

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Determinación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río
Motagua

Trabajo de Graduación en modalidad de tesis presentado por Liliana Michelle
Cáceres Garrido para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Civil

Guatemala
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




Determinación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río
Motagua

Trabajo de Graduación en modalidad de tesis presentado por Liliana Michelle
Cáceres Garrido para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Civil

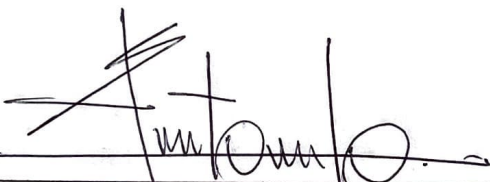
Guatemala
2025


V.o. Bo.

(f) 
(M. Sc. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos)

Tribunal examinador.

(f) 
(M. Sc. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos)

(f) 
(M. Sc. Danilo Antonio Rodríguez Cerón)

(f) 
(M. Sc. Diego Josue Incer Nuñez)

Fecha de aprobación:
(Guatemala, 08 de diciembre de 2025)

Prefacio

Gracias a Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa tan valiosa de mi vida, llena de aprendizajes y desafíos que me ayudaron a crecer y a convertirme en quien soy hoy.

De corazón, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres y abuelitos, por su paciencia, confianza y por todo el esfuerzo que siempre han puesto en apoyarme.

También quiero dar las gracias a mis amigos y compañeros de estudio, por su compañía, por las experiencias compartidas y por la amistad sincera que hizo este camino mucho más ameno.

Y, por supuesto, a todos los docentes y profesionales que compartieron su conocimiento y su tiempo, contribuyendo a que este trabajo fuera posible.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental de este logro y por motivarme a alcanzar esta meta con dedicación y compromiso.

Índice

Índice de cuadros	vi
Índice de ecuaciones	vii
Índice de figuras	viii
Índice de anexos	ix
Resumen	x
Abstract.....	xi
Lista de símbolos	xii
Glosario	xiv
I. Introducción.....	1
II. Justificación	2
III. Objetivos.....	4
A. Objetivo general	4
B. Objetivos específicos.....	4
IV. Marco teórico.....	5
A. Hidrología.....	5
B. Hidrología en Guatemala.....	6
C. Recarga hídrica	9
D. Metodologías para calcular la recarga hídrica	13
E. Fuentes de Recarga.....	24
V. Metodología.....	25
A. Área de estudio	25
B. Selección de metodologías	26
C. Programación.....	26
VI. Análisis de Resultados.....	31
VII. Conclusiones.....	37
VIII. Recomendaciones	38
IX. Bibliografía.....	40
X. Anexos.....	42

Índice de cuadros

Cuadro 1. Distribución global en la Tierra.....	6
Cuadro 2. Recarga hídrica, según pendiente y microrelieve.....	15
Cuadro 3. Recarga hídrica del suelo según su textura.....	15
Cuadro 4. Recarga hídrica según el tipo de roca.....	16
Cuadro 5. Recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.....	16
Cuadro 6. Recarga hídrica de acuerdo con el uso del suelo.....	17
Cuadro 7. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto.....	17
Cuadro 8. Coeficientes por tipo de suelo.....	18
Cuadro 9. Coeficientes de pendiente.....	19
Cuadro 10. Coeficientes del uso de suelo.....	19
Cuadro 11. Comparación de metodologías para la estimación e identificación de la recarga hídrica.....	22

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Zona de recarga.....	14
Ecuación 2. Recarga de acuífero	17
Ecuación 3. Balance Climático.....	18
Ecuación 4. Coeficiente de infiltración	18
Ecuación 5. Recarga hídrica en la India	20
Ecuación 6. Tasa de recarga promedio anual.....	20
Ecuación 7. Valor corregido de temperatura.....	21
Ecuación 8. Conversión del volumen de la precipitación.....	28
Ecuación 9. Conversión del volumen de la evapotranspiración	29

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	5
Figura 2. Vertientes en el territorio guatemalteco	7
Figura 3. Ubicación del río Motagua.....	9
Figura 4. Mapa de la cuenca del río Motagua en territorio guatemalteco	25
Figura 5. Subcuencas de la cuenca del río Motagua	25
Figura 6. Mapa de recarga acuífera promedio anual (mm/año) en la cuenca del río Motagua, obtenido mediante la metodología RAS.....	31
Figura 7. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante la metodología RAS.....	31
Figura 8. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante el método participativo	32
Figura 9 Mapa de la tasa de recarga hídrica promedio anual (mm/año) en la cuenca del río Motagua, obtenida mediante el método empírico de Turc.	34
Figura 10. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante el método empírico de Turc	34
Figura 11. Mapa de la recarga hídrica final de la cuenca Motagua	35

Índice de anexos

Anexo 1. Ponderación según tipo de roca	42
Anexo 2. Ponderación según tipo de suelo.....	43
Anexo 3. Ponderación según uso de suelo	44
Anexo 4. Áreas de las subcuencas.....	45
Anexo 5. Identificación del valor K_v según uso de suelo	46
Anexo 6. Identificación del valor K_{fc} según tipo de suelo	48
Anexo 7. Valores de precipitación y evapotranspiración en millones de m^3 (adaptado de IARNA/URL, 2015)	48
Anexo 8. Mapas de niveles de recarga hídrica de la cuenca del río Motagua.....	48

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo identificar las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, Guatemala, mediante la aplicación e integración de tres metodologías: la metodología RAS, el método empírico de Turc y el método participativo. Cada una de estas permitió estimar, clasificar y representar espacialmente los niveles de recarga hídrica, considerando las condiciones climáticas, edáficas, topográficas y de uso del suelo de la región. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial en la recarga acuífera.

Las zonas con niveles muy altos se concentran principalmente en la región noreste de la cuenca en las subcuencas Motagua Bajo, Teculután-Huité, El Tambor y Las Vacas. Estas áreas presentan características favorables para la infiltración, como suelos permeables, pendientes suaves y mayor precipitación, por lo que se consideran prioritarias para la conservación y gestión sostenible del recurso. En contraste, la región suroeste mostró niveles moderados a bajos de recarga, lo que la hace más vulnerable a la escasez hídrica y requiere una planificación más rigurosa del uso del suelo.

El análisis comparativo entre los métodos aplicados permitió integrar los resultados en un mapa final de recarga hídrica, con una escala de clasificación de 1 a 5, muy bajo a muy alto respectivamente. Siendo 4.67 el valor máximo obtenido, localizado en las subcuencas de Motagua Bajo y Teculután-Huité, mientras que los valores mínimos (1.0–3.0) se registraron principalmente en Suchichul-Belejayá, Pixcayá y El Tambor.

La combinación metodológica demostró ser adecuada al contexto hidrológico guatemalteco y permitió la elaboración de una guía de referencia aplicable a otras regiones del país.

Palabras clave: *recarga hídrica, sostenible, conservación, metodologías, análisis geoespacial.*

Abstract

The present study aimed to identify the areas with the greatest potential for groundwater recharge in the Motagua River basin, Guatemala, through the application and integration of three methodologies: the RAS methodology, the empirical Turc method, and the participatory method. Each of these made it possible to estimate, classify, and spatially represent groundwater recharge levels, considering the climatic, edaphic, topographic, and land-use conditions of the region. The results revealed marked spatial variability in aquifer recharge.

Areas with very high recharge levels are mainly concentrated in the northeastern region of the basin, within the Motagua Bajo, Teculután–Huité, El Tambor, and Las Vacas sub-basins. These areas present favorable characteristics for infiltration, such as permeable soils, gentle slopes, and higher precipitation, and are therefore considered priorities for conservation and sustainable resource management. In contrast, the southwestern region showed moderate to low recharge levels, making it more vulnerable to water scarcity and requiring more rigorous land-use planning.

The comparative analysis of the applied methods allowed the integration of results into a final groundwater recharge map, using a classification scale from 1 to 5, corresponding to very low to very high, respectively. A maximum value of 4.67 was obtained, located in the Motagua Bajo and Teculután–Huité sub-basins, while the minimum values (1.0–3.0) were recorded mainly in Suchichul–Belejayá, Pixcayá, and El Tambor.

The methodological combination proved to be appropriate for the Guatemalan hydrological context and enabled the development of a reference guide applicable to other regions of the country.

Keywords: *groundwater recharge, sustainability, conservation, methodologies, geospatial analysis.*

Lista de símbolos

Símbolo	Significado
A	Área de la subcuenca
ANAM	Asociación Nacional de Municipalidades de Guatemala
BC	Balance climático
C	Coefficiente de infiltración
CIE	Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad (UVG)
CONCYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Cve	Cobertura vegetal
DEM	Modelo digital de elevación
ET	Evapotranspiración
ETreal	Evapotranspiración real
FONACYT	Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (URL)
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
Kfc	Coefficiente del tipo de suelo
Kp	Coefficiente de pendiente
Kv	Coefficiente del uso de suelo
L	Valor corregido de temperatura (Turc)
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
P	Precipitación
QGIS	Quantum Geographic Information System (software SIG)
R	Recarga hídrica
RAS	Recarga acuífera sostenible (metodología)
SIG	Sistema de información geográfica
T	Temperatura media anual
Tr	Tipo de roca
Ts	Tipo de suelo

Us	Uso del suelo
V	Volumen de precipitación
VE	Volumen de evapotranspiración real
ZR	Zona de recarga

Glosario

Término	Definición
Acuífero	Formación geológica que almacena y transmite agua subterránea a través de poros o fisuras.
Balance climático	Diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real; indica la disponibilidad de agua en un área.
Balance hídrico	Relación cuantitativa entre entradas, salidas y almacenamiento de agua en un sistema hidrológico.
Cobertura vegetal	Superficie cubierta por vegetación, la cual influye en la infiltración y la recarga hídrica.
Conductividad hidráulica	Propiedad de un material que mide su capacidad para transmitir agua.
Cuenca hidrográfica	Territorio delimitado por divisorias topográficas donde el agua escurre hacia un río principal o cuerpo de agua.
DEM (modelo digital de elevación)	Representación digital de la topografía terrestre utilizada para análisis hidrológicos.
Edáfico	Relativo a las características físicas, químicas y biológicas del suelo que influyen en los procesos hidrológicos y ambientales.
Escorrentía	Flujo superficial de agua de lluvia sobre el terreno hacia ríos o lagos.
Evapotranspiración (ET)	Pérdida de agua hacia la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas.
Evapotranspiración real (ETreal)	Cantidad de agua efectivamente transferida a la atmósfera considerando la disponibilidad hídrica del suelo.
Geoespacial	Relacionado con el análisis de fenómenos en el espacio geográfico mediante herramientas SIG.

Geología	Ciencia que estudia la composición, estructura y evolución de la Tierra, incluyendo su influencia en la recarga hídrica.
Hidrología	Ciencia que estudia la ocurrencia, distribución, circulación y propiedades del agua en la Tierra.
Infiltración	Proceso mediante el cual el agua de lluvia o superficial penetra en el suelo.
Litología	Estudio y clasificación de las rocas según su composición y características relevantes para la infiltración.
Modelo de álgebra de mapas	Operación en SIG que combina capas ráster aplicando fórmulas matemáticas para generar resultados.
Pendiente	Inclinación del terreno respecto a la horizontal, factor clave en la escorrentía e infiltración.
Recarga hídrica	Incorporación de agua superficial al subsuelo y acuíferos mediante infiltración.
Subcuenca	División interna de una cuenca hidrográfica que drena hacia un afluente del río principal.
Textura del suelo	Proporción relativa de arena, limo y arcilla que determina la infiltración.
Topografía	Estudio de la forma y características del relieve de un terreno.
Uso del suelo	Clasificación del territorio según actividades humanas o naturales (agricultura, bosque, urbano, etc.).
Vertiente hidrográfica	Conjunto de cuencas cuyos ríos drenan hacia un mismo mar o cuerpo receptor.
Zona de recarga hídrica	Área geográfica donde el agua superficial (lluvia o escorrentía) se infiltra hacia el subsuelo, contribuyendo a la alimentación de acuíferos.

I. Introducción

En Guatemala, a pesar de contar con una amplia disponibilidad de recursos hídricos, el manejo inadecuado y la escasa conservación de estos representan una amenaza para su sostenibilidad. Particularmente a lo largo de la cuenca del río Motagua —la más extensa del país— se ha observado una marcada sobreexplotación del manto freático.

Ante esta problemática, las zonas de recarga hídrica han cobrado relevancia como elementos estratégicos en la gestión sostenible del agua subterránea. No obstante, no existe una delimitación actualizada de las zonas de recarga dentro de la cuenca del Motagua basada metodologías aplicables al país. En respuesta a esta problemática se recurrió a la comparación de tres metodologías de cálculo de recarga hídrica, con el propósito de generar una guía de referencia que recopile y sistematice la información fundamental para la delimitación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua y mapas temáticos elaborados con el software QGIS, en donde se realizó álgebra de mapas en capas ráster para diferenciar materiales geológicos, estratos y tipos de vegetación presentes en la cuenca del río Motagua.

Esto busca brindar una base sólida y práctica para la toma de decisiones informadas en torno a la conservación del recurso hídrico.

II. Justificación

Morales Samayoa (2013) señala que toda civilización depende de la disponibilidad del agua para el bienestar común, ya que este recurso es fundamental para el consumo humano, el uso doméstico, las actividades agrícolas e industriales, la producción de energía y el transporte, entre otros. Esta dependencia ha condicionado históricamente el asentamiento humano en las proximidades de cuerpos de agua como ríos y lagos.

Sin embargo, diversos factores técnicos, económicos y sociales han impulsado a los usuarios a aprovechar de forma intensiva, en primer lugar, los manantiales, posteriormente las aguas superficiales y, finalmente, las aguas subterráneas. En el valle de Guatemala, esta dinámica se ha intensificado debido a la creciente divergencia entre la oferta y la demanda hídrica, lo que ha provocado que distintos sectores recurran a la explotación privada de las aguas subterráneas (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], 1978).

El acelerado crecimiento poblacional y los procesos asociados de urbanización, cambio de uso del suelo y deforestación han incrementado de manera significativa la demanda de agua, ocasionando la sobreexplotación del manto freático a lo largo de la cuenca del río Motagua, la más extensa de Guatemala. De acuerdo con Paiz (2021), los registros de monitoreo realizados por las autoridades evidencian un descenso del nivel freático de hasta 400 m en los últimos 40 años, lo que representa una amenaza directa para la disponibilidad futura del recurso hídrico subterráneo.

Ante este escenario, las zonas de recarga hídrica —definidas como áreas donde la precipitación y las aguas superficiales se concentran y una fracción se infiltra en el suelo mientras el excedente escurre hacia ríos y quebradas (ANAM Guatemala, 2019)— han adquirido relevancia como un componente clave para mitigar la sobreexplotación de los acuíferos. No obstante, en muchos contextos centroamericanos, el deterioro de estas zonas se ve agravado por la falta de información precisa sobre su ubicación y por la ausencia de metodologías prácticas que puedan ser aplicadas por los actores locales responsables de la gestión de las cuencas.

Diversos estudios desarrollados en la región centroamericana han demostrado la efectividad de metodologías orientadas a la identificación de zonas de recarga hídrica, especialmente en contextos donde la información hidrogeológica es limitada. Un ejemplo representativo es el estudio realizado en el cantón central de Cartago, Costa Rica, donde se implementó un proceso integral para la delimitación de áreas de recarga acuífera y zonas de protección de manantiales, integrando criterios técnicos con la participación institucional y comunitaria, con el fin de garantizar la calidad y cantidad del agua para el abastecimiento local (Guzmán Monge y Díaz Hernández, 2007).

De manera complementaria, la “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica”, aplicada en la subcuenca del río Jucuapa en Nicaragua (Matus, Faustino y Jiménez, 2008) evidenció que la combinación del conocimiento técnico-científico con el conocimiento local, apoyada en herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite delimitar de forma efectiva zonas potenciales de recarga mediante metodologías de bajo costo y fácil aplicación.

Estos antecedentes regionales respaldan el enfoque metodológico adoptado en el presente estudio para la cuenca del río Motagua, dada la similitud de las condiciones climáticas y los desafíos asociados a la gestión del recurso hídrico en Guatemala. En este contexto, la identificación y representación cartográfica de las zonas con potencial de recarga hídrica, apoyada en herramientas SIG y en una guía de referencia técnica, constituye un insumo fundamental para fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia, orientar acciones de planificación, conservación y manejo del territorio, y contribuir a la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo en el país.

III. Objetivos

A. Objetivo general

Determinar las zonas de recarga hídrica sobre la cuenca del río Motagua a partir de la comparación de tres metodologías.

B. Objetivos específicos

- Comparar tres metodologías de recarga hídrica comúnmente utilizadas, con el fin de generar una guía de referencia.
- Implementar la guía de referencia para la determinación de zonas de recarga hídrica.
- Elaborar mapas de las potenciales zonas de recarga hídrica de la cuenca del río Motagua.

IV. Marco teórico

A. Hidrología

La palabra hidrología etimológicamente proviene de las raíces griegas “hydor” y “logos” que significa agua y estudio respectivamente. En otras palabras, se puede concluir que la hidrología es la ciencia que estudia el agua. Gámez (2009) afirma que “hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos” (p.8).

Gracias a la orientación que se tome para su análisis, se ve necesario el uso de otras disciplinas como: meteorología y climatología, ecología, matemáticas, estadística, geografía, física, entre otras; así mismo es auxiliada por la fointerpretación, cartografía, computación, etc.

1. Ciclo hidrológico

En la Tierra, el agua se concentra en la hidrosfera, la cual abarca desde parte de la atmósfera hasta un kilómetro bajo la corteza terrestre. Dentro de este espacio, el agua circula mediante el ciclo hidrológico, un proceso constante de intercambio entre la atmósfera, la superficie y el subsuelo. Este ciclo se manifiesta a través de la evaporación, la precipitación y los flujos de escorrentía superficial y subterránea, los cuales representan entradas y salidas de agua en el sistema.

Figura 1. Ciclo hidrológico



Nota: La imagen representa el ciclo hidrológico, así como sus etapas. Tomado de: Hidro-precip-rominakaren13. (2011, 19 de mayo).

La principal fuente de agua que alimenta este ciclo es la precipitación. Su infiltración en el suelo depende de factores como la intensidad de la lluvia, la condición física del terreno, la pendiente y la cobertura vegetal. Parte de esta agua es absorbida por las plantas y regresa a la atmósfera mediante la transpiración; otra parte se evapora o se infiltra hacia los acuíferos, que en realidad no son lagos subterráneos, sino formaciones donde el agua ocupa espacios porosos entre rocas y sedimentos. El agua que no se infiltra escurre hacia ríos, lagos y finalmente hacia el océano.

Aunque el volumen total de agua en el planeta permanece constante, su distribución es desigual e irregular. Factores climáticos provocan periodos de abundancia y escasez en diferentes regiones, lo que ha motivado el desarrollo de disciplinas científicas dedicadas a comprender el ciclo del agua y proponer medidas para su conservación y uso sostenible (Maldonado Cáceres, 2018).

2. Distribución del agua en la Tierra

El agua cubre aproximadamente un 65 % de la superficie de la Tierra, ocupando un volumen aproximado de 1400 km³. Siendo que el 97.25 % se encuentra en océanos en forma de agua marina, el 2.7 % se localiza en los continentes o atmósfera y el 0.001 % restante se ubica en el resto de los depósitos.

Cuadro 1. Distribución global en la Tierra

Depósito	%
Océanos	97
Capas de hielo y glaciares	2.061
Aguas subterráneas	0.903
Lagos	0.00783
Ríos	0.00018
Pantanos	0.00099
Otros	0.027
Total	100

Nota: El Cuadro 1 presenta la distribución del agua global en la Tierra en porcentaje elaboración propia con datos de US Geological Survey (como se cita en Pardo, 2013).

B. Hidrología en Guatemala

Guatemala se ubica en el centro geográfico del continente americano. Es un país montañoso de posición geográfica intertropical que goza de un clima cálido, con variaciones en diferentes regiones y microclimas locales, los cuales están determinados en función del relieve montañoso del lugar y su distancia al mar. Gracias a su orografía, el país se divide en tres vertientes de escurrimiento superficial: Pacífico, Caribe y Golfo de México (Marinos et al., s.f).

La precipitación promedio anual en Guatemala es de aproximadamente 2000 mm, con variaciones que van desde los 700 mm en las regiones secas hasta los 5000 mm en la zona norte y occidente. El escurrimiento superficial varía entre 1,760 y 3,190 m³/s (55.6 a 100.6 mil millones de metros cúbicos anuales). Este caudal está mayormente concentrado en los cuatro meses más secos y tiene una distribución más uniforme en las regiones más húmedas. (Universidad Rafael Landívar, IARNA y FCAA, 2005).

Figura 2. Vertientes en el territorio guatemalteco



Nota: La imagen representa de forma gráfica las 3 vertientes en las cuales se divide el país —Vertiente del Mar Caribe, Vertiente del Golfo de México, Vertiente del Pacífico—, así como las 38 cuencas que conforman dichas vertientes. Tomado de Funcagua (2024)

1. Vertiente del Pacífico

Ocupa el 2 % del área total del territorio guatemalteco (239990 km²), cuenta con pendientes pronunciadas en las partes altas y muy leves en la parte baja de la misma, volviéndola proclive a inundaciones.

Cuenta con ríos de longitudes relativamente cortas presentando un largo en promedio de 110 km y un origen promedio de 3000 msnm. Se caracteriza por el acarreo de materiales por parte de los ríos que la conforman debido a las grandes pendientes desde la Sierra Madre hasta el litoral. Asu vez, presenta períodos de precipitación de gran intensidad hasta registrar una precipitación anual media de 2,200 mm (Aguilar, 2022)

2. Vertiente del golfo de México

Corresponde al conjunto de ríos y cuencas hidrográficas de Guatemala que drenan sus aguas hacia el norte, específicamente hacia el río Usumacinta en territorio mexicano, para finalmente desembocar en el golfo de México. Esta vertiente se localiza en la región noroccidental del país y abarca principalmente los departamentos de Huehuetenango, Quiché y Petén. Sus ríos son de gran extensión y caudal, pues recorren tanto áreas montañosas como zonas de llanura antes de unirse a los sistemas fluviales mayores. Entre los cursos de agua más representativos se encuentran los ríos Seleguá, Nentón y Pasión.

3. Vertiente del mar Caribe

Es la vertiente más grande de Guatemala, ocupando un aproximado del 40 % del territorio nacional, cuenta con longitudes de ríos grandes y afluentes caudalosos. El 55 % de su territorio está compuesto por cuencas de repercusión internacional, cuyo flujo se dirige en un 47.5 % hacia México, 7 % hacia El Salvador, 6 % hacia Belice y 0.5 % hacia Honduras. Los ríos más caudalosos son el Usumacinta (1,800 m³/s), Motagua (240 m³/s), Polochic (161 m³/s), Sarstún (172 m³/s) e Ixcán (165 m³/s), y en la costa sur, el río Suchiate (28 m³/s) es el de mayor caudal (García, 2015).

a) *Río Motagua*

El río Motagua es la cuenca interna más extensa en el territorio guatemalteco, a su vez que es una cuenca compartida con Honduras; con un área de 17 670 km², el 85.95 % drena dentro del territorio de Guatemala mientras que el restante 14.04 % inicia su drenaje dentro del territorio de Honduras. Ubicada entre las coordenadas 88°15' y 90°15' longitud Oeste y 14°30' y 15°50' latitud Norte (Colectivo MadreSelva, 2019).

Figura 3. Ubicación del río Motagua



Nota: La imagen representa la ubicación y los departamentos nacionales y de Honduras que forman parte de la Cuenca Río Motagua. Fotografía recuperada de Stokstad, E. (2020, enero 7). *The prickly case of a cross-border garbage chute*. Hakai Magazine.

Fisiografía

La cuenca del Río Motagua contiene parte de cuatro de las ocho regiones fisiográficas de Guatemala.

Tierras altas cristalinas

El patrón de drenaje está controlado por las fallas existentes, lo cual caracteriza los cursos de los ríos Cuilco, Chixoy o Negro y Motagua. El material geológico está constituido por rocas metamórficas y plutónicas —esquistos, gneiss, mármoles, serpentinas y granitos—. Forman parte de los sistemas de cordilleras, que se desarrollan desde Chiapas en México, hasta las islas del Golfo de Honduras (Colectivo MadreSelva, 2019).

C. Recarga hídrica

Álvarez y Lugo (2014) definen la recarga hídrica como el proceso mediante el cual el agua proveniente del exterior se incorpora a un acuífero. Este fenómeno ocurre cuando el excedente de agua, tras superar la evapotranspiración, se infiltra en el suelo, drena desde la zona radicular y continúa su desplazamiento descendente a través de la zona no saturada hasta alcanzar la capa freática.

1. Tipos de recarga

La Recarga puede darse de forma natural debido a la precipitación, agua superficial —ríos, lagos— o bien por medio de transferencia de otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; sin embargo, esta también puede darse de forma artificial por medio de irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos. Sin embargo, es posible clasificar las fuentes de recarga (Otálvaro et al., 2019).

- a. Recarga directa o recarga difusa
- b. Recarga concentrada o indirecta
- c. Flujos laterales
- d. Retorno de riegos
- e. Recarga urbana

2. Factores que determinan la recarga hídrica

De acuerdo con ANAM GUATEMALA, 2019 La zona de recarga hídrica tiene condiciones climatológicas, geológicas y topográficas que generan una alta capacidad de infiltración, de esta forma el agua llega a los acuíferos o depósito de agua subterránea, por medio de la infiltración para luego aflorar en las vertientes. Entre los factores se encuentran:

Clima

Presenta un papel muy importante en la recarga, porque de las condiciones climáticas locales dependen la precipitación, evaporación y evapotranspiración que regulan el ciclo hidrológico. Si estas condiciones presentan comportamientos muy marcados a lo largo del territorio, se presentan zonas que contribuirán en mayor o menor medida a la recarga (Lux, 2016).

Evapotranspiración

Es un proceso combinado de evaporación en la superficie del planeta y de transpiración de la vegetación. En este término se incluye el agua transpirada a la atmósfera por medio de las plantas y la evaporación de la lluvia que es interceptada por las hojas árboles y plantas. Este proceso es cambiante debido al tipo y densidad de la vegetación, humedad, disponibilidad de energía y viento en la superficie (FUNIBER, s.f).

La medición de la evapotranspiración es un proceso complejo y difícil de ejecutar que puede incorporar una marcada desviación de los resultados. Sin embargo, hay métodos los cuales son utilizados que proporcionan resultados aceptables:

- a. Método de la sonda de neutrones
- b. Lisímetros
- c. Ecuación del balance de masa de agua de Turc

Precipitación

La condensación del vapor — agua que ha escapado de la superficie terrestre hacia la atmósfera— origina las precipitaciones, que pueden ocurrir de varias formas: nieve, niebla, granizo, rocío y lluvia. Siendo la nieve y la lluvia los más importantes (FUNIBER, s.f).

Suelo

Las características del suelo que influyen en la recarga son: la textura, densidad, grado de saturación y capacidad de infiltración; esto debido a que los suelos impermeables o compactos dificultan la infiltración caso contrario a los suelos permeables que la facilitan.

Según la Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA, 2000), la clasificación de los suelos se basa en criterios específicos de textura, composición y propiedades químicas.

- **Alfisol:** suelos con un horizonte interno que tiene altos contenidos de arcilla con relación a los horizontes superficiales, además presentan alta saturación de bases (mayor de 35%). Los alfisoles son suelos maduros con un grado de desarrollo avanzado, pero que todavía tienen un alto contenido de bases en los horizontes interiores. Generalmente son suelos con buen potencial de fertilidad.
- **Andisol:** suelos desarrollados sobre ceniza volcánica que tienen baja densidad aparente (menor de 0.9 g/cc) y con altos contenidos de alófono. Generalmente son suelos con alto potencial de fertilidad y adecuadas características físicas para su manejo. En condiciones de fuerte pendiente tienden a erosionarse con facilidad. Una característica de los andisoles es su alta retención de fosfatos (arriba del 85%), la cual es una limitante para el manejo, por lo que se debe considerar en los planes de fertilidad cuando se someten a actividades de producción agrícola.
- **Entisol:** suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como, el relieve (el cual incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, las condiciones como el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (Cimas de montañas y volcanes) o en partes planas.
- **Histosol:** suelos que con altos contenidos de sustancias orgánicas (suelos orgánicos), generalmente tienen más de 12 % de carbono orgánico. Se forman bajo condiciones de saturación de agua. Las condiciones para que se formen estos suelos en el país (saturación de agua y fuertes aportes de materiales orgánicos), están dadas en lugares de abundante vegetación y pantanosas, por lo que generalmente se pueden considerar para áreas de reserva de la biodiversidad que se presentan en los ecosistemas de los que forman parte.

- **Inceptisol:** suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero son más desarrollados que los entisoles. Son suelos muy abundantes en diferentes condiciones de clima y materiales originarios.
- **Mollisol:** suelos con un horizonte superficial grueso, oscuro, generalmente con alto contenido de materia orgánica y una alta saturación de bases (mayor del 50%) . Son suelos bastante fértiles, y por sus características físicas y químicas, generalmente son muy buenos suelos para la producción agrícola. Es común encontrarlos en relieves planos o casi planos, lo que favorece su mecanización. Sin embargo, se debe de planificar su aprovechamiento, para que este sea sostenible.
- **Ultisol:** estos son suelos que normalmente presentan una elevada alteración de sus materiales minerales. Presentan un horizonte interior con alto contenido de arcilla (argílico) el cual tiene baja saturación bases (menor de 35%). La mayor parte de los ultisoles son suelos pobres debido al lavado que han sufrido. Por sus niveles de productividad que son muy bajos, demandan tecnologías no convencionales y ser manejados en forma extensiva, pero no con cultivos o actividades productivas exigentes en nutrientes.
- **Vertisol:** suelos con altos contenidos de arcilla expandible desde la superficie. Se caracterizan por formar grietas profundas en todo el perfil, las cuales se observan principalmente en la época seca. Cuando están húmedos o mojados se vuelven muy plásticos. Generalmente, son suelos con alto potencial de fertilidad en la producción agrícola, pero tienen limitantes en lo que se refiere a su labranza, porque cuando están secos son muy duros y como ya se indicó, cuando están mojados son muy plásticos. Se recomienda manejar el contenido de humedad para controlar las limitantes físicas mencionadas. Casi siempre ocupan relieves planos o bien de suave a moderadamente ondulados.

Pendiente

Es la relación entre el cambio en distancia horizontal de dos puntos en el terreno y su respectivo cambio en distancia vertical, de esta forma es posible determinar el grado de inclinación del terreno. Para la recarga hídrica es necesario que el agua proveniente de la precipitación se mantenga el mayor tiempo posible sobre la superficie del suelo para iniciar el proceso de infiltración; por lo que existe una relación inversamente proporcional entre la pendiente y la recarga hídrica del lugar (Lux, 2016).

Cobertura vegetal

La cobertura es diversa y puede estar conformada por praderas o páramos, bosques de diferentes tipos de árboles y arbustos y cultivos o bien la combinación de todos estos.

Presenta un factor importante para la recarga acuífera, al regular la infiltración hacia las zonas saturadas del subsuelo; siendo que en sistemas altoandinos que se caracterizan por pendientes pronunciadas, patrones pluviométricos estacionales y un estrés hídrico creciente, se vuelve aún más relevante gracias a que aumenta la recarga efectiva (Cutipa, et al., 2025).

D. Metodologías para calcular la recarga hídrica

1. Método directo

Las medidas directas tienen la ventaja de ofrecer un balance de masa implícito, lo que proporciona resultados precisos. Sin embargo, son métodos costosos y solo proporcionan datos puntuales. Generalmente, las mediciones directas se limitan a la recarga producida por la precipitación y las pérdidas de los canales, las cuales se miden con alguna frecuencia.

El único método práctico para medir directamente el flujo de recarga es el lisímetro. Este dispositivo consiste en tanques o bloques instrumentados, que pueden contener suelo alterado o inalterado, con o sin vegetación. El flujo de agua que circula a través del suelo en el lisímetro se mide con precisión. El bloque de suelo está aislado hidrológicamente del suelo circundante, pero sigue siendo representativo ya que tiene la misma vegetación y está expuesto a las mismas condiciones climáticas (Otálvaro et al., 2019).

2. Medidores de infiltración

Los medidores de infiltración se utilizan para medir la recarga en canales de riego y ríos. El método consiste en una "campana de filtración" o cilindro que se inserta en el sedimento en la base de un canal. Junto al cilindro, se coloca un tanque de agua. La tasa de infiltración del agua se determina observando los cambios en el volumen del agua en el tanque. El cilindro se inserta en el suelo mientras se deja abierta una manguera para permitir la salida del aire y el exceso de agua. Además, una bolsa plástica flotante se mantiene bajo la superficie, conectada a la manguera (Otálvaro et al., 2019).

3. Aproximaciones de Darcy

La estimación de la recarga utilizando la técnica de Darcy se basa en el cálculo de las cabezas hidráulicas mediante las ecuaciones de Richards (para la zona no saturada) y Boussinesq (para la zona saturada). Para ello, se utilizan datos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y contenido de humedad, aplicando técnicas analíticas o modelos numéricos dependiendo de la complejidad del campo o de las simplificaciones asumidas (Otálvaro et al., 2019).

A partir de las cabezas hidráulicas, se determina la velocidad de filtración o flujo de agua, lo que permite calcular el caudal. Con el caudal, se realiza un balance de masa que permite

conocer el volumen de agua que entra y sale del sistema, y estimar el volumen de agua almacenado, el cual representa la recarga. La ley de Darcy relaciona la velocidad de filtración (q) con la conductividad hidráulica (k) y el gradiente hidráulico (Otálvaro et al., 2019).

4. Método participativo

Intenta conjugar el conocimiento técnico y científico junto a la experiencia local, para la identificación de zonas de recarga hídrica se basa en el análisis y evaluación práctica de 5 elementos —pendiente y micro relieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de suelo— que influyen en la posibilidad de que ocurra la recarga hídrica (Matus et al., 2008).

Ecuación 1. Zona de recarga

$$ZR = [0.27(pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.25(Cve) + 0.13(Us)]$$

En donde:

$$\begin{aligned} ZR &= \text{Zona de Recarga} \\ pend &= \text{Pendiente y micro relieve} \\ Ts &= \text{Tipo de suelo} \\ Tr &= \text{Tipo de roca} \\ Cve &= \text{Cobertura vegetal} \\ Us &= \text{Uso de suelo} \end{aligned}$$

Los Cuadros 2, 3, 4, 5 y 6 presentan los criterios y ponderaciones utilizados en el método participativo para la identificación de zonas con potencial de recarga hídrica. Estas Cuadros permiten evaluar de manera sistemática variables físicas y antrópicas que influyen directamente en la infiltración del agua, tales como la pendiente y microrelieve, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Las ponderaciones asignadas a cada categoría, con valores entre 1 y 5, cumplen una función clave dentro del modelo, ya que son utilizadas posteriormente en la ecuación de zona de recarga propuesta por Matus et al., (2008) Ecuación 1. A través de dicha ecuación, los valores ponderados de cada variable son integrados para obtener un valor final de recarga, el cual permite clasificar el área de estudio en distintos niveles de potencial de recarga hídrica (muy alta, alta, moderada, baja y muy baja) como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 2. Recarga hídrica, según pendiente y microrelieve

Microrelieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo plano a casi plano, con o sin rugosidad	0-6	Muy alta	5
Suelo moderadamente ondulado/cóncavo	6-15	Alta	4
Suelo ondulado/cóncavo	15-45	Moderada	3
Suelo escarpado	45-65	Baja	2
Suelo fuertemente escarpado	>65	Muy baja	1

Nota. El Cuadro 2 presenta una ponderación (1 a 5) de la posibilidad de la recarga hídrica según pendiente y micro relieve del lugar (Matus et al., 2008).

Cuadro 3. Recarga hídrica del suelo según su textura

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo franco arenoso a arenoso, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios y muy rápida capacidad de infiltración (mayor de 25 cm/h)	Muy alta	5
Suelo franco, con partes iguales de arena, limo y arcilla y rápida capacidad de infiltración (12.7-25 cm/h)	Alta	4
Suelo franco limoso, con partículas de tamaño medio a finas y moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2-12.7 cm/h)	Moderada	3
Suelo franco arcilloso, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación y lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0.13-2 cm/h)	Baja	2
Suelo arcilloso, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menor de 0.13 cm/h)	Muy baja	1

Nota. El Cuadro 3 presenta una ponderación (1 a 5) de la capacidad de recarga hídrica del suelo según textura del tipo de suelo presentado en el lugar (Matus et al., 2008).

Cuadro 4. Recarga hídrica según el tipo de roca

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; p.e., arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados, con poca cementación; p.e., arena fina, arenisca	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular interconexión de poros	Moderada	3
Rocas poco permeables, algo dura, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; p.e., grava combinada con arcilla	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas	Muy baja	1

Nota. El Cuadro 4 presenta una ponderación (1 a 5) de la capacidad de recarga hídrica según el tipo de roca presentado en el lugar de estudio (Matus et al., 2008).

Cuadro 5. Recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal

Porcentaje	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80%	Muy alta	5
70-80%	Alta	4
50-70%	Moderada	3
30-50%	Baja	2
<30%	Muy baja	1

Nota. El Cuadro 5 presenta una ponderación (1 a 5) de la capacidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal (Matus et al., 2008).

Cuadro 6. Recarga hídrica de acuerdo con el uso del suelo

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque que presentan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo	Regular	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios, con manejo intensivo	Muy baja	1

Nota. El Cuadro 6 presenta una ponderación (1 a 5) de la posibilidad de recarga hídrica de acuerdo con el uso del suelo (Matus et al., 2008).

Cuadro 7. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto

Posibilidad de recarga	Rango
Muy alta	4.1-5
Alta	3.5-4.09
Moderada	2.6-3.49
Baja	2-2.59
Muy baja	1-1.99

Nota. El Cuadro 7 presenta el potencial de recarga hídrica según el rango de los resultados obtenidos del modelo propuesto (Matus et al., 2008).

5. Metodología RAS

De acuerdo con Junker (2005), la metodología RAS es un método científico, teórico para elaborar el mapa de la recarga de agua subterránea, que sirve como una herramienta para la toma de decisiones; este método toma en cuenta diversos factores:

- Clima
- Geología en conjuntos con la vegetación
- Topografía y uso de suelos

Ecuación 2. Recarga de acuífero

$$R = BC * C$$

Donde:

$$C = \text{Coeficiente de infiltración}$$
$$BC = \text{Balance Climático}$$

Ecuación 3. Balance Climático

$$BC = P - ET_{real}$$

Donde:

$$P = \text{Precipitación (mm)}$$
$$ET_{real} = \text{Evapotranspiración real (mm)}$$

Ecuación 4. Coeficiente de infiltración

$$C = kfc + kp + kv$$

Donde:

$$kfc = \text{Coeficiente del tipo de suelo}$$
$$kp = \text{Coeficiente de pendiente}$$
$$kv = \text{Coeficiente del uso del suelo}$$

El balance climático permite estimar la disponibilidad de agua en el área de estudio a partir de la precipitación y la evapotranspiración real. Adicionalmente, la metodología RAS incorpora factores físicos del territorio, como el tipo de suelo y la pendiente, los cuales influyen directamente en la infiltración y la escorrentía superficial (Figueredo, J., 2019).

Los Cuadros 8,9 y 10 que se presentan a continuación establecen los coeficientes asociados al tipo de suelo (Kfc), la pendiente (Kp) y el uso del suelo (Kv), respectivamente, permitiendo representar cuantitativamente la influencia de estas variables sobre los procesos hidrológicos. Dichas ponderaciones se utilizan en el cálculo del coeficiente de infiltración (C), obtenido mediante la suma de los coeficientes parciales, el cual integra las condiciones físicas y antrópicas que controlan la recarga hídrica.

Cuadro 8. Coeficientes por tipo de suelo

Tipo de suelo	Kfc
Suelos arcillosos, latosales de altura, zonas urbanas, suelos o rocas compactas e impermeables	0.10
Suelos de combinación de limo y arcilla, litosole y regosole de valle, zonas con fallas tectónicas	0.15
Suelos arenosos, recientes, suelos de cause de ríos, suelos no muy compactos, zonas de muchas fallas	0.20

Nota. El Cuadro 8 presenta los coeficientes *Kfc* según el tipo de suelo encontrado en el lugar (Junker 2005).

Cuadro 9. Coeficientes de pendiente

Pendiente	Kp
Muy plano	0.40
1-15%	0.15
15-30%	0.10
30-50%	0.07
50-70%	0.05
>70%	0.01

Nota. El Cuadro 9 presenta los coeficientes *pc* según el porcentaje de pendiente (Junker 2005).

Cuadro 10. Coeficientes del uso de suelo

Uso del suelo	Kv
Vegetación espinosa	0.30
Cultivo de piña	0.30
Lava reciente	0.20
Árboles frutales	0.20
Bosque de galería	0.20
Bosque latifoliado	0.20
Plantaciones de bosques monoespecíficos	0.20
Sistemas agroforestales	0.20
Vegetación arbustiva baja	0.20
Bosques de café	0.19
Platanales y Bananeras	0.18
Tejido Urbano	0.18
Zonas comerciales	0.18
Aeropuertos	0.18
Hortalizas	0.15
Cultivos anuales	0.15
Bosque de coníferas	0.15
Tierras sin bosque	0.15
Zonas verdes urbana	0.15
Palmeras	0.15
Pastos cultivados	0.10
Caña de azúcar	0.10
Granos básicos	0.10
Zonas urbanas discontinuas	0.10
Playa, Dunas y Arena	0.07

Praderas pantanosas	0.05
Salinera	0.05
Lagos, lagunas	0.00

Nota. El Cuadro 10 presenta los coeficientes K_v según el uso del suelo (Junker 2005).

6. Métodos empíricos

El texto describe las técnicas empíricas para estimar la recarga hídrica, las cuales correlacionan la recarga (R) con variables fácilmente medibles como la precipitación (P), la temperatura y la elevación, entre otras. Son útiles para extrapolar datos en el tiempo o en áreas geográficamente similares, estudios preliminares y zonas con subexplotación de acuíferos.

Sin embargo, presentan limitaciones importantes: no consideran la hidrogeología del área (permeabilidad del terreno, profundidad del nivel freático), dependen de constantes empíricas válidas solo para zonas específicas, no reflejan la dinámica real del sistema ni el impacto de la explotación de agua subterránea, y generan resultados inconsistentes al depender únicamente de la precipitación actual sin considerar condiciones previas. Por estas razones, se consideran modelos de “caja negra” con validez limitada (Otalvaro et al., 2019).

a) *Cheeturvedi*

Propone una fórmula para estimar la recarga en India que no preserva la dimensionalidad. Esta tiene la particularidad que la precipitación no puede ser menor a 380 mm/año.

Ecuación 5. Recarga hídrica en la India

$$r = 50.8 * \left(\frac{p}{25.4} - 15 \right)^{0.4}$$

Donde:

$$r = \text{recarga (mm/año)}$$

$$p = \text{precipitación (mm/año)}$$

b) *Turc*

Propone una fórmula en donde se incluye la precipitación y la temperatura media anual.

Ecuación 6. Tasa de recarga promedio anual

$$r = p * \left(1 \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right)$$

Donde:

$$p = \text{precipitación (mm/año)}$$
$$L = \text{valor corregido de temperatura } ^\circ\text{C}$$

Ecuación 7. Valor corregido de temperatura

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

Donde:

$$T = \text{temperatura media anual } ^\circ\text{C}$$

A continuación, se presenta un Cuadro comparativo que sintetiza las principales metodologías utilizadas para la estimación y delimitación de zonas de recarga hídrica, destacando sus fundamentos conceptuales, variables consideradas, requerimientos de información y principales alcances. Este tipo de comparación permite identificar las diferencias metodológicas entre los enfoques directos, empíricos y físico-espaciales, así como reconocer sus respectivas fortalezas y limitaciones en la evaluación del proceso de recarga hídrica.

Cuadro 11. Comparación de metodologías para la estimación e identificación de la recarga hídrica

Metodología	Tipo de enfoque	VARIABLES consideradas	Tipo de resultado	Ventajas	Limitaciones	Origen y aplicaciones documentadas
Método directo (lisímetros)	Medición directa en campo	Precipitación, infiltración real, humedad del suelo	Recarga puntual medida directamente	Alta precisión; balance de masa implícito	Alto costo; datos puntuales; difícil extrapolación espacial	Desarrollado y aplicado principalmente en Europa y Norteamérica; usado en estudios experimentales de suelos agrícolas y forestales
Medidores de infiltración	Medición directa local	Infiltración en ríos y canales	Infiltración puntual	Sencillo; útil en cauces	Representatividad espacial limitada	Aplicado en sistemas de riego y ríos en EE. UU., Europa y América Latina
Aproximaciones de Darcy	Analítico-físico	Conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, humedad	Recarga cuantitativa	Base física sólida	Requiere alta densidad de datos	Usado en estudios hidrogeológicos detallados en acuíferos de Europa, EE. UU. y Asia

Método participativo (CATIE)	Multicriterio participativo	Pendiente, suelo, roca, cobertura vegetal, uso del suelo	Índice de potencial de recarga (1–5)	Integra conocimiento local; bajo costo	Subjetividad; resultados relativos	Desarrollado por CATIE; aplicado en Nicaragua (subcuenca del río Jucuapa)
Metodología RAS	Multicriterio cuantitativo–espacial	Precipitación, evapotranspiración, suelo, pendiente, uso del suelo	Mapa de recarga hídrica	Integra clima y características físicas	Dependiente de calidad de capas SIG	Propuesta por Junker (2005); aplicada en El Salvador especialmente en estudios de planificación territorial
Chaturvedi	Empírico	Precipitación	Recarga anual (mm/año)	Fácil aplicación	Validez limitada; condiciones específicas	Desarrollado y aplicado en India para acuíferos someros
Turc	Empírico–climático	Precipitación, temperatura media anual	Tasa de recarga promedio anual	Ampliamente utilizado; sencillo	No incorpora variables geológicas	Desarrollado en Europa; aplicado en Europa, África y América Latina en estudios regionales

Fuente: Elaboración propia con base en Otálvaro et al., (2019), Matus et al., (2008), Junker (2005) y Guzmán Monge y Díaz Hernández (2007)

E. Fuentes de Recarga

En zonas urbanas, las fuentes y vías de recarga son más complejas que en áreas rurales debido a la combinación de infraestructuras superficiales como edificios y carreteras, y las obras de drenaje que alteran las vías de infiltración. Aunque parte de la recarga directa se pierde, puede haber contribuciones adicionales provenientes de sistemas de drenaje de aguas pluviales, fugas en redes de distribución de agua y alcantarillado, que alimentan las reservas subterráneas. Además, áreas como parques, jardines y calles sin drenaje de aguas lluvias también contribuyen a la recarga.

La urbanización introduce nuevas fuentes de recarga como el goteo de tanques sépticos, alcantarillas, acueductos, sobre irrigación de jardines y escorrentía de tormentas. En ciudades sin alcantarillado, la infiltración de agua de tanques sépticos y letrinas es la principal vía de recarga. En aquellas con sistemas de alcantarillado, gran parte del agua importada se exporta, impidiendo su recarga directa.

Las fugas en redes de acueducto son más significativas que en alcantarillado, con tasas de goteo comunes del 20-25 %, e incluso superiores al 50 %. En áreas húmedas, estas fugas pueden equilibrar las pérdidas de recarga por precipitación debido a la urbanización, pero en zonas áridas y semiáridas, la recarga por goteo siempre superará la recarga por precipitación (Otálvaro et al., 2019).

V. Metodología

A. Área de estudio

La investigación se realizó en parte del territorio guatemalteco que comprende la cuenca río Motagua, conformado por las microcuencas Grande, Teculután Huité, Motagua Bajo, El Tambor, Chiacús-Uyús, Las Vacas, Suchicul-Belejejá, Pixcayá y Motagua alto.

Figura 4. Mapa de la cuenca del río Motagua en territorio guatemalteco



Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 muestra la ubicación de la cuenca del río Motagua dentro del territorio guatemalteco. La cuenca se resalta en color rojo permitiendo identificar su extensión espacial.

Figura 5. Subcuencas de la cuenca del río Motagua



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se identifican las subcuencas que conforman la cuenca del río Motagua, con una etiqueta, para una delimitación más detallada.

B. Selección de metodologías

Se llevó a cabo una comparación entre distintas metodologías previamente documentadas, considerando criterios como la disponibilidad de datos, la factibilidad técnica y el tiempo de ejecución, con el objetivo de seleccionar aquellas más apropiadas para el contexto guatemalteco. A partir de este análisis, se definieron tres metodologías de aplicación: metodología RAS, método participativo y método empírico de Turc. Estas fueron seleccionadas debido a su aplicabilidad en el territorio de estudio, ya que presentan fórmulas sencillas y requieren información que fue posible obtener y adaptar a partir de capas cartográficas e insumos proporcionados por instituciones nacionales.

La información necesaria para su implementación se recopiló de fuentes académicas y de instituciones nacionales, principalmente del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) y del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad (CIE) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). Esto garantizó la disponibilidad de datos confiables y específicos para el desarrollo de la investigación.

Los insumos utilizados incluyeron:

- Elevación (derivada del modelo digital de elevación – DEM del CIE)
- Cobertura forestal (CIE),
- Tipo de suelo y litología (cartografía fisiográfica del MAGA)
- Uso de suelo (cartografía del MAGA)
- Evapotranspiración y precipitación, cuya información teórica fue adaptada y vinculada a las capas cartográficas mediante el análisis por subcuencas.
- Cuencas y subcuencas del territorio guatemalteco (cartografía del MAGA)

C. Programación

Para el análisis de las variables en la cuenca del río Motagua, se implementó un procedimiento de programación y procesamiento espacial orientado a optimizar la intersección de capas en formato ráster. Exceptuando el DEM, toda la información se encontraba en formatos *shapefile* (.shp). Estas capas fueron procesadas en el software QGIS 3.42.2, en donde se realizaron las operaciones de recorte, reproyección y generación de nuevas variables mediante la calculadora de campos y herramientas de geoprocursos.

1. Preprocesamiento de la información

- Se reproyectaron las capas al sistema de coordenadas ESRI: 103598 GTM.
- Se seleccionaron y aislaron las subcuencas que conforman la cuenca de estudio el río Motagua generando un solo polígono para el estudio.
- Se recortaron las capas al límite de la cuenca de estudio.
- A partir del modelo digital de elevación (DEM), se calcularon las pendientes mediante herramientas de análisis ráster en QGIS.

2. Asignación de valores a las capas

a) Litología

Método participativo: se asignaron los valores de ponderación de 1 a 5 según el Cuadro 4, de acuerdo con la naturaleza de la roca, directamente en el cuadro de atributos de la capa vectorial correspondiente (ver Anexo 1).

b) Uso de suelo

- Método participativo: se asignaron los valores de ponderación de 1 a 5 según el Cuadro 6, de acuerdo con la naturaleza de la explotación del suelo en el área, directamente en el Cuadro de atributos de la capa vectorial correspondiente (ver Anexo 3).
- Metodología RAS: se asignaron los valores de Kv según el Cuadro 10, de acuerdo con el uso del suelo en el área, directamente en el cuadro de atributos de la capa vectorial correspondiente (ver Anexo 5).

c) Tipo de suelo

- Método participativo: se asignaron los valores de ponderación de 1 a 5 según el Cuadro 3, de acuerdo con la textura del suelo en el área, directamente en El Cuadro de atributos de la capa vectorial correspondiente (ver Anexo 2).
- Metodología RAS: se asignaron los valores de Kfc según el Cuadro 8, de acuerdo con el uso del suelo en el área, directamente en el cuadro de atributos de la capa vectorial correspondiente (ver Anexo 6).

d) Cobertura forestal

Método participativo: se calculó la cobertura forestal de cada subcuenca a partir de la capa vectorial correspondiente. Primero, la capa fue recortada al límite de cada subcuenca. Posteriormente, se calculó el área ocupada por cobertura forestal utilizando las herramientas de geometría de QGIS y los resultados se incorporaron en el cuadro de atributos de las

subcuencas (ver Anexo 4). Finalmente, se calculó el porcentaje de cobertura forestal sobre el área total de cada subcuenca.

Posteriormente, se asignaron los valores de ponderación de 1 a 5 según el Cuadro 5, utilizando de referencia los porcentajes de cobertura vegetal directamente en el cuadro de atributos de la capa vectorial de subcuencas.

e) Pendiente

- Método participativo: se reclasificó por cuadro el archivo de pendientes previamente generado, asignando una ponderación de 1 a 5 según el Cuadro 2.
- Método RAS: se reclasificó por cuadro el archivo de pendientes del área de estudio, asignando un valor K_p según el Cuadro 9.

f) Temperatura

- Método empírico de Turc: se calculó la corrección de la temperatura (archivo DEM) con ayuda de la Ecuación 7, utilizando la calculadora ráster.

g) Precipitación

Para la estimación de recarga hídrica se utilizó información de precipitación reportada en millones de $m^3/año$ para cada subcuenca (ver Anexo 7). Con el fin de emplear estos datos en los métodos empíricos, se realizó la conversión a milímetros por año ($mm/año$), considerando el área de cada subcuenca. Los valores obtenidos se registraron en el cuadro de atributos de cada subcuenca.

Ecuación 8. Conversión del volumen de la precipitación

$$p = \frac{V}{A} * 100,000$$

Donde:

$A = \text{área de la subcuenca (ha)}$

$V = \text{Volumen de precipitación de la subcuenca (millones de } m^3)$

h) Evapotranspiración

Para la estimación de recarga hídrica se utilizó información de precipitación reportada en millones de $m^3/año$ para cada subcuenca (ver Anexo 7). Con el fin de emplear estos datos en los métodos empíricos, se realizó la conversión a milímetros por año ($mm/año$), considerando el área de cada subcuenca. Los valores obtenidos se registraron en el cuadro de atributos de cada subcuenca.

Ecuación 9. Conversión del volumen de la evapotranspiración

$$Et = \frac{VE}{A} * 100,000$$

Donde:

A = área de la subcuenca (ha)

VE = Volumen de evapotranspiración real de la subcuenca (millones de m³)

3. Conversión de datos

Al contar con todas las variables necesarias para cada metodología, se procedió a generar dichas variables en archivos *raster*, en los casos en que originalmente se encontraban en archivos *shapefile*. Se cuidó que el ancho y alto de los píxeles fueran consistentes para cada metodología. Siempre que fue posible, se utilizaron los valores provenientes de los rústeres existentes, que serían empleados directamente en cada metodología (pendientes y temperatura).

4. Álgebra de mapas

Se procedió a utilizar álgebra de mapas para combinar los rústeres de las variables, las operaciones se realizaron píxel a píxel mediante la calculadora rúster en QGIS, aplicando las fórmulas establecidas para cada método.

- Método RAS: precipitación, evapotranspiración, pendiente, uso de suelo, y tipo de suelo.
- Método participativo: pendiente, tipo de suelo, litología, uso de suelo y cobertura forestal.
- Método empírico Turc: precipitación y temperatura.

5. Clasificación de la recarga hídrica

Los valores de recarga (mm/año) se clasifican en cinco categorías cualitativas:

- Muy baja
- Baja
- Moderada
- Alta
- Muy alta

La reclasificación de los rúster resultantes del álgebra de mapas se realizó mediante un proceso de normalización lineal por rangos, el cual permitió representar de forma

proporcional la variabilidad espacial de los datos. Este procedimiento se aplicó únicamente a los resultados obtenidos mediante la metodología RAS y el método empírico de Turc.

La conversión a una escala ordinal común de 1 a 5 tuvo como propósito estandarizar los resultados derivados de metodologías con enfoques y unidades de análisis diferentes, facilitando su comparación e integración espacial. Esta escala representa niveles relativos de potencial de recarga hídrica y permite reducir la influencia de las diferencias en magnitud absoluta entre métodos. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como indicadores comparativos de potencialidad y no como estimaciones directas del volumen real de recarga.

6. Integración final

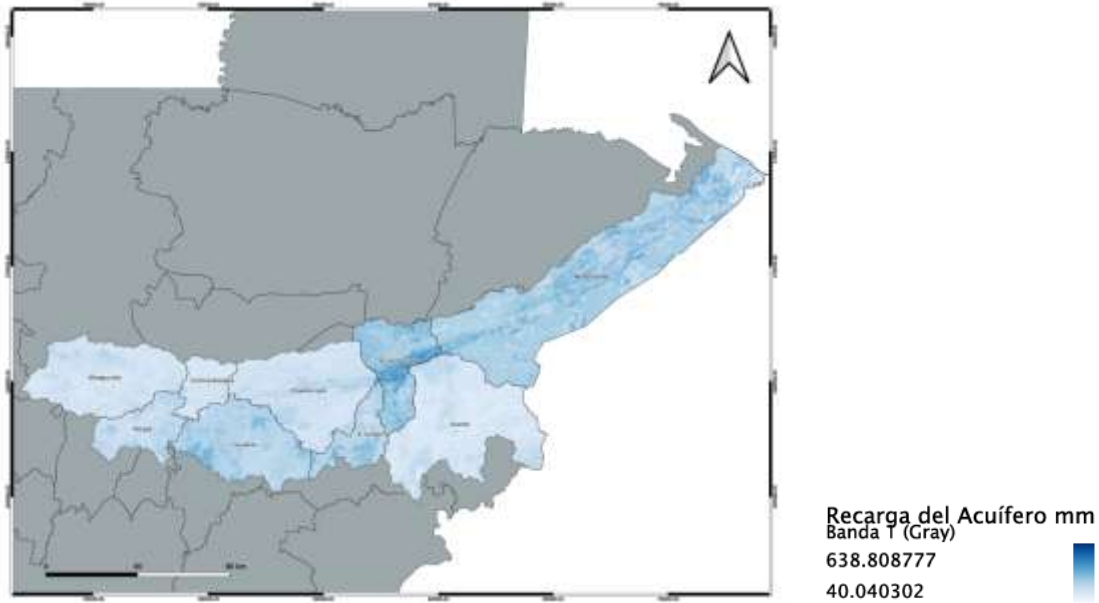
Para la obtención del dato integrado, se realizó nuevamente el álgebra de mapas utilizando los rásteres clasificados de las tres metodologías. Se obtuvo mediante promedio aritmético simple de las tres metodologías, considerando igual peso a cada una debido a su complementariedad conceptual un valor final en una escala de 1 a 5.

7. Presentación de los resultados

Se elaboraron los mapas temáticos de recarga hídrica según los valores inherentes a cada proceso y a su vez un mapa con la reclasificación, para cada metodología. Finalmente, se generó el mapa temático de integración, combinando los resultados de las tres metodologías.

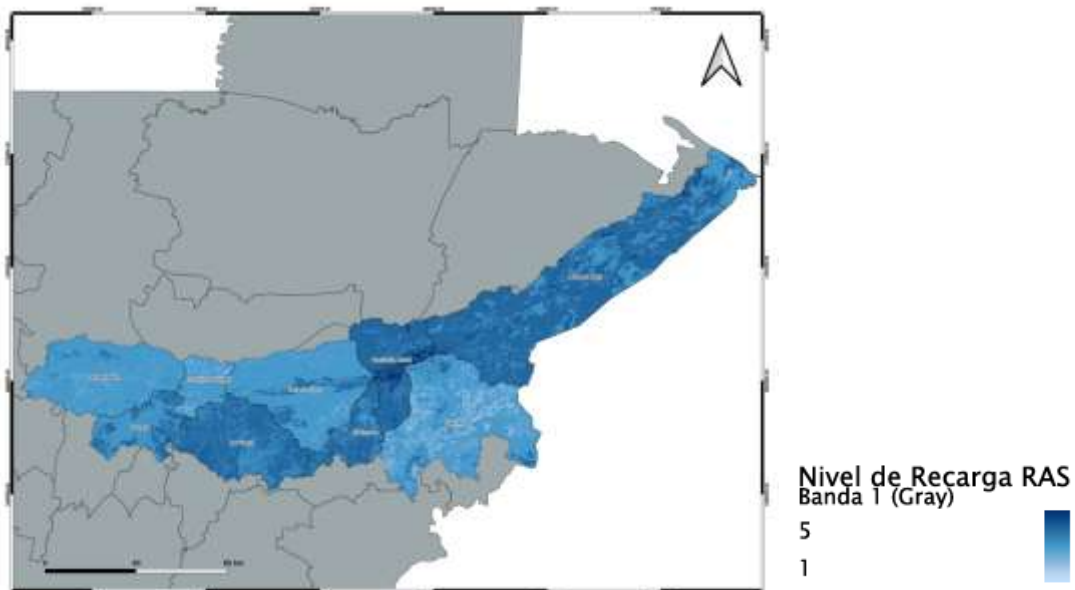
VI. Análisis de Resultados

Figura 6. Mapa de recarga acuífera promedio anual (mm/año) en la cuenca del río Motagua, obtenido mediante la metodología RAS



Nota: El mapa muestra la distribución espacial de la precipitación anual (mm) en la cuenca del río Motagua, obtenida mediante la metodología RAS. Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante la metodología RAS



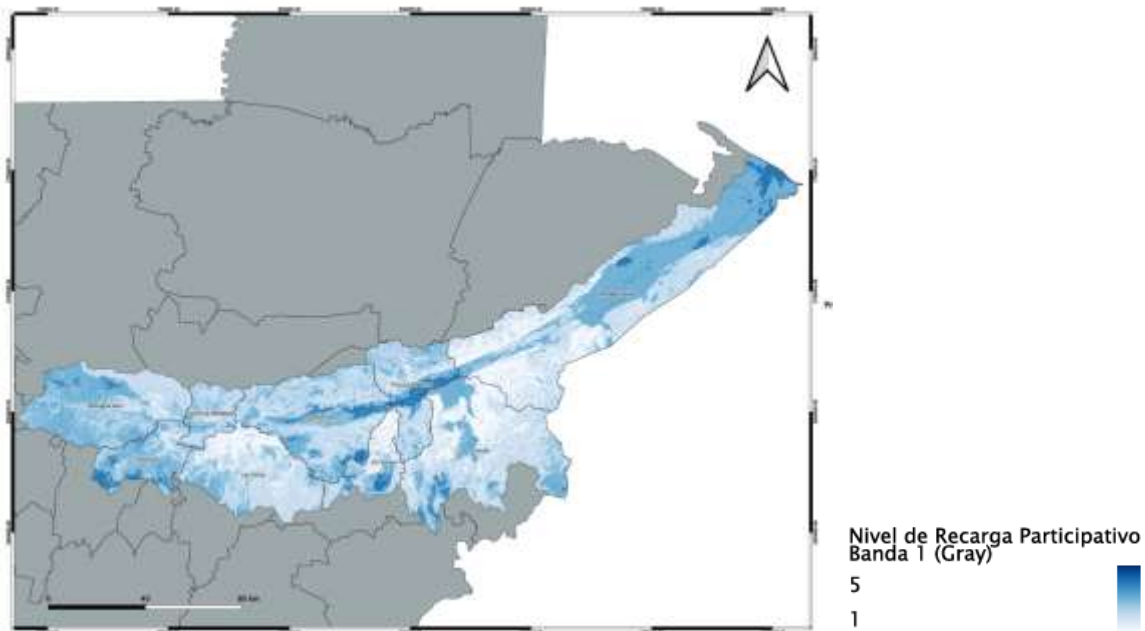
Fuente: elaboración propia.

La Figura 7 representa la clasificación espacial de los niveles de recarga acuífera del 1 al 5, muy baja, baja, moderada, alta y muy alta respectivamente, en la cuenca del río Motagua, obtenida a partir de la aplicación de la metodología RAS.

Los niveles de recarga más altos y muy altos se concentran visiblemente en la región noreste de la cuenca. Las áreas, representadas por los tonos cromáticos más oscuros, sugieren una fuerte correlación con factores que optimizan la infiltración, tales como una mayor precipitación y la combinación favorable de la textura del suelo con el aprovechamiento de este. Este patrón de alta recarga abarca las subcuencas de Motagua Bajo, Teculután Huité, El Tambor y Las Vacas. Dada su función como principales aportadoras al sistema hídrico, estas zonas deben ser consideradas prioritarias en cualquier estrategia de conservación y gestión sostenible del recurso.

En contraste, la región suroeste de la cuenca exhibe una clara predominancia de niveles moderados a bajos. Las áreas con los colores más claros, que indican valores bajos o muy bajos, demandan una atención especial, ya que estas zonas son intrínsecamente vulnerables a la escasez hídrica y requieren la implementación urgente de medidas de conservación y una planificación rigurosa del uso del suelo para mejorar y potenciar su limitada capacidad de recarga.

Figura 8. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante el método participativo



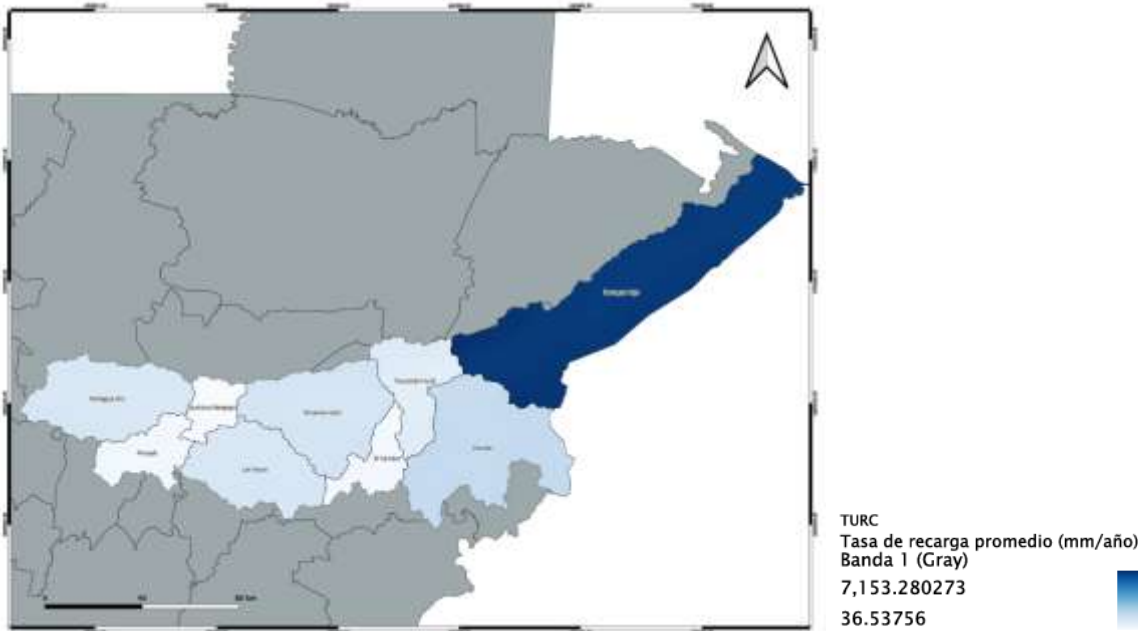
Nota: El mapa presenta la clasificación espacial de los niveles de recarga hídrica en la escala del 1 al 5, muy baja, baja, moderada, alta y muy alta respectivamente, en la cuenca del río Motagua, obtenida mediante la aplicación del método participativo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra que los niveles de recarga no son homogéneos en la cuenca. Las áreas con colores más oscuros se concentran principalmente en la zona noreste, algunas áreas del centro de la cuenca y áreas en la zona suroeste, lo que indica que estas regiones tienen mayor capacidad de infiltración. Por el contrario, las zonas con colores más claros predominan en áreas específicas al noreste y suroeste y en algunas áreas intermedias, lo que sugiere menor recarga. Se evidencia que la cuenca presenta una alta variabilidad espacial, con parches de recarga alta intercalados con áreas de recarga baja. Esto confirma que no se puede tratar a toda la cuenca de manera uniforme y que las subcuencas o sectores requieren análisis específicos para la gestión del recurso hídrico.

En el noreste, especialmente las subcuencas Motagua Bajo y Teculután Huité, junto a las subcuencas del suroeste Motagua Bajo y Pixcayá, presentan los valores más altos de recarga. Esto indica que estas áreas podrían considerarse prioritarias para conservación y manejo sostenible del agua.

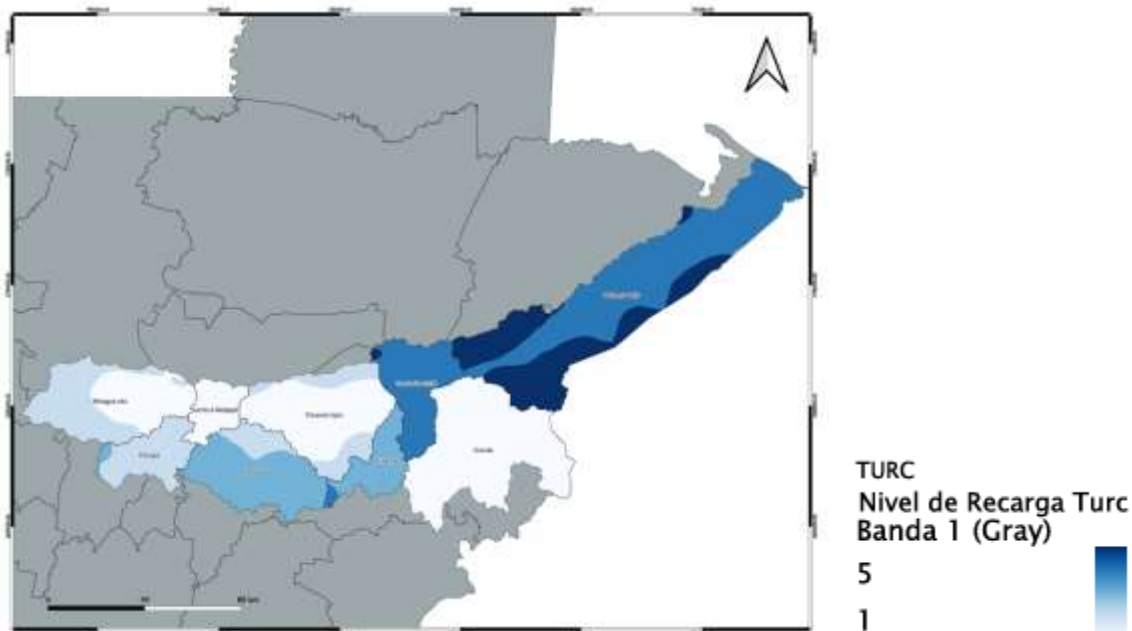
El hecho de que el modelo dependa de la integración de cinco variables distintas hace que los resultados sean más sensibles y susceptibles a cambios bruscos o a la incertidumbre inherente a los datos de entrada. Por lo tanto, es crucial interpretar los valores como indicaciones relativas y no como cifras absolutas. El mapa señala dónde la infiltración es comparativamente mayor o menor dentro de la cuenca, pero no cuantifica el volumen exacto de recarga hídrica. Esta relatividad subraya la necesidad de complementar este análisis espacial con mediciones directas en campo.

Figura 9 Mapa de la tasa de recarga hídrica promedio anual (mm/año) en la cuenca del río Motagua, obtenida mediante el método empírico de Turc.



Nota: El mapa muestra los valores de la tasa de recarga hídrica promedio anual (mm/año) en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante el método empírico propuesto por Turc. Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Mapa de los niveles de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, obtenidos mediante el método empírico de Turc



Nota: El mapa presenta la clasificación espacial de los niveles de recarga hídrica en la escala del 1 al 5 (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) en la cuenca del río Motagua, obtenida mediante la aplicación del método empírico propuesto por Turc. Fuente: elaboración propia.

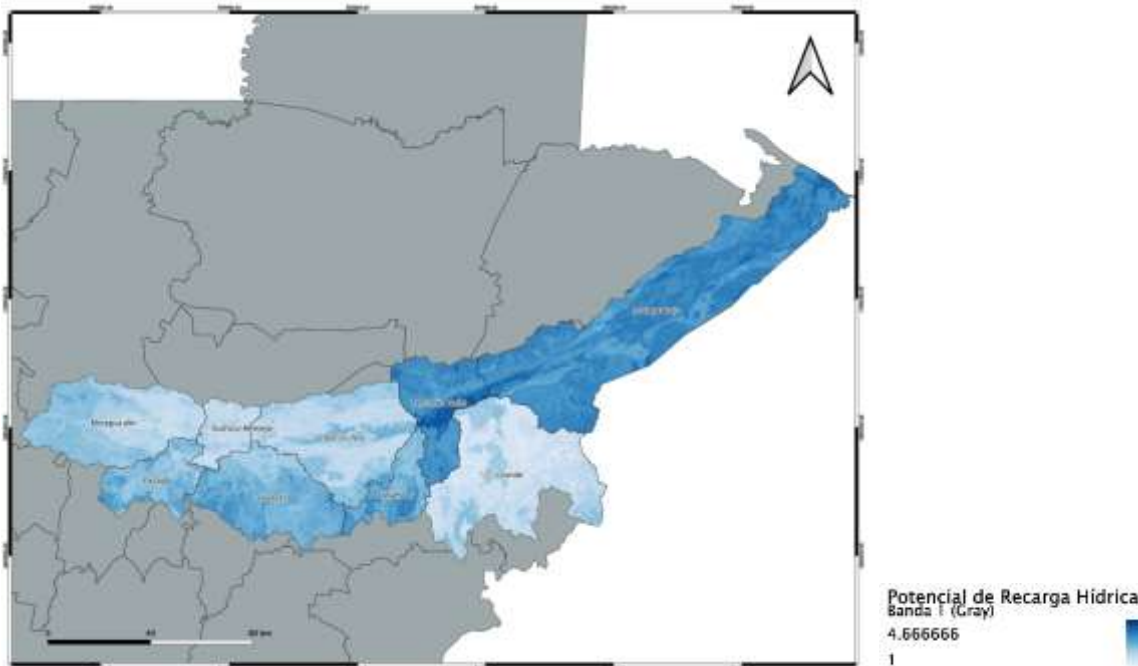
La Figura 9 muestra una clara segregación de los valores de recarga. La zona noreste de la cuenca, correspondiente a las subcuencas Motagua Bajo y Teculután Huité, presenta consistentemente niveles de recarga altos a muy altos (colores azul oscuro y negro). En contraste, las regiones del oeste y sur exhiben recargas predominantemente bajas a muy bajas (colores claros), destacando la subcuenca Grande y Suchicul Belejayá, que registran valores “muy bajos” en toda su superficie.

El método empleado se basa únicamente en variables climáticas, precipitación y temperatura media, por lo que no refleja de manera exacta la recarga hídrica real, ya que no considera condiciones locales que controlan el movimiento del agua, como:

- Geología e hidrogeología: capacidad del subsuelo para transmitir agua.
- Edafología: textura y profundidad del suelo, que afectan la infiltración.
- Topografía: pendientes que pueden generar escorrentía antes de la infiltración.

Por lo tanto, el mapa indica la disponibilidad teórica de agua para recarga, no la cantidad efectiva que llega al acuífero. Por ello los resultados deben interpretarse como un índice de potencialidad y complementarse con estudios de campo que incluyan suelos, geología y monitoreo piezométrico para una representación hídrica precisa.

Figura 11. Mapa de la recarga hídrica final de la cuenca Motagua



Nota: El mapa muestra la distribución de los valores de recarga hídrica en una escala de 1 a 5, resultantes de la aplicación de tres metodologías: método empírico de Turc, metodología RAS y método participativo, en la cuenca del río Motagua. Fuente: elaboración propia.

La Figura 11 presenta los niveles de recarga hídrica a lo largo de la cuenca del Motagua, estos niveles son el resultado de la integración espacial de mapas derivados de las tres metodologías previamente seleccionadas.

La escala de clasificación empleada varía de 1 a 5, aunque el valor máximo obtenido en el estudio es de 4.67. Este valor representa el nivel más alto de recarga dentro del área de estudio y se localiza en la subcuenca del Motagua Bajo y Teculután Huité, En contraste, el valor mínimo registrado es 1.0. Aunque las áreas con el valor mínimo no son fácilmente distinguibles en la visualización, se observa una predominancia de valores bajos que oscilan entre 1.0 y 3.0 en las subcuencas de Suchichul-Belejayá. Pixcayá y El Tambor.

Los resultados obtenidos representan una aproximación espacial del potencial de recarga hídrica en la cuenca del río Motagua, derivada de la aplicación de metodologías indirectas y de análisis multicriterio. En este sentido, los valores estimados reflejan tendencias relativas de infiltración y no mediciones directas del proceso de recarga. Estudios previos desarrollados en cuencas de la región centroamericana han señalado la importancia de complementar este tipo de análisis espacial con información de campo o con comparaciones regionales, a fin de contextualizar los resultados y fortalecer su interpretación. Por lo tanto, los mapas generados deben entenderse como una herramienta de apoyo para el análisis hidrológico y la planificación territorial.

VII. Conclusiones

1. Se compararon las metodologías RAS, el método empírico de Turc y el método participativo, evidenciándose que presentan condiciones, variables y requerimientos metodológicos compatibles con el contexto hidrológico y la disponibilidad de información en Guatemala. La comparación permitió identificar la complementariedad de los enfoques y la pertinencia de sus variables para la estimación de la recarga hídrica. La adaptación de los parámetros se realizó con base en referencias bibliográficas especializadas, garantizando la coherencia técnica de los resultados y permitiendo la generación de una guía metodológica de referencia aplicable a otras regiones del país.
2. Se implementó la guía de referencia construida a partir de la integración de las metodologías RAS, empírica de Turc y participativa, lo que permitió determinar zonas con diferente potencial de recarga hídrica dentro de la cuenca del río Motagua. La aplicación de la guía posibilitó la obtención de valores individuales de recarga y su posterior interpolación espacial, integrando variables climáticas, físicas y de uso del suelo. Este proceso permitió transformar información de distinta naturaleza en resultados comparables, constituyendo una base técnica sólida para el análisis espacial de la recarga hídrica a escala de cuenca.
3. Se elaboraron mapas temáticos de las potenciales zonas de recarga hídrica de la cuenca del río Motagua a partir de la aplicación de cada una de las metodologías evaluadas. Los productos cartográficos generados evidenciaron una marcada variabilidad espacial de la recarga, asociada a las diferencias en las variables y enfoques considerados. Asimismo, la comparación entre los mapas permitió identificar coincidencias y contrastes entre las metodologías, consolidando estos resultados como una herramienta útil para el análisis territorial y la toma de decisiones orientadas a la gestión y conservación del recurso hídrico.

VIII. Recomendaciones

Sociales e institucionales

Promover la integración de actores comunitarios, municipalidades e instituciones estatales en los procesos de identificación, conservación y gestión de zonas de recarga hídrica. La incorporación de variables sociales y dinámicas de uso del territorio en futuros estudios permitirá diseñar estrategias más equitativas y efectivas, considerando los medios de vida locales y las presiones existentes sobre el recurso hídrico. Asimismo, la participación social puede contribuir a la reducción de conflictos asociados a la disponibilidad del agua y al fortalecimiento de prácticas de uso del suelo compatibles con la recarga hídrica.

Ambientales

Implementar una metodología sistemática de trabajo de campo orientada a la validación de los valores de recarga hídrica estimados, mediante mediciones in situ de parámetros como permeabilidad, infiltración, humedad del suelo y niveles freáticos. La incorporación de redes de monitoreo piezométrico permitiría generar información continua sobre la dinámica del acuífero, facilitando la identificación de tendencias, la evaluación de la respuesta del sistema ante procesos de recarga y explotación, y el fortalecimiento de la gestión ambiental del recurso hídrico. En casos donde se identifiquen discrepancias significativas entre los resultados modelados y los datos de campo, se recomienda la calibración de los modelos para mejorar la representatividad de las condiciones hidrogeológicas reales.

Planificación territorial

Complementar los análisis realizados mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución y series temporales, con el fin de evaluar con mayor detalle los cambios en la cobertura vegetal, el uso del suelo y la expansión urbana en la cuenca del río Motagua. La integración de estos insumos permitirá realizar comparaciones espaciales y temporales más precisas, así como identificar procesos de degradación o recuperación en zonas de recarga. Asimismo, se sugiere delimitar subáreas de menor extensión dentro de las subcuencas, lo que permitirá incrementar la resolución espacial de los análisis y mejorar la identificación de microzonas de recarga hídrica relevantes para el ordenamiento territorial.

Económicas

Considerar los resultados obtenidos como un insumo técnico para orientar decisiones relacionadas con el uso productivo del territorio, especialmente en actividades agrícolas, industriales y de desarrollo urbano, con el fin de minimizar impactos negativos sobre las zonas de recarga hídrica. La identificación de áreas prioritarias de recarga puede apoyar la formulación de incentivos económicos, mecanismos de compensación ambiental o esquemas

de pago por servicios ecosistémicos que promuevan prácticas productivas sostenibles y contribuyan a la seguridad hídrica regional.

Académicas

Considerar la metodología RAS como una herramienta base para la identificación de zonas de recarga hídrica en el contexto guatemalteco, dada su compatibilidad con la disponibilidad de información climática, edafológica y de uso del suelo a escala nacional. No obstante, su aplicación debe fortalecerse mediante estudios específicos a nivel local y la incorporación de información de campo que permita ajustar los coeficientes utilizados. De esta manera, la metodología RAS puede consolidarse como un insumo técnico robusto para futuras investigaciones, así como para el apoyo a procesos de ordenamiento territorial, conservación de zonas estratégicas y formulación de políticas públicas orientadas a la seguridad hídrica.

IX. Bibliografía

- Aguilar Estrada, J. A. (2022). *Convalidación del análisis regional altura – precipitación de la vertiente del Pacífico y actualización del efecto en la vertiente del fenómeno de El Niño y La Niña* [Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis22/T16222.pdf>
- Álvarez, P. P., y Lugo, D. M. R. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, Cuba. *Aqua-LAC*, 6(2), 58-70.
- ANAM GUATEMALA. (2019, 2 octubre). Manejo de Zonas de Recarga Hídrica [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5MWaLf9AbPA>
- Colectivo MadreSelva. (2019, febrero). Cuenca del Río Motagua, situación actual y las causas de su deterioro. Heinrich Böll Stiftung. <https://www.madreselva.org.gt>
- Cutipa Condori, O. R., Quispe Fernandez, S., y Ascue Salas, G. F. (2025). Cobertura vegetal en la recarga de acuíferos: Una revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(3). <https://doi.org/10.5281/zenodo.16111184>
- Figueredo Pan, J. L. (2019). Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o comunidades con recursos financieros limitados.
- FUNIBER. (s.f.). *Ciclo hidrológico y balance de energía en la Tierra* (Cap. 1). Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER).
- FUNIBER. (s.f.). *El agua en la atmósfera* (Cap. 3). Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER).
- García Ávila, J. A. (2015). *Regionalización de crecidas para la vertiente del Golfo de México de la República de Guatemala* [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Institucional USAC. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3758/>
- Guzmán Monge, A., y Díaz Hernández, A. (2007). *Identificación de las áreas de recarga acuífera y zonas de protección de los manantiales del Cantón Central de Cartago*. IX Congreso Nacional de Ciencias, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Junker, M. (2005). Capítulo IV: Método RAS. FORGAES - MARN y la Unión Europea. <https://www.yumpu.com/es/document/read/14778375/capitulo-iv-metodo-ras>
- Lux Cardona, B. F. (2016). *Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca del río Turbala, ubicada en la cuenca del río Naranjo, Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala Centro Universitario de San Marcos]. <https://cusam.edu.gt/wp-content/uploads/2024/08/IAOAS-11-LCBF-Lux-Cardona-Benjamin-Feliciano.pdf>

- Maldonado Cáceres, H. I. (2018). *Informe final: Identificación de áreas críticas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Turbalá, parte alta de la cuenca del río Naranjo (FINDECYT/FODECYT 044-2017)*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONCYT; Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología – SENACYT; Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología – FONACYT; Centro Universitario de San Marcos.
- Marinos, T. B. B. A. E., NATURALES, C. D. S. R., y RENOVABLES, N. Situación del recurso hídrico en Guatemala.
- Matus, O., Faustino, J., y Jiménez, F. (2008, diciembre). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Recursos Naturales y Ambiente. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/7308>
- Morales Samayoa, J. I. M. (2013). Descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero metropolitano en el Valle de Guatemala. *Agua Saneamiento y Ambiente*, 8(1), 53-58. <https://doi.org/10.36829/08asa.v8i1.1487>
- Otálvaro, Vélez, M. L., y Ariza, Vásquez, M. V. (2019). Métodos para determinar la recarga en acuíferos.
- Pardo, Alfonso. (2013). El origen del agua terrestre: la ciencia actual desde la visión de Odón de Buen. *Odón*. 31-37.
- Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA). (2000). *Primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250,000: Memoria técnica*. Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID).
- Universidad Rafael Landívar, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA), y Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas (FCAA). (2005). Situación del recurso hídrico en Guatemala: Documento técnico del Perfil Ambiental de Guatemala. Instituto de Incidencia Ambiental, con el apoyo de la Embajada Real de los Países Bajos. http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/IARNA/serie_ambi/02.pdf

X. Anexos

Anexo 1. Ponderación según tipo de roca

Índice	Roca	Ponderación
3.1.1	Andesítico - basáltico y basaltos. Ceniza, lava y lapilli.	4
3.1.15	Piroclastos de pómez tipo lapilli, con espesores de hasta 200 metros.	5
3.1.7	Piroclásticos o tephra interstratificada con diamictones pomáceos y sedimentos fluvio lacustres, incluyendo cenizas volcánicas, lapilli, escoria, pómez, bombas y bloques	3
3.2.1	Rocas Volcánicas como andesitas y basaltos en su mayor parte, flujos riolíticos, piroclastos, aglomerados, tobas e ignimbritas.	3
3.2.10	Piroclastos de pómez tipo lapilli, con algunos fragmentos de rocas volcánicas andesíticas y basálticas de coloración gris y pardo Amarillento cuando están meteorizadas	5
3.2.11	Relleno piroclástico de pómez y aportes de coluvios con la presencia de rocas andesíticas	5
3.2.2	Tephra interstratificadas con diamictones pomáceos y sedimentos fluvio lacustres.	3
3.3.10	Grupo Padre Miguel, rocas sedimentarias clásicas y aluviones.	4
3.3.11	Las rocas que componen esta unidad son en su mayor parte carbonatadas, rocas clásticas de la formación Subinal, además de rocas volcánicas en forma de lavas y tobas volcánicas.	3
3.3.3	Flujos de basalto con cubiertas de materiales piroclásticos y ceniza volcánica	5
3.3.4	Padre Miguel, constituido por basaltos, andesitas, riolitas, felsitas, arenas volcánicas y lahares, rocas sedimentarias carbonatadas y clásticas	3
3.3.5	Materiales aluviales de fragmentos volcánicos	5
3.3.7	Coladas de basalto, cenizas y conos cineríticos	4
3.3.8	Rocas volcánicas del grupo Padre Miguel, algunas rocas sedimentarias y metamórficas más antiguas y algunos cuerpos intrusivos	3
4.2.4	Rocas del período Paleozóico, llamado Grupo Chuacús.	1
4.3.1	Está formada propiamente por rocas metamórficas del Grupo Chuacús, como esquistos, filitas, gneisses, migmatitas y rocas ígneas intrusivas de tipo granito y diorita, al norte existen carbonatos de la Formación Cobán	1
4.3.2	Ultrabásica y metamórfica como: esquistos, gneisses, migmatitas y anfibolitas	1

4.4.1	Metamórficas, como filitas, anfibolitas y esquistos verdes, y algunas rocas sedimentarias	1
4.4.2	Igneas intrusivas graníticas a dioríticas	1
4.4.3	Grupo del Chuacús, ácidas y básicas son frecuentes.	1
4.4.4	Rocas intrusivas y rocas metamórficas	1
4.4.5	Metamórficas del Grupo Chuacús, tales como filitas, esquistos, gneisses y migmatitas, y rocas carbonatadas de la Formación de Cobán	3
5.1.1	Volcánico, sedimentario donde predominan las metamórficas)	3
5.1.2	Rocas sedimentarias clásticas, lutitas, areniscas y conglomerados de las Formaciones Subinal conocidas como capas rojas.	3
5.1.3	Está formada por depósitos de materiales piroclastos de pómez y ceniza volcánica.	5
5.2.1	Sedimentario y Metamórfico.	3
5.2.2(a)	Hay una dominancia de materiales aluviales con gran cantidad de rocas de todo tipo dentro de una matriz arenosa a arcillosa, principalmente en la parte media siendo una de las razones del mal drenaje.	3
5.2.2(c)	La parte baja cerca de la costa puede mostrar en el suelo cierto grado de salinidad, con materiales aluviales.	4
5.2.3	Lutitas, limolitas y areniscas poco compactadas de los depósitos sedimentarios de la Formación Armas.	3
5.2.5	Relleno litoral de arenas y limos con lentes. Hacia la Bahía La Graciosa existen cayos formados por rocas de caliza.	4
6.7.2	Rocas de origen Sedimentarias, se identifican rocas detríticas como lutitas, areniscas y conglomerados del Grupo Santa Rosa y carbonatos de las formaciones Chochal y Cobán	3

Anexo 2. Ponderación según tipo de suelo

Índice	Categoría	Ponderación
I	Alfisol	3
II	Andisol	5
III	Entisol	5
IV	Histosol	1
V	Inceptisol	4
VI	Mollisol	3
VII	Ultisol	1
VIII	Vertisol	1

Anexo 3. Ponderación según uso de suelo

Índice	Categoría	Ponderación
1.1.1	Tejido Urbano Continuo	1
1.1.2	Tejido Urbano Discontinuo	1
1.1.3	Lotificaciones	1
1.2.1.1	Agroindustria	1
1.2.1.2	Beneficios	1
1.2.1.3	Producciones hidrobiológicas (Camaroneras, piscícolas)	1
1.2.1.5	Complejo Industrial	1
1.2.2.1	Centro Comercial	1
1.2.2.2	Hospital	1
1.2.2.3	Base militar	1
1.2.2.4	Instalación educativa	1
1.2.2.5	Prisión	1
1.2.2.6	Cementerio	1
1.2.2.7	Hidroeléctrica	1
1.2.2.8	Otros comercios y servicios	1
1.2.5	Áreas Turísticas, arqueológicas	2
1.3.1	Zonas de extracción minera (canteras)	1
1.4.1.1	Zoológicos	3
1.4.2	Instalaciones deportivas y recreativas	2
2.1.1	Granos básicos (maíz y frijol)	3
2.1.2	Arroz	3
2.1.3.1	Tomate	3
2.1.3.2	Otras hortalizas (papas, cebolla, repollo, zanahoria, lechuga y otros)	3
2.1.5	Melón	3
2.1.8	Tabaco	3
2.1.9	Stevia	3
2.2.1.1	Banano-plátano	3
2.2.1.2	Piña	3
2.2.1.3	Fresa	3
2.2.1.4	Flores y follajes	3
2.2.1.6	Loroco	3
2.2.1.7	Sábila	3
2.2.2.1	Café	3
2.2.2.3	Mora	3
2.2.3.1	Palma de aceite	3
2.2.3.11	Rambután	3

2.2.3.15	Otros cultivos permanentes arbóreos	3
2.2.3.12	Jocote	3
2.2.3.3	Coco	3
2.2.3.4	Frutales decídúos	3
2.2.3.6	Hule	3
2.2.3.7	Aguacate	3
2.2.3.8	Mango	3
2.2.3.9	Cítricos	3
2.2.4.1	Caña de azúcar	3
2.2.4.2	Cardamomo	3
2.3.1	Pasto cultivado	3
2.3.2	Pasto natural	3
2.4.2.2	Café y banano	3
2.4.2.5	Café y aguacate	3
2.4.3	Huerto	3
3.1.1	Bosque latifoliado	5
3.1.2	Bosque de coníferas	5
3.1.3	Bosque mixto	5
3.2.1.1	Plantación de conífera	5
3.2.1.2	Plantación de latifoliada	5
3.2.2	Árboles dispersos	4
3.3.1	Vegetación arbustiva baja (matorral y/o guamil)	2
3.4.1	Playas, dunas o arenales	1
3.4.3	Espacio con vegetación escasa (Tierras desnudas y degradadas)	1
4.1.2	Zonas inundables	2
4.1.3	Humedal con vegetación	4
4.1.4	Humedal con bosque	4
5.1.1	Ríos	5
5.1.2	Lago, laguna o laguneta	5
5.2.2	Mar y/u océano	5

Anexo 4. Áreas de las subcuencas

Subcuenca	Área (ha)	Área forestal (ha)
Motagua bajo	423062.544	174870.431
Grande	249399.07	120607.671

Teculután Huité	101501.513	76709.28
El Tambor	60380.995	27135.936
Chuacús-Uyús	189209.64	144043.445
Las Vacas	151341.148	70217.68
Suchicul-Belejeyá	45442.999	32912.692
Pixcayá	74508.805	37279.544
Motagua alto	173964.678	101831.78

Anexo 5. Identificación del valor Kv según uso de suelo

Índice	Categoría	Kv
1.1.1	Tejido Urbano Continuo	0.18
1.1.2	Tejido Urbano Discontinuo	0.10
1.1.3	Lotificaciones	0.18
1.2.1.1	Agroindustria	0.18
1.2.1.2	Beneficios	0.18
1.2.1.3	Producciones hidrobiológicas (Camaroneras, piscícolas)	0.18
1.2.1.5	Complejo Industrial	0.18
1.2.2.1	Centro Comercial	0.18
1.2.2.2	Hospital	0.18
1.2.2.3	Base militar	0.18
1.2.2.4	Instalación educativa	0.18
1.2.2.5	Prisión	0.18
1.2.2.6	Cementerio	0.18
1.2.2.7	Hidroeléctrica	0.18
1.2.2.8	Otros comercios y servicios	0.18
1.2.5	Áreas Turísticas, arqueológicas	0.18
1.3.1	Zonas de extracción minera (canteras)	0.18
1.4.1.1	Zoológicos	0.18
1.4.2	Instalaciones deportivas y recreativas	0.18
2.1.1	Granos básicos (maíz y frijol)	0.10
2.1.2	Arroz	0.15
2.1.3.1	Tomate	0.15
2.1.3.2	Otras hortalizas (papas, cebolla, repollo, zanahoria, lechuga y otros)	0.15
2.1.5	Melón	0.15
2.1.8	Tabaco	0.15

2.1.9	Stevia	0.15
2.2.1.1	Banano-plátano	0.18
2.2.1.2	Piña	0.30
2.2.1.3	Fresa	0.15
2.2.1.4	Flores y follajes	0.20
2.2.1.6	Loroco	0.15
2.2.1.7	Sábila	0.15
2.2.2.1	Café	0.19
2.2.2.3	Mora	0.20
2.2.3.1	Palma de aceite	0.15
2.2.3.11	Rambután	0.20
2.2.3.15	Otros cultivos permanentes arbóreos	0.20
2.2.3.12	Jocote	0.20
2.2.3.3	Coco	0.20
2.2.3.4	Frutales decíduos	0.20
2.2.3.6	Hule	0.20
2.2.3.7	Aguacate	0.20
2.2.3.8	Mango	0.20
2.2.3.9	Cítricos	0.20
2.2.4.1	Caña de azúcar	0.10
2.2.4.2	Cardamomo	0.20
2.3.1	Pasto cultivado	0.10
2.3.2	Pasto natural	0.10
2.4.2.2	Café y banano	0.185
2.4.2.5	Café y aguacate	0.195
2.4.3	Huerto	0.15
3.1.1	Bosque latifoliado	0.20
3.1.2	Bosque de coníferas	0.15
3.1.3	Bosque mixto	0.175
3.2.1.1	Plantación de conífera	0.15
3.2.1.2	Plantación de latifoliada	0.20
3.2.2	Árboles dispersos	0.15
3.3.1	Vegetación arbustiva baja (matorral y/o guamil)	0.20
3.4.1	Playas, dunas o arenales	0.07
3.4.3	Espacio con vegetación escasa (Tierras desnudas y degradadas)	0.15
4.1.2	Zonas inundables	0.05
4.1.3	Humedal con vegetación	0.05
4.1.4	Humedal con bosque	0.20
5.1.1	Ríos	0.0

5.1.2	Lago, laguna o laguneta	0.0
5.2.2	Mar y/u océano	0.0

Anexo 6. Identificación del valor K_{fc} según tipo de suelo

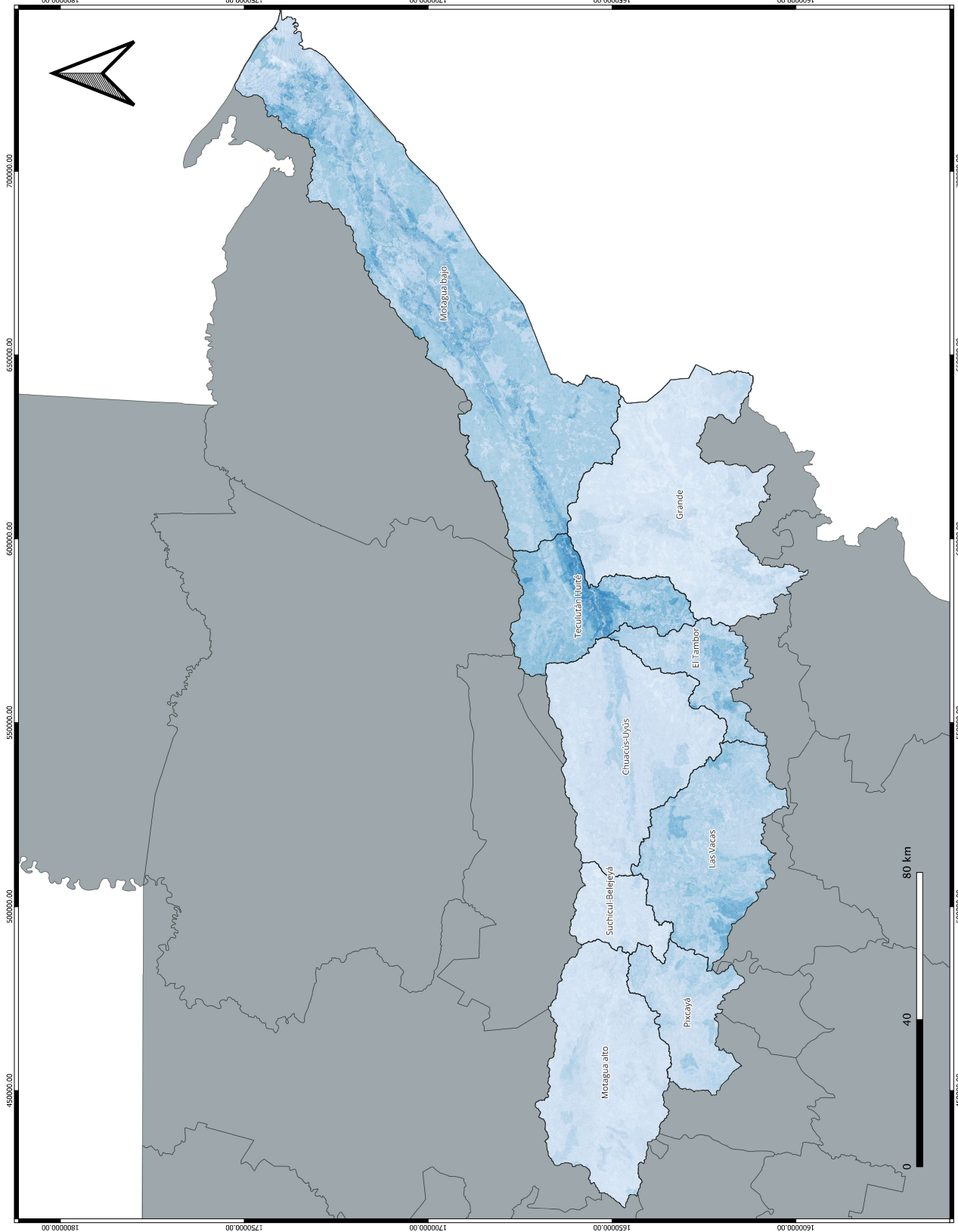
Índice	Categoría	K _{fc}
I	Alfisol	0.15
II	Andisol	0.10
III	Entisol	0.20
IV	Histosol	0.20
V	Inceptisol	0.15
VI	Mollisol	0.20
VII	Ultisol	0.10
VIII	Vertisol	0.10

Anexo 7. Valores de precipitación y evapotranspiración en millones de m³ (adaptado de IARNA/URL, 2015)

Subcuenca	Precipitación	Evapotranspiración
Grande	2792.80	1794.20
Las Vacas	1968.10	1008.50
Motagua Alto	1873.80	1074.30
Motagua Bajo	7943.40	5038.90
Pixcayá	897.6	481.2
Suchicul	486.3	294.9
Teculután	1679.80	869.30

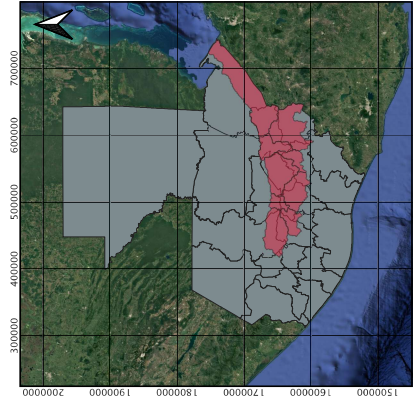
Anexo 8. Mapas de niveles de recarga hídrica de la cuenca del río Motagua

RECARGA HÍDRICA METODOLOGÍA RAS



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zacapa, Chiquimulá e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88° 15' - 90° 15' longitud Oeste
14° 30' - 15° 50' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator
ESRI: 103598 CTM

Recarga del Acuífero mm Banda 1 (Gray)

638.808777
40.040302

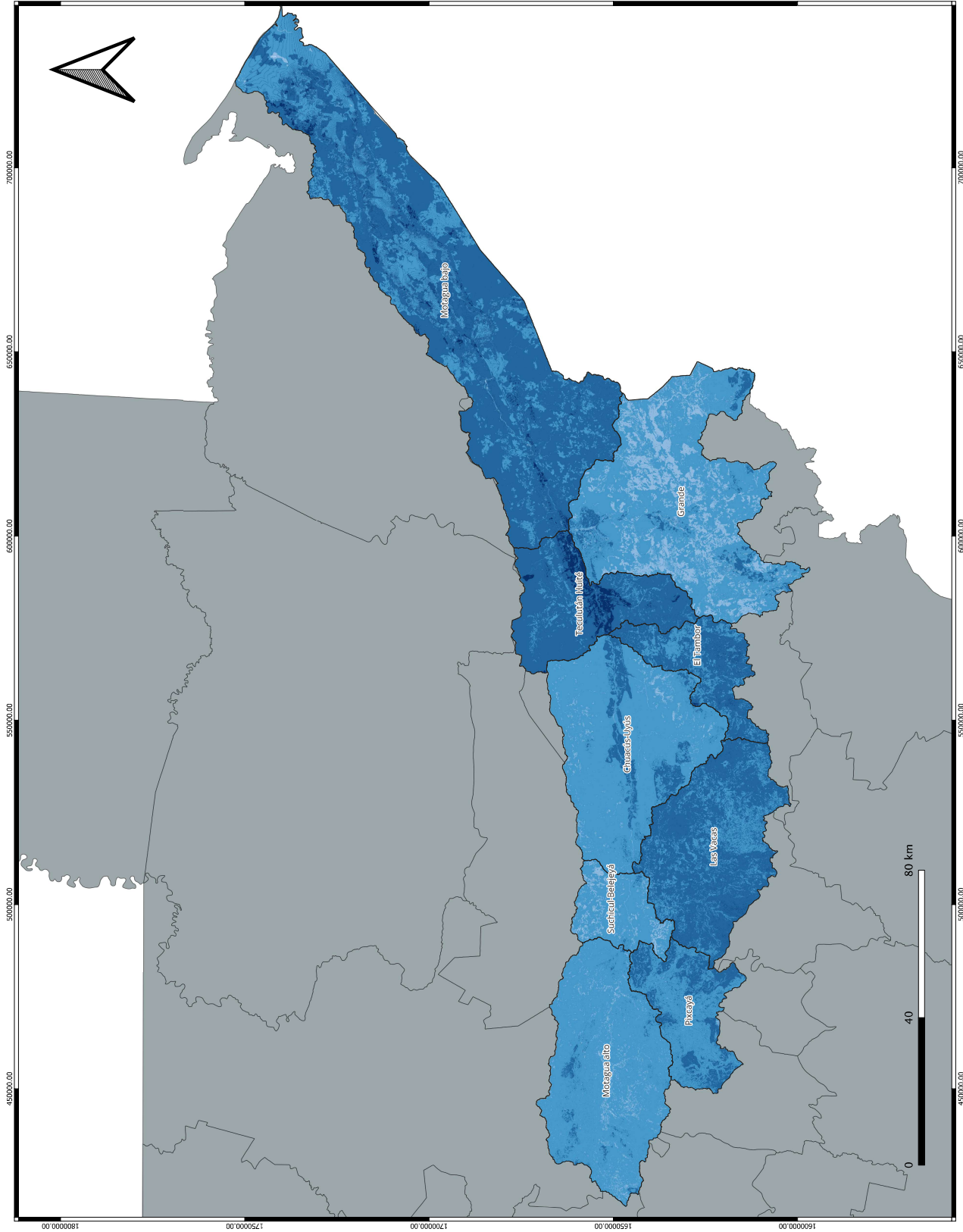
Subcuenca	Area (ha)
Motagua Bajo	423062.544
Grande	249399.070
Teculután Huité	101501.513
El Tambor	60380.995
Chuacús-Lyvis	189209.640
Las Vacas	151341.148
Suchitlán-Belejeva	45442.999
Pixcayá	74508.805
Motagua Alto	173964.678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

Escala: 550000	Mapa 1	Fecha 2026-01-03
-------------------	-----------	---------------------

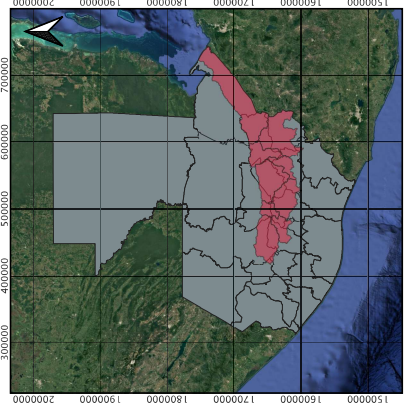
Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres

RECARGA HÍDRICA METODOLOGÍA RAS



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

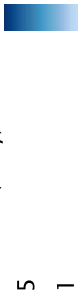
La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zacapa, Chiquimula e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88°15' - 90°15' longitud Oeste
14°30' - 15°50' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator
ESRI: 103598 GTM

Nivel de Recarga RAS Banda 1 (Gray)

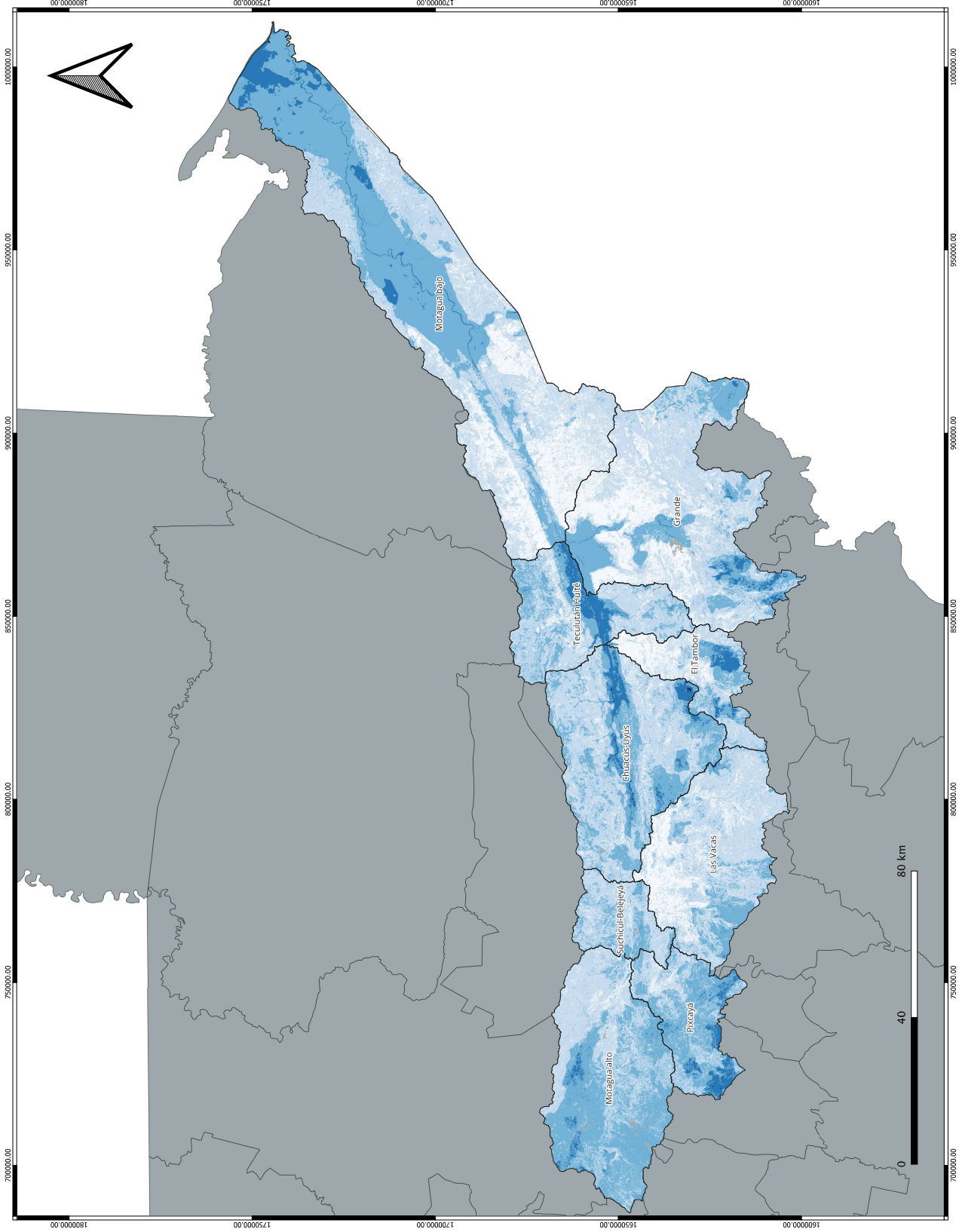


Subcuenca	Área (ha)
Motagua Bajo	423062.544
Grande	249399.070
Teculután Huité	101501.513
El Tambor	60380.995
Chumate-Lyús	189209.640
Las Vacas	151341.148
Suchitlán-Bellevé	45442.999
Pixcayá	74508.805
Motagua Alto	173964.678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

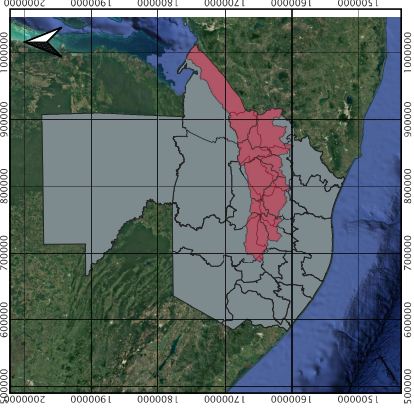
Escala: 550000	Mapa 2	Fecha 2026-01-03
-------------------	-----------	---------------------

Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zecapa, Chiquimula e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88°15' - 90°15' longitud Oeste
14°30' - 15°30' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator (UTM)

EPSG:32615 WGS 84 / UTM zone 15N

Nivel de Recarga Participativo Banda 1 (Gray)

5

1

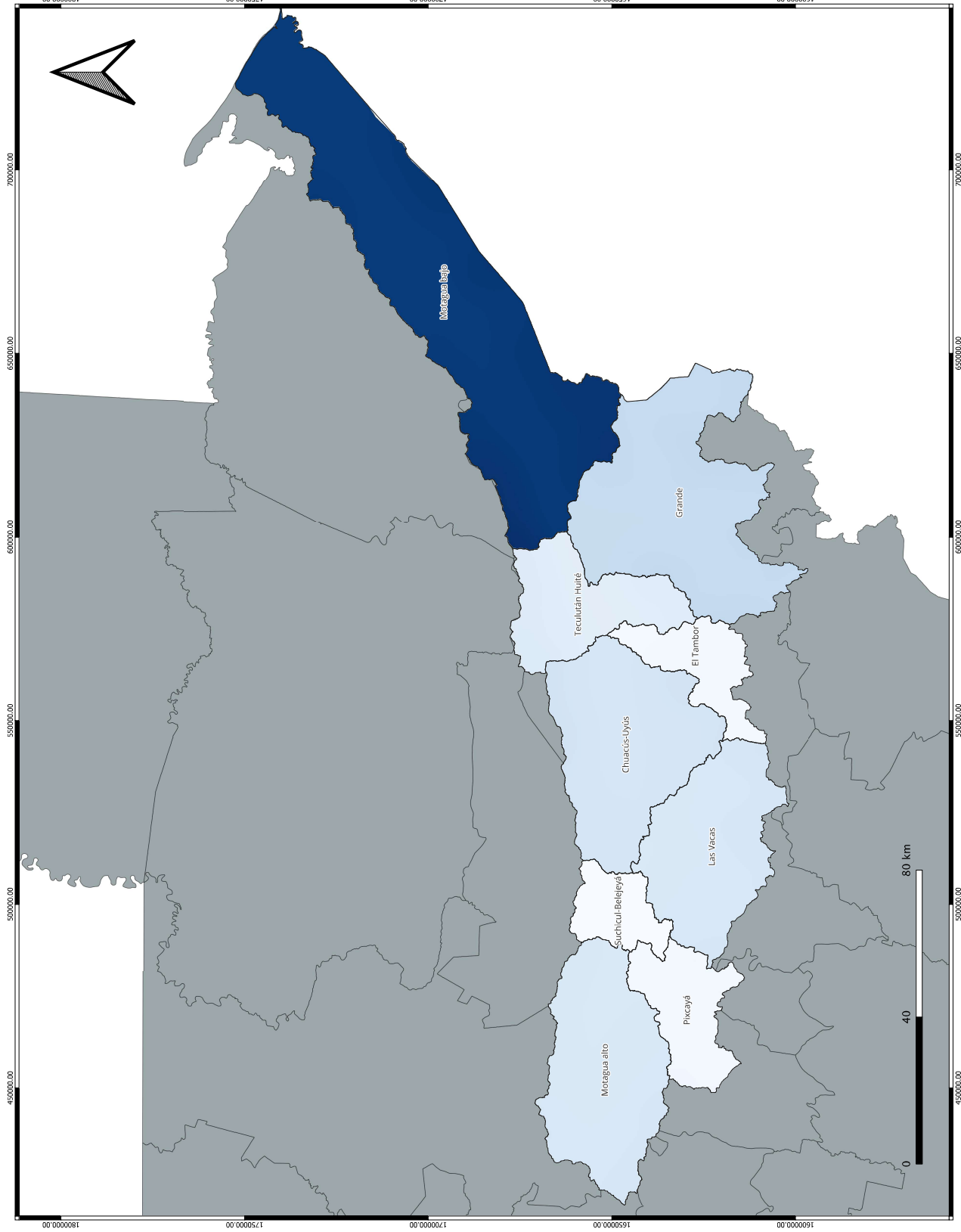
Subcuenca	Área (ha)
Motagua Bajo	423062,544
Grande	249598,070
Tecululán Huité	101501,513
El Tambor	60380,995
Chuaquis-Luyis	189209,640
Las Varas	151341,148
Suchitucú-Belejeví	45442,999
Puxayá	74508,805
Motagua Alto	173964,678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

Escala: 550000 Mapa 3 Fecha 2026-01-03

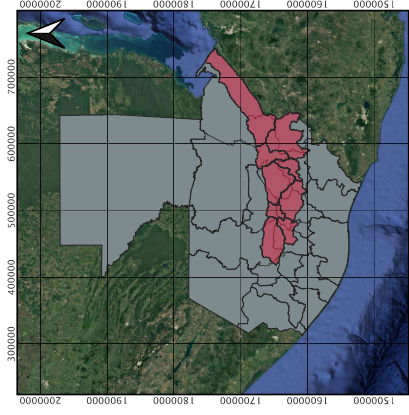
Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres

RECARGA HÍDRICA MÉTODO EMPÍRICO "TURC"



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zacapa, Chiquimula e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88°15' - 90°15' longitud Oeste
14°30' - 15°50' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator
ESRI: 103598 GTM

TURC
Tasa de recarga promedio (mm/año)
Banda 1 (Gray)
7,153.280273
36.53756

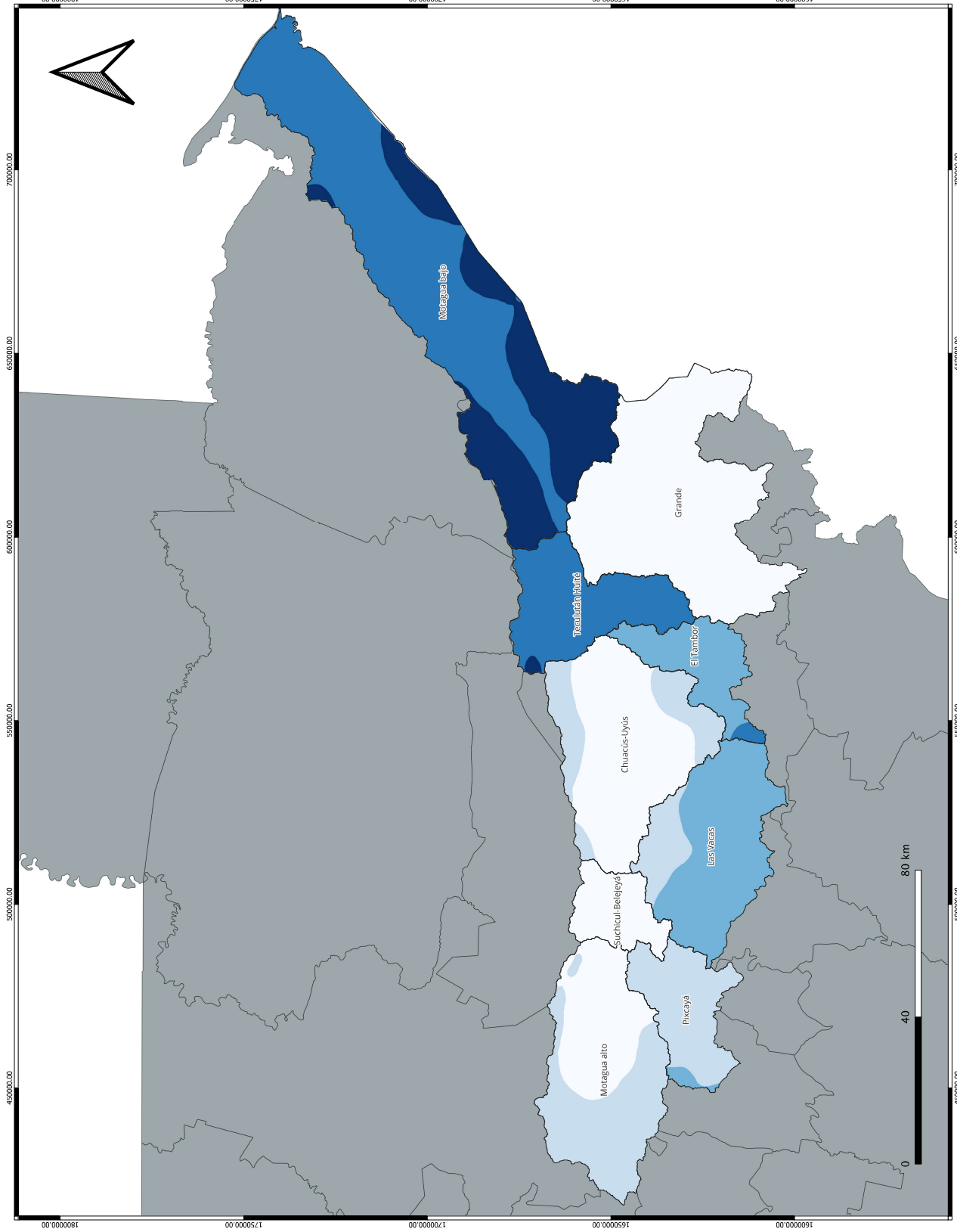
Subcuenca	Área (ha)
Motagua Bajo	423062.544
Grande	249395.070
Teculután Huité	101501.513
El Tambor	60380.995
Chuacús-Uyús	189209.640
Las Vacas	151341.148
Suchitcú-Belejevá	45442.999
Pixcayá	74508.805
Motagua Alto	173964.678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

Escala: 550000 Mapa 4 Fecha 2026-01-04

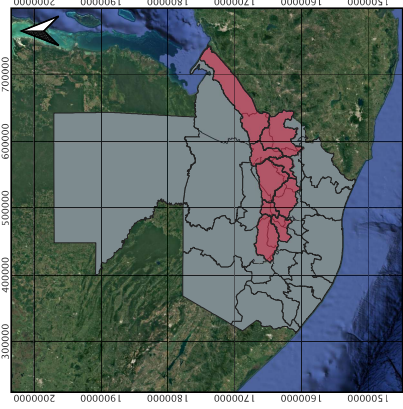
Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres

RECARGA HÍDRICA MÉTODO EMPÍRICO "TURC"



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zacapa, Chiquimula e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88°15' - 90°15' longitud Oeste
14°30' - 15°50' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator
ESRI: 103598 GTM

TURC
Nivel de Recarga Turc
Banda 1 (Gray)



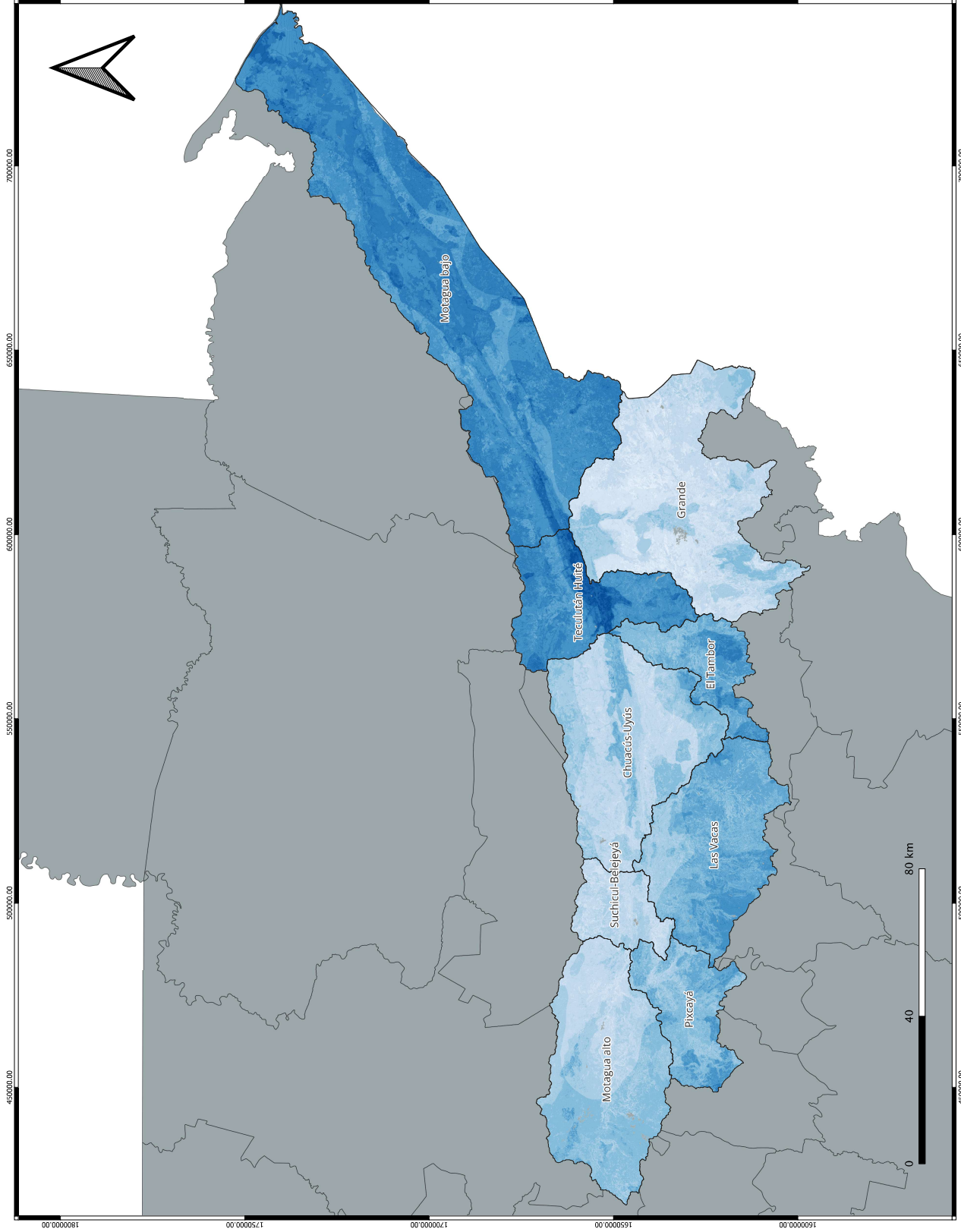
Subcuenca	Área (ha)
Motagua Bajo	423062.544
Grande	249399.070
Teculután Huité	101501.513
El Tambor	60380.995
Chuacús-Uyús	189209.640
Las Víceas	151341.148
Suchicuil-Belejevá	45442.999
Pixcayá	74508.805
Motagua Alto	173964.678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

Escala: 550000 Mapa 5 Fecha 2026-01-04

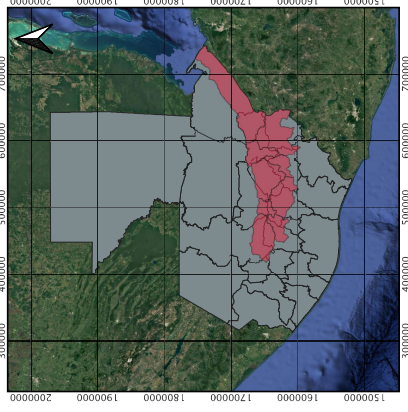
Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres

POTENCIAL DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA



Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Motagua

La cuenca del río Motagua se localiza en el oriente de Guatemala y constituye la cuenca hidrográfica más extensa del país. Drena hacia el mar Caribe y abarca parcialmente los departamentos de Guatemala, El Progreso, Zacapa, Chiquimula e Izabal.



Extensión geográfica del área de estudio:
88°15' - 90°15' longitud Oeste
14°30' - 15°50' latitud Norte

Proyección Universal Transverse Mercator
ESRI:103598 GTM

Potencial de Recarga Hídrica Banda 1 (Gray)

4.666666

1

Subcuenca	Área (ha)
Motagua Bajo	423062.544
Grande	249399.070
Teculután Huíté	101501.513
El Tambor	60380.995
Chuaucús-Uyús	189209.640
Las Vacas	151341.148
Suchicil-Belejevá	45442.999
Pixcayá	74508.805
Motagua Alto	173964.678

Cuenca del Río Motagua, Guatemala

Escala: 550000 Mapa 6 Fecha 2026-01-04

Elaborado por:
Liliana Michelle Cáceres