



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO**

MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

PROYECTO DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA DE LA SUBCUENCA DEL
RÍO MANCHAGUALA PARA DETERMINAR LA OFERTA Y DEMANDA
HÍDRICA ACTUAL Y FUTURA DE LA COMUNIDAD DE COFRADÍA,
MUNICIPIO DE SAN PEDRO SULA, DEPARTAMENTO DE CORTÉS,
HONDURAS**

IVAN EDGARDO GARCIA MERCADO

SAN PEDRO SULA, CORTÉS, HONDURAS C.A.

2023

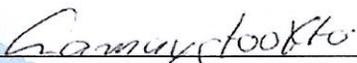
Este trabajo de final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador del estudiante, como requisito para optar por el grado de

División de Educación

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FIRMANTES:





José Ney Ríos Ramírez, M.Sc.

Director Principal del Trabajo de Graduación



Eris Edgardo Pórtela Fajardo, M.Sc.

Miembro Comité Asesor del Trabajo de Graduación



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.

Decana, a.i. de la Escuela de Posgrado



Iván Edgardo García Mercado

Candidato

Escuela de Posgrado

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, Ivan Garcia Enamorado y Mirna Rosa Mercado Ramos. Agradezco su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios que han hecho para que pueda alcanzar mis metas académicas. Su ejemplo de dedicación, perseverancia y valores ha sido fundamental en mi camino hacia el éxito. Con profunda gratitud, les dedico este logro como un tributo a su influencia y como muestra de mi reconocimiento por todo lo que han hecho por mí.

A mi abuela Mercedes Enamorado Reyes, quien fue la forjadora de todos los valores y enseñanzas que me han permitido enfrentar los desafíos de la vida. Agradezco su constante apoyo, amor y las lecciones sobre el esfuerzo y la perseverancia que han sido fundamentales para alcanzar mis logros académicos. Con profunda gratitud, le dedico este trabajo como un testimonio de su influencia y guía en mi camino hacia el éxito

A mi tío Abog. Juan Vicente Raudales, mi tía Marta Soledad García, mi tía Hilda Cruz García y mis primos Juan, Eli y Andrea. Agradezco su sabiduría, apoyo incondicional, amor y motivación a lo largo de mi vida. Su influencia ha sido fundamental en mi formación académica y profesional y personal. Con cariño y gratitud, les dedico este logro.

Agradecimientos.

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas palabras son para ustedes. A mis amistades por todo su cariño, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, unas buenas, otras malas, otras locas.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi amiga y mentora, M.Sc. Karla Diaz, por su invaluable apoyo y orientación durante la culminación de este proceso de formación educativa. Tu experiencia, comentarios y motivación fueron fundamentales para el éxito de mi culminación educativa. Gracias por tu amistad y por estar presente en cada paso del camino. Tu guía y apoyo hicieron una diferencia significativa en este logro.

También agradezco al M.Sc. Ney Ríos por haber desempeñado un papel fundamental como uno de mis más destacados catedráticos durante mi travesía académica en esta maestría. Su dedicación y habilidades pedagógicas excepcionales han sido una fuente constante de inspiración para mí. Además, deseo reconocer y agradecer sinceramente el apoyo invaluable que el M.Sc. Ney Ríos me ha brindado al desempeñar el papel de asesor en mi proyecto de graduación. Su orientación experta, paciencia y compromiso han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

A mi amigo M.Sc. Eris Edgardo Portela, por darme el apoyo condicional y las herramientas y asesoría de proyecto de graduación.

Gracias al Instituto de Conservación Forestal, he tenido la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y contribuir a la conservación y manejo sostenible de los bosques. Su compromiso con la protección del medio ambiente y la promoción de prácticas forestales responsables es verdaderamente inspirador.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación del tema	2
1.3 Importancia	3
1.4 Objetivo general.....	3
1.5 Objetivos específicos	3
2 Marco referencial	5
2.1 Ciclo Hidrológico.....	5
2.2 Sistema Hidrológico	6
2.3 Cuenca Hidrográfica	7
2.3.1 Función de una cuenca hidrográfica	7
2.3.2 Parámetros morfométricos y fisiográficos de una cuenca hidrográfica	8
2.3.1 Parámetros asociados a la forma de la Cuenca	8
2.4 Balance hídrico.....	9
3. Metodología	13
3.1 Ubicación del área de estudio	13
3.2 Descripción del área de estudio	14
3.3 Procedimiento metodológico.....	15
3.3.1 Metodología para caracterización morfométrica	15
3.3.2 Metodología para determinar el balance hídrico	15
3.4 Demanda de Agua.....	17
3.4 Resultados esperados.....	17
3.4.1 Características Morfométricas	17
3.4.2 Balance hídrico	22
3.4.3 Oferta y demanda hídrica actual y futura	40
5. Conclusiones	44
6. Recomendaciones	44
7. Bibliografía.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	5
Figura 2. Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas.....	6
Figura 3. Cuenca hidrográfica y su sistema fluvial.....	7
Figura 4. Esquema de balance hídrico.....	10
Figura 5. Principales tipos de precipitación.....	11
Figura 7. Ubicación hidrográfica de la subcuenca río Manchaguala.....	13
Figura 8. Cobertura del suelo de la Subcuenca del río Manchaguala.....	14
Figura 9 Mapa de Elevaciones de la Subcuenca del Rios Manchaguala.....	19
Figura 10 Mapa de Orden de los Cauces, Subcuenca Rio Manchaguala.....	20
Figura 11 Mapa Hipsométrico de la Subcuenca del Rio Manchaguala.....	21
Figura 12 Delimitacion de la Subcuenca Rio Manchaguala en Qswat.....	24
Figura 13 Capas que definen las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológicas de la Subcuenca Rio Manchaguala en Qswat.....	25
Figura 14 Importación de estaciones mete reológicas al Swat+Editor meteorológicas.....	26
Figura 15 Importación de datos meteorológicos mensuales al Swat+Editor.....	27
Figura 16 Diagrama del Balance Hídrico en la subcuenca del Rio Manchaguala.....	28
Figura 17 Grafico de la precipitación media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	30
Figura 18 Mapa de precipitación media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	30
Figura 18 Mapa de precipitación (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	30
Figura 19 Grafico de la escorrentía superficial media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	31
Figura 20 Mapa de Flujo Lateral (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	32
Figura 20 Mapa de Escorrentía Superficial (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	32
Figura 21 Grafico del flujo lateral media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	33
Figura 22 Mapa de Flujo Lateral (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	33
Figura 23 Grafico de la Percolacion (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	34
Figura 24 Mapa de percolación (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	35
Figura 25 Grafico del comportamiento del Acuífero (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	36
Figura 21 Grafico de recarga de acuíferos (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	36
Figura 26 Mapa de distribución de acuíferos (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	36
Figura 27 Grafico de la evapotranspiración media anual (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	37
Figura 28 Mapa de evapotranspiración (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	37
Figura 29 Grafico de la Producción de Agua (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala.....	38

Figura 30 Mapa de producción de agua (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala	38
Figura 31 Grafico del Caudal de agua (m3/s) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala	39
Figura 32 Mapa de Caudal de Agua (m3/s) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala	40
Figura 33 Grafico del rendimiento hídrico (m3/s) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala	41
Figura 34 Mapa de producción de agua (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala	42

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.Cobertura de suelo Subcuenca Rio Manchaguala	14
Cuadro 2. Parámetros Morfométricos de la Sub Cuenca del Rio Manchaguala	22
Cuadro 3. Base de Datos para la modelación hidrológica de la Sub Cuenca del Rio Manchaguala	23
Cuadro 4. Datos hidrológicos, obtenidos de la simulación con SWAT+	29
Cuadro 5. Datos rendimiento hídrico de la Subcuenca del Rio Manchaguala, obtenidos de la simulación con SWAT+.....	40
Cuadro 6. Oferta y demanda hídrica de la comunidad de Cofradía, San Pedro Sula, Cortes de la Subcuenca del Rio Manchaguala.....	43

Lista de Acrónimos, Abreviaturas y Unidades

CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

ZRM - Zona de Reserva Merendón

UNAH-VS - Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Valle de Sula

CNP+HL - Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras

ASHSPS - La alianza por la seguridad hídrica de San Pedro Sula

SIG - Sistemas de Información Geográfica

HRU – Unidades de Respuesta Hidrológica

Dep- Profundidad del cauce en metro

ETP - Evapotranspiración Potencial

ETR - Evapotranspiración Real

hab - Habitantes

kc - Coeficiente de Compacidad

kf - Factor de Forma

km - Kilómetros

km² - Kilómetros cuadrados

l/seg - Litros por segundo

m/s - Metros por segundo

m³/s - Metros cúbicos por segundo

MED - Modelo de Elevación Digital

Mm - Milímetros

Msnm - Metros sobre el nivel medio del mar

Resumen

En la Zona de Reserva El Merendón (ZRM) se encuentra la subcuenca del río Manchagua que tienen a su vez muchos ramales y zonas de nacimiento de fuentes de agua que deben ser conservadas a perpetuidad, de ello depende en gran medida la conservación, pero también la seguridad hídrica para los residentes y las industrias en el Valle de Sula.

Fisiográficamente la Zona de Reserva del Merendón, se encuentra en la Cordillera del mismo nombre, limitando al oeste con el Parque Nacional Cusuco localizado en el municipio de Quimistán, departamento de Santa Bárbara, al Este con las ciudades de San Pedro Sula, al Norte con el municipio de Choloma y al Sur con el Valle de Chamelecón, esta formación montañosa presenta elevaciones que van hasta los 1,800 msnm, con pendientes que van desde 10 hasta 50%. (GA-MSPS; ICF, 2020)

En el presente estudio detalla los procedimientos y resultados de los modelos espaciales generados y la caracterización morfométrica obtenida a través de software SIG (Sistemas de Información Geográfica) y el análisis de coberturas de información vectorial y ráster o capas de información espacial, que fueron obtenidas de fuentes oficiales y describen la complejidad del paisaje, ya que representan las variables determinantes en el análisis. Esta información permite a través de su manipulación, generar resultados para diversos escenarios donde se pueda identificar respuestas positivas o negativas en el territorio, con respecto a la capacidad de Producción Agua, Oferta hídrica, con base en esto se procesó la información para identificar la condición actual del territorio.

Abstract

In the El Merendón Reserve Zone (ZRM) is the sub-basin of the Manchaguala river, which in turn has many branches and source areas of water sources that must be conserved in perpetuity, conservation depends to a large extent on this, but also water security for residents and industries in the Sula Valley.

Physiographically, the Merendón Reserve Zone is located in the Cordillera of the same name, bordering to the west with the Cusuco National Park located in the municipality of Quimistán, department of Santa Bárbara, to the east with the cities of San Pedro Sula, to the north with the municipality of Choloma and to the south with the Valley of Chamelecón, this mountainous formation presents elevations that go up to 1,800 meters above sea level, with slopes that go from 10 to 50%. (GA-MSPS; ICF, 2020)

In the present study, the procedures and results of the spatial models generated and the morphometric characterization obtained through GIS (Geographic Information Systems) software and the analysis of vector and raster information coverage or layers of spatial information, which were obtained from official sources and describe the complexity of the landscape, since they represent the determining variables in the analysis. This information allows, through its manipulation, to generate results for various scenarios where positive or negative responses can be identified in the territory, with respect to the capacity of Water Production, Water Supply, based on this, the information was processed to identify the condition current of the territory.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La subcuenca del río Manchaguala se localiza en la jurisdicción del municipio de San Pedro Sula, Departamento de Cortés, al interior de los límites de la Zona de Reserva del Merendón (ZRM), zona declarada bajo la categoría de Zona Productora de Agua del municipio de San Pedro Sula bajo Decreto Legislativo No. 46-90 publicado en la gaceta el 12 de Julio del año 1990. Cuenta, además, con protección legal del Reglamento de la Ley del Merendón Acuerdo 156-94, y Reforma al Decreto 46-90 (Decreto 3342013) publicado el 22 de enero del 2014. Y demás leyes de carácter ambiental, y Decretos Ejecutivos vigentes que están relacionados con la preservación y protección de los recursos naturales.

Como parte de la ZRM el manejo y conservación de los recursos naturales de la subcuenca del río Manchaguala ha estado supeditado a las directrices emitidas en el Plan de Manejo existe en la zona. Se identificó que solamente se contó con un Plan de Manejo "Zona de Reserva El Merendón" para el periodo 2010-2015. No obstante, con la dinámica cambiante en esta zona, la Municipalidad de San Pedro Sula en coordinación con el Instituto Nacional de Conservación Forestal (ICF) tuvo a bien formular el nuevo Plan de Manejo "Zona de Reserva Merendón, periodo 2019-2031.

Consiente que la subcuenca del río Manchaguala cuenta con una alta diversidad de flora y fauna en sus cinco (5) ecosistemas. Aspectos que son monitoreados por la Universidad Nacional Autónoma de Honduras en el Valle de Sula (UNAH-VS) a través del departamento de Biología. Siendo su estudio más reciente "Indicadores Biológicos de la Calidad de Agua". Además, posee una gran riqueza hidrológica constituyéndose en la principal fuente abastecedora de agua para la comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, departamento de Cortes y las comunidades dentro del área; así como el aporte hidrológico de la zona de Merendón a la ciudad de San Pedro Sula, se han efectuado varios estudios en la subcuenca dentro de los que destacan: Riesgos hídricos en la zona, resultados contemplados en el estudio "Análisis de Seguridad Hídrica en el Municipio de San Pedro Sula, Cortés, Honduras, formulado por BEINSA-2017"; "Diagnóstico de la Cuenca de Manchaguala con Enfoque de Gestión de Riesgo del Recurso Hídrico, San Pedro Sula, Honduras" elaborado por el CATIE, 2017"; "Evaluación de Altos Valores de Conservación de la subcuenca río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortés, Honduras, elaborado por Ambiente, Biodiversidad, Conservación, 2018"; "Proyecto Desarrollo de Indicadores Biológicos de Calidad de Agua para la Zona de Reserva Merendón, elaborado por UNAH,2018".

La alianza por la seguridad hídrica de San Pedro Sula (ASHSPS) es una plataforma de organizaciones de carácter multisectorial y voluntario, que colaboran para coordinar y promover esfuerzos que contribuyan a la conservación y el manejo de las cuencas de la zona de reserva del Merendón y que por ende aportan a la seguridad hídrica de San Pedro Sula con transparencia, responsabilidad y confianza, está impulsando con el apoyo de la Cooperación Alemana GIZ y la ejecución técnica del CNP+LH el programa de desarrollo de capacidades en gestión hídrica empresarial cuyo objetivo es Desarrollar y fomentar capacidades en representantes de empresas en temas relacionados al riesgo hídrico desde el punto de vista de consumo del recurso, gestión de programas de reducción de consumo y programas de inversión en la protección del recurso agua.

En este sentido la Alianza para la Seguridad Hídrica de San Pedro Sula, está interesada en realizar los estudios hidrológicos de la subcuenca del Río Manchagua, con la intención de elaborar un plan de manejo de uso sostenible que garantice el uso y aprovechamiento recursos naturales en beneficio de la población de San Pedro Sula.

1.2 Justificación del tema

El agua es un recurso importante y todos tienen derecho a acceder a ella; en Centroamérica gran parte de la población no cuenta con este elemento y su calidad es deficiente. En consecuencia, al acelerado crecimiento poblacional y demanda al sector agropecuario e industrial está exigiendo una mayor demanda en cuanto al abastecimiento del recurso hídrico. En este sentido, se hace necesario tomar medidas efectivas para asegurar la disponibilidad de agua en suficiente cantidad de buena calidad para cubrir esta demanda, a pesar de que el área cuenta con un estatus de protección decretado por el estado de Honduras por decreto legislativo 46-90, la subcuenca se encuentra degradada debido a múltiples factores insostenibles llevados a cabo en las comunidades asentadas, como lo es el avance de la frontera agrícola y ganadera, cambiando el uso de suelo zona de recarga hídrica, incendios forestales, extracción ilegal de productos y sub productos forestales. Estas acciones se revierten en amenazas a la seguridad hídrica de los gobiernos locales, industrias y las comunidades por igual.

La población de la parte media y alta de la subcuenca del río Manchagua está consciente que el uso inapropiado de los recursos naturales en la zona afecta la cantidad y calidad de agua, los pobladores perciben que existe reducción de la disponibilidad de agua, aumento de fuentes de contaminación del agua, se incrementa la demanda de agua potable y aumenta la vulnerabilidad de los suelos propensos a derrumbes y deslizamientos.

Los impactos provocados por el mal manejo de los recursos naturales de la subcuenca del río Manchagua no permiten que pueden escapar de su actual realidad, donde la agricultura ha sido tradicionalmente la base económica y productiva en la subcuenca, esto se refleja en los diagnósticos biofísicos y socioeconómicos que se han realizado en la zona, de tal manera que los problemas encontrados dentro de la subcuenca son causados a través de la presión demográfica, a falta de una planificación para la ocupación del territorio bajo un proceso de ordenamiento territorial, genera una sobre explotación de los recursos naturales en la subcuenca, causando daños en la salud y el medio ambiente.

A medida que incrementa la actividad antropogénica, ejerce una presión sobre los usos de los recursos hídricos, se refleja en los cambios cualitativos y cuantitativos en los parámetros característicos de los recursos hídricos y el proceso de formación de escorrentía.

Debido a lo anterior, es necesario mejorar significativamente el conocimiento de los recursos hídricos de la subcuenca del río Manchagua, su estado actual referido a la variabilidad temporal y espacial del régimen hidrológico.

Es importante mencionar que la subcuenca del río Manchagua, a pesar de ser la ser el área que abastece de agua a gran parte de la zona del valle de sula, zona que es de vital importancia en la provisión de agua no solo para el consumo humano sino también para el desarrollo industrial y agrícola de la zona, quienes aportan el 68% del PIB de Honduras. Esta investigación genera una herramienta de información científica para orientar las acciones e integrar a los diferentes usuarios en la conservación, protección y manejo del

recurso hídrico en la cuenca de Manchagua. Asimismo, aporta una base sólida de información hidrogeológica que sirva como punto de partida para el desarrollo futuro de un plan de manejo integral de la cuenca con énfasis en los recursos hídricos.

1.3 Importancia

Los estudios hidrológicos de la subcuenca del río Manchagua tienen como principal objetivo determinar y cuantificar la cuenca a través de estudios de sus procesos operativos. Estos estudios hidrológicos incluyen factores meteorológicos, hidrológicos y topográficos que contribuyen a la escorrentía superficial, el objetivo de realizar estos estudios es con el fin de apoyar las decisiones sociales, técnicas y políticas regionales relacionadas con la gestión y manejo de las cuencas hidrográficas. La subcuenca es la principal fuente de abastecimiento de agua para la creciente comunidad de Cofradía, además, existe una degradación acelerada debido a la sobre explotación de los recursos naturales a través del avance de la frontera agrícola ganadera, a pesar de ser parte de una de las áreas productoras de agua del Valle de Sula que abastece de agua a la comunidad de Cofradía.

Los estudios hidrológicos son de mucha importancia de brindar información hidrológica de la cuenca con la información hidrológica de la cuenca que es de suma importancia para el desarrollo humano e industrial del Valle de Sula. En este sentido la Alianza para la Seguridad Hídrica de San Pedro Sula siendo una plataforma de organizaciones de carácter multisectorial y voluntario, le permite realizar la cogestión en el manejo de los recursos hídricos de la Zona de Reserva Merendón, donde se encuentra ubicada la subcuenca del río Manchagua, lo cual le permitirá orientar acciones a funcionamiento de los consejos de cuencas que se pueden formar en de Agua Limpia y Saneamiento, Salud y Bienestar para los consumidores del recurso hídrico de la Sub Cuenca, Acción por el Clima y sobre todo salvaguardar la Vida de los Ecosistemas Terrestres.

1.4 Objetivo general

Determinar, mediante modelación hidrológica distribuida, la oferta y demanda hídrica actual y futura en la comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, departamento de Cortés, Honduras.

1.5 Objetivos específicos

- Determinar la morfometría de la subcuenca del río Manchagua.
- Realizar el balance hídrico de la subcuenca del río Manchagua.
- Calcular la oferta y demanda hídrica actual y futura para consumo humano que la subcuenca del río Manchagua ofrece a la población de la comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, Cortes.

1.1 Preguntas de investigación

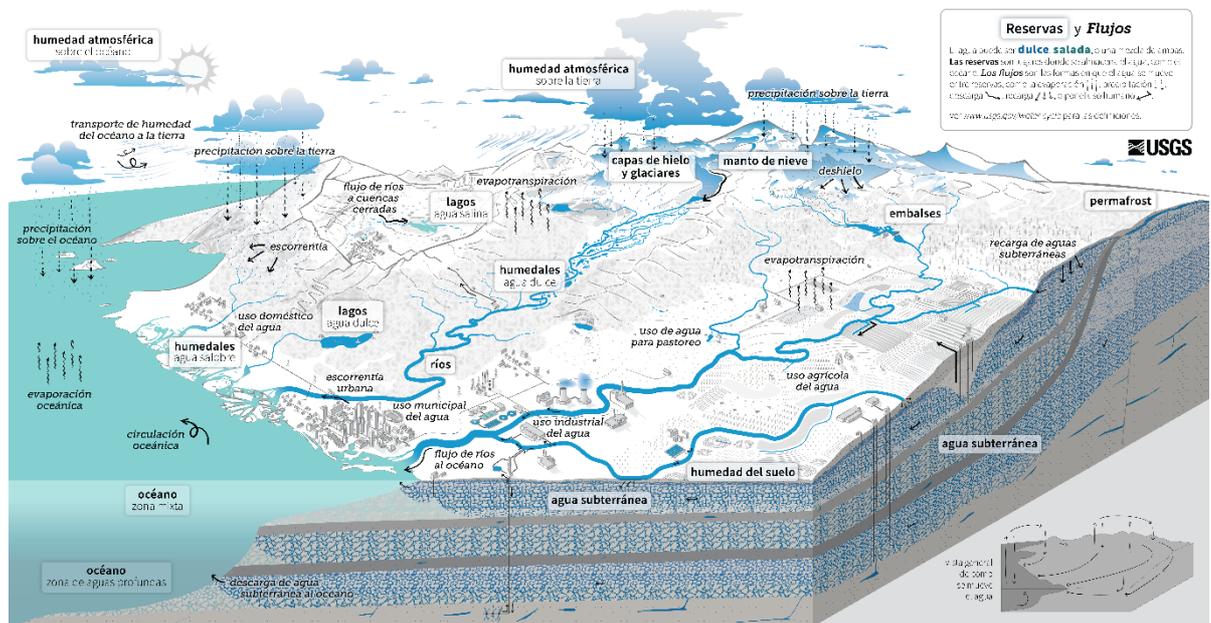
Objetivo Específico (OE)	Pregunta (s) de investigación	¿Cómo Resolverla (s)?
<p>Determinar la morfometría de la subcuenca del río Manchaguala.</p>	<p>1. ¿Cómo se determinará la Morfometría de la Subcuenca río Manchaguala?</p>	<p>En base a un modelo de elevación digital del terreno (ráster) se determinarán los valores de las variables para realizar los cálculos morfométricos de la Subcuenca Manchaguala, utilizando sistemas de información geográfica (SIG)</p>
<p>Realizar el balance hídrico de la subcuenca del río Manchaguala.</p>	<p>2. ¿Qué software se utilizará para realizar la modelación del Balance Hídrico de la subcuenca del río Manchaguala?</p>	<p>3. Se utilizará un software de modelación hidrológica Swat para poder modelar el balance hídrico se deberá de contar con información Geoespacial y Meteorológicas.</p>
<p>Calcular la oferta y demanda hídrica para consumo humano que la subcuenca del río Manchaguala ofrece a la población de la comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, Cortes.</p>	<p>4. ¿Cómo determinara la Oferta y demanda de agua para la comunidad de Cofradía?</p>	<p>Mediante la modelación hídrica se obtendrá la oferta hídrica de la subcuenca río Manchaguala, y para determinar la demanda futura se utilizará el siguiente modelo matemático (informática, s.f.):</p> $Pf = Pa \left(1 + \frac{rt}{1000} \right)$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pf = población futura Pa = Población actual r = coeficiente de crecimiento anual por 1,000 t = tiempo en años

2 Marco referencial

2.1 Ciclo Hidrológico

La definición de hidrósfera se basa en el movimiento permanente o movimiento de masas de agua entre la biósfera, la atmósfera, la litósfera y la hidrósfera en diferentes estados (líquido, sólido, gaseoso) (Ordoñez, 2011).

Según Campos, 1998, el ciclo del agua comienza con la evaporación del agua en el océano, formándose vapor de agua que es llevado al continente por el viento. En condiciones climáticas templadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, lo que provoca precipitaciones. No toda la precipitación se recibe en el suelo, ya que una parte se evapora en el otoño y otra precipitación es retenida (contenida) por la vegetación, edificios, caminos, etc. El agua que circula sobre una superficie y llega a una superficie que desemboca en un río, lago, embalse o mar (escorrentía superficial). Existe una tercera parte de la precipitación que penetra bajo tierra (permeación) es la encargada de rellenar los huecos y fisuras del medio poroso. En el caso de una gran cantidad de infiltración de agua, parte de ella cae para reponer las aguas subterráneas, y el volumen de infiltración es pequeño, el agua se retiene en la zona no saturada (humedad del suelo), donde esta capa vuelve al suelo o a la atmósfera por evaporación del suelo. o transpiración de las plantas (transpiración).



El Ciclo del Agua

El ciclo del agua describe cómo se encuentra el agua en la Tierra y cómo se mueve. El agua se almacena en la atmósfera, en la superficie terrestre y debajo del suelo. Puede ser un líquido, un sólido o un gas. El agua líquida puede ser dulce, salada o sin medida (salobre). El agua se mueve entre los lugares donde está almacenada. El agua se mueve a grandes escalas y a muy pequeñas escalas. El agua se mueve en forma natural y decidida por las acciones humanas. El uso humano del agua, a efectos de cómo se almacena el agua, cómo se mueve y qué tan limpia es.

Las reservas almacenan agua. El 98% de toda el agua se almacena en los océanos y en la tierra. En la tierra, el agua se almacena en forma líquida en lagos de agua dulce, embalses y ríos, y en forma de hielo y nieve. El agua dulce se almacena en forma líquida en lagos de agua dulce, embalses y ríos, y en forma de hielo y nieve en los polos de la Tierra. El agua se mueve en forma de vapor de agua en la atmósfera y en forma de precipitación sobre el océano y la tierra. En el suelo, el agua se almacena como humedad del suelo y el agua que se almacena como permafrost y el agua que se almacena como humedad del suelo. Más profundo bajo tierra, el agua se almacena en acuíferos subterráneos, dentro de las grietas y poros en las rocas.

Los flujos mueven el agua entre las reservas. A medida que se mueve, el agua puede cambiar de forma entre líquido, sólido y gas. La circulación mueve el agua en los océanos y transporta el vapor de agua en la atmósfera. El agua se mueve entre la atmósfera y la superficie a través de la evaporación, la evaporotranspiración y la precipitación. El agua se mueve a través de la superficie a través del deshielo, la escorrentía y el flujo de ríos. El agua se mueve hacia abajo a través de la infiltración o el recarga de agua subterránea. Bajo tierra, el agua subterránea fluye a través de las rocas. Puede regresar a la superficie a través de la descarga natural de agua subterránea a los ríos, al océano y de los manantiales.

Algunos usos del agua incluyen ríos, construcciones de represas para almacenar agua. Otros usos del agua se encuentran en la agricultura y el pastoreo de ganado. La agricultura y el pastoreo de ganado utilizan el agua para producir alimentos y fibras. La agricultura y el pastoreo de ganado utilizan el agua para producir alimentos y fibras. El agua se mueve a través de la infiltración y la precipitación. El agua se mueve a través de la superficie a través del deshielo, la escorrentía y el flujo de ríos. El agua se mueve hacia abajo a través de la infiltración o el recarga de agua subterránea. Bajo tierra, el agua subterránea fluye a través de las rocas. Puede regresar a la superficie a través de la descarga natural de agua subterránea a los ríos, al océano y de los manantiales.

Algunos usos del agua incluyen ríos, construcciones de represas para almacenar agua. Otros usos del agua se encuentran en la agricultura y el pastoreo de ganado. La agricultura y el pastoreo de ganado utilizan el agua para producir alimentos y fibras. El agua se mueve a través de la infiltración y la precipitación. El agua se mueve a través de la superficie a través del deshielo, la escorrentía y el flujo de ríos. El agua se mueve hacia abajo a través de la infiltración o el recarga de agua subterránea. Bajo tierra, el agua subterránea fluye a través de las rocas. Puede regresar a la superficie a través de la descarga natural de agua subterránea a los ríos, al océano y de los manantiales.

Figura 1. Ciclo hidrológico

Fuente: <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png?fbclid=IwAR0VjGalXxxZyWfXvPyaGGONcPivMZLQs7gRwq9Xuas1sWf2xqUEvRCuq>

2.2 Sistema Hidrológico

USGS, 2022 define que el ciclo del agua describe dónde ocurre el agua en el planeta y cómo se mueve. El agua se almacena en la atmósfera, de manera superficial y subterránea, el agua puede presentarse en tres procesos que pueden ser líquido, sólido o gaseoso, el agua líquida puede ser dulce, salada o mixta. El agua se mueve entre los lugares donde se almacena, se mueve a gran escala y a muy pequeña escala, el agua se mueve naturalmente debido a la actividad humana. El uso que hacen las personas del agua afecta dónde se almacena el agua, cómo se mueve y qué tan limpia es. El 96% del agua almacenada en los océanos es salina, en la tierra estas aguas salinas se almacenan en lagos, el agua dulce se almacena en lagos de agua dulce como ser, ríos, humedales o embalses artificiales, el agua en forma solida se encuentra almacenada en los glaciares y en los mantos de nieve, el vapor de agua es almacenado como humedad atmosférica.

Los flujos mueven el agua entre los almacenamientos, a medida que el agua se mueve, puede cambiar su proceso (líquido, sólido y gaseoso), en circulación, el agua de los océanos se mezcla y transporta el vapor de agua a la atmósfera, el agua se mueve entre la atmósfera y la superficie a través de la evaporación, la evapotranspiración y la precipitación, el agua se mueve bajo tierra por infiltración y recarga de aguas subterráneas esta fluye bajo tierra en capas subterráneas y puede regresar a la superficie a través de la filtración natural de aguas subterráneas en ríos, océanos y manantiales.

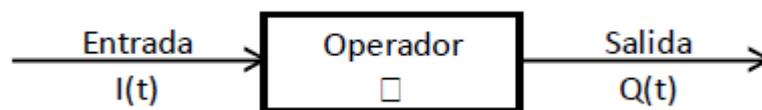


Figura 2. Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas

Según Cabrera, 2017 Este concepto se puede aplicar claramente a una cuenca hidrológica donde el agua ingresa por precipitación y otras formas; y algunos de ellos salen de la cuenca por su canal principal o por consumo de agua. Una vez que se entiende una cuenca como un sistema, necesitamos entender las interacciones que existen entre sus elementos; Por ejemplo, la deforestación insostenible en la cuenca alta del río puede provocar inundaciones durante la temporada de lluvias en la cuenca baja del río. Por lo tanto, debemos ser conscientes de los procesos hidrológicos que se están produciendo y de los mecanismos físicos que intervienen en ellos.

Estos procesos hidrológicos, presente en el ciclo del agua dentro de una cuenca se pueden caracterizar por:

- Debido a que no son lineales, tienen variaciones complejas en el espacio y el tiempo.
- Dado que no son estacionarios, se ven afectados por la ciclicidad y las tendencias.
- Porque son espacialmente variables debido a las diferentes propiedades del suelo, usos y climas a lo largo de la cuenca.
- Porque cambian con el tiempo en todas las escalas, ya sea horaria, diaria, mensual, etc.

Debido a esta variación, las mediciones de los procesos hidrológicos solo pueden considerarse como una fuente de información, y la comprensión de las leyes que rigen el ciclo hidrológico se vuelve cada vez más importante. En este punto, comenzamos a trazar cómo será nuestro modelo hidrológico; identificando los procesos y variables clave que influyen en la formación de flujos.

2.3 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como un terreno está rodeado por las partes más altas de montañas, laderas o cerros, tiene un sistema de drenaje superficial bien desarrollado que concentra el agua hacia un río principal que desemboca en el mar, lago u otros cuerpos de agua. La cuenca hidrográfica es entendida como un sistema en el medio ambiente, incluye las interrelaciones de los subsistemas social, económico, demográfico y biofísico (Faustino, J. 2000).

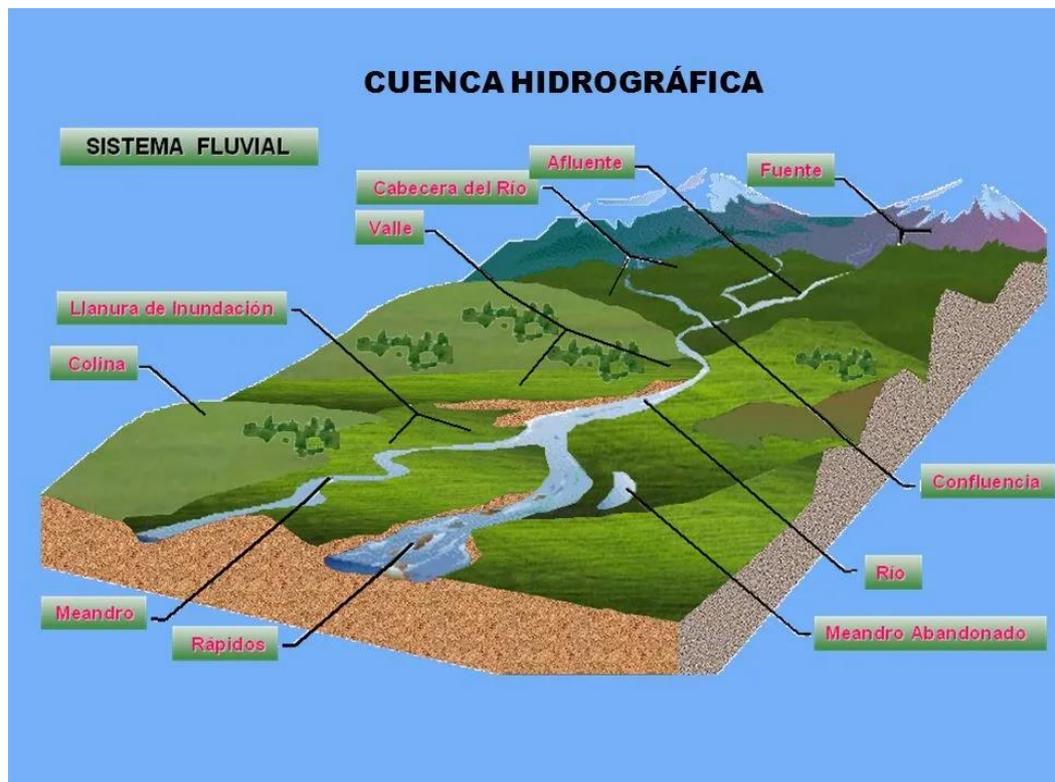


Figura 3. Cuenca hidrográfica y su sistema fluvial

Nota: Tomado de <http://cuencahidrograficamilia.blogspot.com/2016/04/cuencahidrografica-el-ambito-de-la.html>

2.3.1 Función de una cuenca hidrográfica

De acuerdo con Aguirre, N. 2007, Los procesos ecosistémicos describen el intercambio de flujos de materia y energía a través de la interconexión de elementos estructurales de un ecosistema que puede considerarse como un sistema: Dentro del área de captación existen factores hidrológicos, ecológicos, ecológicos y socioeconómicos, sus funciones se describen a continuación:

Función Hidrológica

- Captación de agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos.

- Almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.
- Descarga del agua como escurrimiento.

Función Ecológica

- Provee diversidad de sitios y rutas a lo largo de la cual se llevan a cabo interacciones entre las características de calidad física y química del agua.
- Provee de hábitat para la flora y fauna que constituyen los elementos biológicos del ecosistema y tienen interacciones entre las características físicas y biológicas del agua.

Función Ambiental

- Constituyen sumideros de CO₂.
- Alberga bancos de germoplasma.
- Regula la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos.
- Conserva la biodiversidad.
- Mantiene la integridad y la diversidad de los suelos

Función Socioeconómica.

- Suministra recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población.

Provee de un espacio para el desarrollo social y cultural de la sociedad.

2.3 Parámetros morfométricos y fisiográficos de una cuenca hidrográfica

Los estudios morfométricos de la cuenca están relacionados con una serie de variables lineales, superficiales, de relieve y de drenaje, este análisis nos permite conocer las tipologías físicas de la cuenca, su interpretación en sus funciones hidrológicas y establecimiento de parámetros para su adecuada gestión, conocer estas características morfométricas en una cuenca es de suma importancia para observar su comportamiento hidrológico a través tiempo. (Ríos et al. 2018)

2.3.1 Parámetros asociados a la forma de la Cuenca

Esta es la configuración geométrica de la cuenca es proyectada en el plano horizontal. La forma afecta el tiempo de respuesta de la cuenca, por lo tanto, el tiempo que tarda el agua en moverse a través de la red de drenaje y, en consecuencia, la forma del hidrograma como resultado de una cierta cantidad de lluvia. Para determinar la forma de la cuenca, se utilizan varios indicadores relacionados con la proporción del área perimetral, para explicar cuantitativamente la forma de la cuenca, se compara principalmente con las figuras geométricas conocidas de círculo, óvalo, cuadrado y rectángulo (Gálvez, 2011).

- **Área**
 - **Perímetro (P)**
 - **Longitud de la Cuenca (L)**
 - **Ancho de la Cuenca (B)**
 - **Elevación**
 - **Factor de Forma de Horton (Kf)**
 - **Coeficiente de Compacidad de Gravelius (kc)**
 - **Cota Mayor del Cauce (CMc)**
 - **Cota Menor del Cauce (Cmc)**
 - **Pendiente Promedio del Cauce (So)**
 - **Longitud del Cauce Principal (Lc)**
 - **Longitud del Cauce Hasta la Divisoria (Lf)**
 - **Orden de los Cauces**
 - **Densidad de Drenaje (Dd)**
 - **Tiempo de Concentración (Tc)**
-
- **Curva Hipsométrica**

2.4 Balance hídrico

El cálculo del balance hídrico consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de la cuenca, así como aquéllos de consumo y retorno que ocurren en su interior, para obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el que se cuantifican los flujos para uso doméstico en los distintos lugares que puede tomar, por ejemplo, la cantidad de agua que circula en los ríos, arroyos y canales; la cantidad de agua almacenada en lagos naturales y artificiales; en el pantano; humedad del suelo; agua contenida en los tejidos de los organismos vivos; todo esto también se puede describir como la cantidad de agua de la Cuenca. En general, se puede decir que una porción del agua que cae en un área determinada regresa a la atmósfera por evaporación directa o por transpiración de la vegetación de regreso a la atmósfera. La otra parte se aleja de la superficie de la cuenca Este flujo fluye a través de la red de drenaje hasta llegar a los canales principales en el mar, y el resto se filtra al suelo y se introduce en un sistema de agua subterránea o acuífero (Vásquez 2019).

Las **entradas de agua** a la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas:

- Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones;
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas;
- Transvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a:
- Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se sitúa en otra cuenca, esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos, donde se construyen

presas en varios de ellos, y se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica;

- Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial se encuentra fuera de la cuenca, esta situación es cada vez más frecuente, al crecer las ciudades, el agua limpia debe irse a buscar cada vez más lejos, con mucha frecuencia en otras cuencas. Un ejemplo muy significativo de esta situación es la conurbación de San Pablo, en el Brasil;

Las **salidas de agua** pueden darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego;
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.;
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos;
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas;
- Derivaciones para consumo humano, riego, industria, etc.
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, para fines prácticos, se suelen separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.

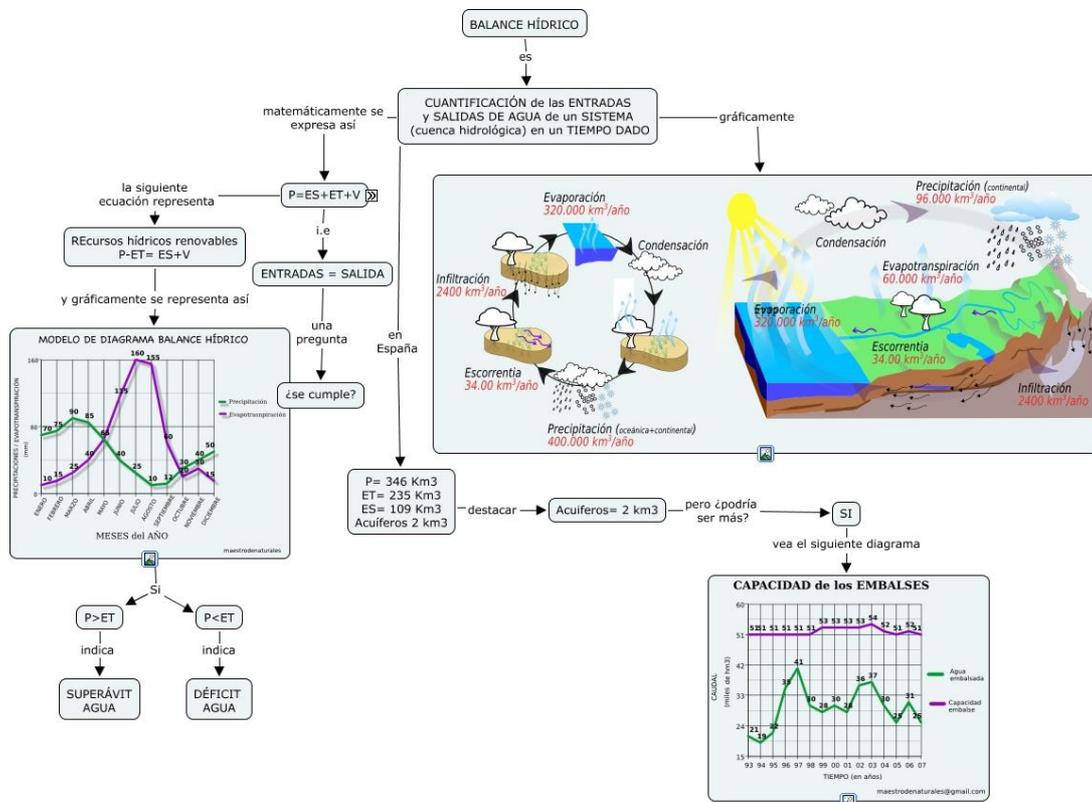


Figura 4. Esquema de balance hídrico

Fuente <https://cmapspublic.ihmc.us/rid=1LHPY5R8L-20PSTNP-XJ8/7.2%20>

- **La precipitación atmosférica**

Galvez, 2011 menciona que la precipitación se refiere a toda agua meteórica que cae a la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.), son causados por cambios en la temperatura o la presión. La precipitación es el único contribuyente importante al sistema hidrología continental.

La precipitación requiere la condensación del vapor de agua atmosférico. La saturación es una condición importante para desbloquear la condensación. Varios procesos termodinámicos son adecuados para saturar partículas atmosféricas inicialmente no saturadas y hacer que se condensen:

- Saturación y condensación isobárica (a presión constante),
- Saturación y condensación por presión adiabática,
- Saturación y condensación por presión de vapor de agua,
- Saturación por mezcla y turbulencia.

Existe varios tipos de precipitación:

- Precipitación convectiva.
- Precipitación orográfica.
- Precipitaciones frontales.

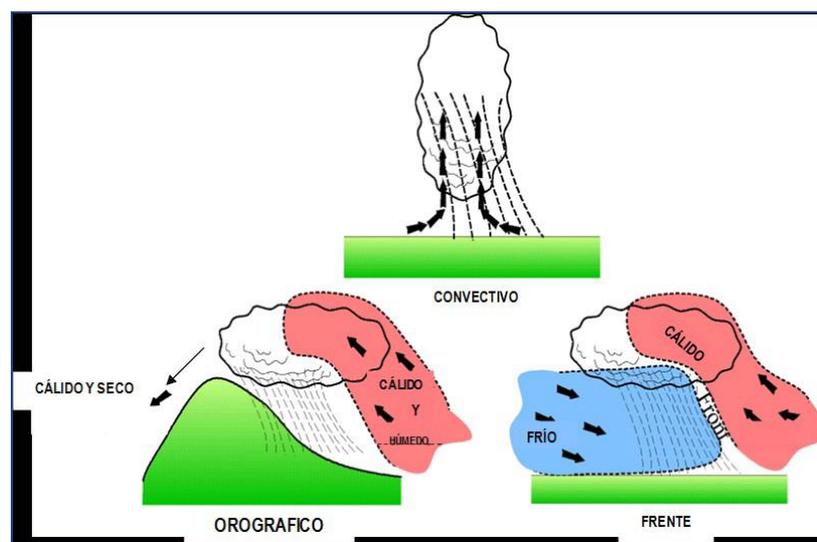


Figura 5. Principales tipos de precipitación

Fuente: Gálvez, J. J. (2011). Ciclo Hidrológico. Lima, Jr. Puno 450 - Lima, Perú.

- **Temperatura**

Esta variable juega un papel importante porque interfiere con todos los métodos empíricos y, en general, junto con la precipitación, son las únicas variables que pueden detectarse con total certeza en las estaciones horarias. Su análisis incluye su homogeneidad y características térmicas del área de estudio.

- **Evapotranspiración**

La evapotranspiración es la cantidad de agua que se devuelve a la atmósfera a través de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Su valor depende del agua realmente disponible, es decir, del agua que la tierra ha ahorrado para el consumo de la vegetación, y también del agua que absorbe el suelo.

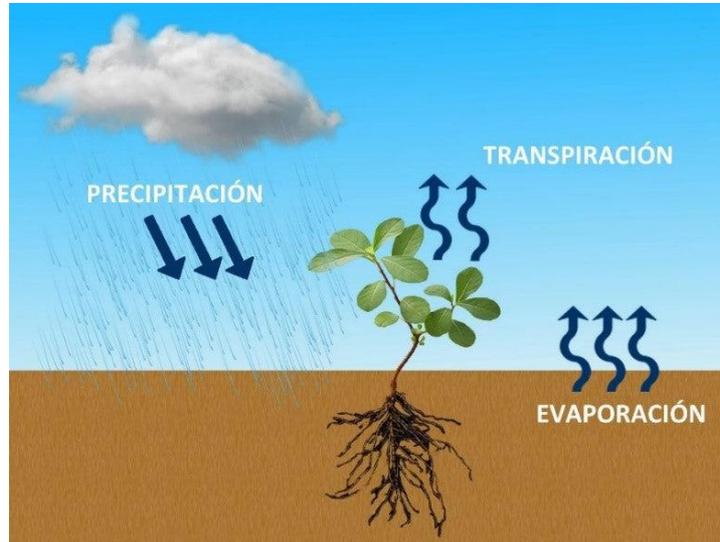


Figura 6. Evapotranspiración

Nota: Proceso de evapotranspiración, tomado de <https://blog.veto.cl/2020/10/31/la-importancia-de-la-evapotranspiración-en-la-agricultura/>

Los valores de intercepción de la precipitación de la vegetación varían según la composición del bosque, sus características y ubicación. El rango de los valores medios de intercepción, expresados como porcentaje de la precipitación total generalmente aceptada para los bosques, oscila entre el 15 % y el 40 %. Este parámetro es difícil de cuantificar, sobre todo por la falta de estaciones que permitan medir este parámetro en campo, por lo que el valor de la evapotranspiración (ETP) debe determinarse desde un principio (Ulmos, B. J. A. P., Rodríguez, B. R. I. B., Rodríguez, B. E. A. R., & Blandón, E. C)

- **Evapotranspiración Real**

El flujo de humedad hacia la superficie de evaporación es un factor decisivo en el proceso de evapotranspiración. A medida que el suelo se seca, la tasa de evaporación cae por debajo de la que normalmente se mantiene en un suelo bien humedecido. Es esta transpiración la que depende de la cantidad de humedad en el suelo y se llama transpiración verdadera. La evapotranspiración real es menor que la transpiración potencial debido a los siguientes factores (Ulmos, 2017).

- Falta de agua en determinados periodos.
- Varíe la cantidad de transpiración según el crecimiento de la planta.
- Cambios en las condiciones climáticas como humedad, temperatura, etc.

- **Escorrentía superficial o caudal**

Para aprovechar los recursos hídricos es necesario conocer el caudal disponible como consecuencia de la precipitación en un punto dado la salida de la cuenca. El problema parece simple en su presentación, pero en muchos casos la solución es muy compleja, para lo cual se han desarrollado varios métodos, desde los más simples hasta los más complejos, tales como: flujo de curvas lineales, flujo específico, modelado, modelo de precipitación. - acciones, etc. (Ulmos, 2017).

3. Metodología

3.1 Ubicación del área de estudio

La subcuenca del río Manchagua se localiza en la jurisdicción del municipio de San Pedro Sula, Departamento de Cortés, Honduras C.A. al interior de los límites de la Zona de Reserva del Merendón (ZRM), zona declarada bajo la categoría de Zona Productora de Agua del municipio de San Pedro Sula bajo Decreto Legislativo No. 46-90 publicado en la gaceta el 12 de Julio del año 1990, cuenta con un área total de 14,141.17 hectáreas.

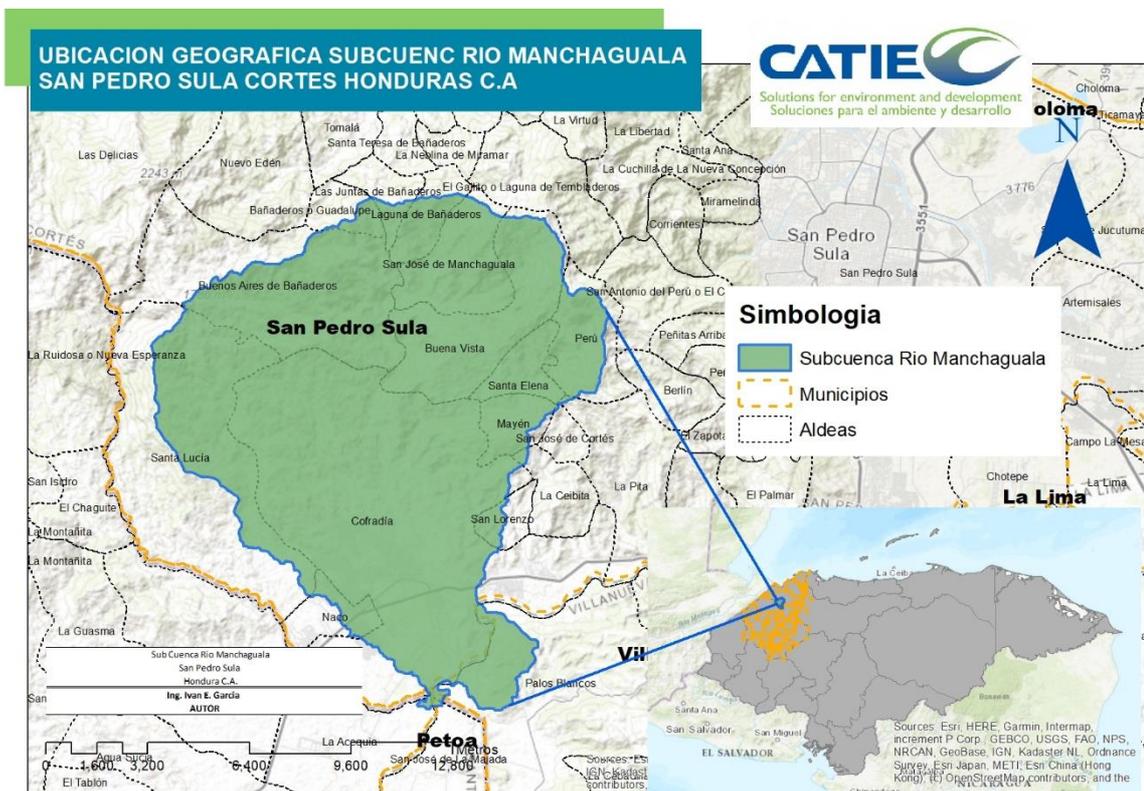


Figura 7. Ubicación hidrográfica de la subcuenca río Manchagua

Nota: Elaboración Propia

3.2 Descripción del área de estudio

Los usos de cobertura de la subcuenca del río Manchaguala indican que está cubierta en un 41% de Bosque Latifoliado Húmedo con una superficie de 5865 hectáreas, seguido de un 18% de bosque de conífera denso equivalente a un área de 2595, en agricultura se encuentra cubierta con un 31% equivalente a un área total de 3736 hectáreas

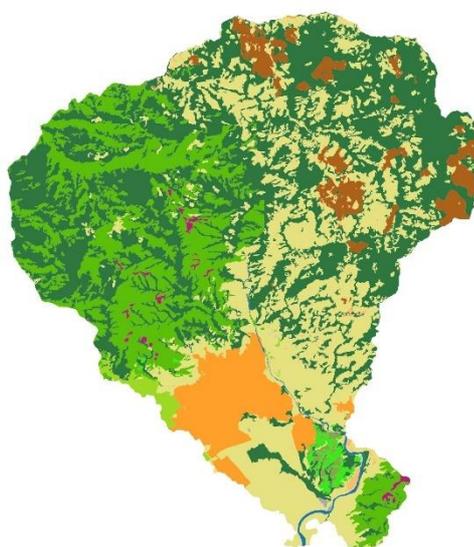
Cuadro 1. Cobertura de suelo Subcuenca Rio Manchaguala

Id	Clases Por Nombre	Área (ha)
1	Arboles Dispersos	58.44
2	Bosque de Conífera Denso	2595.71
3	Bosque de Conífera Ralo	109.17
4	Bosque Latifoliado Deciduo	128.70
5	Bosque Latifoliado Húmedo	5865.63
6	Bosque Mixto	55.76
7	Cafetales	591.73
8	Pastos/Cultivos	3736.68
9	Pino Plagado	53.89
10	Ríos y Otras Superficies de Agua	47.51
11	Suelo Desnudo Continental	6.76
12	Vegetación Secundaria Decidua	1.33
13	Vegetación Secundaria Húmeda	34.98
14	Zona Urbana Continua	854.89

Cobertura Forestal de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



- Simbología
Cobertura Forestal de Honduras
- Arboles Dispersos
 - Bosque de Conífera Denso
 - Bosque de Conífera Ralo
 - Bosque Latifoliado Deciduo
 - Bosque Latifoliado Húmedo
 - Bosque Mixto
 - Cafetales
 - Pastos/Cultivos
 - Pino Plagado
 - Ríos y Otras Superficies de Agua
 - Suelo Desnudo Continental
 - Vegetación Secundaria Decidua
 - Vegetación Secundaria Húmeda
 - Zona Urbana Continua



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 8. Cobertura del suelo de la Subcuenca del río Manchaguala

Nota: Elaboración Propia

3.3 Procedimiento metodológico

3.3.1 Metodología para caracterización morfométrica

3.3.1.1 Pasos

- Para iniciar con el proceso del estudio morfométrico, se cuenta con Shapefile del área que comprende toda la subcuenca del río Manchaguala, ubicada en el municipio de San Pedro Sula, dentro de la Zona de Reserva Merendón, en el departamento de Cortés, Honduras C.A.
- Para desarrollar este proceso de estudio sobre dichos parámetros se utilizará un modelo de elevación digital del terreno, el cual será tomado del sensor ALOS-Palsar, con un pixel de 30 x 30, con una resolución nativa de 5x5 metros, esta imagen ráster se encuentran en formato TIFF y puede ser descargada de la página <https://www.eorc.jaxa.jp/>
- Debemos de contar con información espacial (Shapefile) sobre la red hídrica de la subcuenca del río Manchaguala, esta misma puede ser generada a través del MDE del terreno utilizando herramientas de los sistemas de información geográfica mediante los softwares de QGis & ArcGIS.
- Una vez teniendo esta información debidamente cortada al área de estudio; para desarrollar el cálculo de las variables necesarias y requeridas para el análisis morfométrico, los datos serán procesados en software de sistemas de información geográficas (SIG) como el QGis y ArcGIS, con la debida aplicación de las fórmulas de la morfometría.

3.3.2 Metodología para determinar el balance hídrico

- El balance hídrico deriva el concepto de balance de materia, es decir el equilibrio de todos los recursos hídricos dentro de un sistema hídrico, donde la ecuación de continuidad o de balance hidrológico se expresa:

$$\text{CAPTACIÓN} = \text{EVAPOTRANSPIRACIÓN} = \text{ESCORRENTÍA SUPERFICIAL} + \text{INFILTRACIÓN}$$

- Para este estudio se realizará el balance hídrico se utilizará el software Swat, utilizando la fórmula de Swat, en este sentido el ciclo hidrológico es simulado en el modelo en base la expresión del balance hídrico, donde los procesos que incrementan la disponibilidad hídrica provienen de la humedad y la precipitación y se reducen por el escurrimiento, evapotranspiración e infiltración entre otros.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Q_{ri})$$

Donde:

SW, es el contenido final de agua (mm).

SW, es el contenido inicial de agua por día i (mm).

T, es el tiempo (días),

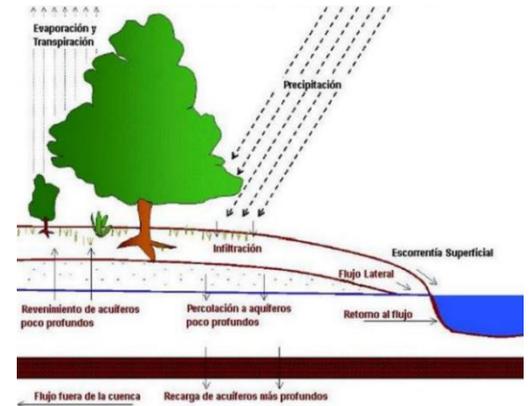
Ruy es la cantidad de precipitación por día i (mm).

Qsurf, es el caudal de salida por día i (mm).

E. es la evapotranspiración por día i (mm).

Wseep, es la cantidad de agua que ingresa al suelo por día i (mm)

Qgw es el caudal de retorno por día i (mm)



En términos de escorrentía superficial el modelo Swat integra dos métodos de cálculo:

- Método de infiltración Green Ampt (1972)
- Método de distribución del número de curva SCS (1972), este último se base en la siguiente ecuación:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_d)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

Donde:

Quaf, es la escorrentía acumulada o el exceso de lluvia (mmH₂O)

Relay, es la profundidad de la lluvia por el día (mmH₂O)

Ia, es la abstracción inicial los que incluye almacén de la superficie de la escorrentía (mmH₂O)

S es el parámetro de retención

- El parámetro de retención varia de espacialmente debido a los cambios en el suelo, uso de la tierra manejo e inclinación y temporalmente debido a cambio en el contenido del agua del suelo, este define como:

$$C = 2.54 \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde CN es el número de distribución para el día. Las abstracciones iniciales.

- Datos Geoespaciales y meteorológicos que se integran para la modelación con Swat:
 - Modelo de Elevación Digital (MDE)
 - Mapa de Cobertura Vegetal
 - Mapa de tipo y textura del suelo
 - Mapa de número de curva
 - Datos meteorológicos
 - Precipitación
 - Temperatura
 - Radiación solar
 - Velocidad del viento
 - Humedad relativa

De acuerdo con la disponibilidad de variables climatológicas el modelo de Swat viene integrado con varios métodos de cálculo de este parámetro:

- Hargreaves
- Priestley-Taylor
- Penman - Monteith

3.4 Demanda de Agua

La abundancia o requerimiento per cápita es la cantidad de agua requerida por cada persona de la población, expresada en litros/habitante/día. Puede ser animal, planta/cultivo u otros requisitos según el uso. Necesita conocer sus necesidades y estimar su consumo promedio diario, semanal, mensual o anual, el consumo máximo diario y el consumo máximo por hora. Utilice el consumo diario promedio anual para calcular su volumen de almacenamiento y estimar su consumo máximo diario y por hora. El valor máximo de consumo diario se utiliza para los cálculos hidráulicos de líneas aéreas. El consumo horario máximo se utiliza para los cálculos hidráulicos de la red de alimentación y distribución.

3.4 Resultados esperados

3.4.1 Características Morfométricas

Para llevar a cabo las características morfométricas para la subcuenca del Río Manchaguala se realizó mediante la integración de los sistemas de información geográfica (SIG) QGIS y ArcGIS. Este enfoque técnico capitaliza las capacidades específicas de ambos programas, optimizando el análisis morfométrico detallado de la cuenca hidrográfica. QGIS, con su interfaz de usuario adaptable y funciones de código abierto, facilita la importación y visualización eficiente de datos geoespaciales, mientras que ArcGIS ofrece herramientas

especializadas para análisis hidro geomorfológico avanzado. La colaboración entre este software permite la extracción precisa de parámetros morfométricos, como la longitud del cauce, la densidad de drenaje, la pendiente etc., proporcionando una base sólida y rigurosa para la caracterización geomorfológica exhaustiva de la subcuenca del Río Manchaguala.

3.4.1.1 Parámetros Morfométricos

- **Área**

Se define como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de drenaje que ingresa directa o indirectamente al mismo cauce natural. Corresponde al área delimitada por la zona de captación del área de estudio (Gálvez, 2011), la subcuenca del río Manchaguala la superficie territorial es de 141.4117 km² considerando una subcuenca grande.

- **Perímetro (P)**

Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en metros o kilómetros (Gálvez, 2011), la subcuenca del río Manchaguala tiene un perímetro de 61 km.

- **Longitud de la Cuenca (L)**

La longitud de la cuenca se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (estación de aforo) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca Este parámetro afecta el tiempo de concentración y la mayoría de los indicadores morfométricos. Cuando el cauce principal se inclina, la diferencia de altura entre el punto más alto y el más bajo del río se divide por la longitud del cauce (Fuentes 2004), en este caso la subcuenca del río Manchaguala tiene una longitud de cuenca de 16.47 km.

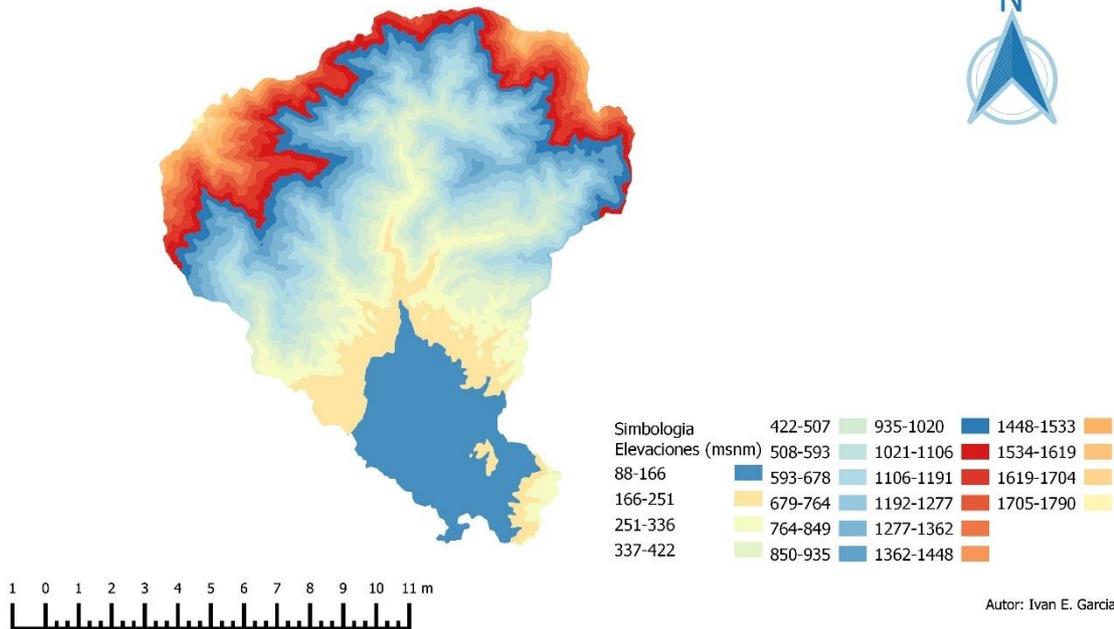
- **Ancho de la Cuenca (B)**

Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca, para la subcuenca del río Manchaguala es de 8.76 km.

- **Elevación**

Es la elevación promedio de la cuenca referida al nivel del mar, la subcuenca del río Manchaguala cuenta con una elevación mínima de 70 msnm y una elevación máxima de 1790 msnm.

**Elevaciones de la Subcuenca del Río Manchaguala,
San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.**



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 9 Mapa de Elevaciones de la Subcuenca del Rios Manchaguala

- **Factor de Forma de Horton (Kf)**

El factor de forma es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. indica la dirección de inundación y se obtiene de la relación entre la longitud de la cuenca y el ancho medio de su área drenada (Ríos et al 2018).

El factor de forma de la subcuenca del río Manchaguala es de 0.51 lo que significa que es **ligeramente ensanchada** esto significada que posee mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras, las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas (Lux 2016).

- **Coefficiente de Compacidad de Gravelius (kc)**

Este parámetro es adimensional y se define como la relación entre la circunferencia del área de la cuenca, igual a la longitud del área de la cuenca. (Gaspari, 2002).

El círculo teórico representa un límite que define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente, teniendo influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1987).

El Coeficiente de Compacidad de Gravelius de la subcuenca del río Manchaguala es de 1.43, de **Oval Redonda a Oval Oblonga**, esto significa que su tendencia es baja ante la susceptibilidad de avenidas.

- **Cota Mayor del Cauce (CMc)**

Elevación del punto más alto del cauce es de 1790 msnm.

- **Cota Menor del Cauce (Cmc)**

Coincide con la cota menor de la cuenca 70 msnm.

- **Pendiente Promedio del Cauce (So)**

Con base en el perfil altimétrico a lo largo del río se puede encontrar la pendiente de la recta ajustada a parejas de valores obtenidos en intervalos iguales a lo largo del cauce. Se aplica la técnica de los mínimos cuadrados, en este caso la pendiente promedio del cauce de la subcuenca del río Manchaguala es de 10.15%.

- **Longitud del Cauce Principal (Lc)**

Corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio, en este parámetro se tienen en cuenta la sinuosidad del cauce; la subcuenca del río Manchaguala cuenta con una longitud de cauce principal de 17.24 km.

- **Longitud de total de los cauces (Lc)**

Es la suma total de los cauces de la cuenca, para la subcuenca del río Manchaguala son 168.27 km.

- **Orden de los Cauces**

El orden de las corrientes es una clasificación que determina el grado de ramificación de una cuenca. Hay varios métodos para hacer tal clasificación, en nuestro caso utilizaremos Horton y/o Strahler, siendo la subcuenca del río Manchaguala de orden 2.

Orden de los Cauces, de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.

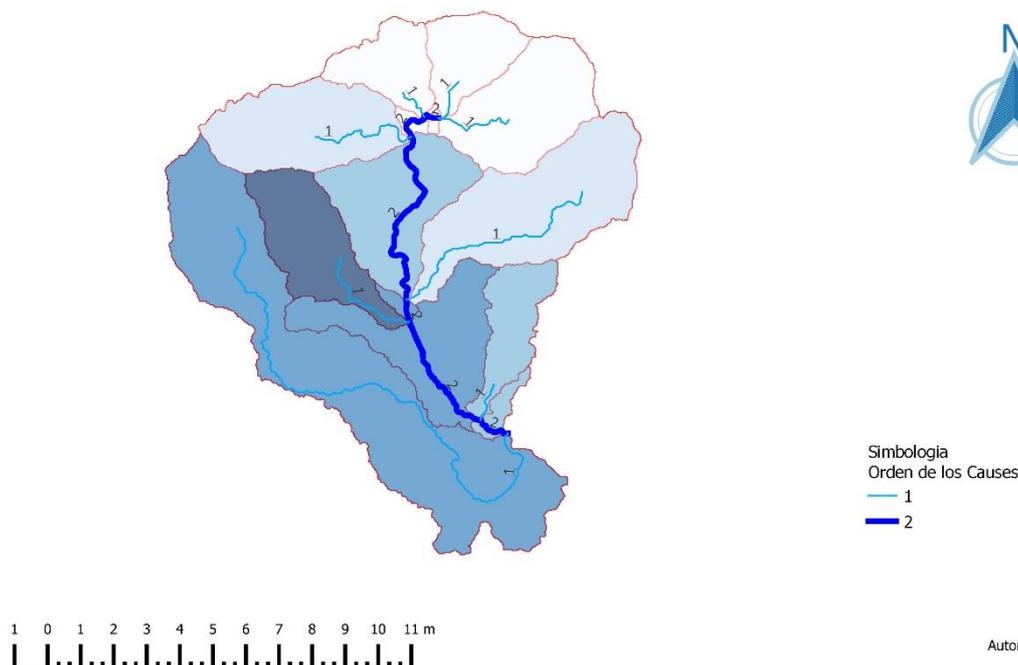


Figura 10 Mapa de Orden de los Cauces, Subcuenca Río Manchaguala

Nota: Elaboración propia

- **Densidad de Drenaje (Dd)**

Este Parámetro es la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1987). Se ha determinado que la densidad de drenaje en la subcuenca analizada es de 1.21 km/km²

- **Tiempo de Concentración (Tc)**

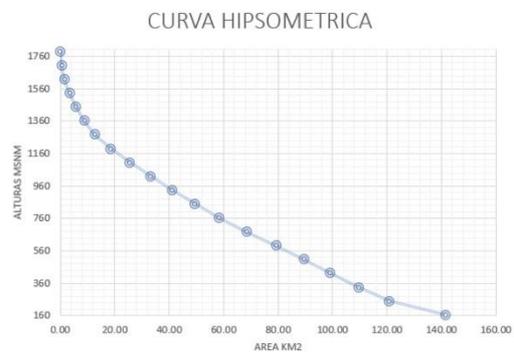
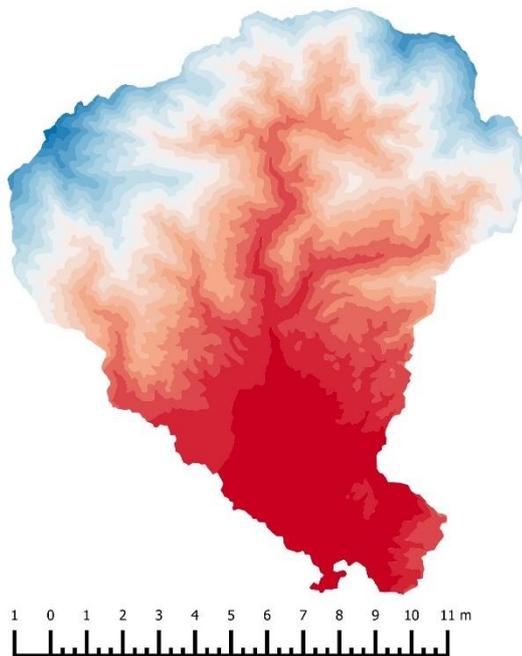
Es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009), en este sentido sea determinado que el tiempo de concentración de la subcuenca es de 0.99 horas

- **Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca, por medio de una curva tal, que a cada altura le corresponde un respectivo porcentaje del área ubicada por encima de esa altura. Dicho en otras palabras, es la distribución del área respecto a la elevación de la cuenca, permitiendo estimar la etapa de esta en su desarrollo geomorfológico (Rios, 2018).

Podemos concluir que la Subcuenca del Rio Manchaguala es una cuenca que se encuentra entre un estado en equilibrio (Curva B) y una cuenca sedimentaria en fase de Madures. Aunque es una cuenca que en teoría debería estar estabilizada, la invasión de su cauce en la parte baja y las altas precipitaciones que se dan en la parte alta y media, aún hace que la cuenca presente un alto potencial erosivo generalizado y avalanchas que causan daño en el cauce en la parte baja.

Hipsometria, de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbologia	337-422	764-849	1106-1191	1448-1533
Hipsometria	422-507	850-935	1192-1277	1534-1619
	88-166	508-593	935-1020	1277-1362
	166-251	593-678	1021-1106	1362-1448
	251-336	679-764		1619-1704
				1705-1790

Autor: Ivan E. Garcia

Figura 11 Mapa Hipsométrico de la Subcuenca del Rio Manchaguala

Nota: Elaboración propia

- **Resumen de los parámetros Morfométricos de la Subcuenca Rio Manchagua.**

Cuadro 2. Parámetros Morfométricos de la Sub Cuenca del Rio Manchagua

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA SUBCUENCA		
DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la superficie		
Área	km ²	141.41
Perímetro de la cuenca	km	61.03
Cotas		
Cota máxima	msnm	1790
Cota mínima	msnm	80
Altitud		
Altitud media	msnm	621.00
Altitud más frecuente	msnm	593.00
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	691.00
Pendiente		
Pendiente media de la cuenca	%	30.63
De la Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	12.46
Orden de la red hídrica	UND	4
Longitud de la red hídrica	km	171.73
Pendiente promedio de la red hídrica	%	10.51
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	horas	0.99
Pendiente del cauce principal	m/m	13.72

3.4.2 Balance hídrico

Durante el análisis hidrológico realizado con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), se utilizaron diferentes conjuntos de datos para llevar a cabo la modelación. Estos conjuntos de datos incluyeron el mapa de suelos de la FAO, el Mapa de Cobertura Forestal de Honduras y datos climatológicos globales.

3.4.2.1 Preparación de la base de datos

El proceso de preparación de datos para la modelación hidrológica con SWAT+ y QSWAT se inicia con la obtención del Modelo Digital de Elevación (DEM) Alos Palsar desde el sitio web <https://www.eorc.jaxa.jp/>. Este archivo ráster se consolida para el área de influencia de la Reserva, generando resoluciones de 30x30 metros con resolución nativa de 5x5 metros por píxel.

Seguidamente, se incorporó un archivo ráster que contiene información detallada sobre la distribución y características del suelo de la FAO 2022 con una resolución (WISE30sec) en el área de estudio.

El tercer componente, la cobertura forestal, se obtiene a través del "Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras 2018", elaborado por el ICF con la metodología CORINE Land Cover.

En cuanto al escenario temporal, se establece en el periodo 2001-2019 se integra para definir el escenario temporal necesario para la modelación hidrológica.

El proceso de preparación de datos implica una serie de pasos adicionales, como la integración de datos en un sistema de referencia común, la identificación y corrección de posibles errores, la garantía de formatos compatibles con SWAT+ y QSWAT, la aplicación de técnicas de interpolación espacial si es necesario, la configuración de escenarios temporales y espaciales, y la realización de pruebas de consistencia y validación cruzada para asegurar la calidad y precisión de los datos. Este guion metodológico proporciona una guía detallada para llevar a cabo estos procesos con el objetivo de obtener resultados confiables en el análisis hidrológico.

Cuadro 3. Base de Datos para la modelación hidrológica de la Sub Cuenca del Rio Manchagua

Ítem	Insumo	Descripción	Fuente
1	DEM	Archivo Formato Ráster con Resolución de 30x30 (resolución nativa de 5x5)	Modelo Digital de Elevación - DEM Alos Palsar. Las imágenes del sensor fueron descargadas para el área de influencia de la Reserva y se consolidaron en un ráster con una resolución 30x30 metros con resolución nativa de 5x5 metros de pixel. https://www.eorc.jaxa.jp/
2	Suelos	Archivo Shapefile ((WISE30sec)	FAO 2022
3	Cobertura Forestal	Archivo Formato Ráster con Resolución de 10x10	El ICF a través de la Unidad de Monitoreo Forestal y con el apoyo financieros y técnico del Programa ONU-REDD de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el proyecto REDD de la Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (MiAmbiente+), elaboró el "Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras 2018", (periodo 2018) a escala 1:100.000. Metodología CORINE Land Cover ICF

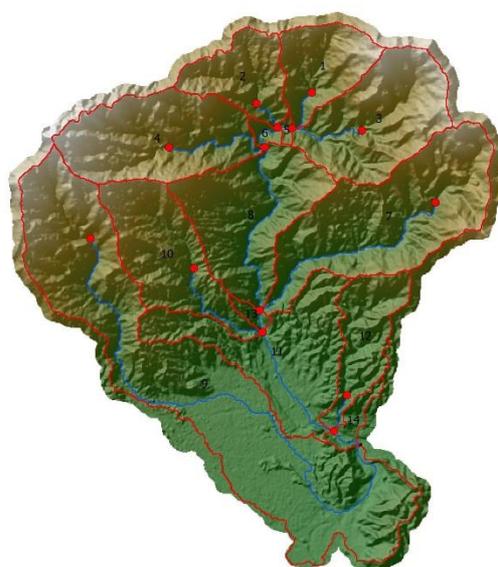
4	Clima	2. Datos meteorológicos globales PCP & T° (Archivo Excel)	1. Contiene datos meteorológicos diarios de precipitación y temperatura https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/
5	ESCENARIO	2001-2019	Arc SWAT CFSR_World Weather Database 6/25/14

3.4.2.2 Procesamientos de lo la base de datos

3.4.2.2.1 Delimitacion de la Cuenca Hidrográfica

El proceso de delimitación de cuencas hidrográficas utilizando SWAT+ implica el uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 30x30 metros, derivado de

Delimitacion de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología
 SWAT subbasin



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 12 Delimitacion de la Subcuenca Rio Manchaguala en Qswat

imágenes nativas de 5x5 metros. En la fase inicial, se selecciona y especifica este DEM en la interfaz de SWAT+, donde la herramienta utiliza la información topográfica para identificar y definir las cuencas hidrográficas. Los resultados pueden ser examinados y ajustados según sea necesario, y es crucial validar la delimitación comparándola con datos de campo o mapas existentes. Finalmente, el proyecto se guarda con las cuencas delineadas, permitiendo avanzar con la modelación hidrológica.

Nota: Elaboración Propia

3.4.2.2 Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU)

La creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en SWAT+ se realiza incorporando datos procesados de las pendientes, uso del suelo y cobertura forestal, lo cual es fundamental para la precisión y representatividad del modelo hidrológico, estos datos, previamente preparados y procesados, proporcionan información detallada sobre la distribución y características de las áreas en la cuenca en términos de su uso del suelo y la presencia de cobertura forestal (Arabi, M., Frankerberger, J., Engel, B., & Arnold, J. G. 2007).

En el caso de información del tipo de suelo se utilizó un archivo tipo ráster con un pixel de 30x30 que contiene el tipo de suelo proporcionado por la FAO (FAO, 2023).

Para los datos de la cobertura forestal se utilizó el archivo ráster Cobertura Forestal 2028 de Honduras, elaborado por el Instituto de Conservación Forestal, a través de la Unidad de Monitoreo Forestal y con el apoyo financieros y técnico del Programa ONU-REDD de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el proyecto REDD de la Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (MiAmbiente+).

Una vez ingresada estas variables de Suelos y Cobertura del Suelo, se asignaron las pendientes predominantes del terreno, en este caso se utilizó la simbología que comúnmente se utiliza en honduras dando 5 rangos de pendiente al mapa.

Cobertura del Suelo de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.

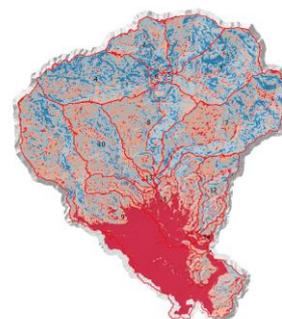


Simbología
Cobertura del Suelo
Codigo
AGRL
FRST
FRSD
PAST
FENG
FNGB
URLD
WATR



Autor: Ivan E. Garcia

Pendientes de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología
Pendiente %
0-12
12-30
30-50
50-60
60-70



Autor: Ivan E. Garcia

Tipo de Suelos, FAO 2022, de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.

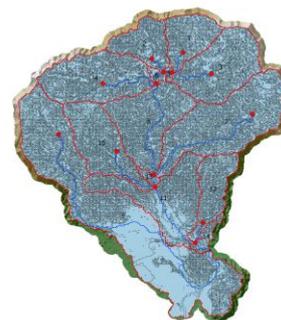


Tipo de Suelo
Suelos Fao 2022
WD10017089
WD10017092



Autor: Ivan E. Garcia

Unidades de Respuesta Hidrológicas de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología
HRU
SWAT subbasin
Upstream from inlet
Pt sources and reservoirs (reservoirs)
Reservoir
Point source
Streams (dem3stream)
Channels (dem3channel)
Full LSUs (fsoz1)
Actual HRUs (hrus2)
Full HRUs (hrus1)
Aquifers (aquifers)



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 13 Capas que definen las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológicas de la Subcuenca Río Manchaguala en Qswat

Nota: Elaboración Propia

3.4.2.2.3 Importación de datos al Swat+Editor para la incorporación de las estaciones meteorológicas y edición de variables.

La importación de datos desde SWAT+ a SWAT+ Editor para la incorporación de estaciones meteorológicas debidamente procesadas con un escenario del año 2021 al año 2019 y la calibración del modelo es una fase crucial en el proceso de modelado hidrológico. Al abrir SWAT+ Editor, se importan datos detallados de la cuenca y HRU desde SWAT+, y se añaden 3 estaciones meteorológicas con información como precipitación y temperatura. Los datos meteorológicos fueron sometidos a un proceso de análisis mediante una MacroWGN implementada en Microsoft Excel. Esta herramienta automatizada desempeñó un papel crucial en el cálculo de las estadísticas meteorológicas esenciales para la generación de un archivo de estaciones meteorológicas personalizado compatible con el modelo SWAT.

En el proceso de importación de datos desde SWAT+ a SWAT+ Editor, se resalta la inclusión de variables fundamentales como la precipitación, temperatura y elevación, elementos cruciales para modelar de manera precisa los procesos hidrológicos en la cuenca de interés. Para la estimación de la evapotranspiración, se empleará el método de Hargreaves, el cual utiliza la temperatura y la latitud para calcular la evapotranspiración potencial. Este método se considera una herramienta robusta y eficiente para cuantificar las pérdidas de agua debidas a la evaporación y transpiración vegetal (Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985).

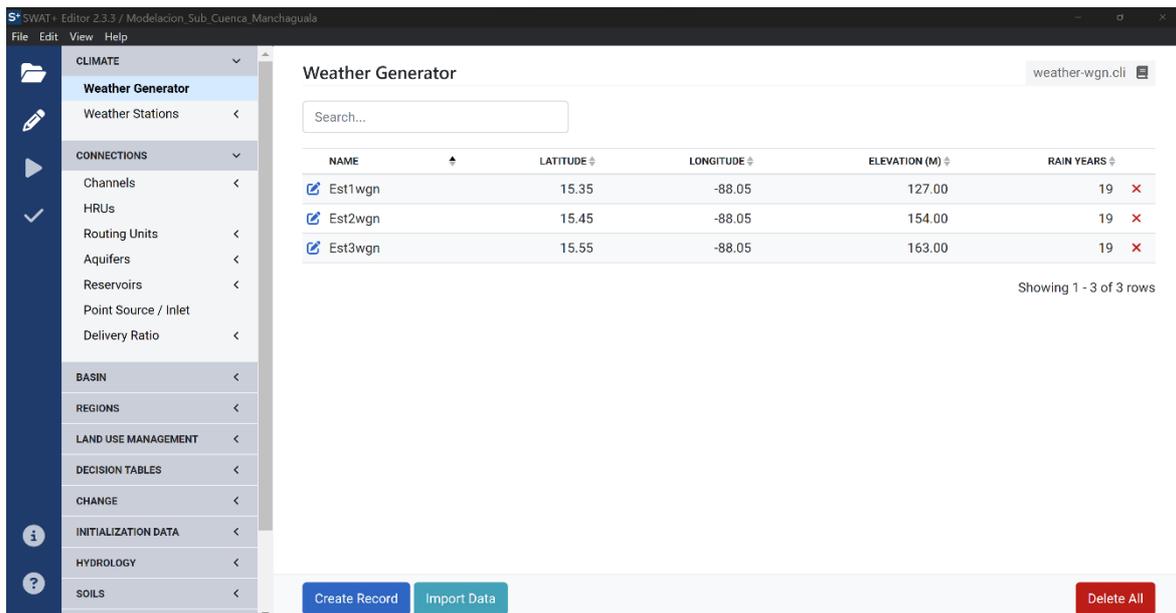


Figura 14 Importación de estaciones meteorológicas al Swat+Editor meteorológicas

En cuanto al modelado del tránsito del flujo en el cauce, se implementará el método de Muskingum. Este enfoque se utiliza para simular la propagación de crecidas en los ríos, ofreciendo una evaluación precisa de cómo el caudal se desplaza a lo largo de una red fluvial. La aplicación del método de Muskingum facilita la representación detallada de eventos hidrológicos y mejora la capacidad predictiva del modelo respecto a la dinámica del flujo (Ponce, V. M. s.f. 2016). Nota: Elaboración Propia

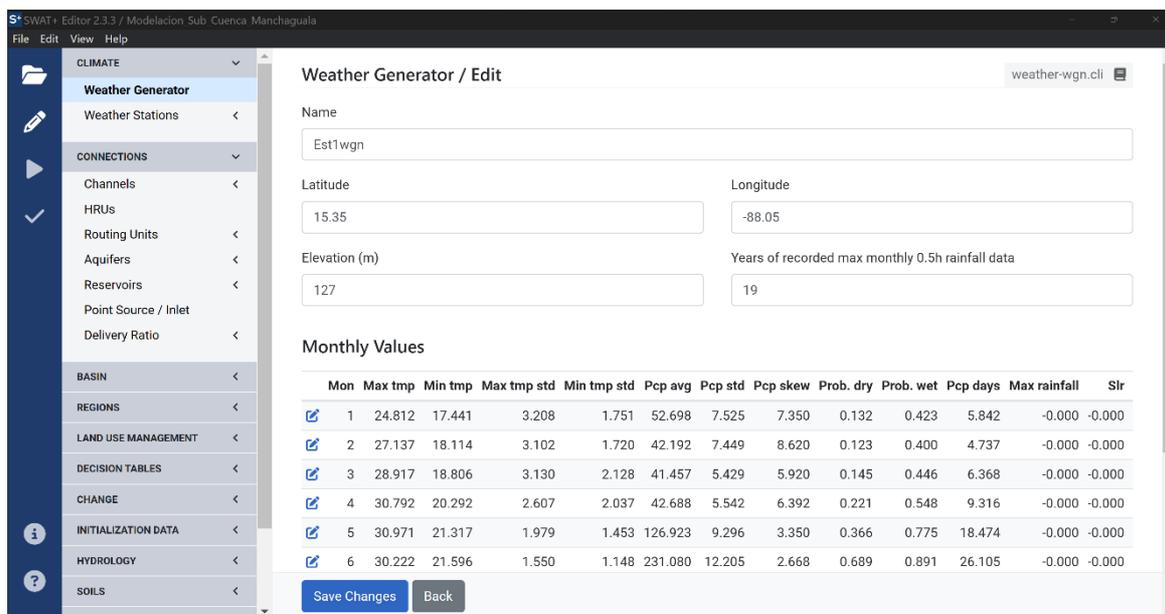


Figura 15 Importación de datos meteorológicos mensuales al Swat+Editor

Nota: Elaboración Propia

3.4.2.2.4 Establecer y correr el Swat

Antes de correr el modelo hidrológico mediante SWAT+ Editor, es necesario realizar elecciones específicas para asegurar una representación precisa y detallada de la dinámica hidrológica en la cuenca de análisis. En primera instancia, se requiere optar por el escenario temporal correspondiente, abarcando el periodo desde 2020 hasta 2019, ya que este intervalo temporal contiene las variables climáticas para una modelación hidrológica precisa.

Posteriormente, al seleccionar los componentes que se pretenden modelar en la cuenca, se deben especificar dichos elementos, esto usualmente incluirá componentes cruciales como los aspectos fundamentales de la cuenca, los acuíferos y las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), en este sentido objetivos del trabajo de investigación se seleccionaron los componentes mencionados, luego arrancamos la modelación y guardamos el escenario procesado para ser visualizado en el Qswat+.

3.4.2.2.5 Visualización de los Datos

Los datos provenientes de SWAT+ Editor en QGIS, a través de la extensión QSWAT, con los resultados importados se aprovechan las herramientas avanzadas dentro de QGIS para realizar análisis necesarios y visualización detallada de información hidrológica. Estas capacidades incluyen la generación de mapas temáticos, la creación de gráficos interactivos y la exploración detallada de los resultados del modelo directamente en la interfaz de QGIS.

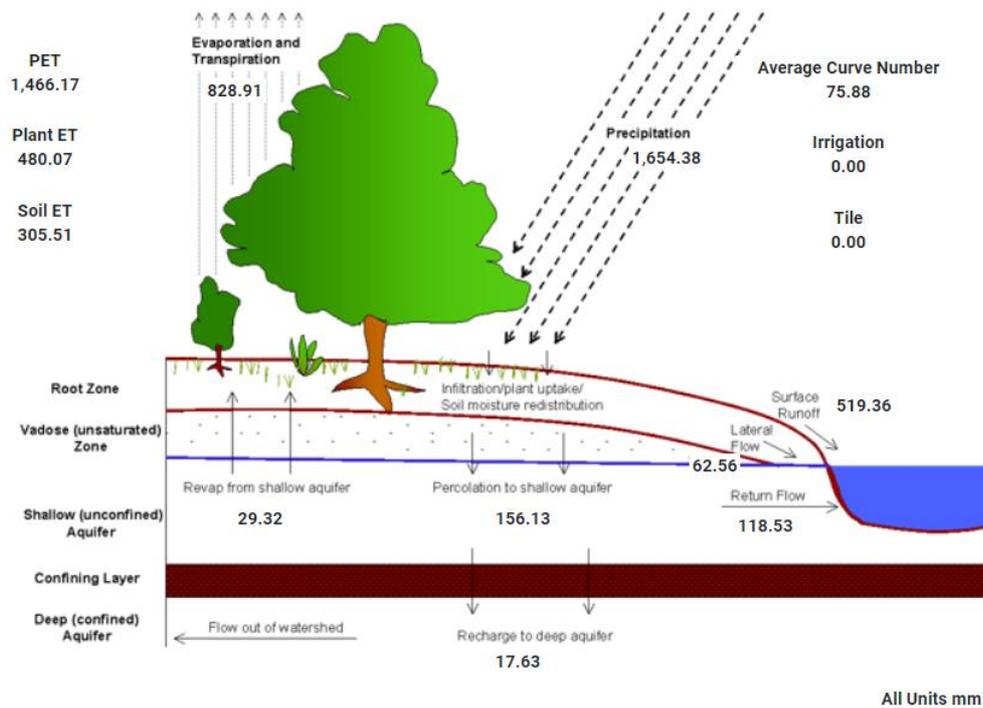


Figura 16 Diagrama del Balance Hídrico en la subcuenca del Río Manchagua

Water Balance Ratios

Streamflow/Precipitation	0.42
Baseflow/Total Flow	0.26
Surface Runoff/Total Flow	0.74
Percolation/Precipitation	0.09
Deep Recharge/Precipitation	0.01
ET/Precipitation	0.50

3.4.2.2.6 Resultados del Modelo Hidrológico

Después de ingresar la información necesaria en el modelo SWAT, se procedió a implementar dicho modelo matemático utilizando sistemas de información geográfica. Este proceso conduce al cálculo de diversas variables climáticas tanto para el área de estudio en general como para cada una de las subcuencas analizadas, ajustándose el cálculo de acuerdo al área específica de cada subcuenca.

Cuadro 4. Datos hidrológicos, obtenidos de la simulación con SWAT+

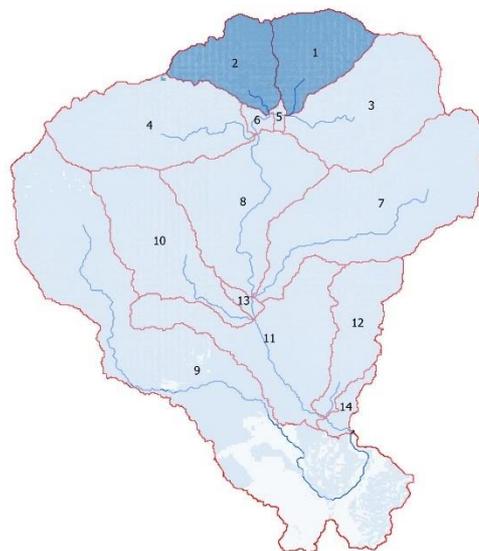
Año	Pcp (mm)	Escorrentía Superficial (mm)	Flujo Lateral (mm)	Percolación (mm)	Acuífero (mm)	et(mm)	Producción de Agua(mm)	Caudal flow out m3/s
2002	1622.71	443.19	45.57	135.81	351.11	859.24	488.76	1.15
2003	1565.3	448.15	62.12	160.7	351.78	860.66	510.26	0.78
2004	1870.5	676.95	72.45	176.11	351.19	881.27	749.4	0.65
2005	1633.52	431.76	68.09	171.03	351.93	867.86	499.85	0.75
2006	1588.74	436.5	60.6	156.96	350.93	853.33	497.1	0.35
2007	1730.49	599.67	59.16	154.56	350.92	843.27	658.83	0.64
2008	1664.75	549.25	67.31	169.19	351.31	865.17	616.56	0.78
2009	1633.39	483.18	50.73	142.14	351.47	821.36	533.91	0.6
2010	1498.52	386.53	60.43	156.01	351.47	871.06	446.96	0.76
2011	1622.53	513.24	47.4	130.07	351.94	810.44	560.64	0.87
2012	1686.34	535.1	62.05	161.62	351.66	861.17	597.15	1.04
2013	1969.77	713.69	73.18	180.05	351.34	885.91	786.87	0.49
2014	1804.11	559.96	68.76	170.25	351.09	873.62	628.71	0.87
2015	1562.85	439.02	69.66	173.59	351.92	872.97	508.69	0.98
2016	1621.4	468.99	58.37	154.32	351.97	866.84	527.36	0.95
2017	1611.98	442.29	53.24	143.59	351.82	840.72	495.54	1.2
2018	1534.75	410.69	59.97	153.67	351.98	855.05	470.66	0.83
2019	1661.28	482.93	68.71	171.11	351.57	875.37	551.64	0.73
Promedio Anual	1660.16	501.17	61.54	158.93	351.52	859.18	562.72	0.80

Precipitación (Promedio anual): Los datos de precipitación en la subcuenca del río Manchaguala, modelados desde 2001 hasta 2019, revelan fluctuaciones anuales en los niveles de lluvia. Se observa una variabilidad significativa, con años como 2013 registrando precipitaciones notablemente superiores (1969.00 mm) y otros como 2010 mostrando valores considerablemente más bajos (1400.00 mm), el análisis de tendencias a lo largo del tiempo insinúa la existencia de patrones estacionales, mientras que la identificación de años atípicos podría señalar eventos climáticos intensos.



Figura 17 Grafico de la precipitación media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Río Manchaguala

Precipitación Media Anual de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología

Pcp Media Anual (mm)

1495 - 1495
1495 - 1601
1601 - 1601
1601 - 1665
1665 - 1665



Autor: Ivan E. García

Figura 18 Mapa de precipitación (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Escorrentía (Promedio anual): El comportamiento de los flujos superficiales en la subcuenca del río Manchaguala se analiza a partir de los datos de escorrentía superficial registrados entre 2002 y 2019, se aprecia una notable variación anual, resaltando años como 2013 con una escorrentía de 713 mm y en el 2019 con una disminución de 482 mm, lo que reflejan eventos hidrológicos relevantes. El análisis muestra que en general la escorrentía sigue tendencias acordes con los datos de precipitación, demostrando la estrecha relación entre estos dos fenómenos. Los años con altos niveles de precipitación, como 2013, suelen correlacionarse con mayores volúmenes de escorrentía.

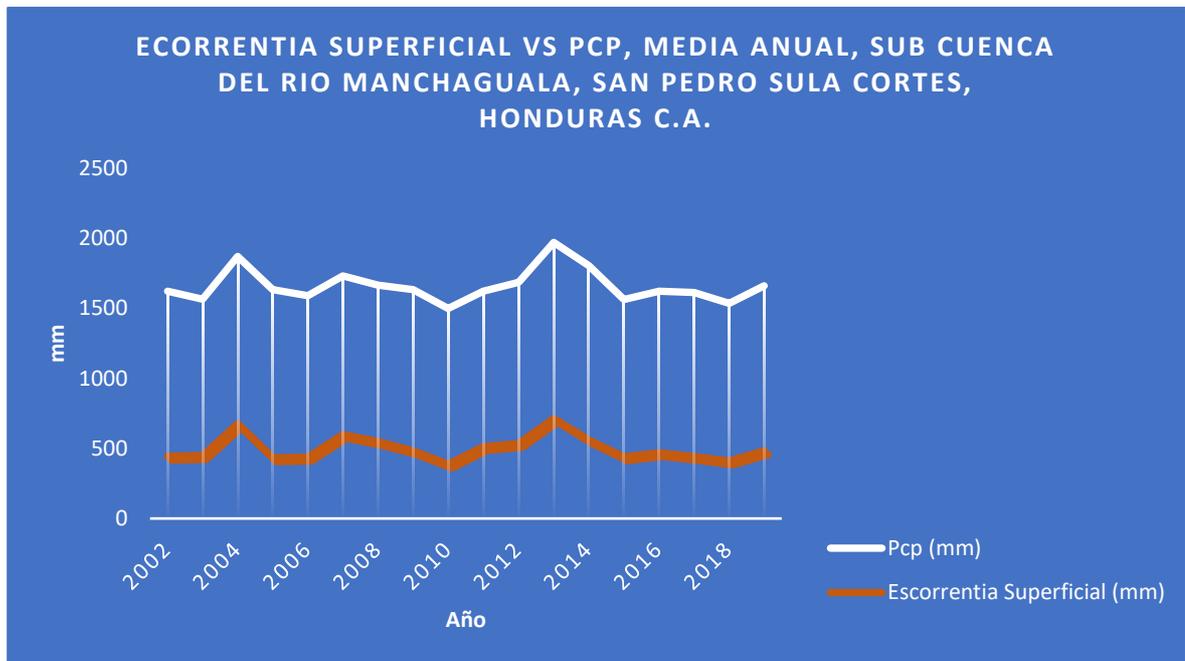


Figura 19 Grafico de la escorrentía superficial media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Rio Manchaguala

Escorrentia Superficial Media Anual de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.

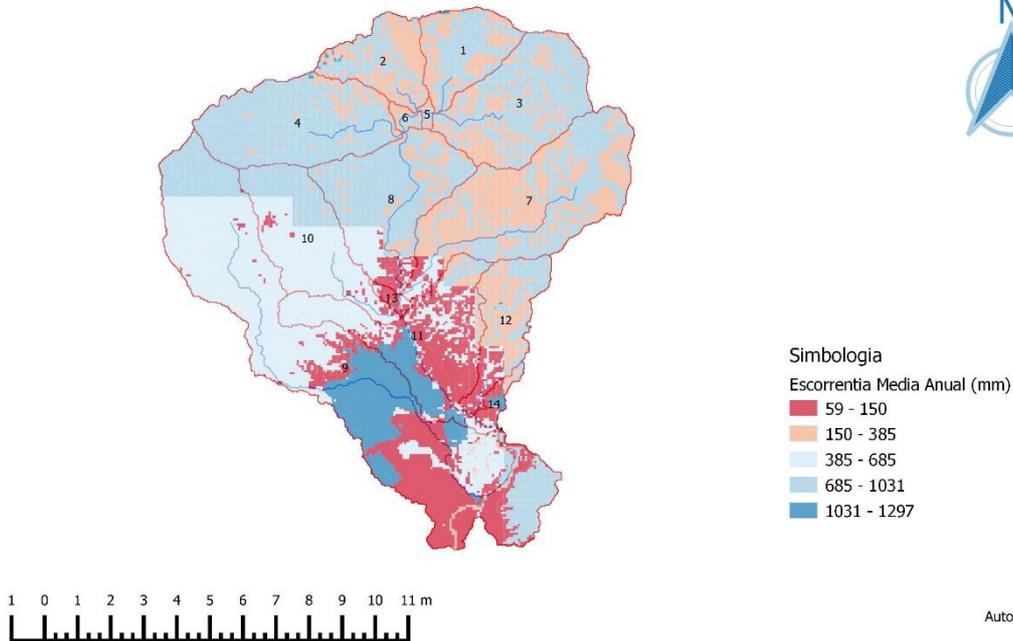


Figura 20 Mapa de Flujo Lateral (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

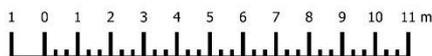
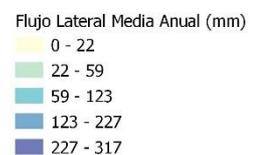
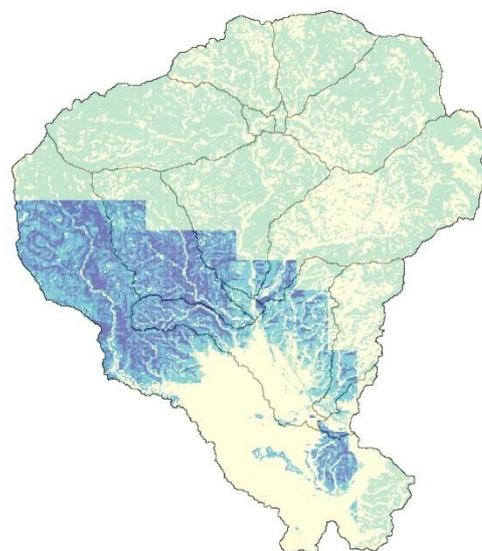
Flujo Lateral (Promedio anual): El flujo lateral, conocido también como flujo subsuperficial, se define como la escorrentía que se desplaza más allá de la superficie terrestre, contribuyendo al caudal final del curso principal en la unidad hidrológica. Al examinar los resultados obtenidos, se concluyó que la subunidad de Quebrada la Yuca exhibe el nivel más elevado de flujo lateral.

Los datos de modelación hidrológica, representados por el flujo lateral en la subcuenca del Río Manchaguala durante el periodo de 2002 a 2019, revelan patrones significativos en la dinámica hidrológica de la región, se observa una variación anual en el flujo lateral, con fluctuaciones que sugieren una respuesta sensible a las condiciones climáticas e hidrológicas, años como 2005 y 2011 destacan por tener flujos laterales relativamente altos (71.10 mm y 70.90 mm), indicando periodos de mayor escurrimiento lateral, la estabilidad en la magnitud de los flujos laterales en algunos años cercanos apunta la presencia de patrones hidrológicos inestables en ese periodo.



Figura 21 Grafico del flujo lateral media anual del periodo del año 2002 al 2019 de la subcuenca del Rio Manchaguala

Flujo Lateral Media Anual de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 22 Mapa de Flujo Lateral (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Percolación (Promedio anua): La percolación se refiere al proceso de filtración o movimiento vertical del agua a través los poros del suelo, en la subcuenca del Rio Manchaguala se evidencia una mayor tasa de percolación en áreas con una extensa

cobertura forestal, la densidad arbórea y vegetal en estas zonas propicia la formación de una red radicular que consolida la retención del suelo, mitigando la erosión y facilitando la infiltración hídrica, adicionalmente la presencia de materia orgánica derivada de los desechos vegetales potencia la capacidad de retención hídrica y optimiza la estructura del suelo, fomentando de manera efectiva el proceso de percolación. Se observa que la percolación varía considerablemente con los años en los que los niveles son consistentemente altos como en 2004 y 2013 llegando a percolarse entre 176 mm y 180 mm, y otros en los que son más bajos, como en 2011 percolándose 130 mm. Esta variabilidad podría estar relacionada con las condiciones climáticas anuales siendo la precipitación (Pcp) un factor clave a considerar ya que están debidamente relacionados.



Figura 23 Grafico de la Percolacion (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Percolación Media Anual de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.

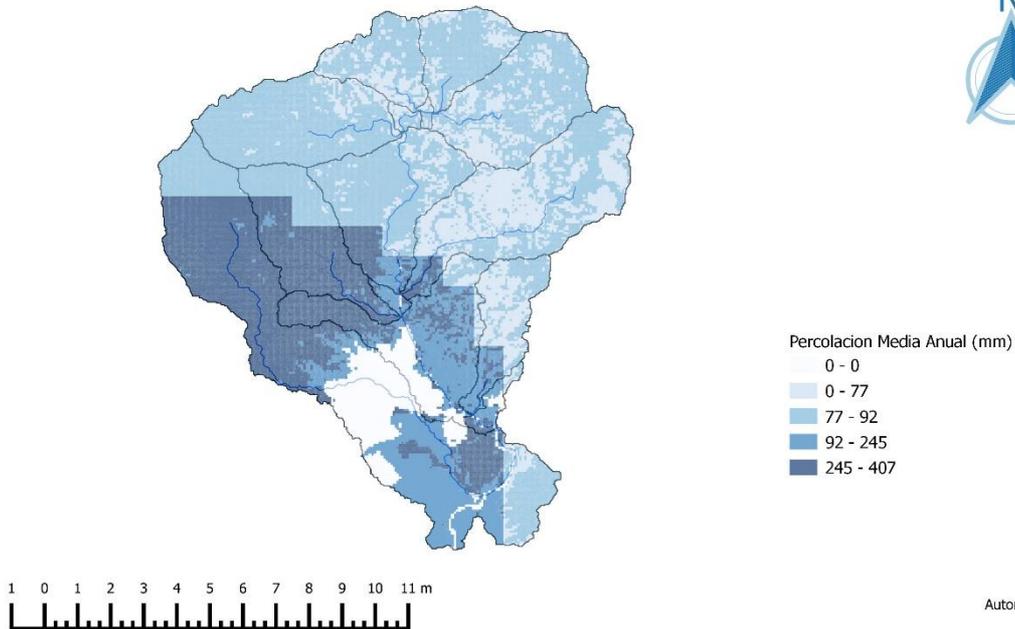


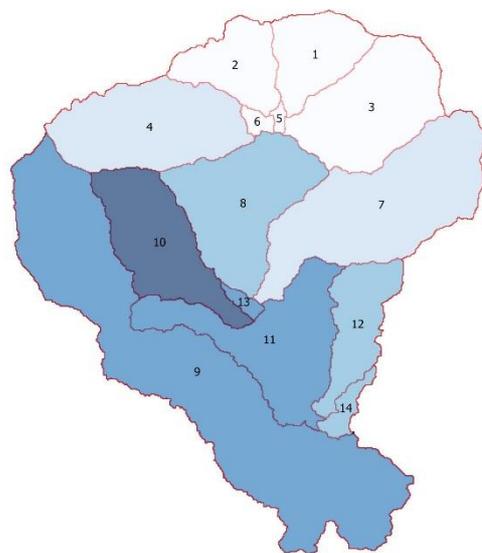
Figura 24 Mapa de percolación (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Acuífero (Promedio anua): Se define como la cantidad de recurso hídrico que atraviesa o perfora la capa de confinamiento, contribuyendo al nivel de las aguas subterráneas. Este valor se calcula restando el flujo de retorno a la percolación, dentro la subcuenca del Río Manchaguala existen 4 subunidades hidrológicas que generan mayor recarga en el acuífero de la cuenca, siendo la unidad 10 con una recarga de 353.01 mm la que mayor aporta en cuanto a la cantidad de agua en el acuífero de la unidad. Es crucial señalar que la zona donde se registra la mayor recarga del acuífero está estrechamente relacionada con la extensión predominante de cobertura forestal en dicha área, este factor destaca la importancia de considerar el papel fundamental que desempeña la cobertura forestal en el proceso de recarga del acuífero, subrayando así la interconexión entre la vegetación y la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.



Figura 25 Grafico del comportamiento del Acuífero (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Acuífero Media Anual de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología
Acuíferos (mm)

350.368 - 350.445
350.445 - 350.613
350.613 - 352.312
352.312 - 353.052
353.052 - 354.5



Autor: Ivan E. Garcia

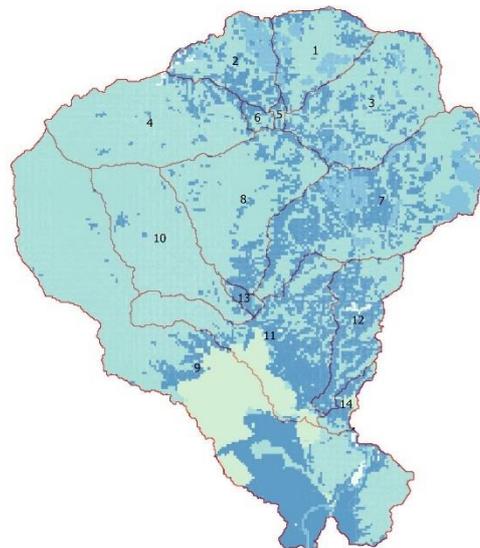
Figura 26 Mapa de distribución de acuíferos (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Evapotranspiración (Promedio anual): En el contexto de la evaporación en la subcuenca del Río Manchaguala, se observa que la tasa promedio anual de evaporación asciende a 859 mm, equivalente al 51.7% de la precipitación total registrada en la unidad de estudio.



Figura 27 Grafico de la evapotranspiración media anual (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Evapotranspiracion Media Anual de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbologia

Evapotranspiracion (mm)

352.6 - 354.5
354.5 - 461.3
461.3 - 592.4
592.4 - 1318.4
1318.4 - 1407.4



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 28 Mapa de evapotranspiración (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Producción de agua (Promedio anual): Según los informes de salida de SWAT, la producción de agua en la cuenca promedia 562.71 mm anuales, destacando el año 2013 como el año con la mayor producción hídrica 786 mm. Al examinar los datos espaciales de generación de agua en la cuenca, se observa que las sub unidades 4, 9, 10 y 8 las principales contribuyentes al volumen total de agua. Esta tendencia está directamente

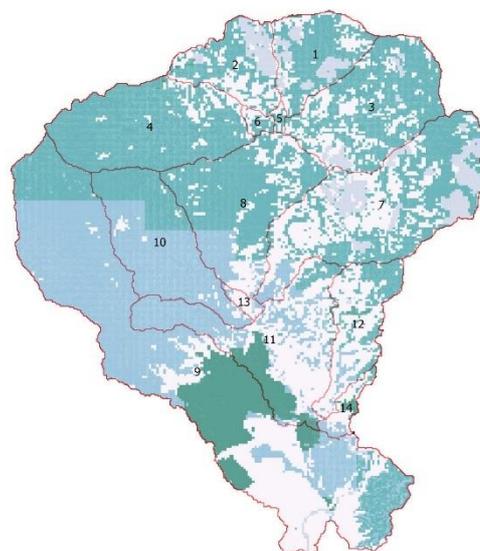
vinculada a las características del suelo y el uso del suelo en las distintas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) de cada subcuenca.

Es relevante señalar que, aunque estas subcuencas lideran en la generación de agua, no necesariamente exhiben los mayores caudales, lo cual constituye un aspecto crítico que requiere un análisis detenido. Esta discrepancia en los caudales debe considerarse cuidadosamente en la formulación de planes de gestión y conservación de los recursos hídricos para garantizar una toma de decisiones informada y eficaz.



Figura 29 Gráfico de la Producción de Agua (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Produccion de agua, Media Anual de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Simbología
Producción Media Anual (mm)

60 - 247
247 - 487
487 - 784
784 - 958
958 - 1297



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 30 Mapa de producción de agua (mm) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

Caudal de Agua (Promedio anual): de acuerdo a los datos obtenidos por el modelo, el caudal de salida de la subcuenca del río Manchagua revela una notable variabilidad anual entre 2002 y 2019, podemos observar un rango significativo en los valores de caudal, con años como 2004 y 2013 destacando por caudales notoriamente altos, mientras que otros años, como 2006 y 2018, exhiben valores más bajos, a partir del año 2012, parece haber una tendencia al alza en el caudal, seguida por una disminución en los últimos años. En cuanto a comparación entre la producción de agua y el caudal de salida en la subcuenca del Río Manchagua entre los años 2002 y 2019 revela algunas tendencias interesantes, en general, se observa que la producción de agua varía considerablemente de un año a otro, por ejemplo, años con una alta producción de agua, como 2013 y 2014, no siempre se corresponden con caudales de salida elevados, indicando posiblemente una mayor retención o infiltración del agua en el suelo. Por otro lado, en años como 2017, hay una convergencia entre una producción de agua relativamente baja y un caudal de salida notablemente alto, posiblemente relacionado con eventos climáticos específicos que impulsaron un mayor flujo.

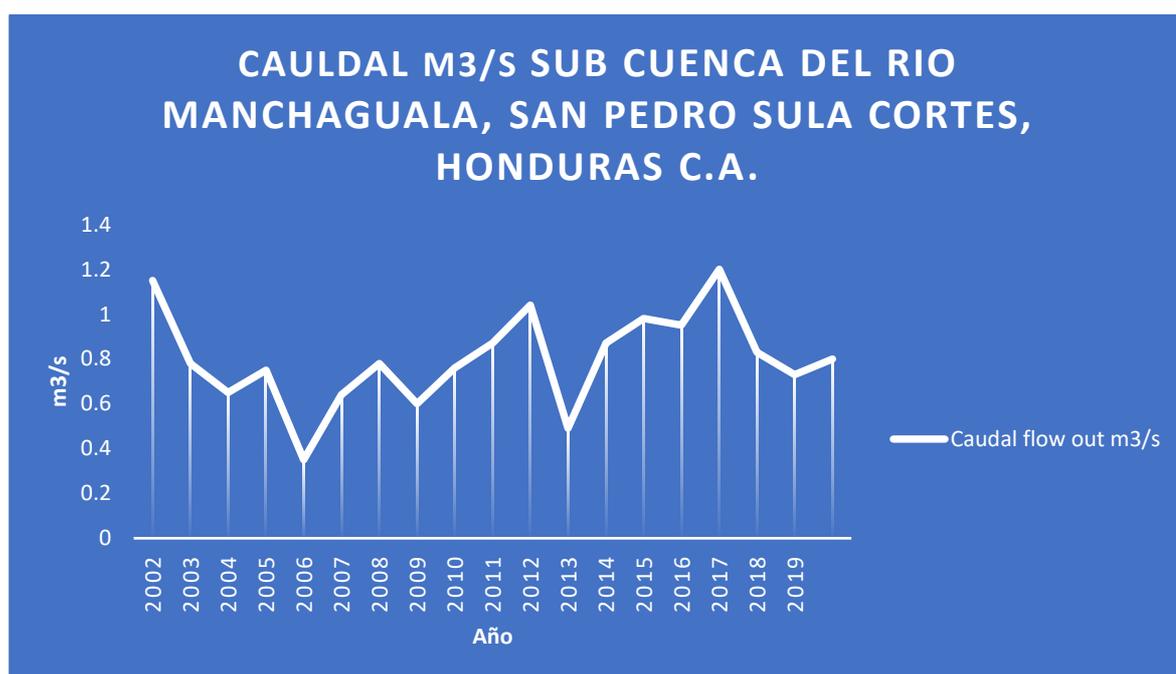
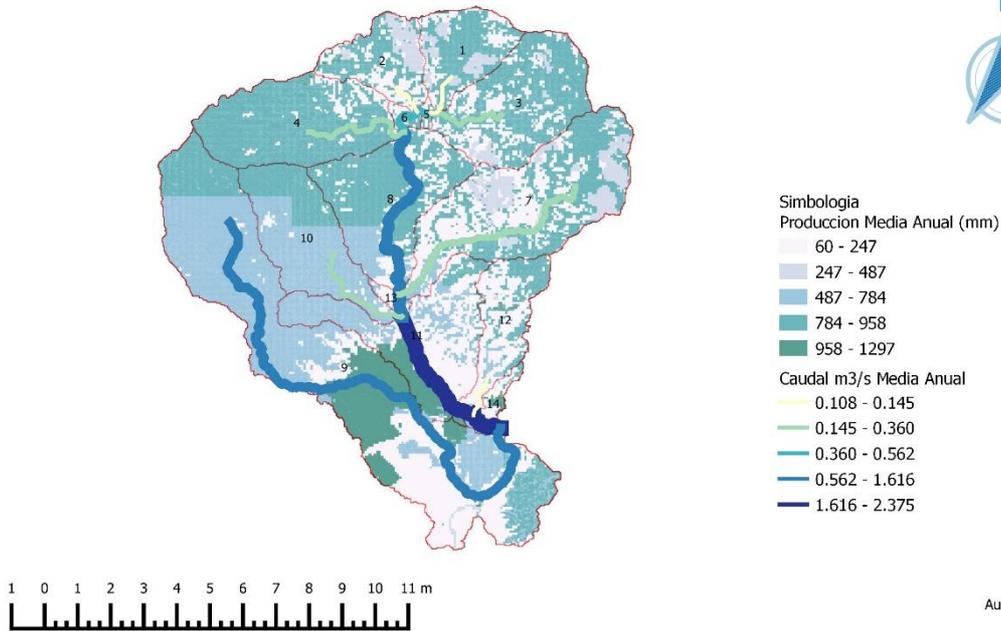


Figura 31 Grafico del Caudal de agua (m3/s) media anual de la subcuenca del Rio Manchagua

Caudal de agua m3/s, Media Anual de la Subcuenca del Rio Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 32 Mapa de Caudal de Agua (m3/s) media anual de la subcuenca del Rio Manchaguala

3.4.3 Oferta y demanda hídrica actual y futura

La determinación de la oferta hídrica se basó en la producción de agua simulada a través del modelo SWAT, la información del SWAT se utiliza para optimizar la planificación y gestión del agua, asegurando una asignación más precisa y sostenible de estos recursos y promoviendo su uso responsable.

Para el cálculo de la demanda hídrica actual y futura se utilizó un modelo matemático, se aplicará para evaluar la interacción entre las diversas variables que influyen en la oferta y demanda hídrica.

Con base en el volumen de producción de agua obtenido, podemos calcular la Oferta y Rendimiento hídrico de la subcuenca.

$$\text{Rendimiento m3/s} = \frac{(\text{producción de agua (mm)}) * \text{área de la cuenca (m}^2 \text{ y/o ha)} / 1000}{(86400 * 365)}$$

Cuadro 5. Datos rendimiento hídrico de la Subcuenca del Rio Manchaguala, obtenidos de la simulación con SWAT+

Año	Producción de Agua (mm)	Oferta Hídrica m3/anual	Rendimiento Hídrico m3/s
2002	488.76	69277624.42	2.20
2003	510.26	72325068.82	2.29
2004	749.4	106221155.04	3.37
2005	499.85	70849538.76	2.25

2006	497.1	70459749.36	2.23
2007	658.83	93383618.33	2.96
2008	616.56	87392200.90	2.77
2009	533.91	75677257.66	2.40
2010	446.96	63352825.54	2.01
2011	560.64	79466010.62	2.52
2012	597.15	84640996.44	2.68
2013	786.87	111532212.79	3.54
2014	628.71	89114361.34	2.83
2015	508.69	72102534.50	2.29
2016	527.36	74748850.18	2.37
2017	495.54	70238632.46	2.23
2018	470.66	66712101.46	2.12
2019	551.64	78190336.22	2.48
Promedio Anual	562.72	79,760,281.93	2.53

La modelación nos revela una dinámica significativa en la producción de agua en la subcuenca del Río Manchaguala durante el periodo analizado, podemos observar una variabilidad anual destacada, con un pico máximo en 2013 y un mínimo en 2010. A pesar de estas fluctuaciones, la oferta hídrica media anual se establece en 79,760,281.93 m³, mientras que el rendimiento hídrico promedio se mantiene relativamente constante alrededor de 2.53 m³/s.

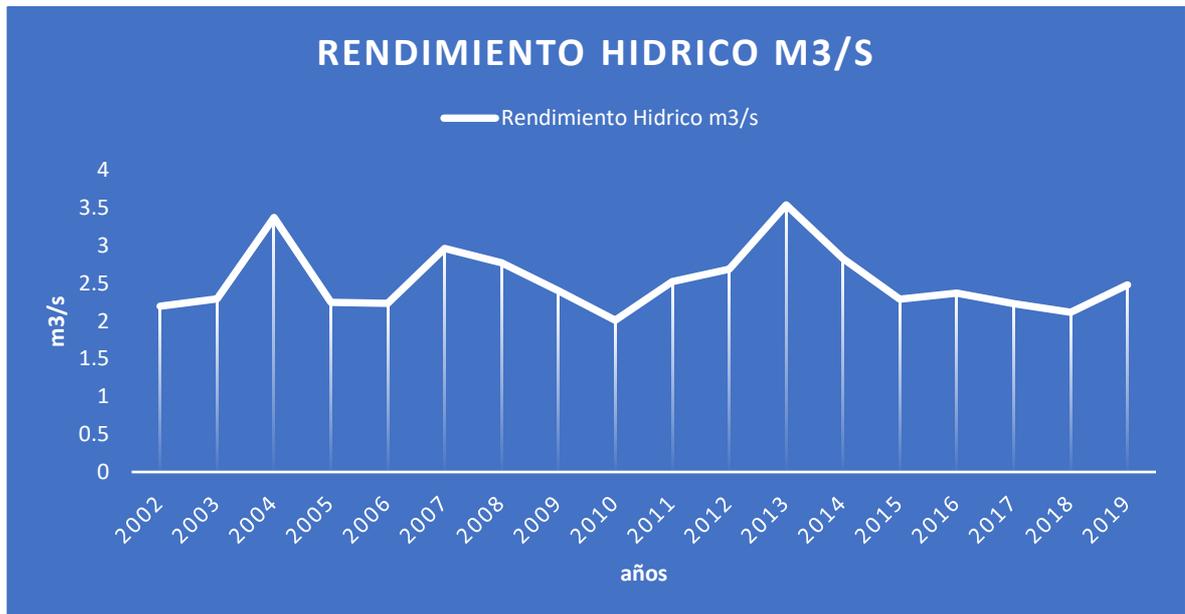
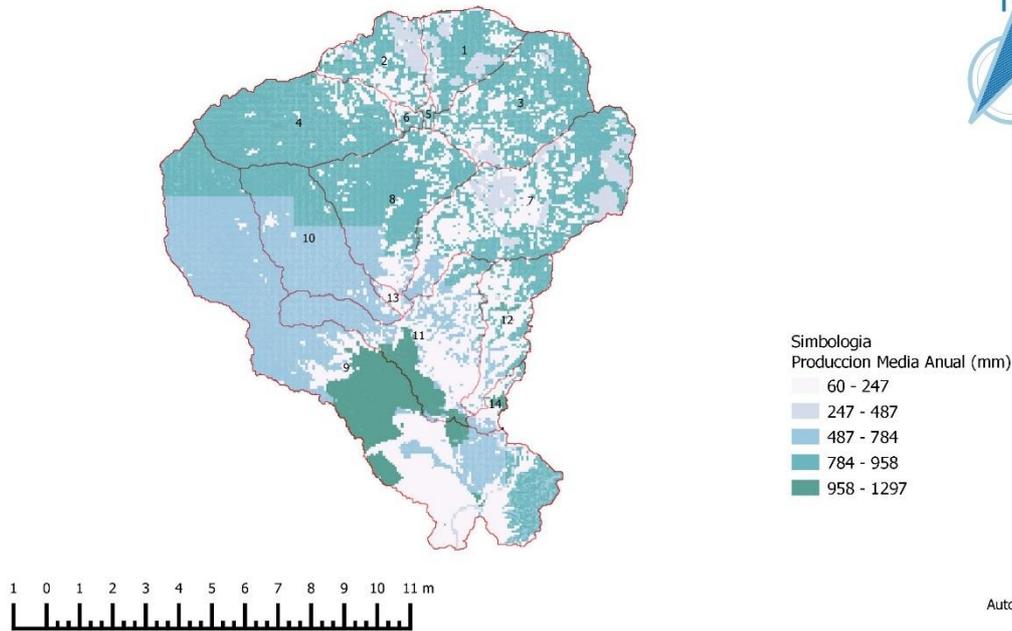


Figura 33 Grafico del rendimiento hídrico (m³/s) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Producción de agua, Media Anual de la Subcuenca del Río Manchaguala, San Pedro Sula, Cortes, Honduras C.A.



Autor: Ivan E. Garcia

Figura 34 Mapa de producción de agua (mm) media anual de la subcuenca del Río Manchaguala

Para el cálculo de la demanda de agua por parte de la población de la comunidad de Cofradía, San Pedro Sula, Cortes, se calculó la población futura a partir del año 2013 tomando como base el último censo del Instituto Nacional de Estadística (INE) del año 2001 y 2013.

$$Pf = Pa \left(1 + \frac{rt}{1000} \right)$$

Donde:

Pf = población futura

Pa = Población actual

r = coeficiente de crecimiento anual por 1,000 habitantes)

t = tiempo en años

Con los datos obtenidos del balance hídrico, el consumo promedio por persona y capacidad del acueducto se realizó la proyección para una demanda de agua a 50 años. En la comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, Cortés, se observa una distribución equitativa entre hombres y mujeres, con 18,835 individuos masculinos constituyendo el 48.05% de la población, y 20,364 individuos femeninos representando el 51.95%. Estos datos revelan un balance de género en la comunidad, donde las mujeres tienen una ligera

mayoría. En conjunto, la población total de la comunidad alcanza los 39,199 habitantes con una tasa de crecimiento poblacional de 1.78% (INE, 2016).

De acuerdo a los cálculos geométricos de población futura para el año 2050 la población tendrá un crecimiento de un 5% de la población actual equivalente a 41292 habitantes, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), una persona necesita 100 litros de agua al día equivalente a 0.1 m³, considerando este consumo diario, actualmente la población de Cofradía demanda de 3566.20 m³/hab/día, y para el año 2050 demandará la cantidad de 4129.22 m³/hab/día.

En un contexto más amplio es importante destacar que la oferta actual de agua es de 218,521.32 m³/día proveniente de la subcuenca del río Manchaguala, esta oferta es fundamental para el consumo diario de la población de Cofradía, este recurso asegura las necesidades básicas de la comunidad, como el abastecimiento doméstico y la higiene personal. La subcuenca desempeña un papel crucial en la salud y el bienestar de la población, y su gestión sostenible se vuelve aún más esencial ante el pronosticado aumento en la demanda de agua para el año 2050.

Cuadro 6. Oferta y demanda hídrica de la comunidad de Cofradía, San Pedro Sula, Cortes de la Subcuenca del Río Manchaguala.

Año	Población	Demanda de Agua Estimada m³/día	Demanda de Agua Estimada m³/anual	Oferta Hídrica de la subcuenca m³/día	Oferta Hídrica de la subcuenca m³/anual
2001	34662	3,466.20	1,265,163.00	218,521.32	79,76,0281.93
2013	39199	3,919.90	1,430,763.50	218,521.32	79,760,281.93
2050	41292	4,129.22	1,507,166.27	218,521.32	79,760,281.93

En resumen, al examinar las cifras de oferta y demanda de agua en la subcuenca del río Manchaguala y la comunidad de Cofradía para los años 2001, 2013 y la proyección para 2050, se destaca que la oferta hídrica de la subcuenca supera la demanda de agua por parte de la población.

Aunque la demanda estimada ha experimentado un aumento gradual a lo largo del tiempo, alcanzando 4,129.22 m³/días proyectados para el año 2050, la oferta hídrica analizada por SWAT mantiene el superávit para el 2050.

5. Conclusiones

1. La subcuenca del río Manchaguala presenta una variada cobertura del suelo, con un extenso 41% ocupado por bosques latifoliados húmedos que abarcan 5,865 hectáreas, un 18% está compuesto por bosque de coníferas densas, equivalente a 2595 hectáreas, no obstante, la presión antropogénica se hace evidente con un 31% destinado a la agricultura, cubriendo un total de 3736 hectáreas.
2. La subcuenca del Río Manchaguala exhibe características que la sitúan entre un estado de equilibrio, es una cuenca sedimentaria en fase de madurez, aunque teóricamente debería estar estabilizada, la invasión en la parte baja de su cauce y las intensas precipitaciones en las zonas altas y medias contribuyen a mantener un alto potencial erosivo. Este fenómeno se traduce en la ocurrencia de avalanchas que generan daños en el cauce inferior, la coexistencia de estos factores sugiere que, a pesar de ciertos indicios de estabilidad, la subcuenca sigue siendo vulnerable a eventos erosivos y requiere una gestión cuidadosa para mitigar los impactos adversos en la parte baja de su curso.
3. La comunidad de Cofradía, municipio de San Pedro Sula, revela una distribución equitativa de género en la comunidad, con una ligera mayoría de mujeres, con una población actual de 39,199 habitantes y una tasa de crecimiento poblacional del 1.78%, se proyecta un aumento del 5% para el año 2050, alcanzando los 41,292 habitantes.
4. De acuerdo a los informes de salida de SWAT, la subcuenca presenta una producción anual de agua promedio de 562.71 mm, siendo el año 2013 el período con la mayor producción hídrica registrada, alcanzando los 786 mm, al analizar los datos espaciales, se destaca que las subunidades 4, 9, 10 y 8 son las principales contribuyentes al volumen total de agua en la cuenca. En un contexto más amplio, en referencia al área de la subcuenca, su producción media anual se traduce en un volumen representado en metros cúbicos, ofreciendo una oferta diaria de 218,521.32 m³/día.
5. El análisis técnico de la oferta y demanda de agua en la subcuenca del río Manchaguala y la comunidad de Cofradía, considerando datos de población censada en el año 2001 y 2013 y proyectadas hasta año 2050, refleja una aparente superación de la demanda por parte de la oferta hídrica disponible, es relevante destacar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) sugiere que una persona necesita aproximadamente 100 litros, equivalente a 0.1 m³, de agua diariamente para sus quehaceres y necesidades básicas. La subcuenca posee la capacidad hídrica para suplir la demanda de agua de la población de Cofradía, incluso con el crecimiento medio anual proyectado para esa zona.

6. Recomendaciones

1. Para mejorar la fiabilidad de los datos meteorológicos diarios, mensuales o anuales, se recomienda considerar la inclusión de estaciones meteorológicas adicionales en área de estudio para empezar a generar una base de datos propias en vista que no existen estaciones cercanas para el análisis de series de tiempo de datos. Es importante

mencionar que, en ausencia de estaciones fijas en la zona, se han utilizado estaciones espaciales para recopilar los datos necesarios.

2. Los resultados de esta investigación son fundamentales para la toma de decisiones en áreas como la planificación del ordenamiento territorial, y la gestión de la subcuenca, este sentido, se recomienda utilizar estos resultados como punto de partida para realizar modelaciones futuras de mayor calidad, esto permitirá determinar con mayor precisión los caudales pico, el tránsito de las avenidas generadas por estos caudales y las zonas inundables. Es importante destacar que la producción hídrica de la subcuenca es un factor crítico en estos análisis. La comprensión de la producción hídrica puede proporcionar información valiosa sobre la disponibilidad y la gestión del agua, lo que a su vez puede informar las estrategias de manejo de cuencas.
3. Dada la falta de información espacial sobre los tipos de suelo en las diferentes regiones de Honduras, es altamente recomendable llevar a cabo estudios detallados del suelo en la zona de interés, estos estudios permitirán una comprensión más profunda de las características del suelo, como la textura, la estructura, la profundidad, la permeabilidad, la capacidad de retención de agua y la composición mineral, esta información es crucial para la gestión eficaz de los recursos hídricos y la planificación del uso de la tierra. Además, el conocimiento de los tipos de suelo puede informar sobre las prácticas de manejo de cuencas, ya que diferentes tipos de suelo tienen diferentes tasas de infiltración y capacidad de almacenamiento de agua.

Por lo tanto, estos estudios pueden contribuir significativamente a la precisión de las modelaciones hidrológicas y a la toma de decisiones informadas en la gestión de cuencas. En este sentido, se recomienda la realización de estudios de suelos en la región, para mejorar la gestión de los recursos hídricos y la planificación del uso de la tierra.

4. Dada la alta productividad hídrica de la subcuenca del río Manchagua, se recomienda realizar un estudio sobre el pago por servicios ecosistémicos en la zona donde se ubica la subcuenca del Río Manchagua, este estudio puede proporcionar una base sólida para la implementación de políticas que promuevan un mejor manejo de los recursos naturales, los servicios ecosistémicos, como la producción de agua, estos son fundamentales para el bienestar humano, el crecimiento económico y el desarrollo industrial.
Al asignar un valor monetario a estos servicios, se puede incentivar la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas, además, el pago por servicios ecosistémicos puede ser una herramienta eficaz para garantizar la disponibilidad de agua para las futuras generaciones.

7. Bibliografía.

- Arabi, M., Frankerberger, J., Engel, B., & Arnold, J. G. (2007). Representation of agricultural conservation practices with SWAT. Okt 2005 Abrufbar Uber Httpwww Tldp orgLDPabsabsguide Pdf Zugriff 1112 2005, 1–14. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8.
- FAO. (2023). Portal de Suelos de la FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>
- Faustino, J., & Jiménez Otárola, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2006). Guidelines for Soil Description. Roma: FAO.
- Fuentes, JD. 2004. Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. (en línea). Instituto Nacional de Ecología :1-47. Consultado 10 jun. 2018.
- GA-MSPS; ICF. (2020). Plan de Manejo Zona de Reserva El Merendón. Áreas de Producción de Agua San Pedro Sula, Cofradía y Naco 2020-2032. San Pedro Sula, Cortés: Gerencia Ambiental Municipalidad de San Pedro Sula (GA-MSPS), Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Areas Protegidas y Vida Silvestre (ICF).
- Gálvez, J. J. (2011). Ciclo Hidrológico. Lima, Jr. Puno 450 - Lima, Perú.
- Gálvez, D. J. (2011). Cartilla Técnica ¿Que es una Cuenca Hidrologica? (Primera ed.). (Z. I. Goicochea, Ed.) Lima, Peru.
- Gaspari FJ. 2002. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones Cooperativas, Buenos Aires: 179 p
- GREGORY J.K. and WALLING E.D. 1985. Drainage Bassin Analysis. The Bath Press. Victoria, Australia. 451 p.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.
- (INE), I. N. (2016). Insituto Nacional de Estadística (INE). Recuperado el 19 de noviembre de 2023, de <http://181.115.7.199/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=MUNDEP05&lang=E SP>

- Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geo enseñanza*, 11, 16.
- LINSLEY, R. K. 1977. Rainfall-runoff models – an overview In Proceedings of the International Symposium of Rainfall-Runoff Modeling May 15-21 Miss., EE.UU. Colo., EE.UU. Water Resources Publications. p. 3-22.
- López Cadenas de Llano F & Mintegui Aguirre JA. 1987. Hidrología de superficie. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España: 222 p
- Lux, B. 2016. Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas (en línea). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos. Guatemala. Consultado 5 jun. 2018. Disponible en <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Mazariego, S. V. (2021). Delimitación de Cuencas y Morfometría. Turrialba, Costa Rica.
- Rios, N. (2018). Caracterización y diagnóstico de la microcuenca del río Tuba. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Ponce, V. M. (s.f.) 2016. Ecuación de enrutamiento simplificada de Muskingum1. San Diego State University. https://ponce.sdsu.edu/ecuacion_de_enrutamiento_simplificada_de_muskingum.html
- USGS. (13 de Octubre de 2022). USGS, Science for a changing world . Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png?fbclid=IwAR0VjGalxXzdYwFyvPyaGGONcPivMZLQqs7gRwq9Xuas1sWf2xqUEvRCug>
- Ulmos, B. J. (marzo de 2017). UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, Facultad Tecnología de la Construcción. Obtenido de <http://ribuni.uni.edu.ni/1816/1/90112.pdf>
- Vásquez Aróstegui, R. (2019). Estudio hidrológico con fines de aprovechamiento hídrico en la Microcuenca de la quebrada Cachiyacu, ubicado en el distrito de San Antonio de Cumbaza, provincia de San Martín-Región San Martín
- VERSTAPPEN H. TH., 1983. Applied Geomorphology. Geomorphological Surveys for Environmental Development. ITC. Enschede, the Netherlands. 437 p.