



# UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN HIDROLÓGICO CON HEC-HMS Y RS-MINERVE DE LA  
CUENCA DEL RÍO CASACAY - EL ORO

GUAMAN REDROVAN EDWIN GUILLERMO  
INGENIERO CIVIL

MACHALA  
2020



# UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN HIDROLÓGICO CON HEC-HMS Y RS-MINERVE  
DE LA CUENCA DEL RÍO CASACAY - EL ORO

GUAMAN REDROVAN EDWIN GUILLERMO  
INGENIERO CIVIL

MACHALA  
2020



# UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO TITULACIÓN  
ANÁLISIS DE CASOS

MODELACIÓN HIDROLÓGICO CON HEC-HMS Y RS-MINERVE DE LA CUENCA  
DEL RÍO CASACAY - EL ORO

GUAMAN REDROVAN EDWIN GUILLERMO  
INGENIERO CIVIL

ESPINOZA CORREA JESUS ENRIQUE

MACHALA, 23 DE DICIEMBRE DE 2020

MACHALA  
2020

# TITULACION 2020-1 GUAMAN EDWIN

## INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE  
INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[www.geo.unizh.ch](http://www.geo.unizh.ch)

Fuente de Internet

<1%

2

[opuntiabrava.ult.edu.cu](http://opuntiabrava.ult.edu.cu)

Fuente de Internet

<1%

3

Submitted to Associatie K.U.Leuven

Trabajo del estudiante

<1%

4

Ping Li. "Application of Back-Propagation Artificial Neural Network Models for Prediction of Groundwater Levels: Case study in Western Jilin Province, China", 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 05/2008

Publicación

<1%

5

Submitted to Universität Hohenheim

Trabajo del estudiante

<1%

6

[revistas.uned.ac.cr](http://revistas.uned.ac.cr)

Fuente de Internet

<1%

7

[revistas.unicentro.br](http://revistas.unicentro.br)

Fuente de Internet

<1%



## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, GUAMAN REDROVAN EDWIN GUILLERMO, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado MODELACIÓN HIDROLÓGICO CON HEC-HMS Y RS-MINERVE DE LA CUENCA DEL RÍO CASACAY - EL ORO, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 23 de diciembre de 2020



GUAMAN REDROVAN EDWIN GUILLERMO  
0921862249

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios, por darme la vida y las fuerzas para superar cada obstáculo que se presentó en cada etapa estudiantil, brindándome la sabiduría, conocimiento y buen juicio ante las diversas adversidades.

A mis padres, por haberme apoyado en cada momento, por sus valores, consejos y motivación tenaz que me han formado como una persona de bien y siempre dar lo mejor de mi cada día.

A toda mi familia que estuvieron siempre pendiente de mí en toda mi formación académica, bríndame ese apoyo incondicional para alcanzar mi objetivo de vida propuesto.

A una persona especial, Mariuxi, que siempre estuvo presente en cada semestre dándome ese ánimo, ese apoyo desinteresado para nunca rendirme y sobre todo por confiar en mí durante todo este camino de alegrías y fracasos.

A mis grandes amigos que tuve la suerte de conocer en toda la carrera universitaria, con los cuales compartí una variedad de anécdotas y conocimientos para llegar hasta el final de la formación académica.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por cada día de vida, tendiéndome con buena salud y permitirme llegar hasta el final de mi formación académica.

A la Universidad Técnica de Machala, en especial a la Facultad de Ingeniería Civil que me albergo en toda la carrera universitaria y me formó como profesional.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil, que con sus conocimientos y ese afán de enseñar a todos los jóvenes para formarlos como profesionales competentes.

Al Ing. Jesús Espinoza, tutor de tesis, por su valiosa guía y profesionalismo en la elaboración de mi tesis de grado.

# **MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON HEC-HMS Y RS-MINERVE DE LA CUENCA DEL RÍO CASACAY – EL ORO**

**AUTOR:** Edwin Guillermo Guamán Redrován

**TUTOR:** Ing. Civil Jesús Enrique Espinoza Correa, Mgs.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo determinar la correlación que existe entre los caudales máximos calculados por HEC-HMS y RS-MINERVE, para verificar el grado de confiabilidad de estos modelos matemáticos, ya que en actualidad son los softwares más empleadas para la elaboración de modelo hidrológicos en subcuencas. Los datos que se emplearon fueron obtenidos de base de datos abiertas que se encuentran disponibles a nivel nacional como a nivel internacional, por lo cual se realizó una minuciosa investigación para seleccionar los datos que más influencia tenían en la subcuenca de estudio. Además, se efectuó una ardua investigación bibliográfica para seleccionar el método de cálculo que más ajuste a la característica de la subcuenca. Por su parte, para la caracterización geomorfológica se empleó un software de sistema de información geográfica y así obtener los parámetros necesarios para la modelación hidrológica. Luego se seleccionó el tipo de submodelo a emplear, donde uno de los más utilizados en diversas investigaciones en el CN (Número de curvas), en cual se basa en el uso y tipo de suelo de la subcuenca. También, se trabajó con hietogramas de precipitación para varios periodos de retorno. Por otra parte, se calculó la evapotranspiración potencial para un año con la calculadora FAO, cuyos insumos de entrada se obtuvieron de una base de datos a nivel mundial, por lo cual se delimitó para el área de estudio. Después de obtener los datos de entrada, se procedió al ingreso en los programas de modelación hidrológica escogidos para la investigación, datos como área, longitud de la cuenca, CN, % de impermeabilidad, tiempo de retraso, hietogramas para varios períodos de retorno, evapotranspiración, entre otros. Mientras que, para verificar el grado de confiabilidad de los caudales máximos se seleccionó la prueba de T de student, al ser la más empleada para variables cuantitativos cuyas mediciones se la hacen a una misma población en dos casos diferentes.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, son los hietogramas de precipitación, la evapotranspiración potencial y los caudales máximos para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno en los dos softwares mencionados. Luego, empleando el software SPSS se llevó a cabo el cálculo de la T de student, donde la correlación entre los caudales es alta y su diferencia poca significativa. Este estudio contribuye a lo que respecta a la elección más adecuada para modelaciones hidrológicas, en el caso de caudales máximos, por lo cual HEC-HMS y RS-MINERVE cumplen el objetivo de confiabilidad para su posterior uso. También, cabe mencionar que se han planteado diversas fuentes para la obtención de datos de entrada, como lo es en el caso para el cálculo de evapotranspiración, ya que algunas estaciones meteorológicas del país no cuentan con estos datos de entrada. Por otro lado, se hace hincapié en seleccionar el mejor submodelo que se adapte a las características de la cuenca con la que se va a trabajar, ya que cada submodelo contiene sus propios parámetros y se puede tener dificultades por una errónea elección.

**Palabras claves:** Modelo hidrológico, caudal máximo, evapotranspiración, RS-MINERVE, HEC-HMS

# **HYDROLOGICAL MODELING WITH HEC-HMS AND RS-MINERVE OF THE CASACAY RIVER BASIN - EL ORO**

**AUTHOR:** Edwin Guillermo Guamán Redrován

**TUTOR:** Ing. Civil Jesús Enrique Espinoza Correa, Mgs.

## **ABSTRACT**

The present degree work aims to determine the correlation that exists between the maximum flows calculated by HEC-HMS and RS-MINERVE, in order to verify the degree of reliability of these mathematical models, since they are currently the most widely used software for the elaboration of hydrological models in sub-watershed. The data used were obtained from open databases available at national and international level, therefore a detailed investigation was performed to select the data that had the most influence on the sub-watershed under study. In addition, an arduous bibliographic investigation was carried out to select the calculation method that best suits the characteristic of the sub-watershed. Equally, for the geomorphological characterization, a geographic information system software was used to obtain the necessary parameters for hydrological modeling. In addition, an arduous bibliographic investigation was performed to select the calculation method that best suits the characteristic of the sub-watershed. On the other hand, for the geomorphological characterization, a geographic information system software was used to obtain the necessary parameters for hydrological modeling. Then the type of sub-model to be used was selected, where one of the most used in several investigations in the CN (Number of curves), which is based on the use and type of soil in the sub-watershed. Besides, we worked with precipitation histograms for several return periods. On the other hand, potential evapotranspiration was calculated for a year with the FAO calculator, whose input was obtained from a worldwide database, so it was defined for the study area. After obtaining the input data, the hydrological modeling programs chosen for the research were entered, data such as area, length of the watershed, CN, % of impermeability, delay time, histograms for several return periods, evapotranspiration, inter alia. While, to verify the degree of reliability of the maximum flows, the student t test was selected,

since it is the most used for quantitative variables whose measurements are made to the same population in two different cases.

The results obtained in this work are the precipitation histograms, potential evapotranspiration and maximum flows for 2, 5, 10, 25, 50, 100 and 500 years of return period in the two mentioned software. Then, using the SPSS software, the calculation of the student T was carried out, where the correlation between the flows is high and their difference is not significant. This study contributes to what regards the most appropriate choice for hydrological modeling, in the case of maximum flows, so HEC-HMS and RS-MINERVE fulfil the reliability objective for its later use. Furthermore, it is worth mentioning that several sources have been proposed to obtain input data, as it is the case for the calculation of evapotranspiration, since some weather stations in the country do not have this input data. Otherwise, emphasis is placed on selecting the best sub-model that adapts to the characteristics of the watershed with which one is going to work, since each sub-model contains its own parameters and one may have difficulties due to an erroneous choice.

**Keywords:** Hydrological model, maximum flow, evapotranspiration, RS-MINERVE, HEC-HMS

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b>	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>3</b>
<b>GENERALIDADES DEL OBJETO DE ESTUDIO</b>	<b>3</b>
Definición y contextualización del objeto de estudio	3
Definición del objeto de estudio	3
Cuenca hidrológica	3
Contextualización del objeto de estudio	3
Historia y creación de la Parroquia Casacay	3
Descripción de la Parroquia Casacay	4
Descripción de la subcuenca del río Casacay	5
Hechos de interés	6
Macro	6
Meso	7
Micro	9
Objetivos de la investigación	10
Objetivo General	10
Objetivos específicos	10
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>11</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – EPISTEMOLOGÍA DEL ESTUDIO</b>	<b>11</b>
Descripción del enfoque epistemológico	11
Bases teóricas de la investigación	11
Hidrología y ciclo hidrológico	11
Precipitación	12
Temperatura	14
Evaporación	14
Presión de vapor de agua	15
Viento	15
Radiación solar	15
Evapotranspiración	15
Cuencas hidrográficas	16
Partes de la cuenca	17
División de la cuenca	18



Características geomorfológicas de la cuenca	19
Área del drenaje (A)	19
Perímetro (P)	19
Longitud de la cuenca (L)	19
Pendiente de la cuenca (s)	19
Forma de la cuenca (F)	20
Tiempo de concentración (Tc)	21
Densidad de drenaje (Dd)	21
Orden de cauces	22
Modelos hidrológicos	23
Reseña	23
Modelo hidrológico	24
Clasificación de modelos hidrológicos	25
SIG y la modelación hidrológica	28
Base de datos espaciales	30
Desarrollo de modelación hidrológica	31
Modelación hidrológica con HEC-HMS	32
Componentes del modelo	33
Componentes del modelo meteorológico	35
Modelación hidrológica con RS-MINERVE	36
Modelo SWMM	37
Modelo GSM	37
Modelo SOCONT	38
Modelo SAC-SMA	39
Modelo GR4J	40
Modelo HBV	41
Estadística e hidrología	48
Prueba de hipótesis.	48
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>50</b>
<b>PROCESO METODOLÓGICO</b>	<b>50</b>
Diseño o tradición de la investigación seleccionada	50
Proceso de recolección de datos en la investigación	50
Sistema de categorización en el análisis de casos.	52
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>66</b>
<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>66</b>
Descripción y argumentación teórica de resultados	66
Resultados de investigación	66
Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Casacay	66
Hietogramas y curvas IDF de la subcuenca	67

Modelación hidrológica en softwares.	68
T de student y correlación de caudales máximos	70
Conclusiones	71
Recomendaciones	73
<b>REFERENCIAS</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Coordenadas de localización.	5
<b>Tabla II.</b> Tipos de precipitación	12
<b>Tabla III.</b> Clasificación del índice de compacidad de Gravelius.	19
<b>Tabla IV.</b> Clasificación de red de drenaje.	20
<b>Tabla V.</b> Elementos hidrológicos para el modelo de la cuenca.	30
<b>Tabla VI.</b> Tipo de métodos para el cálculo de precipitación, pérdidas y flujo base.	31
<b>Tabla VII.</b> Métodos de precipitación de HEC-HMS.	32
<b>Tabla VIII.</b> Lista de parámetros y condiciones iniciales de los submodelos de RS-MINERVE.	38
<b>Tabla IX.</b> Valores para CN.	51
<b>Tabla X.</b> Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Casacay.	58
<b>Tabla XI.</b> Valores para hietograma.	60
<b>Tabla XII.</b> Valores de CN para subcuenca del río Casacay.	61
<b>Tabla XIII.</b> Caudales máximos.	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Mapa base de la Parroquia Casacay.	4
<b>Fig. 2.</b> Ubicación geográfica de la subcuenca del río Casacay.	5
<b>Fig. 3.</b> Ciclo hidrológico.	11
<b>Fig. 4.</b> Esquema de la precipitación.	11
<b>Fig. 5.</b> Tipos de precipitaciones: a) Convectiva. b) Orográfica. c.1) Ciclónica frente cálido. c.2) Ciclónica frente frío.	12
<b>Fig. 6.</b> Proceso de la evaporación.	14
<b>Fig. 7.</b> Ejemplo de cuenca hidrográfica del río Chone.	15
<b>Fig. 8.</b> Partes de una cuenca hidrográfica. Aportes e impactos que se presentan por actividades humanas.	16
<b>Fig. 9.</b> División jerárquica de las cuencas hidrográficas.	17
<b>Fig. 10.</b> Ejemplo de orden de cauce según Horton.	20

<b>Fig. 11.</b> Representación de un modelo de transformación lluvia-escorrentamiento.	22
<b>Fig. 12.</b> Tipos de modelos hidrológicos.	23
<b>Fig. 13.</b> Estructura de modelos espaciales: A. Modelo agregado. B. Modelo semidistribuido. C. Modelo distribuido.	24
<b>Fig. 14.</b> Representación de los datos de los SIG.	26
<b>Fig. 15.</b> Ejemplo de delimitación de cuenca hidrográfica	27
<b>Fig. 16.</b> Diferentes imágenes tipo ráster en WorldClim2.	28
<b>Fig. 17.</b> Ejemplo de esquema gráfico del modelo hidrológico.	29
<b>Fig. 18.</b> Fases de la modelación hidrológica que sigue HEC-HMS.	30
<b>Fig. 19.</b> Modelo SWMM.	34
<b>Fig. 20.</b> Modelo GSM.	34
<b>Fig. 21.</b> Modelo SOCONT.	35
<b>Fig. 22.</b> Modelo SAC-SMA.	36
<b>Fig. 23.</b> Modelo GR4J.	37
<b>Fig. 24.</b> Modelo HBV.	38
<b>Fig. 25</b> Condición para aplicar distribución.	44
<b>Fig. 26.</b> Proceso de recolección de datos.	45
<b>Fig. 27.</b> Sistema de categorización..	47
<b>Fig. 28.</b> Parámetros geomorfológicos extraídos con software GIS..	48
<b>Fig. 29.</b> Ráster de los parámetros para el cálculo de evapotranspiración del mes de enero..	49
<b>Fig. 30.</b> Selección de datos de entrada para el cálculo de evapotranspiración..	50
<b>Fig. 31.</b> Parámetros de la subcuenca..	52
<b>Fig. 32.</b> Datos ingresados del hietograma para un período de retorno de 2 años.	53
<b>Fig. 33.</b> Parámetros para el modelo meteorológico..	54
<b>Fig. 34.</b> Parámetros para el arranque de la modelación..	55
<b>Fig. 35.</b> Arranques de simulación por cada período de retorno..	55
<b>Fig. 36.</b> Configuración de unidades del programa..	56
<b>Fig. 37.</b> Cuenca del río Casacay..	56
<b>Fig. 38.</b> Selección de la opción para el río principal..	57
<b>Fig. 39.</b> Resumen de datos ingresados en el modelo hidrológico..	57
<b>Fig. 40.</b> Curvas IDF para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años..	59
<b>Fig. 41.</b> Hietograma de precipitación para un período de retorno de 2 años..	60

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1. Páginas web de bases de datos libres.</b>	74
<b>Anexo 2. Mapas temáticos de la cuenca.</b>	76
<b>Anexo 3. Tabla de precipitaciones de anuarios, intensidades y curvas IDF.</b>	86
<b>Anexo 4. Hietogramas de precipitaciones para períodos de diseño.</b>	87
<b>Anexo 5. Datos ingresando para evapotranspiración.</b>	93

<b>Anexo 6. Modelación hidrológica y caudal máximo para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de períodos de retorno con HEC-HMS.</b>	94
<b>Anexo 7. Modelación hidrológica y caudal máximo para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de períodos de retorno con RS-MINERVE.</b>	97
<b>Anexo 8. Datos y resultados de SPSS de la correlación y t de student.</b>	101

## INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país que se caracteriza por tener zonas montañosas, en donde se alberga amplias zonas verdes, en su mayoría naturales. Dentro de estas zonas se forman varias cuencas hidrográficas donde gracias al escurrimiento de las diversas precipitaciones forman cauces principales, que son empleadas para abastecer a poblaciones cercanas y también para regar cultivos. Los poblados obtienen el líquido vital para saciar una de las necesidades básicas que tiene el ser humano, pero por causas natural, ya sea por la propia topografía de la cuenca o por causas de la acción humana, como la minería, estas cuencas han llegado a inundarse, perjudicando a quienes se benefician del agua. En la ciudad de Machala, capital de la provincia de El Oro, se abastece de agua captada de la Río Casacay, además de otros cantones como El Guabo, Pasaje y otros lugares cercanos [7]; en muchas ocasiones se ha visto perjudicada la captación debido a la inundaciones que sobrepasan el nivel de la captación, por lo cual se ha visto la necesidad de implementar un modelo hidrológico que permita conocer los caudales máximos que se producen en dicha cuenca, empleando herramientas tecnológicas que faciliten el cálculo y sobre todo se adapte a los parámetros de la subcuenca del río Casacay. Por lo cual se optó emplear HEC-HMS y RS-MINERVE, con el objetivo de determinar la correlación entre los caudales máximos calculados, con el fin de verificar el grado de confiabilidad de ambos modelos para posibles obras de protección y control de inundaciones.

Un modelo hidrológico es la representación de los procesos que implican la distribución de lluvia y la generación de los caudales que se producen en una cuenca [34]. Además, existen diversos tipos de modelos hidrológicos, entre ellos físicos, analógicos y matemáticos [39]; donde se seleccionó el modelo hidrológico adecuado para las características de la subcuenca.

La metodología empleada es investigativa, ya que se empleó diversos trabajos para fundamentar y elegir el modelo hidrológico adecuado para la subcuenca de estudio. Además, para los parámetros de entrada se optó por bases de datos libres vigentes en el país como el IGM, y otra base de datos con información a nivel mundial la cual se la menciona en los apartados siguientes. Una vez obtenidos los insumos se procede al cálculo de los hietogramas de precipitación de diferentes períodos de retorno para la modelación, adicionando el parámetro de evapotranspiración potencial para obtener

caudales máximos más cercanos a la realidad. Adicionalmente, se utilizó un software de sistema de información geográfica para extraer los parámetros geomorfológicos.

Los resultados obtenidos presentan una correlación favorable para el cálculo de los caudales máximos con ambos softwares, siempre y cuando se tengan en cuenta las indicaciones que se especifican en los capítulos de la presente investigación.

El presente trabajo de titulación, cuenta con los siguientes capítulos:

**Capítulo I:** Se detalla el objeto de estudio, donde se define la contextualización de la población de Casacay, ya que es la de mayor influencia en la subcuenca. Además, los hechos de interés sobre la empleabilidad de modelos hidrológicos en diversos estudios. También, los objetivos del presente análisis de caso.

**Capítulo II:** Se especifica los diversos fundamentos teóricos que se investigó para la modelación hidrológica, todos los conceptos que abarca esta temática. Así mismo, como los parámetros geomorfológicos más importantes y los diversos submodelos que poseen los softwares a emplear.

**Capítulo III:** Se define el proceso metodológico para la recolección de los datos de investigación, los submodelos que permitan ingresar los datos de entrada de la subcuenca. Así mismo, como la prueba de hipótesis que se adapte a los resultados que se obtendrán.

**Capítulo IV:** Se presentan los resultados de la investigación como lo son los parámetros geomorfológicos, hietogramas, caudales máximos y la correlación entre los resultados obtenidos de HEC-HMS y RS-MINERVE.

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES DEL OBJETO DE ESTUDIO**

#### **1.1 Definición y contextualización del objeto de estudio**

##### **1.1.1 Definición del objeto de estudio**

###### **1.1.1.1 Cuenca hidrológica**

La palabra cuenca en el ámbito de la hidrología hace referencia a la diferencia de altura en una determinada extensión de tierra o superficie, es decir un terreno con diferencia de desnivel que tienen de semejanza su punto de encuentro en el centro [1]. Ahora una cuenca hidrológica son aquellos territorios definidos naturalmente donde se realizan todos los procesos socio ecológicos ligados entre sí [2], donde se concentran escurrimientos que recorren hasta que desembocan en un punto en común llamado punto de salida, que puede ser un mar o lago.

Mientras que Querol, menciona que una cuenca hidrográfica es “un sistema de aguas que abarca un río principal, donde se concentra todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) desde su nacimiento hasta su desembocadura, sus afluentes, lagos que desaguan en él, y las aguas subterráneas que reciben de ellos o les aportan agua” [3].

Así que una cuenca hidrográfica es aquella extensión de tierra delimitada por montañas, donde ocurren procesos hidrológicos, albergando vegetación y el río principal; cuyos beneficios son aprovechados por el ser humano.

##### **1.1.2 Contextualización del objeto de estudio**

###### **1.1.2.1 Historia y creación de la Parroquia Casacay**

Los primeros habitantes de la Parroquia Casacay fueron los descendientes de los mayas denominados máchalas; la Parroquia Casacay tenía gran afluencia de ingreso de los habitantes de Azuay denominados cañaris, y por motivos de intercambio comercial y cercanía entre las dos regiones se une la costa y la sierra.

La palabra “CASAUCAY PAMBA” se refiere lugar para divisar o espiar hacia abajo, dicha palabra es el origen del nombre de la Parroquia, con la llegada de los españoles se castellaniza este vocablo y se cambió por Casacay.

La Parroquia Casacay tiene su publicación en el Registro Oficial N° 514 el 3 de septiembre de 1986 y su apertura como parroquia es el 10 de octubre de 1986.

### 1.1.2.2 Descripción de la Parroquia Casacay

La Parroquia Casacay tiene una superficie aproximada de 60 Km<sup>2</sup>, limitada al Norte con el río Jubones y la Parroquia El Progreso; al Sur, con el Cantón Chilla; al Este, con el Cantón Chilla y la Parroquia Rural Uzhecurrumi; y, al Oeste con la Cabecera Cantonal de Pasaje. Como se indica en el mapa base de la Parroquia de Casacay [4].

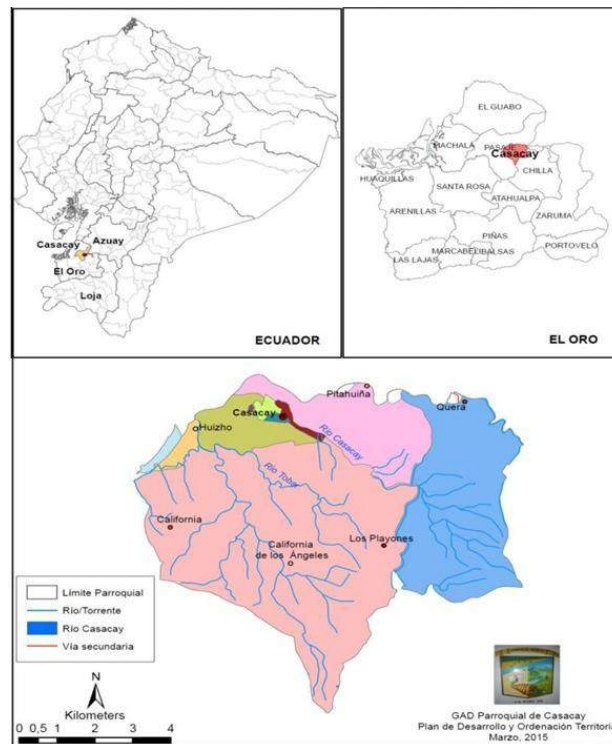


Fig. 1. Mapa base de la Parroquia Casacay [3].

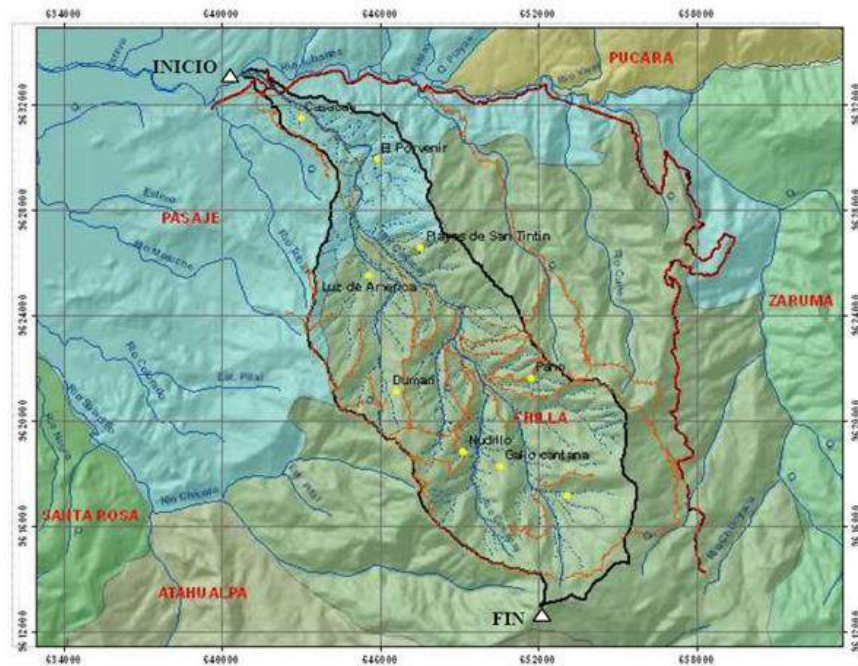
### Rango altitudinal.

La altitud de la Parroquia Casacay va desde los 111 msnm, en la desembocadura del río Casacay con el río Jubones, hasta los 3300 msnm, en el cerro Chilola, la cabecera parroquial está ubicada a 150 msnm [5].



### 1.1.2.3 Descripción de la subcuenca del río Casacay

El río Casacay geográficamente está localizada en el sur del Ecuador continental en la Parroquia Casacay Provincia de El Oro, en los cantones de Pasaje y Chilla; los ríos que desembocan las aguas son el Dumari, Tobar, Quera asimismo las aguas de las Quebradas que desembocan son el Pano, Mochata, Peña Negra y Ringilo, para posteriormente desembocar en el río Jubones.



*Fig. 2. Ubicación geográfica de la subcuenca del río Casacay [6].*

Dentro de la subcuenca del río Casacay se encuentran poblados como: Casacay, Dumari, Gallo Cantana, Nudillo, El Porvenir, Luz de América, Playas de San Tintín y Pao.

La altitud de la subcuenca del río Casacay va de los 3588 msnm a los 60 msnm, por lo que es un terreno con muchas elevaciones y una orografía muy irregular, representada por la cordillera de Chilla y las elevaciones de Sayucalo, Huizho y Cobisec.

La subcuenca del río Casacay tiene una superficie de 12178 Ha., siendo la longitud del río Casacay de aproximadamente 29106 m; y las coordenadas métricas de localización de la unidad en datum WGS84 UTM Zona 17 Sur [7], detalladas en la tabla I.

*Tabla I. Coordenadas de localización.*

<b>Orientación.</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>Norte</b>	641017	9633388
<b>Sur</b>	655268	9614627
<b>Este</b>	655913	9620502
<b>Oeste</b>	643178	9623799

*Esta tabla describe las coordenadas métricas de localización de la unidad hidrográfica en sistema de coordenadas WGS84 UTM Zona 17S [7].*

## **1.2 Hechos de interés**

### **1.2.1 Macro**

Los modelos hidrológicos se han venido empleando en diversos estudios para verificar o calcular diversos datos de interés que ayudan a tomar decisiones sobre las cuencas hídricas. Existen varias investigaciones en el continente asiático y europeo, donde emplean software de modelos hidrológicos, por ejemplo:

En Camboya, utilizaron el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) el cual se emplea para simular cual el volumen anual en la cuenca de Stung Pursat del lago Tonle Sap. El objetivo de esta investigación es simular el flujo diario de un arroyo y evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca después de eventos de precipitación, con el fin conocer el agua que puede resultar ser útil para el desarrollo y la gestión de futuros programas de recursos hídricos. Los insumos para la modelación fueron obtenidos del Ministerio de Recursos Hídricos y Meteorología de ese país y la cuenca se delimitó con 43 subcuencas [8]. Los resultados obtenidos fueron que el modelo da resultados más fiables cuando se generó flujo mensual, los mismo que fueron comparados con datos observados.

Mientras que, en España, Navarra, se empleó el modelo HEC-HMS para determinar las avenidas donde se produce la máxima crecida a lo largo del río Arga a su paso por Pamplona, ya que es susceptible a inundaciones. Por lo cual emplearon el modelo CN (Número de Curvas), ya que presentó mayor sensibilidad al momento varios datos. También, se usaron datos de estaciones meteorológicas como lo es la precipitación y datos obtenidos manualmente, por lo cual los resultados al final se vieron favorecidos, porque presentaron una

mejora significativa [9]. Con estos resultados se lograron identificar las avenidas con máximas crecidas y así tener una mejor planificación al momento que ocurran eventos extremos.

También, en la cuenca del río Jalón se implementó el modelo hidrológico HBV, el cual es un modelo semidistribuido desarrollado en Suecia por el Instituto Meteorológico e Hidrológico con el software RS Minerve 2.0. Este programa simula procesos de precipitación-escorrentía y su programación se orienta con objetos. El objetivo de esta investigación es comparar el modelo SIMPA, que fue desarrollado por CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), con la finalidad si los resultados se encuentran sobreestimados, es decir verificar posibles errores que se pueden cometer. Los datos de entrada que ingresan en el modelo HBV son precipitación, temperatura y evapotranspiración. Como resultados obtuvieron que los resultados del modelo SIMPA están sobrevalorados [10], por lo cual los caudales no ayudarían a tomar una decisión correcta en un posible plan de manejo del recurso hídrico.

Así mismo, en el cantón Valis, Suiza, en los últimos años en la cuenca del río Ródano ha sufrido grandes crecidas provocando diversos daños millonarios. Por lo cual se realizó una simulación para predecir las crecidas en tiempo real con el sistema de gestión de crecidas MINERVE, cuyo modelo hidrológico empleado fue el RS-MINERVE empleando modelos para una parte glaciar debido al hielo que se presentar en las montañas de la cuenca y otra sin glaciar [11]. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios por lo que tomaron también datos de caudales en campo y con los ajustes correctos se obtuvo una simulación de los caudales reales. Con estos resultados se podrán tomar decisiones oportunas para el control de crecidas en la cuenca.

### **1.2.2 Meso**

A nivel continental tanto en Norteamérica como en Sudamérica existen diversas investigaciones sobre modelos hidrológicos de ríos, aplicando aforos y usando software para conocer el comportamiento de los ríos, por ejemplo:

En la ciudad Azul, Buenos Aires, se implementó el modelo hidrológico HEC-HMS con ayuda de las CN (Números de curvas) para predecir respuestas hidrológicas en la cuenca que en su mayoría es de uso agrícola. Por lo cual, con ayuda de SIG delimitaron el área de estudio y diversos parámetros que necesitaban para la misma. Las precipitaciones se tomaron de la estación meteorológica Cerro del Águila, por su mayor influencia y cercanía a la cuenca. Los resultados que se obtuvieron reflejó que los caudales simulados se acercan bastante a los observados, contrastando con valores de ajustes como coeficiente de Nash-Sutcliffe,  $R^2$  y error medio cuadrático [12].

Por otra parte, en Bolivia, en el río Rocha ubicada en la cuenca principal Maylenco perteneciente a Cochabamba, se realizó un análisis hidrológico con ayuda del software HEC-HMS, con el fin de conocer caudales máximo en diferentes periodos de retorno con datos recopilados desde 1980 a 2016, comparado con tomas de nivel de agua realizadas in situ con una estación hidrométrica registrando niveles de agua cada 15 min y así poder pronosticar tormentas futuras y determinar franjas de seguridad para considerarlos en planes de uso de suelo de la zona [13].

Mientras que, en el río Bravo/Grande que se encuentre entre la frontera entre México y EEUU, es considerado uno de los ríos más largos de Norteamérica, el cual se estimó el caudal ecológico aplicando la normativa NMX-AA-159-SCFI-2012 de México, cuyos caudales se los estima según la importancia ambiental de la cuenca de estudio en un modelo que fue implementado en ese país [14]. Los resultados finales fueron que el río tiene 3 clases de redes hídricas, además que se requiere recuperación del ecosistema, ya que este ha sido modificado.

Además, en la región de La Araucanía, Chile, aplicaron un modelo hidrológico espacialmente distribuido con ayuda de softwares como ArcHydro y WARPHydro, con el fin de caracterizar dos cuencas, ya que al no tener suficiente información de la misma y con el fin de poder tener resultados bases

para toma de decisiones ante eventos hidrológicos [15]. El modelo permitió generar antecedentes básicos para la caracterización entre las dos cuencas.

### 1.2.3 Micro

En el país se han realizado diversas investigaciones sobre modelos hidrológicos e hidráulicos de ríos, los cuales como ya se mencionó en los anteriores apartados, permiten conocer el comportamiento del mismo aplicando software con diversos modelos, por ejemplo:

En la microcuenca del río Chaquilcay, Azuay, se empleó el modelo hidrológico HEC-HMS para obtener caudales con el fin de generar una correcta gestión de la cuenca. Previamente se obtuvieron parámetros morfológicos de la microcuenca con ayuda del software ArcMap, como el área, perímetro, pendiente, tipos de suelo, tiempo de concentración, longitud de la cuenca, densidad drenaje, cotas, etc. Además, se emplearon hidrogramas y CN para ingresar en el HEC-HMS para el cálculo del caudal en periodos de retorno de 25, 50 y 100 años [16].

También, en la cuenca Quinuas, ubicada al sur del Ecuador, evaluaron el desempeño del modelo hidrológico HEC-HMS para calcular el caudal máximo del río, empleando el método SMA (Contenido de humedad del suelo). Además, adicionaron datos de evapotranspiración usando el método Penman-Monteith que es recomendado por la FAO [17]. Se concluyó que este método tiene sensibilidad al momento de calcular los caudales máximos y que en su mayoría el agua se filtra en el suelo, tomando más de un mes en llegar al río.

Por otra parte, en la Quebrada de Cunduana, Riobamba, Chimborazo, debido a las fuertes lluvia provocaron un colapso en el alcantarillado por lo que se realizó una modelación hidrológica como ayuda de softwares como HEC-HMS mediante el CN y ArcGIS, con el fin de tomar decisiones oportunas y prevenir catástrofes en el alcantarillado [18]. Se obtuvieron como resultados diversos caudales en  $m^3/s$  para diversos periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, con el fin de que se pueda tomar medidas de protección como muros u otra estructura.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Determinar la correlación entre los caudales máximos obtenidos con los softwares HEC-HMS y RS-MINERVE con el fin de verificar la confiabilidad de los modelos hidrológicos.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Obtener insumos de información a través de la caracterización de la cuenca del río Casacay empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG)
- Realizar una minuciosa investigación bibliográfica sobre los softwares de modelación hidrológica para seleccionar los parámetros que más se adapten a las características de la cuenca de estudio.
- Calcular el caudal máximo de la cuenca con los programas mencionados para diferentes periodos de retorno.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – EPISTEMOLOGÍA DEL ESTUDIO

#### 2.1 Descripción del enfoque epistemológico

La modelación hidrológica se relaciona directamente con dos dominios, el primero es Bioconocimiento y recursos humanos sostenibles en la línea de investigación de manejo de recursos hídricos. El segundo dominio que abarca es Ordenamiento territorial, infraestructura, sustentabilidad ambiental y servicio para el desarrollo en la línea de investigación de aprovechamiento sustentable de los recursos minerales y energéticos [19], ya que este proyecto evaluará el desempeño de un modelo hidrológico conceptual en la simulación de los procesos de precipitación escorrentía, además de asegurar la sustentabilidad ambiental y tener resultados que permitan tomar decisiones para preservar el ambiente en la cuenca del río Casacay.

#### 2.2 Bases teóricas de la investigación

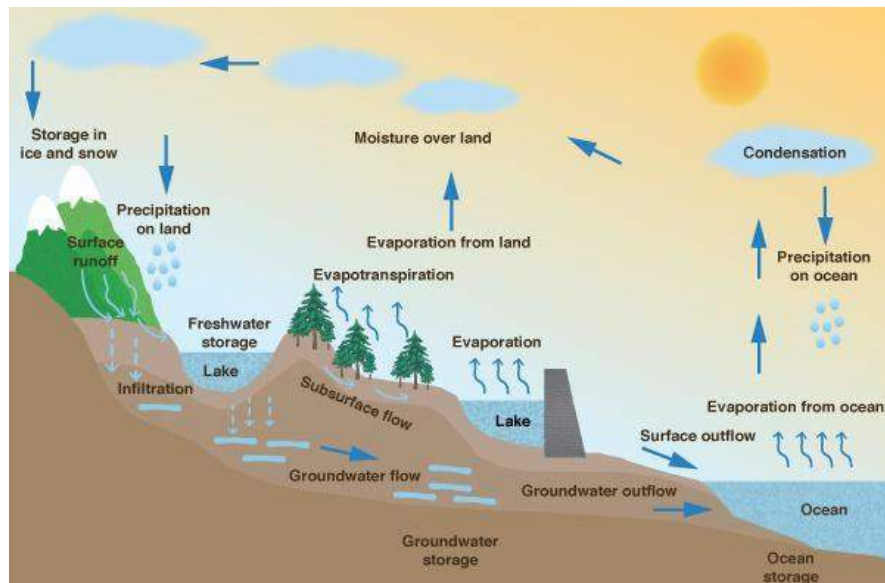
##### 2.2.1 Hidrología y ciclo hidrológico

La hidrología es una ciencia que estudia el recurso hídrico continental, sus propiedades; además de la influencia en el ambiente [20]. La hidrología juega un papel importante al momento de querer realizar una planificación del recurso, por lo cual se ha convertido en un aporte para diversos proyectos de ingeniería, como: puentes, vías, obras de captación, saneamiento, control de inundaciones, etc.

Además, en [21] se menciona que: “la hidrología es la ciencia que estudia la disponibilidad y la distribución del agua sobre la tierra”. Igualmente, se enfatiza la importancia de la hidrología en la planificación del recurso hídrico y en los diversos proyectos de ingeniería.

El ciclo hidrológico describe un proceso continuo donde se conecta la tierra, atmósfera, lagos, ríos y océanos [22], como se presenta en la Fig. 3. Este proceso es complejo, primero se evapora el agua superficial (mayor parte de los océanos) mediante la acción del sol, esta asciende hacia la atmósfera. Luego se condensa

y precipita sobre la superficie de la tierra, donde caen por acción de la gravedad y se depositan en las aguas superficiales para cumplirse el ciclo nuevamente.

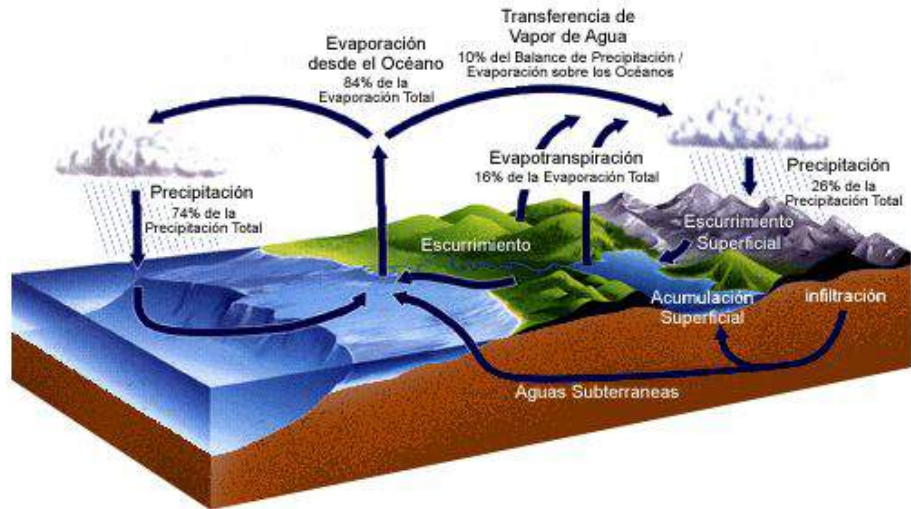


*Fig. 3. Ciclo hidrológico [22].*

### 2.2.2 Precipitación

La precipitación es el evento que ocurre después de la condensación, es el momento cuando las nubes se saturan y estas caen por acción de la gravedad e impulsada por los vientos [20], tal y como lo muestra la Fig. 4. Las precipitaciones varían dependiendo de la temperatura, además de la lluvia pueden caer en forma de nevisca y granizo [21], [23]. Hay que mencionar que, con la ayuda de estos eventos naturales se han realizado diferentes investigaciones hidrológicas e hidráulicas para poder predecir eventos extremos.





*Fig. 4. Esquema de la precipitación [20].*

Puesto que, en algunas localidades se han observado eventos naturales extremos como inundaciones, la precipitación se ha convertido en uno de los parámetros más importante para realizar modelos hidrológicos [24]. Con el fin de predecir precipitaciones altas y tomar decisiones acertadas.

Según la World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial) [25], menciona que la precipitación son aquellos elementos líquidos y sólidos procedentes de la condensación del vapor de agua que caen de las nubes. existen tres tipos de precipitación que pueden producirse:

*Tabla II. Tipos de precipitación*

<b>P. Convectiva</b>	<b>P. Orográfica</b>	<b>P. Ciclónica</b>
Ocurre cuando el aire se calienta y ese vapor asciende acumulándose con el aire que no se calentó. Esto produce lluvias ligeras y de larga duración.	Se da cuando los vientos húmedos y cálidos del mar son desplazados, chocan contra las montañas y ascienden. Al bajar la temperatura puede ocasionar nieve.	Ocurre cuando se encuentra una masa de aire frío y caliente. Cuando el aire caliente se encuentra en la parte de abajo se producen lluvias continuas y poco intensas. Mientras que, si el aire frío se encuentra abajo produce

		lluvias intensas y tormentas.
--	--	-------------------------------

La tabla describe tres precipitaciones que por lo general se presentan [20], [26].

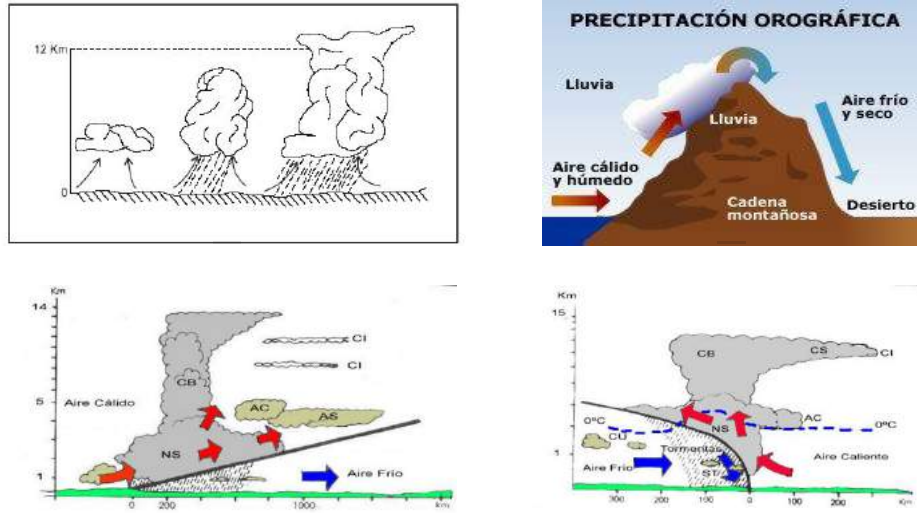


Fig. 5. Tipos de precipitaciones: a) Convectiva. b) Orográfica. c.1) Ciclónica frente cálido. c.2) Ciclónica frente frío [20], [26].

### 2.2.3 Temperatura

Según WMO [25] define a la temperatura como cantidad física, que caracteriza el movimiento aleatorio promedio de las moléculas, en un cuerpo físico. La temperatura varía según la latitud y el cambio climático en todo el año [27].

La temperatura influye en algunos procesos naturales como la evaporación y la evapotranspiración que se explicará en los siguientes apartados. Estos parámetros ayudan a tener una estimación más confiable al momento de realizar una modelación hidrológica. La temperatura se mide por medio de estaciones meteorológicas por medio de un termógrafo o termómetro [28], su unidad de medida en grados: Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) y Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ); siendo los  $^{\circ}\text{C}$  la medida más utilizada.

### 2.2.4 Evaporación

La evaporación es aquella cantidad de agua que pasa de estado líquido y gaseoso. Este vapor ocupa un espacio en la atmósfera. En hidrología, se refiere a la tasa neta de transferencia de agua perdida en estado de vapor [22].

### 2.2.5 Presión de vapor de agua

Según [29] el vapor de agua es cuando se alcanza un equilibrio entre las moléculas del aire y el agua, esto provoca una saturación en el aire y no puede almacenar más agua. Esto provoca la denominada presión del vapor de agua, depende mucho de la temperatura y según en el S.I., se la expresa en Pa o kPa.

### 2.2.6 Viento

El viento es aquel desplazamiento horizontal provocado por fenómenos naturales, es decir un fenómeno atmosférico. Estos vientos provocan el movimiento de presiones en zonas altas a bajas. La velocidad del viento (expresada en m/s) influye en la evapotranspiración provocando que sea mayor o menor [29], dependiendo del clima de la zona.

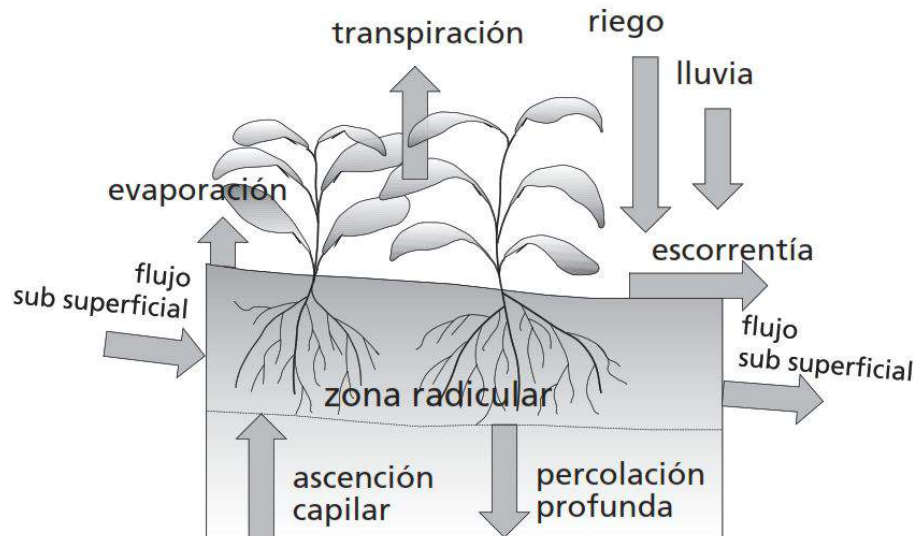
### 2.2.7 Radiación solar

El planeta tiene una fuente de energía natural proporcionada por el sol, esta es la radiación solar. Esta radiación varía dependiendo de la estación del año y el lugar en donde se encuentre. También depende de la densidad de la capa de ozono [29]. Además, esta radiación permite a la tierra mantenerse caliente permitiendo algunos procesos naturales uno de ellos la evaporación y evapotranspiración, la unidad que se expresa la radiación solar puede ser  $\frac{MJ}{m^2 \cdot día}$  o  $\frac{kJ}{m^2 \cdot día}$ .

### 2.2.8 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es un fenómeno físico natural y complejo, que forma parte del ciclo hidrológico [27], [30]. La Et permite que se realice una correcta cuantificación del recurso hídrico [31]. Además, es considerado una herramienta necesaria para monitorear la transferencia de la humedad hacia la atmósfera.

La Et o uso consuntivo consiste en toda el agua evaporada de diferentes superficies como vegetación, tierra y transpiración de las plantas [22] como se puede observar en la Fig. 6; y se desplaza hacia la atmósfera. Por lo general se expresa en cm o mm por día.



*Fig. 6. Proceso de la evaporación [29].*

La ET depende de cómo se evaporan el agua hacia la atmósfera, por lo que intervienen algunos factores [21], como:

- Presión de vapor de agua.
- Temperaturas: máxima, mínima y promedio.
- Radiación solar
- Velocidad del viento.

### 2.2.9 Cuencas hidrográficas

Para Avalos [2] las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos y desembocan en un punto en común.



*Fig. 7. Ejemplo de cuenca hidrográfica del río Chone [21].*

Cabe mencionar que, no toda el agua que se desemboca, ya que existen pérdidas provocadas por infiltración y evapotranspiración [20]. Además, dentro de la cuenca existen subcuencas que también se dividen por cadenas montañosas pequeñas que aportan al río principal, depósito natural o hacia el mar. Así que, una cuenca hidrográfica se la considera como un sistema de drenaje natural.

### **2.2.9.1 Partes de la cuenca**

Las cuencas hidrográficas tienen tres partes: alta, media y baja, se puede observar las partes en la Fig. 8. Estas cuencas se pueden identificar al aplicar dos criterios como lo son la altitud que si la altura varía entre 0 a 2500 msnm se puede identificar las tres partes, pero si la diferencia es menor se puede identificar solo 2 partes [32]. En cuanto a la topografía depende mucho del relieve de la cuenca porque pueden existir laderas, montañas, tierras onduladas, valles y tierras planas.

#### **1) Cuenca alta.**

También llamada zona de cabecera o captación. Es la parte más elevada de la cuenca [2]. En esta zona es también llamada de recarga, ya que es donde se producen los primeros escurrimientos.

#### **2) Cuenca media.**

Llamada zona de transición o de almacenamiento. Zona limitada por la cuenca alta y baja [2], donde los escurrimientos aportan a diversos caudales

y varían según el material que se presente: sedimentos, materias orgánicas o minería.

### 3) Cuenca baja.

Denominada como zona de descarga o de emisión. En esta zona es donde desemboca el río principal al océano o a un depósito natural (laguna) [2]. Es aquí donde se identifican los impactos de la cuenca.



*Fig. 8. Partes de una cuenca hidrográfica. Aportes e impactos que se presentan por actividades humanas [2].*

#### 2.2.9.2 División de la cuenca

Las cuencas se pueden dividir dependiendo de la importancia que tiene el curso del agua. Es decir, si un afluente aporta a otro curso principal, luego a un terciarios, etc.[32], estas divisiones son: subcuenca y microcuenca. Avalos [2] sugiere una división jerárquica de la cuenca hidrográfica como se muestra en la Fig. 9, donde lo divide por escalas e identifica según el afluente y aportación.

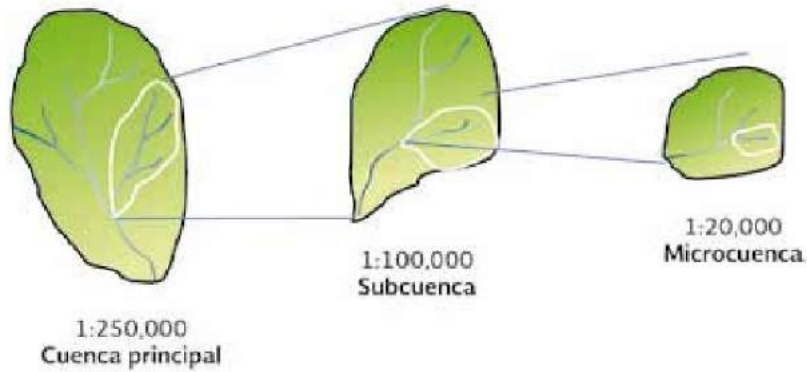


Fig. 9. División jerárquica de las cuencas hidrográficas [2].

## 2.2.10 Características geomorfológicas de la cuenca

### 2.2.10.1 Área del drenaje (A)

El área de la cuenca corresponde a aquella superficie limitada por líneas divisorias. Por lo general se la representa con planimetría para tener una mayor precisión y sus unidades son en  $\text{km}^2$  [20]. En la actualidad se cuenta con software de SIG para extraer diversos parámetros de una cuenca, en este caso el área.

### 2.2.10.2 Perímetro (P)

Toda la superficie que contiene a la cuenca, en donde la precipitación cae [20], se drena y recorre hasta el punto de salida.

### 2.2.10.3 Longitud de la cuenca (L)

Se determina desde el punto de entrada de la cuenca hasta donde va a desembocar el río [33], es decir el punto de la salida de la cuenca. Se la expresa en km.

### 2.2.10.4 Pendiente de la cuenca (s)

Corresponde a la diferencia de cotas de la cuenca según lo indica la ecuación (1) expresada en % o msnm/msnm.

$$s = \frac{C_{Max} - C_{Min}}{L} \quad (1)$$

Donde:

$s$  = Pendiente de la cuenca (adimensional o %)

$C_{Max}$  = Cota máxima de la cuenca (msnm).

$C_{Min}$  = Cota mínima de la cuenca (msnm).

$L$  = Longitud de la cuenca (msnm).

#### 2.2.10.5 Forma de la cuenca (F)

Corresponde si la cuenca es alargada, redonda o irregular [33], dependiendo de la superficie que abarque. La forma de la cuenca por lo general se la calcula con dos parámetros:

a) **Factor de forma ( $k_f$ ).**

La forma de la cuenca se calcula mediante la ecuación (2) propuesta por Horton [20], mientras más cercana sea el valor a la unidad o superior es una cuenca redonda, y si se aleja más de la unidad es una cuenca alargada.

$$k_f = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

Donde:

$k_f$  = Factor de forma (adimensional)

$A$  = Área de cuenca (km<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud de la cuenca (km)

b) **Coficiente de compacidad ( $K_c$ )**

Llamado también coeficiente de Gravelius, que permite comparar la cuenca con una circunferencia [33], la cual relaciona al perímetro con el área. Se la expresa con la ecuación (3):

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Donde:

$K_c$  = Coeficiente de compacidad o de Gravelius (adimensional)

$P$  = Perímetro de la cuenca (km)

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)



El índice de compacidad que se acerque a la unidad, indica que la cuenca se asemeja a una circunferencia [33], mientras que, si este valor va aumentando se considera una cuenca irregular más cercana a una forma rectangular según se muestra en la Tabla III.

*Tabla III. Clasificación del índice de compacidad de Gravelius.*

$K_c$	Clasificación
1 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
1.25 a 1.5	Oval redonda a oval-oblonga
1.5 a 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular

En la presente tabla se detalla la clasificación según el índice de Gravelius obtenido [33].

#### 2.2.10.6 Tiempo de concentración ( $T_c$ )

El tiempo de concentración corresponde al tiempo en que demora una gota de lluvia en llegar hasta el punto de salida de la cuenca [20]. Existen diversas fórmulas para calcular el tiempo de concentración, pero la más empleada es la ecuación (4) planteada por Ramser Kirpich.

$$T_c = 0.0663 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (4)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (h)

$L$  = Longitud de la cuenca (km)

$S$  = Pendiente de la cuenca (m/m)

#### 2.2.10.7 Densidad de drenaje ( $D_d$ )

Este parámetro permite conocer la capacidad de drenaje de la cuenca, que tanto podría demorar la escorrentía, por lo cual depende del tipo de suelo que cuenta la cuenca [33]. La densidad de drenaje es la relación entre la longitud de la cuenca y el área, como se lo expresa en la ecuación (5). Mientras menor sea la unidad, su drenaje es bajo, pero si supera a la unidad se considera que la cuenca va

aumentando su capacidad de drenaje. En la tabla IV se presentan rangos de valores referenciales de densidad de drenaje.

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (5)$$

Donde:

$D_d$  = Tiempo de concentración (km/km<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud de la cuenca (km)

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

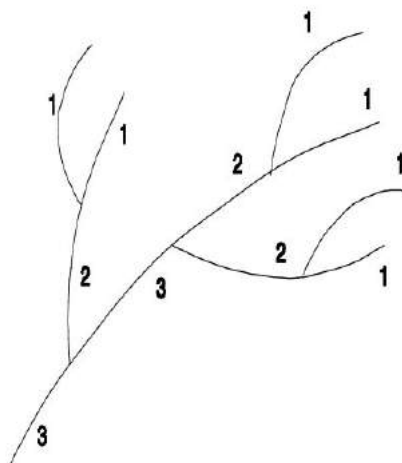
*Tabla IV. Clasificación de red de drenaje.*

Rangos (km/km <sup>2</sup> )	Clases
0.1 – 1.8	Baja
1.9 – 3.6	Moderada
3.7 – 5.6	Alta

*En esta tabla se presentan las diferentes clases de drenajes que puede tener una cuenca, dependiendo del valor de densidad de drenaje [33].*

#### 2.2.10.8 Orden de cauces

Permite conocer la clasificación de los distintos cauces que alimentan al cauce principal de salida, de acuerdo al grado de bifurcación [20]. En 1940, el ingeniero Robert Horton implementó el orden de los cauces partiendo de las aguas nacientes como primer orden, segundo orden a la unión de o más de primer orden y así sucesivamente como se muestra en la Fig. 10.



*Fig. 10. Ejemplo de orden de cauce según Horton [20].*

## 2.2.11 Modelos hidrológicos

### 2.2.11.1 Reseña

La modelación hidrológica empieza a inicios del siglo XIX empleando el diseño de canales, presas, redes de drenajes, diques, distribución de agua y puentes [34]. A mediados del siglo XX, la modelación se limitó a tratar de explicar con expresiones matemáticas, el funcionamiento mecánico del ciclo hidrológico, donde surgieron: método racional, infiltración de Horton, estimaciones de evapotranspiración, etc.

Mientras que, en la década de los 60, con la inminente llegada de la revolución digital, se elaboró el primer intento de representar el ciclo hidrológico completo de una cuenca, donde fue planteada por Standford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 [35]. Debido a esto, con ayuda de los sistemas computacionales se ha podido desarrollar modelaciones en diferentes periodos de tiempo.

Además, desde la década de los 70, ha surgido la necesidad de realizar modelos hidrológicos con bases en la estadística y en la hidrología estocástica [15], con el fin de conocer cuál es el comportamiento de un río ante tormentas, la cuales en su mayoría de casos provocan inundaciones afectando al terreno, ciudades cercanas y a la sociedad.

Los modelos hidrológicos a lo largo de la historia han saciado la necesidad de predecir eventos futuros para evitar potenciales daños relacionados con el régimen hídrico [36]. Más aún, estos modelos se han convertido en herramientas muy útiles para mitigar o abastecer el agua de las cuencas.

Estos modelos han ido evolucionando de acuerdo a las necesidades de cada población y los diferentes parámetros que tienen las cuencas hidrográficas de cierto sector, en la actualidad se emplean software especializados como el HEC-HMS, RS-MIVERVE, los cuales son de uso libre, que permite al usuario ingresar los datos más significativos y así poder tomar decisiones acertadas para controlar y prevenir inundaciones a lo largo del río.

### 2.2.11.2 Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico ayuda a representar los diversos procesos implicados en la distribución de lluvia y generación de caudales de una cuenca determinada [34]. Estos modelos pueden ser matemáticos, en donde se parte con una ecuación empírica empleando métodos in situ; o físicos, donde se representan caudales reales a escala. Por consiguiente, el modelo hidrológico no sólo permite predecir condiciones a futuro del flujo, sino ayuda a realizar una planificación del recurso hídrico, ya que estos pueden ser empleados para abastecer o prevenir algún evento extremo [13], como inundación o acumulación de sedimentos.

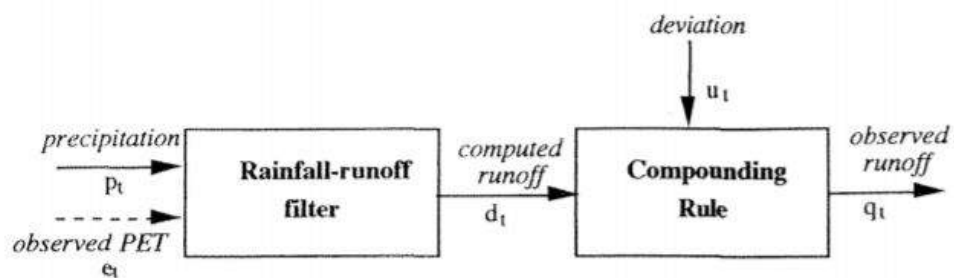


Fig. 11. Representación de un modelo de transformación lluvia-escorrentía [37].

Un modelo empleado en la mayoría de los modelos es transformando la lluvia a escorrentía, que son generadas por los hietogramas donde se encuentra información de duración de la tormenta, las cuales ayudarán a calcular los caudales que pasan por la cuenca en un tiempo determinado por el usuario.

Cabe mencionar que, estos modelos hidrológicos deben cumplir dos condiciones:

- a) Los datos para la modelación y calibración deben ser accesibles.
- b) La modelación y calibración deben ser lo más sencillo posible.

Esta última condición hace referencia a requerimientos de un modelo hidrológico, en especial cuando se tiene pocos datos, por lo cual se deben ingresar los parámetros básicos que se tengan. Por lo cual, Xu y Vandewiele [37] recomiendan ser cautelosos con los números de parámetros que se van a ingresar.

En otras palabras, se debe emplear el modelo que mayor se ajuste a los datos que se tienen, que el tiempo de cálculo sea reducido [38], permitiendo así tener respaldo para tomar decisiones acertadas en la planificación de la cuenca hidrográfica.

### 2.2.11.3 Clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos en especial los de lluvia-escorrentía se los clasifica según los parámetros que se tiene y aplicar el modelo adecuado [36]. Por lo cual, se clasifican como modelos distribuidos y agrupados [39]. En cuanto, a la función de tiempo y espacio se los puede clasificar como modelos deterministas y estocásticos tal y como se puede observar en la Fig. 12, donde describe todos los modelos que pueden emplearse en diferentes escenarios.

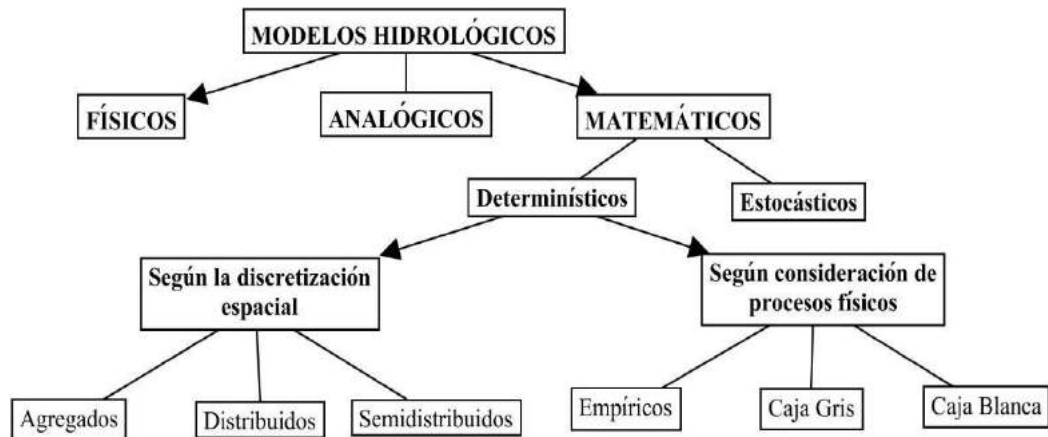


Fig. 12. Tipos de modelos hidrológicos [39].

#### Modelos físicos.

Este modelo emplea variables que son medibles. No requiere datos hidrológicos y meteorológicos, pero si requiere parámetros que describan las características físicas de la cuenca [39]. Estos datos pueden ser contenido de humedad, topografía, etc. Estos modelos se los calcula con ecuaciones ya establecidas que permitan el cálculo de las diferentes solicitaciones que se estén investigando.

#### Modelos analógicos.

Los modelos analógicos son orientados a la observación considerando datos existentes. Esta modelación se la ha denominado modelos basados en datos[39].

Los resultados que se esperan obtener son hidrogramas unitarios, modelos de regresión lineal, etc.; permite encontrar una relación entre entradas y salidas.

### **Modelos matemáticos.**

En este modelo se describen los procesos hidrológicos. Consiste en una serie de interconexiones entre sí [39], donde se representa los elementos físicos de la cuenca y la influencia de la lluvia, infiltración, evaporación, drenaje, etc. Este modelo aplica diferentes ecuaciones que evalúan el modelo a partir de los datos que se ingresan.

El objetivo principal de un sistema hidrológico es comprender la operación del sistema y predecir la salida [23]. Por lo cual, el sistema hidrológico representa de forma simplificada los fenómenos ocurridos durante todo el ciclo hidrológico. Los modelos matemáticos se dividen en modelos determinísticos y estocásticos.

#### **a) Determinísticos.**

Estos modelos producen respuestas idénticas para el mismo conjunto de entrada [36], por lo cual se busca minimizar la diferencia entre datos simulados y reales, por lo cual los parámetros se van ajustando según sea lo necesario.

En hidrología, los modelos deterministas tienen diferentes aplicaciones [36], como por ejemplo: cálculo de precipitación, cálculo de flujo de secciones, determinar movimiento, flujo potencial, caudales en ríos o canales, diámetros de conductos, simulación de condiciones del flujo, etc.

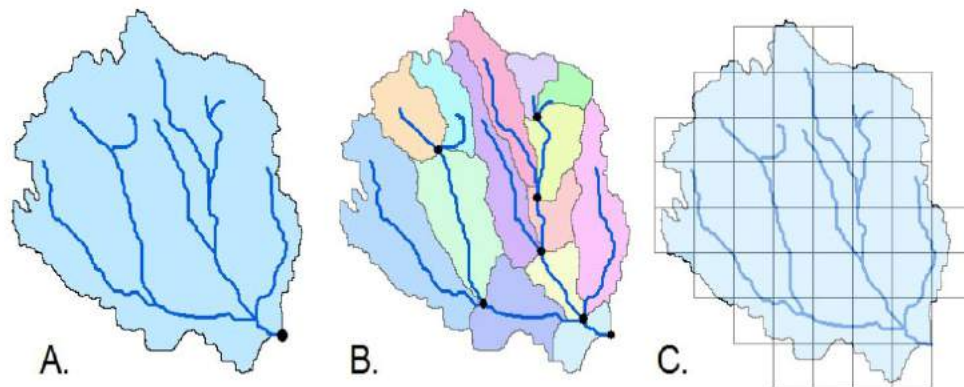
#### **b) Estocásticos**

Son aquellos modelos en los que intervienen una o más variables y tiene un comportamiento aleatorio, teniendo una distribución probabilística [36]. Este modelo depende de la probabilidad y del tiempo. Este modelo por lo general se emplea para determinar la operación óptima de sistemas de reservorios y la simulación de condiciones de sistemas de operación en canales, plantas de tratamiento, irrigación, etc.

### **2.2.11.4 Clasificación según la discretización espacial**

Esta clasificación del modelo proporciona una forma de representar una cuenca para realizar modelación [40], se dividen en tres modelos como se muestra en la Fig. 13. Estos datos de entradas representan algunos parámetros ya tomados

espacialmente, como precipitación, vegetación, tipo de suelo, topografía, clima, etc.



*Fig. 13. Estructura de modelos espaciales: A. Modelo agregado. B. Modelo semidistribuido. C. Modelo distribuido [40].*

### **Modelos agregados**

Estos modelos tratan al área de la cuenca como una sola unidad tal y como se muestra en la Fig. 13, por lo cual no se puede trabajar con datos variados [40]. El modelo agregado está diseñado para simular la escorrentía y calcular el caudal de salida, no permite calcular caudales específicos dentro de la cuenca.

Por lo cual es recomendable emplear este modelo si se desea tener un resultado previo o tentativo, con ese fin ya emplear otro modelo donde permita el ingreso de distintas variables y tener un cálculo más exacto.

### **Modelos semidistribuidos**

Los modelos semidistribuidos son un tipo de variación de modelos agregados. En este modelo permite el ingreso de diversos parámetros [40]. Además, divide la cuenca en áreas más pequeñas como se muestra en la Fig. 13, para ingresar diversas variables. Estas subáreas permiten caracterizar la cuenca con datos de entrada ya sean agrupados y distribuidos., pero esto no afecta el cálculo ya que el modelo los considera semidistribuidos según las subáreas que se tengan. Por lo general, este tipo de modelos es el más usado al momento de realizar modelaciones hidrológicas.

Uno de los beneficios de emplear este modelo es el tiempo en obtener los resultados y el uso de menos datos de entrada [40]. Estos datos se los debe

promediar, por ejemplo, los datos de lluvia en una cuenca se debe realizar un promedio para ingresar en cada subárea, o también empleando el método de Thiessen para distribuir la precipitación dentro de la cuenca.

### **Modelo distribuido**

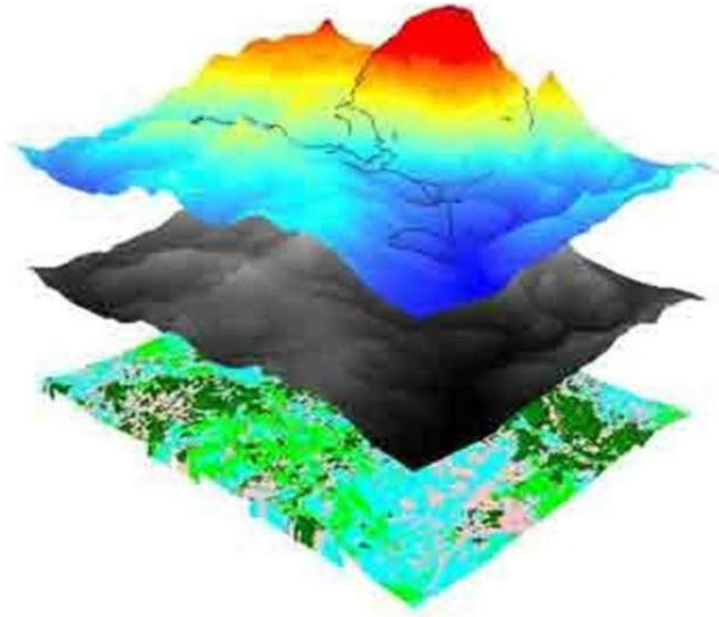
Estos modelos son complejos, ya que se tienen una variedad de datos que se puede ingresar [36]. Los modelos distribuidos separan cada dato en celdas pequeñas como se puede observar en la Fig. 13, es decir, datos por cada píxel [40]. Esta información ayuda a tener datos más cercanos a la realidad de una cuenca hidrográfica.

El principal dato de entrada para este modelo es el Modelo Digital de Elevación (DEM), imágenes satelitales, precipitación y otros datos por pixeles, topografía y parámetros físicos de la cuenca.

#### **2.2.12 SIG y la modelación hidrológica**

El Sistema de Información Geográfico (SIG) engloba diversas áreas, por lo cual, no existe un concepto único, ya que, un SIG es la relación entre hardware, software y los procesos para una salida de datos espaciales según sea la necesidad del problema [7], [41]. Por lo cual se lo considera como una base de datos representada en forma de imagen [42], tal y como se observa en la Fig. 14. Cada cuadro o píxel de la imagen alberga diversos datos que pueden ser empleados para la problemática que se desee resolver.





*Fig. 14. Representación de los datos de los SIG [42].*

Los datos que manejan los SIG son de tipo vectorial, donde cada vector posee información relevante [42]. Cabe mencionar que, los SIG más empleados en la actualidad son de tipo ráster, ya que los softwares que se emplean para la gestión o modelación de cuencas admiten este tipo de datos para una mejor facilidad de cálculos o la obtención de parámetros [43], como delimitar, cálculo de áreas, perímetros, etc.

De modo que, los SIG y los modelos hidrológicos en la actualidad se encuentran estrechamente relacionados, ya que se proporcionan parte de los insumos necesarios de una cuenca para una modelación hidrológica, como por ejemplo delimitar la cuenca (Fig. 15), orden de cauce, cálculo de evapotranspiración, tipo de suelo, zonas impermeables, zonas propensas a inundaciones, identificar el punto de salida de la cuenca, ubicación de la estaciones meteorológicas e hidrológicas, etc.

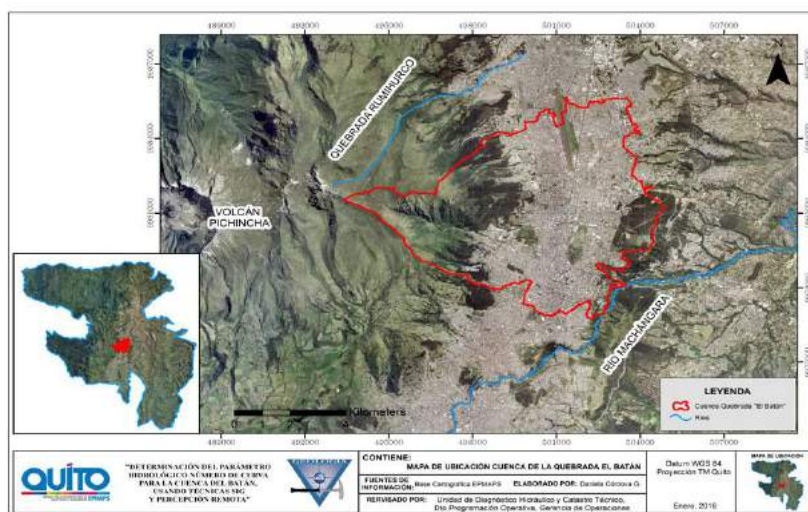


Fig. 15. Ejemplo de delimitación de cuenca hidrográfica [43].

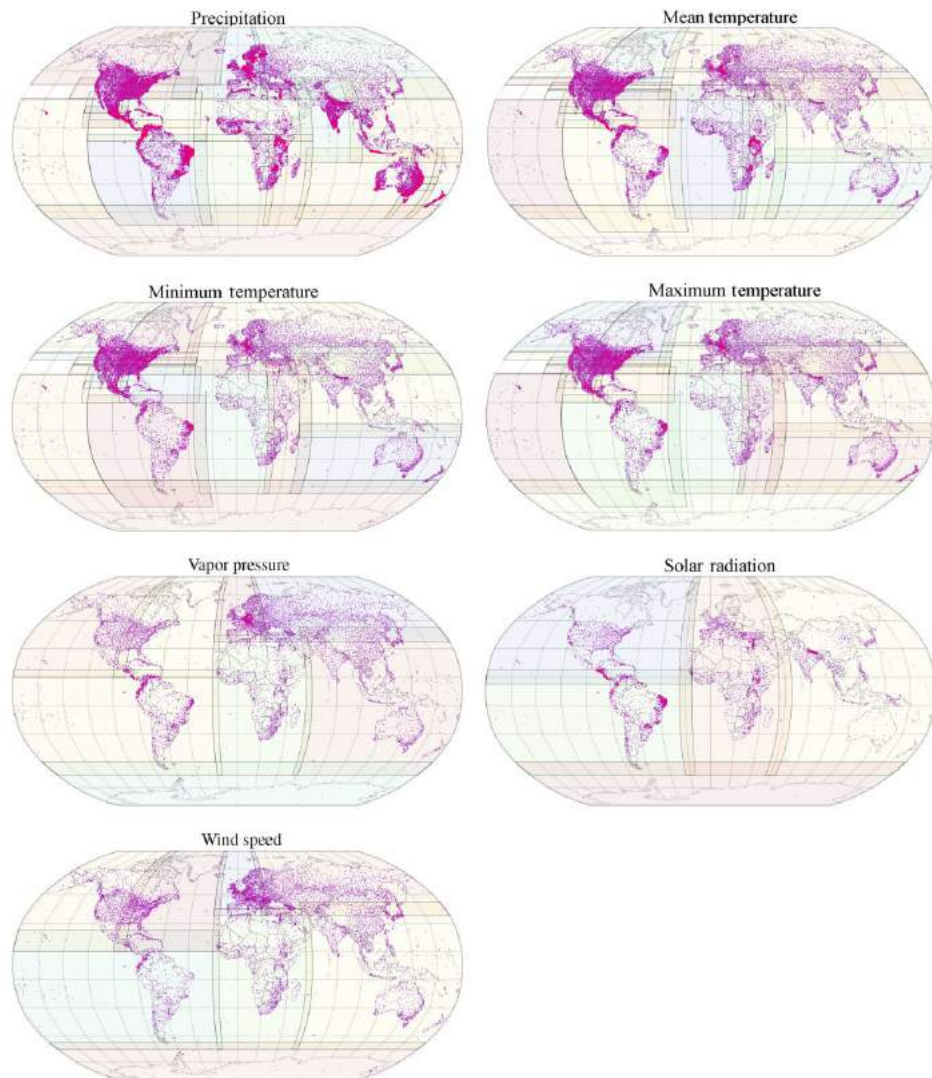
### 2.2.13 Base de datos espaciales

Las bases de datos espaciales o también llamado Open Access Hub son datos espaciales tomados por satélites, donde se puede acceder libremente para su posterior uso. Estos datos proporcionan alternativas para cuencas hidrográficas con poca información o en casos extremos sin ningún dato [44]. Estos datos se emplean en la actualidad ya que tienen buena resolución permitiendo aplicarlas en diversas problemáticas, como gestión del recurso hídrico, inundaciones y mitigar desastres.

En la actualidad existen diversas páginas de Open Access como imágenes del satélite SENTINEL [45], que se encuentra en la página [search.remotepixel.ca/#4.04/5.66/-72.37](http://search.remotepixel.ca/#4.04/5.66/-72.37), donde se pueden descargar imágenes de tamaño de celda de 10x10 m. Mientras que, para descargar Modelos Digitales de Terrenos (MDT) los más empleados en algunas investigaciones es en Copernicus Open Access Hub ([scihub.copernicus.eu/dhus/#/home](http://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)), esta página ofrece MDT con tamaño de píxel de 12.5 x 12.5 m.

Además, si se va a realizar cálculos de evapotranspiración y no se cuenta con suficientes datos para el cálculo, en la actualidad se cuenta con WorldClim 2 [46], donde se puede descargar diferentes imágenes tipo ráster como se muestra en la Fig. 16. Estas imágenes ráster se encuentran disponibles en cuatro resoluciones espaciales: 30 segundos toma 1 km<sup>2</sup> hasta 10 min toma 340 km<sup>2</sup>, estos datos son promedios desde 1970 - 2000.

De modo que, estas bases de datos permitirán elaborar un modelo hidrológico más acercado a la realidad como lo menciona [44], donde los resultados tienen una mejor capacidad cuantitativa de estimación.



*Fig. 16. Diferentes imágenes tipo ráster en WorldClim2 [46].*

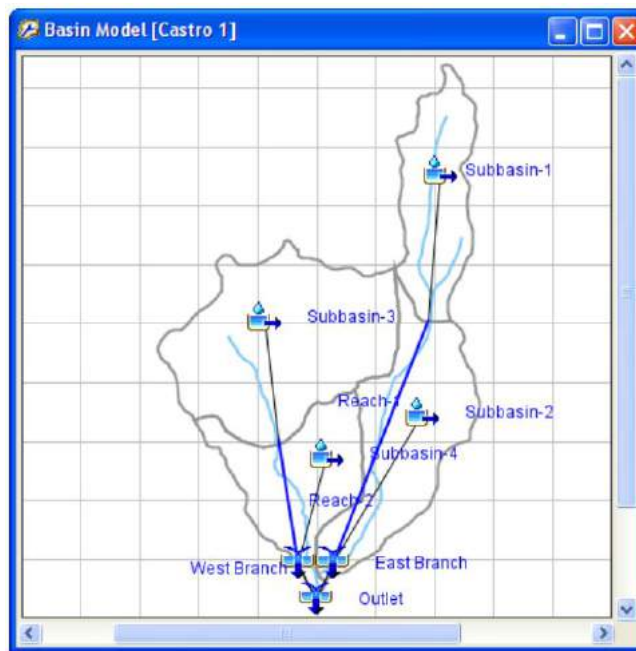
#### **2.2.14 Desarrollo de modelación hidrológica**

El desarrollo de la modelación hidrológica corresponde al ingreso de diversos insumos que se cuentan, si son pocos o casi nulos, en apartados anteriores se expuso que existen diversas páginas Open Access para descargar imágenes ráster que contienen información relevante para la modelación. Así que, dependiendo de la problemática se eligen los softwares adecuados. Por lo cual, se expondrán dos softwares libres: HEC-HMS y RS-MINERVE.

### 2.2.15 Modelación hidrológica con HEC-HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU. Este programa fue desarrollado para elaborar diversas simulaciones en base al proceso denominado lluvia-escorrentía de cuencas [47]. HEC-HMS se lo emplea para cuencas con grandes áreas y poder solucionar los problemas que se busquen resolver, en la Fig. 17 se muestra un ejemplo de esquema gráfico de un modelo hidrológico. Además, permite simular eventos hidrológicos, lineales y semidistribuidos [13], con el ingreso de precipitaciones máximas. Además, el HEC-HMS toma en consideración otros parámetros que se presentan en la cuenca como: pérdidas por infiltración, zonas impermeables, etc.

Por otro lado, una vez obtenido el modelo hidrológico según los datos que se posean, se procede a determinar la gráfica de hidrogramas de crecidas, donde se detalla diferentes horas en cierto día para conocer cuánto caudal se ha generado y así seguir con la simulación de inundaciones en una cuenca para determinar las zonas más susceptibles a inundaciones.



*Fig. 17. Ejemplo de esquema gráfico del modelo hidrológico [48].*

Se debe agregar que, HEC-HMS sigue una secuencia de fases para la modelación hidrológica, la cual se esquematiza en la Fig. 18.

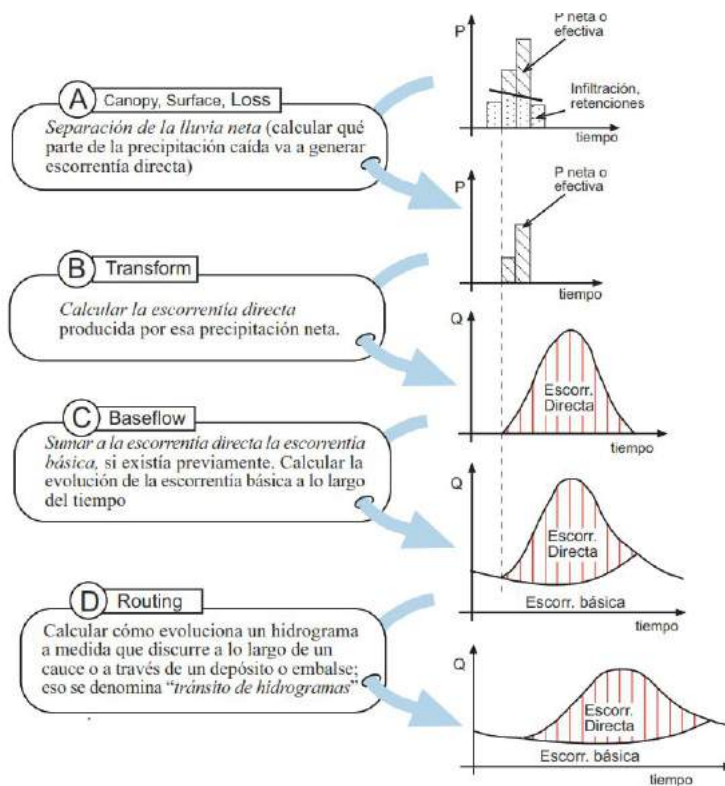


Fig. 18. Fases de la modelación hidrológica que sigue HEC-HMS [49].

En las tres primeras fases se ingresan los parámetros que el usuario define según sea las características de la subcuenca y que más se adapta a la misma [49]. En la última fase realiza el cálculo a lo largo del cauce. Finalmente, se obtienen como resultados hidrogramas de caudales.

### 2.2.15.1 Componentes del modelo

La representación física de la cuenca se basa en las características de la superficie. Este modelo se emplea para agregar y conectar las partes hidrológicas. Las partes se presenta en la Tabla V, los cuales son la base para modelos matemáticos que representan los procesos físicos dentro de la cuenca [47].

Tabla V. Elementos hidrológicos para el modelo de la cuenca.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Subbasin (Subcuenca)	Se representa la cuenca físicamente. Se especifica la precipitación, donde será el caudal de salida y demás parámetros que se tengan para el modelo.

Reach (Tramo)	Representa la dirección del flujo aguas abajo en la cuenca. El caudal de entrada viene de uno o varios ríos. Mientras que, el caudal de salida se calcula sumando los caudales de entrada y restando las diferentes pérdidas.
Junction (Unión)	Se lo emplea para unir tramos de ríos y obteniendo un caudal de varios tramos.
Source (Fuente)	Permite ingresar un caudal a la cuenca.
Sinck (Salida)	Con este elemento se representa la salida de la cuenca, en donde saldrá el caudal total.
Reservoir (Reservorio o depósito)	Elemento en donde el usuario puede definir un lugar donde el agua será depositada.
Derivation (Derivación)	Elemento con el cual se especifica alguna ramificación en el recorrido del cauce principal, puede ser una o varias ramificaciones.

*En esta tabla se detalla los diferentes elementos que posee el HEC-HMS para elaborar un modelo hidrológico [47].*

Una de las ventajas del HEC-HMS es su variedad de modelos matemáticos para determinar pérdidas de precipitación en cada subcuenca, el proceso de transformar la lluvia en escorrentía y agregar al flujo base. Estos métodos se los presenta en la Tabla VI.

**Tabla VI.** Tipo de métodos para el cálculo de precipitación, pérdidas y flujo base.

<b>TIPO DE MÉTODO</b>	<b>MÉTODO</b>
Canopy	Dinámico Simple Cuadrícula Simple
Surface	Superficie Simple Celdas de superficie simple
Loss	Déficit y tasa constante Exponencial Green and Ampt



	Inicial y tasa constante Smith Parlange Número de curva (CN) de SCS Soil moisture accounting (SMA) Número de Curvas de SCS por celdas DC por celdas Green and Ampt por celda SMA por celda
Transform	Onda Cinética Hidrograma Unitario (UH) de Clark Hidrograma del SCS UH de Clark modificado HU especificado por el usuario Hidrograma Unitario de Snyder Curva S especificada por el usuario
BaseFlow	Depósito lineal Mensualmente constante Recesión delimitada Recesión Aproximación no lineal de Boussinesq

*En esta tabla se detalla los diferentes métodos para transformar la lluvia a escorrentía, pérdidas en la cuenca por diversos factores y agregar flujo base [48].*

### 2.2.15.2 Componentes del modelo meteorológico

Este componente permite el cálculo de la precipitación para el modelo de la subcuenca. Emplea información de precipitación ya sea por celdas o algo puntual, las cuales se encuentran detalladas en la Tabla VII, además se permite el ingreso de datos de evapotranspiración [47]. En cuanto a los datos de evapotranspiración se permite incluir promedio mensual y Priestley Taylor.

*Tabla VII. Métodos de precipitación de HEC-HMS.*

<b>MÉTODOS DE PRECIPITACIÓN</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
Frequency Storm	Permite crear eventos de precipitaciones donde el volumen es ingresado para diversas duraciones.
Gridded Precipitation	Se puede emplear datos de precipitación por celda de un RADAR.
Gage Weights	Se ingresan datos por diferentes estaciones.

SCS Storm	En este método se aplica una distribución temporal SCS a volumen de tormenta durante 24 horas.
Inverse Distance	Se calcula promedio de precipitación de la subcuenca, usando la distancia inversa elevada al cuadrado para diferentes estaciones.
Standard Project Storm	Se define una altura de precipitación y se define el hietograma de entrada.
Specified Hyetograph	Se permite ingresar un hietograma elaborado por el usuario.

*En la presente tabla se describe cada uno de los métodos de precipitación que se puede realizar en HEC-HMS [47], [48].*

#### **2.2.16 Modelación hidrológica con RS-MINERVE**

RS-MINERVE (Routing System Modélisation des Intempéries de Nature Extrême dans le Rhône Valaisan et de leur Effets) es un software diseñado para modelación tanto hidráulica como hidrológica, bajo una estructura de modelado semidistribuido para calcular caudales [11], [50]. Este software fue desarrollado por el Centro de Investigación sobre el Medio Ambiente Alpino (CREAP) y HydroCosmos S.A. con la participación de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne de la Universidad Politécnica de Valencia y con la asociación de Hydro 10 [51].

RS-MINERVE tiene un algoritmo de optimización global Shuffled Complex Evolution – University of Arizona, diseñado para generar estimaciones optimizadas de los parámetros más probable [52]. Por lo cual, este software es ampliamente empleado para predecir caudales. Así que, el éxito de la modelación depende de las cantidad y calidad de los datos de entrada.

El software es de carácter libre, por lo cual es uno de los más empleados para diferentes investigaciones en el caso de estudio de cuencas [51]. RS-MINERVE cuenta con diferentes modelos hidrológicos para lluvia-escorrentía, como SWMM, GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HBV. Además de modelos



hidráulicos estructurales como embalses, turbinas, aliviaderos, hidroeléctricas, entre otros [50].

#### 2.2.16.1 Modelo SWMM

El modelo SWMM (Storm Water Management Model – Modelo de gestión de aguas lluvias) desarrollado por Metclaf y Eddy (1971) [51], permite el cálculo de caudal mediante el ingreso hietograma de lluvia en superficies impermeables, el esquema del modelo se lo presenta en la Fig. 19, este modelo da como resultado un hidrograma de aguas abajo. Los parámetros y condiciones iniciales de todos los modelos se los presentará en la Tabla VIII.

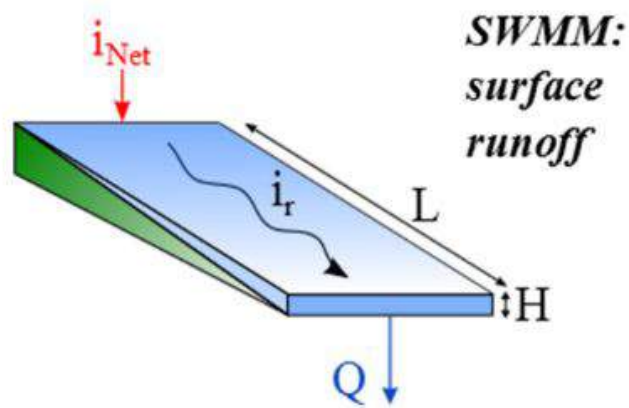


Fig. 19. Modelo SWMM [51].

#### 2.2.16.2 Modelo GSM

El modelo GSM (Glacier and Snowmelt – Glaciar y deshielo) está compuesto por 5 submodelos como se presenta en la Fig. 20, dos de ellos corresponden al modelo Snow-SD (Snow model with a Seasonal Degree-day factor - Modelo de nieve con un factor día-grado estacional) y el resto al modelo glaciar [51].

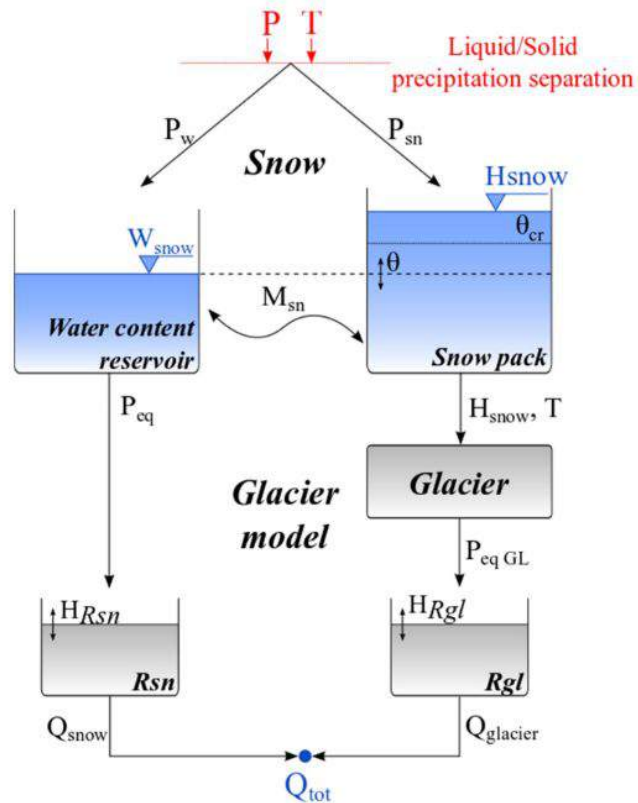


Fig. 20. Modelo GSM [51].

El modelo permite ingresar datos de precipitación (P) y temperatura (T), el modelo de nieve (Snow) crea una precipitación equivalente (P<sub>eq</sub>), mientras el modelo glaciar transfiere la precipitación a un depósito de nieve hasta el caudal de salida de la subcuenca [51]. El flujo total es la suma del caudal generado por la nieve y el glaciar.

### 2.2.16.3 Modelo SOCONT

El modelo SOCONT (Soil Contribution – Contribución del suelo) fue desarrollado por Consuegra & Vez (1996), comprende de tres submodelos hidrológicos [50], tal y como se muestra en la Fig. 21. SOCONT propone entre sus submodelos tres reservorios: uno lineal para la contribución de la nieve, uno no lineal para aguas subterráneas y otro no lineal para escorrentía directa. También, el modelo cuenta para ingreso de evapotranspiración y la intensidad [51].

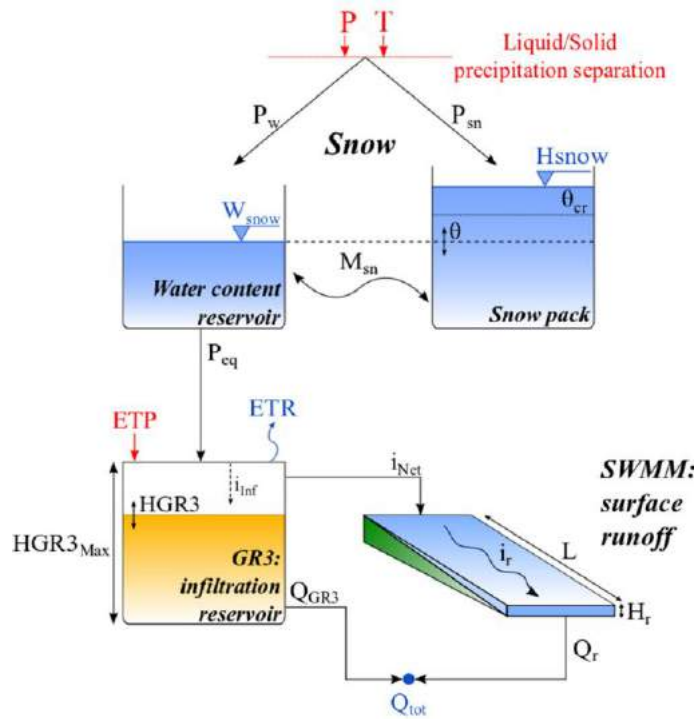


Fig. 21. Modelo SOCONT [51].

#### 2.2.16.4 Modelo SAC-SMA

Este modelo fue desarrollado en 1970 por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU División Norte en colaboración del Centro de Predicción Fluvial del Servicio Meteorológico Nacional de EEUU y el Departamento de Recursos Hídricos, Sacramento [50]. Por lo cual, SAC-SMA o también llamado Modelo hidrológico Sacramento presentado en la Fig. 22, permite optimizar las características de humedad del suelo para una eficiente simulación de descargas [51]. Además, permite calcular la descarga total de la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) dependiendo de los parámetros y condiciones iniciales que se digite.

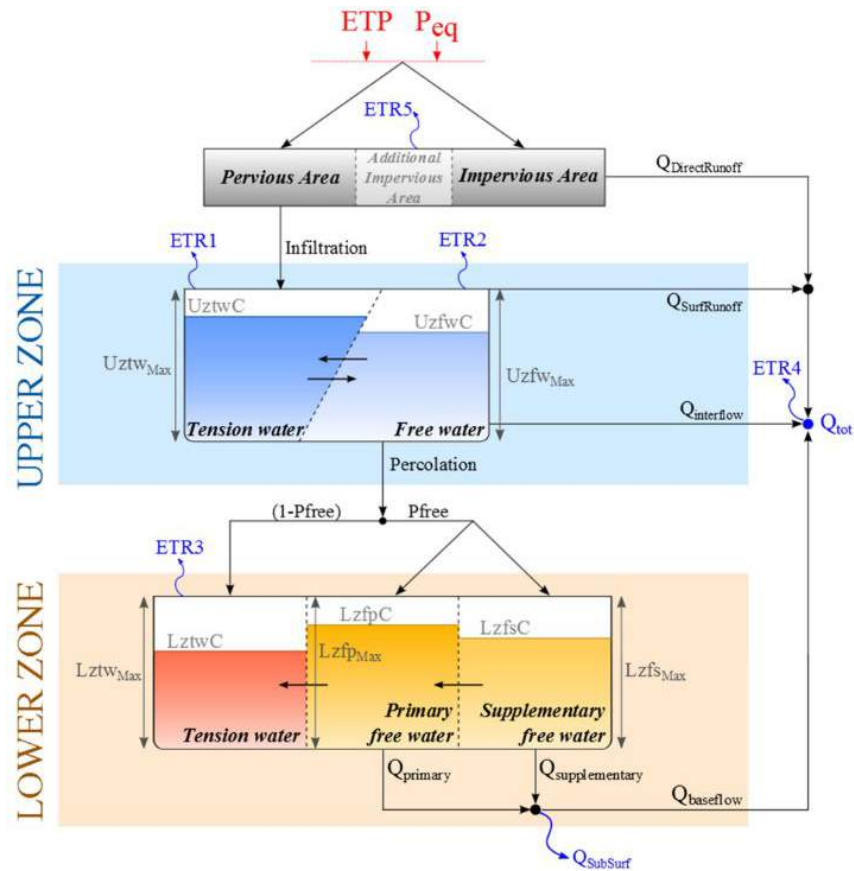


Fig. 22. Modelo SAC-SMA [51].

### 2.2.16.5 Modelo GR4J

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier – Ingeniería rural con 4 parámetros diarios) desarrollado por Perrin, Michel & Andrásian (2003) en Francia. Presenta descargas medias diarias ingresando cuatro parámetros, los cuales se muestran en la Fig. 23. El modelo requiere datos de entrada como precipitación y evapotranspiración [50].

GR4J es un modelo empírico, pero su estructura es similar a los modelos ya presentados. Consideran la humedad y tiene dos reservorios (producción y enrutamiento) [51], además permite ingresar hidrogramas unitarios para el cálculo del caudal de salida.

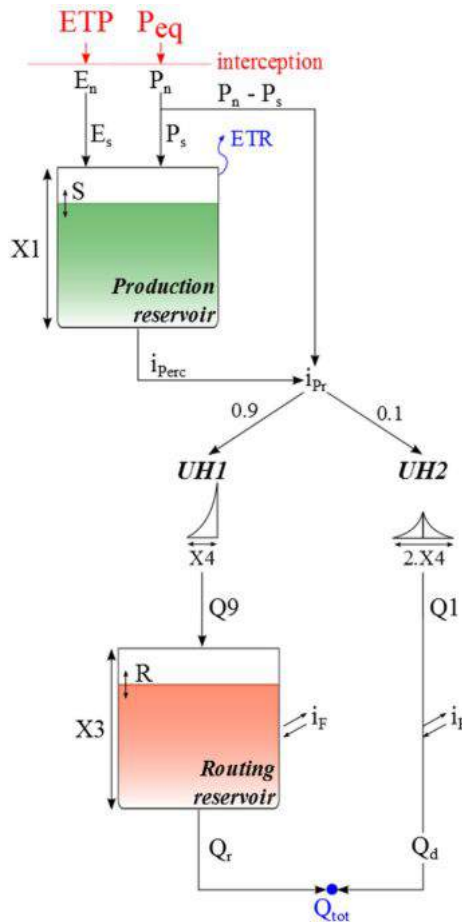


Fig. 23. Modelo GR4J [51].

### 2.2.16.6 Modelo HBV

El modelo HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning – Departamento de Balance Hídrico de la oficina de Hidrología) fue desarrollado en Suecia por StenBergström (1992) en el Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia [50]. Este submodelo está compuesto por una función de nieve, un depósito de humedad y dos de almacenamiento de suelo tanto superior como inferior [51], la estructura se presenta en la Fig. 24.

El modelo calcula la escorrentía de la cuenta, donde los datos de partida son la precipitación, evapotranspiración y temperatura diarios, por lo cual, se lo considera un modelo determinístico-conceptual [50]. Cabe mencionar que, este modelo es empleado en algunos países europeos como Austria y Suecia, donde se toma en cuenta el derretimiento de nieve, humedad y evapotranspiración.

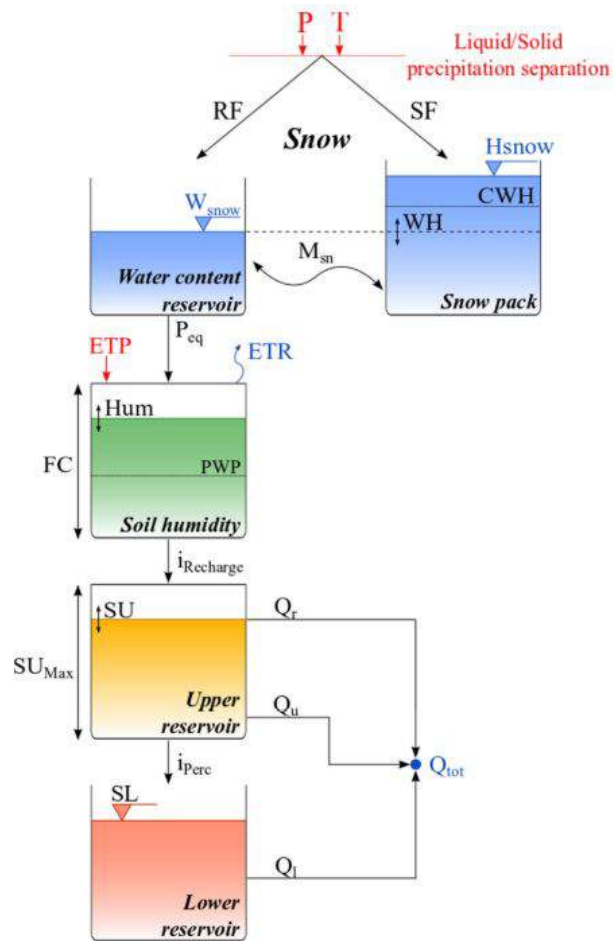


Fig. 24. Modelo HBV [51].

Tabla VIII. Lista de parámetros y condiciones iniciales de los submodelos de RS-MINERVE.

Modelo	Parámetro	Descripción	Unidad
SWMM	A	Superficie de escorrentía	$m^2$
	L	Longitud del plano	$m$
	JO	Pendiente de escorrentía	-
	K	Coefficiente de Strickler.	$\frac{m^{1/3}}{s}$
	HLni	Nivel inicial agua debajo de la superficie	$m$
GSM	A	Superficie	$m^2$
	S	Coefficiente de fusión de nieve día-grado de referencia	$mn/^\circ C/d$
	Slnt	Intervalo de deshielo de grados-día	$mn/^\circ C/d$

SMin	Coeficiente mínimo de deshielo de grado-día	$mm/°C/d$
Sph	Desplazamiento de fase de la fusión sinusoidal	$d$
ThetaCri	Contenido de agua relativo crítico del paquete de nieve	-
Bp	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida	$d/mm$
Tcp1	Temperatura crítica mínima para la precipitación líquida	$°C$
Tcp2	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	$°C$
Tcf	Temperatura crítica de deshielo	$°C$
G	Coeficiente de derretimiento del glaciar grado-día de referencia	$mm/°C/d$
GInt	Intervalo de derretimiento del glaciar grado-día	$mm/°C/d$
GMin	Coeficiente mínimo de derretimiento del glaciar grado-día	$mm/°C/d$
Tcg	Temperatura crítica de deshielo de los glaciares	$°C$
Kgl	Temperatura de liberación del depósito de deshielo del glaciar	$1/d$
Ksn	Coeficiente de liberación del depósito de deshielo	$1/d$
CFR	Coeficiente de recongelación	-
SWEIni	Altura equivalente inicial de agua de nieve	$m$
Thetalni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	-

	Qsnowlni	Salida inicial del depósito de nieve lineal	$m^3/s$
	Qglacierlni	Salida inicial del reservorio glaciar lineal	$m^3/s$
<b>SOCONT</b>	A	Superficie de infiltración	$m^2$
	S	Coefficiente de fusión de nieve día-grado de referencia	$mn/°C/d$
	Slnt	Intervalo de deshielo de grados-día	$mn/°C/d$
	SMin	Coefficiente mínimo de deshielo de grado-día	$mn/°C/d$
	Sph	Desplazamiento de fase de la fusión sinusoidal	$d$
	ThetaCri	Contenido de agua relativo crítico del paquete de nieve	-
	Bp	Coefficiente de fusión debido a la precipitación líquida	$d/mm$
	Tcp1	Temperatura crítica mínima para la precipitación líquida	$°C$
	Tcp2	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	$°C$
	Tcf	Temperatura crítica de deshielo	$°C$
	HGR3Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	$m$
	KGR3	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración	$1/s$
	L	Longitud del plano	$m$
	JO	Pendiente de escorrentía	-
	Kr	Coefficiente de Strickler.	$\frac{m^{1/3}}{s}$
CFR	Coefficiente de recongelación	-	
SWElni	Altura equivalente inicial de agua de nieve	$m$	



	HGR3lni	Nivel inicial en reservorio de infiltración	<i>m</i>
	Helni	Nivel de agua de escorrentía inicial aguas abajo de la superficie	<i>m</i>
	Thetalni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	-
<b>SAC-SMA</b>	A	Superficie de la cuenca	<i>m</i> <sup>2</sup>
	Adimp	Área impermeable adicional (fracción)	-
	Pctim	Fracción permanente de área impermeable	-
	Riva	Fracción de cobertura vegetal	-
	UztwMax	Capacidad de la tensión de agua en la capa superior	<i>m</i>
	UzfwMax	Capacidad del agua libre en la capa superior	<i>m</i>
	Uzk	Tasa de retiro de la capa superior	<i>1/d</i>
	Zperc	Coefficiente de la relación de percolación	-
	Rexp	Exponente de la relación de percolación	-
	Rfree	Fracción de la percolación que va a Almacenamiento de agua libre de la zona inferior	-
	LztwMax	Capacidad de la tensión de agua en la capa inferior	<i>m</i>
	LzfpMax	Capacidad del agua libre primario en la capa inferior	<i>m</i>
	LzfsMax	Capacidad del agua libre suplementario en la capa inferior	<i>m</i>
Rserv	Fracción del agua almacenada en la zona más baja no transferible	-	

	Lzpk	Tasa de retiro diario del almacenamiento primario de agua libre en la zona inferior	$1/d$
	Lzsk	Tasa de retiro diario del almacenamiento suplementario de agua gratuita en la zona inferior	$1/d$
	Side	Fracción del flujo base para la recarga profunda	-
	Adimlni	Contenido de agua de tensión inicial del área de Adimp	$m$
	Uztlwni	Tension inicial de la zona superior	$m$
	Uzfwlni	Contenido inicial de agua libre de la zona superior	$m$
	Lztlwni	Tensión inicial de la zona inferior	$m$
	Lzfpini	Contenido complementario inicial libre de la zona inferior	$m$
	Lzfslni	Contenido primario inicial libre de la zona inferior.	$m$
<b>GR4J</b>	A	Superficie de la cuenca	$m^2$
	X1	Capacidad del depósito de producción	$m$
	X2	Coefficiente de intercambio de agua	$m$
	X3	Capacidad de producción de enrutamiento	$m$
	X4	Base de tiempo UH	$d$
	Slni	Contenido de agua inicial en el depósito de producción	$m$
	Rlni	Nivel de agua inicial en el depósito de enrutamiento	$m$
<b>HBV</b>	A	Superficie de la cuenca	$m^2$
	CFMax	Coefficiente de deshielo	$mn/^\circ C/d$
	CFR	Factor de congelación	-

CWH	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	-
TT	Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	°C
TTInt	Intervalo de temperatura para lluvia nieve	°C
TTSM	Temperatura umbral para el derretimiento de nieve	°C
Beta	Coefficiente forma	-
FC	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	<i>m</i>
PWP	Punto de marchitez permanente del suelo	-
SUMax	Nivel umbral de agua del Reservorio superior	<i>m</i>
Kr	Coefficiente de liberación del flujo superficial	$1/d$
Ku	Coefficiente de liberación del interflujo	$1/d$
Kl	Coefficiente de liberación del flujo base	$1/d$
Kperc	Coefficiente de liberación de percolación	$1/d$
SWEIni	Altura equivalente inicial de agua de nieve.	<i>m</i>
WHIni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	-
HUmlni	Humedad inicial	<i>m</i>
SUIni	Nivel de agua del depósito superior inicial	<i>m</i>
SLIni	Nivel de agua del depósito inferior inicial	<i>m</i>

*En la presente tabla se detallan los diferentes parámetros que se ingresan en cada submodelo del software, además de las condiciones iniciales con sus respectivas unidades [50], [51].*

La elección del submodelo adecuado depende únicamente de las variables que se tienen, ya que como se presentó en la Tabla VI los parámetros varían y no todas las cuencas tienen la misma morfología.

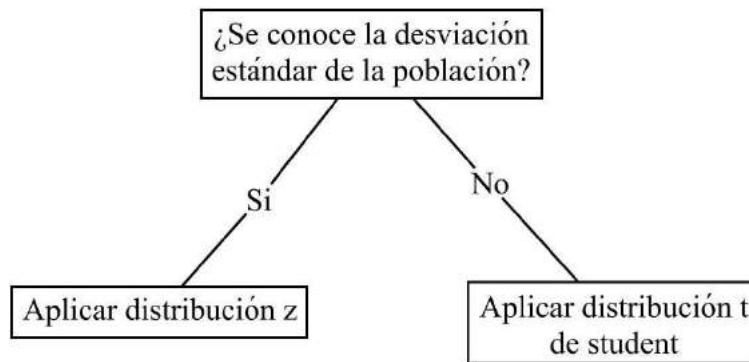
### **2.2.17 Estadística e hidrología**

En la actualidad la estadística ha permitido conocer una variedad de eventos según la probabilidad que puede ocurrir. Por lo cual, la hidrología se cimienta a partir de datos de probabilidad y estadística [53], permitiendo conocer los diferentes eventos como precipitación, caudales, evaporación, etc. Además, la estadística es una de las áreas con la que parte la ciencia e ingeniería, permitiendo comprender muchos aspectos importantes para la toma de decisiones y diseños.

Una de las ventajas de la estadística es comprobar una hipótesis que se puede suponer basándose en observaciones, por lo cual se emplean las pruebas de hipótesis y las pruebas de bondad.

#### **2.2.17.1 Prueba de hipótesis.**

Es aquel proceso basado en evidencias para determinar si la afirmación de la hipótesis es correcta. Por lo cual, como primer paso es plantear la hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ). Donde  $H_0$  se prueba mediante valores números y la  $H_0$  es el enunciado preparado por si no se acepta la  $H_1$  [54]. Las pruebas de hipótesis más empleadas son la prueba de distribución z o la t de student, las cuales se explica su aplicación en la Fig. 25.



*Fig. 25 Condición para aplicar distribución [54].*

### 2.2.17.2 Pruebas de normalidad

Las pruebas de normalidad se las emplea en conjunto con las pruebas de hipótesis para comprobar si la varianza se encuentra relacionada entre sí. Por lo cual, existen muchas pruebas de normalidad, siendo una de ellas Chi-cuadrado de Pearson, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk [55]. Siendo las dos últimas, las que se emplean en conjunto con la distribución t de student.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov se emplea cuando se tiene datos mayores a iguales a 50, mientras que, Shapiro-Wilk cuando se tienen menores a 50 datos [56].

## CAPÍTULO III

### 3. PROCESO METODOLÓGICO

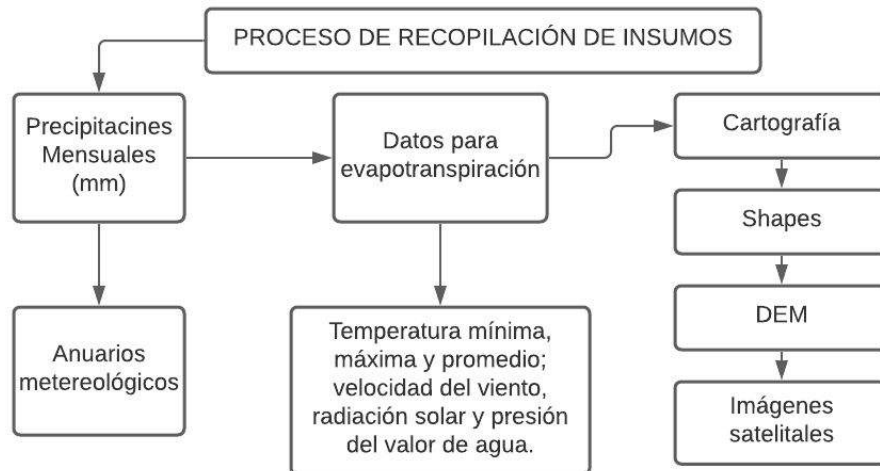
#### 3.1 Diseño o tradición de la investigación seleccionada

En la presente investigación se empleó la metodología de análisis de casos, el cual es un proceso de investigación dirigido a explorar en profundidad la estructura y dinámica del objeto de estudio a fin de develar el conjunto de factores que condicionan su estado actual [57].

Se tomó como objeto de estudio la subcuenca del río Casacay, en donde se calculará el caudal máximo de salida con HEC-HMS y RS-MINERVE, realizando procesos empleados en hidrología como la caracterización geomorfológica, uso de anuarios meteorológicos del INAMHI, curvas IDF y los hidrogramas de precipitación para diversos periodos de retorno. Además de la necesidad de tener un modelo hidrológico que permita tomar decisiones oportunas para la planificación del recurso hídrico y evitar acontecimientos que perjudiquen a los beneficiarios de la cuenca.

#### 3.2 Proceso de recolección de datos en la investigación

El proceso de recolección de datos para la presente investigación se la detalla en la Fig. 26, donde se detalla la secuencia para la obtención de datos, donde se empleó datos de empresas públicas, páginas de acceso libre y de datos cartográficos a nivel mundial.



**Fig. 26.** *Proceso de recolección de datos. Fuente: Autor.*

Primeramente, se ingresó a la página del INAMHI para descargar los anuarios meteorológicos de los años disponibles donde constan los registros de las estaciones cercanas a la subcuenca de estudio. Luego, se separó los datos de precipitación mensual para posteriormente obtener las curvas IDF y los hietogramas de precipitación para varios periodos de retorno.

Además, se consultó datos para el cálculo de la evapotranspiración, pero en los anuarios no se ha registrado para la estación seleccionada, por lo cual, se optó por la investigación de bases de datos abiertas a nivel mundial donde consten estos datos. Siempre y cuando esos datos sean de bases de información confiable, por lo que se seleccionó la base de datos de WorldClim2, que como ya se mencionó en el apartado 2.2.13, consta con ráster a nivel mundial de velocidad de viento, radiación solar, presión de vapor de agua, temperatura máxima, mínima y promedio. Estos datos son promedio desde 1970 a 2010, por lo que son de gran utilidad para la presente investigación y para futuras investigaciones que no cuenten con este tipo de datos.

En cuanto a los datos de cartografía, al igual que los datos de evapotranspiración, consultar en bases de datos abiertas con tamaños de celda reducidos, en este caso cercanos a 10 m, ya que menos a 10 m se debe cancelar un valor adicional. Así que, se empleó la base de datos de Copernicus, que consta que una variedad de archivos tipo DEM con una resolución de píxel o

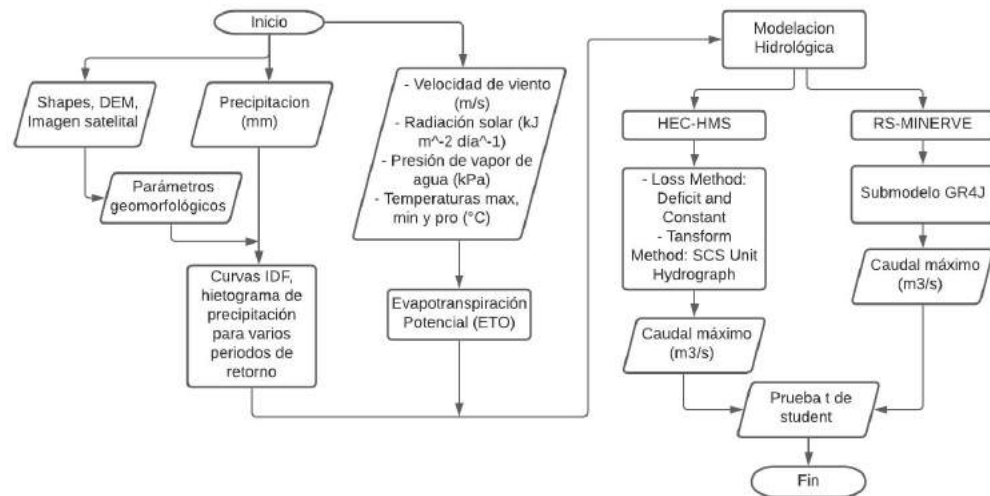
tamaño de celda de 12.5 m x 12.5 m, la cual favorece para la obtención de los diferentes parámetros con ayuda de un software SIG para realizar una modelación hidrológica adecuada. También, se descargaron imágenes satelitales, donde la base de datos elegida fue la del satélite SENTINEL, que alberga una variedad de imágenes satelitales tomadas en diferentes años con un tamaño de pixel de 10 m x 10 m, las cuales ayudaran para observar la ubicación exacta del cauce principal. Por lo cual, con esta información se realizarán mapas temáticos de la cuenca para presentar las características relevantes de la cuenca.

Así mismo, se consultó en bases de datos del país para obtener shapes para obtener otros parámetros iniciales para la caracterización de la cuenca. La base de datos que se empleó es la del Instituto Geográfico Militar (IGM) la cual consta con una variedad de shapes libres a nivel nacional, que facilitan los diferentes procesos para diferentes investigaciones. Para la presente investigación son empleados para delimitar la cuenca, observar el curso del cauce principal, área, perímetro, longitud del cauce, entre otros parámetros que se los mencionara en los apartados siguientes.

### **3.3 Sistema de categorización en el análisis de casos.**

El sistema de categorización que se empleó se lo presenta en la Fig. 27, donde se detalla cada proceso desde la obtención de los datos de precipitación y evapotranspiración hasta el método de correlación para los caudales obtenidos de ambos modelos hidrológicos.





**Fig. 27.** Sistema de categorización. **Fuente:** Autor.

En el proceso de obtención de los hietogramas de precipitación, como datos de entrada se utilizaron las precipitaciones desde 2009 a 2012 que se encuentran en los anuarios meteorológicos publicados por el INAMHI. Una vez clasificado los valores de precipitación se ingresó en una hoja electrónica. También, con estos valores se obtuvo la ecuación (6) para la intensidad de precipitación en la estación Pasaje, que es la más representativa para la cuenca de estudio.

$$I = \frac{KT^m}{t^n} \quad (6)$$

Donde:

$I$  = Intensidad de precipitación (mm/h)

$T$  = Período de retorno (años)

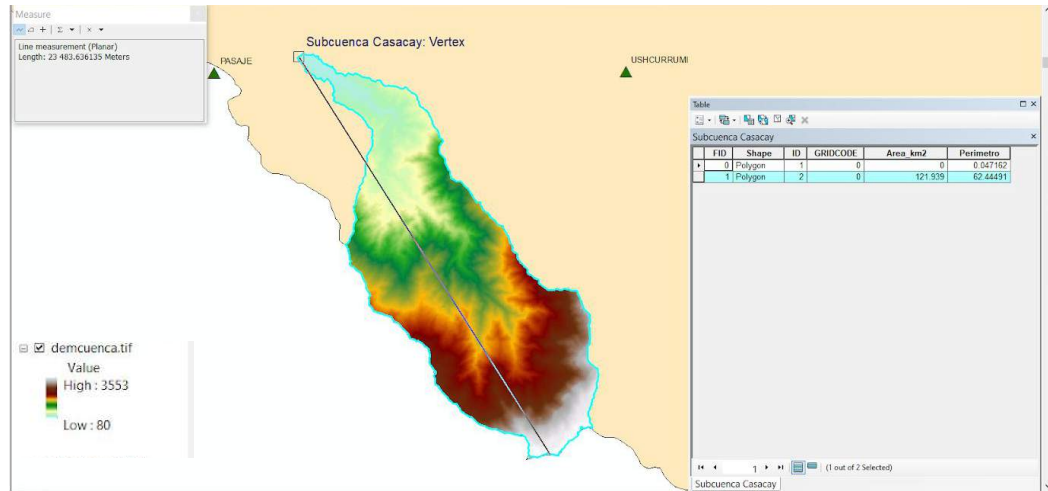
$t$  = Tiempo de duración de la lluvia (min)

$K, m, n$  = Constantes de ajuste

Las constantes antes mencionadas se las obtienen mediante mínimos cuadrados, permitiendo obtener una ecuación representativa para cualquier cuenca de estudio.

Mientras que, para caracterizar los parámetros geomorfológicos de la cuenca, se lo realizó con un software SIG, los cuales se pueden apreciar en la Fig. 28, por lo

cual, se delimitó la cuenca, se obtuvo área, perímetro, pendiente y el orden de cauce.



**Fig. 28.** Parámetros geomorfológicos extraídos con software GIS. **Fuente:** Autor.

Por otra parte, para el cálculo de la evapotranspiración se empleó datos de la base de datos WorldClim2, como lo es velocidad del viento, radiación solar, presión del vapor de agua, temperatura, máxima, mínima y promedio. Aunque, estos datos son ráster a nivel mundial, con ayuda del software SIG se delimitó el área de la subcuenca, como se presenta en la Fig. 29, por lo cual se crean ráster de cada parámetro para los 12 meses del año. Después, para obtener la Evapotranspiración Potencial (ET<sub>o</sub>) se utilizó la calculadora desarrollada por la Food and Agricultural Organization United Nations (FAO), que se basa en la ecuación (7) desarrollada por Penman-Monteith [58]. Además, Ortíz & Chile [59] mencionan que este método es uno de los más cercanos a la evapotranspiración, detallando que los resultados son buenos a diferencia de otros métodos para el cálculo.

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta \cdot \gamma (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (7)$$

Donde:

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración potencial ( $\frac{mm}{d}$ )

Rn = Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot d}$ )

G = Flujo del calor de suelo ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot d}$ )

$U_2$  = Velocidad del viento ( $\frac{m}{s}$ )

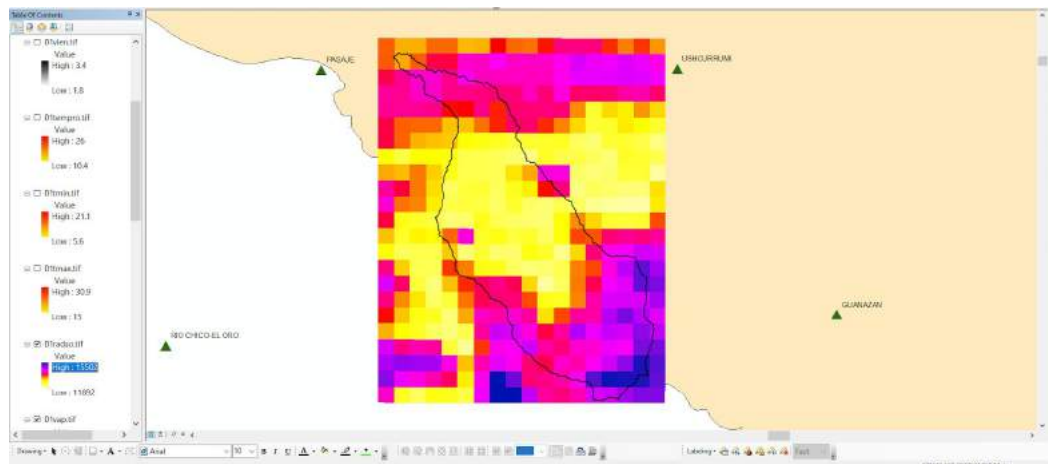
$ea$  = Presión real de vapor ( $kPa$ )

$es$  = Presión de vapor de saturación ( $kPa$ )

$\Delta$  = Pendiente de la curva de variación de la presión ( $\frac{kPa}{^\circ C}$ )

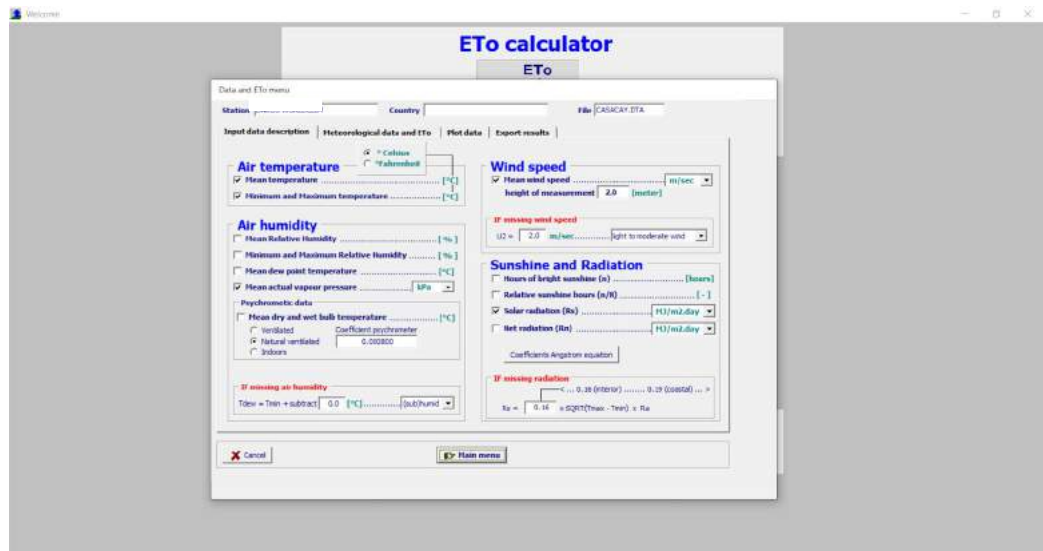
$T$  = Temperatura promedio ( $^\circ C$ )

$\gamma$  = Constante psicométrica ( $\frac{kPa}{^\circ C}$ )



**Fig. 29.** Ráster de los parámetros para el cálculo de evapotranspiración del mes de enero. **Fuente:** Autor.

Cabe mencionar que, los parámetros a ingresar deben ser seleccionados previamente como se muestra en la Fig. 30, por lo cual, se debe tener en cuenta con que insumos de entrada se cuenta, ya que, depende de eso la efectividad del cálculo de la evapotranspiración.



*Fig. 30. Selección de datos de entrada para el cálculo de evapotranspiración. Fuente: Autor.*

En cuanto a los datos de entrada, como primer paso se debe seleccionar las unidades de temperatura, en este caso °C. Luego seleccionar los parámetros que se van a ingresar, en este caso: Mean Temperature (Temperatura promedio), Minimum and Maximum Temperature (Temperatura mínima y máxima), Mean actual vapour pressure en kPa (Presión del vapor real media), Mean wind speed en m/s (velocidad del viento media) y solar radiation en MJ/m<sup>2</sup>.day (radiación solar)

Una vez obtenidos los datos de entrada para cada modelo, se procede a ingresar en cada uno de los softwares:

En el software HEC-HMS, se deben seguir cuatro pasos esenciales para la respectiva modelación, los cuales son:

- 1) **Basin Model Manager.** El cual consiste en ingresar el shape de la subcuenca y establecer los parámetros de entrada y salida de la cuenca. También se especificó el área en km<sup>2</sup>, al igual que otros parámetros que solicita el programa como lo son:
  - **Loss Method: SCS Curve Number.** El cual consiste en ingresar el número de curvas cuyo valor proviene según el tipo y uso de suelo, teniendo como referencia valores de la Tabla IX, siendo este método el

más empleado para transformar la precipitación total en precipitación efectiva [18].

Para la selección de CN se tiene en cuenta los criterios de Soil Conservation Service (SCS): Cobertura Vegetal > 75%: Condición hidrológica buena. Cobertura vegetal 50% - 75%: Condición hidrológica regular. Cobertura vegetal < 50%: Condición hidrológica pobre.

*Tabla IX. Valores para CN.*

Cobertura			Número de curva			
Uso de tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
<b>Descuido, en descanso, sin cultivo</b>	Surcos rectos		77	86	91	94
<b>Cultivos</b>	Surcos rectos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Pobre	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	Curva de nivel y en terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Curva de nivel y en terrazas	Buena	62	71	78	81
<b>Pequeños granos</b>	Surcos rectos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Pobre	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Curva de nivel y en terrazas	Pobre	61	72	79	82

	Curva de nivel y en terrazas	Buena	59	70	78	81
<b>Sembríos cerrados, legumbres o sembríos en rotación</b>	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Pobre	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Buena	55	69	78	89
	Curva de nivel y en terrazas	Pobre	63	73	80	89
	Curva de nivel y en terrazas	Buena	51	67	76	80
<b>Pastizales o similares</b>		Pobre	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
<b>Pradera</b>		Buena	30	58	71	78
<b>Bosques</b>		Pobre	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
<b>Patios</b>			59	74	82	86
<b>Caminos, incluyendo derecho de vía</b>	Cieno		72	82	87	89
	Superficie firme		74	84	90	92

*En la presenta se tiene valores de CN según la condición hidrológica y tipo de suelo [18], [9].*

Para conocer qué tipo de suelo se usó el software SIG para delimitar el área de la cuenca, obtener áreas parciales con su respectivo CN parcial y calcular el CN ponderado.

- **Transform Method.** Se seleccionó el método SCS Unit Hydrograph, el cual permite transformar la lluvia en escorrentía con los hietogramas calculados para diferentes periodos de retorno.
- **Baseflow Method.** Se ingresó un caudal constante en todos los meses, como caudal base para la simulación. En la Fig. 31 se presentan las opciones seleccionadas de los primeros tres ítems.

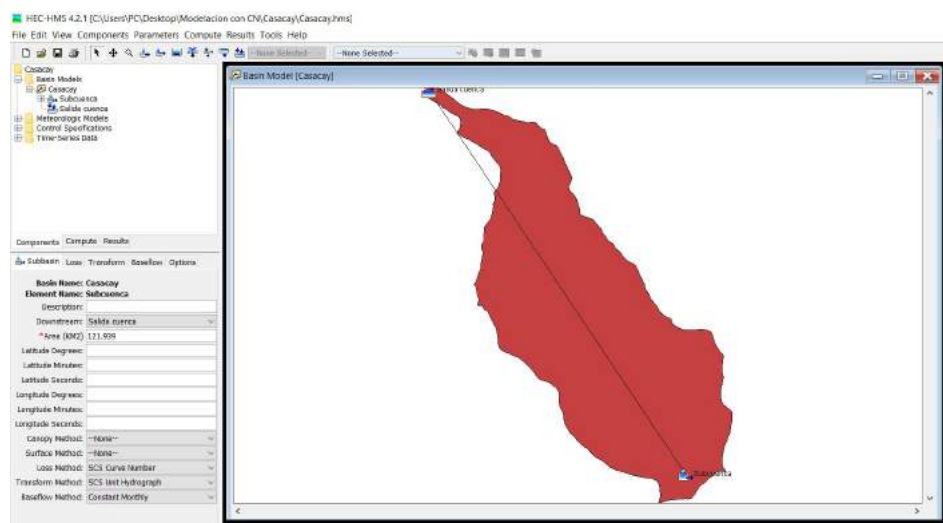


Fig. 31. Parámetros de la subcuenca. Fuente: Autor.

- **Initial Abstraction (mm).** En este parámetro se ingresa un valor inicial de abstracción expresada en mm, por lo cual se emplea la ecuación (8) y (9), donde el nivel de abstracción según SCS equivale a un 20% de S [43].

$$S = \frac{25400}{CN_{Ponderado}} - 254 \quad (8)$$

$$I_a = 0.2 \cdot S \quad (9)$$

Donde:

$I_a$  = Pérdidas o sustracciones iniciales (mm)

$S$  = Infiltración máxima (mm)

$CN_{Ponderado}$  = Número de curva.

- **Impervious (%).** Se ingresa el porcentaje de área impermeable dentro de la cuenca, por lo cual, se empleó el software GIS para determinar el

área impermeable y dividirlo para el área total, obteniendo el % de área impermeable.

- **Lag Time (min).** Se ingresa el valor de tiempo de retraso en minutos.

2) **Time-Series Data Manage.** En este paso se digitan los datos del hietograma de precipitación, se establece la fecha y hora de la iniciación de la precipitación en la subcuenca. Cabe mencionar que, se pueden ingresar algunas precipitaciones para varios periodos de retorno. En este paso se ingresó la forma en que se van a ingresar los datos, en este caso Manual Entry, al igual que otros parámetros como: el incremento en mm, el intervalo de tiempo, para nuestro caso 5 min; la fecha y hora de inicio y fin, los datos de precipitación obtenidos en los hietogramas para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno, como se presenta en la Fig. 32

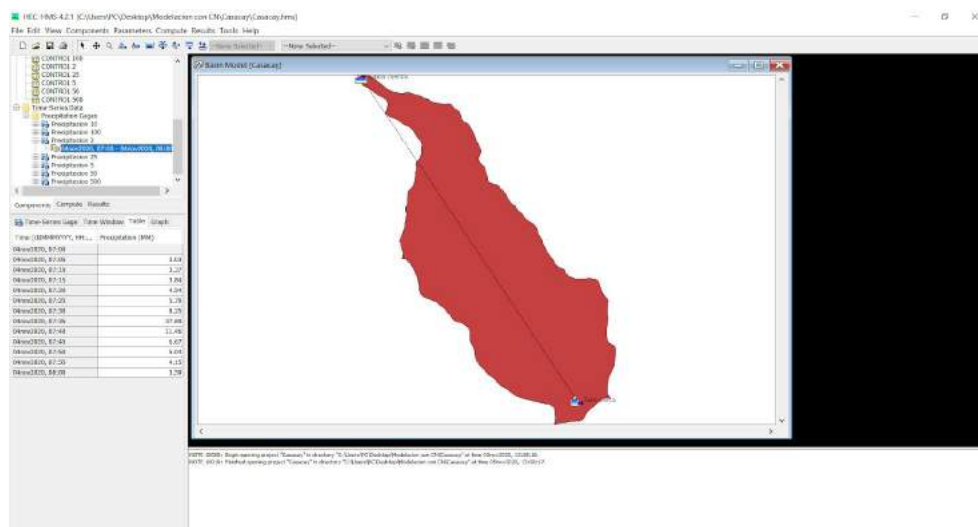
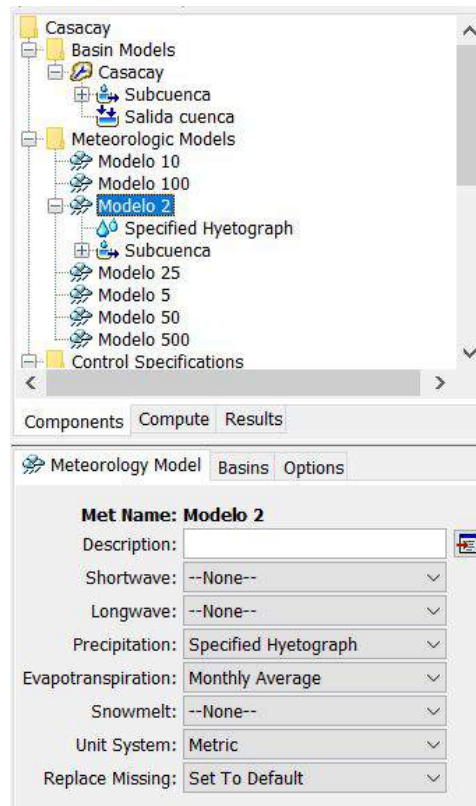


Fig. 32. Datos ingresados del hietograma para un periodo de retorno de 2 años. Fuente: Autor.

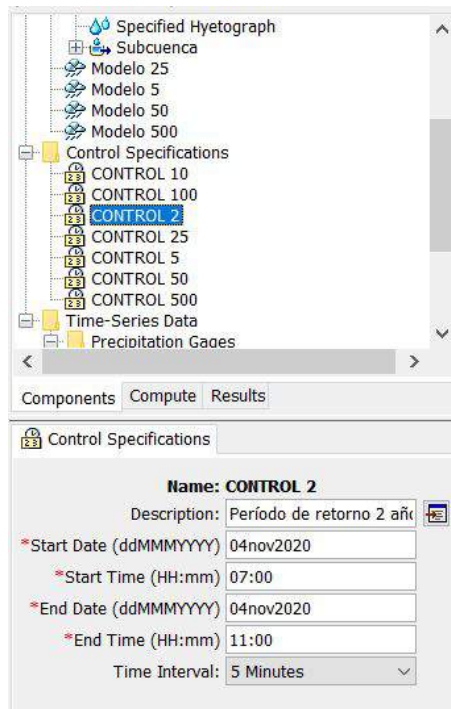
3) **Meteorologic Model Manager.** En este apartado se especifica que el programa siga realizando el proceso si es que llega a ocurrir algún error en el proceso, además de especificar el modelo y el hietograma que se va a emplear en la modelación. Por lo cual, en la Fig. 33 se observa la precipitación que se va a ingresar, la condición de continuar (Set to Default) si llega a ocurrir algún error durante el proceso, elegir el Basin Model, en este caso Casacay y los datos de evapotranspiración mensuales.





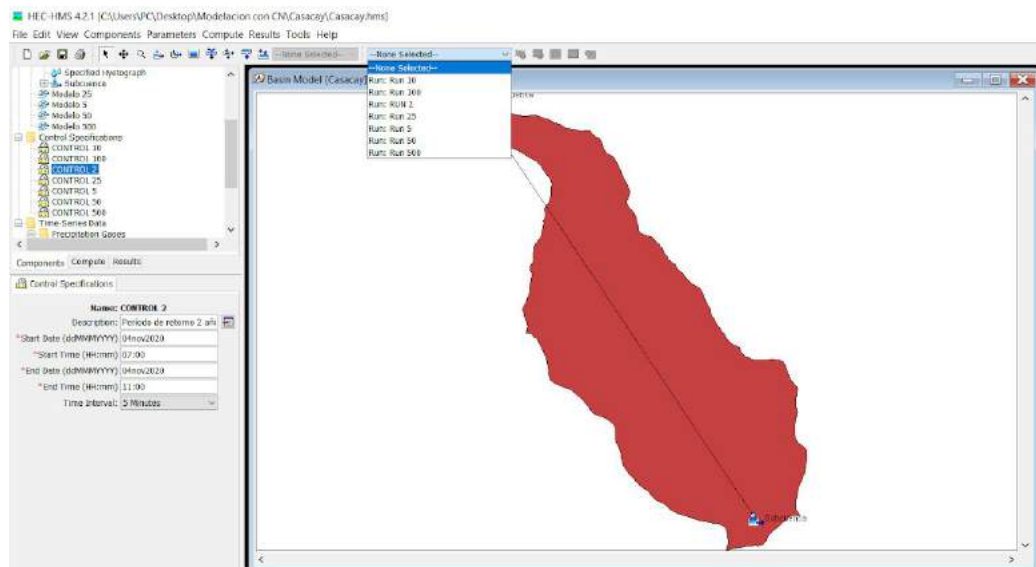
*Fig. 33. Parámetros para el modelo meteorológico. Fuente: Autor.*

- 4) **Control Specifications Manager.** En este paso se creó un control para la precipitación elegida, especificar el intervalo de tiempo, la fecha de inicio y fin de la lluvia; es importante recalcar que la lluvia no específicamente se termina en una hora, por lo cual, se debe dar un rango adicional para tener más caudales. Así que, se creó el arranque de la modelación, donde se ingresó fecha y hora de inicio y fin de la precipitación, como se presenta en la Fig. 34, en donde se ingresó una hora más extendida como hora de fin, para tener más valores de caudales y el intervalo de tiempo (5 min).



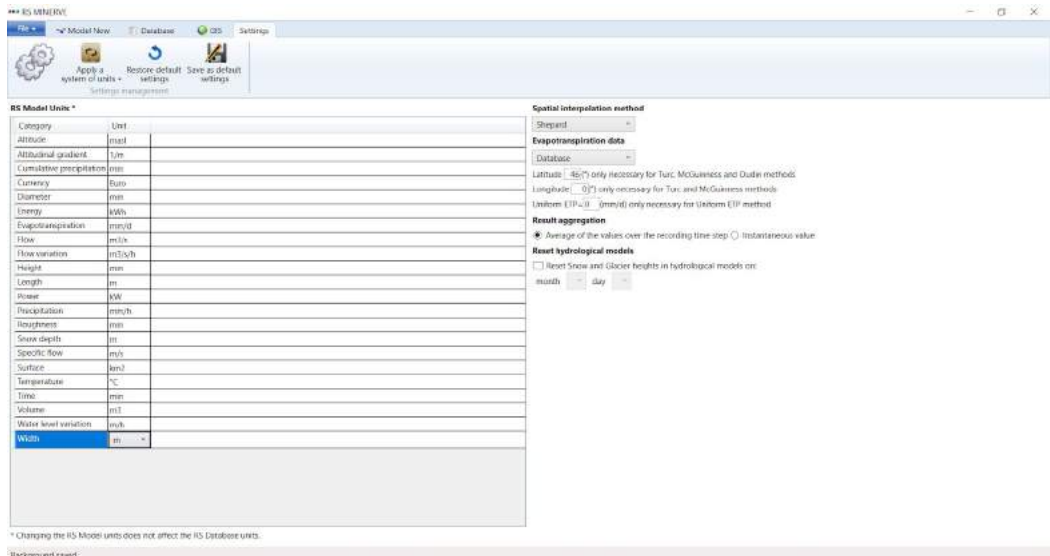
**Fig. 34.** Parámetros para el arranque de la modelación. **Fuente:** Autor.

Finalmente, se debe crear una opción para iniciar la simulación, en este caso se creó uno por cada período de retorno, como se puede apreciar en la Fig. 35.



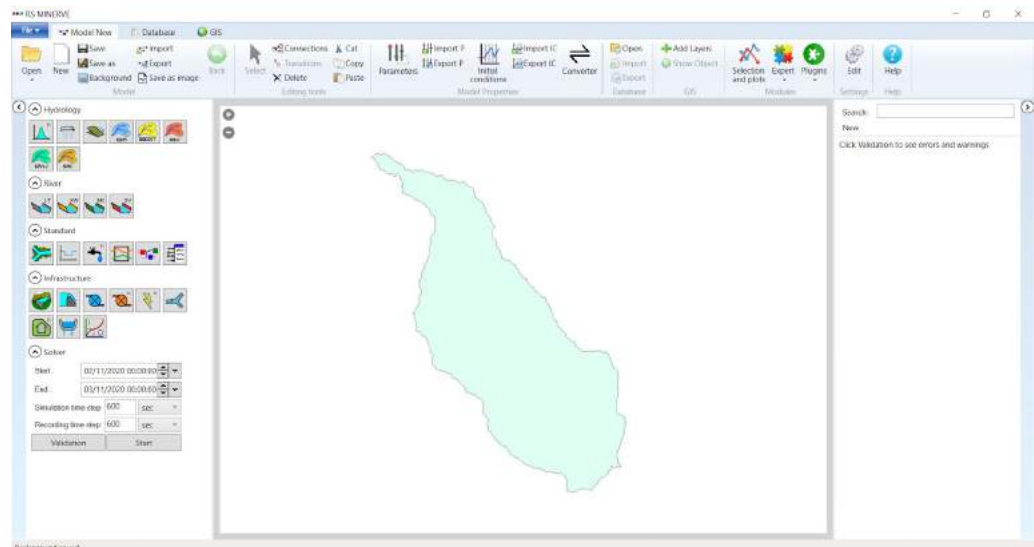
**Fig. 35.** Arranques de simulación por cada período de retorno. **Fuente:** Autor.

En cuanto al modelo hidrológico en el software RS-MINERVE, como primer paso a seguir es la configuración de las unidades, como se presenta en la Fig. 36, ya que se debe tener en cuenta las unidades que tenemos y así ingresar de forma correcta a las unidades con los que cuenta el programa.



**Fig. 36.** Configuración de unidades del programa. **Fuente:** Autor.

A continuación, se ingresó la cuenca de estudio como fondo para tener una mejor apreciación del modelo como se puede apreciar en la Fig. 36, aunque es opcional.

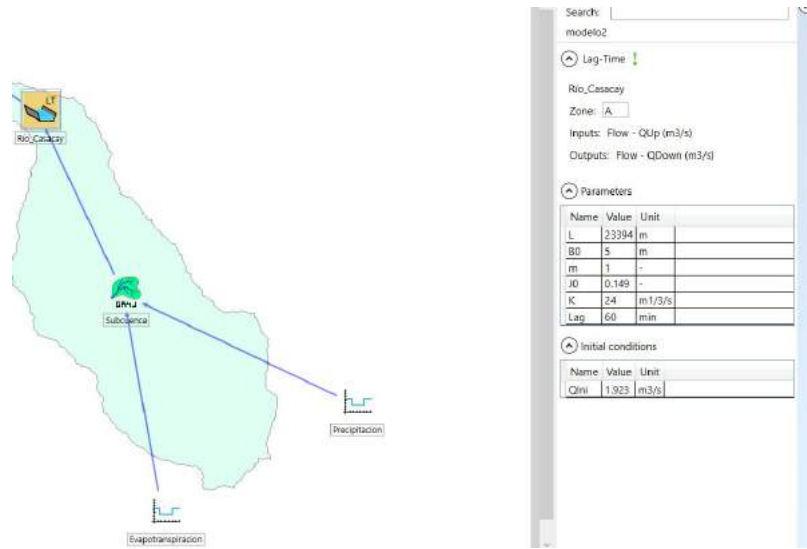


**Fig. 37.** Cuenca del río Casaca. **Fuente:** Autor.

Luego se debe seleccionar un submodelo de los seis con los que cuenta RS-MINERVE, por lo cual se seleccionó el submodelo GR4J, que es uno de los más cercanos al modelo HEC-HMS. Después, se seleccionó Time series, las cuales permiten ingresar datos de precipitación y evapotranspiración, en el caso de estudio se colocaron dos de ellos, para después conectar con el submodelo.

Dentro de los parámetros del submodelo, A, X1, X2, X3, X4, se ingresó el área de la cuenca, X2 y X3 100 mm, X2 el valor por defecto y X4 el tiempo en días que está expresado el hietograma.

También, se ingresa las características del río, en este caso LT (Lag time). Así mismo, se digitaliza las características del cauce principal como el ancho del río, pendiente y otros parámetros adicionales como se observa en la Fig. 38.



**Fig. 38.** Selección de la opción para el río principal. *Fuente:* Autor.

Finalmente, en la figura 39 se presenta el modelo hidrológico completo, además se ubicó el punto de salida, donde se va a recolectar todas las aguas abajo, dando como resultado el caudal máximo de salida de toda la cuenca.

También, se presenta cada uno de los parámetros ingresados en cada opción del modelo hidrológico de la cuenca, por lo cual este modelo es solo para el período de retorno de 2 años. Luego, para la simulación se ingresa las fechas y horas de inicio y fin de precipitación para obtener el caudal máximo de salida de la cuenca.

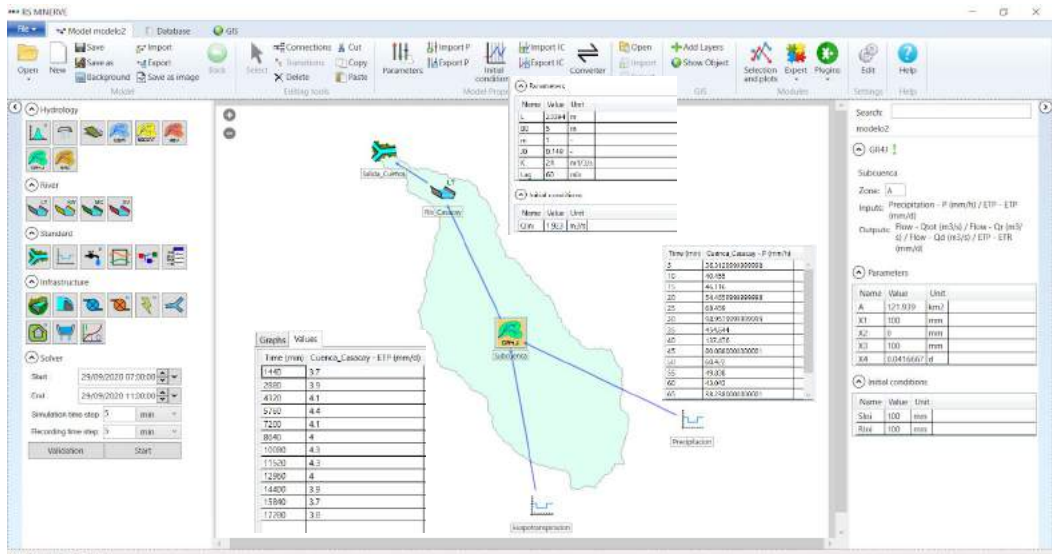


Fig. 39. Resumen de datos ingresados en el modelo hidrológico. Fuente: Autor.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1 Descripción y argumentación teórica de resultados

Para tener la modelación de la subcuenca del río Casacay, se desarrolla un proceso de obtención de datos específicos mediante shapes, precipitaciones de estaciones en los anuarios y software especializados para la respectiva obtención de resultados finales. Además, para la correlación entre los caudales máximos de los softwares se empleó SPSS.

#### 4.1.1 Resultados de investigación

##### 4.1.1.1 Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Casacay

Los parámetros fueron obtenidos mediante un software SIG y se realizaron mapas temáticos que se encuentran en los Anexos. A continuación, se presentan los resultados de los parámetros geomorfológicos de la cuenca y de forma resumida en la Tabla X.

$$s = \frac{C_{Max} - C_{Min}}{L} = \frac{3553m - 80m}{23394m} = 0.149 = 14.9\%$$

$$k_f = \frac{A}{L^2} = \frac{121.939km^2}{(23.394km)^2} = 0.223$$

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 \cdot \frac{32.455km}{\sqrt{121.939km^2}} = 1.583$$

$$T_c = 0.0663 \left( \frac{L}{\sqrt{s}} \right)^{0.77} = 0.0663 \left( \frac{23.394}{\sqrt{0.149}} \right)^{0.77} = 1.56 \text{ horas}$$

$$D_d = \frac{L}{A} = \frac{23.394km}{121.939km^2} = 0.192 \text{ km/km}^2$$

*Tabla X. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Casacay.*

Parámetro	Resultado	Unidad	Descripción
Área (A)	121.939	km <sup>2</sup>	Obtenido mediante software SIG.
Perímetro (P)	32.455	km	Obtenido mediante software SIG.
Longitud de la cuenca (L)	23394	m	Obtenido mediante software SIG.
Pendiente de la cuenca (s)	0.149	---	Cotas obtenidas mediante DEM.

<b>Forma de cuenca (F)</b>	<b>Factor de forma (<math>k_f</math>)</b>	0.223	---	Cuenca alargada.
	<b>Coefficiente de compacidad</b>	1.583	---	Oval oblonga a rectangular oblonga.
<b>Tiempo de concentración (Tc)</b>		1.56	horas	Obtenida mediante ecuación (4) de Kirpich.
<b>Densidad de drenaje (<math>D_d</math>)</b>		0.192	km/km <sup>2</sup>	Drenaje bajo.
<b>Orden del cauce</b>		5	---	Obtenido mediante software GIS con el método de Horton.

En la presente tabla se encuentran los resultados de los parámetros de la cuenca, con sus respectivas unidades y descripción.

#### 4.1.1.2 Hietogramas y curvas IDF de la subcuenca

Con los datos de precipitación de los anuarios se procedió a realizar las curvas IDF, calcular los coeficientes para la ecuación de Intensidad de lluvia (I) y los hietogramas de precipitación para los periodos de retorno mencionados. En la Fig. 40 y 41 se presenta las curvas IDF y el hietograma para un periodo de retorno de 2 años respectivamente para una duración de 1 hora, mientras que el resto se los podrá observar en los Anexos.

$$I = \frac{KT^m}{t^n} = \frac{1126.9011 \cdot T^{0.127372}}{t^{0.61885}}$$

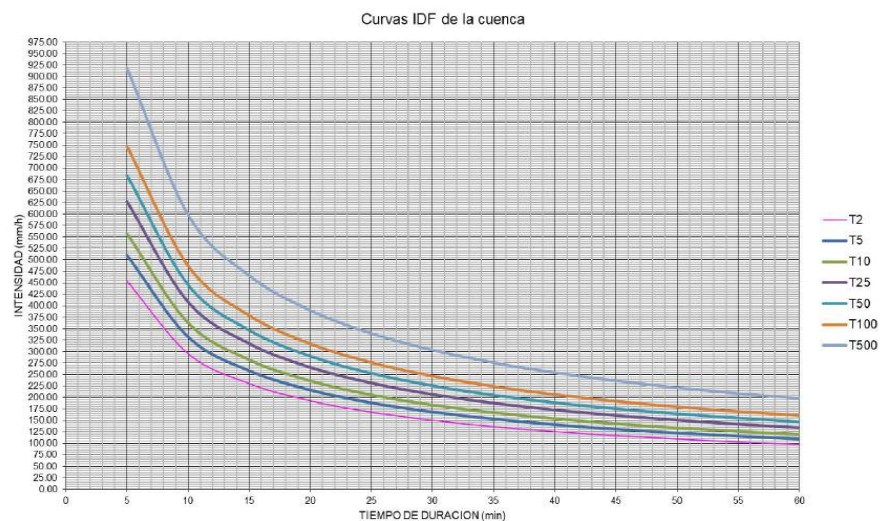
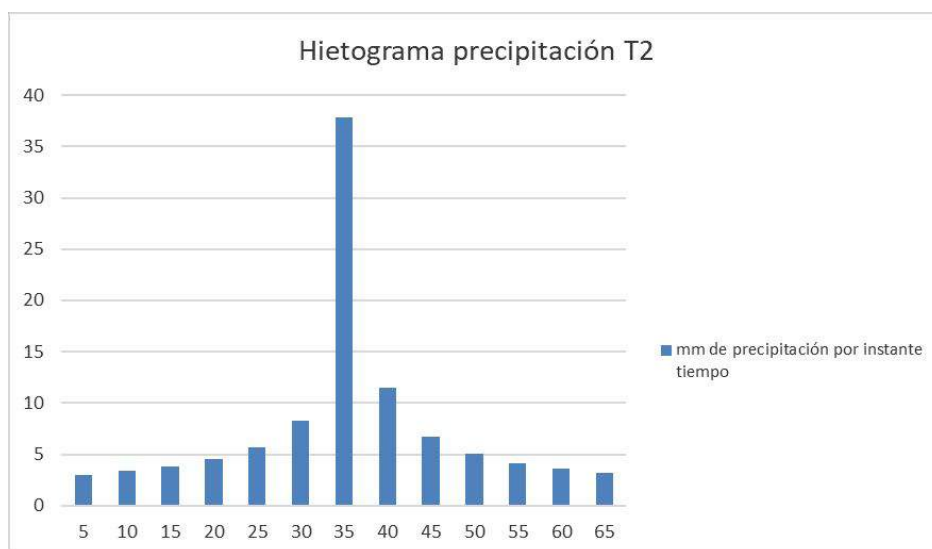


Fig. 40. Curvas IDF para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Fuente: Autor.

**Tabla XI. Valores para hietograma.**

HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 2 AÑOS						
Duración de la tormenta (h)	1					
Intesidad de lluvia (mm/h)	92.96					
Precipitación en 24 horas (mm)	92.96					
Intervalos de tiempo (min)	5					
Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	454.64	37.89	37.89	454.64	3.03	36.31
10	296.06	49.34	11.46	137.48	3.37	40.45
15	230.36	57.59	8.25	98.96	3.84	46.12
20	192.79	64.26	6.67	80.09	4.54	54.47
25	167.92	69.97	5.70	68.46	5.70	68.46
30	150.01	75.00	5.04	60.42	8.25	98.96
35	136.36	79.54	4.54	54.47	37.89	454.64
40	125.54	83.70	4.15	49.84	11.46	137.48
45	116.72	87.54	3.84	46.12	6.67	80.09
50	109.35	91.13	3.59	43.04	5.04	60.42
55	103.09	94.50	3.37	40.45	4.15	49.84
60	97.68	97.68	3.19	38.24	3.59	43.04
65	92.96	100.71	3.03	36.31	3.19	38.24

En la presenta tabla se detallan los valores para la construcción del hietograma para un periodo de retorno de 2 años. **Fuente:** Autor.



**Fig. 41.** Hietograma de precipitación para un periodo de retorno de 2 años. **Fuente:** Autor.

#### 4.1.1.3 Modelación hidrológica en softwares.

Para la modelación hidrológica se debe obtener el CN y los valores para las pérdidas de la cuenca, ya que HEC-HMS requiere estos valores para la simulación, por lo cual se obtuvo los siguientes resultados.



**Tabla XII.** Valores de CN para subcuenca del río Casacay.

Uso de suelo	Área parcial		GRUPO	CN (Número de curva)	CN X Área parcial
	(km2)	%			
AGRICOLA	9.889	8.13%	B	79	6.42
AGROPECUARIO MIXTO	30.323	24.91%		79	19.68
CONSERVACION Y PROTECCION	36.032	29.61%		66	19.54
PECUARIO	0.755	0.62%		79	0.49
PECUARIO-CONSERVACION Y PROTECCION	44.708	36.73%		79	29.02
<b>TOTAL</b>	121.707	100.00%			
				<b>CN PONDERADO</b>	75

En la tabla se describe los valores de CN para cada área parcial de la subcuenca y CN ponderado total.

**Fuente:** Autor.

Cabe mencionar que, por la capacidad de drenaje de la cuenca que es moderada, se la clasificó en el grupo hidrológico tipo B. Mientras que, se implementó el software SIG para conocer el área parcial según tipo de suelo de la subcuenca. Con la finalidad de obtener un CN ponderado para toda la subcuenca y poder realizar la modelación hidrológica.

Además, se calculó el Inicial Abstraction y el porcentaje de impermeabilidad de la subcuenca, donde se utilizó el software SIG para conocer las áreas parciales impermeables.

$$S = \frac{25400}{CN_{Ponderado}} - 254 = \frac{25400}{75} - 254 = 84.667 \text{ mm}$$

$$I_a = 0.2 \cdot 84.667 \text{ mm} = 16.933 \text{ mm}$$

$$\%_{Imp} = \frac{A_{Imp}}{A} \times 100\% = \frac{78.798 \text{ km}^2}{121.939 \text{ km}^2} \times 100\% = 64.621\%$$

Una vez obtenidos los valores de las precipitaciones para diferentes períodos de retornos se procede a la modelación hidrológica y la simulación de caudales máximos en cada software, los que se presentan en la Tabla XIII.

**Tabla XIII.** Caudales máximos.

Períodos de retorno (años)	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
	HEC-HMS	RS-MINERVE
2	1776.00	1631.80
5	2246.60	1832.60
10	2030.90	1996.59
25	2566.50	2242.77
50	2837.00	2449.15

100	3134.20	2674.67
500	3942.50	3282.17

En la presente tabla se detalla los valores de caudales máximos para varios periodos de retorno en los respectivos softwares. **Fuente:** Autor.

#### 4.1.1.4 T de student y correlación de caudales máximos

Para este proceso se empleó el software SPSS, ya que es uno de los programas más empleados para cálculo estadísticos. Los resultados se presentan a continuación:

			Estadístico	Desv. Error
Caudal máximo Hec	Media		2646.57143	278.465248
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	1965.19151	
		Límite superior	3327.95134	
	Media recortada al 5%		2623.06270	
	Mediana		2565.40000	
	Máximo		3941.400	
Caudal máximo Rs	Media		2301.39286	211.994753
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	1782.66038	
		Límite superior	2820.12533	
	Media recortada al 5%		2284.10484	
	Mediana		2242.77000	
	Máximo		3282.170	

El promedio del caudal máximo en HEC-HMS es de 2646.57 y en RS-MINERVE es de 2301.39 m<sup>3</sup>/seg. Mientras que, el máximo caudal ocurre a los 500 años de periodo de retorno tanto en el HEC como en RS y el mínimo caudal ocurre en un periodo de retorno de 2 años.

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Caudal máximo Hec	.135	7	.200*	.959	7	.813
Caudal máximo Rs	.135	7	.200*	.962	7	.834

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

En cuanto a las pruebas de normalidad, como tenemos datos menores a 50, se elige la prueba de Shapiro-Wilk, donde el valor de nivel de significancia calculado para HEC-HMS es de 0.813 y para RS-MINERVE es de 0.834. Siendo estos valores menores al 5% de significancia, concluyendo que estos valores provienen de una distribución normal.

## Prueba T

### Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	Caudal máximo Hec	2646.571	7	736.749	278.465
	Caudal máximo Rs	2301.392	7	560.885	211.994

### Correlaciones de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	Caudal máximo Hec & Caudal máximo Rs	7	.986	.000

### Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Caudal máximo Hec - Caudal máximo Rs	345.178	206.735	78.138	155.98	536.376	4.418	6	.004

Según la prueba T de student, se tiene una media de 346.278 entre los caudales máximos calculados. Como el valor de significancia calculado es de 0.004 es menor al 0.05 por cual si tiene una diferencia poca significativa. Además, la correlación entre ambos caudales da un valor de 0.986.

## 4.2 Conclusiones

- Se obtuvieron diversos insumos de información a través de los shapets obtenidos del IGM donde se obtuvieron los siguientes resultados: área de 121.939 km<sup>2</sup>, perímetro de 62.445 km, longitud de la cuenca de 23.394 km, cota máxima y mínima 3553 m y 80 m respectivamente, pendiente

de 0.148 m/m, factor de forma de 0.233 siendo una cuenca alargada, coeficiente de compacidad de 1.583 siendo una cuenca oval oblonga a rectangular oblonga, densidad de drenaje de 0.192 km/km<sup>2</sup> por lo cual tiene un drenaje pobre.

- Como resultado de la investigación bibliográfica, se evidenció que los softwares HEC-HMS y RS-MINERVE son los más empleados en la modelación hidrológica e hidráulica. Por lo cual, en HEC-HMS se eligió el método SCS Curve Number, dando como resultado un CN de 75. Después, se calculó el nivel de abstracción inicial el cual fue de 16.933 mm. Luego, el área impermeable de la cuenca es de 78.798km<sup>2</sup>, siendo el porcentaje que ocupa en la subcuenca de 64.621 %. Mientras que, para el software RS-MINERVE se eligió el submodelo GR4J siendo el que más se asemeja el modelo empleado en HEC junto con el tipo de río LT, colocando en ambos programas un Lag Time de 60 min.
- Se obtuvieron diferentes caudales máximos para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años; donde en ambos programas los caudales se los expresa en m<sup>3</sup>/s y se encuentra resumido en la siguiente tabla.

Períodos de retorno (años)	Qmax (m3/s)	
	HEC-HMS	RS-MINE RVE
2	1776.00	1631.80
5	2246.60	1832.60
10	2030.90	1996.59
25	2566.50	2242.77
50	2837.00	2449.15
100	3134.20	2674.67
500	3942.50	3282.17

- La correlación que existe entre ambos caudales máximos, es de 0.98 siendo un valor cercano a uno, teniendo una confiabilidad alta para la empleabilidad de ambos softwares.

### 4.3 Recomendaciones

- Tener en cuenta la estación meteorológica que más datos de precipitación tenga y esté cercana a la subcuenca, ya que no todas las estaciones tienen los datos necesarios para realizar los estudios hidrológicos en las diversas cuencas del país, como fue el caso de los datos para la evapotranspiración, por lo cual se optó por una base de datos a nivel mundial respaldada su confiabilidad en investigaciones recientes.
- Al momento de ingresar los datos para el cálculo de evapotranspiración tener muy en cuenta las unidades con las que trabaja la calculadora FAO, caso contrario transformarlas según lo indica el manual.
- Al momento de simular los caudales, tener muy en cuenta el rango de horas donde se desea conocer el caudal máximo y ampliarlo, porque la duración de precipitación por lo general supera a una hora.
- Seguir realizando más investigaciones en la subcuenca, en este caso realizar estudios in situ y trabajar en conjunto con algún software SIG y tener números de curvas más exactas para realizar modelaciones hidrológicas.

## REFERENCIAS

- [1] S. Adamo *et al.*, “Cuenca hidrográfica. una exploración sobre el concepto,” *Semin. sobre uso Tradic. Recur. Nat. en ecosistemas montaña*, pp. 1–9, 1989, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/242423133\\_CUENCA\\_HIDROGRAFICA\\_UNA\\_EXPLORACION\\_SOBRE\\_EL\\_CONCEPTO](https://www.researchgate.net/publication/242423133_CUENCA_HIDROGRAFICA_UNA_EXPLORACION_SOBRE_EL_CONCEPTO).
- [2] H. C. Avalos and R. Pineda, *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.*, 1st ed. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013.
- [3] F. Rodríguez Barrientos, “Cuencas Hidrográficas , Descentralización y Desarrollo Regional Participativo,” *Rev. las Sedes Reg.*, vol. 7, no. 12, pp. 113–125, 2006, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66612867008>.
- [4] L. Fajardo, E. Ordóñez, D. Cobos, and M. Tur, *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Casacay. Casacay: Gobierno Autónomo descentralizado parroquial rural de Casacay.* 2015.
- [5] INEC, “Distribución de la Población del Cantón Pasaje, según Parroquias.” 2001. [Online]. Available: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Fasciculos\\_Censales/Fasc\\_Cantonales/El\\_Oro/Fasciculo\\_Pasaje.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Fasciculos_Censales/Fasc_Cantonales/El_Oro/Fasciculo_Pasaje.pdf).
- [6] A. Araujo and F. Cabrera, “Propuesta de un plan de manejo integral de la cuenca del Río Casacay en el Cantón Pasaje, Provincia de El Oro mediante la Utilización de herramientas SIG,” ESPE, 2009.
- [7] F. Jumbo, “Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA,” *Enfoque UTE*, vol. 6, no. 4, pp. 81–97, 2015, [Online]. Available: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-65422015000400081](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422015000400081).
- [8] S. Chea and C. Oeurng, “Flow simulation in an ungauged catchment of Tonle Sap Lake Basin in Cambodia: Application of the HEC-HMS model,” *Water Util.*

- J.*, vol. 17, pp. 3–17, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/323120661>.
- [9] J. J. López, M. González, A. Scaini, M. Goñi, J. V. Valdenebro, and F. N. Gimena, “Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas,” *Obras y Proy.*, no. 12, pp. 15–30, 2012, doi: 10.4067/s0718-28132012000200002.
- [10] D. Chuquin, N. Chuquin, J. Chuquin, L. Castro, and R. Cepeda, “Desarrollo de un modelo de precipitación escorrentía semi-distribuido para la evaluación de los recursos hídricos del río Jalón,” *Cienc. Digit.*, vol. 3, no. 3.1, pp. 115–126, 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v3i3.1.680.
- [11] J. García Hernández, A. Foehn, S. Alesina, and J. Fluixá-Sanmartín, “El sistema operacional Minerve para la previsión de crecidas en el cantón de Valais - Suiza,” *Congr. Latinoam. Hidráulica*, vol. 27, p. 11, 2016, [Online]. Available: <https://infoscience.epfl.ch/record/223802>.
- [12] J. Mozo, M. Varni, M. G. Ares, and C. I. Chagas, “Modelado Hidrológico de la precipitación-escorrentía en una microcuenca agrícola del Partido de Azul, Buenos Aires.,” *Cienc. del Suelo*, vol. 38, no. 1, pp. 121–132, 2020, [Online]. Available: <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/Volumen38n1/12-484.pdf>.
- [13] M. A. Angulo and O. C. Saavedra, “Modelación hidrológica de la cuenca Maylenco utilizando HEC-HMS,” *Investig. Desarro.*, vol. 18, no. 1, pp. 53–67, Jul. 2018, [Online]. Available: <http://www.upb.edu/revista-investigacion-desarrollo/index.php/id/article/view/169>.
- [14] V. Guerra Cobián, A. Ferriño Fierro, R. Cavazos González, J. Palomo Mendoza, and F. Yépez Rincón, “Estimación del caudal ecológico de la cuenca binacional Bravo / Grande mediante el contraste de modelos hidrológicos.,” *Ing. del Agua*, vol. 5, pp. 1–14, 2017, [Online]. Available: [http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema\\_A/a9.pdf](http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_A/a9.pdf).

- [15] E. Fernández Soto and F. Peña Cortés, “Aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en dos cuencas costeras de la región de la araucanía (Chile),” *Estud. Geogr.*, vol. 77, no. 280, pp. 35–56, 2016, [Online]. Available: <http://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/view/474>.
- [16] P. Duque Sarango, D. M. Patiño, and X. E. López, “Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,” *Inf. tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 351–362, 2019, [Online]. Available: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v30n6/0718-0764-infotec-30-06-00351.pdf>.
- [17] J. J. Cabrera Balarezo, L. M. Timbe Castro, and P. J. Crespo Sánchez, “Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin,” *DYNA*, vol. 86, no. 210, pp. 338–344, 2019, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v86n210/0012-7353-dyna-86-210-338.pdf>.
- [18] L. Santillán, M. Cárdenas, M. Brito, J. Orejuela, and C. Rosero, “Modelación de base de la distribución temporal de un evento de lluvia intensa ocurrido sobre un área de suelo en la quebrada de Cunduana, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo,” *Rev. Caribeña Ciencias Soc.*, pp. 1–20, 2018, [Online]. Available: [www.eumed.net/rev/caribe/2018/11/distribucion-temporal-lluvia.html](http://www.eumed.net/rev/caribe/2018/11/distribucion-temporal-lluvia.html).
- [19] Centro de Investigaciones UTMACH, “Dominio y líneas de investigación de la Universidad Técnica de Machala,” Machala, Ecuador, 2017. [Online]. Available: [https://investigacion.utmachala.edu.ec/es/wp-content/uploads/2017/05/129\\_2017-Reforma-a-las-lineas-de-investigación-de-la-UTMACH.pdf](https://investigacion.utmachala.edu.ec/es/wp-content/uploads/2017/05/129_2017-Reforma-a-las-lineas-de-investigación-de-la-UTMACH.pdf).
- [20] J. E. Torres and J. A. Aragón, *Investigación en hidrología: general, isotópica y aplicada*. Bogotá: Universidad Libre, 2018.
- [21] M. V. Pazos and D. Arias, *Hidrología agrícola*, 1st ed. Babahoyo: CIDEPRO, 2019.
- [22] V. Ponce, *Engineering hydrology: Principles and practices*, 2nd ed. Englewood Cliffs: NJ: Prentice Hall, 2014.



- [23] V. Te Chow, D. Maidment, and L. Mays, *Hidrología aplicada*, 13th ed. Bogotá: McGRAW-HILL, 1994.
- [24] E. Colombani, S. Behr, and L. Brandizi, “Estimación de precipitaciones extremas a través de GSMaP y aplicación hidrológica a la crecida del arroyo Telsen, Chubut, Patagonia Argentina.,” *Meteorológica*, vol. 42, no. 1, pp. 53–66, 2017, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1850-468X201700200004](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1850-468X201700200004).
- [25] World Meteorological Organization, *International Glossary of Hydrology*. Geneva: OMM, 2012.
- [26] S. Soto and M. Desamparados, “Precipitación,” 2020. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/146445>.
- [27] M. A. Segura Castruita and C. A. Ortiz Solorio, “Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud,” *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 8, no. 3, pp. 93–110, 2017, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-24222017000300093&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222017000300093&lng=es&nrm=iso).
- [28] INAMHI, “Anuario meteorológico № 53-2013,” Quito, 2017.
- [29] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, 56th ed. Roma: FAO, 2006.
- [30] E. López *et al.*, “Evapotranspiration and Crop Coefficient of Bell Pepper in Culiacan Valley, Mexico,” *Terra Latinoam.*, vol. 33, no. 3, pp. 209–219, 2015, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57341186003.pdf>.
- [31] I. Orozco Medina, M. S. Alvarado Barrientos, J. López de la Cruz, and A. I. Ramírez Orozco, “Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Penman-Monteith,” *Acta Univ.*, vol. 29, pp. 1–15, 2019, doi:

10.15174/au.2019.2481.

- [32] J. Carrie, *Manual de manejo de cuencas*. Editorial World Vision, 2004.
- [33] M. Camino, M. Bó, J. Cionchi, J. Del Río, A. López, and S. De Marco, “Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires,” *Rev. Univ. Geogr.*, vol. 27, no. 1, pp. 73–97, 2018, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383257036005>.
- [34] J. Weber, C. Dasso, and E. Jorquera, “Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta,” *Mecánica Comput.*, vol. 29, pp. 4013–4037, 2010, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/263350791\\_DESARROLLO\\_Y\\_CALIBRACION\\_DE\\_UN\\_MODELO\\_HIDROLOGICO\\_DE\\_SIMULACION\\_MIXTA](https://www.researchgate.net/publication/263350791_DESARROLLO_Y_CALIBRACION_DE_UN_MODELO_HIDROLOGICO_DE_SIMULACION_MIXTA).
- [35] V. Singh and D. Woolhiser, “Mathematical Modeling of Watershed Hydrology,” *J. Hydrol. Eng.*, vol. 7, pp. 270–292, 2002, [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mathematical-Modeling-of-Watershed-Hydrology-Singh-Woolhiser/7ea67fa0b9b6abb49f52c2c7967a942f81e6606c>.
- [36] L. Almeida and J. C. Valdés Serra, “Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas,” *Rev. da FAE*, vol. 20, no. 1, pp. 129–137, 2017, [Online]. Available: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>.
- [37] C. Y. Xu and G. Vandewiele, “Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to Input errors and data length,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 39, no. 2, pp. 157–176, 1994, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/233207048\\_Sensitivity\\_of\\_rainfall-runoff\\_models\\_to\\_input\\_errors\\_and\\_data\\_length](https://www.researchgate.net/publication/233207048_Sensitivity_of_rainfall-runoff_models_to_input_errors_and_data_length).
- [38] J. Boada, M ; Campo, “Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba,” *Energía*, no. 15, pp. 47–56, 2018, [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=134458928&lang=es&site=ehost-live>.

- [39] G. Devi, B. Ganasri, and G. Dwarakish, “A Review on Hydrological Models,” *Aquat. Procedia*, vol. 4, pp. 1001–1007, 2015, doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126.
- [40] J. Sitterson, C. Knightes, R. Parmar, K. Wolfe, M. Muche, and B. Avant, “An Overview of Rainfall-Runoff Model Types An Overview of Rainfall-Runoff Model Types,” Georgia, 2018.
- [41] R. C. Pauta, D. M. Arias, and E. R. Castro, “Uso de Sistemas de Información Geográfica SIG para la elaboración de planos de fincas agrícolas,” *Opuntia Brava*, vol. 11, no. 1, pp. 217–223, 2019, [Online]. Available: <http://200.14.53.83/index.php/opuntiabrava/article/view/714>.
- [42] D. Rodriguez, S. Sánchez, and M. Espinosa, “Sistema de información hidrológica para el diagnóstico de recursos hídricos del municipio de Morelia (Hydrological Information System for the Diagnosis of Water Resources of the Municipality of Morelia),” *SEREA*, vol. 15, pp. 1–6, 2017, [Online]. Available: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3113743](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3113743).
- [43] D. Córdova, D. Paredes, and R. Alulema, “Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota.,” *FIGEMPA Investig. Y Desarro.*, vol. 2, no. 8, pp. 31–41, 2017, [Online]. Available: <http://200.12.169.32/index.php/RevFIG/article/view/53>.
- [44] W. Guachamín, S. Páez, and N. Horna, “Evaluación de productos IMERG V03 y TMPA V7 en la detección de crecidas caso de estudio cuenca del río Cañar,” *Rev. Politécnica*, vol. 42, no. 2, pp. 31–48, 2019, [Online]. Available: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-01292019000100031](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000100031).
- [45] D. Villegas and W. Gómez, “Procesos locales de transformación que detonan el cambio de uso de suelo y vegetación en un área natural protegida de la Región Centro de México,” *Acta Univ. Multidiscip. Sci. J.*, vol. 30, pp. 1–21, 2020, doi: <https://doi.org/10.15174/au.2020.2864>.
- [46] S. E. Fick and H. R. J., “WorldClim 2 : new 1-km spatial resolution climate


- surfaces for global land areas,” *Int. J. Climatol.*, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315, 2017, doi: 10.1002/joc.5086.
- [47] P. Hernández and C. Patiño, “Manual para el uso de modelo hidrológico HEC-HMS ( HYDROLOGIC MODELING SYSTEM HEC-HMS ). Aplicaciones del Modelo en Simulación Hidrológica a la Cuenca del Río Conchos,” Puebla, 2018. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/342259487\\_MANUAL\\_PARA\\_EL\\_USO\\_DE\\_MODELO\\_HIDROLOGICO\\_HEC-HMS\\_HYDROLOGIC\\_MODELING\\_SYSTEM\\_HEC-HMS\\_Aplicaciones\\_del\\_Modelo\\_en\\_Simulacion\\_Hidrologica\\_a\\_la\\_Cuenca\\_del\\_Rio\\_Conchos](https://www.researchgate.net/publication/342259487_MANUAL_PARA_EL_USO_DE_MODELO_HIDROLOGICO_HEC-HMS_HYDROLOGIC_MODELING_SYSTEM_HEC-HMS_Aplicaciones_del_Modelo_en_Simulacion_Hidrologica_a_la_Cuenca_del_Rio_Conchos).
- [48] US Army Corps of Engineers, “HEC-HMS User’s Manual,” *Hydrologic Engineering Center*, 2020. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.6.1>.
- [49] J. Sánchez, “HEC-HMS . Manual elemental,” España, 2015. [Online]. Available: <http://hidrologia.usal.es>.
- [50] M. Astorayme, J. García, W. Suarez, O. Felipe, C. Huggel, and W. Molina, “Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú,” *Rev. Peru. Geo Atmosférica RGPA*, vol. 4, no. 4, pp. 109–124, 2015, [Online]. Available: [http://www.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015\\_vol04/paper8.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper8.pdf).
- [51] J. García *et al.*, *RS MINERVE - Technical Manual*, no. 2. Switzerland: CREALP, 2020.
- [52] E. Lujano Laura, J. D. Sosa Sarmiento, A. Lujano Laura, and R. Lujano Laura, “Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú,” *Rev. Investig. Altoandinas - J. High Andean Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 431–438, 2016, doi: 10.18271/ria.2016.235.
- [53] M. Villón Bejar, *Hidrología Estadística*. Lima: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2004.
- [54] D. Lind, W. Marchal, and S. Wathen, *Estadística aplicada a los negocios y la*

*conomía*, 15th ed. México: McGRAW-HILL, 2012.

- [55] J. César and S. Montenegro, “Estudio de Monte Carlo para comparar 8 pruebas de normalidad sobre residuos de mínimos cuadrados ordinarios en presencia de procesos autorregresivos de primer orden,” *Estud. Gerenciales*, vol. 31, no. 136, pp. 253–265, 2015, doi: 10.1016/j.estger.2014.12.003.
- [56] M. Herrera Villafranca, C. Guerra, L. Sarduy, Y. García, and C. Enriquez, “Diferentes métodos estadísticos para el análisis de variables discretas. Una aplicación en las ciencias agrícolas y técnicas,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 21, no. 1, pp. 58–62, 2012, [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542012000100011&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542012000100011&script=sci_arttext&tlng=en).
- [57] Universidad Técnica de Machala, “Guía complementaria para la instrumentalización del sistema de titulación de pregrado de la UTMACH,” Machala.
- [58] D. Raes and G. Munoz, *The ETo Calculator*, 3rd ed. Roma, 2009.
- [59] R. S. Ortiz and M. Chile A., “Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco,” *Siembra*, vol. 7, no. 1, pp. 70–79, 2020, doi: 10.29166/siembra.v7i1.1450.

# ANEXOS

## Anexo 1. Páginas web de bases de datos libres.



Cartografía de Libre Acceso Escal...  
No seguro | geoportalligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/

Inicio Portafolio Geoeuca Descargas – Visor GNSS Contactos

### ESCALA 1:50.000, Segunda Versión Enero 2013!!

#### CAPAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA BÁSICA DEL IGM DE LIBRE ACCESO. (Codificación UTF-8)

**ARCHIVOS SHP.**- Las Capas de Información Geográfica han sido estructuradas de acuerdo al [Catálogo de Objetos del IGM Versión 4.0](#); contienen datos continuos del país y según la distribución de cartas topográficas a escala 1: 50.000. La información se descargará en formato SHP [comprimido (\*.rar)].

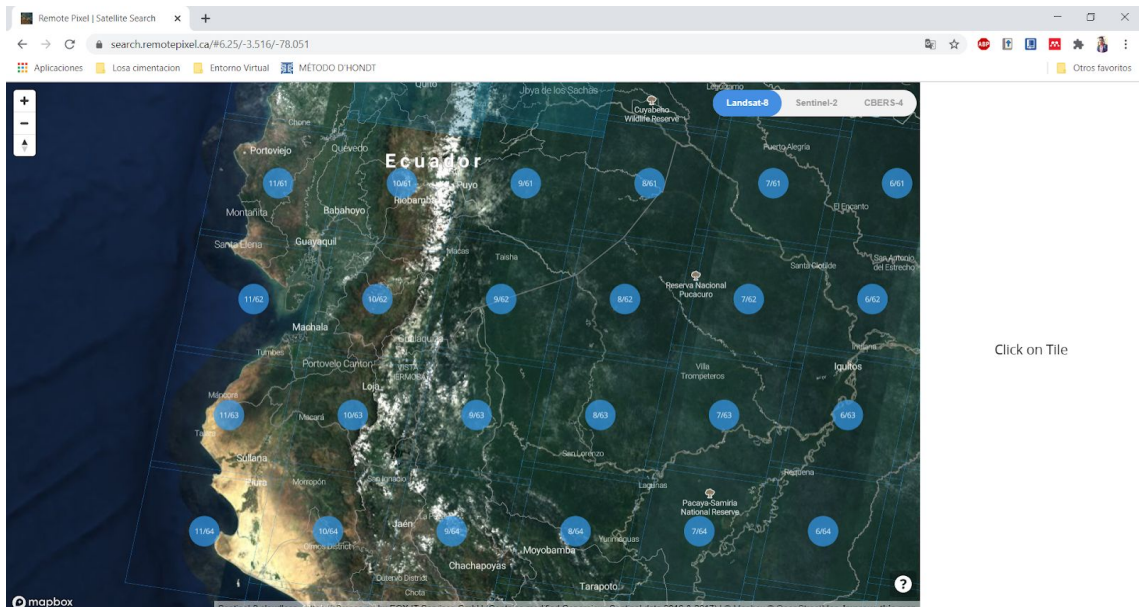
**Notas a considerar:**  
*Es importante mencionar que se pone a disposición en formato [SHAPEFILE](#) al ser considerado un formato estándar de facto, lo que quiere decir, que es un patrón o norma (el shapefile) que se caracteriza por no haber sido consensuada ni legitimada por un organismo de estandarización al efecto; por el contrario, se trata de una norma generalmente aceptada y ampliamente utilizada por iniciativa propia de un gran número de interesados; y la información puede ser utilizada en varios software SIG libres o propietario.*

**Verifica las Cartas Topográficas Reservadas ECUADOR EN CARTAS ESCALA 1:50.000 RESERVADAS** (gráfico actualizado, según Resolución 2012). Se realizará la entrega de la información establecida como RESERVADA, una vez que se realice el trámite administrativo respectivo, para lo cual, pedimos se comunique con el área de Mercadotecnia al teléfono 3975100 ext. 2508 con la Sra. Tlga. Jacqueline Páez (Asistente de Mercadeo) ó al correo electrónico: [jacqueline.paez@mail.igm.gob.ec](mailto:jacqueline.paez@mail.igm.gob.ec)

**Leer los siguientes documentos de interés:**

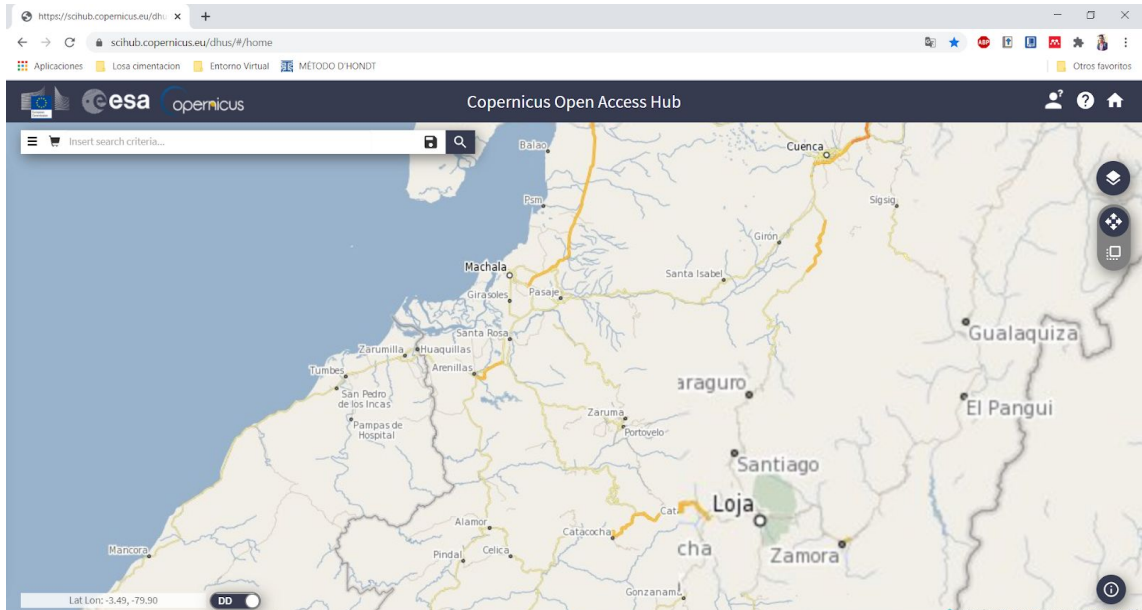
- **LICENCIA DE USO**, documento con la licencia de uso de la información.
- **MEMORIA TÉCNICA**, documento en el que se detalla el proceso de la obtención de la información hasta llegar al formato shp.
- **MEMORIA DE ACTUALIZACIÓN**, documento en el que se detalla el proceso de actualización de la información hasta llegar al formato shp.
- **LISTADO DE CARTAS RESERVADAS**, Listado de Cartas Reservadas según Nueva Directiva de Seguridad

### CARTAS TOPOGRÁFICAS ESCALA 1:50.000, FORMATO SHP



Remote Pixel | Satellite Search  
search.remotepixel.ca/#6.25/-3.516/-78.051

Map showing Ecuador with a grid of map tiles. The tiles are labeled with numbers such as 11/61, 10/61, 9/61, 8/61, 7/61, 6/61, 11/62, 10/62, 9/62, 8/62, 7/62, 6/62, 11/63, 10/63, 9/63, 8/63, 7/63, 6/63, 11/64, 10/64, 9/64, 8/64, 7/64, 6/64. The map is overlaid with a grid of blue lines. The text "Click on Tile" is visible on the right side of the map.



Historical climate data — WorldClim

worldclim.org/data/worldclim21.html

WorldClim Home

## Historical climate data

This is WorldClim version 2.1 climate data for 1970-2000. This version was released in January 2020.

There are monthly climate data for minimum, mean, and maximum temperature, precipitation, solar radiation, wind speed, water vapor pressure, and for total precipitation. There are also 19 "bioclimatic" variables.

The data is available at the four spatial resolutions, between 30 seconds (~1 km<sup>2</sup>) to 10 minutes (~340 km<sup>2</sup>). Each download is a "zip" file containing 12 GeoTiff (.tif) files, one for each month of the year (January is 1; December is 12).

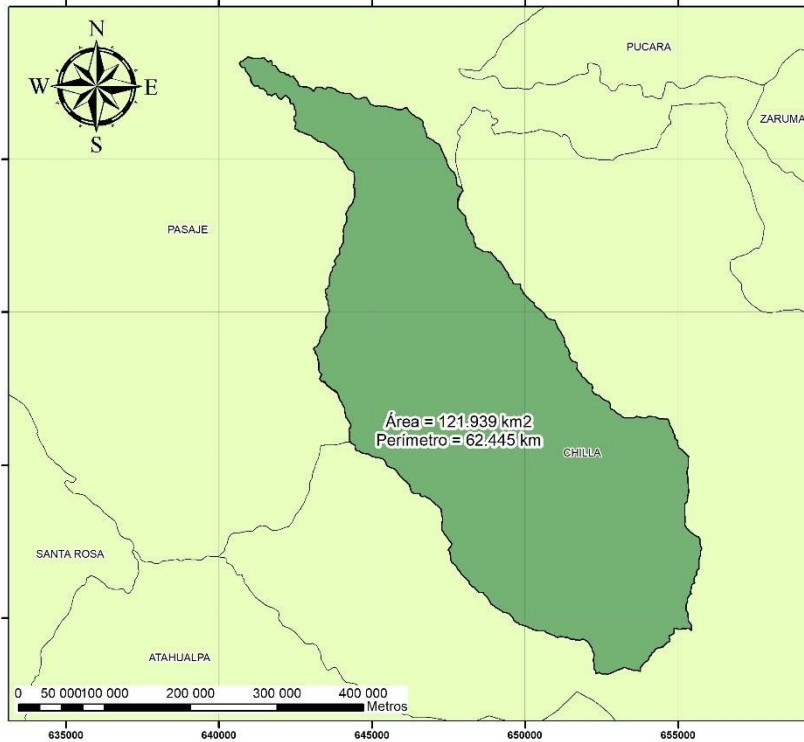
variable	10 minutes	5 minutes	2.5 minutes	30 seconds
minimum temperature (°C)	tmin 10m	tmin 5m	tmin 2.5m	tmin 30s
maximum temperature (°C)	tmax 10m	tmax 5m	tmax 2.5m	tmax 30s
average temperature (°C)	tavg 10m	tavg 5m	tavg 2.5m	tavg 30s
precipitation (mm)	prec 10m	prec 5m	prec 2.5m	prec 30s
solar radiation (kJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )	srad 10m	srad 5m	srad 2.5m	srad 30s
wind speed (m s <sup>-1</sup> )	wind 10m	wind 5m	wind 2.5m	wind 30s
water vapor pressure (kPa)	vapr 10m	vapr 5m	vapr 2.5m	vapr 30s

[Historical climate data](#)  
[Historical monthly weather data](#)  
[Future climate data](#)

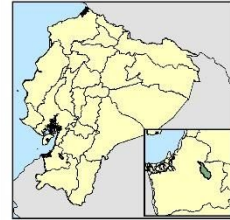


## Anexo 2. Mapas temáticos de la cuenca.

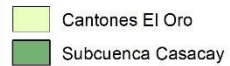
### DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY



#### Mapa de Ubicación



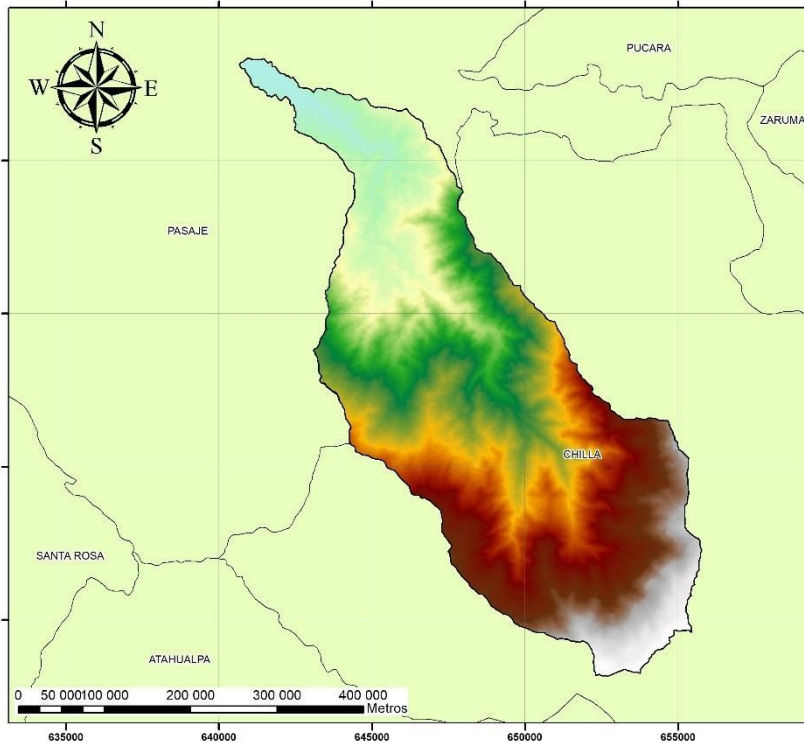
#### LEYENDA



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
TÍTULO: Área y perímetro de la subcuenca.	
Elaborado por: Edwin Guzmán Redrodrán	Corrección: IGM, SENAGUA
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000

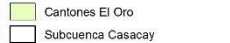
### MDE DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY



#### Mapa de Ubicación



#### LEYENDA



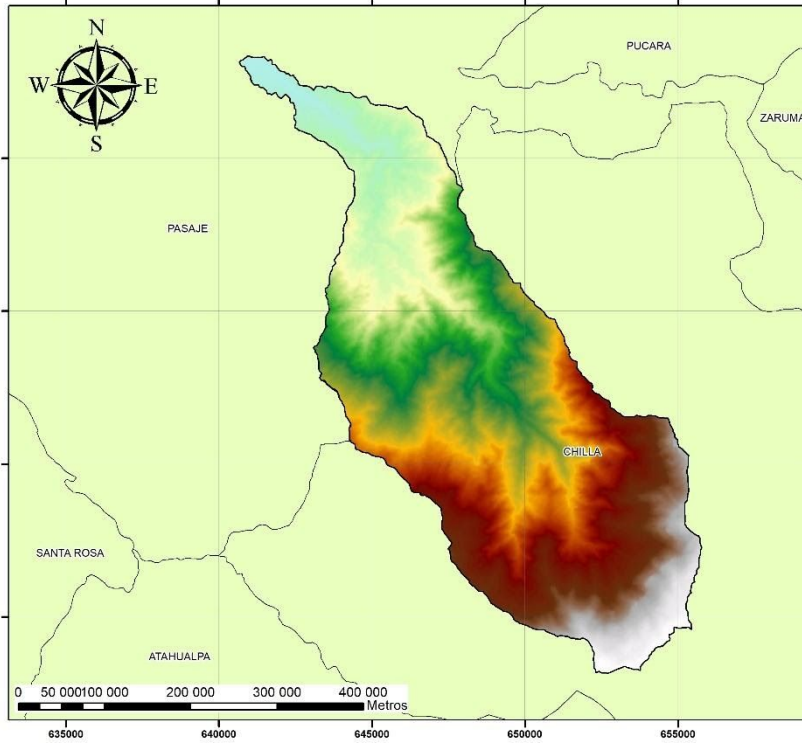
**DEM**  
 High : 3553  
 Low : 80

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

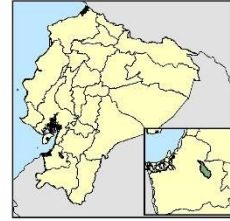
<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
TÍTULO: MDE de la subcuenca expresada en m.	
Elaborado por: Edwin Guzmán Redrodrán	Corrección: IGM, SENAGUA, Copernicus
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000



## MDE DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY



### Mapa de Ubicación



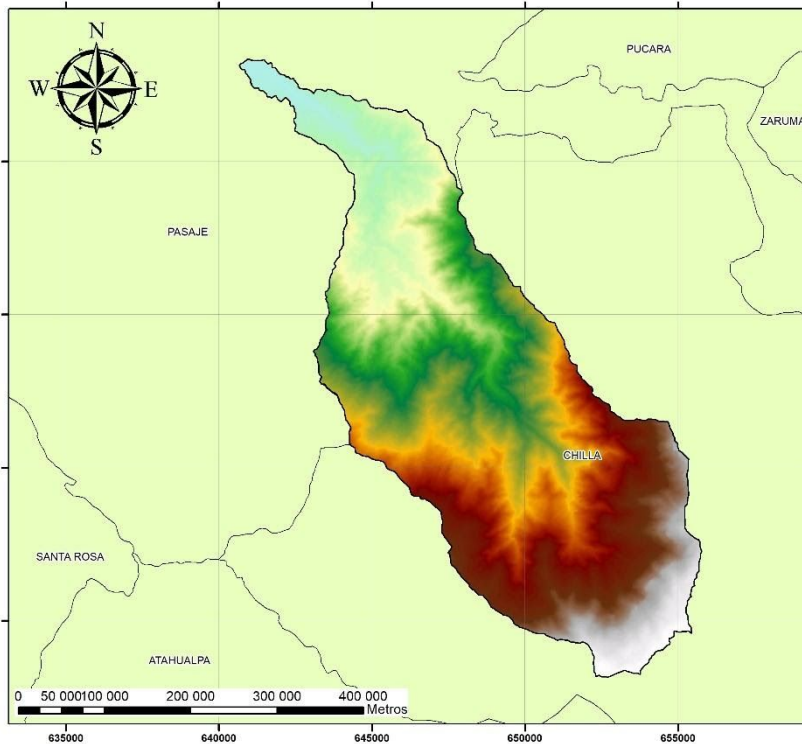
### LEYENDA

- Cantones El Oro
  - Subcuenca Casacay
- DEM**
- High : 3553
  - Low : 80

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
TÍTULO: MDE de la subcuenca expresada en m.	
Elaborado por: Edwin Guamán Redován	Fecha: IGM, SENAGUJA, Copernicus
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000

## MDE DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY



### Mapa de Ubicación



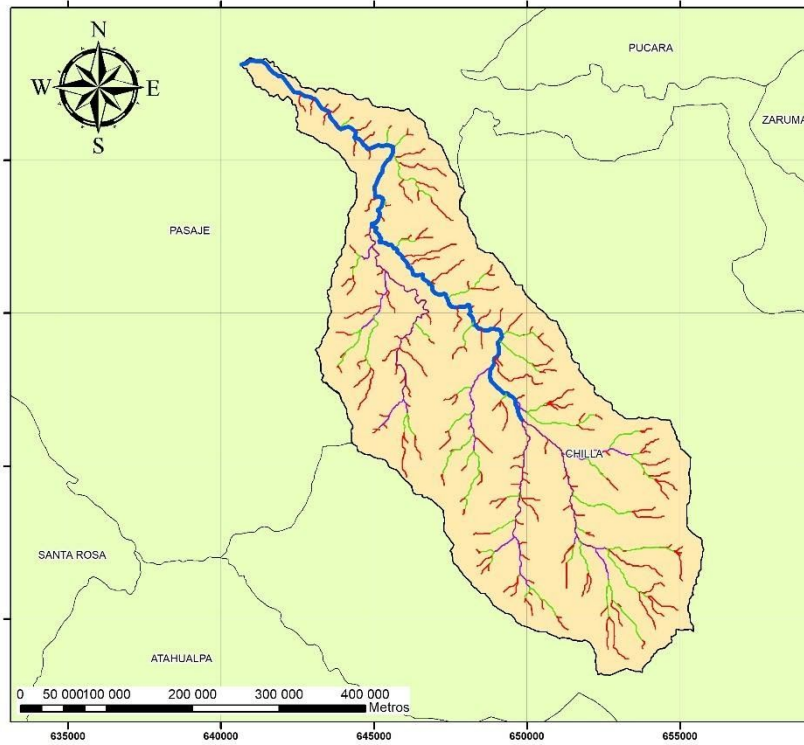
### LEYENDA

- Cantones El Oro
  - Subcuenca Casacay
- DEM**
- High : 3553
  - Low : 80

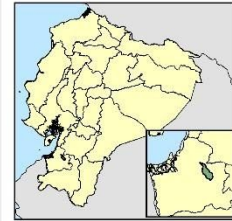
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
TÍTULO: MDE de la subcuenca expresada en m.	
Elaborado por: Edwin Guamán Redován	Fecha: IGM, SENAGUJA, Copernicus
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000

## RED HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY



### Mapa de Ubicación



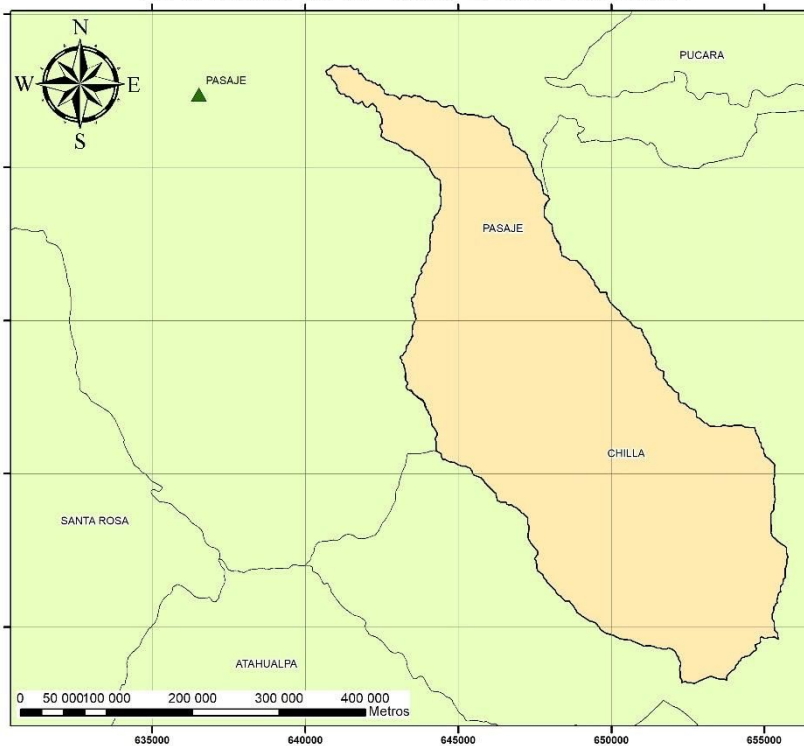
### LEYENDA



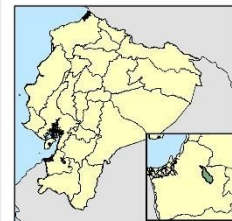
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
Carrera: Orden de ríos según Horton	
Elaborado por: Edwin Guzmán Redován	Fuente: IGM, SENAGUA
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000

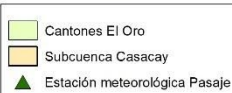
## ESTACIÓN METEOROLÓGICA PASAJE



### Mapa de Ubicación



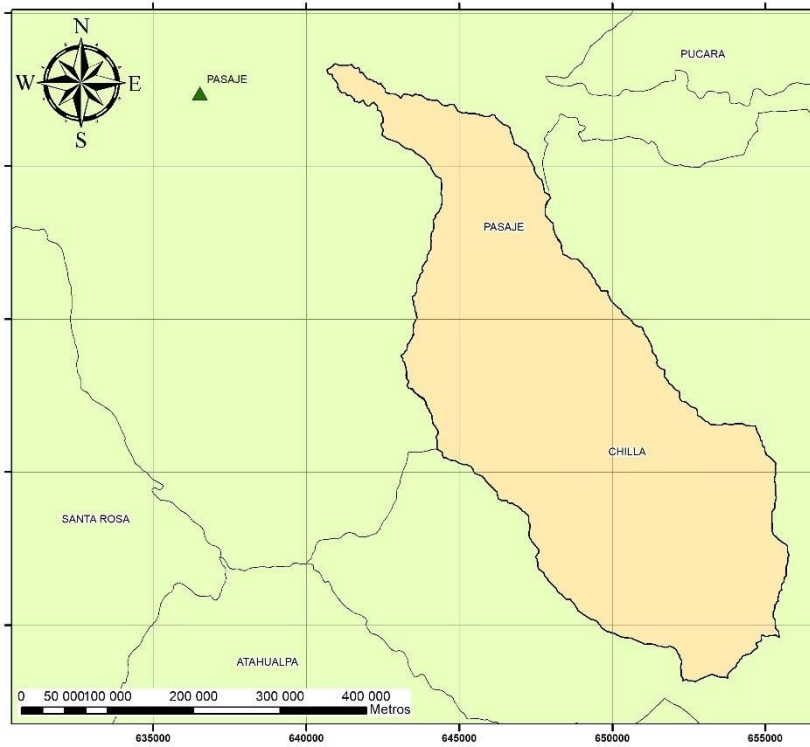
### LEYENDA



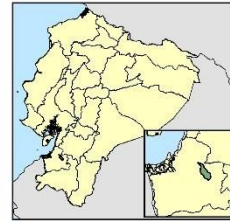
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
Carrera: Estación más influyente en la subcuenca del río Casacay	
Elaborado por: Edwin Guzmán Redován	Fuente: IGM, SENAGUA
Fecha: Noviembre-2020	Escala: 1:125 000

## ESTACIÓN METEOROLÓGICA PASAJE



### Mapa de Ubicación



### LEYENDA

- Cantones El Oro
- Subcuenca Casacay
- Estación meteorológica Pasaje

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

### UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA

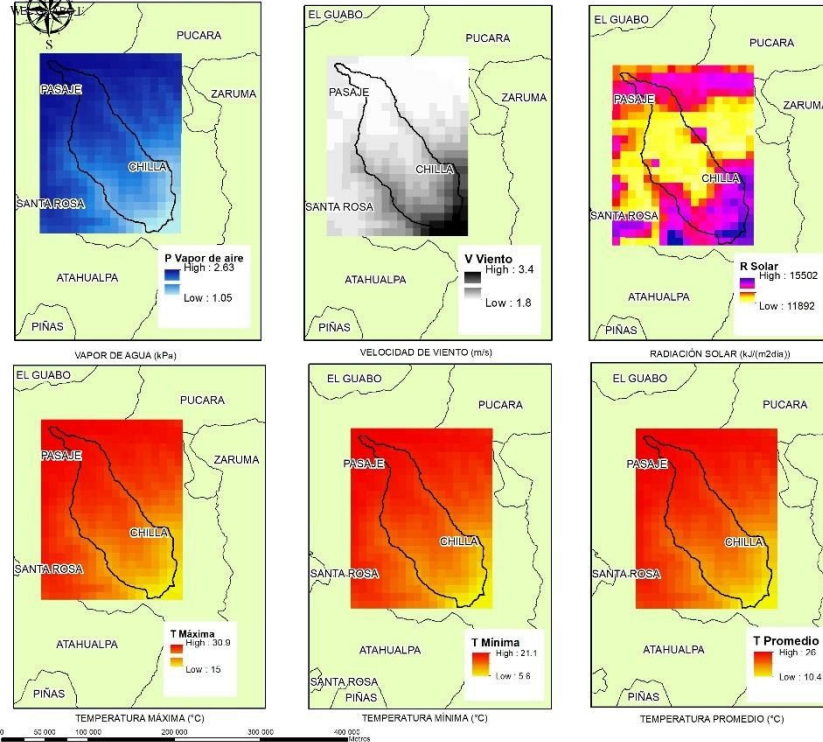
#### FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Centro: Estación más influyente en la subcuenca del río Casacay

Elaborado por: Edwin Guamán Redován Fuente: IGM, SENAGUA

Fecha: Noviembre-2020 Escala: 1:125 000

## PARÁMETROS PARA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LA SUBCUENCA



### Mapa de Ubicación



### LEYENDA

- Cantones El Oro
- Subcuenca Casacay

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500 000.0000  
 False Northing: 10 000 000.0000  
 Central Meridian: -81 0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

### UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA

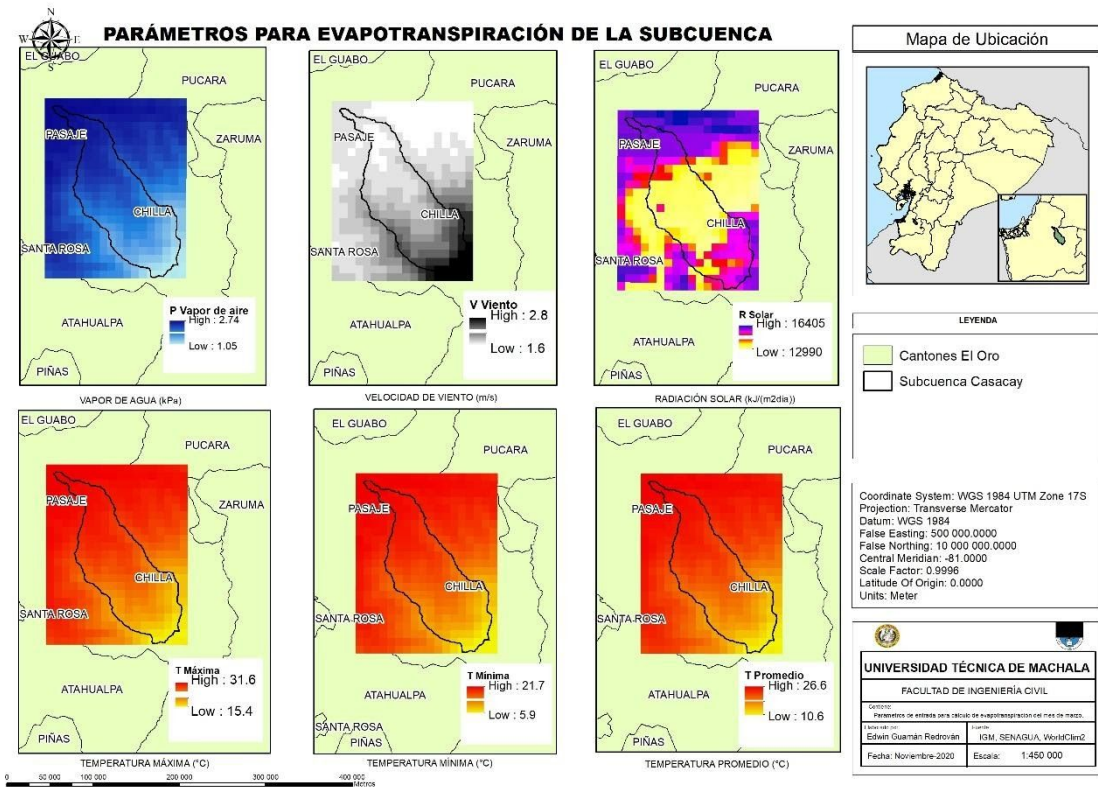
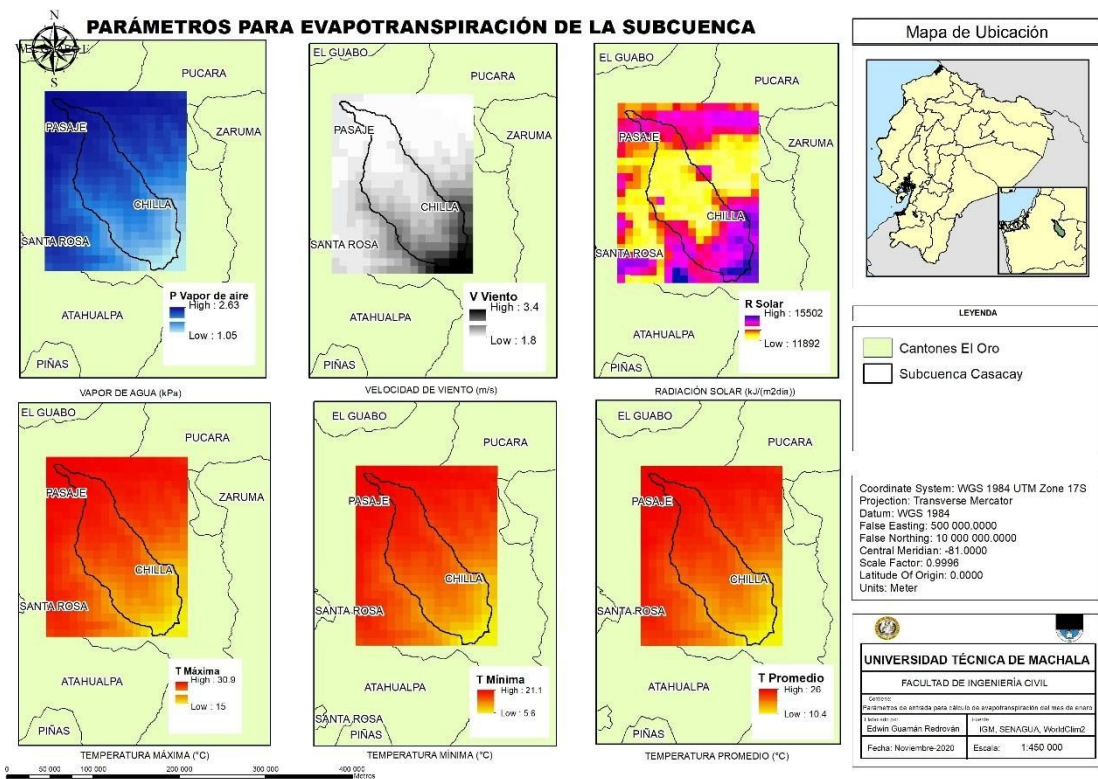
#### FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

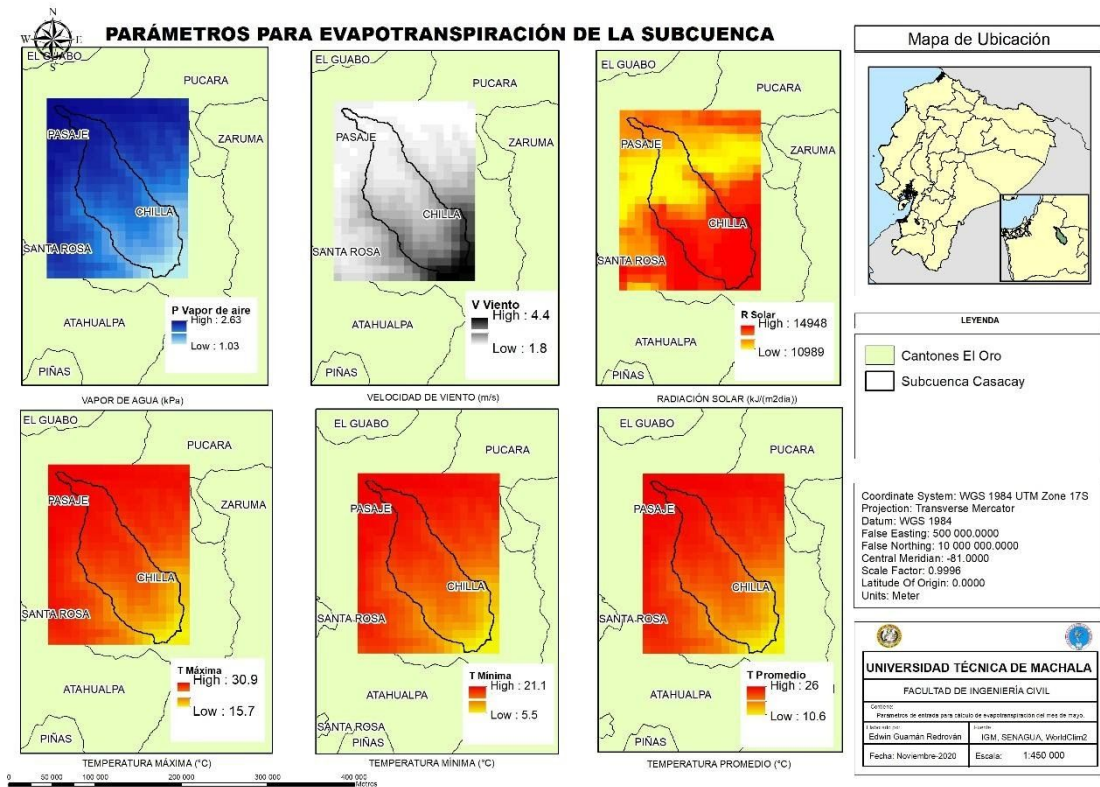
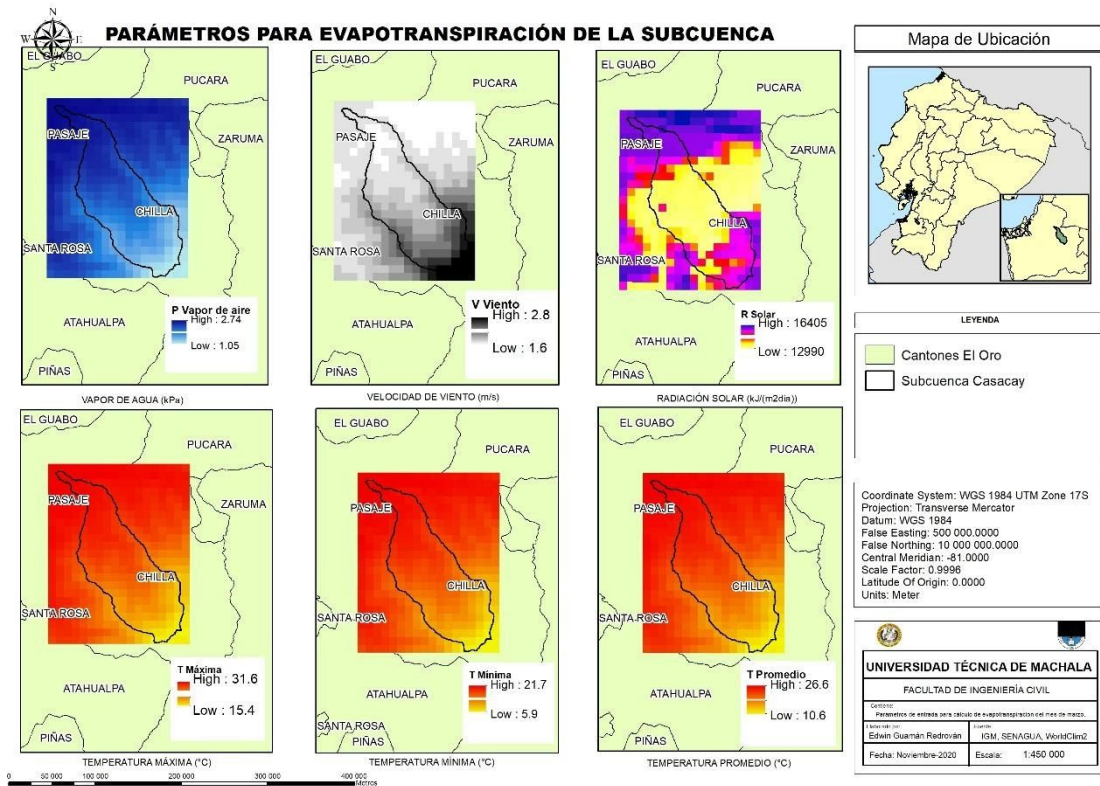
Centro: Parámetros de entrada para cálculo de evapotranspiración del mes de enero

Elaborado por: Edwin Guamán Redován Fuente: IGM, SENAGUA, WorldClim2

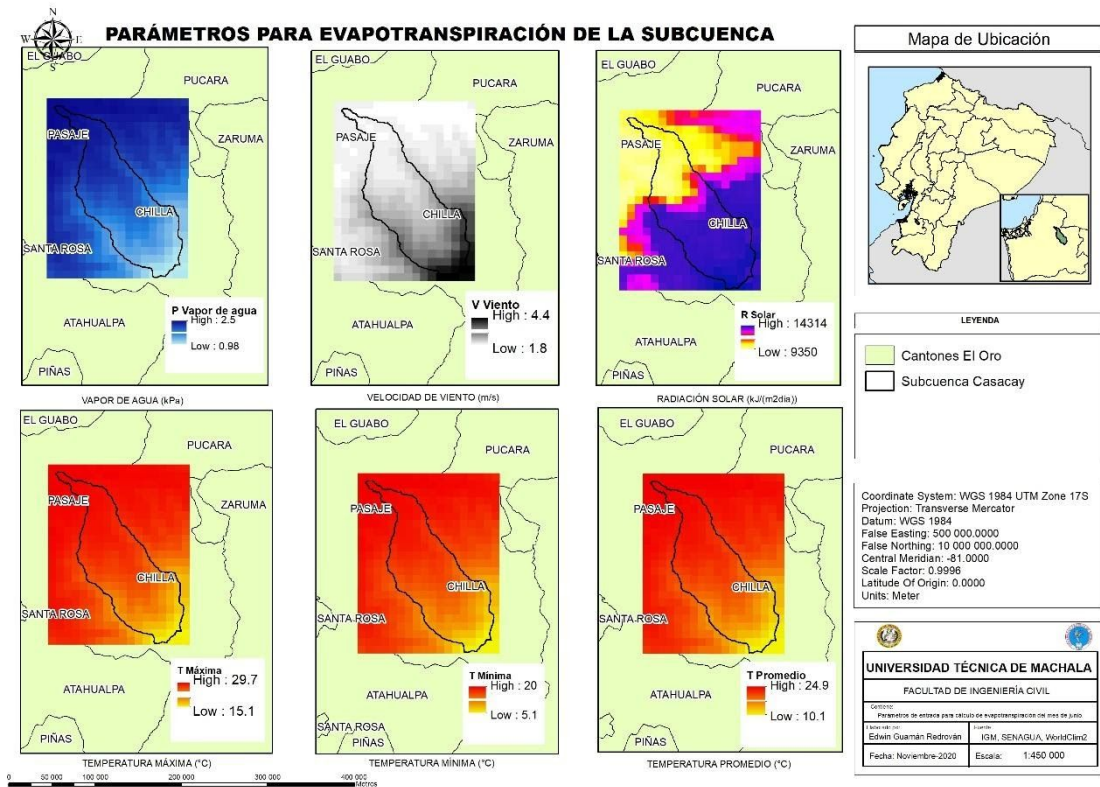
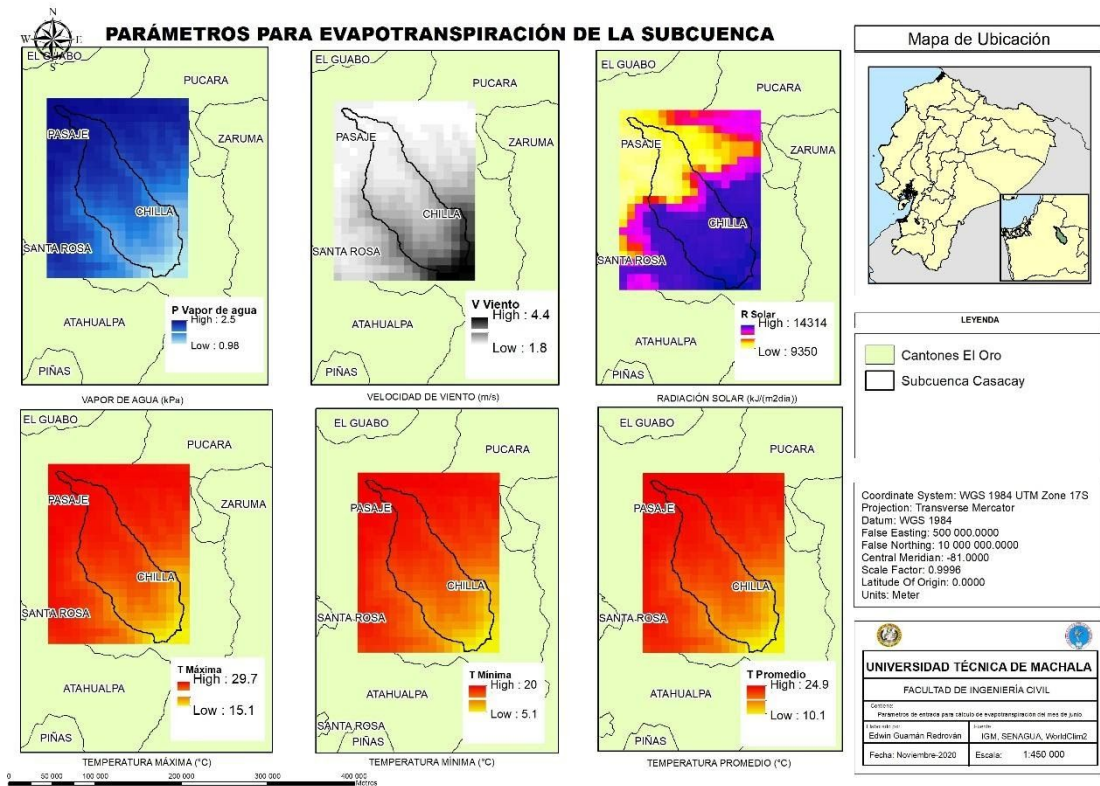
Fecha: Noviembre-2020 Escala: 1:140 000

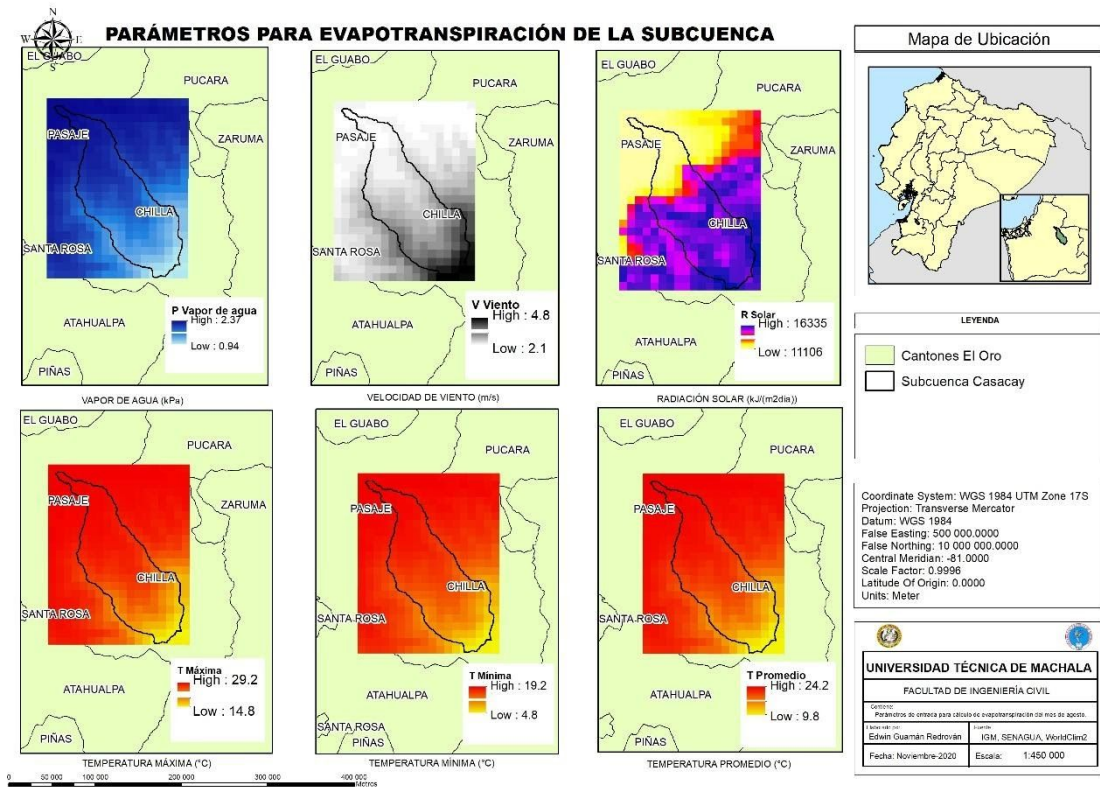
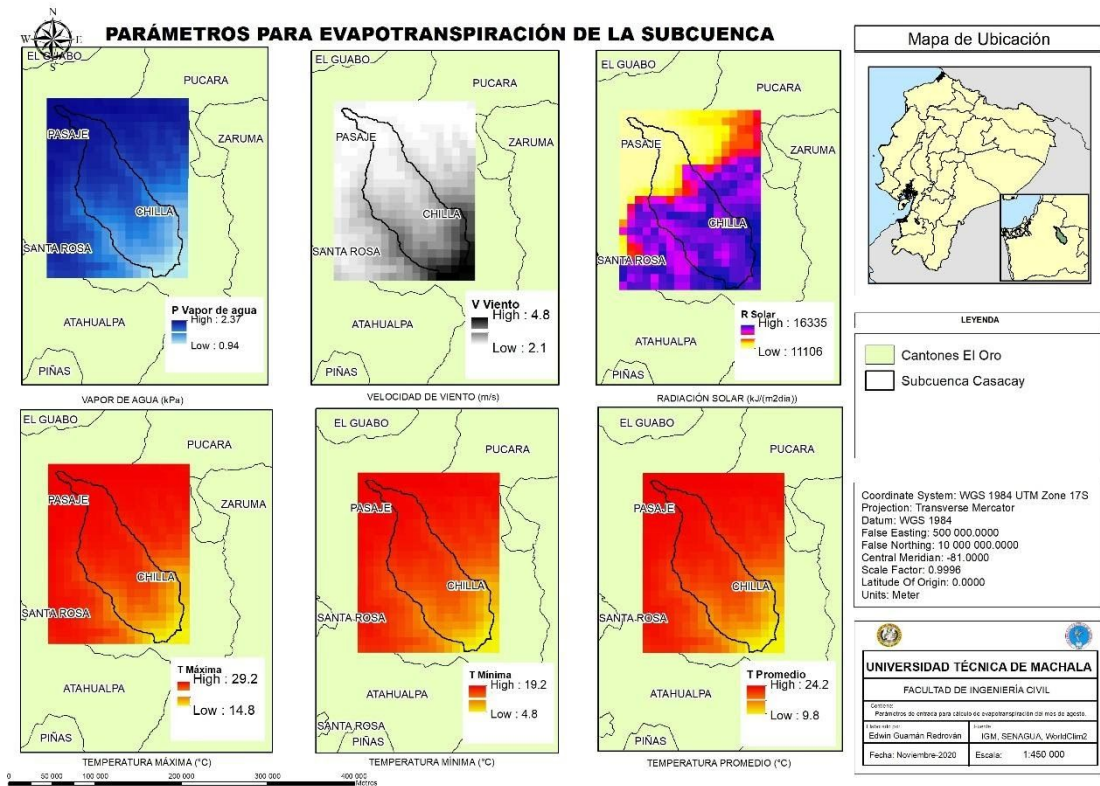




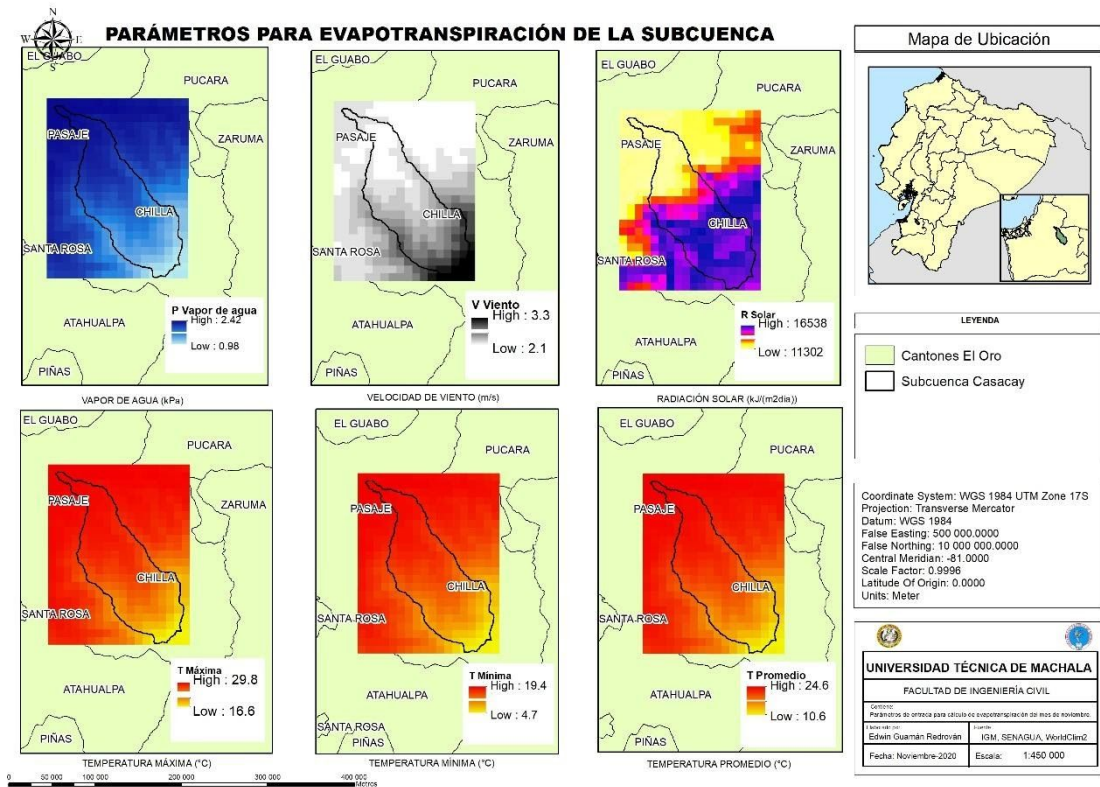
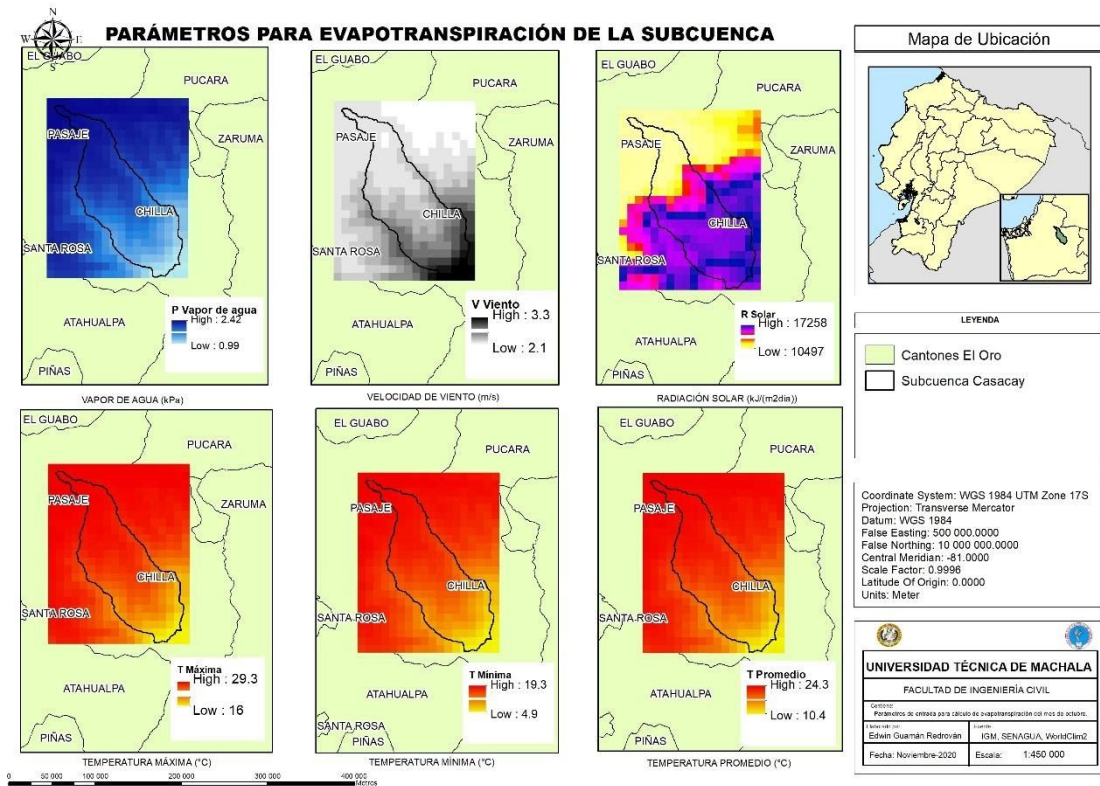




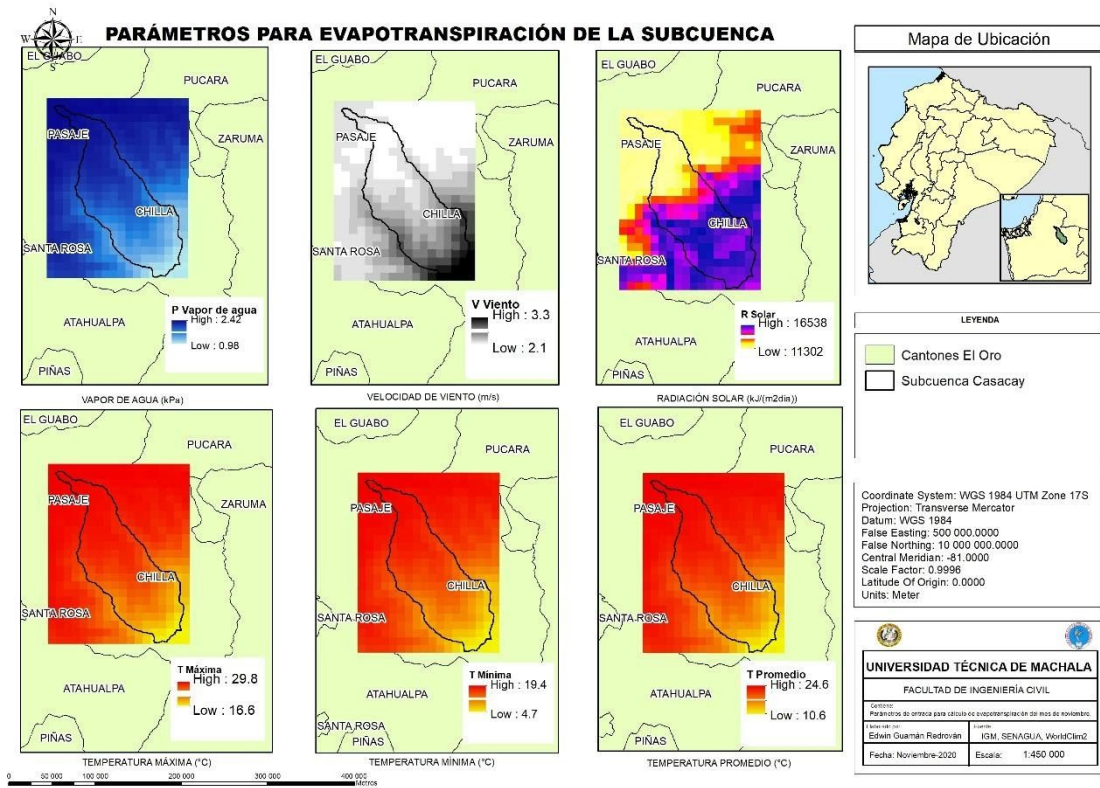












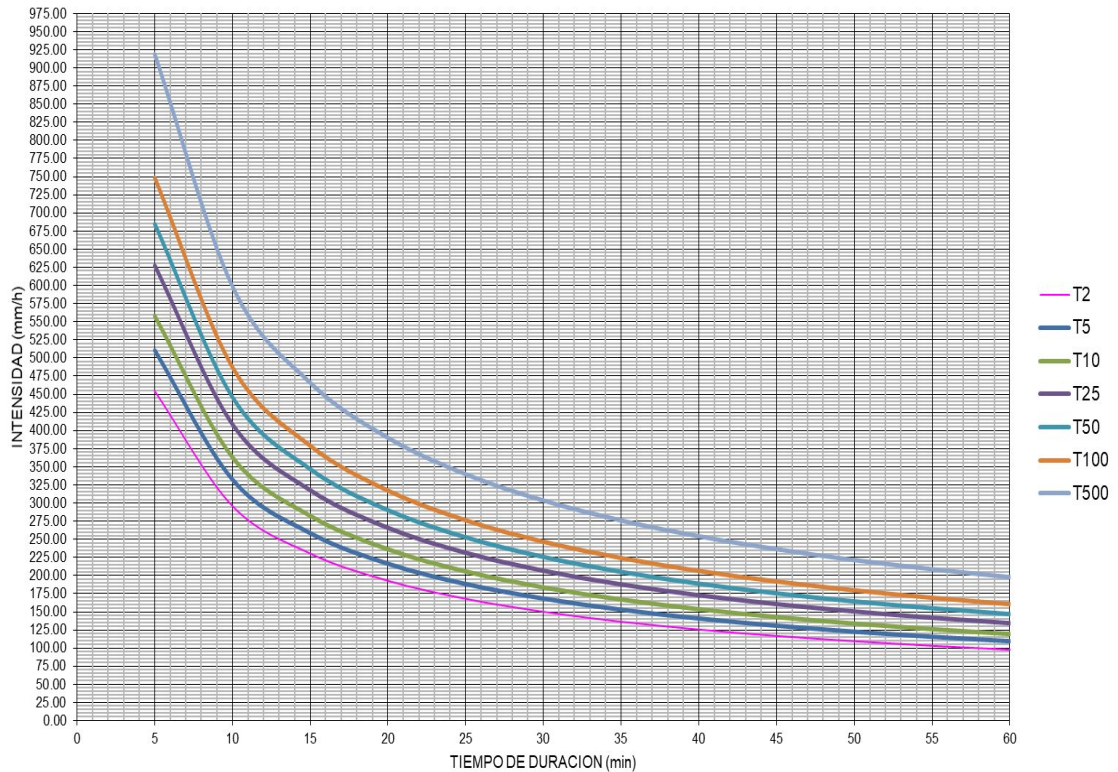
### Anexo 3. Tabla de precipitaciones de anuarios, intensidades y curvas IDF.

DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 Hrs. (mm)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	228.00	210.50	110.20	38.40	42.60	28.30	9.90	30.80	27.00	43.20	21.70	83.90
2010	160.10	293.00	162.00	121.00	48.40	36.40	25.90	27.70	37.50	40.10	33.50	53.10
2011	62.10	233.60	29.10	225.70	24.20	28.90	31.40	47.50	31.50	24.30	23.60	17.50
2012	360.20	191.50	105.00	130.30	24.90	24.70	19.60	29.30	15.70	44.70	25.60	41.30

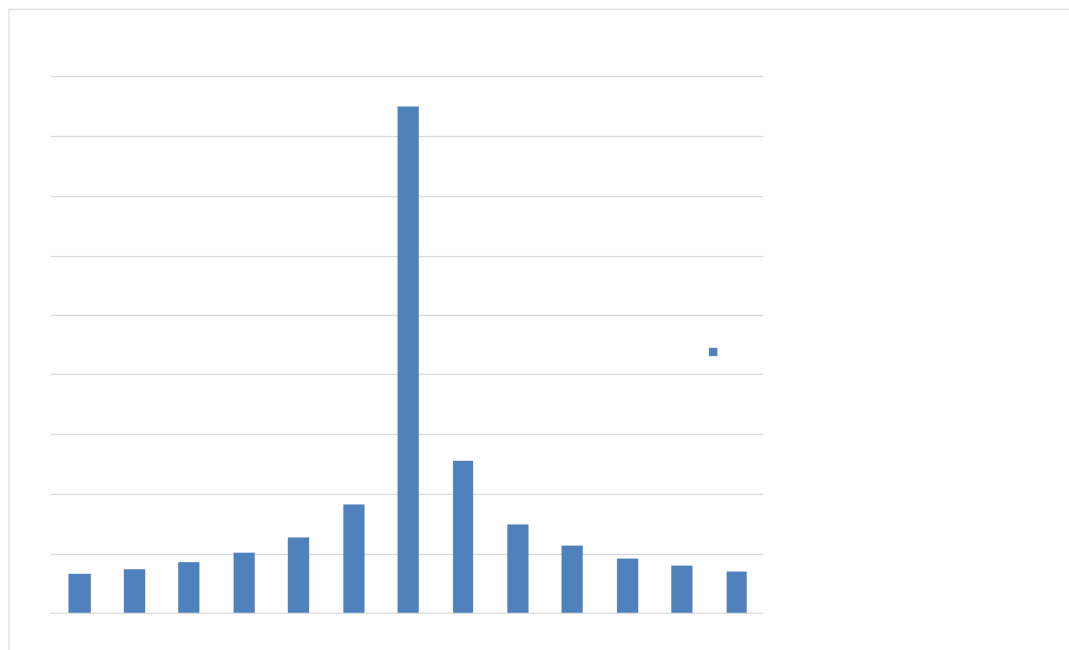
Frecuencia años	Tabla de intensidades - Tiempo de duración											
	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	454.64	296.06	230.36	192.79	167.92	150.01	136.36	125.54	116.72	109.35	103.09	97.68
5	510.93	332.71	258.88	216.66	188.71	168.58	153.24	141.09	131.17	122.89	115.85	109.78
10	558.09	363.42	282.77	236.66	206.13	184.14	167.38	154.11	143.27	134.23	126.54	119.91
25	627.17	408.41	317.78	265.95	231.65	206.93	188.10	173.19	161.01	150.85	142.21	134.75
50	685.06	446.11	347.11	290.50	253.03	226.03	205.47	189.17	175.87	164.77	155.33	147.19
100	748.30	487.28	379.15	317.31	276.39	246.90	224.43	206.63	192.11	179.98	169.67	160.78
500	918.55	598.15	465.41	389.51	339.27	303.07	275.50	253.65	235.81	220.93	208.28	197.36

Curvas IDF de la cuenca



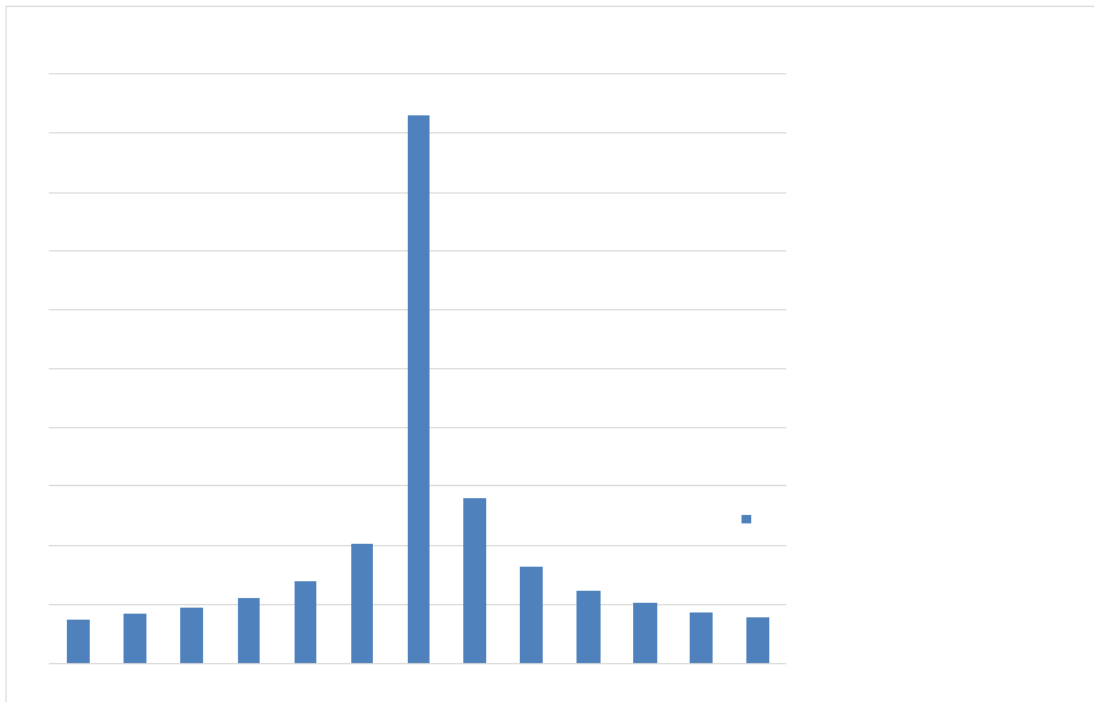
#### Anexo 4. Hietogramas de precipitaciones para períodos de diseño.

HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 5 AÑOS						
Duración de la tormenta (h)	1					
Intesidad de lluvia (mm/h)	104.47					
Precipitación en 24 horas (mm)	104.47					
Intervalos de tiempo (min)	5					
Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	510.93	42.58	42.58	510.93	3.40	40.81
10	332.71	55.45	12.87	154.49	3.79	45.46
15	258.88	64.72	9.27	111.21	4.32	51.82
20	216.66	72.22	7.50	90.00	5.10	61.21
25	188.71	78.63	6.41	76.93	6.41	76.93
30	168.58	84.29	5.66	67.90	9.27	111.21
35	153.24	89.39	5.10	61.21	42.58	510.93
40	141.09	94.06	4.67	56.01	12.87	154.49
45	131.17	98.38	4.32	51.82	7.50	90.00
50	122.89	102.41	4.03	48.37	5.66	67.90
55	115.85	106.20	3.79	45.46	4.67	56.01
60	109.78	109.78	3.58	42.97	4.03	48.37
65	104.47	113.18	3.40	40.81	3.58	42.97



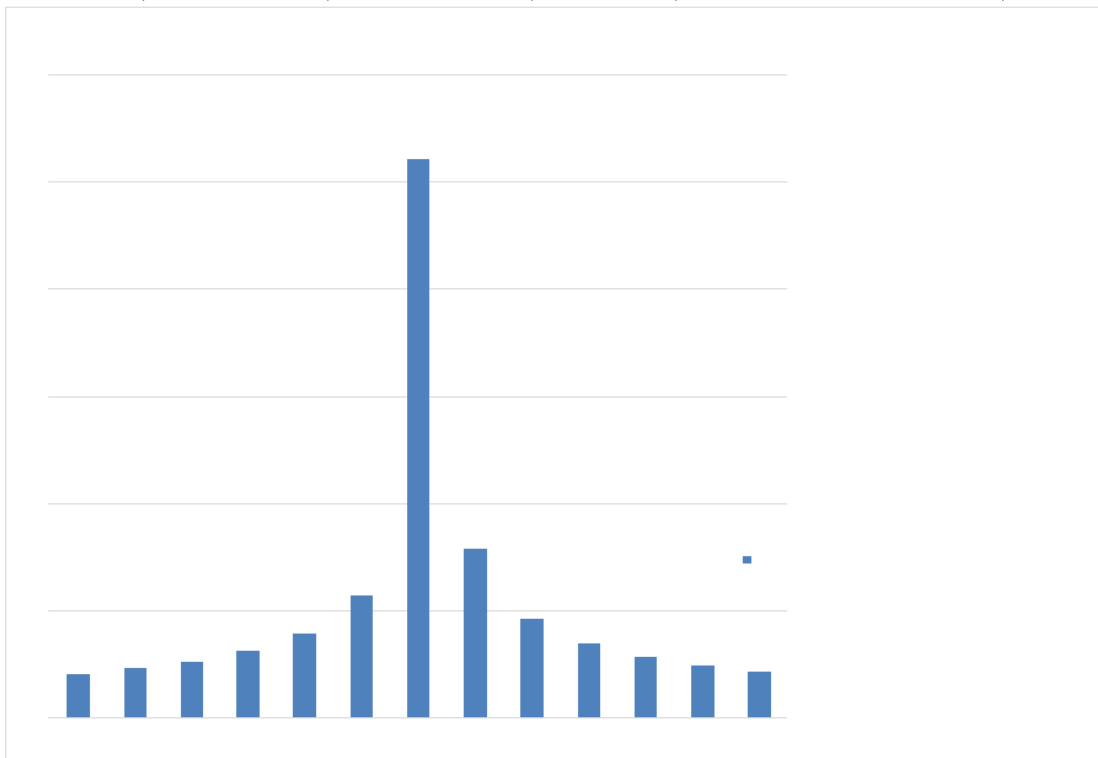
HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 10 AÑOS	
Duración de la tormenta (h)	1
Intensidad de lluvia (mm/h)	114.11
Precipitación en 24 horas (mm)	114.11
Intervalos de tiempo (min)	5

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	558.09	46.51	46.51	558.09	3.71	44.58
10	363.42	60.57	14.06	168.75	4.14	49.66
15	282.77	70.69	10.12	121.47	4.72	56.61
20	236.66	78.89	8.19	98.31	5.57	66.86
25	206.13	85.89	7.00	84.03	7.00	84.03
30	184.14	92.07	6.18	74.17	10.12	121.47
35	167.38	97.64	5.57	66.86	46.51	558.09
40	154.11	102.74	5.10	61.18	14.06	168.75
45	143.27	107.46	4.72	56.61	8.19	98.31
50	134.23	111.86	4.40	52.84	6.18	74.17
55	126.54	116.00	4.14	49.66	5.10	61.18
60	119.91	119.91	3.91	46.94	4.40	52.84
65	114.11	123.62	3.71	44.58	3.91	46.94



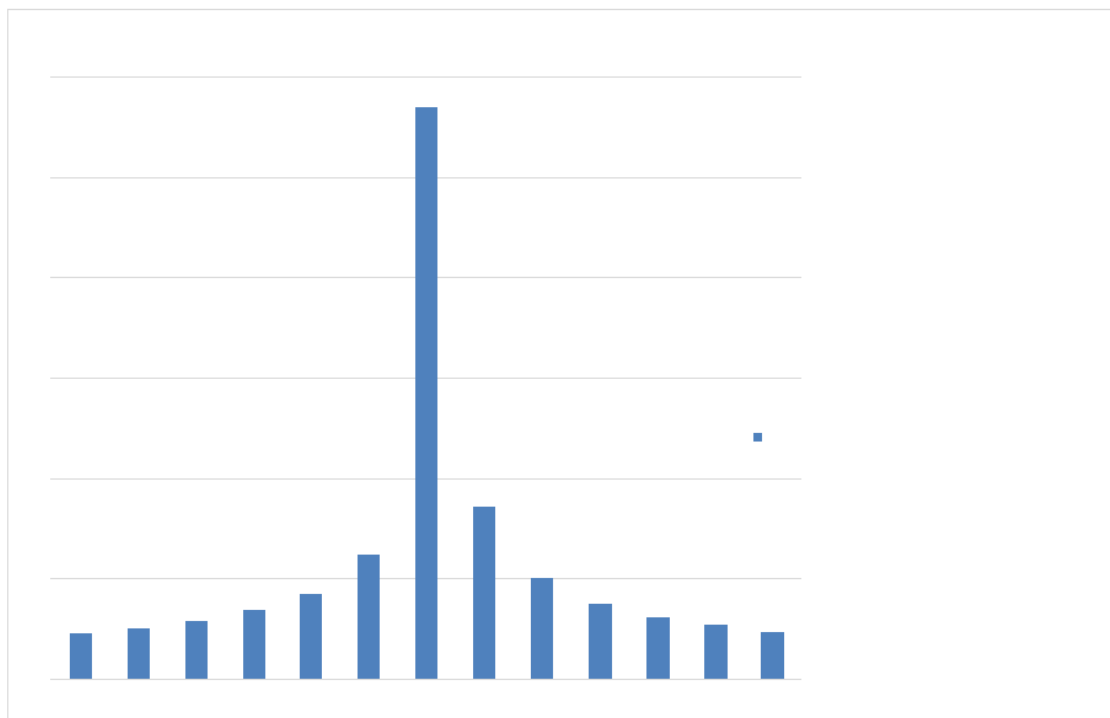
HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 25 AÑOS	
Duración de la tormenta (h)	1
Intesidad de lluvia (mm/h)	128.24
Precipitación en 24 horas (mm)	128.24
Intervalos de tiempo (min)	5

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	627.17	52.26	52.26	627.17	4.17	50.09
10	408.41	68.07	15.80	189.65	4.65	55.81
15	317.78	79.44	11.38	136.51	5.30	63.62
20	265.95	88.65	9.21	110.48	6.26	75.14
25	231.65	96.52	7.87	94.44	7.87	94.44
30	206.93	103.47	6.95	83.35	11.38	136.51
35	188.10	109.73	6.26	75.14	52.26	627.17
40	173.19	115.46	5.73	68.75	15.80	189.65
45	161.01	120.76	5.30	63.62	9.21	110.48
50	150.85	125.71	4.95	59.38	6.95	83.35
55	142.21	130.36	4.65	55.81	5.73	68.75
60	134.75	134.75	4.40	52.75	4.95	59.38
65	128.24	138.93	4.17	50.09	4.40	52.75



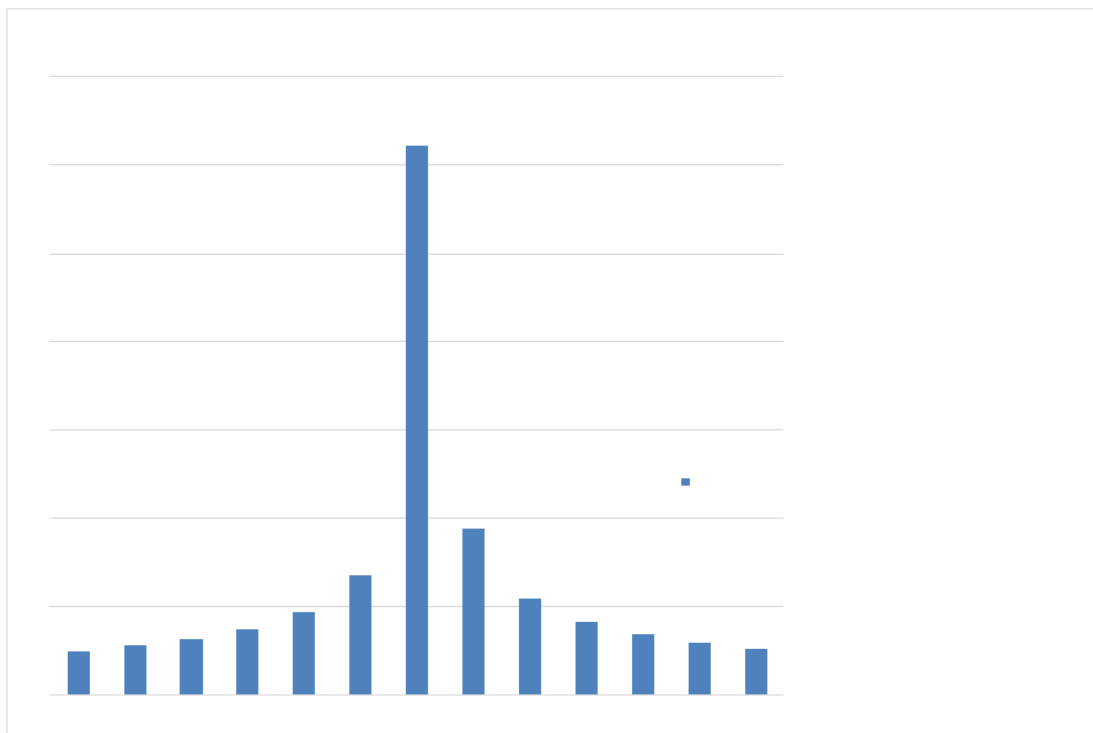
HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 50 AÑOS	
Duración de la tormenta (h)	1
Intensidad de lluvia (mm/h)	140.08
Precipitación en 24 horas (mm)	140.08
Intervalos de tiempo (min)	5

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm/h)
5	685.06	57.09	57.09	685.06	4.56	54.72
10	446.11	74.35	17.26	207.15	5.08	60.96
15	347.11	86.78	12.43	149.11	5.79	69.49
20	290.50	96.83	10.06	120.68	6.84	82.07
25	253.03	105.43	8.60	103.15	8.60	103.15
30	226.03	113.02	7.59	91.05	12.43	149.11
35	205.47	119.86	6.84	82.07	57.09	685.06
40	189.17	126.11	6.26	75.10	17.26	207.15
45	175.87	131.90	5.79	69.49	10.06	120.68
50	164.77	137.31	5.40	64.86	7.59	91.05
55	155.33	142.39	5.08	60.96	6.26	75.10
60	147.19	147.19	4.80	57.62	5.40	64.86
65	140.08	151.75	4.56	54.72	4.80	57.62



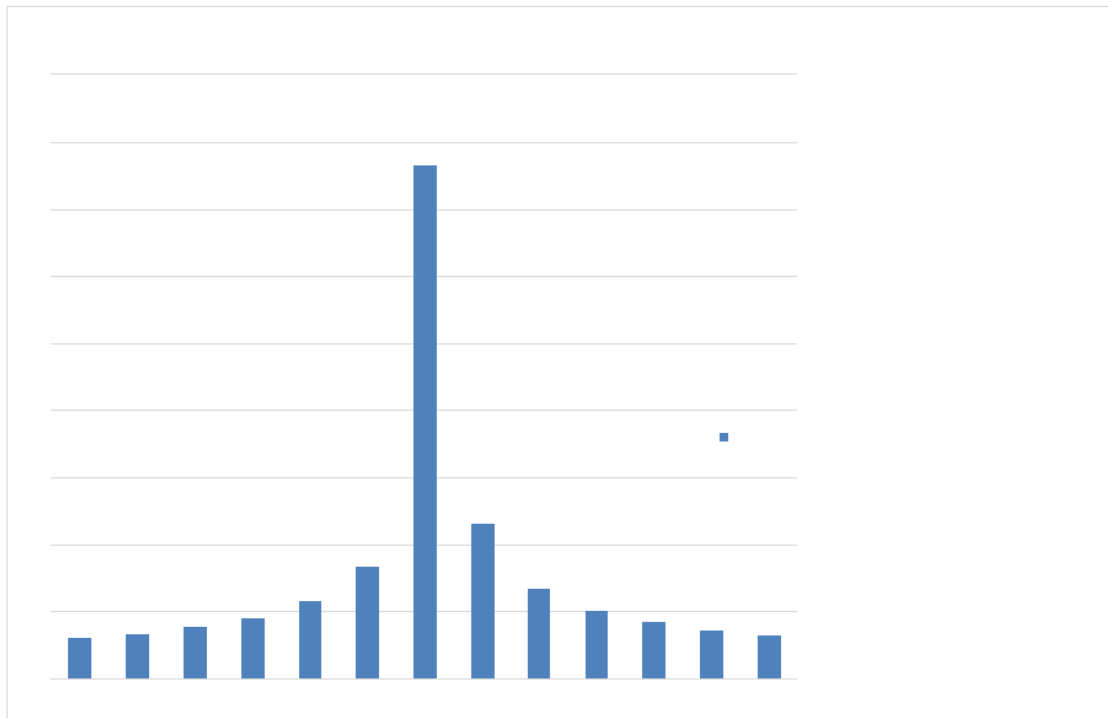
HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 100 AÑOS	
Duración de la tormenta (h)	1
Intensidad de lluvia (mm/h)	153.01
Precipitación en 24 horas (mm)	153.01
Intervalos de tiempo (min)	5

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	748.30	62.36	62.36	748.30	4.98	59.77
10	487.28	81.21	18.86	226.27	5.55	66.58
15	379.15	94.79	13.57	162.87	6.33	75.90
20	317.31	105.77	10.98	131.82	7.47	89.65
25	276.39	115.16	9.39	112.68	9.39	112.68
30	246.90	123.45	8.29	99.45	13.57	162.87
35	224.43	130.92	7.47	89.65	62.36	748.30
40	206.63	137.75	6.84	82.03	18.86	226.27
45	192.11	144.08	6.33	75.90	10.98	131.82
50	179.98	149.98	5.90	70.84	8.29	99.45
55	169.67	155.53	5.55	66.58	6.84	82.03
60	160.78	160.78	5.24	62.94	5.90	70.84
65	153.01	165.76	4.98	59.77	5.24	62.94



HIETOGRAMA PARA PERIODO RETORNO 500 AÑOS	
Duración de la tormenta (h)	1
Intesidad de lluvia (mm/h)	187.82
Precipitación en 24 horas (mm)	187.82
Intervalos de tiempo (min)	5

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	918.55	76.55	76.55	918.55	6.11	73.37
10	598.15	99.69	23.15	277.75	6.81	81.73
15	465.41	116.35	16.66	199.93	7.76	93.17
20	389.51	129.84	13.48	161.81	9.17	110.04
25	339.27	141.36	11.53	138.31	11.53	138.31
30	303.07	151.54	10.17	122.08	16.66	199.93
35	275.50	160.71	9.17	110.04	76.55	918.55
40	253.65	169.10	8.39	100.69	23.15	277.75
45	235.81	176.86	7.76	93.17	13.48	161.81
50	220.93	184.11	7.25	86.96	10.17	122.08
55	208.28	190.92	6.81	81.73	8.39	100.69
60	197.36	197.36	6.44	77.25	7.25	86.96
65	187.82	203.47	6.11	73.37	6.44	77.25





## Anexo 5. Datos ingresando para evapotranspiración.

Welcome

### ETo calculator

ETo

Data and ETo menu

Station: SAROS WORLDCLIM Country: File: CASACAY.DTA

Input data description | Meteorological data and ETo | Plot data | Export results

**Air temperature**

Mean temperature [°C]

Minimum and Maximum temperature [°C]

**Air humidity**

Mean Relative Humidity [%]

Minimum and Maximum Relative Humidity [%]

Mean dew point temperature [°C]

Mean actual vapour pressure [kPa]

**Psychrometric data**

Mean dry and wet bulb temperature [°C]

Ventilated Coefficient psychrometer

Natural ventilated 0.000800

Indoors

**IF missing air humidity**

Tdew = Tmin + subtract 0.0 [°C] (sub)humid

**Wind speed**

Mean wind speed [m/sec]

height of measurement 2.0 [meter]

**IF missing wind speed**

U2 = 2.0 m/sec... light to moderate wind

**Sunshine and Radiation**

Hours of bright sunshine (n) [hours]

Relative sunshine hours (n/N) [-]

Solar radiation (Rs) [MJ/m2.day]

Net radiation (Ra) [MJ/m2.day]

Coefficients Angstrom equation

**IF missing radiation**

Rs = 0.16 x SQRT((Tmax - Tmin) x Ra)

Welcome

### ETo calculator

ETo

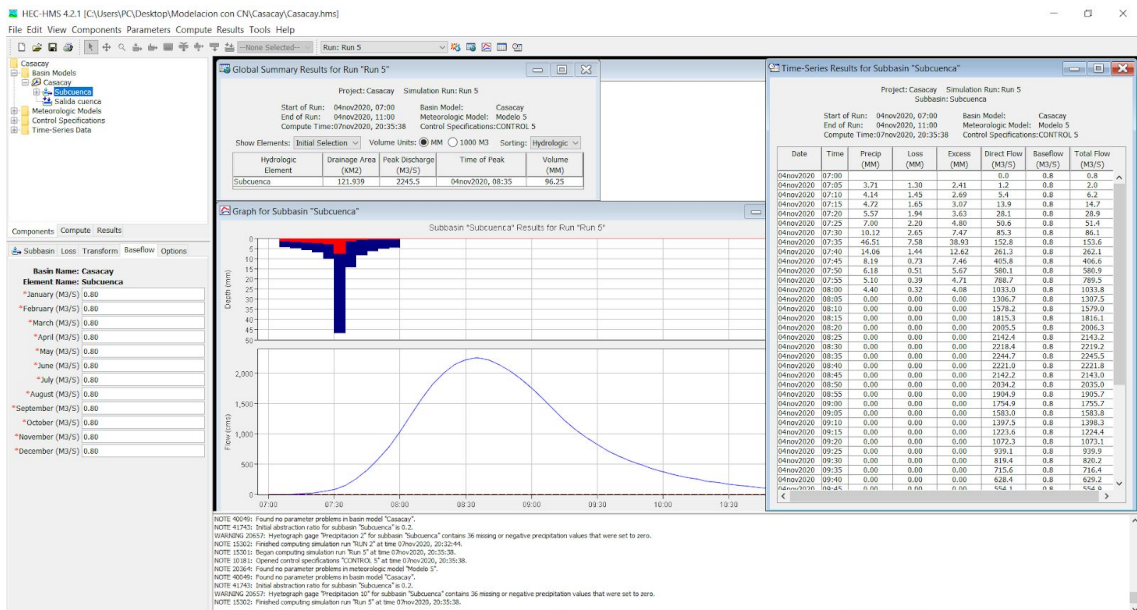
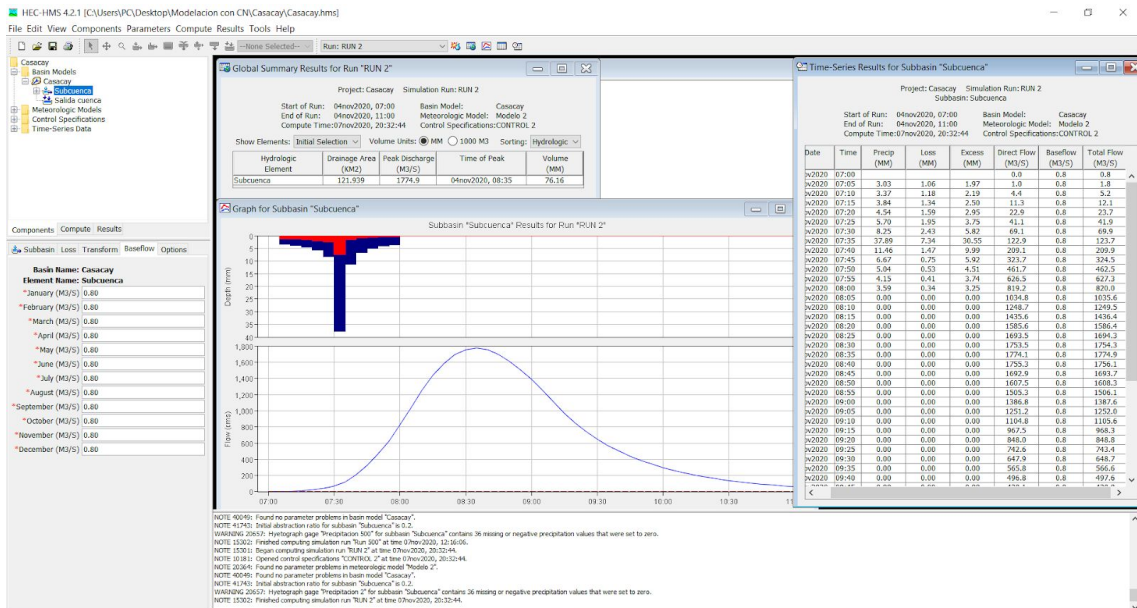
Data and ETo menu

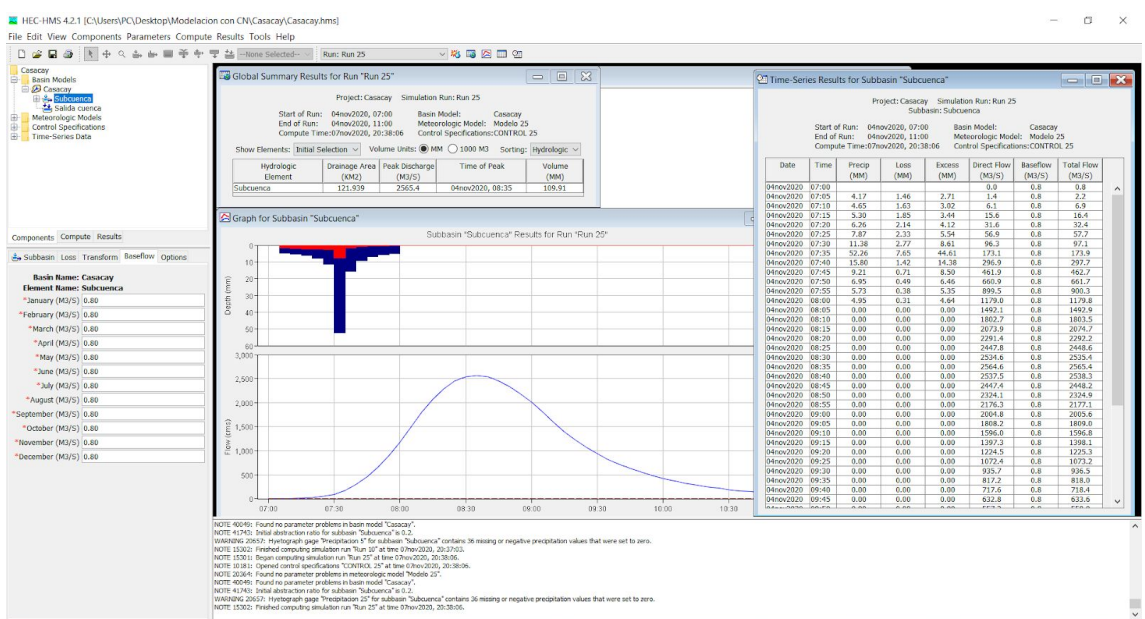
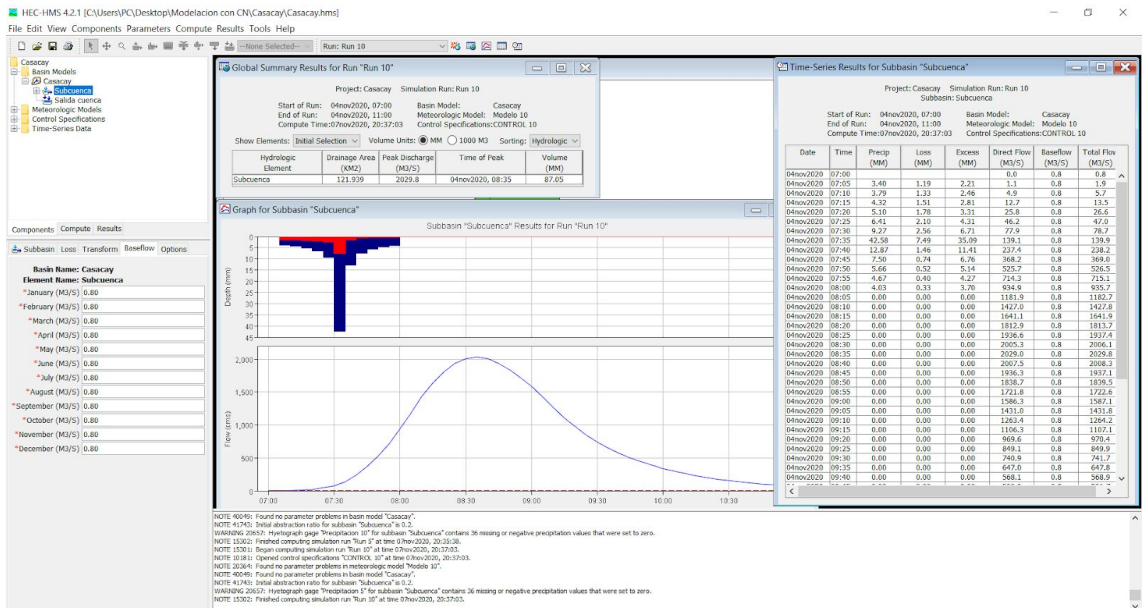
Station: SAROS WORLDCLIM Country: File: CASACAY.DTA

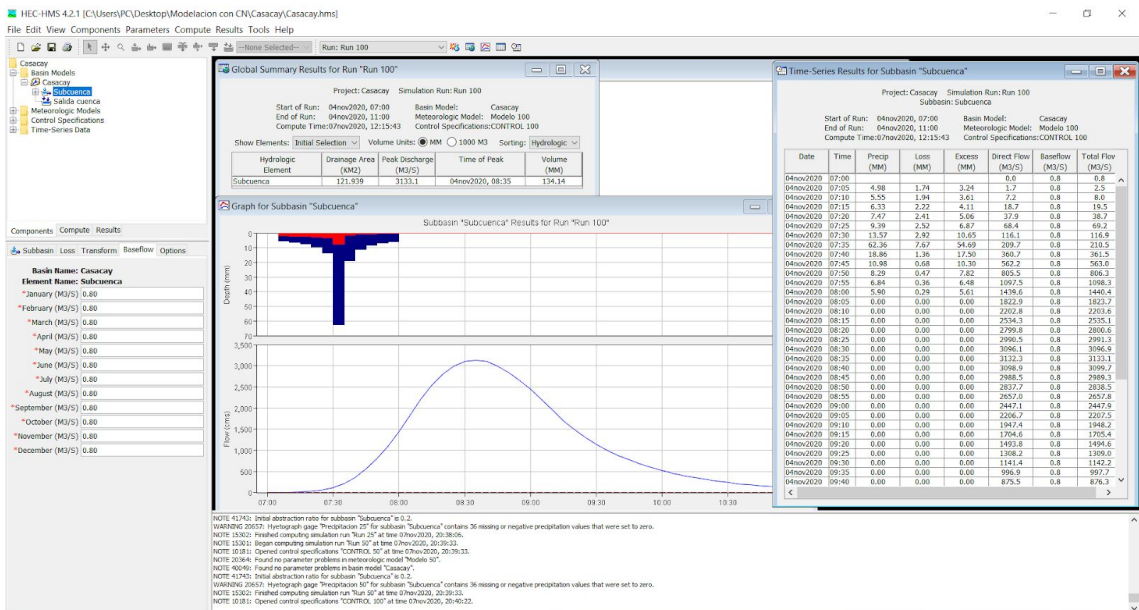
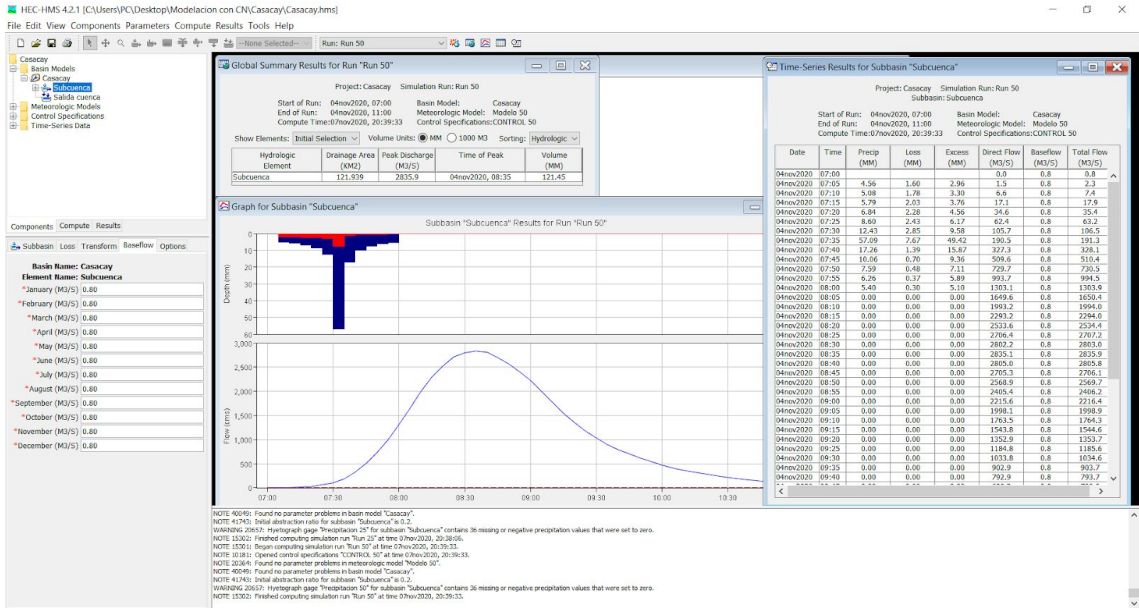
Input data description | Meteorological data and ETo | Plot data | Export results

Month	January	February	March	April	May	June	July
Tmax °C	30.9	31.2	31.6	31.8	30.9	29.7	29.3
Tmean °C	26.0	26.4	26.6	26.7	26.0	24.9	24.5
Tmin °C	21.1	21.5	21.7	21.6	21.1	20.0	19.8
e(act) kPa	2.6300	2.6900	2.7400	2.7100	2.6300	2.5000	2.4000
u(z) m/sec	3.40	2.90	2.80	3.10	3.60	4.40	5.00
Rs MJ/m2.day	15.50	16.50	16.41	16.64	14.95	14.31	15.02
ETo mm/day	3.7	3.9	4.1	4.4	4.1	4.0	4.3

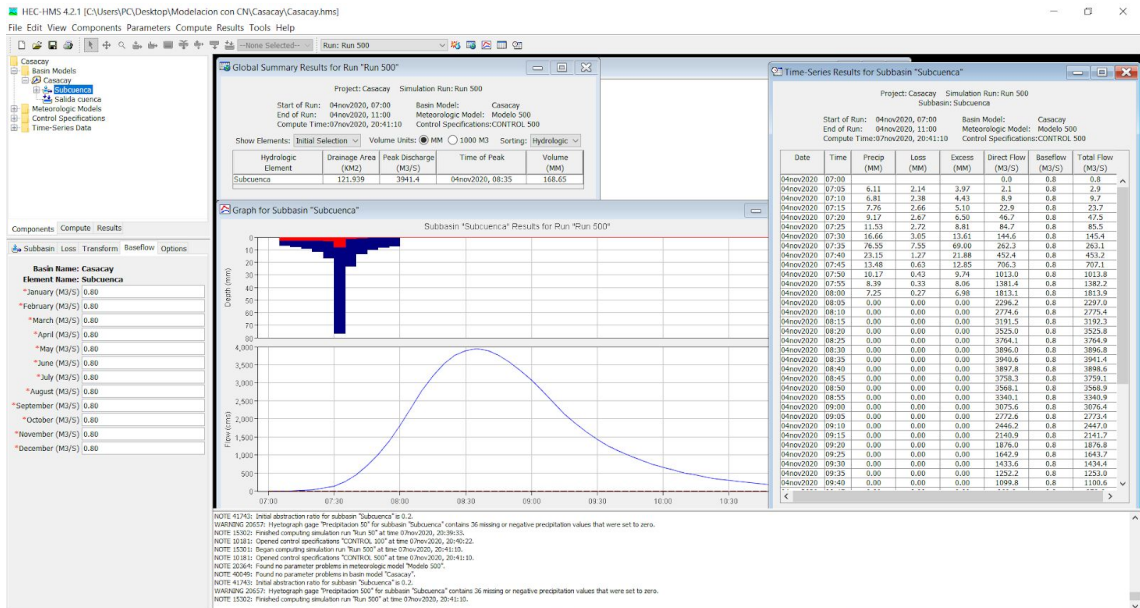
# Anexo 6. Modelación hidrológica y caudal máximo para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de períodos de retorno con HEC-HMS.



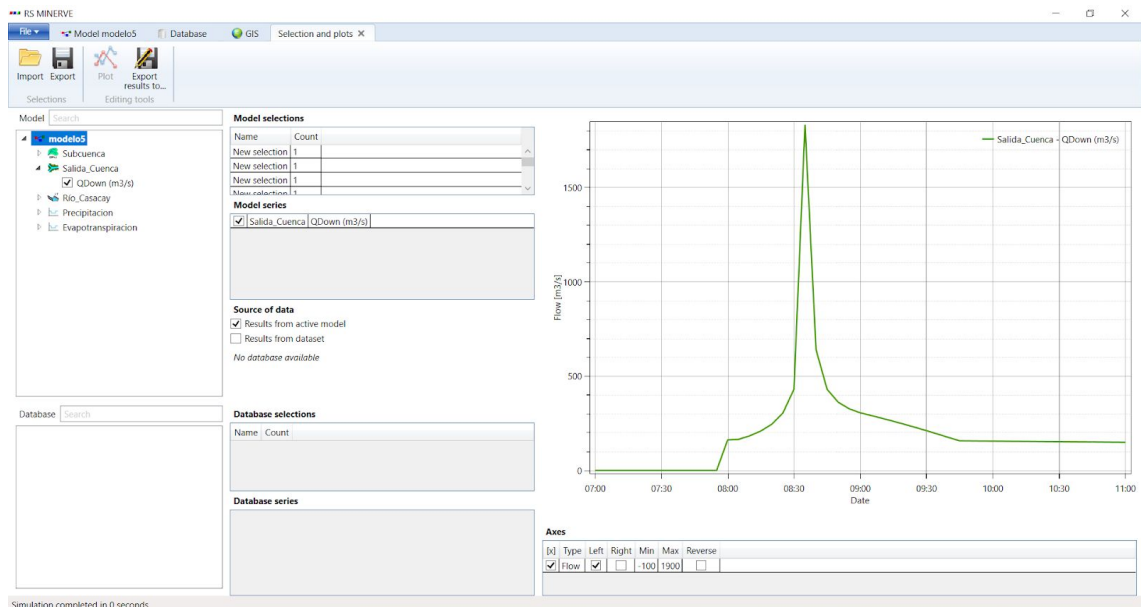
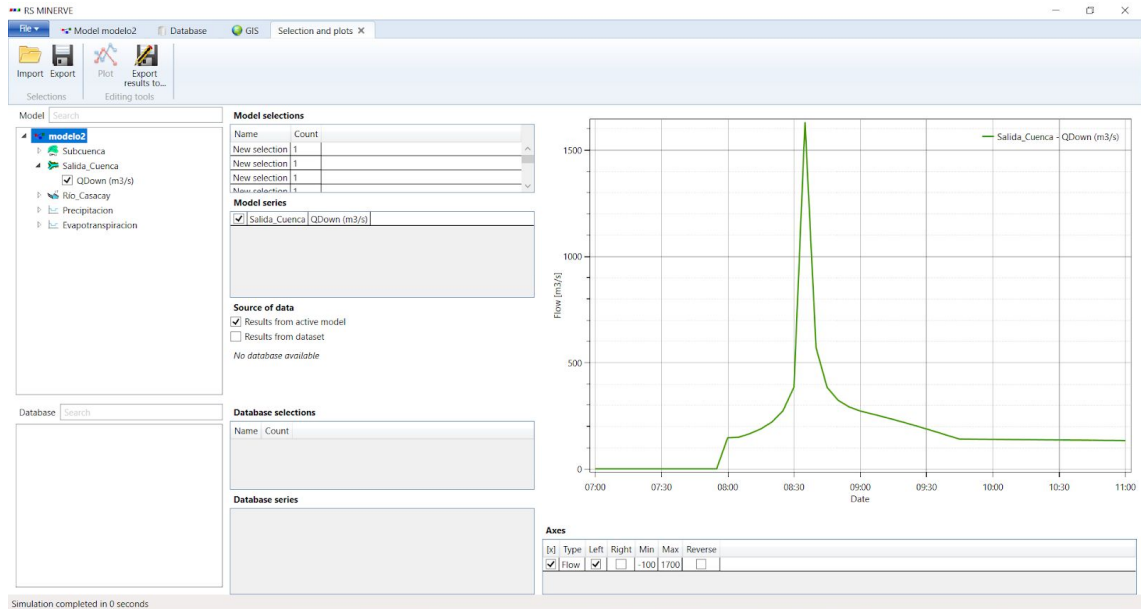


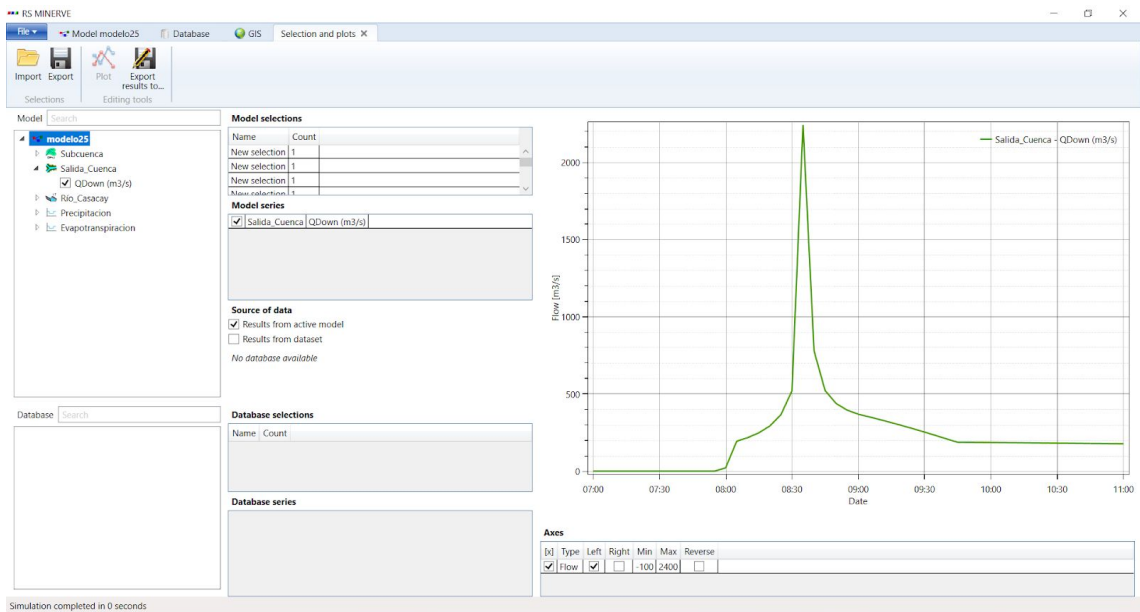
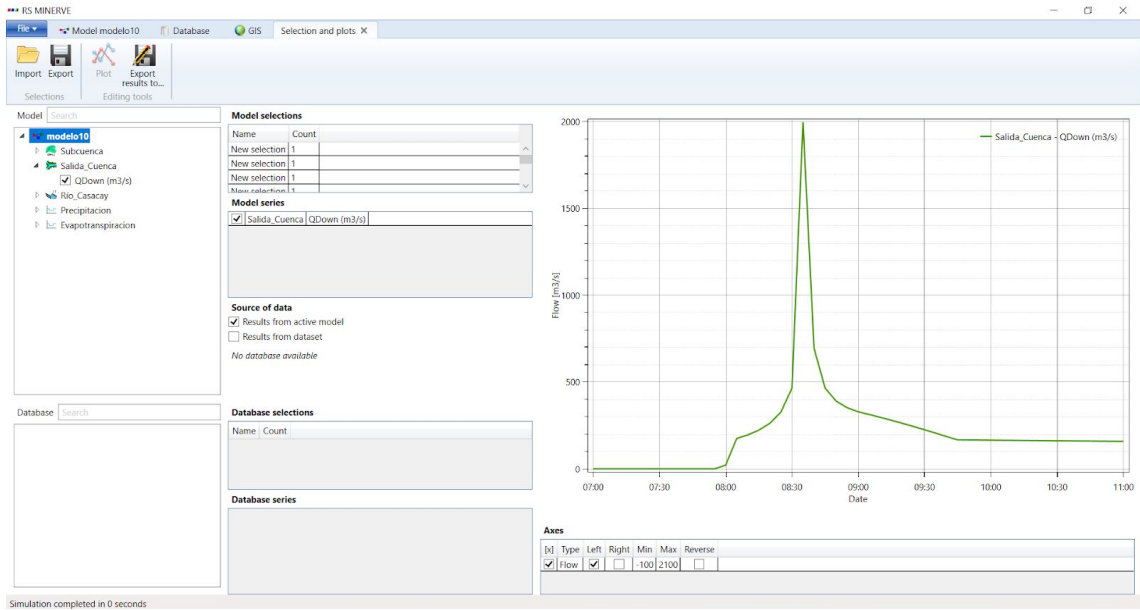


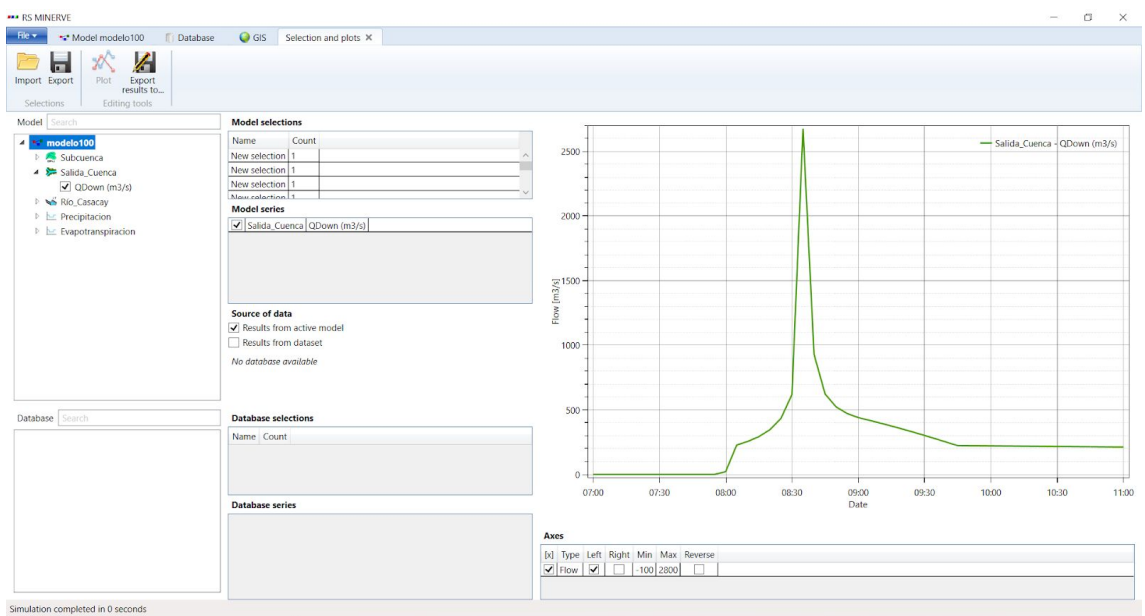
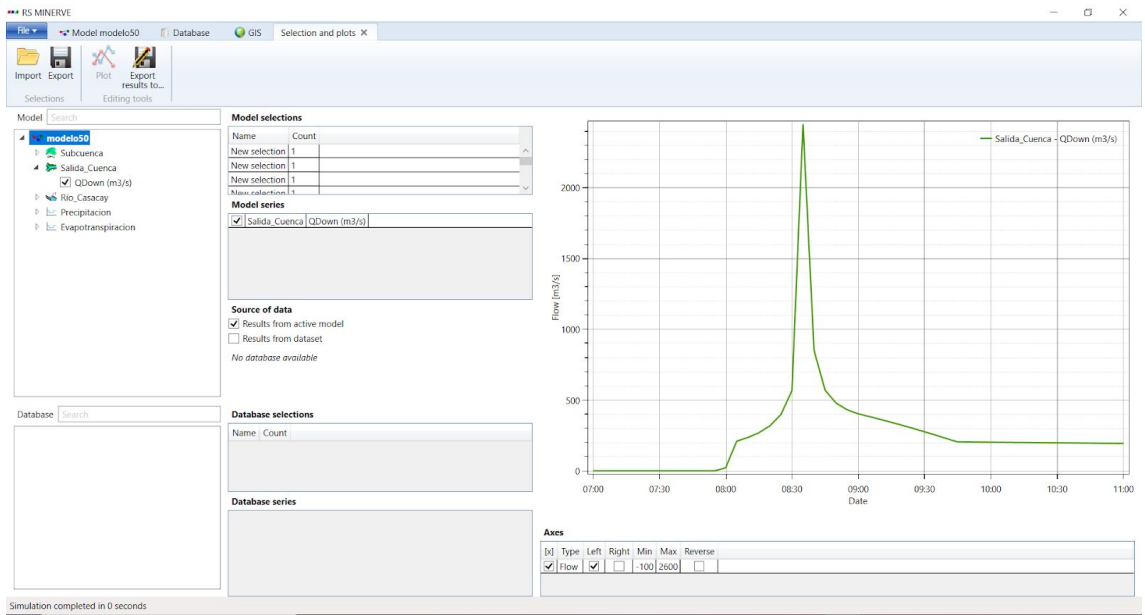




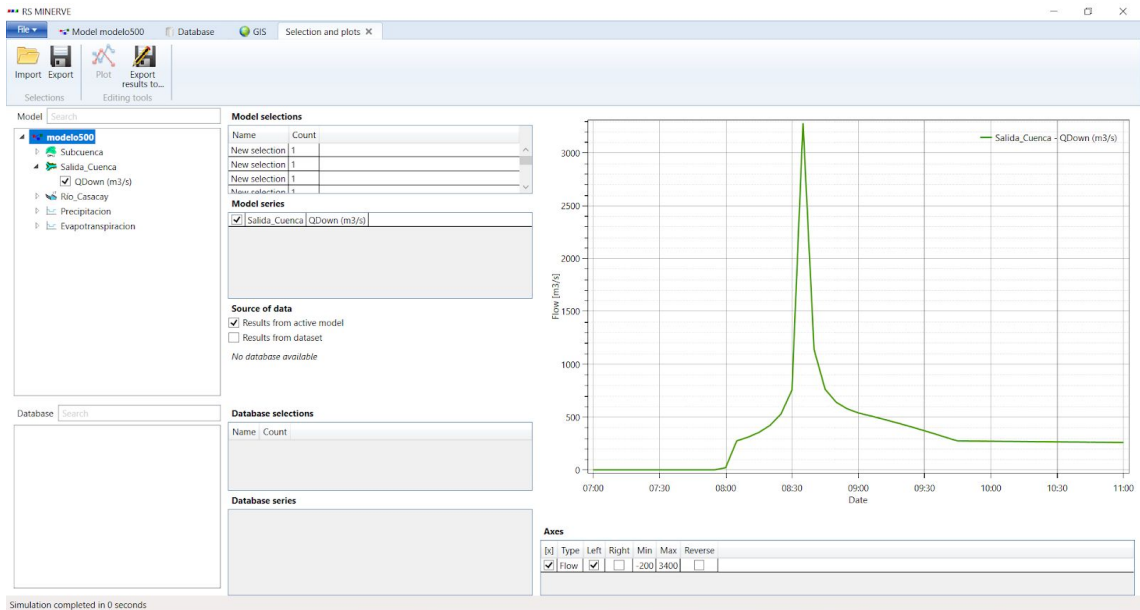
## Anexo 7. Modelación hidrológica y caudal máximo para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de períodos de retorno con RS-MINERVE.











## Anexo 8. Datos y resultados de SPSS de la correlación y T de student.

Analisis estadistico.sav [ConjuntoDatos1] - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

Visible: 2 de 2 variables

	Hec_HM	RS_MINE																
1	1774.900	1631.800																
2	2245.500	1832.600																
3	2029.800	1996.590																
4	2565.400	2242.770																
5	2835.900	2449.150																
6	3133.100	2674.670																
7	3941.400	3282.170																
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		

Vista de datos Vista de variables

IBM SPSS Statistics Processor está listo Unicode:ON

\*Resultado1 [Documento1] - IBM SPSS Statistics Visor

Archivo Editar Ver Datos Transformar Insertar Formato Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

Resultado

- Registro
- Explorar
  - Título
  - Notas
  - Conjunto de datos activo
  - Resumen de procesam
  - Descriptivos
  - Pruebas de normalidad
    - Caudal máximo Hec
    - Caudal máximo Rs
  - Gráfico de tallo y hoj
  - Gráfico Q-Q normal
  - Diagrama de caja
- Prueba T
  - Título
  - Notas
  - Estadísticas de muestra
  - Correlaciones de muest
  - Prueba de muestras em

/NOTOTAL.

Explorar

[ConjuntoDatos1] C:\Users\PC\Desktop\Río Casacay\Análisis estadístico.sav

Resumen de procesamiento de casos

	Válidos		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Caudal máximo Hec	7	100.0%	0	0.0%	7	100.0%
Caudal máximo Rs	7	100.0%	0	0.0%	7	100.0%

Descriptivos

	Estadístico	Desv. Error
Caudal máximo Hec	Media	2646.57143
	95% de intervalo de confianza para la media	
	Límite inferior	1965.19151
	Límite superior	3327.95134
	Media recortada al 5%	2623.06270
	Mediana	2565.40000
	Varianza	542800.259
	Desv. Desviación	736.749794
	Mínimo	1774.900
	Máximo	3941.400
	Rango	2166.500
	Rango intercuartil	1103.300
	Asimetría	.777
	Curtosis	.328
Caudal máximo Rs	Media	2301.39286
	95% de intervalo de confianza para la media	
	Límite inferior	1782.66038
	Límite superior	2820.12533

IBM SPSS Statistics Processor está listo Unicode:ON H: 177. W: 572 pt.

