



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL SISTEMA PAUTE -MAZAR (ECUADOR).

Trabajo realizado por:

Adrián Barea Palomo

Dirigido:

Manuel del Jesús Peñil

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, septiembre de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL SISTEMA PAUTE – MAZAR (ECUADOR)

Adrián Barea Palomo

Director: Manuel del Jesús Peñil

PALABRAS CLAVE: Geoestadística, Cambio climático, kriging, ArcGIS, HEC-HMS, Representative Concentration Pathway RCP, Paute, Ecuador, precipitación, temperatura.

INTRODUCCIÓN

Objetivos:

Los objetivos principales de este proyecto son los siguientes:

- Generación de series temporales de precipitación y temperatura, distribuidas espacialmente sobre la cuenca de estudio a partir de técnicas geoestadísticas (kriging).
- Generar los mapas de calor para representar la variación de la precipitación y temperatura en la cuenca del Paute en Ecuador.
- Modelado hidrológico de la cuenca del río Paute, mediante la calibración y validación de los parámetros del modelo.
- Generación de series temporales de caudales, sólidos en suspensión y sólidos transportados para los escenarios futuros, y para cada ruta de concentración representativa (Representative Concentration Pathway, RCP).
- Comparativa de los resultados de caudales y sedimentos futuros con el periodo base (1981 - 2010).

Datos de partida:

- Datos de las estaciones pluviométricas y termométricas facilitadas por INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador).
- Series de caudales diarios.

Área de estudio:

El estudio se centra en la cuenca hidrológica de río Paute, en Ecuador. Esta se encuentra en la región austral de Ecuador, específicamente en los Andes Centro Sur. Su superficie es aproximadamente de 5.000 km². Recorre las provincias del Azuay, Cañar y Chimborazo.

Sistema hidroeléctrico:

Debido a la fuerte pendiente en la cuenca, en este río se construyó el Complejo Hidroeléctrico Paute, siendo la Represa de Paute - Mazar la mayor productora del complejo. Además, existen otras instalaciones que han sido objeto de este estudio como se indica a continuación:

- Presa y central Mazar
- Presa Daniel Palacios
- Presa y central Cardenillos
- Central Paute Sopladora
- Central Paute Molino
- Casa de máquinas Dudas
- Casa de máquinas Alazán
- Casa de máquinas San Antonio

METODOLOGÍA

Preparación del MDT:

Para el modelado hidrológico es primordial delimitar la cuenca y subcuencas utilizando como dato de partida un modelo digital del terreno (MDT).

El MDT se puede obtener a partir de datos LIDAR (Light Detection and Ranging). El LIDAR es una técnica que se utiliza para obtener una muestra de superficie terrestre

produciendo mediciones exactas de coordenadas x, y, z.

Con este MDT (en nuestro caso, con una resolución de 30 metros) se modeliza la cuenca y subcuencas mediante la herramienta ArcGIS, posibilitando así la administración, visualización y análisis de dichos puntos generados en el MDT.

Caracterización de las dinámicas climáticas:

Para la realización de un estudio hidrológico es necesario contar con las variables climáticas que definen el comportamiento hidrológico de una cuenca. En este estudio, se consideran tanto la precipitación como la temperatura como datos de partida para la definición de la cuenca.

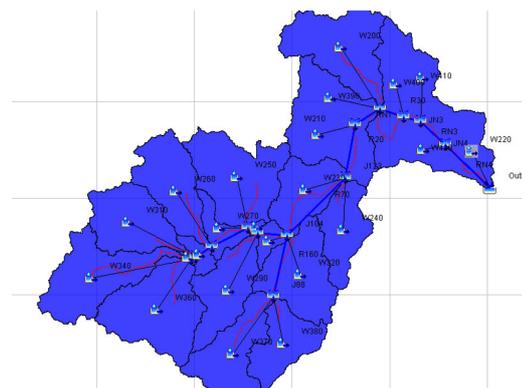
Debido a la escasa información pluviométrica y termométrica, se realiza una interpolación geoestadística mediante la técnica de Kriging.

Modelado hidrológico:

El modelado hidrológico se lleva a cabo mediante el modelo HEC-HMS de la US Army Corps of Engineers.

Este modelo utiliza métodos de precipitación - escorrentía para estimar los hidrogramas generados por las precipitaciones en una cuenca durante un período de tiempo determinado.

Además de los dos principales inputs (series de precipitación y temperatura) el programa requiere datos de evapotranspiración, sedimentos, curvas granulométricas y series de caudales observados (para calibración y validación del modelo).



CONCLUSIONES

Para caracterizar adecuadamente el clima de una zona, es necesario tener series de datos climáticos largas y cierta densidad de estaciones meteorológicas distribuidas por el territorio. Series cortas y escaso número de estaciones impiden realizar estudios precisos.

Partiendo de dichas series de datos, y mediante la herramienta de interpolación kriging, se consigue plasmar de una manera visual la variabilidad de la cuenca mediante mapas de calor o Heat Maps.

Estos datos obtenidos mediante kriging, son el punto de partida para la caracterización hidrológica de la cuenca, modelizada mediante HEC-HMS, obteniendo así las series de caudales y sedimentos en las instalaciones hidroeléctricas.

Después de la realización de este estudio, se puede concluir que el buen funcionamiento de las casas de máquinas y centrales de la cuenca (nivel mínimo de operación de las centrales) estaría asegurado puesto que se prevé un aumento en los caudales a su paso por las mismas. Por otro lado, el incremento de los caudales proyectados da lugar a un incremento significativo del flujo de sedimentos y sólidos en suspensión, debido principalmente al incremento de la velocidad de flujo del cauce principal. Será por ello vital el estudio de los problemas que pueda causar este incremento de sólidos en las inmediaciones del sistema hidroeléctrico.

REFERENCIAS

- Análisis de la vulnerabilidad de las centrales hidroeléctricas priorizadas ante los efectos del cambio climático, 2016. IH Cantabria.
- Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning, 1986. United States Department of Agriculture.
- Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India, 2015. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering.
- Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 1997. United States Department of Agriculture.
- La ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Universitat Politècnica de Valencia.
- HEC-geoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual, 2013. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1, 2007. Universidad de Granada.
- Manual de utilización del programa HEC-HMS. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el Modelo WEAP, 2009. Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. Guía Metodológica. Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
- Willian, Caballero Guardo (2011). Kriging Universal para Datos Funcionales. Tesis doctoral.
- Mapa interactivo ambiental de Ecuador: <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal>
- GIS Geography: <http://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>
- Kriging para Python: <http://pykriging.com/>
- Complejo hidroeléctrico Paute Integral: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/ley-de-transparencia/11-espanol/perfil-corporativo/127-paute-integral.html>
- La cuenca del río paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. Políticas de desarrollo agropecuario. https://www.researchgate.net/profile/Mario_Donosoz/publication/278009785_La_cuenca_del_río_Paute_diagnostico_y_propuesta_de_manejo_integral_Políticas_de_desarrollo_agropecuario/links/57801d6d08ae69ab88241941/La-cuenca-del-río-Paute-diagnostico-y-propuesta-de-manejo-integral-Políticas-de-desarrollo-agropecuario.pdf

ANALYSIS OF THE VULNERABILITY TO CLIMATE CHANGE OF THE HYDROELECTRIC POWER PLANTS WITHIN THE PAUTE – MAZAR SYSTEM (ECUADOR)

Adrián Barea Palomo

Director: Manuel del Jesús Peñil

KEY WORDS: Geostatistic, Climate Change, kriging, ArcGIS, HEC-HMS, Representative Concentration Pathways RCP, Paute, Ecuador, precipitation, temperature.

INTRODUCCIÓN

Objectives:

The main objectives of this Project are as follows:

- Generation of the temporal series of precipitation and temperature, spatially distributed within the basin subject of study, through geostatistic analysis (kriging).
- To develop Heat Maps to represent the variation of the precipitation and temperature in the Paute basin, Ecuador.
- Hydrologic modelling of the Paute river basin, through the calibration and validation of the parameters in the hydraulic model.
- Developing the temporal series of water flow, suspension sediments and sediments flow, for every foresee scenario and each one of the Representative Concentration Pathways (RCP).
- Comparative between the foresee results and the results in the base period (1981 – 2010).

Input data

- Pluviometry and thermometry data, developed by INAMHI (National Institute of Meteorology and Hydrology of Ecuador).
- Daily series of flows in the basin.

Study area:

This study is developed in the hydrologic basin of the Paute river. This basin is in Ecuador, in the austral region of the country, specifically in the Southern part of the Andes. Its overall area is up to 5.000 km². It runs through the Azuay, Cañar and Chimborazo regions.

Hydroelectric System:

Due to the strong slopes in this river, the Hydroelectric Complex of Paute was developed, with the Paute – Mazar dam being the largest one. There are also some other facilities in this complex, which are the following:

- Mazar dam and hydroelectric power plant.
- Daniel Palacios dam.
- Cardenillos dam and hydroelectric power plant
- Paute Sopladora hydroelectric power plant.
- Paute Molino hydroelectric power plant.
- Dudas powerhouse.
- Alazán powerhouse.
- San Antonio powerhouse.

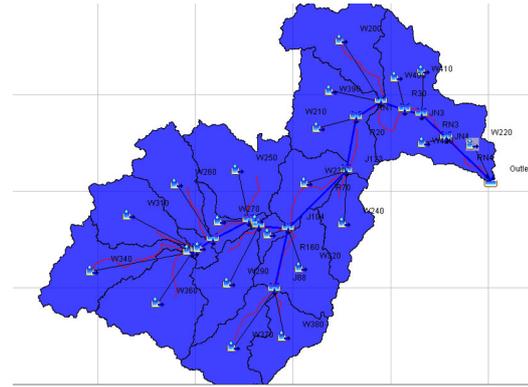
METODOLOGY

Preparation of the DTM:

To develop the hydrologic modelling, the first task is to mark the area of the basin and sub-basins using as the input, a digital terrain model (DTM).

This DTM can be obtained from LIDAR data (Light Detection and Ranging). LIDAR is a technique used to obtain a sample of the earth's surface, producing exact measurements of x, y, and z coordinates.

With the DTM (a 30-meter resolution in our case) the basin is modeled with the ArcGIS tool, which makes possible to administrate, visualize and analyse the coordinates generated in the DTM.



Picture 3 Basin, sub-basins and drainage system.

Climatic dynamics characterization:

To develop a hydrological study, it is necessary to count on the climatic variables that define the hydrologic behaviour within the basin. In this study, both precipitation and temperature are considered as input data to the basin definition.

Due to the few available pluviometric and thermometric information, a geostatistic interpolation is carried out with the kriging technique.

Hydrologic modelling:

The hydrologic modelling is developed by the HEC-HMS model of the US Army Corps of Engineers.

This model uses runoff – precipitation methods to estimate the hydrographs generated by the precipitations in the basin within a certain period.

The program not only requires precipitation and temperature series of data, but also evapotranspiration, sediments, granulometric graphs and flow series (to calibrate and validate the model).

RESULTS

In the reference period (1981 – 2010), we observe average flows in the hydroelectric facilities of around 80 m³/s in the Mazar and Cardenillo dams and hydroelectric power plants, and 60m³/s in the Daniel Palacios dam. In these reference points, the water flow increments for the RCP 4.5 and 6.0, reaching its highest value in the long-term reference period (2071 – 2100), with peaks of around 26% higher than the reference period.

In the Sopladora and Paute – Molino hydroelectric power plants, water flows for the reference period are around 70 m³/s, and they get peaks 27% higher than the reference period in the long-term period (2071 – 2100).

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presas y central Mazar	80.328	2.705	1860.500
Presas Daniel Palacios	62.063	4.235	1071.600
Presas y central Cardenillo	80.682	5.506	1125.180
Central Paute Sopladora	72.614	4.955	1102.676
Central Paute Molino	72.614	4.955	1102.676
Casa de máquinas Dudas	5.706	0.389	800.350
Casa de máquinas Alazán	6.277	0.428	840.368
Casa de máquinas San Antonio	6.277	0.428	840.368

Picture 4 Results for the reference period (1981 – 2010)

Through this study, results are shown for the foresee scenarios, comparing them with the base period (shown in the above picture).

CONCLUSIONS

To adequately characterize the climate of an area, it is necessary to have large and complete climatic series of data of meteorological stations distributed through the territory. Short and limited series of data, makes impossible to develop accurate studies.

From this data series, and through de geostatistical kriging tool, it is possible to visually print Heat Maps which shows the variability of the basin.

These data obtained with the kriging tool, are the input data to the hydrologic characterization of the basin, modeled with HEC-HMS, obtaining flows and sediments data series in the hydroelectric facilities.

After the realization of this study, it is to conclude that the good operation of the hydroelectric facilities is assured (the minimum level of operation in the power plants), due to the increments in the flows through the facilities.

On the other hand, the increment in the sediments flow, which comes from the increment in the velocity of the flow of the main course of the river, could cause problems close to the hydroelectric facilities.

REFERENCES

- Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 1997. United States Department of Agriculture.
- La ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Universitat Politècnica de Valencia.
- HEC-geoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual, 2013. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1, 2007. Universidad de Granada.
- Manual de utilización del programa HEC-HMS. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el Modelo WEAP, 2009. Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. Guía Metodológica. Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
- Willian, Caballero Guardo (2011). Kriging Universal para Datos Funcionales. Tesis doctoral.
- Mapa interactivo ambiental de Ecuador: <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal>
- GIS Geography: <http://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>
- Kriging para Python: <http://pykriging.com/>
- Complejo hidroeléctrico Paute Integral: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/ley-de-transparencia/11-espanol/perfil-corporativo/127-paute-integral.html>
- La cuenca del rio paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. Políticas de desarrollo agropecuario. https://www.researchgate.net/profile/Mario_Donos2/publication/278009785_La_cuenca_del_ri_o_Paute_diagnostico_y_propuesta_de_manejo_integral_Políticas_de_desarrollo_agropecuario/links/57801d6d08ae69ab88241941/La-cuenca-del-rio-Paute-diagnostico-y-propuesta-de-manejo-integral-Políticas-de-desarrollo-agropecuario.pdf
- Análisis de la vulnerabilidad de las centrales hidroeléctricas priorizadas ante los efectos del cambio climático, 2016. IH Cantabria.
- Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning, 1986. United States Department of Agriculture.
- Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India, 2015. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering.



TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	1
1 INTRODUCCIÓN	4
2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	4
2.1 CARACTERÍSTIAS CLIMÁTICAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO.....	4
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA LOCAL	5
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	6
2.3.1 BASES DE DATOS	6
2.3.2 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA.....	6
2.3.3 INFORMACIÓN TERMOMÉTRICA.....	9
3 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	12
3.1 MODELOS CLIMÁTICOS	12
3.2 DOWNSCALING:	13
4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROYECCIONES	14
4.1 PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN.....	14
4.1.1 ESCENARIO 2011 – 2040	14
4.1.2 ESCENARIO 2041 – 2070	15
4.1.3 ESCENARIO 2071 – 2100	16
4.2 PROYECCIONES DE TEMPERATURA.....	17
4.2.1 ESCENARIO 2011 – 2040	17
4.2.2 ESCENARIO 2041 – 2070	18
4.2.3 ESCENARIO 2071 – 2100	19
5 MODELIZACIÓN DE LA CUENCA	21
5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HEC – HMS	21
5.2 MODELO DEL TERRENO.....	22
5.3 DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS.....	23
5.4 LITOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA	25
5.5 USOS DEL SUELO	25
5.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	26
5.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS AFOROS.....	27
5.7.1 AFOROS DE CAUDALES.....	27
5.7.2 AFOROS DE SEDIMENTOS.....	29
6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	30
6.1 CALIBRACIÓN DE CAUDALES	31



6.1.1	ESTACIÓN DE AFORO H0894	31
6.1.2	ESTACIÓN DE AFORO H0895	32
6.1.3	ESTACIÓN DE AFORO H0900	33
6.2	CALIBRACIÓN DE SEDIMENTOS	35
7	ESCENARIOS PLANTEADOS	35
8	PROYECCIONES DE CAUDALES Y SEDIMENTOS	36
8.1	SITUACIÓN ACTUAL	36
8.2	ESCENARIOS FUTUROS	36
8.2.1	ESCENARIO RCP 4.5	37
8.2.2	ESCENARIO RCP 6.0	38
9	CONCLUSIONES	39
10	REFERENCIAS	41



TABLA DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1. FLUCTUACIONES DE VIENTOS ALISIOS EN LA ITCZ.	5
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DE ESTUDIO.....	6
FIGURA 3. SERIES DE DATOS DIARIAS OBSERVADAS EN LOS PLUVIÓMETROS SELECCIONADOS.	8
FIGURA 4. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA (MM/AÑO) PARA LOS DATOS OBSERVADOS 1979 – 2010.	9
FIGURA 5. SERIES DE DATOS DIARIAS OBSERVADAS EN LOS TERMÓMETROS SELECCIONADOS.	10
FIGURA 6. TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA CUENCA (°C) PARA LOS DATOS OBSERVADOS 1979 – 2010.	11
FIGURA 7. CONCENTRACIÓN DE CO2 EQUIVALENTE PARA LAS CUATRO RUTAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRACIÓN.	13
FIGURA 8. VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (%) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2011-2040.....	15
FIGURA 9. VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (%) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2041-2070.....	16
FIGURA 10. VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (%) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2071-2100.	17
FIGURA 11. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA (°C) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2011-2040.	18
FIGURA 12. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA (°C) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2041-2070.	19
FIGURA 13. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA (°C) EN LOS CUATRO RCP. ESCENARIO 2071-2100.	20
FIGURA 14. ESQUEMA DEL MODELO SMA	22
FIGURA 15. MODELO DIGITAL DEL TERRENO CON RESOLUCIÓN 30 METROS.	23
FIGURA 16. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA, SUBCUENCAS Y RED DE DRENAJE.	25
FIGURA 17. MAPA DE COBERTURA Y USOS DEL SUELO EN ECUADOR.	26
FIGURA 18. SERIES DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN DE AFORO H0894.	27
FIGURA 19. SERIES DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN DE AFORO H0895.	28
FIGURA 20. SERIES DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN DE AFORO H0900.	28
FIGURA 21. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE AFORO DE LOS CAUDALES SELECCIONADOS.	29
FIGURA 22. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE AFORO DE LOS SEDIMENTOS SELECCIONADOS.....	30
FIGURA 23. RANGOS DE EFICIENCIA EN LA CALIBRACIÓN DEL NSE Y PBIAS (%).	31
FIGURA 24. CAUDAL SIMULADO Y OBSERVADO PARA EL AFORO H0894.	31
FIGURA 25. CORRELACIÓN CAUDAL OBSERVADO – CAUDAL SIMULADO H0894.....	31
FIGURA 26. CURVA DURACIÓN FRECUENCIA H0894.....	32
FIGURA 27. CAUDAL SIMULADO Y OBSERVADO PARA EL AFORO H0895.	32
FIGURA 28. CORRELACIÓN CAUDAL OBSERVADO – CAUDAL SIMULADO H0894.....	33
FIGURA 29. CURVA DURACIÓN FRECUENCIA H0894.....	33
FIGURA 30. CAUDAL SIMULADO Y OBSERVADO PARA EL AFORO H0900.	34
FIGURA 31. CORRELACIÓN CAUDAL OBSERVADO – CAUDAL SIMULADO H0900.....	34
FIGURA 32. CURVA DURACIÓN FRECUENCIA H0900.....	34



1 INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se trata de analizar la vulnerabilidad frente al cambio climático de las centrales hidroeléctricas localizadas en la cuenca del Paute, a su paso por las provincias de Cañar y Azuay, en Ecuador.

Debido a la fuerte pendiente en la cuenca, en este río se construyó el Complejo Hidroeléctrico Paute, el cuál actualmente genera la mayor parte de la energía eléctrica del país, siendo la Represa de Paute - Mazar la mayor productora del complejo. Además, existen otras instalaciones que han sido objeto de este estudio, como se indica a continuación:

- Presa y central Mazar
- Presa Daniel Palacios
- Presa y central Cardenillos
- Central Paute Sopladora
- Central Paute Molino
- Casa de máquinas Dudas
- Casa de máquinas Alazán
- Casa de máquinas San Antonio

Todas ellas serán estudiadas a lo largo de este informe, especialmente su afluencia de caudal y sedimentos, a tiempo actual y futuro, a fin de predecir los posibles cambios que puedan acontecer con el paso de los años debidos al cambio climático.

El mencionado estudio constará de dos fases principales con actuaciones específicas. En la primera de ellas se tratará de estimar las variaciones inducidas por el cambio climático en la precipitación y en la temperatura en el área de estudio, y representarlas mediante “mapas de calor” que se obtendrán mediante la herramienta de modelización Python, a través de la programación de la interpolación “Kriging Ordinario”.

A partir de los datos que se obtendrán en esta primera fase, se procederá a estimar las variables hidrológicas (caudales, sólidos transportados y sólidos en suspensión) de interés para evaluar los posibles riesgos asociados al cambio climático en la cuenca, y más concretamente en la central hidroeléctrica y en la presa Paute – Mazar.

2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

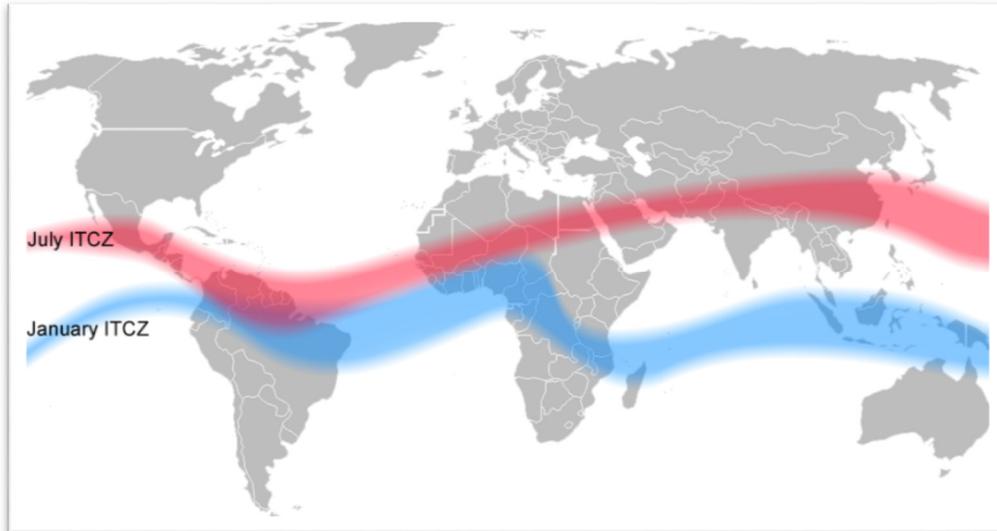
2.1 CARACTERÍSTIAS CLIMÁTICAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO

Las condiciones climáticas de Ecuador, son muy variadas. Son dos los principales factores que gobiernan el clima en Ecuador. El primero de ellos son las fluctuaciones de vientos en la zona de convergencia intertropical (ITCZ). La zona de convergencia Intertropical es la zona del globo en la que convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los procedentes del hemisferio sur. Esta zona se caracteriza por ser un ancho cinturón de baja presión constituido por corrientes de aire ascendente, donde convergen grandes masas de aire cálido y húmedo provenientes del norte y del sur de la zona intertropical. La consecuencia de este fenómeno son grandes precipitaciones en la parte central de Sudamérica durante los meses iniciales y finales del año.

Por otro lado, el modelo meteorológico del país varía según la orografía, y las temperaturas cambian en función de la altitud y localización, principalmente por la presencia de los Andes y la influencia marítima.

De este modo, todos estos factores determinan los diferentes regímenes de las llamadas “regiones naturales” de Ecuador: Costa, Sierra y Oriente. Es interesante mencionar el clima de la Sierra o de los valles interandinos, donde se encuentran parte de las cabeceras de los ríos que alimentan nuestra cuenca de estudio.

Figura 1. Fluctuaciones de vientos alisios en la ITCZ.

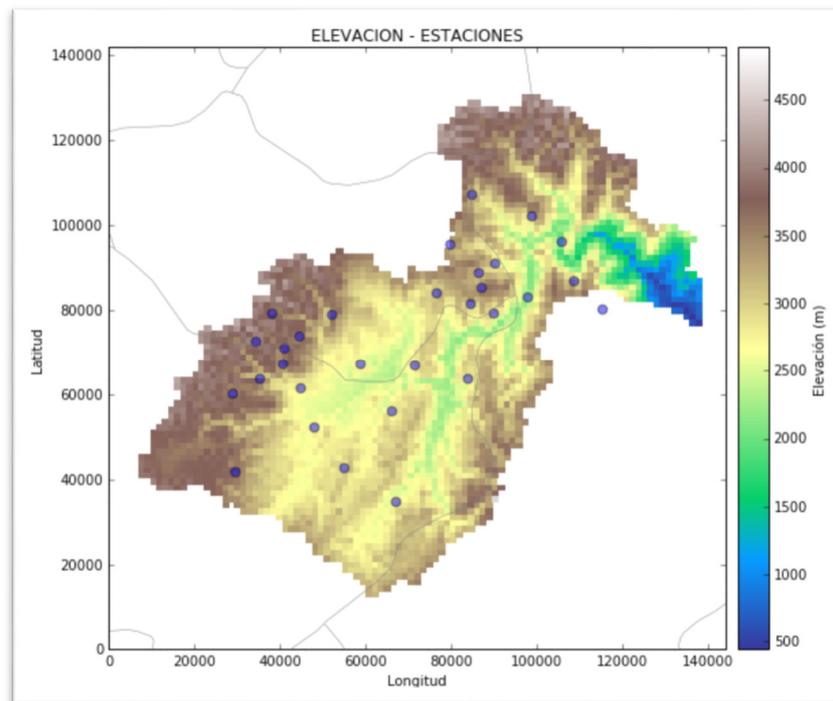


2.2 CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA LOCAL

Para caracterizar el clima local, se ha acudido al INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador, el cual nos facilita información pluviométrica y termométrica de las diferentes estaciones meteorológicas a lo largo de toda la cuenca de estudio.



Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio



Se puede observar que, en la parte oriental de la cuenca, las precipitaciones son mayores, debido principalmente a la influencia del Amazonas. La temperatura media en esta zona es elevada (alrededor de 20 – 22°C de media anual) y más o menos constante a lo largo del año.

En la zona central de la cuenca, coincidiendo con las zonas más bajas en cuanto altitud de la cuenca (los valles interandinos), los datos observados de precipitación son a su vez los más bajos, y la temperatura media anual, a su vez, alcanza las máximas de toda la zona de estudio, alcanzando los 24 – 26°C de media anual.

Las cumbres de la cordillera de la zona más occidental de la cuenca (alcanzando los 3500 metros de altitud), presentan las temperaturas medias más bajas (alrededor de 10 – 12°C).

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

2.3.1 BASES DE DATOS

Como ya se ha comentado anteriormente, para la caracterización de los aspectos meteorológicos de la cuenca, se ha dispuesto de las estaciones pluviométricas y termométricas facilitadas por INAMHI.

Contamos, por tanto, con valores diarios para 30 estaciones meteorológicas (a las que nos referiremos a lo largo del estudio como M1, M2, ...M30), desde el 01 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre de 2010.

2.3.2 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

En la Tabla 2, se presentan las estaciones utilizadas para la caracterización pluviométrica de la cuenca de estudio:



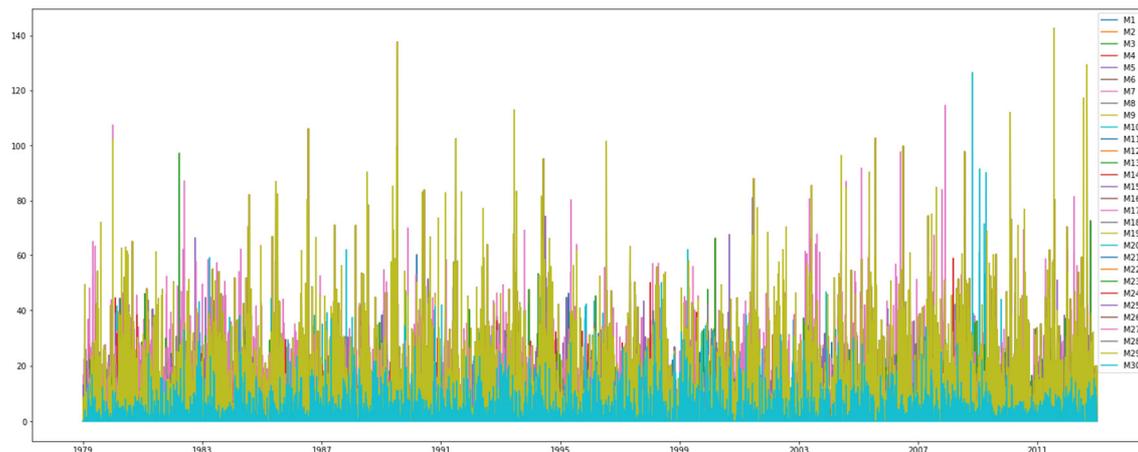
Tabla 1 Caracterización estaciones pluviométricas.

ESTACIÓN	PERÍODO	PMEDIA (mm/año)	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
M1	01/1979 - 12/2010	942,145272	-2,409178224	-78,65269722	3657,71192
M2	01/1979 - 12/2011	1285,81863	-2,516487306	-78,69876096	3232,75357
M3	01/1979 - 12/2012	2914,348658	-2,509412156	-78,46335793	2938,86316
M4	01/1979 - 12/2013	1285,81863	-2,574267488	-78,63969118	2495,406
M5	01/1979 - 12/2014	942,145272	-2,55564181	-78,60494619	2759,35778
M6	01/1979 - 12/2015	2914,348658	-2,457030416	-78,52835475	3223,54716
M7	01/1979 - 12/2016	2914,348658	-2,59405E+14	-78,43766674	2120,97734
M8	01/1979 - 12/2017	1285,81863	-2,607481305	-78,63230955	2648,27988
M9	01/1979 - 12/2018	2914,348658	-2,626862435	-78,53706928	2629,69324
M10	01/1979 - 12/2019	1058,536168	-2,619138859	-78,7276215	3266,69429
M11	01/1979 - 12/2020	1285,81863	-2,641802524	-78,65716564	2897,838
M12	01/1979 - 12/2021	1213,6205	-2,660027689	-79,07202929	3900,90381
M13	01/1979 - 12/2022	1342,83959	-2,661655811	-78,60670589	2812,51234
M14	01/1979 - 12/2023	1213,6205	-2,665509985	-78,94599527	3281,86384
M15	01/1979 - 12/2024	1342,83959	-2,800730282	-78,66056242	2930,08269
M16	01/1979 - 12/2025	1213,6205	-2,72066963	-79,10703829	3857,73199
M17	01/1979 - 12/2026	1958,778541	-2,652695551	-78,37882614	1503,22304
M18	01/1979 - 12/2027	1213,6205	-2,734594904	-79,0474989	3559,59536
M19	01/1979 - 12/2028	1213,6205	-2,709743	-79,01577063	3524,24207
M20	01/1979 - 12/2029	740,713875	-2,772892016	-78,77278011	2715,12128
M21	01/1979 - 12/2030	1213,6205	-2,769027528	-79,05104566	3503,46295
M22	01/1979 - 12/2031	740,713875	-2,769707987	-78,88671998	2785,45644
M23	01/1979 - 12/2032	740,713875	-2,871180386	-78,82044307	2755,93043
M24	01/1979 - 12/2033	709,961513	-3,062028575	-78,81297568	2959,72496
M25	01/1979 - 12/2034	1213,6205	-2,799992437	-79,09778462	3621,76319
M26	01/1979 - 12/2035	2914,348658	-2,820307704	-79,01191342	2981,69612
M27	01/1979 - 12/2036	788,585567	-2,989474541	-78,92280438	2860,75277
M28	01/1979 - 12/2037	1067,209753	-2,831845186	-79,15651651	3619,61378
M29	01/1979 - 12/2038	2914,348658	-2,904605002	-78,98453963	2591,32502
M30	01/1979 - 12/2039	677,268394	-2,9993523	-79,15032904	3291,50163

En la Figura 3, se puede observar las series diarias de datos reconstruidos de los todos los pluviómetros de la cuenca.



Figura 3. Series de datos diarias observadas en los pluviómetros seleccionados.

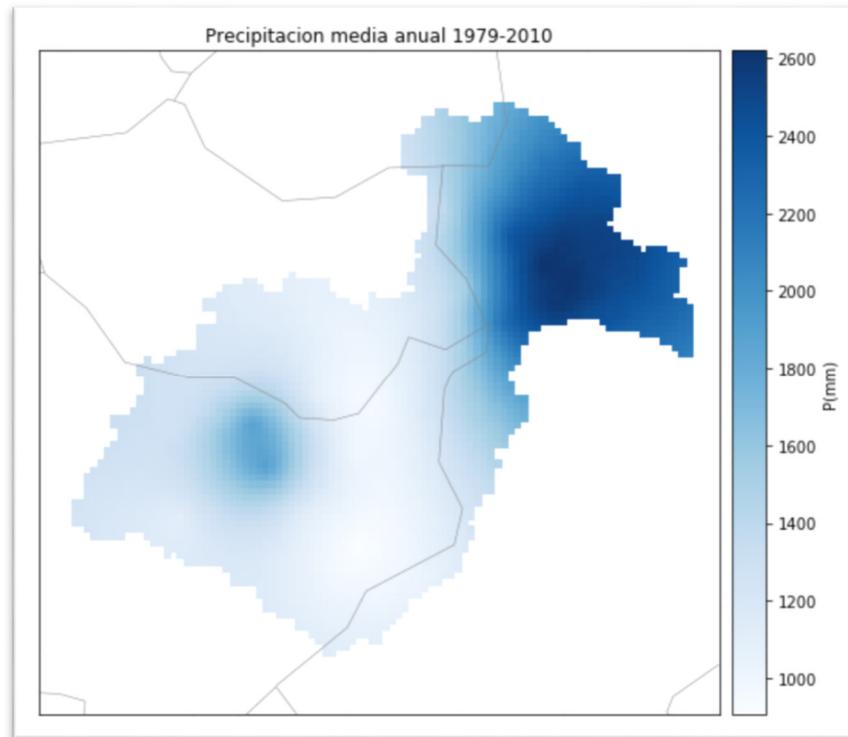


Se pueden observar puntas de precipitación de alrededor de 140 mm/día, correspondiéndose estos valores punta a los pluviómetros situados en la zona más oriental de la cuenca que, como ya hemos comentado en apartados anteriores, está influenciada por el río Amazonas.

Una vez seleccionados los pluviómetros, se procede a realizar el rellenado de las series observadas mediante la técnica conocida como “kriging”. El *kriging* es una técnica de interpolación geoestadística avanzada, que genera una superficie a partir de una serie de puntos. En nuestro caso, se ha utilizado la variante “Universal Kriging”, el cual recoge como variable principal la información pluviométrica, y se apoya en la elevación y la precipitación media para así hacer la interpolación más precisa y mejorar los resultados.

En la Figura 4 se representa el resultado de la interpolación de las lluvias anuales de los datos observados (1979 – 2010) mediante la técnica “kriging”.

Figura 4. Precipitación media anual en la cuenca (mm/año) para los datos observados 1979 – 2010.



FUENTE: Elaboración propia.

Tal y como preveíamos, la zona oriental presenta las puntas de precipitación anual, en la zona centro, donde se sitúan los valles interandinos, encontramos los mínimos valores de la cuenca.

2.3.3 INFORMACIÓN TERMOMÉTRICA

En la Tabla 3 se puede observar un resumen de las características térmicas de las estaciones termométricas seleccionadas:

Tabla 2. Caracterización estaciones termométricas.

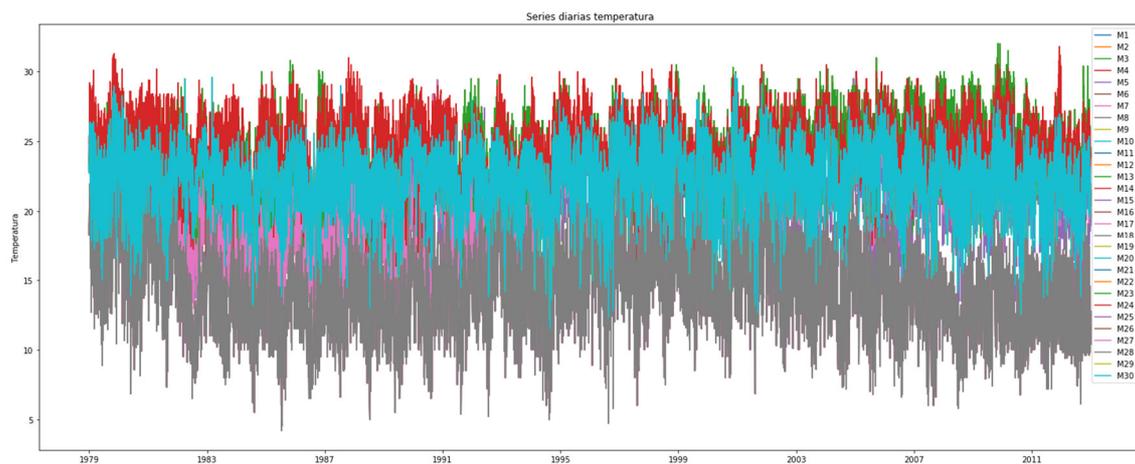
ESTACIÓN	PERÍODO	TMEDIA (°C)	TMAXIMA (°C)	TMINIMA (°C)	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
M1	01/1979 - 12/2010	21,0873	29,4127	11,1410	-2,409178224	-78,65269722	3657,71192
M2	01/1979 - 12/2011	21,0873	29,4127	11,1410	-2,516487306	-78,69876096	3232,75357
M3	01/1979 - 12/2012	21,0873	29,4127	11,1410	-2,509412156	-78,46335793	2938,86316
M4	01/1979 - 12/2013	21,0873	29,4127	11,1410	-2,574267488	-78,63969118	2495,406
M5	01/1979 - 12/2014	21,0873	29,4127	11,1410	-2,55564181	-78,60494619	2759,35778
M6	01/1979 - 12/2015	21,0873	29,4127	11,1410	-2,457030416	-78,52835475	3223,54716
M7	01/1979 - 12/2016	21,0873	29,4127	11,1410	-2,59405E+14	-78,43766674	2120,97734
M8	01/1979 - 12/2017	21,0873	29,4127	11,1410	-2,607481305	-78,63230955	2648,27988
M9	01/1979 - 12/2018	21,0873	29,4127	11,1410	-2,626862435	-78,53706928	2629,69324
M10	01/1979 - 12/2019	21,4534	30,0	10,2	-2,619138859	-78,7276215	3266,69429
M11	01/1979 - 12/2020	21,0873	29,4127	11,1410	-2,641802524	-78,65716564	2897,838
M12	01/1979 - 12/2021	14,4105	26,5947	4,2	-2,660027689	-79,07202929	3900,90381
M13	01/1979 - 12/2022	21,4534	30,0	10,2	-2,661655811	-78,60670589	2812,51234
M14	01/1979 - 12/2023	14,4105	26,5947	4,2	-2,665509985	-78,94599527	3281,86384
M15	01/1979 - 12/2024	21,4534	30,0	10,2	-2,800730282	-78,66056242	2930,08269



M16	01/1979 - 12/2025	14,4105	26,5947	4,2	-2,72066963	-79,10703829	3857,73199
M17	01/1979 - 12/2026	21,0873	29,4127	11,1410	-2,652695551	-78,37882614	1503,22304
M18	01/1979 - 12/2027	14,4105	26,5947	4,2	-2,734594904	-79,0474989	3559,59536
M19	01/1979 - 12/2028	14,4105	26,5947	4,2	-2,709743	-79,01577063	3524,24207
M20	01/1979 - 12/2029	24,1217	32,0	13,5	-2,772892016	-78,77278011	2715,12128
M21	01/1979 - 12/2030	14,4105	26,5947	4,2	-2,769027528	-79,05104566	3503,46295
M22	01/1979 - 12/2031	24,1217	32,0	13,5	-2,769707987	-78,88671998	2785,45644
M23	01/1979 - 12/2032	24,1217	32,0	13,5	-2,871180386	-78,82044307	2755,93043
M24	01/1979 - 12/2033	24,1056	31,8	13,4	-3,062028575	-78,81297568	2959,72496
M25	01/1979 - 12/2034	14,4105	26,5947	4,2	-2,799992437	-79,09778462	3621,76319
M26	01/1979 - 12/2035	14,4105	26,5947	4,2	-2,820307704	-79,01191342	2981,69612
M27	01/1979 - 12/2036	14,4105	26,5947	4,2	-2,989474541	-78,92280438	2860,75277
M28	01/1979 - 12/2037	14,4105	26,5947	4,2	-2,831845186	-79,15651651	3619,61378
M29	01/1979 - 12/2038	22,3106	29,8	11,5213	-2,904605002	-78,98453963	2591,32502
M30	01/1979 - 12/2039	22,3106	29,8	11,5213	-2,9993523	-79,15032904	3291,50163

En la Figura 5 se observan las series de datos obtenidos de los termómetros de la cuenca.

Figura 5. Series de datos diarias observadas en los termómetros seleccionados.



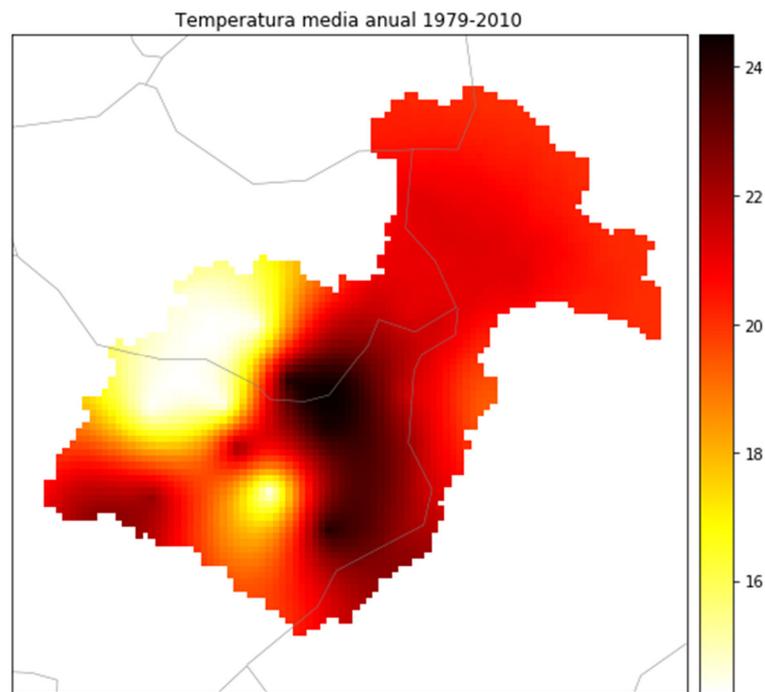
FUENTE: Elaboración propia.

Como habíamos comentado en apartados anteriores, las temperaturas máximas se corresponden con las zonas de la cuenca de menor altitud (valles interandinos) y las temperaturas más bajas se miden en las zonas más altas (cordillera occidental) de la cuenca de estudio.

Análogamente a la interpolación geoestadística llevada a cabo para rellenar las series de datos, y para dibujar los resultados, realizada mediante “kriging universal” en los pluviómetros de la cuenca, realizamos el proceso con los datos de temperatura media anual en la cuenca.

En la Figura 6 podemos observar el campo de temperaturas medias anuales en la cuenca de estudio:

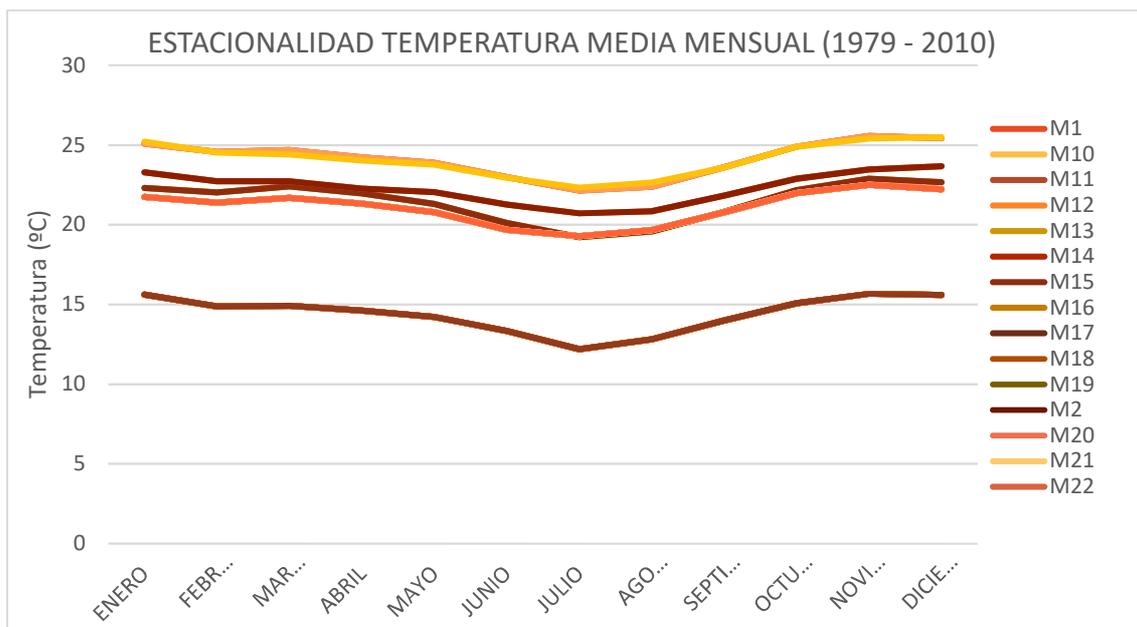
Figura 6. Temperatura media anual en la cuenca (°C) para los datos observados 1979 – 2010.



FUENTE: Elaboración propia.

Las temperaturas medias oscilan entre los 10 y los 25°C, correspondiéndose los valores máximos a los puntos de menor cota de la cuenca, y los más bajos a las cordilleras de la provincia de Azuay.

La estacionalidad de las temperaturas se representa en la siguiente Gráfica 1. Según se puede observar, las temperaturas medias máximas se alcanzan en el mes de noviembre oscilando entre los 15 y los 26°C. Las temperaturas medias mínimas se producen en el mes de julio.



Gráfica 1. Estacionalidad de las estaciones termométricas seleccionadas. Elaboración propia.



3 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

3.1 MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos climáticos o “General Circulation Models”, son modelos matemáticos que simulan las diferentes variables terrestres relacionadas con la atmósfera, océanos, relieve terrestre y hielo, y sus interacciones, con el fin de obtener unas proyecciones del clima futuro. Se basan en las ecuaciones de Navier–Stokes sobre una esfera rotatoria utilizando términos termodinámicos para las diversas fuentes de energía.

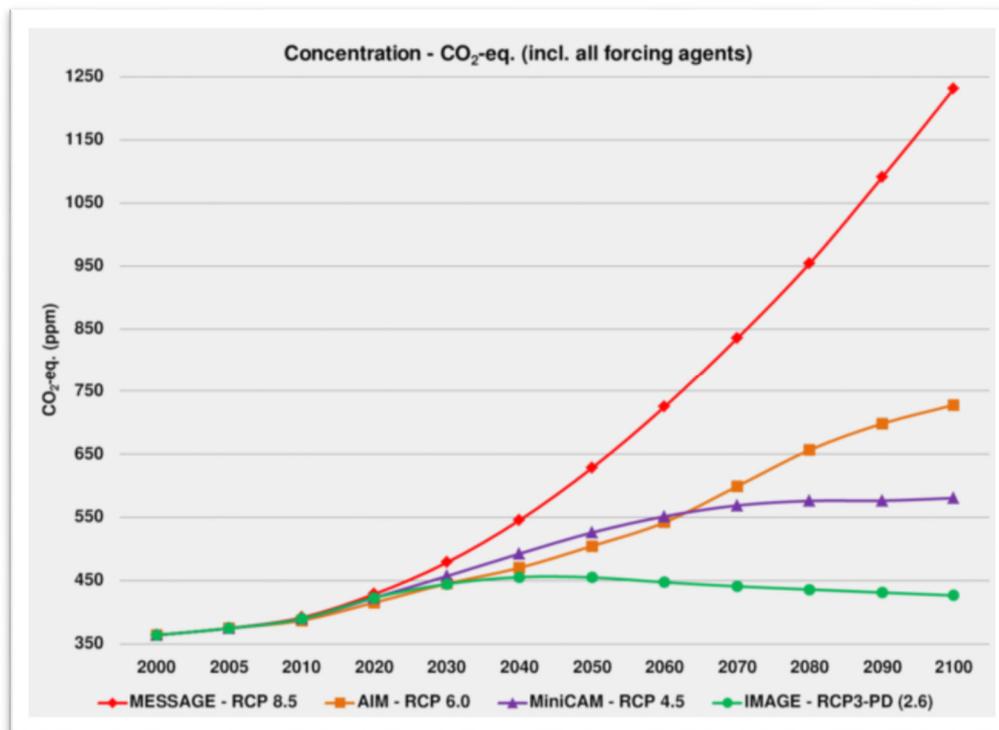
La evolución futura de la situación socioeconómica global, se modela mediante el uso de las llamadas Representative Concentration Pathways (RCP), o rutas de concentración representativas. Estas rutas simulan unos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo, aumento de la población y cambios socioeconómicos.

Las cuatro rutas empleadas, que describen cuatro posibles climas futuros, se describen a continuación:

- **RCP2.6:** este escenario se corresponde con unos esfuerzos de mitigación de las emisiones muy bajos. Asume que las emisiones tendrán un pico entre 2010 y 2020, y las emisiones comenzarán a descender a partir de entonces. El objetivo principal es limitar el calentamiento global a menos de 2°C a final de siglo, y que la radiación no supere el valor de 2.6 W/m^2 . Este escenario sugiere una reducción drástica e inmediata de las emisiones, que algunos trabajos resaltan que no es posible.
- **RCP4.5:** este escenario es un escenario de estabilización medio, en el que para el 2100 la radiación no deberá superar 4.5 W/m^2 . El pico de radiación, se asume que se producirá alrededor de año 2040 y después se reducirá hasta estabilizarse alrededor del 2080. Para llegar a este objetivo, se suponen políticas que incluyen la penalización en el uso del carbono.
- **RCP6.0:** este escenario representa una tasa de radiación alta, alcanzando el pico alrededor del año 2080, disminuyendo a partir de ese momento hasta el 2100, no pudiendo superar ese año 6.0 W/m^2 .
- **RCP8.5:** este escenario representa una vía en la que las emisiones y concentraciones de radiación son altas. Se supone un alto crecimiento poblacional y modestos cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Las emisiones son crecientes durante todo el siglo XXI. En este escenario no se implementan políticas decididas contra el cambio climático.

A modo de resumen, la siguiente Figura 7 representa la evolución de los cuatro escenarios descritos anteriormente:

Figura 7. Concentración de CO₂ equivalente para las cuatro rutas representativas de concentración.



3.2 DOWNSCALING:

Los Modelos de Circulación General (GCMs) mencionados en párrafos anteriores, trabajan a resoluciones espaciales de unos 200 km, resolución demasiado grande que provoca que la información suministrada sobre el clima sea inadecuada en muchas ocasiones.

Para resolver este desajuste, se ha desarrollado unas estrategias que permitan inferir información de alta resolución a partir de variables de baja resolución, es decir, proyectar a escala regional las variables de gran escala. Estas estrategias se denominan “técnicas de downscaling” (o reducción de escala).

Existen dos métodos principales para realizar downscaling:

- **Downscaling dinámico:** los campos de alta resolución se obtienen anidando un modelo climático regional (RCM) dentro del propio modelo climático global (GCM). El problema principal de este método es que requiere un gran esfuerzo computacional, y por ello tan solo hay simulaciones de RCM para algunos GCM y únicamente en algunas regiones.
- **Downscaling estático:** estos métodos se basan en relaciones estadísticas entre un predictor y un predictando (variables de superficie). Son menos costosos computacionalmente hablando, pero necesitan ser alimentados de datos ya generados para generar dicha relación estadística entre predictor y predictando.

Ambos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. Los métodos estadísticos son una buena opción cuando se necesita información local de muy alta resolución, ya que la resolución de los modelos dinámicos actuales es todavía demasiado grande.

Para que los métodos estadísticos sean válidos, se deben cumplir dos requisitos:



- El primero es que el rendimiento debe ser igualmente bueno en diferentes escalas de tiempo (diario, mensual, anual...).
- El segundo es que las posibles situaciones de los predictores que aparezcan en el posible clima futuro proporcionado por las simulaciones de los GCMs, deben estar dentro del rango de aplicabilidad de las relaciones estadísticas que ha determinado el periodo de calibración del método.

En lo que se refiere al presente estudio de la cuenca del Paute – Mazar, las proyecciones de precipitación y temperatura media futuras, van a ser determinadas mediante métodos de downscaling estadístico, puesto que el downscaling dinámico tan solo cuenta con escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, y tampoco podemos obtener valores para el largo plazo (escenario 2071 – 2100).

4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROYECCIONES

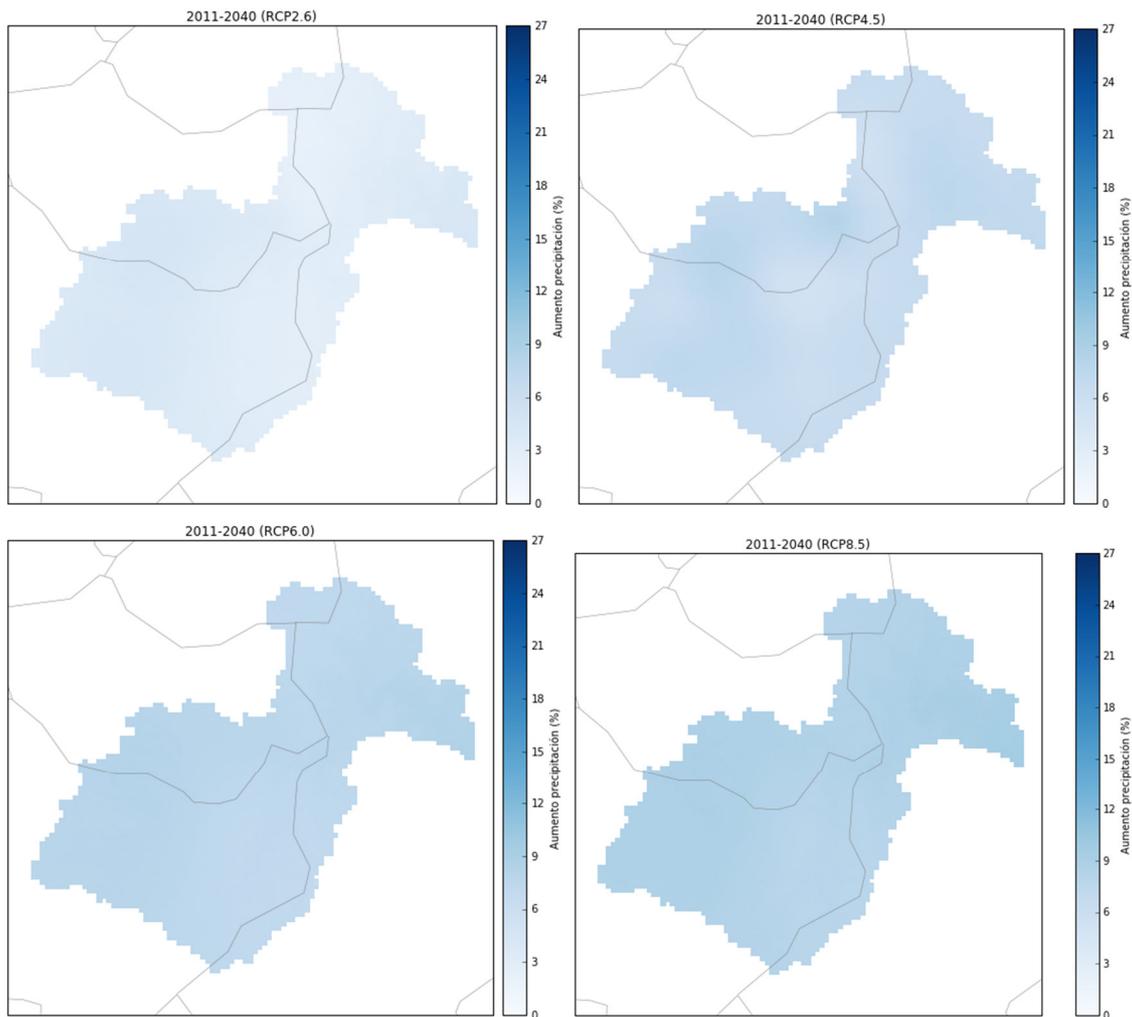
4.1 PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN

En este capítulo se representan los porcentajes de variación de la precipitación media anual de cada pluviómetro en relación con la precipitación media anual de los datos observados hasta el 2010.

4.1.1 ESCENARIO 2011 – 2040

Según podemos observar en la Figura 8, los mayores incrementos de precipitación se corresponden con el RCP 8.5, llegándose a observar en algunos puntos de la cuenca incrementos de hasta el 10 – 11%.

Figura 8. Variación de la precipitación (%) en los cuatro RCP. Escenario 2011-2040.



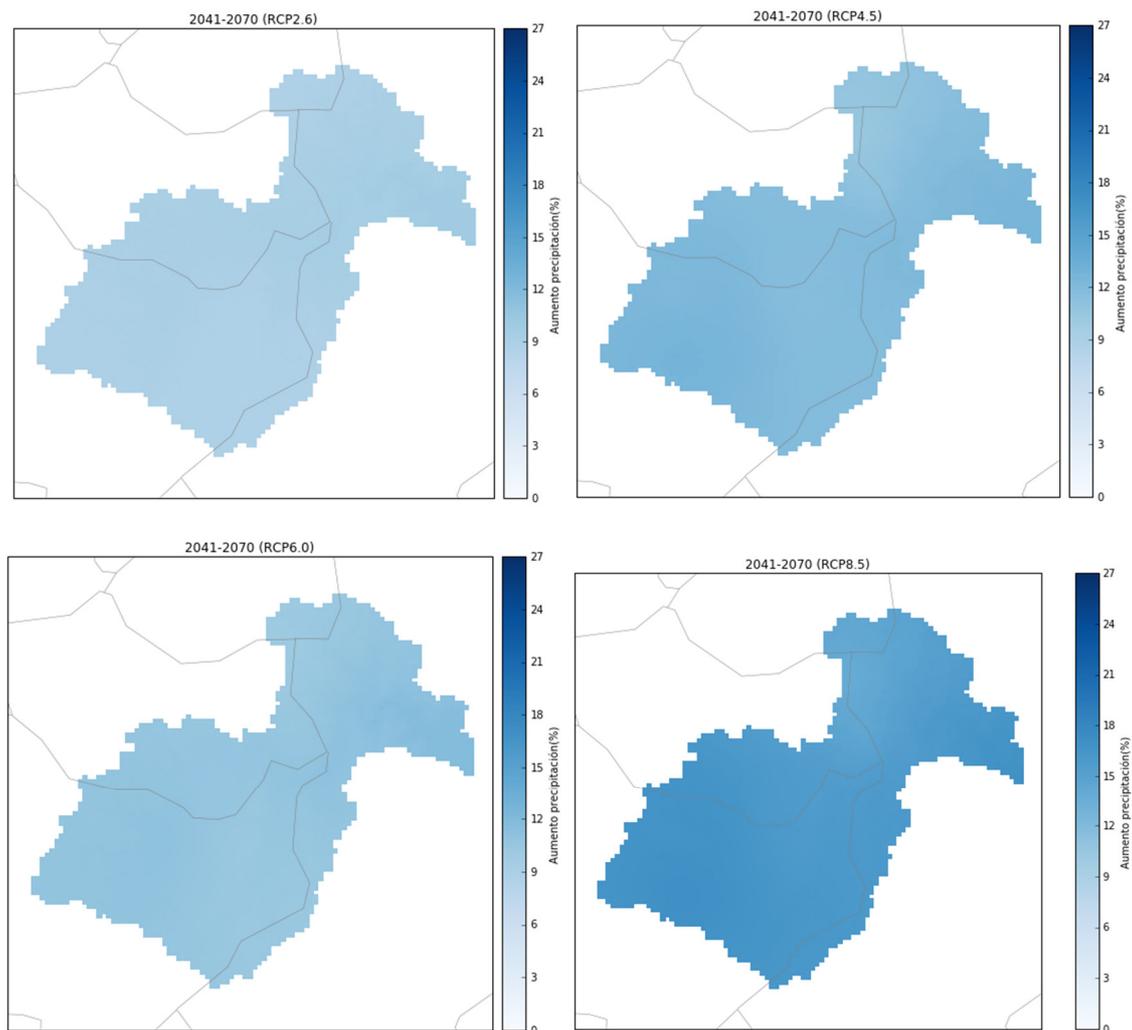
FUENTE: Elaboración propia.

4.1.2 ESCENARIO 2041 – 2070

En este escenario podemos observar los mayores incrementos de precipitación media anual en el RCP 8.5, llegando a alcanzarse incrementos de hasta el 18%e algunos puntos de la cuenca.

En la Figura 9 se observan los mencionados incrementos de precipitación para los 4 RCP:

Figura 9. Variación de la precipitación (%) en los cuatro RCP. Escenario 2041-2070.



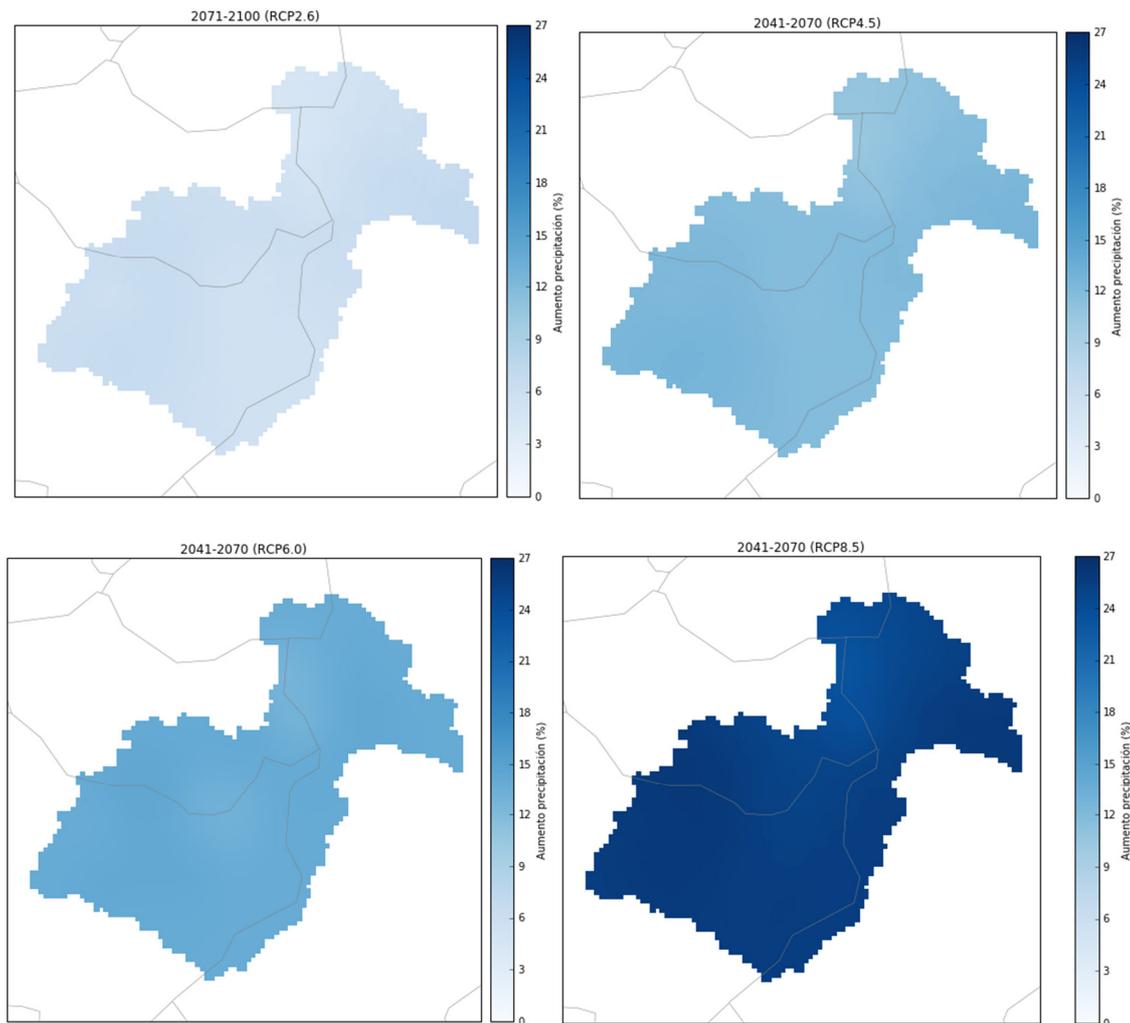
FUENTE: Elaboración propia.

4.1.3 ESCENARIO 2071 – 2100

Por último, para el escenario a largo plazo 2071 – 2100, se han representado los incrementos de precipitación en la Figura 10.

Al igual que en los escenarios anteriores, los mayores incrementos en la precipitación media anual se obtienen para el RCP 8.5, llegando hasta valores del 27% de incremento.

Figura 10. Variación de la precipitación (%) en los cuatro RCP. Escenario 2071-2100.



FUENTE: Elaboración propia.

4.2 PROYECCIONES DE TEMPERATURA

Análogamente a las proyecciones de precipitación representadas en el apartado anterior, a continuación, se va a representar las proyecciones de temperatura media para los escenarios corto, medio y largo plazo, y para los cuatro RCP.

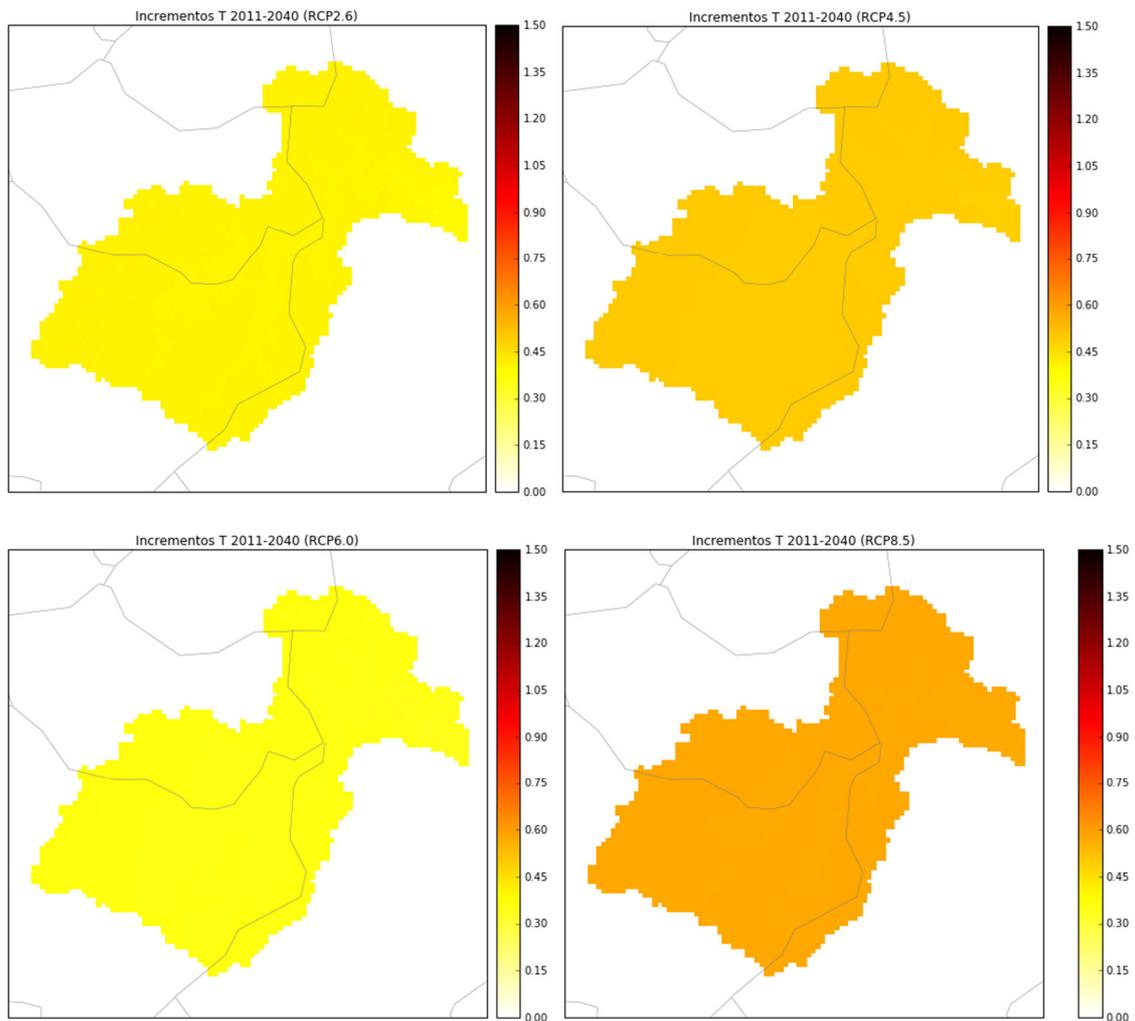
4.2.1 ESCENARIO 2011 – 2040

En el escenario que representa el corto plazo, los mayores incrementos de temperatura se observan en el RCP 8.5, llegando a alcanzar incrementos del 0,7 – 0,8%.

Cabe destacar que, en este caso, los menores incrementos aparecen en el RCP 6.0, algo normal puesto que este escenario presenta un incremento de emisiones más tendido a lo largo del siglo XXI, mientras que los RCP 2.6 y 4.5 presentan picos de emisiones en el corto – medio plazo.

Estos incrementos se representan en la Figura 11.

Figura 11. Variación de la temperatura media (°C) en los cuatro RCP. Escenario 2011-2040.



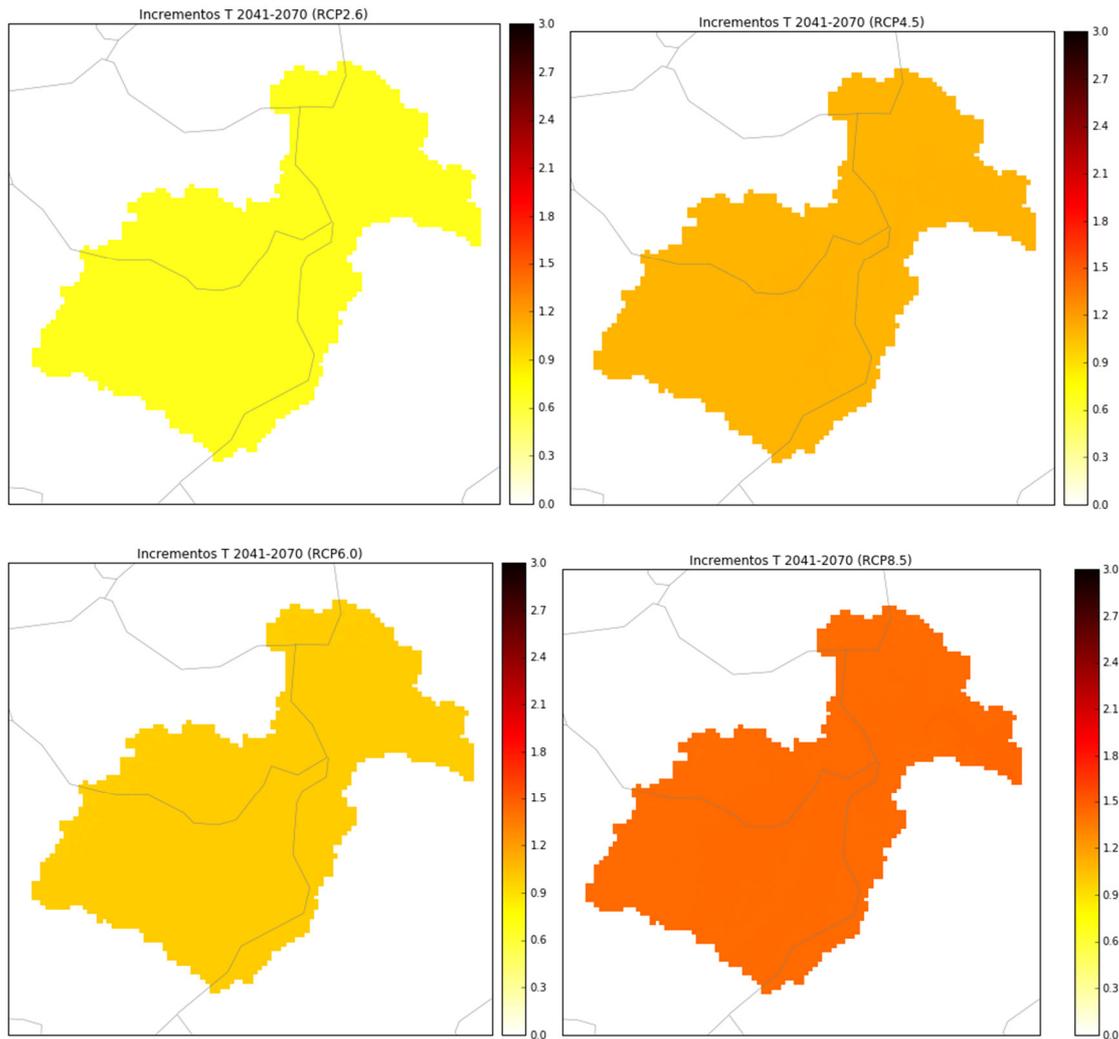
FUENTE: Elaboración propia.

4.2.2 ESCENARIO 2041 – 2070

Los mayores incrementos en este escenario (medio plazo) se observan para el RCP 8.5, llegando a incrementarse hasta en 2°C respecto la temperatura media calculada para los datos observados entre 1979 y 2010. El RCP 4.5 es el segundo que experimenta los mayores incrementos de temperatura.

Estos incrementos se representan en la Figura 12 a continuación.

Figura 12. Variación de la temperatura media (°C) en los cuatro RCP. Escenario 2041-2070.



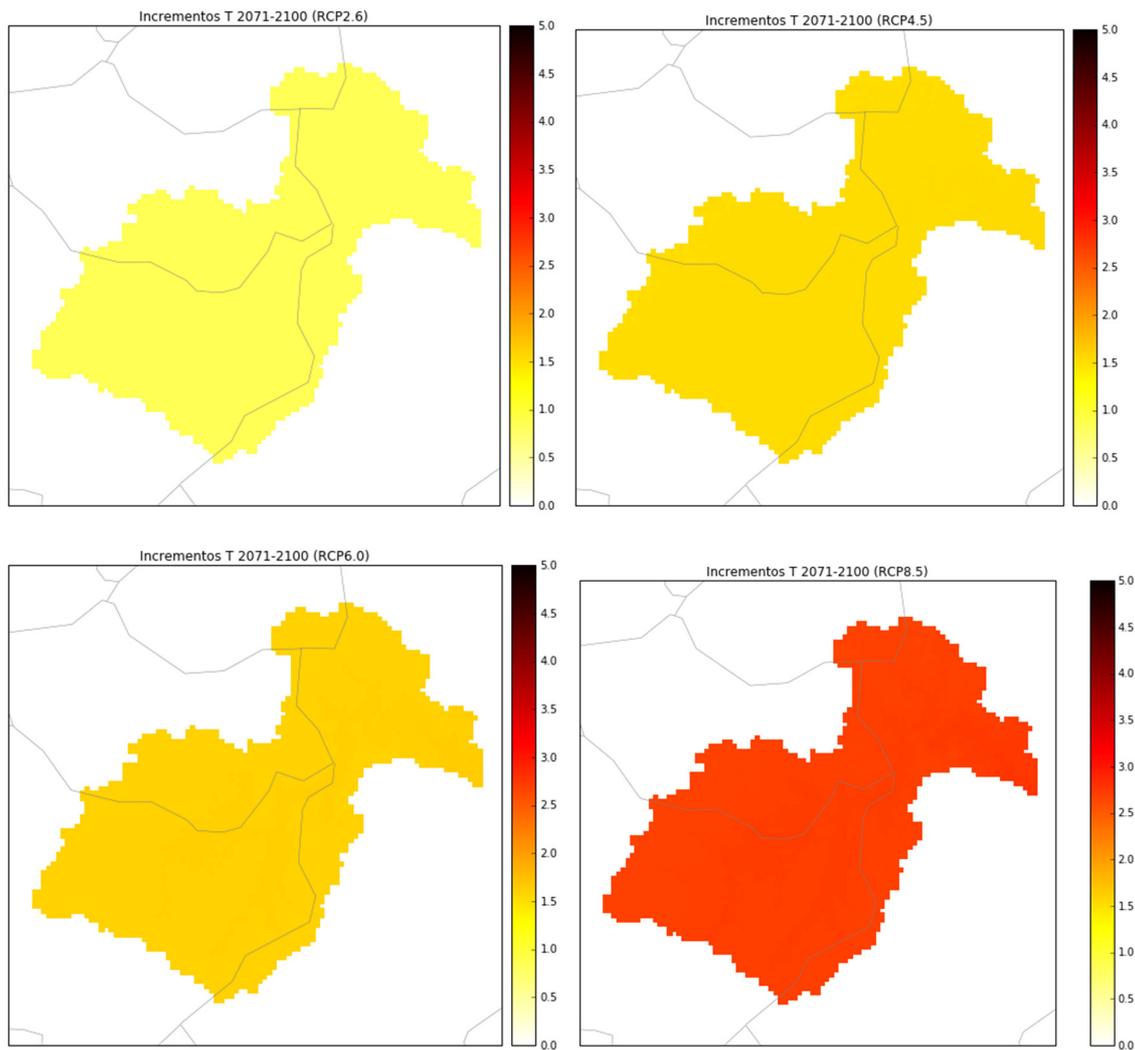
FUENTE: Elaboración propia.

4.2.3 ESCENARIO 2071 – 2100

Por último, en el escenario a largo plazo, se experimentan los mayores incrementos de temperatura media anual. Concretando, el RCP 8.5 presenta los mayores incrementos con valores que alcanzan los 3 – 4°C. Dichos incrementos se representan en la Figura 13.



Figura 13. Variación de la temperatura media (°C) en los cuatro RCP. Escenario 2071-2100.



FUENTE: Elaboración propia.



5 MODELIZACIÓN DE LA CUENCA

5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HEC – HMS

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE), que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de episodios de lluvia.

El modelo HEC-HMS, funciona como modelo continuo, trata de simular todo el proceso hidrológico (meses – años), y tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia. Para simular los modelos de pérdida, se utiliza generalmente el modelo SMA de simulación continua.

El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, como se muestra de forma esquemática en la Figura 1, en la que se pueden ver también las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos.

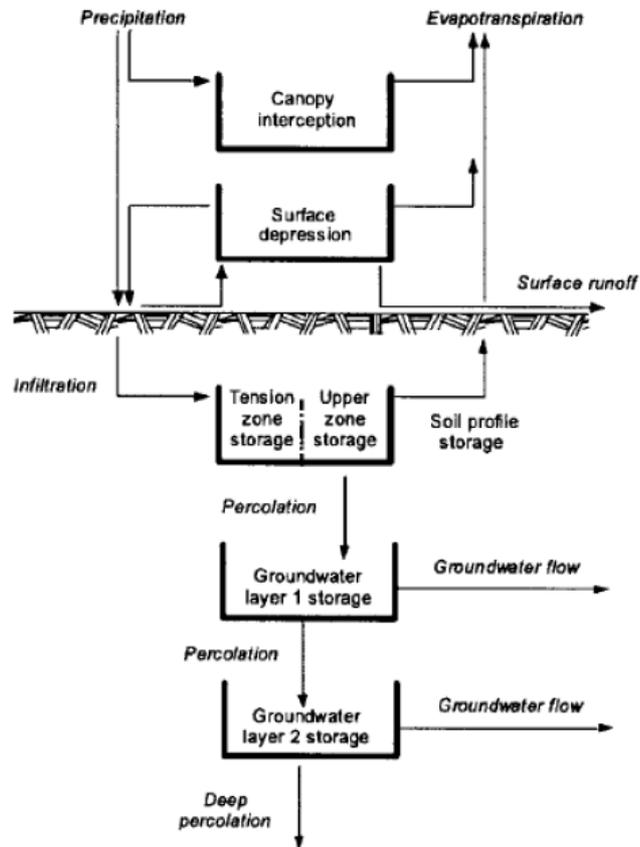
El primero de los depósitos de almacenamiento que se muestran en la citada figura representa la parte de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno. El siguiente depósito representa el almacenamiento de agua en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones.

En el interior del terreno, encontramos primero un depósito que trata de representar el fenómeno de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo, que está dividido, a su vez, en dos zonas: la upper zone, que está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o filtración, y la tension zone, que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. En realidad, la subdivisión del depósito de almacenamiento del suelo en dos zonas trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo.

Los dos depósitos subterráneos de almacenamiento de agua en el suelo, que se pueden reducir a uno solo, según las circunstancias, sirven para representar el flujo hipodérmico y el flujo base. La consideración, en cada caso, de uno o de los dos depósitos está condicionada por la forma de la curva de recesión del hidrograma correspondiente.



Figura 14. Esquema del modelo SMA

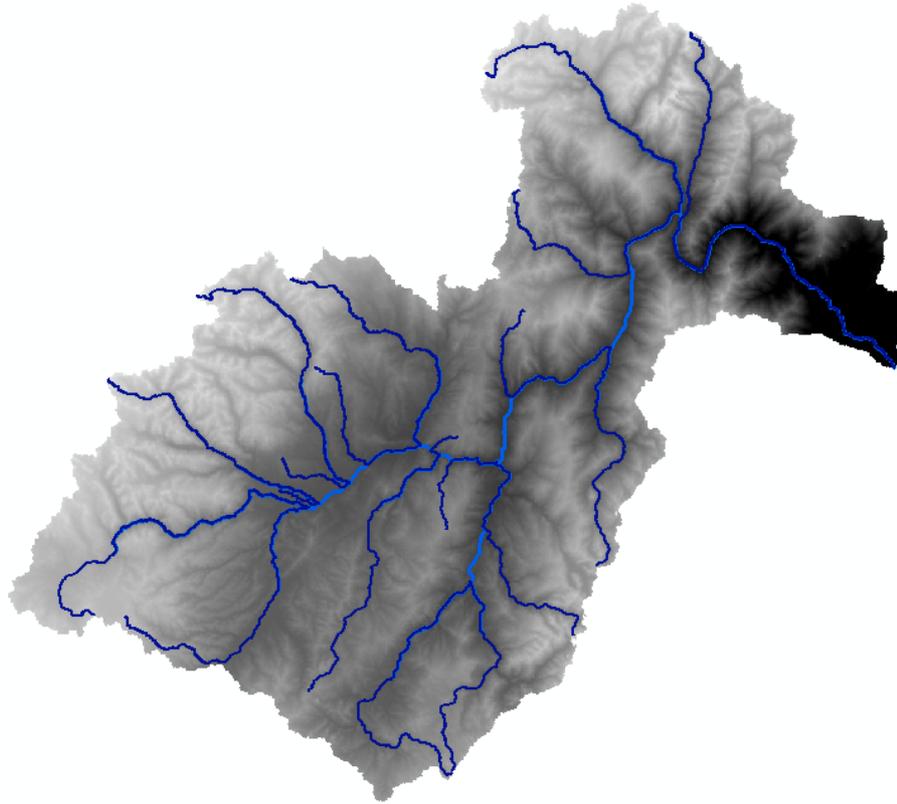


5.2 MODELO DEL TERRENO

Para poder llevar a cabo un adecuado comportamiento de la cuenca mediante el modelo HEC-HMS, en primer lugar, se debe definir una representación esquemática de la misma, que refleje su morfología y las características de la red de drenaje. Para ello, se ha utilizado un modelo digital del terreno con resolución de 30 metros, para la generación de las sub-cuencas y los cauces principales.



Figura 15. Modelo digital del terreno con resolución 30 metros.



FUENTE: Elaboración propia.

5.3 DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS

La definición de la cuenca de estudio se ha realizado con la extensión HEC-geoHMS de ArcGIS. Para procesarlo, se selecciona un punto de cierre de la cuenca, en este caso la desembocadura del río Paute en el río Namangoza. La definición final de la cuenca, sub-cuencas y red de drenaje se puede observar en la Figura 16.

Las características geomorfológicas de las subcuencas generadas mediante ArcGIS se pueden observar en la Tabla 3 siguiente:



Tabla 3. Características geomorfológicas de las subcuencas.

ID	Nombre	Área (km ²)	Perímetro (km)	Altitud media (m)	Pendiente Media (%)
1	W200	429.1126	165.28	3103	40.70
2	W210	282.1000	108.27	2215	40.62
3	W220	206.6200	91.84	2467	52.14
4	W230	252.7095	104.20	2378	37.03
5	W240	239.8280	113.71	2211	43.03
6	W250	447.4062	161.82	2324	27.55
7	W260	324.4447	139.89	2950	35.37
8	W270	96.8992	86.22	2563	22.24
9	W280	9.9879	21.00	2527	36.93
10	W290	294.8061	136.25	2683	30.04
11	W300	53.8184	51.70	2886	32.83
12	W310	326.9167	137.42	3435	38.57
13	W320	365.5047	136.19	2887	36.74
14	W330	54.0186	58.74	2473	16.63
15	W340	414.4783	193.81	2636	28.24
16	W350	5.9319	24.27	2442	13.69
17	W360	480.4781	155.15	2564	29.68
18	W370	337.8307	159.41	2073	32.07
19	W380	249.8999	123.03	2116	39.20
20	W390	224.8400	128.96	1993	39.04
21	W400	295.7000	143.97	1277	54.67
22	W410	134.5200	78.44	747	54.37
23	W420	124.3400	69.92	747	61.08

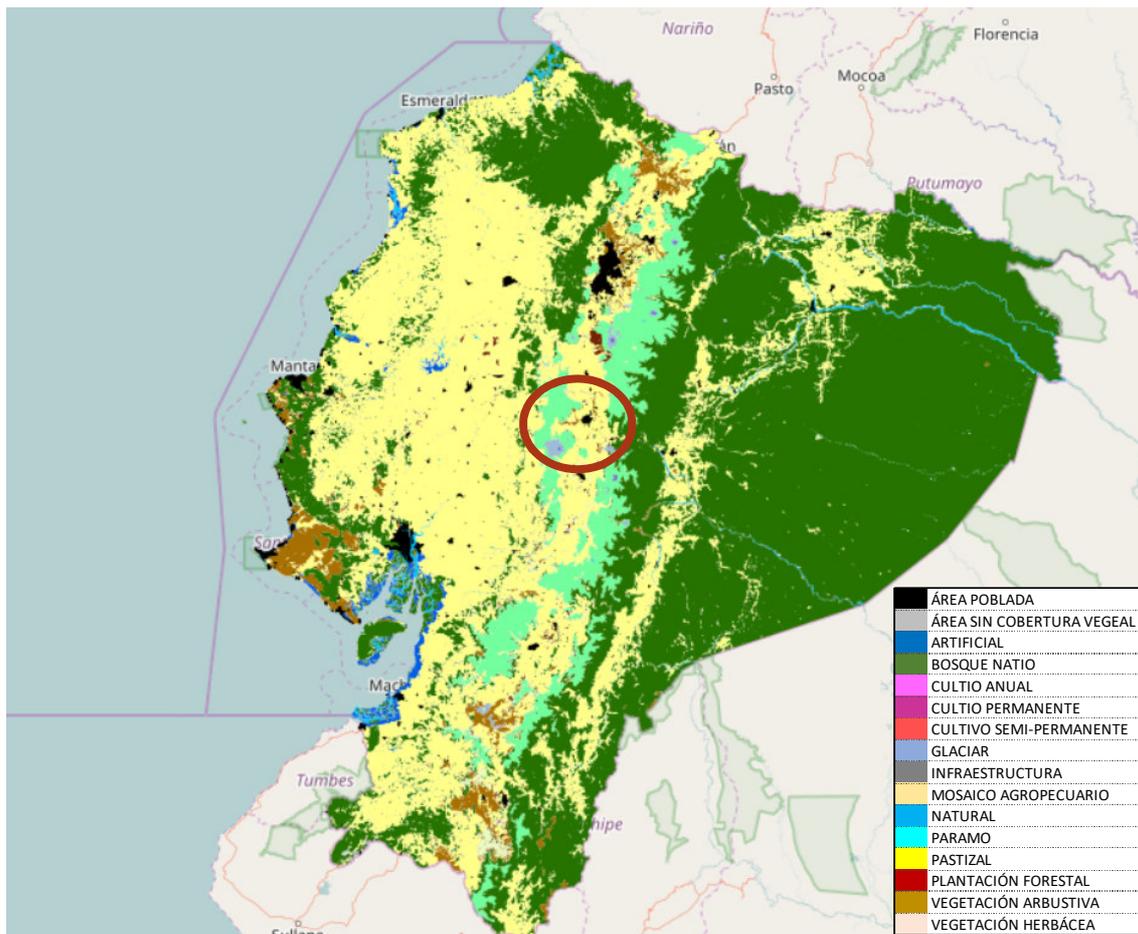
FUENTE: Elaboración propia.

Para delimitar las subcuencas del área de estudio, se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Tamaño mínimo de la subcuenca 6 km².
- Tamaño máximo de la subcuenca 800 km².
- Ubicación de las centrales hidroeléctricas.
- Ubicación de las estaciones de aforo de caudal.
- Ubicación de las estaciones de aforo de sedimentos.

En la Figura siguiente, se presenta la delimitación del área de estudio, subcuencas y red de drenaje principal de la cuenca.

Figura 17. Mapa de cobertura y usos del suelo en Ecuador.



FUENTE: Elaboración propia.

5.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación procedente de la superficie del suelo, y la transpiración de la vegetación. Ya sea por evaporación o transpiración, el agua vuelve de la superficie de la tierra a la atmósfera. Aunque la evaporación y transpiración son considerados en conjunto, la transpiración es responsable de mover mayor cantidad de agua que la evaporación. Ambas combinadas, son responsables de devolver al a atmósfera en torno al 50 - 60 % del agua de lluvia caída.

A la hora de tener en cuenta la evapotranspiración para el modelado en el programa HEC-HMS, se ha utilizado el método "Monthly Average", que nos da la posibilidad de introducir un ratio (MM/MONTH) de agua evaporada, el cual ha sido calculado con el método de Thornthwaite que se explica a continuación.

Este método calcula un índice de calor mensual (i) a partir de las temperaturas medias diarias, y con él se computa el índice de calor anual (I) que será utilizado para obtener la ETP (Evapotranspiración Potencial) en mm/día. Este valor debe corregirse en función de los días mensuales y el número de horas de sol diarias, y pasarse a mm/mes para ser utilizado como parámetro en HEC-HMS.

En el Anexo B se pueden ver los valores calculados, introducidos en el programa para posterior modelización de la cuenca.



5.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS AFOROS

Para la calibración del modelo hidrológico, es de vital importancia escoger series de datos de caudales y sedimentos con el mayor número de datos posibles para el periodo de simulación (1981 – 2010). A continuación, se presenta la caracterización de los mismos:

5.7.1 AFOROS DE CAUDALES

Las series de registros de caudales empleadas para la definición del modelo hidrológico, han sido las siguientes:

Tabla 5. Caracterización de los aforos seleccionados.

Estación	% huecos	Longitud serie (días)	Q10 (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)	Qmedio (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Area (km ²)	Fecha inicio	Fecha fin
H0894	34.1	12418	15.841	148.928	55.2401	795.941	3592.63	Jan-80	Jan-14
H0895	13.7	17331	3.453	50.4253	17.9516	314.022	1281.82	Jul-64	Nov-11
H0900	17.2	16584	23.154	193.62	71.2413	1250	3983.59	Oct-63	Mar-09

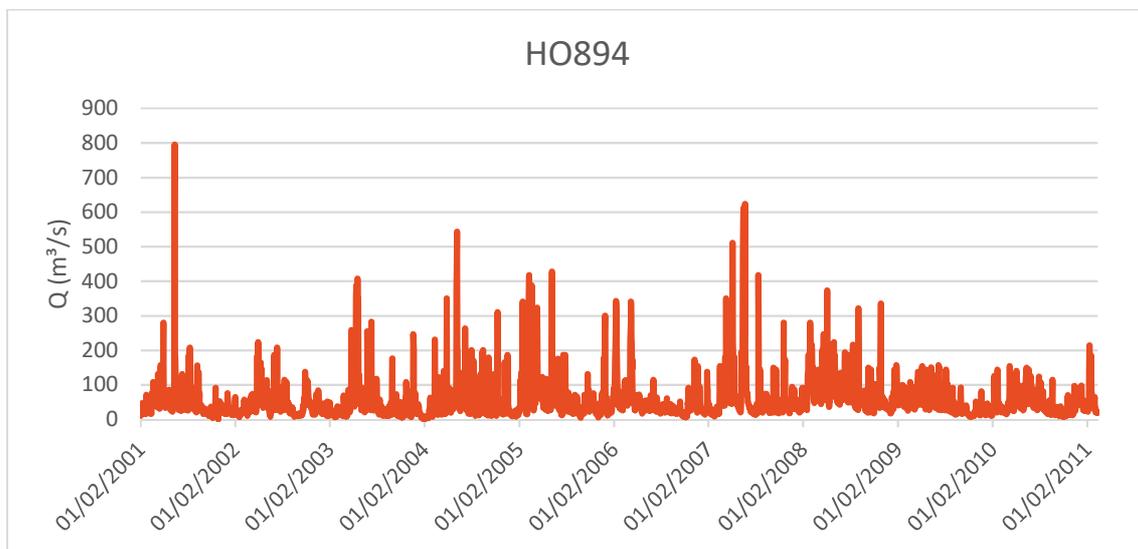
Q10=percentil 10 de los caudales

Q95=percentil 95 de los caudales

FUENTE: Elaboración propia.

A continuación, se muestran las series completas de caudales para las tres estaciones de aforo seleccionadas:

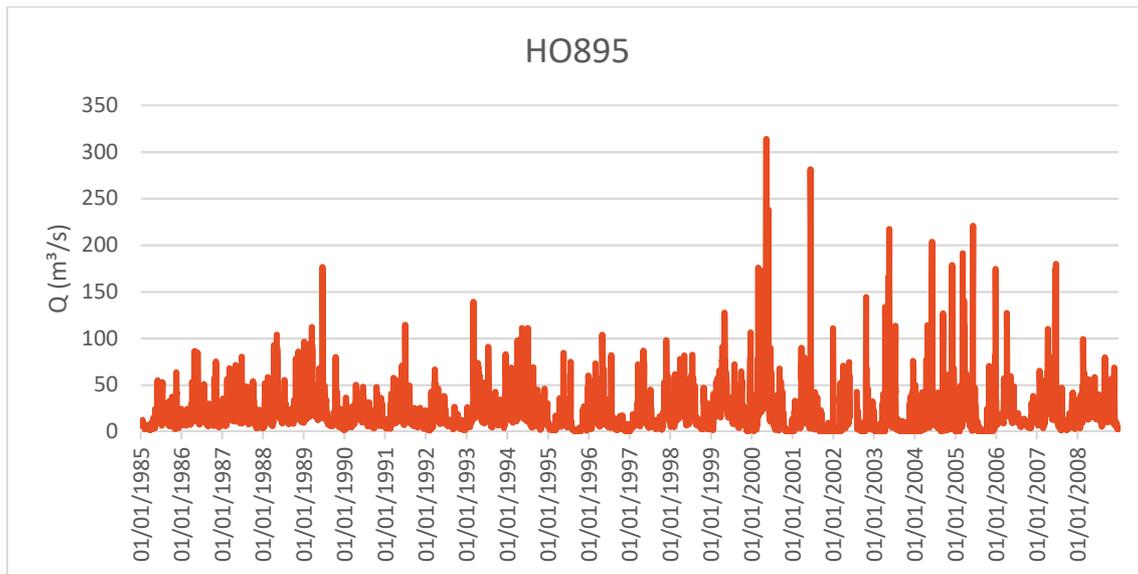
Figura 18. Series de caudales en la estación de aforo H0894.



FUENTE: Elaboración propia.

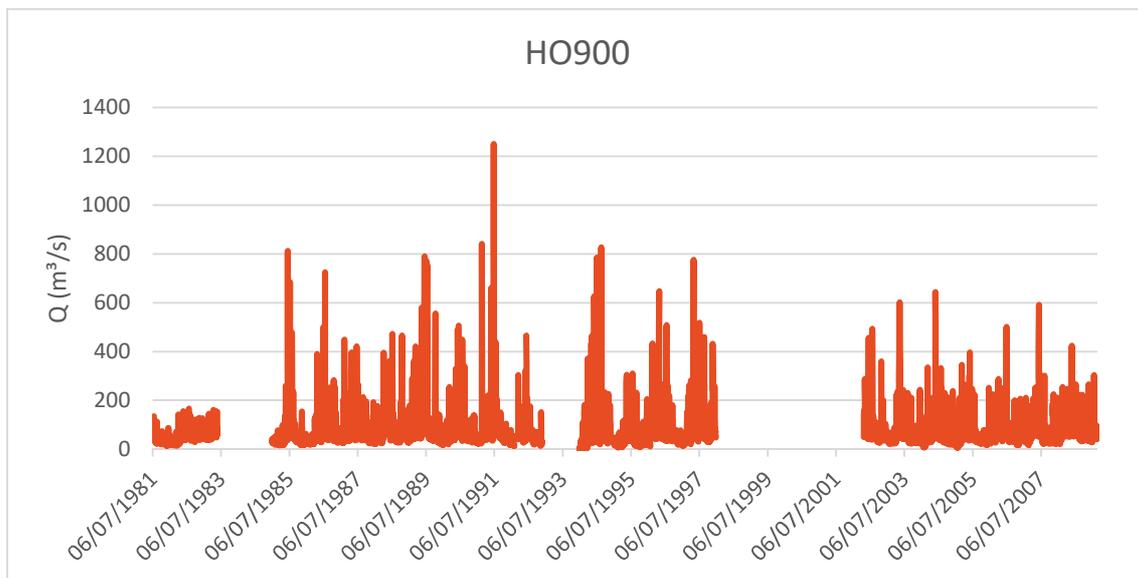


Figura 19. Series de caudales en la estación de aforo H0895.



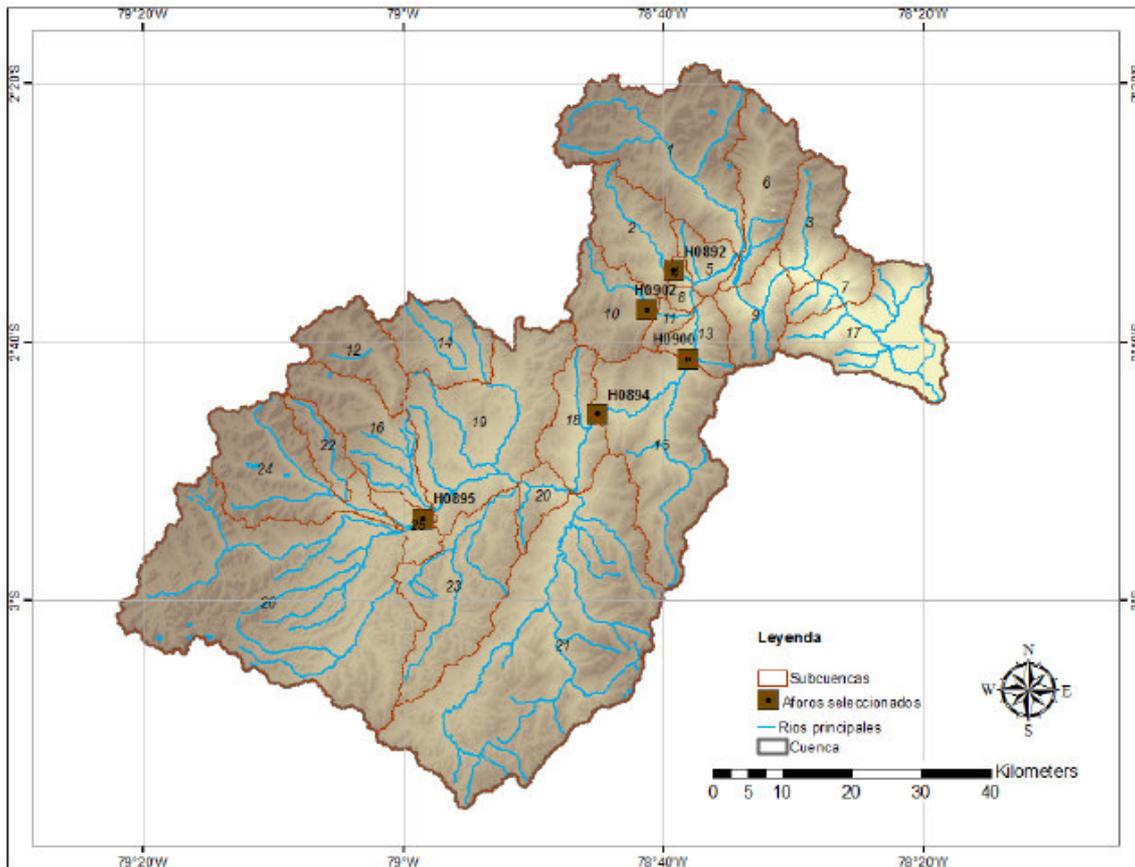
FUENTE: Elaboración propia.

Figura 20. Series de caudales en la estación de aforo H0900.



FUENTE: Elaboración propia.

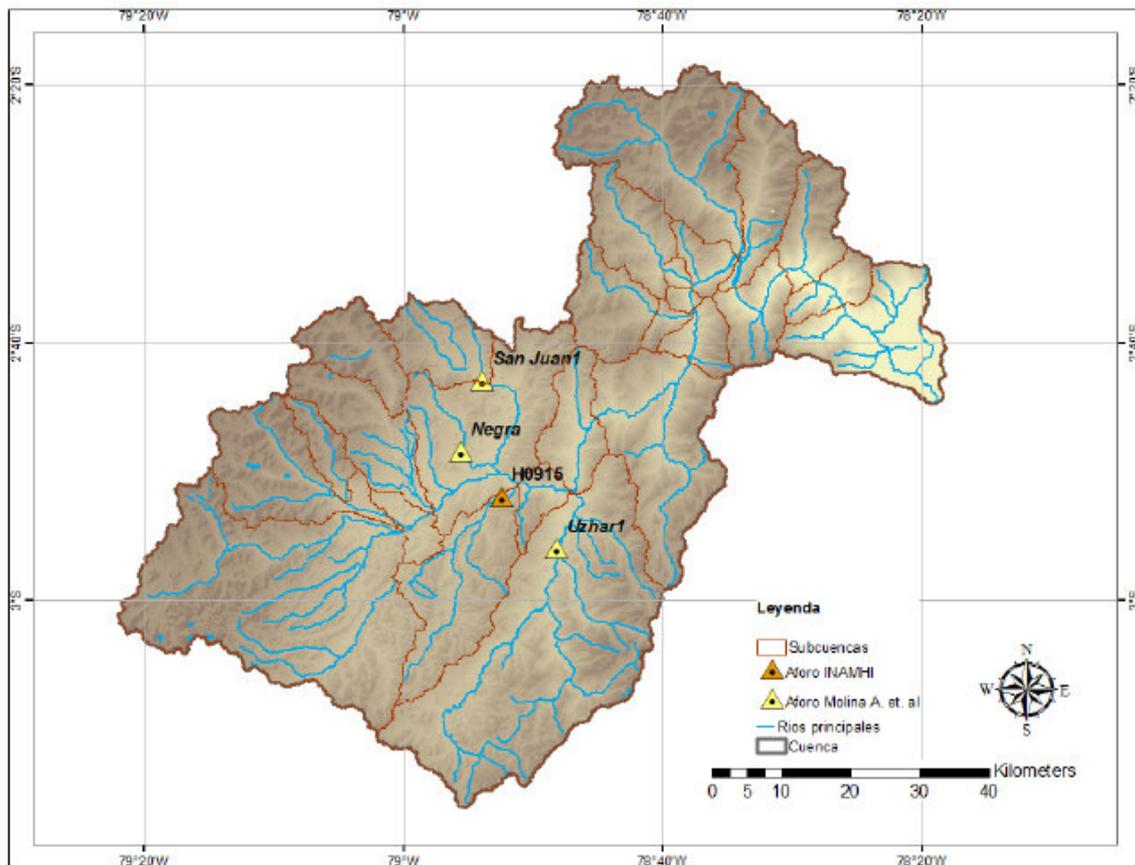
Figura 21. Localización de las estaciones de aforo de los caudales seleccionados.



5.7.2 AFOROS DE SEDIMENTOS

Las series de sedimentos de las que se dispone contienen poca información. Dado la escasa información se ha utilizado la metodología propuesta por (Molina et. al., 2007). Las estaciones seleccionadas se muestran a continuación:

Figura 22. Localización de las estaciones de aforo de los sedimentos seleccionados.



6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para medir el grado de ajuste de nuestra calibración, se van a utilizar los dos principales indicadores de calibración siguiendo las recomendaciones de (Moriasi et. al., 2007): el coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE), la desviación de volumen (PBIAS) y el coeficiente de correlación (R).

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0i} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{0i} - Q_{0m})^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0i} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n (Q_{0i})} * 100$$

NSE: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

PBIAS: Desviación del volumen.

N: Número de parejas de caudales consideradas en el proceso de calibración.

Q_{0i} : Caudal observado en el instante i.

Q_{si} : Caudal simulado en el instante i.

Q^{0m} : Valor medio de los caudales observados a lo largo del período de calibración.

El coeficiente NSE mide la relación entre la varianza de los valores simulados y los observados. Su parámetro óptimo es 1.

El parámetro PBIAS mide la variación de volumen entre el hidrograma observado y simulado. El valor buscado es PBIAS = 0, por lo que se tratará de buscar el valor más cercano posible.



Figura 23. Rangos de eficiencia en la calibración del NSE y PBIAS (%).

CALIDAD DE AJUSTE	NSE	PBIAS (%)
Excelente	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Buena	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Aceptable	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
No aceptable	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Una vez conseguidos unos valores válidos, se puede proceder a aplicar la configuración de los parámetros del modelo a las proyecciones futuras.

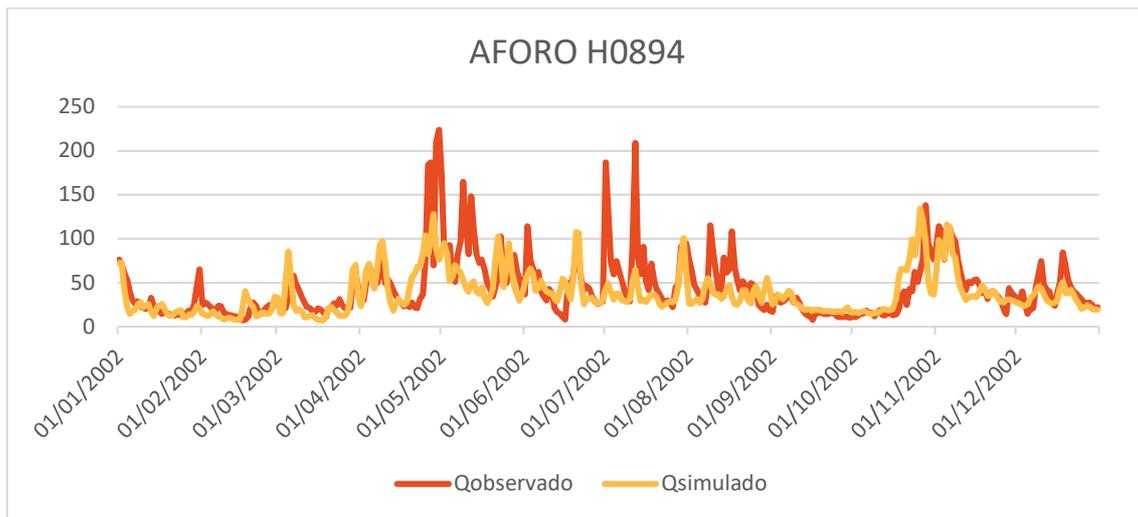
6.1 CALIBRACIÓN DE CAUDALES

6.1.1 ESTACIÓN DE AFORO H0894

La estación de aforo H0894 se ha calibrado para el año 2002 a nivel diario.

Los parámetros empleados en la calibración pueden observarse en el Anexo B.

Figura 24. Caudal simulado y observado para el Aforo H0894.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 25. Correlación Caudal observado – Caudal simulado H0894.

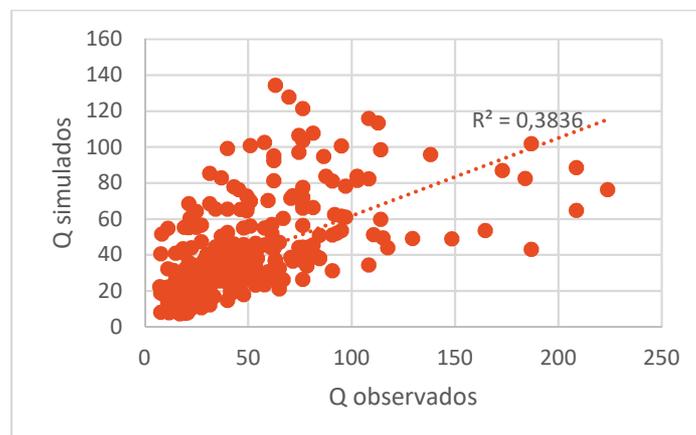


Figura 26. Curva duración frecuencia H0894.

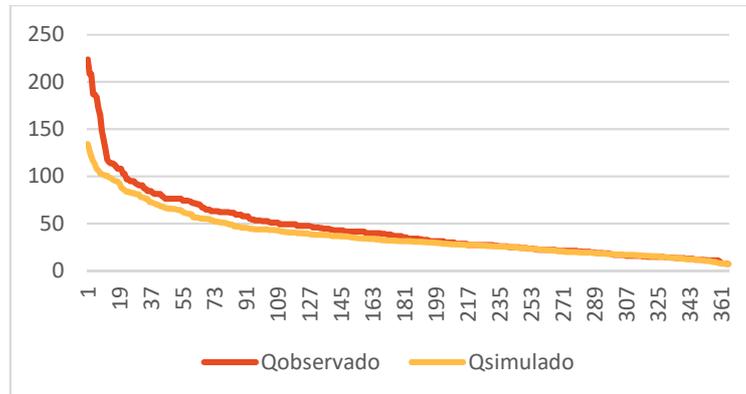


Tabla 6. Calidad del ajuste Aforo H0894.

PIAS (%)		NSE	
Valor	Nivel de ajuste	Valor	Nivel de ajuste
15.267	Bueno	0.745	Bueno - Excelente

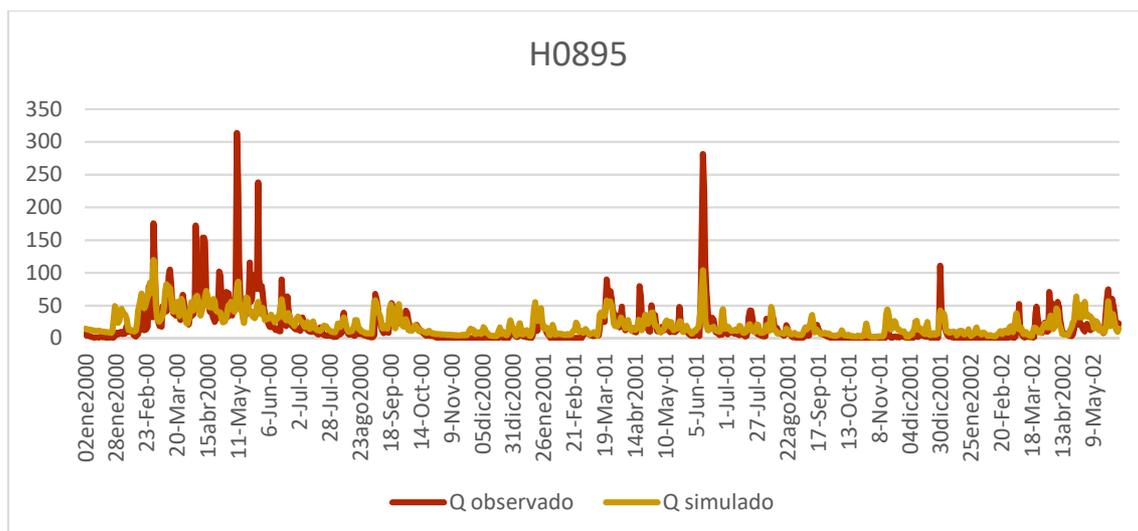
FUENTE: Elaboración propia.

6.1.2 ESTACIÓN DE AFORO H0895

La estación de aforo H0895 se ha calibrado para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2001 a nivel diario.

Los parámetros empleados en la calibración pueden observarse en el Anexo B.

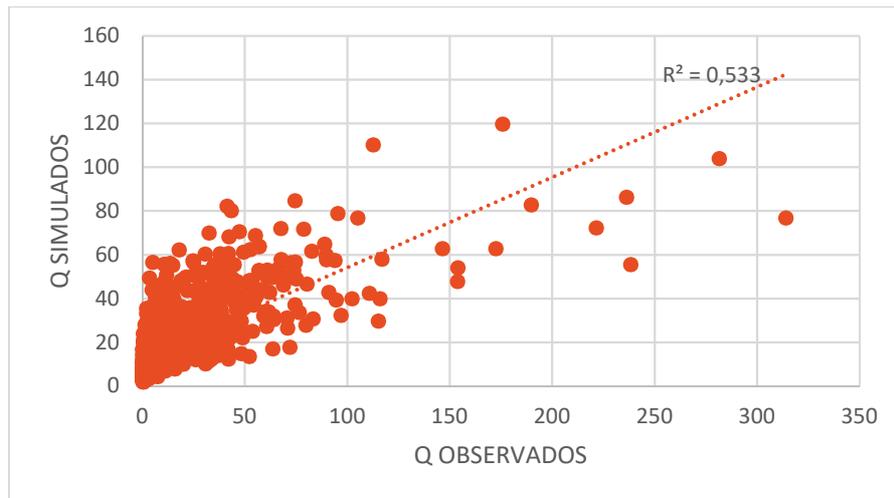
Figura 27. Caudal simulado y observado para el Aforo H0895.



FUENTE: Elaboración propia.

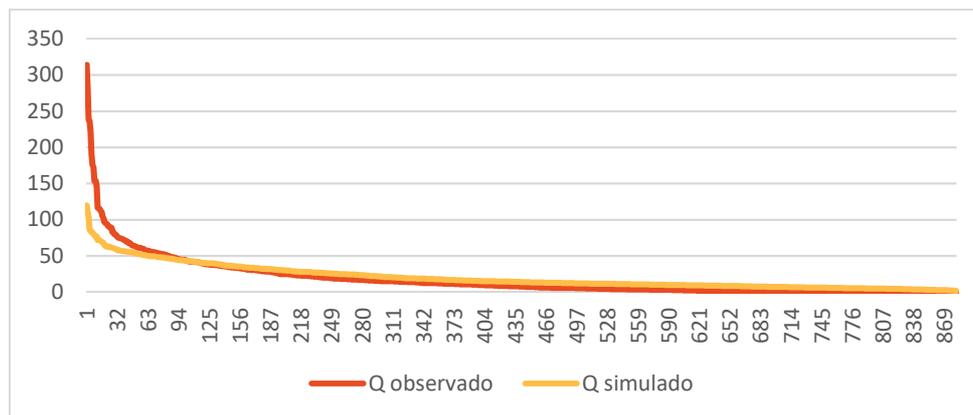


Figura 28. Correlación Caudal observado – Caudal simulado H0894.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 29. Curva duración frecuencia H0894.



FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 7. Calidad del ajuste Aforo H0895.

PIAS (%)		NSE	
Valor	Nivel de ajuste	Valor	Nivel de ajuste
-11.39	Bueno	0.623	Aceptable - Bueno

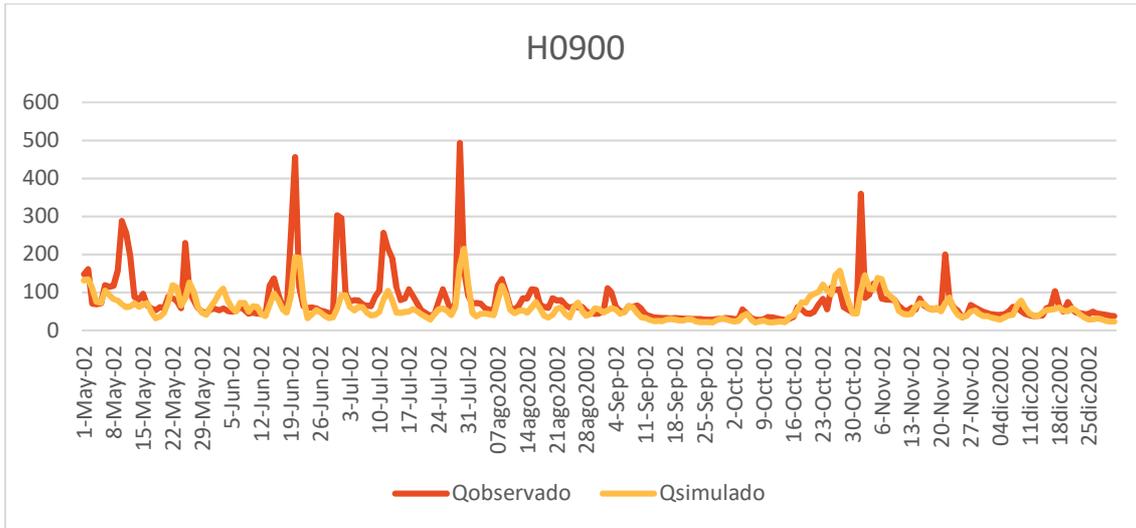
6.1.3 ESTACIÓN DE AFORO H0900

La estación de aforo H0900 se ha calibrado para el año 2002 a nivel diario.

Los parámetros empleados en la calibración pueden observarse en el Anexo B.

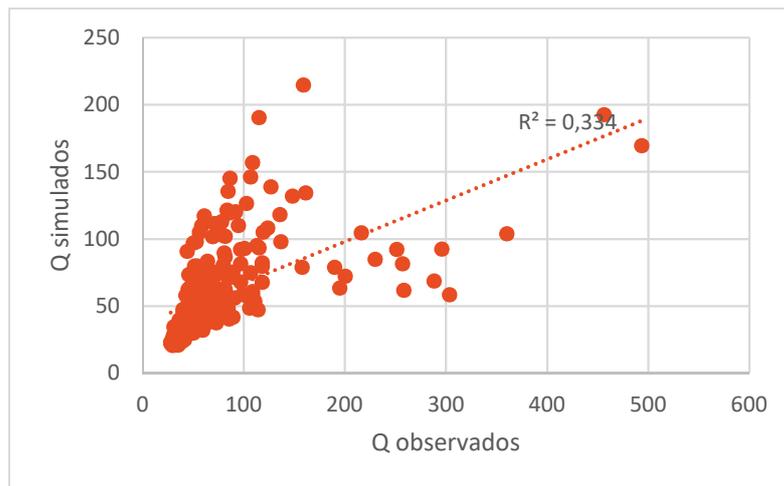


Figura 30. Caudal simulado y observado para el Aforo H0900.



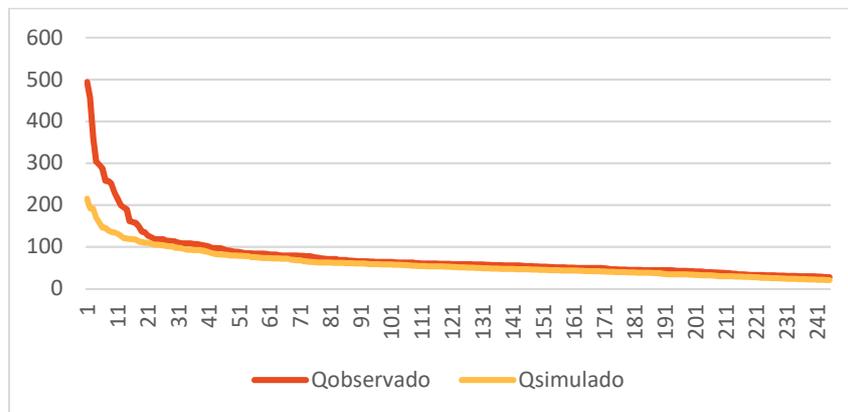
FUENTE: Elaboración propia.

Figura 31. Correlación Caudal observado – Caudal simulado H0900.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 32. Curva duración frecuencia H0900.



FUENTE: Elaboración propia.



Tabla 8. Calidad del ajuste Aforo H0900.

PIAS (%)		NSE	
Valor	Nivel de ajuste	Valor	Nivel de ajuste
21.218	Aceptable	0.702	Bueno

6.2 CALIBRACIÓN DE SEDIMENTOS

Para la calibración de sedimentos en el modelo, se ha utilizado la Universal Soil Loss Equation (USLE) en su versión modificada (MUSLE). Esta se diferencia de la primera en que trata de hacer una estimación para un evento singular, contrario a la estimación promediada a largo plazo que planteaba USLE.

Los parámetros utilizados para su modelado son los siguientes:

- $K \rightarrow$ (Soil Erodibility Factor). Factor de erosionabilidad del suelo. Es la cantidad de suelo perdida debido a la erosividad de la lluvia.
- $L \rightarrow$ (Slope Length Factor). Es un factor adimensional que indica la longitud de la pendiente.
- $S \rightarrow$ (Slope Steepness Factor). Es el factor gradiente de la pendiente: relación entre la pérdida del suelo con un determinado gradiente y el estándar de 9%, a igualdad de los demás factores.
- $C \rightarrow$ (Cover Management Factor). Es el ratio que varía en función de uso y gestión del suelo (rotación de cultivos, uso de los mismos, productividad, gestión de residuos, etc.).
- $P \rightarrow$ (Support Practice Factor). Es el factor de práctica mecánica. La relación entre la pérdida del suelo que se produce como una determinada mecánica (laboreo en contorno, en fajas, en terrazas) y la que ocurre con laboreo a favor de la pendiente.

Los parámetros calibrados utilizados en el modelo, se indican en el Anexo B.

7 ESCENARIOS PLANTEADOS

Tal y como se ha explicado anteriormente con más detalle, los escenarios principales de cambio climático se dividen en cuatro, en función del incremento de radiación: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, para cada uno de los tres horizontes temporales; 2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100.

Una vez calibrado el modelo en HEC-HMS, se utilizan los parámetros calibrados para simular los cambios en los aforos de caudales y sedimentos para cada subcuenca, y para cada escenario RCP.

En este caso, se ha realizado un análisis previo de los cuatro escenarios basándonos en las previsiones de precipitación y temperatura obtenidas y presentadas en la Fase 1 de este documento. Se ha llegado por tanto a la conclusión de que los dos escenarios extremos (RCP 2.6 y RCP 8.5) presentan una probabilidad muy baja de ocurrir, y se utilizan como apoyo teórico para los diferentes estudios de cambio climático.

Por tanto, se van a presentar los resultados para los escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0, que son considerados los más interesantes desde el punto de vista práctico, y abarcan un rango de radiación más probable, con el fin de lograr así unos resultados mucho más ajustados a la realidad.

8 PROYECCIONES DE CAUDALES Y SEDIMENTOS

En el período de referencia (1981 - 2010) observamos caudales medios en las infraestructuras hidroeléctricas del orden de 80 m³/s en las presas y centrales de Mazar y Cardenillo, y de alrededor de 60 m³/s en la presa Daniel Palacios. En estos tres puntos de referencia, el caudal se ve incrementado para los RCP 4.5 y 6.0, alcanzando su máximo para el período de referencia 2071 - 2100 (largo plazo), incrementándose del orden del 26% en las presas Mazar y Cardenillo, y del 27% en la Daniel Palacios.

En la central Paute Sopladora y Paute Molino, los caudales para el escenario de referencia rondan los 70 m³/s, y se ven incrementados hasta en un 27% para el escenario 6.0 y para el largo plazo (2071 - 2100).

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para las cuencas objeto de estudio en las que se encuentran las infraestructuras hidroeléctricas de la cuenca.

8.1 SITUACIÓN ACTUAL

En el período de referencia (1981 – 2010) el caudal medio

En términos de sedimentos, el transporte anual de sólidos, es mayor para la subcuenca W220, coincidiendo con los caudales más bajos. La concentración máxima de sólidos en suspensión se observa en la subcuenca W210, alcanzando los 1860.5 mg/l.

En la siguiente Tabla 9 se observa un resumen para cada infraestructura con los valores comentados para el período de referencia.

Tabla 9. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período de referencia 1981 – 2010.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presas y central Mazar	80.328	2.705	1860.500
Presas Daniel Palacios	62.063	4.235	1071.600
Presas y central Cardenillo	80.682	5.506	1125.180
Central Paute Sopladora	72.614	4.955	1102.676
Central Paute Molino	72.614	4.955	1102.676
Casa de máquinas Dudas	5.706	0.389	800.350
Casa de máquinas Alazán	6.277	0.428	840.368
Casa de máquinas San Antonio	6.277	0.428	840.368

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

8.2 ESCENARIOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada uno de los escenarios y períodos futuros en los diferentes puntos de interés.



8.2.1 ESCENARIO RCP 4.5

Se producen incrementos respecto de la situación actual en torno al 5 - 10% para los caudales, y del 3 - 5% en la concentración de sólidos en suspensión.

Tabla 10. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2011 – 2040 para el escenario RCP 4.5.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	85.951	1.300	1917.670
Presa Daniel Palacios	66.407	6.682	1168.044
Presa y central Cardenillo	86.330	8.687	1226.446
Central Paute Sopladora	77.697	7.818	1201.917
Central Paute Molino	77.697	7.818	1201.917
Casa de máquinas Dudas	6.105	0.614	872.382
Casa de máquinas Alazán	6.716	0.676	916.001
Casa de máquinas San Antonio	6.716	0.676	916.001

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto al medio plazo (2041 - 2070), se producen incrementos en torno al 13 - 16%, y del 5 - 10% en la concentración de sólidos en suspensión.

Tabla 11. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2041 – 2070 para el escenario RCP 4.5.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	91.968	1.367	2009.200
Presa Daniel Palacios	71.056	7.893	1273.168
Presa y central Cardenillo	92.373	10.261	1336.826
Central Paute Sopladora	83.135	9.235	1310.090
Central Paute Molino	83.135	9.235	1310.090
Casa de máquinas Dudas	6.533	0.726	950.896
Casa de máquinas Alazán	7.186	0.798	998.441
Casa de máquinas San Antonio	7.186	0.798	998.441

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

Los mayores incrementos se producen en la proyección de largo plazo (2071 - 2100). En torno al 20 - 25% en los caudales medios, y 7 - 12% en los sólidos en suspensión.



Tabla 12. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2071 – 2100 para el escenario RCP 4.5.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	98.405	1.391	1963.990
Presa Daniel Palacios	76.030	6.447	1387.753
Presa y central Cardenillo	98.839	8.381	1457.141
Central Paute Sopladora	88.955	7.543	1427.998
Central Paute Molino	88.955	7.543	1427.998
Casa de máquinas Dudas	6.990	0.593	1036.476
Casa de máquinas Alazán	7.689	0.652	1088.300
Casa de máquinas San Antonio	7.689	0.652	1088.300

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

8.2.2 ESCENARIO RCP 6.0

Para el RCP 6.0, los incrementos aumentan considerablemente ya desde el escenario corto plazo. Se observan para este período incrementos en los caudales de en torno al 18%, y del 5% en la concentración de sólidos en suspensión.

Tabla 13. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2011 – 2040 para el escenario RCP 6.0.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	94.595	1.109	1354.200
Presa Daniel Palacios	73.081	6.073	1512.651
Presa y central Cardenillo	95.006	7.895	1588.283
Central Paute Sopladora	85.505	7.105	1556.518
Central Paute Molino	85.505	7.105	1556.518
Casa de máquinas Dudas	6.719	0.558	1129.759
Casa de máquinas Alazán	7.391	0.614	1186.247
Casa de máquinas San Antonio	7.391	0.614	1186.247

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se observan los resultados para el RCP 6.0 en el medio plazo (2041 - 2070). Incrementos de entorno al 20% se observan en los caudales, y del 6 - 7% en los sólidos en suspensión.



Tabla 14. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2041 – 2070 para el escenario RCP 6.0.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	96.660	1.395	1993.000
Presa Daniel Palacios	76.131	8.569	1648.789
Presa y central Cardenillo	98.970	11.140	1731.229
Central Paute Sopladora	89.073	10.026	1696.604
Central Paute Molino	89.073	10.026	1696.604
Casa de máquinas Dudas	6.866	0.773	1231.438
Casa de máquinas Alazán	7.553	0.850	1293.010
Casa de máquinas San Antonio	7.553	0.850	1293.010

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

La tabla siguiente, muestra los resultados para el periodo en el que mayor incremento se produce de los estudiados, el largo plazo (2071 - 2100) para el RCP 6.0.

Tabla 15. Caudales medio y máximo, y sólidos transportados en el período 2071 – 2100 para el escenario RCP 6.0.

INFRAESTRUCTURA	Qmed (m ³ /s)	SSY año (x10 ⁵ Tn/año)	TSS (mg/l)
Presa y central Mazar	101.493	1.356	1662.600
Presa Daniel Palacios	79.937	8.232	1797.180
Presa y central Cardenillo	103.918	10.702	1887.040
Central Paute Sopladora	93.527	9.631	1849.299
Central Paute Molino	93.527	9.631	1849.299
Casa de máquinas Dudas	7.209	0.742	1342.267
Casa de máquinas Alazán	7.930	0.817	1409.380
Casa de máquinas San Antonio	7.930	0.817	1409.380

SSY año: sólidos totales transportados (x10⁵ Tn/año).

TSS: sólidos en suspensión (mg/l).

FUENTE: Elaboración propia.

9 CONCLUSIONES

En la primera fase de este informe, se recopilan las series históricas de precipitación y temperatura en la cuenca del río Paute. Partiendo de ellas, y mediante la herramienta de interpolación kriging, se consigue plasmar de una manera muy clara y visual la variabilidad de la cuenca mediante mapas de calor o Heat Maps.

Los cuatro escenarios futuros explicados durante el informe (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5) representan diferentes líneas de tendencia para el incremento de las emisiones de gases efecto invernadero.



A partir de estos cuatro escenarios, se pueden obtener las proyecciones de precipitación y temperatura, tal y como se ha mostrado durante el informe, y con las conclusiones que se detallan a continuación:

- Corto plazo (2011 – 2040): se observan incrementos en la precipitación media de entre un 2,7% y un 12%. Los cambios de temperatura, aumentan del orden de 0,40 - 0,86°C en la cuenca. Los mayores incrementos de precipitación y de temperatura se producen para el escenario RCP 8.5.
- Medio plazo (2041 – 2070): se observan incrementos en la precipitación media de entre un 5% y un 15%. Los cambios de temperatura, aumentan del orden de 0,68 - 1,93°C en la cuenca. Los mayores incrementos de precipitación y de temperatura se producen para el escenario RCP 8.5.
- Largo plazo (2071 – 2100): se observan incrementos en la precipitación media de entre un 5,7% y un 25%. Los cambios de temperatura, aumentan del orden de 0,85 - 3,94°C en la cuenca. Los mayores incrementos de precipitación y de temperatura se producen para el escenario RCP 8.5.

Los mayores incrementos de precipitación se producen en los pluviómetros ubicados en la zona situada al sur meridional de la cuenca, y para la temperatura, se producen en la zona más cálida de la cuenca, cercana a la desembocadura del río Paute.

Estos datos de precipitación y temperatura para escenarios futuros, son el punto de partida para la segunda fase de este estudio: la caracterización hidrológica de la cuenca y obtención de la proyección de caudales y sedimentos en las instalaciones hidroeléctricas seleccionadas.

Para poder caracterizar adecuadamente el clima de una zona, es necesario tener series de datos largas y con gran densidad de estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio. Un escaso número de estaciones o series de datos poco pobladas, impiden realizar estudios precisos.

Es por ello que los resultados obtenidos para el flujo de sedimentos en la cuenca, deben leerse siempre junto a los resultados obtenidos de caudales, y nunca en solitario, pues la falta de datos de partida puede derivar en errores en el modelo. Esta falta de datos de sedimentos, se traduce en una gran sensibilidad de los mismos, que se ha observado al introducir modificaciones en el modelo de los tipos de suelo, tipos de cultivo, y en las variables de la ecuación universal de MUSLE.

La tendencia que se aprecia en la cuenca, es un incremento de la escorrentía de las subcuencas más alejadas de la desembocadura del río, produciendo un incremento de caudal que se incrementa gradualmente hasta el punto de salida, en donde se encuentran las principales instalaciones hidroeléctricas de estudio.

A vista de todo esto, podemos concluir que los incrementos en las precipitaciones y temperaturas estimadas en la primera fase, producen un incremento en los caudales a su paso por las instalaciones hidroeléctricas. De este modo, se aseguraría el buen funcionamiento de las casas de máquinas y centrales de la cuenca (nivel mínimo de operación de las centrales). Por otro lado, el incremento de los caudales proyectados da lugar a un incremento significativo del flujo de sedimentos y sólidos en suspensión, debido principalmente al incremento de la velocidad de flujo del cauce principal. Será por ello vital el estudio de los problemas que pueda causar este incremento de sólidos en las inmediaciones del sistema hidroeléctrico.



10 REFERENCIAS

Análisis de la vulnerabilidad de las centrales hidroeléctricas priorizadas ante los efectos del cambio climático, 2016. IH Cantabria.

Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning, 1986. United States Department of Agriculture.

Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India, 2015. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering.

Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 1997. United States Department of Agriculture.

La ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Universitat Politècnica de Valencia.

HEC-geoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual, 2013. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1, 2007. Universidad de Granada.

Manual de utilización del programa HEC-HMS. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el Modelo WEAP, 2009. Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. Guía Metodológica. Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS.

D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.

Willian, Caballero Guardo (2011). Kriging Universal para Datos Funcionales. Tesis doctoral.

Mapa interactivo ambiental de Ecuador: <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal>

GIS Geography: <http://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>

Kriging para Python: <http://pykriging.com/>

Complejo hidroeléctrico Paute Integral: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/ley-de-transparencia/11-espanol/perfil-corporativo/127-paute-integral.html>

La cuenca del río paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. Políticas de desarrollo agropecuario.

https://www.researchgate.net/profile/Mario_Donosos2/publication/278009785_La_cuenca_de_l_rio_Paute_diagnostico_y_propuesta_de_manejo_integral_Políticas_de_desarrollo_agropecuario/links/57801d6d08ae69ab88241941/La-cuenca-del-rio-Paute-diagnostico-y-propuesta-de-manejo-integral-Políticas-de-desarrollo-agropecuario.pdf



***ANEXO A - Indicadores de
cambio de precipitación y
temperatura.***



A.1 INDICADORES DE CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN ANUAL

1.1 ESCENARIO 2011 – 2040

Tabla 16. Indicadores de proyecciones de precipitación en escenario 2011 – 2040.

	PMEDIA	AP2.6	AP4.5	AP6.0	AP8.5
ESTACIÓN	MA	MA	MA	MA	MA
M1	942,1452717	0,989119285	1,03468315	1,039357119	1,047247033
M2	1285,81863	1,02777139	1,069518431	1,082878868	1,089287937
M3	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M4	1285,81863	1,02777139	1,069518431	1,082878868	1,089287937
M5	942,1452717	0,989119285	1,03468315	1,039357119	1,047247033
M6	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M7	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M8	1285,81863	1,02777139	1,069518431	1,082878868	1,089287937
M9	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M10	1058,536168	1,087399833	1,105890633	1,113779773	1,119774398
M11	1285,81863	1,02777139	1,069518431	1,082878868	1,089287937
M12	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M13	1342,83959	1,0213052	1,052591456	1,06885998	1,079231156
M14	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M15	1342,83959	1,0213052	1,052591456	1,06885998	1,079231156
M16	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M17	1958,778541	1,070314569	1,095132442	1,111252451	1,125727199
M18	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M19	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M20	740,7138754	1,022288558	1,04147459	1,053390042	1,053874913
M21	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M22	740,7138754	1,022288558	1,04147459	1,053390042	1,053874913
M23	740,7138754	1,022288558	1,04147459	1,053390042	1,053874913
M24	709,9615134	1,017436028	1,048091818	1,055844335	1,059508705
M25	1213,620265	1,05247249	1,081770164	1,089718548	1,097883545
M26	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M27	788,5855673	1,057327812	1,078538678	1,077983258	1,089173467
M28	1067,209753	1,02420468	1,046408132	1,05043277	1,056078752
M29	2914,348658	1,03546148	1,07936117	1,087145433	1,101615921
M30	677,2683944	1,065998838	1,089284923	1,10007916	1,098111027

MA: Coeficiente unitario de incremento de la precipitación media anual respecto a la precipitación base.

FUENTE: Elaboración propia.



1.2 ESCENARIO 2041 – 2070

Tabla 17. Indicadores de proyecciones de precipitación en escenario 2041 – 2070.

ESTACIÓN	PMEDIA	AP2.6	AP4.5	AP6.0	AP8.5
	MA	MA	MA	MA	MA
M1	942,1452717	1,051131026	1,055909515	1,055802188	1,09251063
M2	1285,81863	1,101040191	1,101982211	1,110107028	1,149055275
M3	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M4	1285,81863	1,101040191	1,101982211	1,110107028	1,149055275
M5	942,1452717	1,051131026	1,055909515	1,055802188	1,09251063
M6	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M7	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M8	1285,81863	1,101040191	1,101982211	1,110107028	1,149055275
M9	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M10	1058,536168	1,129631565	1,141476832	1,144758581	1,183069145
M11	1285,81863	1,101040191	1,101982211	1,110107028	1,149055275
M12	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M13	1342,83959	1,102227022	1,109904345	1,11200662	1,166148606
M14	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M15	1342,83959	1,102227022	1,109904345	1,11200662	1,166148606
M16	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M17	1958,778541	1,125683086	1,135815248	1,14484385	1,186747695
M18	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M19	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M20	740,7138754	1,06263234	1,094813456	1,084558278	1,147257107
M21	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M22	740,7138754	1,06263234	1,094813456	1,084558278	1,147257107
M23	740,7138754	1,06263234	1,094813456	1,084558278	1,147257107
M24	709,9615134	1,070773482	1,092361364	1,084259742	1,163154279
M25	1213,620265	1,096297283	1,115799199	1,113079266	1,171102858
M26	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M27	788,5855673	1,084863363	1,115871365	1,113918597	1,170545346
M28	1067,209753	1,064995463	1,080496933	1,08759922	1,14793585
M29	2914,348658	1,105659806	1,12167157	1,129296452	1,167331304
M30	677,2683944	1,094656048	1,132382153	1,119461205	1,188904389

MA: Coeficiente unitario de incremento de la precipitación media anual respecto a la precipitación base.

FUENTE: Elaboración propia.



1.3 ESCENARIO 2071 – 2100

Tabla 18. Indicadores de proyecciones de precipitación en escenario 2071 – 2100.

ESTACIÓN	PMEDIA	AP2.6	AP4.5	AP6.0	AP8.5
	MA	MA	MA	MA	MA
M1	942,1452717	1,014121745	1,068850037	1,08713818	1,177628778
M2	1285,81863	1,057165175	1,118610977	1,130127714	1,241860125
M3	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M4	1285,81863	1,057165175	1,118610977	1,130127714	1,241860125
M5	942,1452717	1,014121745	1,068850037	1,08713818	1,177628778
M6	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M7	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M8	1285,81863	1,057165175	1,118610977	1,130127714	1,241860125
M9	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M10	1058,536168	1,089153986	1,141510473	1,158751893	1,26466235
M11	1285,81863	1,057165175	1,118610977	1,130127714	1,241860125
M12	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M13	1342,83959	1,062424984	1,127770763	1,145208108	1,265732583
M14	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M15	1342,83959	1,062424984	1,127770763	1,145208108	1,265732583
M16	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M17	1958,778541	1,093540951	1,138857937	1,145902077	1,271134472
M18	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M19	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M20	740,7138754	1,043026758	1,104791489	1,115939604	1,238326117
M21	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M22	740,7138754	1,043026758	1,104791489	1,115939604	1,238326117
M23	740,7138754	1,043026758	1,104791489	1,115939604	1,238326117
M24	709,9615134	1,043941948	1,108901719	1,134214326	1,272603022
M25	1213,620265	1,069832142	1,125076179	1,147957978	1,265118656
M26	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M27	788,5855673	1,065131277	1,132166657	1,153684237	1,246311761
M28	1067,209753	1,025736024	1,102291072	1,129617779	1,251872766
M29	2914,348658	1,071269741	1,127635604	1,149592165	1,264221171
M30	677,2683944	1,083882004	1,148825785	1,15825883	1,27075297

MA: Coeficiente unitario de incremento de la precipitación media anual respecto a la precipitación base.

FUENTE: Elaboración propia.



A.2 INDICADORES DE CAMBIO EN LA TEMPERATURA ANUAL

2.1 ESCENARIO 2011 – 2040

Tabla 19. Indicadores de proyecciones de temperatura en escenario 2011 – 2040.

	Tª MEDIA	ΔT 2.6	ΔT 4.5	ΔT 6.0	ΔT 8.5
M1	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M2	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M3	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M4	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M5	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M6	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M7	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M8	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M9	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M10	21,45342	0,568275	0,665916	0,512583	0,756463
M11	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M12	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M13	21,45342	0,568275	0,665916	0,512583	0,756463
M14	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M15	21,45342	0,568275	0,665916	0,512583	0,756463
M16	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M17	21,08738	0,381338	0,484031	0,324304	0,575036
M18	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M19	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M20	24,12176	0,657849	0,760346	0,591056	0,861374
M21	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M22	24,12176	0,657849	0,760346	0,591056	0,861374
M23	24,12176	0,657849	0,760346	0,591056	0,861374
M24	24,10563	0,673975	0,776472	0,607182	0,8775
M25	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M26	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M27	14,41054	8,487024	8,585126	8,429962	8,67386
M28	14,41054	0,24065	0,31218	0,210283	0,362125
M29	22,31065	-7,65945	-7,58792	-7,68982	-7,53798
M30	22,31065	0,586924	0,685025	0,529861	0,77376

ΔT: °C de incremento de la temperatura media anual

FUENTE: Elaboración propia.



2.2 ESCENARIO 2041 – 2070

Tabla 20. Indicadores de proyecciones de temperatura en escenario 2041 – 2070.

	Tª MEDIA	ΔT 2.6	ΔT 4.5	ΔT 6.0	ΔT 8.5
M1	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M2	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M3	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M4	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M5	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M6	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M7	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M8	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M9	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M10	21,45342	0,881921	1,346968	1,219678	1,709197
M11	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M12	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M13	21,45342	0,881921	1,346968	1,219678	1,709197
M14	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M15	21,45342	0,881921	1,346968	1,219678	1,709197
M16	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M17	21,08738	0,682628	1,129714	1,009904	1,502971
M18	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M19	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M20	24,12176	1,009036	1,530875	1,392773	1,936227
M21	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M22	24,12176	1,009036	1,530875	1,392773	1,936227
M23	24,12176	1,009036	1,530875	1,392773	1,936227
M24	24,10563	1,025162	1,547002	1,408899	1,952353
M25	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M26	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M27	14,41054	8,812214	9,297716	9,167324	9,667437
M28	14,41054	0,446823	0,76288	0,674227	1,001141
M29	22,31065	-7,45328	-7,13722	-7,22587	-6,89896
M30	22,31065	0,912113	1,397615	1,267223	1,767337

ΔT : °C de incremento de la temperatura media anual

FUENTE: Elaboración propia.



2.3 ESCENARIO 2071 – 2100

Tabla 21. Indicadores de proyecciones de temperatura en escenario 2071 – 2100.

	Tª MEDIA	ΔT 2.6	ΔT 4.5	ΔT 6.0	ΔT 8.5
M1	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M2	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M3	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M4	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M5	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M6	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M7	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M8	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M9	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M10	21,45342	1,057678	1,827933	1,923894	3,139383
M11	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M12	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M13	21,45342	1,057678	1,827933	1,923894	3,139383
M14	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M15	21,45342	1,057678	1,827933	1,923894	3,139383
M16	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M17	21,08738	0,849621	1,608859	1,698697	2,899921
M18	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M19	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M20	24,12176	1,201725	2,073163	2,177827	3,544247
M21	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M22	24,12176	1,201725	2,073163	2,177827	3,544247
M23	24,12176	1,201725	2,073163	2,177827	3,544247
M24	24,10563	1,217851	2,08929	2,193953	3,560373
M25	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M26	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M27	14,41054	8,997541	9,801023	9,894725	11,1526
M28	14,41054	0,576441	1,084229	1,14482	1,948561
M29	22,31065	-7,32366	-6,81587	-6,75528	-5,95154
M30	22,31065	1,097441	1,900922	1,994624	3,2525

ΔT: °C de incremento de la temperatura media anual

FUENTE: Elaboración propia.



ANEXO B – Parámetros de calibración del modelo.



B.1 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES

Tabla 22. Parámetros de calibración de caudales en las subcuencas seleccionadas.

PARÁMETROS	UNIDAD	SUBCUENCAS																						
		W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280	W290	W300	W310	W320	W330	W340	W350	W360	W370	W380	W390	W400	W410	W420
CANOPY																								
INITIAL STORAGE	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAX STORAGE	mm	10	10	5	3	3	15	15	15	215	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	10	15	15
SURFACE																								
INITIAL STORAGE	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAX STORAGE	mm	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
LOSS																								
SOIL	%	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
GW1	%	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
GW2	%	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
MAX INFILTRATION	mm/hr	7	7	7	3	3	15	10	15	15	15	15	15	10	15	10	10	10	10	15	15	7	7	7
IMPERVIOUS	%	30	30	30	70	70	35	30	35	35	35	35	30	35	30	30	30	30	35	35	30	30	30	30
SOIL STORAGE	mm	150	150	150	140	140	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
TENSION STORAGE	mm	140	140	110	100	100	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	140	110	110
SOIL PERCOLATION	mm/hr	5	5	5	1	1	5	20	5	5	5	5	20	5	20	20	20	20	5	5	5	5	5	5
GW1 STORAGE	mm	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
GW1 PERCOLATION	mm/hr	2	2	2	1	1	5	20	5	5	5	5	20	5	20	20	20	20	5	5	2	2	2	2
GW1 COEFFICIENT	hr	80	80	80	100	80	100	80	80	80	100	100	80	150	80	80	80	80	150	150	80	80	80	80
GW2 STORAGE	mm	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
GW2 PERCOLATION	mm/hr	0.0125	0.0125	0.0125	0.0001	0.0001	0.001	0.2	0.001	0.001	0.001	0.001	0.2	0.001	0.2	0.2	0.2	0.2	0.001	0.001	0.013	0.013	0.013	0.013
GW2 COEFFICIENT	hr	1000	1000	1000	2000	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
BASEFLOW																								
GW1 INITIAL	m ³ /s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GW1 COEFFICIENT	hr	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1100	1000	1000	1000	1000	1000	1000
GW1 RESERVOIRS	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GW2 INITIAL	m ³ /s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GW2 COEFFICIENT	hr	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2500	2500	2500	2500	2000	2000	2200	2000	2000	2000	2000	2000	2000
GW2 RESERVOIRS	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

FUENTE: Elaboración propia.



B.2 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE SEDIMENTOS

Tabla 23. Parámetros de calibración de sedimentos en las cuencas seleccionadas.

MODIFIED USLE				
SUBCUENCAS	Erodibility Fac	Topographic F	Cover Factor	Practice Factor
W200	0.14	10	0.03	1
W210	0.45	10	0.01	1
W220	0.05	15	0.2	0.2
W230	0.14	8	0.03	0.7
W240	0.14	11	0.03	1
W250	0.14	6	0.03	0.23
W260	0.14	7	0.03	0.25
W270	0.14	3	0.03	0.2
W280	0.14	8	0.03	0.07
W290	0.14	7	0.03	0.17
W300	0.14	7	0.03	0.01
W310	0.14	9	0.03	0.3
W320	0.14	8	0.03	0.8
W330	0.14	25	0.03	0.85
W340	0.14	5	0.03	1
W350	0.14	1.5	0.03	1
W360	0.14	6.5	0.03	1
W370	0.14	7	0.03	0.8
W380	0.14	10	0.03	0.8
W390	0.45	10	0.01	1
W400	0.05	15	0.2	0.2
W410	0.05	15	0.2	0.2
W420	0.05	15	0.2	0.2

FUENTE: Elaboración propia.



B.3 PARÁMETROS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

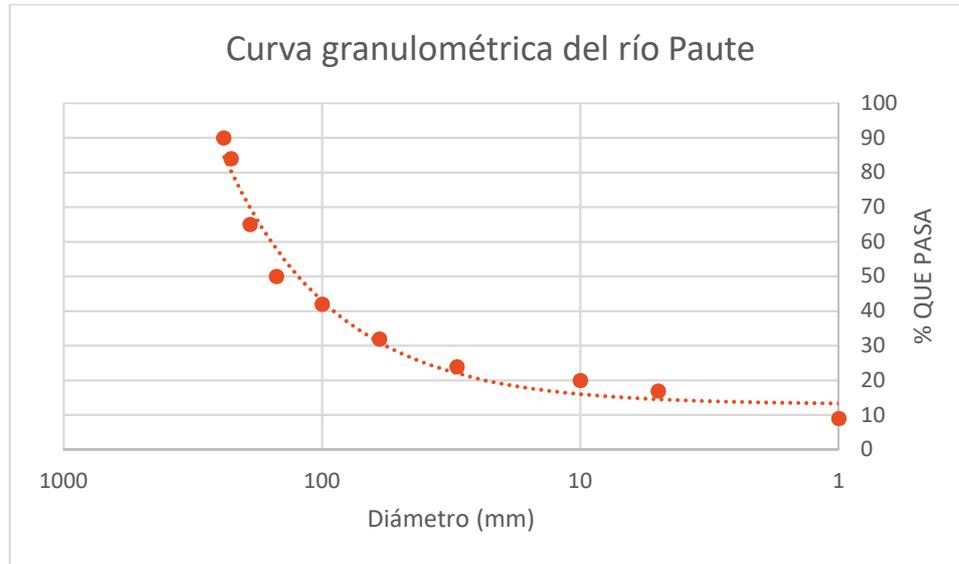
Tabla 24. Parámetros de Evapotranspiración Mensual (mm/mes) para las cuencas seleccionadas.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
W200	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W210	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W220	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W230	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W240	89.49	86.87	90.36	86.16	80.07	69.75	62.60	65.51	75.74	88.32	95.30	92.93
W250	89.49	86.87	90.36	86.16	80.07	69.75	62.60	65.51	75.74	88.32	95.30	92.93
W260	63.34	59.08	59.33	57.57	55.38	50.50	44.45	47.76	54.19	60.28	63.63	63.22
W270	115.17	108.21	109.77	103.63	99.47	88.51	79.06	81.81	95.86	112.38	122.01	119.81
W280	115.17	108.21	109.77	103.63	99.47	88.51	79.06	81.81	95.86	112.38	122.01	119.81
W290	63.34	59.08	59.33	57.57	55.38	50.50	44.45	47.76	54.19	60.28	63.63	63.22
W300	115.17	108.21	109.77	103.63	99.47	88.51	79.06	81.81	95.86	112.38	122.01	119.81
W310	63.34	59.08	59.33	57.57	55.38	50.50	44.45	47.76	54.19	60.28	63.63	63.22
W320	115.17	108.21	109.77	103.63	99.47	88.51	79.06	81.81	95.86	112.38	122.01	119.81
W330	97.19	91.23	91.41	86.62	84.36	76.95	71.89	73.17	82.33	93.07	99.19	101.45
W340	97.19	91.23	91.41	86.62	84.36	76.95	71.89	73.17	82.33	93.07	99.19	101.45
W350	97.19	91.23	91.41	86.62	84.36	76.95	71.89	73.17	82.33	93.07	99.19	101.45
W360	63.34	59.08	59.33	57.57	55.38	50.50	44.45	47.76	54.19	60.28	63.63	63.22
W370	116.93	107.76	106.19	101.24	97.96	88.19	81.26	84.72	95.77	112.46	119.53	120.77
W380	116.93	107.76	106.19	101.24	97.96	88.19	81.26	84.72	95.77	112.46	119.53	120.77
W390	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W400	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W410	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71
W420	85.31	81.95	84.81	81.43	76.68	67.65	64.46	67.39	76.81	87.49	92.36	89.71

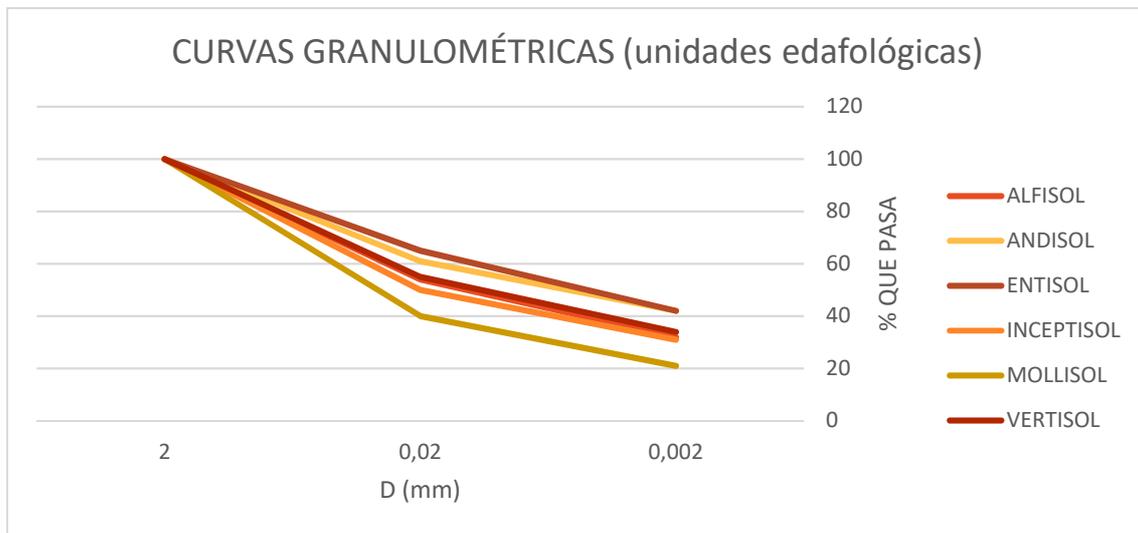
FUENTE: Elaboración propia.



B.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS CUENCA



Gráfica 2. Curva granulométrica del río Paute. Elaboración propia. FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 3. Curvas granulométricas (unidades edafológicas). Elaboración propia. FUENTE: Elaboración propia.