



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN LA CUENCA DEL
RÍO COCA**

AUTOR: CHAMORRO CAICEDO, LEONARDO DAVID

**DIRECTOR: ING: MASABANDA CAISAGUANO, MARCO VINICIO
PH.D.**

SANGOLQUÍ

2020



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO COCA”* fue realizado por el señor *Chamorro Caicedo, Leonardo David* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de enero del 2020

Ing. Marco Vinicio Masabanda Caisaguano Ph.D.

C.C 1802179190



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Chamorro Caicedo, Leonardo David*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Incidencia del cambio climático en la determinación del caudal ecológico en la cuenca del río Coca* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 28 de enero del 2020

Leonardo David Chamorro Caicedo

C.C.: 2300439334



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

*Yo, **Chamorro Caicedo, Leonardo David** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Incidencia del cambio climático en la determinación del caudal ecológico en la cuenca del río Coca en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Sangolquí, 28 de enero del 2020

Leonardo David Chamorro Caicedo

C.C.:2300439334

DEDICATORIA

El siguiente trabajo de titulación va dedicado a mis padres, María Caicedo Andrade y Jorge Chamorro Haro. Sin el constante apoyo incondicional de los dos seres que me dieron la vida no habría podido lograr la tarea titánica de culminar la ingeniería. Con pocas palabras y muchos actos siempre supieron darme la fortaleza necesaria para seguir adelante cada día a lo largo de estos años.

Así mismo quiero dedicárselo a la familia que formé recientemente en 2018, mi compañera de vida, Shirley Durán y a mi hija Luna Victoria. Ellas dos fueron el motor físico, mental y emocional que me ayudo siempre a nunca desfallecer incluso en las situaciones más difíciles. Siempre pensando en ellas seguí hasta el final.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por el apoyo incondicional y constante que me brindaron a lo largo de los años.

A mis hermanos, por guiarme en la aventura de la vida de un adulto joven.

A mi compañera de vida, Shirley, por apoyarme y darme consuelo en los momentos más difíciles.

A mis amigos del GAP, Ricardo, Ernesto, Byron, todos estos años en la Universidad no hubieran sido gratos si ustedes no hubieran estado. Los recuerdos de las risas en las madrugadas de trabajos, las giras y las clases en la ESPE perdurarán por siempre.

A mi tutor, Ing. Marco Masabanda, por haber sido lo que necesitaba durante mi estancia en esta Universidad: un excelente docente y un gran amigo.

A mi docente, Ing. Washington Sandoval, por haberme guiado durante este proceso de titulación y por haber sido uno de los mejores docentes que he tenido durante mi vida, siempre con su carisma y predisposición para ayudar a sus estudiantes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e Importancia.....	2
1.3 Planteamiento del Problema	4
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Caudal.....	7
2.2 Caudal Ecológico.....	7
2.3 Meteorología y sus variables.	8
2.3.1 Humedad	8
2.3.2 Temperatura.....	8
2.3.3 Precipitación	8
2.4 Cambio climático.	9
2.4.1 Cambio climático en Ecuador.	10

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	24
3.1 Procesamiento de datos hidrológicos y meteorológicos	24
3.1.1 Parámetros estadísticos	24
3.1.2 Homogenización de las series: Método de la racha.....	26
3.2 Métodos de relleno de datos	27
3.2.1 Método de regresión lineal para el relleno de datos.....	27
3.2.2 Método de promedios aritméticos	28
3.2.3 Método de completación por regresiones múltiples.....	28
3.3 Metodología para la delimitación de la cuenca y parámetros geomorfológicos.	28
3.4 Metodología para el cálculo de factores climatológicos.....	30
3.4.1 Precipitación media: método de las isoyetas	30
3.4.2 Temperatura media: método de las isotermas	30
3.4.3 Caudal medio anual	30
3.4.4 Caudal ecológico.....	31
3.4.5 Coeficiente de escorrentía.....	31
CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA	35
4.1 Delimitación de la cuenca.....	35
4.2 Línea divisoria	36
4.3 Perímetro de la cuenca.....	37
4.4 Área de drenaje	37
4.5 Río Principal	37
4.6 Orden de la corriente	38
4.7 Forma de la cuenca	39
4.8 Factor de forma (kf).....	41
4.9 Densidad de Drenaje.....	42
4.10 Sinuosidad de las corrientes de agua	42
4.11 Propiedades de relieve de la cuenca	43
4.12 Pendiente de la cuenca.....	43
4.13 Altura media de la cuenca	45
4.14 Pendiente del río Principal.....	47
4.15 Tabla resumen de resultados.....	48

4.16 Tiempos de concentración	50
4.17 Curva hipsométrica.....	51
CAPÍTULO V: ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA Y SU INFORMACIÓN HIDROMETEOROLOGICA.....	52
5.1 Obtención de series climatológicas.	52
5.2 Precipitación	52
5.3 Temperatura.....	57
5.4 Caudales.....	59
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE FACTORES CLIMATOLÓGICOS Y TENDENCIAS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.	62
6.1 Cálculo de la precipitación media de la cuenca.....	62
6.2 Cálculo de la temperatura media de la cuenca.	68
6.3 Caudales.....	72
6.3.1 Cálculo del coeficiente de escorrentía.....	73
6.3.2 Cálculo del caudal medio anual de la cuenca.....	74
6.4 Relación de factores climatológicos.	81
6.5 Caudal ecológico.	83
6.6 Impacto en Coca Codo Sinclair.	86
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
7.1 CONCLUSIONES.....	87
7.2 RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Cálculo del coeficiente de escorrentía según Prevert.....</i>	31
Tabla 2	<i>Valores de coeficientes K para el cálculo de coeficiente de escorrentía según Nadal....</i>	32
Tabla 3	<i>Coeficientes k_1, k_2, k_3, k_4</i>	33
Tabla 4	<i>Coeficiente de escorrentía por Schwab.....</i>	34
Tabla 5	<i>Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad</i>	40
Tabla 6	<i>Límites de coeficiente de forma (k_f)</i>	41
Tabla 7	<i>Valores de la pendiente de la cuenca.....</i>	45
Tabla 8	<i>Valores de altura del relieve</i>	46
Tabla 9	<i>Tabla resumen de parámetros morfológicos de la cuenca</i>	49
Tabla 10	<i>Resumen de tiempos de concentración de la cuenca calculada.....</i>	51
Tabla 11	<i>Estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio</i>	53
Tabla 12	<i>Precipitación media anual con datos rellenos mediante correlación lineal</i>	56
Tabla 13	<i>Estaciones con datos de temperatura más representativos de la cuenca</i>	58
Tabla 14	<i>Cálculo de precipitación media de la cuenca para el año 2005.....</i>	64
Tabla 15	<i>Cálculo de precipitación media de la cuenca para el año 2008.....</i>	65
Tabla 16	<i>Precipitación media anual de la cuenca del río Coca</i>	66
Tabla 17	<i>Cálculo de temperatura media de la cuenca para el año 2004</i>	69
Tabla 18	<i>Cálculo de temperatura media de la cuenca para el año 2005</i>	70
Tabla 19	<i>Temperatura media anual de la cuenca del río Coca.....</i>	71
Tabla 20	<i>Coeficiente de escorrentía de la cuenca según varios autores</i>	73
Tabla 21	<i>Caudal medio anual en función de la precipitación media anual de la cuenca</i>	80
Tabla 22	<i>Caudal ecológico en el período 2004-2013</i>	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas Globales en Océanos y Superficies.....	4
Figura 2. Caudal ecológico en embalse de Eugi, España.....	7
Figura 3. Pluviómetro.....	9
Figura 4. Promedio mundial de temperatura en superficie desde 1850 hasta 2000	10
Figura 5. Valores de cambio de temperatura Año 1960-2006	11
Figura 6. Valores de cambio de precipitación Año 1960-2006	12
Figura 7. Relación Inter-estacional entre altura de la estación y la precipitación cuantificada ..	13
Figura 8. Cambios promedio proyectados entre los modelos de cambio climático en precipitación, evapotranspiración y escorrentía.	14
Figura 9. Reducción de la cubierta glaciaria del Cotopaxi 1976-2006.....	15
Figura 10 . Modelo conceptual de amenazas que afectan la integridad ecológica de la cordillera real oriental.	17
Figura 11. Porcentaje de cambio de caudales medios, máximos y mínimos en el mundo para el período del 2070-2100 en comparación al período 1970-2000.....	18
Figura 12. Cambio promedio mensual en la temperatura del Antisana desde el periodo (1979-2003) hasta el futuro cercano (2015-2039).....	19
Figura 13. Variación del caudal del río Juval en base al modelo SWAT.	20
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso para la delimitación de unidades hidrográficas.	29
Figura 15. Delimitación de la cuenca del río Coca	36
Figura 16. Área de la cuenca hidrográfica del río Coca.....	37
Figura 17. Esquema de la cuenca del río Coca hasta el punto de control en la casa de máquinas.....	38
Figura 18. Orden de los ríos afluentes y principales	39
Figura 19. Pendientes en la cuenca	44
Figura 20. Representación de la cuenca proyectada sobre el MDE.	47
Figura 21 Curva hipsométrica de la cuenca	51
Figura 22. Mapa de isoyetas media anual. Serie 1981-2010.....	53
Figura 23. Esquema referencial de la ubicación de las estaciones dentro de la cuenca.....	54
Figura 24. Serie de la estación Lumbaqui con datos faltantes en rojo y datos existentes en verde	55
Figura 25. Relación altura vs temperatura del año 2012 con datos faltantes en rojo.....	57
Figura 26. Relación altura vs temperatura del año 2012 con datos completados por correlación lineal.	58
Figura 27 . Períodos secos y húmedos a través de los años en base a los caudales	60
Figura 28. Sitio de toma de caudales en la unión del río Salado con el río Quijos.....	61
Figura 29. Mapa de Isoyetas del año 2013.....	63
Figura 30. Variación de la precipitación media anual de la cuenca a través del tiempo	67
Figura 31. Mapa de isotermas del año 2004 modelado en ArcMap.....	68
Figura 32. Variación de la temperatura media anual en el período 2004-2014	72

Figura 33. Variación del caudal medio anual según los datos medidos en el sitio de toma Salado.....	72
Figura 34. Variación del caudal medio anual en función de la precipitación. Período 2004-2013.....	80
Figura 35. Comparación de temperatura, precipitación y caudal medio anual en el período 2004-2013.....	82
Figura 36 Variación del caudal ecológico en el período 2004-2013	85

RESUMEN

El cambio climático ha sido uno de los principales objetos de estudio en las últimas décadas debido al impacto que está teniendo en el mundo. Cambios en diferentes variables climatológicas como la temperatura y precipitación a lo largo de los años han preocupado a la comunidad científica globalmente ya que afectan directamente a las fuentes de agua las cuales tienen efectos adversos sobre el ecosistema y sobre las poblaciones aledañas que se benefician de estas fuentes. El objetivo de la presente investigación es identificar el impacto que puede sufrir la cuenca del río Coca en cuanto a la determinación de caudales y la conservación de caudales ecológicos para el beneficio del ecosistema y la población. Para cumplir este objetivo se analiza estadísticamente las series de estaciones climatológicas instaladas en la cuenca y provisionadas por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, a lo largo de los años, para identificar la tendencia que estas variaciones están tomando. Los análisis realizados indican una tendencia decreciente en la temperatura de la cuenca y una tendencia creciente en la precipitación, caudales y caudales ecológicos de la cuenca, con un aumento estimado de hasta el 20% en el caudal ecológico de la cuenca para el año 2050.

PALABRAS CLAVE:

- **PRECIPITACION**
- **TEMPERATURA**
- **CAUDAL**
- **CAMBIO CLIMÁTICO**

ABSTRACT

Climate change has been one of the main objects of study in recent decades due to the impact it is having on the world. Changes in different climatic variables such as temperature and precipitation over the years have worried the scientific community globally since they directly affect water sources which have adverse effects on the ecosystem and nearby populations that benefit from these sources. The objective of the present investigation is to identify the impact that Coca river basin can suffer in terms of the determination of flows and the conservation of ecological flows for the benefit of the ecosystem and population. To reach this objective, series of weather stations installed in the basin and provisioned by the National Institute of Hydrology and Meteorology, over the years, are statistically analyzed to identify the trend that these variations are taking. The analyzes carried out indicate a decreasing trend in the temperature of the basin and an increasing trend in the precipitation, flows and ecological flows of the basin, with an estimated increase of up to 20% in the ecological flow of the basin by 2050

KEYWORDS:

- **RAINFALL**
- **TEMPERATURE**
- **FLOW**
- **CLIMATE CHANGE**

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

(Sánchez, 2018) en su artículo de investigación “El cambio climático y los caudales ecológicos elementos determinantes de la construcción de nuevas obras hidráulicas en España” expone el estudio llevado a cabo en algunas obras de fábrica de ciertas localidades de España y como se evidenciaría el impacto del cambio climático con el aumento de la evapotranspiración y reducción de precipitación por el aumento de temperatura anual propuesto como una realidad inminente.

(Pacheco, 2018) en la investigación “Estudio de los efectos del cambio climático en las capacidades del embalse La Mica” genera series sintéticas para el cálculo de la regulación de caudales considerando un escenario sin cambio climático y dos escenarios con cambio climático en los cuales se daba un aumento y reducción de 50% de los caudales en cada uno de los caudales. En este estudio se determinó una garantía de aproximadamente 98% del aumento de caudal en 50% con y sin cambio climático. Y una probabilidad del 64% en la reducción de caudal.

(Gómez, 2012) en el “Estudio del Impacto del Cambio Climático en los Caudales de Entrada al Embalse del Río Frío” se analizó la afectación de los caudales de entrada al embalse hasta el año 2100 para poder verificar si las demandas proyectadas al año 2070 se cumplen considerando un posible impacto del cambio climático. Se determinó que los caudales de entrada se reducirían en un 20% y las demandas que se proyectaron fueron sobreestimadas.

1.2 Justificación e Importancia

A nivel mundial en los últimos años se ha publicado miles de estudios en los cuales se asegura que el planeta está sufriendo serios cambios ambientales que no pueden ser simplemente ignorados. El cambio climático es el fenómeno que provoca variaciones inesperadas en los parámetros del clima y en Ecuador, (Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología , 2011) considera que “el Ecuador es un país sujeto a variaciones en el tiempo, clima, agua y que de ello depende en gran parte su desarrollo, entonces, se requiere información hidrometeorológica fiable y oportuna para planificar estrategias a mediano y largo plazo”.

Muchas obras civiles se diseñan en base a datos hidrometeorológicos los cuales le dan una idea al diseñador de los eventos que pueden ocurrir y como pueden afectar a la obra civil. Si el diseñador no tuviera acceso a estos estudios para el cálculo de la infraestructura, su diseño podría ser erróneo.

El (Ministerio del Ambiente, 2012) indica que el Ecuador está empezando a vivir los efectos del cambio climático y que se debe tomar las medidas necesarias para poder procurar el bienestar económico del país, ya que el cambio climático puede llegar a crear un impacto que afecte a todos los sectores del gobierno ecuatoriano y a su economía.

Según el (Ministerio del Ambiente, 2012) los principales efectos que se pueden producir en el Ecuador como consecuencia del cambio climático son la intensificación de eventos climáticos extremos, el incremento del nivel del mar, el retroceso de los glaciares, la disminución de la escorrentía anual, entre otros. Los principales efectos mencionados anteriormente son los mas probables a afectar los caudales de los ríos de nuestro país.

Ya desde el año de 1974 a 1998 el incremento en temperatura de la región andina central fue de 0.34 C, mientras que el promedio a nivel mundial fue de 0.2 C, es decir en la región andina central se ha incrementado en un 70% más que el promedio mundial (Amat y León , 2008). Este calentamiento que ha sido registrado es la principal causa, según varios expertos, de la reducción del hielo de los glaciares de nuestra región andina, en dónde se ha podido observar mediante evidencias fotográficas que estos se han disminuido considerablemente.

Con la reducción de los glaciares se tendrá un progresivo aumento del escurrimiento en la cuenca, pero a medida de que vayan desapareciendo, esta tendencia se invertirá con una progresiva desaparición de los caudales (Ramírez, 2006), esto quiere decir que así mismo los caudales ecológicos que se hayan calculado en algún punto de control de la cuenca, también se verán afectados por este aumento y reducción del escurrimiento mencionado.

En la constitución del Ecuador se indica que el estado ecuatoriano “adoptará las medidas necesarias para mitigar el cambio climático luchando contra las emisiones de gases de invernadero, deforestación y contaminación atmosférica”. (Asamblea Constituyente , 2008).

El cambio climático afecta a todos y cada uno de los aspectos de la vida diaria. Con nuestra sociedad cimentada en los recursos que nos ofrece la naturaleza, es imprescindible tratar de predecir los resultados que van a darse por los cambios en el clima que se han evidenciado y mencionado para poder prever situaciones extremas y actuar ahora con un cierto margen de seguridad. Esta investigación le dará a la ingeniería civil el aporte que necesita para prepararse para posibles eventos en los cuales se puedan afectar las obras civiles y el entorno en el cual se desarrollan.

1.3 Planteamiento del Problema

A nivel mundial, los expertos han lanzado la alarma sobre el cambio climático y como puede afectar este a todo el planeta. Mientras en unos lugares la temperatura ha aumentado más que en otros, en promedio, se ha producido un crecimiento de 0.85°C desde 1880 a 2010 (Hansen, Persin , Hendrickson , Sato, & Lo, 2010) como se indica en la Figura 1:

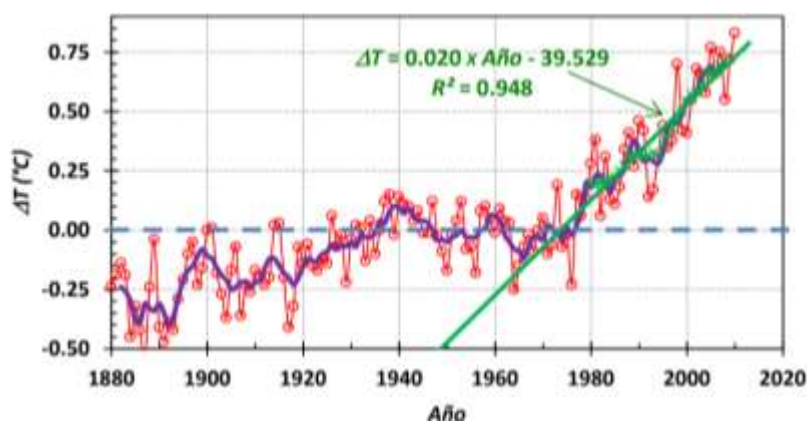


Figura 1. Temperaturas Globales en Océanos y Superficies.

Fuente: (Hansen, Persin , Hendrickson , Sato, & Lo, 2010)

Estos cambios tienen impactos en los casquetes polares de la tierra los cuales se han visto reducidos por el aumento de la temperatura.

A nivel nacional, de acuerdo con los análisis de la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (Ministerio del Ambiente del Ecuador , 2011), entre los impactos más probables que se podrían verificar en el Ecuador se destacan:

La intensificación de eventos climáticos extremos, como los ocurridos a causa del fenómeno “Oscilación Sur El Niño”

El incremento del nivel del mar;

El retroceso de los glaciares;

La disminución de la escorrenfía anual;

El incremento de la transmisión de dengue y otras enfermedades tropicales;

La expansión de las poblaciones de especies invasoras en Galápagos y otros ecosistemas sensibles del Ecuador continental;

La extinción de especies. Los impactos sobre la población, infraestructura y producción podrían ser considerables.

Con estas problemáticas mencionadas es fácil pensar en una pérdida de miles de millones de dólares que se generará a partir de los desastres que provocan todos estos impactos.

En la estrategia nacional para el cambio climático se señala que: “para el año 2025 el país perdería aproximadamente US\$ 5,6 billones por efectos de eventos extremos meteorológicos generados por el cambio climático.” (Ministerio del Ambiente, 2012)

Según Bolívar Cáceres, experto del INAMHI, se estima que, en los próximos 12 años, la temperatura aumente 1.5°C provocando con esto el deshielo de los glaciares de los nevados más prominentes de nuestra cordillera, entre ellos el Antisana, el cual aporta dentro de la subcuenca hidrográfica del río Coca. El deshielo del Antisana y otros glaciares de nuestro país tiene como consecuencia directa la reducción del recurso hídrico lo cual influirá directamente en el volumen del caudal ecológico existente ya que el valor de este estaría por debajo de los caudales mínimos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Determinar el impacto del cambio climático en el proceso de determinación de caudales ecológicos para la cuenca del río Coca hasta la zona del proyecto Coca-Codo-Sinclair.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la información hidrometeorológica y el estado actual de la cuenca del río Coca.
- Definir los parámetros hidrológicos y climatológicos de la cuenca del río Coca.
- Determinar la incidencia del cambio climático en los parámetros hidrológicos y climatológicos de la cuenca del río Coca.
- Calcular el caudal ecológico en la cuenca del río Coca considerando la incidencia del cambio climático en la zona de estudio.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Caudal

El caudal no es más que una cantidad de volumen de un líquido que pasa por un área determinada en función del tiempo. En hidrología se utiliza el caudal para referirse al volumen de agua cuantificado en una unidad de tiempo. El estudio y determinación de los caudales ha sido una actividad llevada a cabo prácticamente desde que la matemática y la física tuvieron lugar en la historia. En la actualidad, el estudio de los caudales es la base para cualquier obra de ingeniería a pequeña, mediana o gran escala como lo podría ser el diseño hidrosanitario de una casa o también el diseño vías, hidroeléctricas, puentes, etc.

2.2 Caudal Ecológico

Se entiende por caudal ecológico a la cantidad de agua mínima necesaria que debe recorrer un recurso hídrico como los ríos para mantener sus características ambientales como su flora y fauna, disolución de los contaminantes que atraviesan los ríos, el mantenimiento del paisaje del río, entre otras. Este caudal se da como una restricción a las actividades de explotación de los recursos hídricos tales como riego, toma de agua potable, embalses. En otras palabras, “un caudal ecológico



Figura 2. Caudal ecológico en embalse de Eugi, España.

Fuente: (Biblioteca Pública de San Jorge, 2013)

es aquel que evita la degradación ambiental del curso de agua, su cauce y su ribera” (Beceiro, 2010).

2.3 Meteorología y sus variables.

La meteorología es la ciencia que estudia la atmósfera, sus fenómenos, sus variables y elementos. El estudio de la atmósfera se lleva a cabo profundizando en lo que son sus elementos y fenómenos como la temperatura, humedad, presión atmosférica, las cuales varían siempre dependiendo del lugar y el tiempo en el cual estas sean identificadas (Rodríguez, 2014).

2.3.1 Humedad

Según (Rodríguez, 2014) la humedad es la cantidad de agua que se encuentra en la atmósfera a manera de vapor. Como se dijo anteriormente, la humedad no es constante en todo el planeta, dependerá mucho del lugar en donde se mida esta magnitud, la humedad será mayor en lugares que se encuentren más cercanos al nivel del mar.

2.3.2 Temperatura

La temperatura, en física, es la cantidad de calor que irradia un objeto. La temperatura se relaciona directamente con la sensación que definimos los seres humanos como caliente o frío. En la meteorología, es la cantidad de calor que se puede percibir dentro de la atmósfera. Esta cantidad de energía liberada en la atmósfera afecta directamente a todas las demás variables meteorológicas.

2.3.3 Precipitación

La precipitación es la cantidad de agua que se precipita desde las nubes a la tierra. La determinación de la precipitación se da en altura de lámina de agua, la cual se mide en milímetros (mm) en un área de 1 metro cuadrado (1m²).



Figura 3. Pluviómetro.
Fuente: Wikipedia

2.4 Cambio climático.

El cambio climático no es un fenómeno reciente, éste se ha venido dando desde el nacimiento de nuestro planeta y es una actividad que siempre está presente a lo largo de los millones de años de existencia de la tierra. Pero hay un hecho en el cual coinciden los expertos en cambio climático alrededor del mundo, este fenómeno se ha intensificado con la actividad humana, más precisamente, a partir de la revolución industrial.

A partir de la revolución industrial, las actividades humanas han basado su desarrollo en la quema de combustibles fósiles. Según (Camilloni, 2008) estas actividades hacen que el efecto invernadero se desarrolle cada vez más por la acumulación de CO₂ y *“muy probablemente son las principales responsables de ese cambio durante, por lo menos, los últimos cincuenta años.”*

El calentamiento global es un fenómeno innegable que se puede evidenciar por el cambio climático que se ha producido en todo el planeta y los fenómenos que han sido consecuencia de esto como el deshielo de glaciares, aumento de temperatura del aire, aumento del nivel del mar según indica (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).

Según el análisis realizado a los escenarios de cambio climático del AR5, la temperatura promedio global podría estar aumentando hasta 4.8°C al final del siglo, si no se llevan a cabo acciones internacionales con el objetivo de reducir el cambio climático. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017)

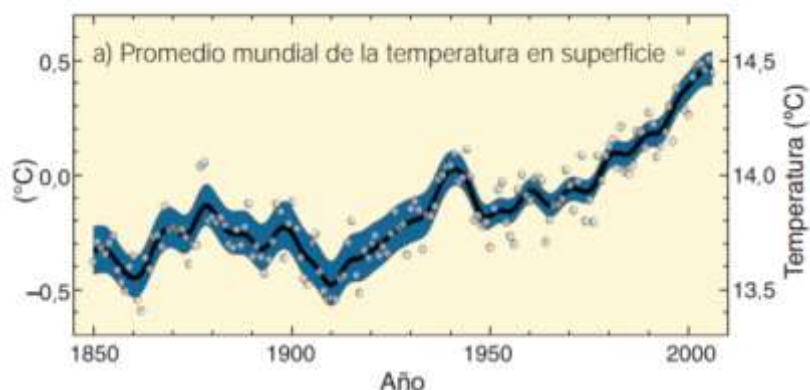


Figura 4. Promedio mundial de temperatura en superficie desde 1850 hasta 2000
Fuente: (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008)

2.4.1 Cambio climático en Ecuador.

2.4.1.1 Temperatura

Según (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2011) en la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático se han recopilado análisis que evidencian los impactos que podríamos tener en contexto Nacional como desastres climáticos extremos que dan en pérdidas humanas y monetarias. También se toma las declaraciones del (Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, 2011) que señalan “*un incremento en la temperatura media, máxima y mínima anual en todo el territorio nacional, con algunas excepciones en ciertas zonas. Entre 1960 y 2006 la temperatura media anual se incrementó en $0,8^{\circ}\text{C}$, la temperatura máxima absoluta en $1,4^{\circ}\text{C}$ y la temperatura mínima absoluta en $1,0^{\circ}\text{C}$.*”

En este caso de la temperatura las provincias más afectadas son el Sur de Cotopaxi, Tungurahua Cañar y Azuay como podemos observar en la *Figura 4*. Estos cambios concuerdan con lo expuesto por el (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008) acerca de el incremento innegable de temperatura ambiental.

La temperatura es la variable principal en el cambio climático. Si la temperatura aumenta, quiere decir que hay una mayor liberación de energía, mayor evaporación y evapotranspiración por parte de las plantas por lo tanto esto se condensará y la precipitación aumentará.

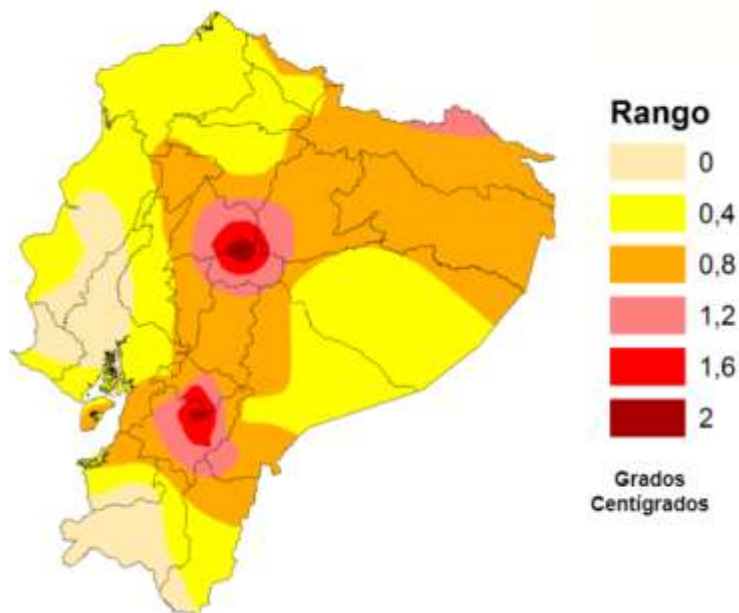


Figura 5. Valores de cambio de temperatura Año 1960-2006
Fuente: (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2011)

2.4.1.2 Precipitación

Las variaciones en la precipitación a nivel nacional han sido también uno de los factores que se han evidenciado en los análisis hechos en los últimos años. Según (Instituto Nacional de

Hidrología y Meteorología , 2011), “la cantidad anual de precipitación entre los años 1960 y 2006 ha variado de manera diferenciada en las regiones, con cierta tendencia hacia el incremento en zonas de la Sierra y en toda la Costa. En promedio, la precipitación anual se incrementó en un 33% en la Región Litoral y en un 8% en la Región Interandina”.

En la costa ecuatoriana, más concretamente en Guayaquil, se pudo identificar un desfase en la época de lluvias entre los años 2000 a 2006; así mismo existió la presencia de eventos extremos de precipitación con un período corto. Estas anomalías se han podido asemejar a las ya existentes en la amazonia ecuatoriana según se indicó en la Segunda Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2011).

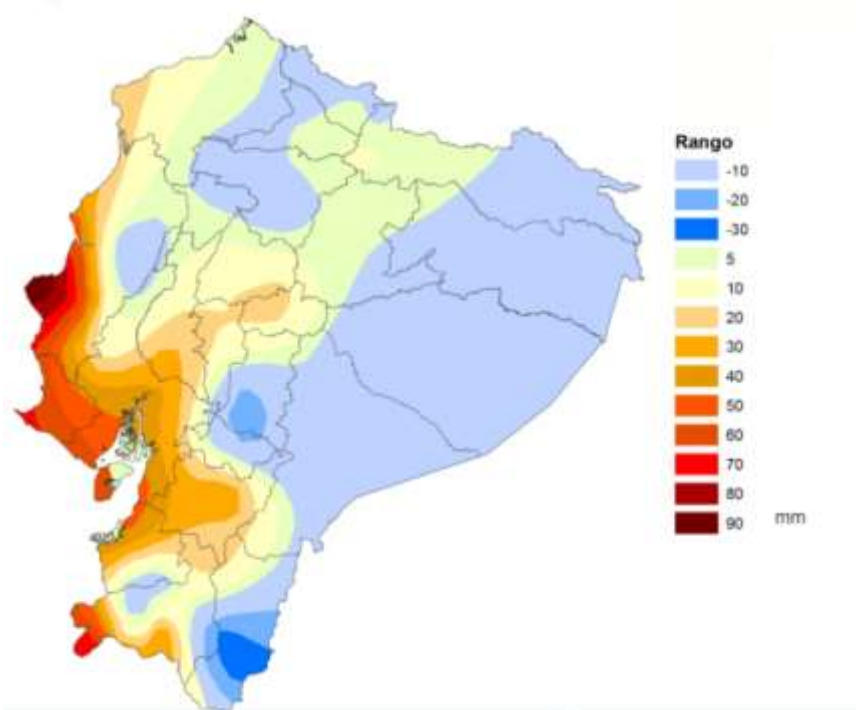


Figura 6. Valores de cambio de precipitación Año 1960-2006
Fuente: (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2011)

Según (Espinoza Villar, y otros, 2010) nuestro país se encuentra mayoritariamente en la zona lluviosa de la cuenca Amazónica. En la parte baja-llana del oriente ecuatoriano anualmente se miden lluvias de hasta 5000 mm anuales. Esto diferencia mucho de la zona andina de nuestro país en la cual podemos encontrar lluvias de hasta 1000 mm anuales o menos. Esto depende mucho de la relación lluvia-altura y de la dirección del viento que han podido analizar (Espinoza Villar, y otros, 2010) en su estudio.

En el caso de los Andes resulta difícil calcular la tendencia de las precipitaciones por la poca existencia de datos históricos y también porque el fenómeno de El Niño es un factor muy importante en la precipitación. (Schoolmeester, y otros, 2018). Los cambios que se han dado en las variables inmiscuidas en la precipitación tales como su frecuencia, duración o estacionalidad, han hecho que eventos extremos tales como sequías o inundaciones se intensifiquen y se conviertan en una problemática que abarca pérdidas de vidas y monetarias (Naranjo, 2010).

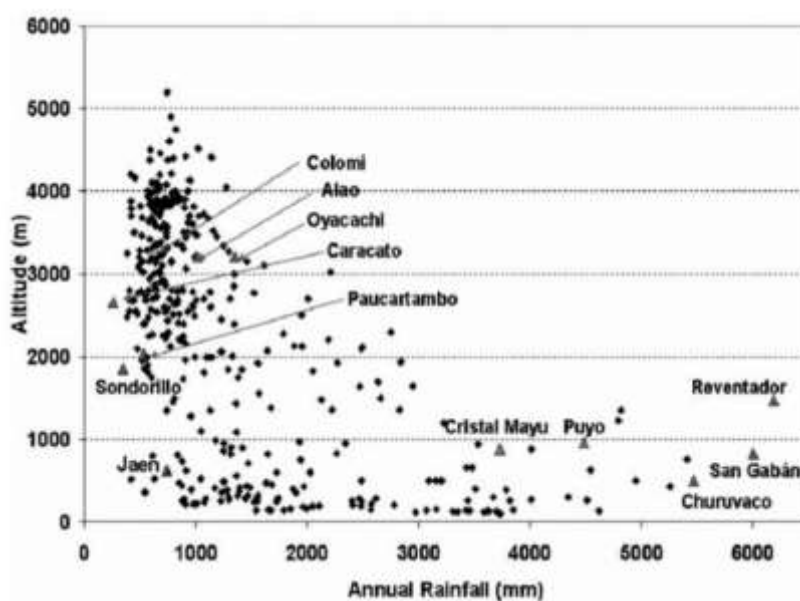


Figura 7. Relación Inter-estacional entre altura de la estación y la precipitación cuantificada

Fuente: (Espinoza Villar, y otros, 2010)

Según un estudio realizado por (Sorribas, y otros, 2016) mediante el análisis de varios escenarios de cambio climático en la cuenca del río Amazonas, deberíamos esperar un aumento de 35% en las precipitaciones hasta el final del siglo.

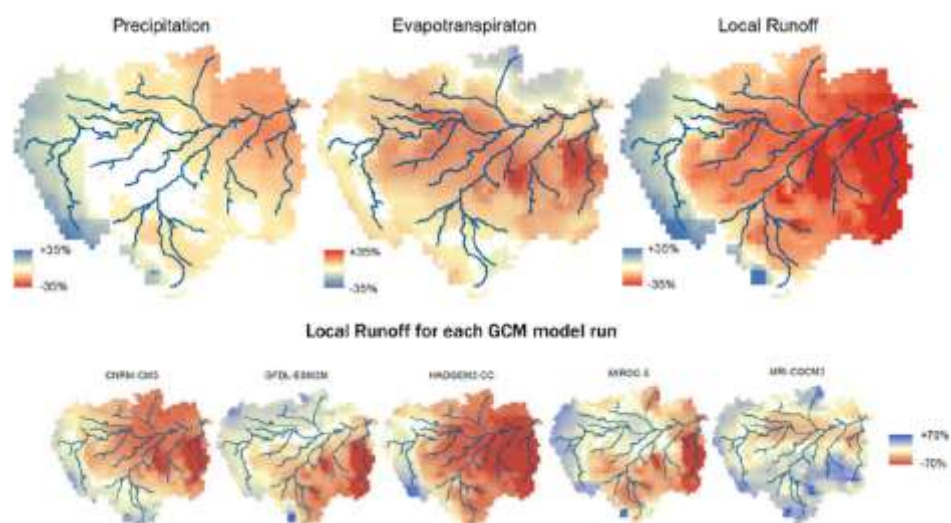


Figura 8. Cambios promedio proyectados entre los modelos de cambio climático en precipitación, evapotranspiración y escorrentía.

Fuente: (Sorribas, y otros, 2016)

2.4.1.3 Glaciares

Otro de los efectos que se ha manifestado en los últimos años como consecuencia del cambio climático ha sido el retroceso de los glaciares, los cuales en nuestro medio se encuentran en la región andina del país. Como ya se había mencionado anteriormente, la temperatura media de la zona andina ha variado crecientemente en un 0.8 grados centígrados, esto abarca los países de Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela. Este aumento de temperatura ha hecho que el espesor de los glaciares andinos se vea reducido y también ha producido que la cota de congelamiento aumente en un promedio de 45 metros (Schoolmeester, y otros, 2018).

En el Ecuador el efecto de reducción de glaciares se ha efectuado en gran cantidad en el volcán Cotopaxi, el cual es uno de los glaciares más importantes de nuestro país. Entre los años de 1976 al 2006 se ha reducido 7.4 km² de cubierta glacial del Cotopaxi esto equivale al 39.5% de su área total (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2011).

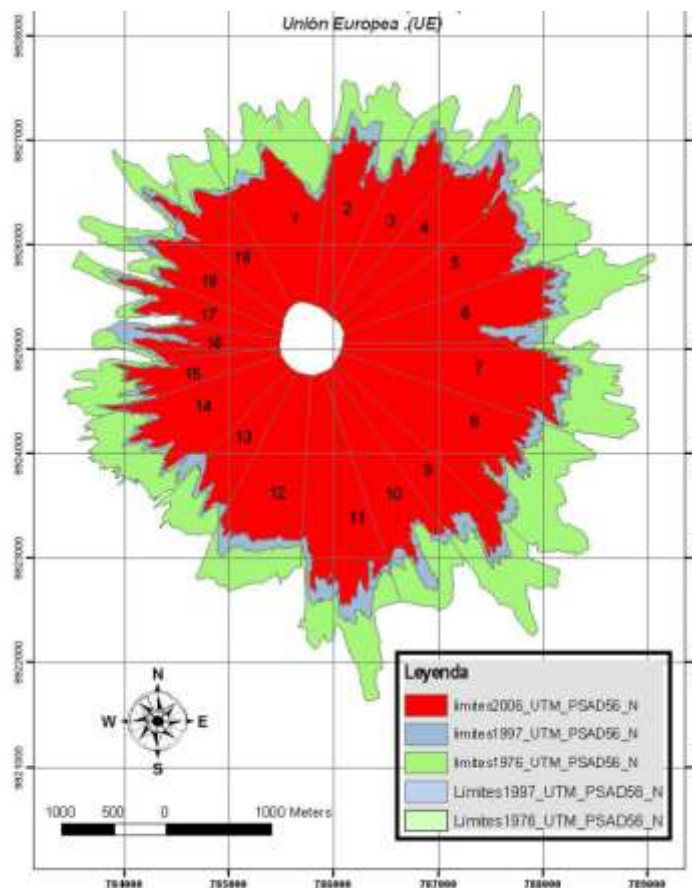


Figura 9 Reducción de la cubierta glacial del Cotopaxi 1976-2006

Fuente: (Cáceres, Jordan, Ungerechts, Francou, & Peñafiel, 2010)

En las distintas ciudades de Latinoamérica, el agua de deshielo de glaciares, es muy importante para sus suministros. En la ciudad de Quito, el agua de deshielo de glaciares representa el 5% del suministro total de agua de la ciudad y en la época seca del año este suministro sube del 5% al 11% del total de suministro. La reducción de los glaciares significa que habrá una reducción en el caudal

que utilizan las ciudades para agua potable, esto afectará a toda la comunidad en general y a los ecosistemas. (Schoolmeester, y otros, 2018).

El cambio climático y su efecto en la reducción de los glaciares es un fenómeno que afecta a miles de personas especialmente a aquellas poblaciones que toman el agua netamente del deshielo de los glaciares. En muchos de los glaciares andinos ya se ha alcanzado el pico hídrico el cual es el *“punto en el cual la esorrentía del agua del deshielo está al máximo”*, a partir de este punto el caudal de agua de deshielo solo disminuye según indica (Schoolmeester, y otros, 2018).

Así mismo las amenazas que se pueden dar a la biodiversidad a causa del cambio climático son muchas. Los factores que incitan a hablar sobre un cambio climático como el aumento de la temperatura, cambios crecientes en las precipitaciones, aumento o disminución de caudales, pueden ocasionar desplazamientos de ecosistemas, especies y extinciones locales. (Naranjo, 2010)

Muchas de las amenazas que se pueden dar a cabo según los modelos futuros de (Naranjo, 2010) se dan inicio en las políticas inadecuadas que tienen los países para manejar la economía de una manera sostenible, así como también se deben a la falta de concientización de la población acerca de esta problemática mundial. Estos inicios tienen impulsores como la ausencia de patrones de consumo y la falta de legislación ambiental, los cuales derivan en causas directas e indirectas de estas amenazas anteriormente mencionadas.

En la figura 9 se presenta un esquema desarrollado por (Naranjo, 2010) en la que explica con un cuadro sinóptico las causas de las amenazas que se dan en este cambio climático en su informe *“Vulnerabilidad y adaptación en la Cordillera Real Oriental de Colombia, Ecuador y Perú”*.

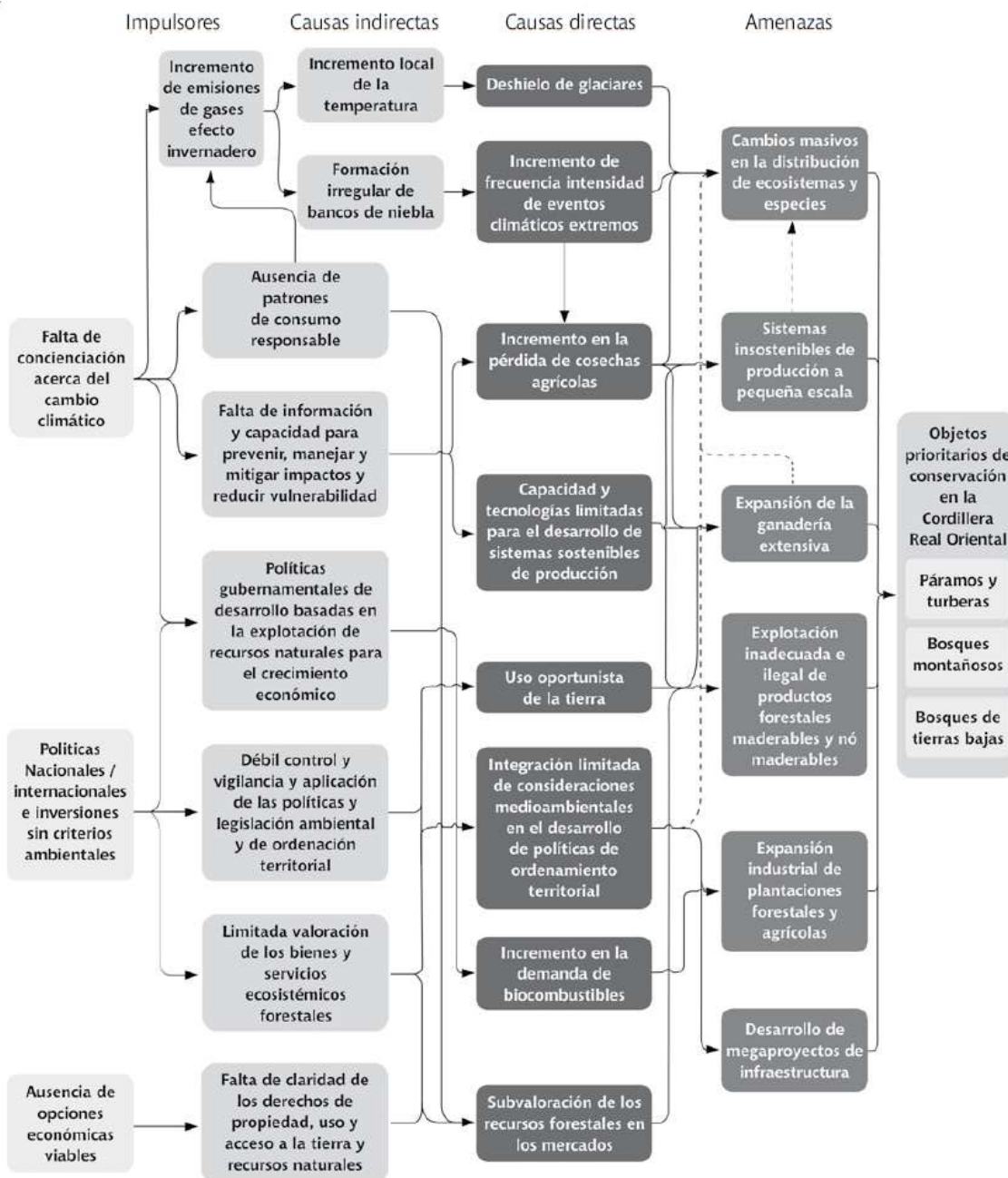


Figura 10. Modelo conceptual de amenazas que afectan la integridad ecológica de la cordillera real oriental.

Fuente: (Naranjo, 2010)

La afectación que se pueda dar a las cuencas de la cordillera real oriental son el resultado de una combinatoria de todas las causas y amenazas presentadas en la Figura 10

2.4.1.4 Variación de caudales

Las variaciones de caudales es otros de los efectos que se darán como consecuencia del impacto del cambio climático, sin embargo, esta consecuencia no siempre será en una tendencia al aumento o disminución del caudal como lo sería la temperatura. En su estudio de caudales de descarga globales, (Van Vliet , y otros, 2013) nos indican que los caudales de las distintas cuencas hidrográficas del mundo pueden variar tanto crecientemente como decrecientemente. Los análisis fueron realizados bajo escenarios de cambio climático B1 y A2.

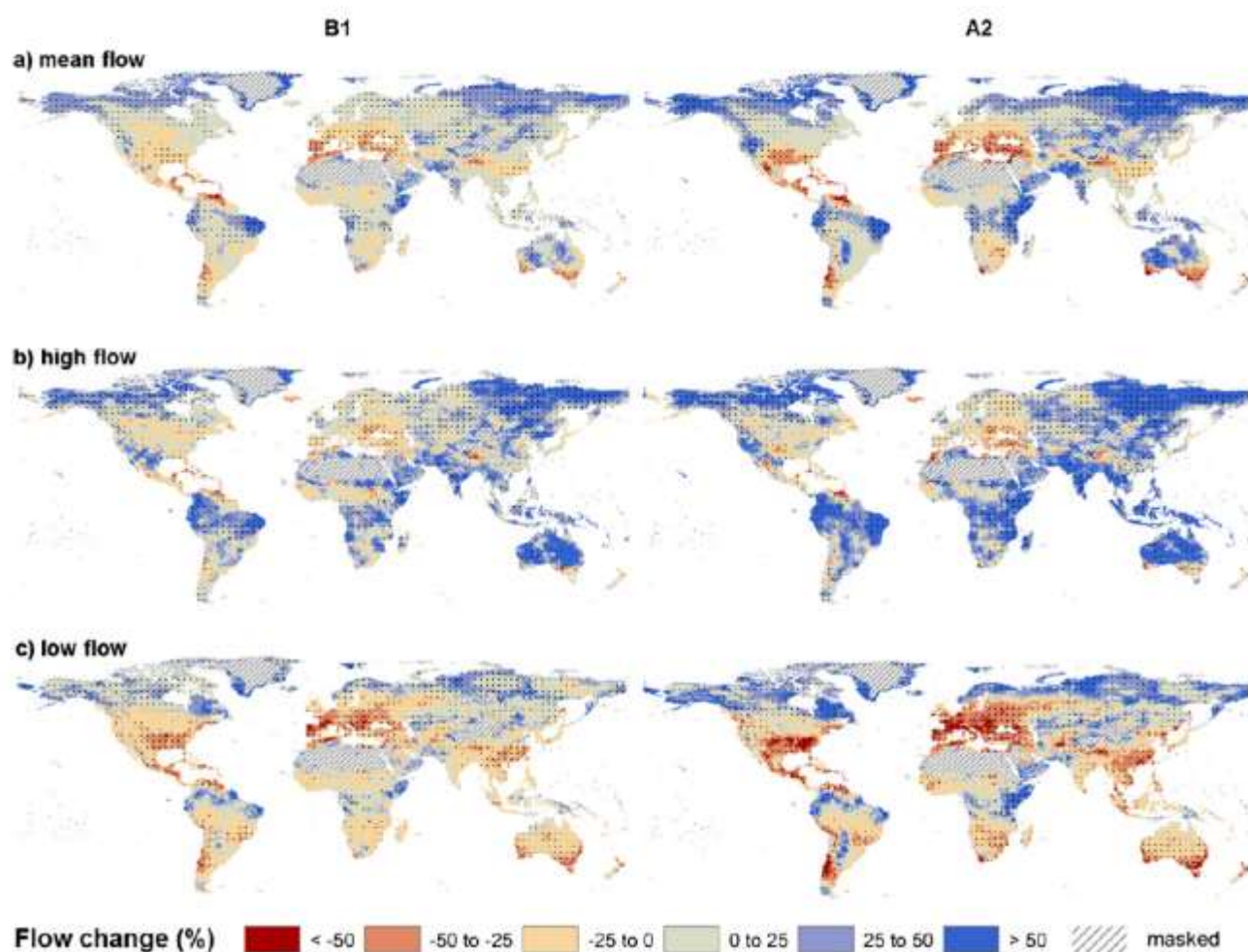


Figura 11. Porcentaje de cambio de caudales medios, máximos y mínimos en el mundo para el período del 2070-2100 en comparación al período 1970-2000.

Fuente: (Van Vliet , y otros, 2013)

Como se puede observar en la *figura 11* presentada en el artículo de (Van Vliet , y otros, 2013), la variación de los caudales es muy variada al punto de presentar porcentajes de cambio positivos y negativos en distintos puntos del globo. En Ecuador el caudal medio presenta un crecimiento de entre 25% y 50%, pero en la cuenca del Amazonas esta variación tiene distintos valores en distintos puntos de la cuenca, siendo sus valores de cambio desde 0% hasta más del 50%.

Con respecto a la variación de caudales que se pueden esperar por el cambio climático en nuestro país, según un estudio llevado a cabo por el Banco Interamericano de Desarrollo, las variaciones que se pueden dar en torno a las temperaturas y precipitaciones de las cuencas de captación de la empresa de agua potable de Quito, concluirán en una reducción del 12% hasta el 34% de los caudales de las cuencas. (Jensen, 2013).

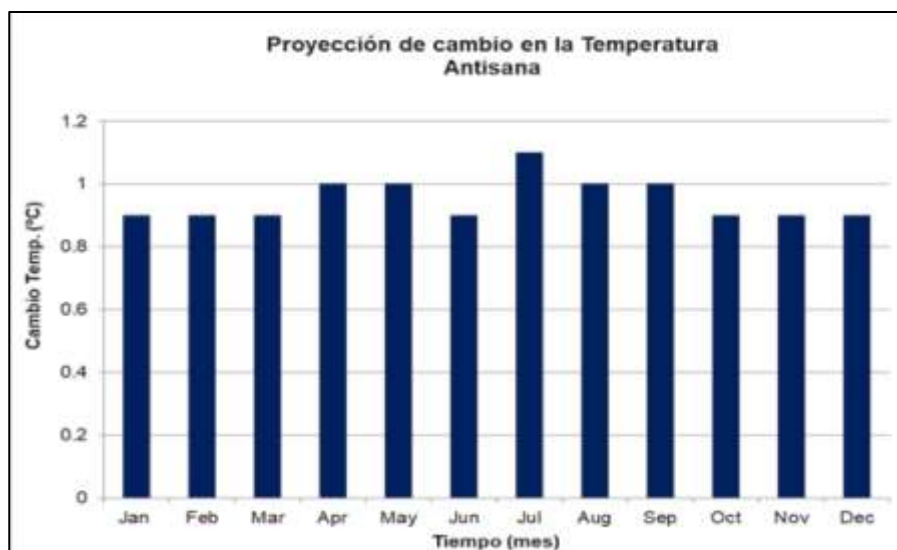


Figura 12. Cambio promedio mensual en la temperatura del Antisana desde el periodo (1979-2003) hasta el futuro cercano (2015-2039).

Fuente: (Jensen, 2013)

Esta reducción de caudales puede darse en dos escenarios en el período de 2015 a 2039. Un escenario optimista, indica la variación en aumento de temperatura de 1° como máximo, en este escenario se producirían reducciones del 12% de los caudales debido a retroceso de glaciares, cambios en la precipitación y reducción de los páramos. Por otro lado, manejan otro escenario pesimista en el cual la temperatura puede llegar a aumentar de 1.5° a 2° en el mismo período en este caso, los caudales se verían reducidos hasta un 34% por retroceso de glaciares, variaciones de temperatura, y reducciones de páramos.

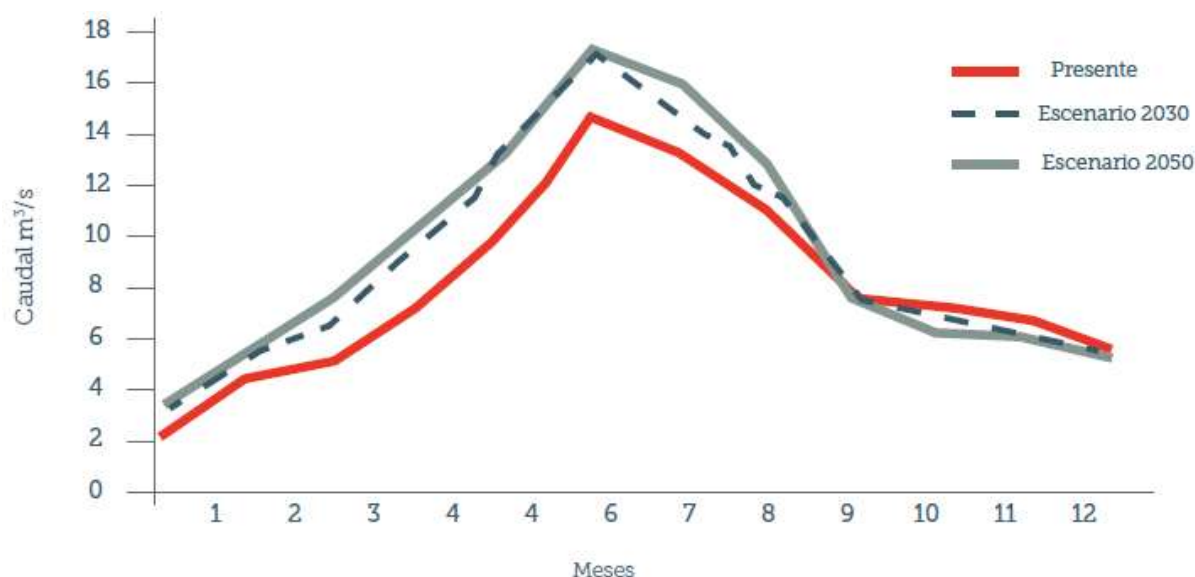


Figura 13. Variación del caudal del río Juval en base al modelo SWAT.

Fuente: (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017)

Sin embargo, estas variaciones de caudales son diferentes para todas las cuencas y sub cuencas hidrográficas que tiene nuestro país. Hay ciertas cuencas en las que se espera una reducción del caudal como en las cuencas de captación de la Empresa de Agua potable de Quito y hay otras en las que se puede producir un aumento en los caudales medios. Según un análisis realizado por (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017) para la determinación del impacto climático sobre la

cuenca del río Juval, el caudal medio presentará un aumento hasta mediados de siglo. Este análisis fue llevado a cabo en base al modelo SWAT (Soil and water assessment tool).

Las variaciones de caudales dependen de otros factores climáticos, los cuales son muy variables con respecto al tiempo y al lugar. En nuestro mismo país podemos tener tendencias de cambio positivas o negativas dependiendo de la cuenca analizada y estas tendencias de cambio dependen a su vez de las tendencias de cambio de temperatura y precipitación de la cuenca de estudio. El cambio climático es un factor que cada vez va tomando más fuerza para afectar a los ciclos naturales conocidos como el del agua. A grandes rasgos esta afectación se puede dar empezando con un crecimiento en la temperatura, la temperatura a su vez causará una mayor evaporación y evapotranspiración, lo cuál deriva en el aumento de la precipitación y con este aumento, la media de caudales, se verá afectada con un crecimiento en la cuenca.

El estudio de las variaciones de los caudales que puedan darse en la cuenca del río Coca es de vital importancia en el futuro socioeconómico de nuestro país. La hidroeléctrica Coca Codo Sinclair se ha convertido en uno de los pilares de abastecimiento energético del Ecuador, haciéndolo un ejemplo de productor de energía limpia en Latinoamérica. Si el caudal que abastece a esta hidroeléctrica se viera afectado en crecimiento o decrecimiento, habría un desabastecimiento de energía para el país o en su defecto la hidroeléctrica podría verse afectada en su funcionamiento.

El (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2018) indica que:

El cambio climático puede alterar las condiciones en las cuencas hidrográficas representando una amenaza no solo a las poblaciones y ecosistemas, sino también a la

generación de energía hidroeléctrica y a la sostenibilidad de la inversión realizada por el Estado en hidroenergía.

Por otra parte (Sánchez, 2018) asegura que la disminución de los caudales es inminente por el impacto del cambio climático; indica que el aumento de la temperatura traerá consigo una reducción predecible en las precipitaciones y un aumento en el consumo de agua por parte de la vegetación por el crecimiento de la evapotranspiración. Este impacto también aumentará la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones.

Estas consecuencias obligan a realizar un estudio sobre la variabilidad del caudal ecológico, ya que este es dependiente de los caudales medios de los ríos y estos a su vez se verán afectados por el impacto del cambio climático. Los caudales ecológicos deben ser mantenidos para asegurar el correcto funcionamiento, estructura y composición del ecosistema y no debe ser afectado por las necesidades de abastecimiento de agua de la población (Sánchez, 2018).

Los caudales ecológicos ayudan a mantener el correcto funcionamiento del ecosistema, nos beneficia por que mantiene en funcionamiento la biodiversidad de los cuerpos de agua así como también ayudan a satisfacer algunas demandas de agua y procuran que la degradación y restauración de ríos, lagos, humedales sea beneficiosa para los ecosistemas a los que pertenecen; los caudales ecológicos son de vital importancia para conseguir objetivos de desarrollo sostenible. (Barchiesi, Davies, Kulindwa, Lei, & Martínez Río del Río , 2018)

A nivel mundial, especialmente en Estados Unidos, el caudal ecológico vino apareciendo desde los años 40 cuando se empezó a notar la reducción de algunas especies de peces por la falta

de caudal en los ríos, sin embargo el término en si se empezó a utilizar desde la década de los años 70 con la construcción de distintas represas en este país (Huguenin, 2016).

Según indica (Calles López, 2019), en el Ecuador el conocimiento del caudal ecológico es reciente, fue con la constitución del 2008 que se le dio una importancia a este término. La aprobación de la Ley de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua le dio la siguiente definición:

Caudal ecológico es la cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico y la calidad del agua expresada en términos de rango, frecuencia y duración de la concentración de parámetros que se requieren para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema.

En países desarrollados, la importancia del caudal ecológico se limita a la conservación y manutención de especies fluviales. En nuestro medio, al no existir plantas de tratamiento de aguas residuales adecuadas, la importancia del caudal ecológico toma una mayor magnitud, siendo el flujo del agua el que ayuda a la depuración de la carga de contaminantes y al reciclaje que tienen estos ríos ayudando a recuperar los ecosistemas acuáticos (Calles López, 2019).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.

3.1 Procesamiento de datos hidrológicos y meteorológicos

Los registros climatológicos para la realización del análisis serán obtenidos del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, pero estos registros deben ser procesados, depurados y rellenados por la abundancia de datos mal tomados en sitio o datos faltantes, por distintas razones como la falta de calibración o mal estado de los instrumentos, cambio de tipo de instrumentos o de sus condiciones de instalación, cambios en el observador y otras razones de ese tipo que pueden afectar los registros climatológicos.

3.1.1 Parámetros estadísticos

El procesamiento, depuración y relleno de estos registros deben ser realizados mediante métodos estadísticos para lograr homogenizar estas series y validarlas para obtener datos fiables. En la rama de la estadística, los parámetros estadísticos como la media, moda, mediana y otro nos ayudarán a describir de mejor manera las series climatológicas que se obtengan, además de sintetizar esta información para lograr un mejor entendimiento a nivel general de todos los fenómenos que estén ocurriendo en cada una de las series a lo largo de los años y más específicamente, los fenómenos de cambio climático que afectan a estas series de datos.

3.1.1.1 Media aritmética

Es la sumatoria de todos los datos de la serie, divididos entre el número de datos de la serie.

$$Media = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

3.1.1.2 Mediana

Al ordenar los datos de una serie de menor a mayor, la mediana es el valor que se encuentra en la mitad de este ordenamiento.

3.1.1.3 Moda

Es el valor que más se repite en una serie.

3.1.1.4 Recorrido o rango

Es el intervalo en el cual se encuentran inmiscuidos los valores de la serie. Se calcula con la diferencia del mayor valor menos el menor valor de la serie.

3.1.1.5 Desviación media

Se calcula con la sumatoria de las diferencias de cada uno de los datos menos la media de la serie dividido entre el número de datos de la serie. Es el promedio de las distancias de los datos hasta la media.

$$\text{Desviación media} = \frac{(x_1 - \bar{x}) + (x_2 - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x})}{n}$$

3.1.1.6 Varianza

“Representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media. Formalmente se calcula como la suma de los residuos al cuadrado divididos entre el total de observaciones” (López, 2019).

$$\text{Varianza} = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}$$

3.1.1.7 Desviación típica

Representa la desviación de los datos en la distribución de la serie con respecto a la media de la serie. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\text{Desviación típica} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}}$$

3.1.2 Homogenización de las series: Método de la racha

La determinación de homogeneidad de una serie es de vital importancia porque nos permite conocer que tan fiables son los datos tomados. El método de la racha se lo aplicará según indican (Cartaya, Zurita , & Montalvo , 2016):

Se procede a compensar todas las estaciones a un período común; luego se ordenan los datos en forma decreciente para calcular la medida de tendencia central denominada mediana. Posteriormente se procede a ordenar los promedios anuales en orden cronológico, para contrastarlos con el dato correspondiente a la mediana. Cuando el valor está por encima de la mediana se le coloca la letra A, y cuando está por debajo se le coloca la letra B. De esta manera se obtiene una racha cada vez que en la columna se registró un cambio de letra. Posteriormente se cuenta el número de rachas y se busca su nivel de significación al 5% en la tabla de consistencia para declararla consistente.

3.2 Métodos de relleno de datos

3.2.1 Método de regresión lineal para el relleno de datos.

El método de regresión lineal permite el relleno de datos de una serie a la que se llamará dependiente, en base a otra serie completa llamada independiente. Para poder asegurarse de que la serie independiente es apta para completar la serie dependiente se necesita calcular el coeficiente de correlación lineal el cual tomará valores de 0 a 1, siendo 0 el valor que indica que las series o variables no tienen relación alguna (Carrera, y otros, 2016)

$$r = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Donde:

r = coeficiente de correlación lineal

X = Variable dependiente

Y = Variable independiente

n = número de observaciones

Si el valor del coeficiente de correlación lineal es bastante alto, se realiza un gráfico de dispersión en el cual se analizan la relación entre las dos variables o series para ser aplicados esta relación a los datos faltantes.

3.2.2 Método de promedios aritméticos

Consiste en el relleno de datos faltantes de una serie con la media aritmética de otras series en el mismo período de tiempo.

Es el método más simple que existe para el relleno de datos y es frecuentemente utilizado por que mantiene la tendencia de los valores en el período aplicado.

3.2.3 Método de completación por regresiones múltiples.

Este método es recomendado cuando se necesita rellenar datos mensuales o anuales de precipitación en base a una estación próxima con datos consistentes. (Pizarro, y otros, 2009).

El método se rige por la siguiente ecuación.

$$Y = a + b * X1 + c * X2 + \dots + n * Xi$$

Donde:

Y= valor de precipitación estimada

Xi= valor de precipitación en estaciones con información completa

a,b,c: constantes de regresión

3.3 Metodología para la delimitación de la cuenca y parámetros geomorfológicos.

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica y la determinación de sus parámetros característicos se utilizará el software Arcgis, en el cual se siguió la metodología explicada en el diagrama de flujo presentado a continuación.

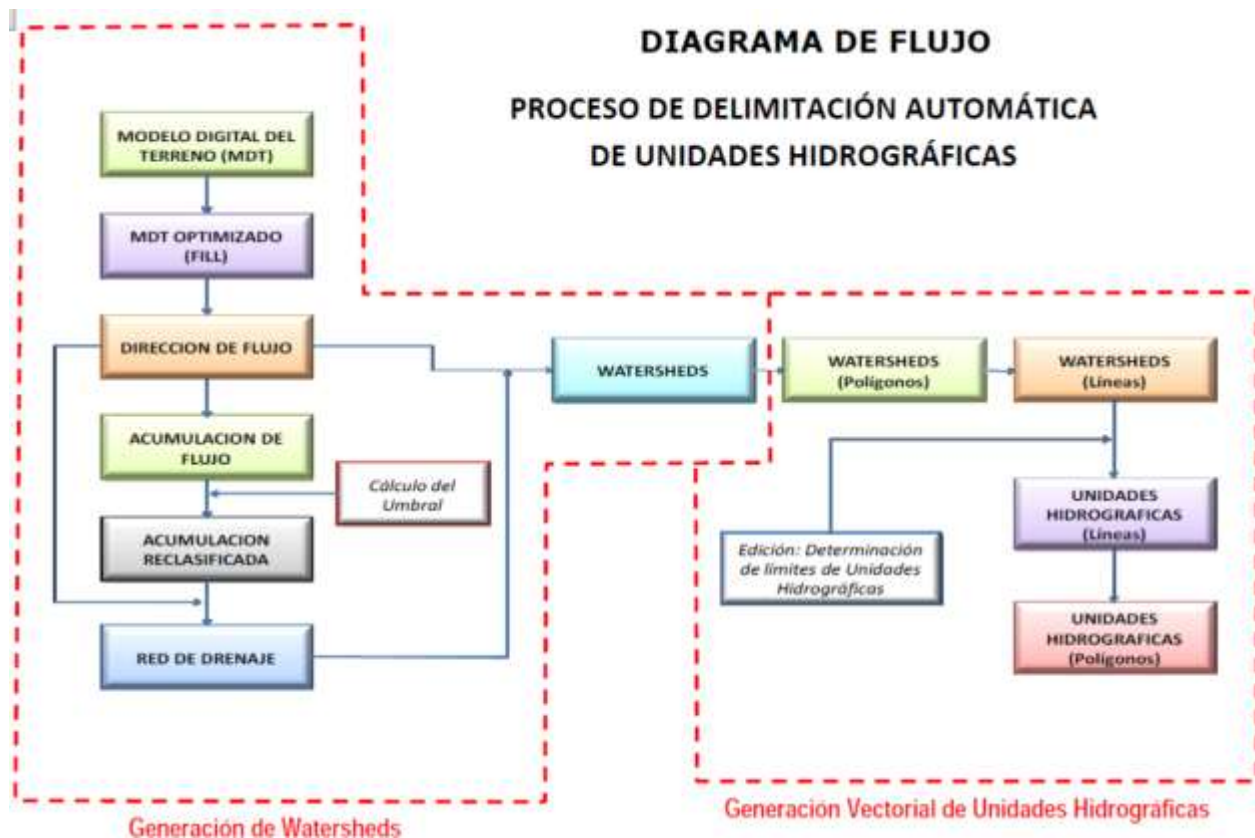


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso para la delimitación de unidades hidrográficas.

Fuente: (Rosas, 2009)

Para la delimitación de la cuenca en estudio no se utilizará los varios puntos de cruce de los afluentes con el río principal, se utilizará un único punto ubicado en la casa de máquinas.

La casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair se ubica en las coordenadas 895561 Norte y 9984860 Este. A partir de este punto será delimitada la cuenca para el análisis en este proyecto.

3.4 Metodología para el cálculo de factores climatológicos

3.4.1 Precipitación media: método de las isoyetas

El método de las isoyetas consiste en el cálculo por interpolación de precipitaciones en distintas estaciones para obtener las isoyetas las cuales posteriormente aportarán una precipitación a una sub-área de la cuenca. Se calcula bajo la siguiente fórmula.

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m [(P_j + P_{j+1}) / 2] \cdot A_j}{\sum_{j=1}^m A_j}$$

Donde

P_j: valor de una isoyeta j

A_j: área comprendida entre la isoyeta j y la siguiente

m: número total de isoyetas.

3.4.2 Temperatura media: método de las isotermas

Siguiendo la misma mecánica de las isoyetas se calcula el aporte entre isotermas a cada sub-área de la cuenca.

3.4.3 Caudal medio anual

Se calcula mediante la fórmula presentada por (Sandoval & Aguilera, 2014) en el cual el caudal está definido en función del área de la cuenca y la precipitación media de la cuenca.

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6}$$

3.4.4 Caudal ecológico

Puede ser calculado como el 10% del caudal medio multianual de la cuenca en estudio según la ley de recursos hídricos del Ecuador. (Sandoval & Aguilera, 2014) también presentan una ecuación para el cálculo del caudal ecológico.

$$Q_{eco} = a_e \frac{\bar{P}A}{10^6}$$

3.4.5 Coeficiente de escorrentía

Existen varias metodologías para el cálculo del coeficiente de escorrentía muchas de ellas presentadas simplemente en tablas resumidas.

3.4.5.1 Método de Prevert

El método de Prevert es bastante utilizado en Europa y se basa en parcelas experimentales, se elige el coeficiente de escorrentía mediante una tabla presentada a continuación.

Tabla 1

Cálculo del coeficiente de escorrentía según Prevert.

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 – 10	0,30	0,40	0,55
	10 – 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,66	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

Nota. Fuente: (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2011)

3.4.5.2 Método de Nadal

El método Nadal se basa en la siguiente fórmula presentada por el autor:

$$C = 0.25 * K1 * K2 * K3$$

Los valores de K1, K2, K3 son tomados de la siguiente tabla:

Tabla 2

Valores de coeficientes K para el cálculo de coeficiente de escorrentía según Nadal

Extensión		Lluvia media anual		Características de la Cuenca	K ₃
Km ²	K ₁	mm	K ₂		
10	2.60	200	0.25		
20	2.45	300	0.50	Llana y permeable	0.5 – 0.7
40	2.15	400	0.75	Ondulada	0.5 – 1.2
100	1.80	500	1.00	Montañosa e impermeable	1.2 – 1.5
200	1.70	600	1.10		
500	1.40	700	1.17		
1.000	1.30	800	1.25		
5.000	1.00	900	1.32		
10.000	0.90	1.000	1.40		
20.000	0.87	1.200	1.50		

Nota. Fuente: (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2011)

3.4.5.3 Método de autor anónimo

El método de este autor se cita en (Sandoval W. R., 2019) se rige por la siguiente ecuación y tabla:

$$C = k1 + k2 + k3 + k4$$

Tabla 3
Coefficients k1, k2, k3, k4.

Pendiente	k1	Permeabilidad	k2
> 0.3	0.4	Roca	0.2
de 0.1 a 0.3	0.3	Arcilla	0.15
de 0.05 a 0.1	0.2	Limos	0.1
Áreas planas	0.05	Arenas	0.05
Cobertura Vegetal	k3	Capacidad de Almacenamiento	k4
Nada	0.2	Nada	0.2
Poca	0.15	Poca	0.15
Media	0.1	Media	0.1
Mucha	0.05	Mucha	0.05

Nota. Fuente: (Sandoval W. R., 2019)

3.4.5.4 Método de Schwab

El método de Schwab se rige por la siguiente tabla:

Tabla 4

Coefficiente de escorrentía por Schwab

Topografía y vegetación	Textura del suelo		
	Tierra franca arenosa	Arcilla y limo	Arcilla compacta
Bosques			
Llano. 0-5% de pendiente	0.10	0.30	0.40
Ondulado. 5-10% de pendiente	0.25	0.35	0.50
Montañosos. 10- 30% de pendiente	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Llanos	0.10	0.30	0.40
Ondulados	0.16	0.36	0.55
Montañosos	0.22	0.42	0.60
Tierras cultivadas			
Llanas	0.30	0.50	0.60
Onduladas	0.40	0.60	0.70
Montañosas	0.52	0.72	0.82
Zonas urbanas	30% de la superficie permeable	50% de la superficie permeable	70% de la superficie permeable
Llanas	0.40	0.55	0.65
Onduladas	0.50	0.65	0.80

Nota. Fuente: (Martínez, 2006)

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA.

Caracterizar los parámetros físicos y geográficos es de gran utilidad, porque permite obtener el inventario de los ecosistemas a nivel geográfico, ofrece una visión integradora de la naturaleza en la superficie terrestre, incluyendo las modificaciones antrópicas. El material necesario para la caracterización de la cuenca son cartas topográficas, archivos tipo vector o raster que tengan información del relieve e información meteorológica; fotografías aéreas e imágenes satelitales; de estos archivos se puede obtener información referente a las elevaciones y formas del terreno, hacia dónde se dirige la cuenca, su río principal, afluentes y de más características de la cuenca.

4.1 Delimitación de la cuenca

Se entiende como cuenca hidrográfica a la unidad territorial, es utilizado en múltiples trabajos de investigación o de planificación relativos a recursos naturales (Adamo et al, 1989). Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por la línea divisoria de aguas o *divorsium aquarum*, donde los afluentes se dirigen y desembocan en un punto de desagüe que puede ser endorreica si desemboca en un lago y exorreica si desemboca en el mar (Cótler et al, 2013). En la práctica se utilizan las cartas topográficas o los modelos digitales de elevación para delimitar la cuenca por medio de Sistemas de Información Geográfica o programas de Dibujo Asistido por computador.

El área y perímetro de la cuenca son datos usados para análisis como el coeficiente de compacidad, que es una relación entre el perímetro y el área del círculo, en cuanto más se acerque este valor a 1 la cuenca tenderá a parecerse un círculo.

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

La cuenca del río Coca fue delimitada de manera semiautomática con las curvas de nivel 1:50000 con las que posteriormente se creó el modelo digital de elevación, y se definió el límite de la cuenca con la ayuda de un sistema de información geográfica, ver figura 15.



Figura 15. Delimitación de la cuenca del río Coca

4.2 Línea divisoria

Es la línea imaginaria que comprende los límites de la cuenca y está formada por la línea de cumbre, el objetivo es dividir la cuenca de sus cuencas vecinas (Cótler, Galindo, González , Pineda, & Ríos, 2013). Ver figura 15.

4.3 Perímetro de la cuenca

Hace referencia al contorno de la forma de la cuenca en la superficie, es de forma irregular. Para el cálculo de este se utilizó un sistema de información geográfica (SIG) para conocer el valor del perímetro. Ver figura 15.

4.4 Área de drenaje

Es el área comprendida por el límite de la cuenca hidrográfica, por el tipo de datos espaciales se calculó usando la geometría en el SIG. Ver figura 16.



Figura 16. Área de la cuenca hidrográfica del río Coca

4.5 Río Principal

El río principal es el que se alimenta de los afluentes de la cuenca, desemboca en un punto de desagüe, generalmente es el que tiene mayor longitud. Una cuenca se convierte más valiosa entre más vertientes de agua tenga y sean de interés para abastecer grandes ciudades. En la Figura 17 se observa el río principal de la cuenca y sus afluentes.

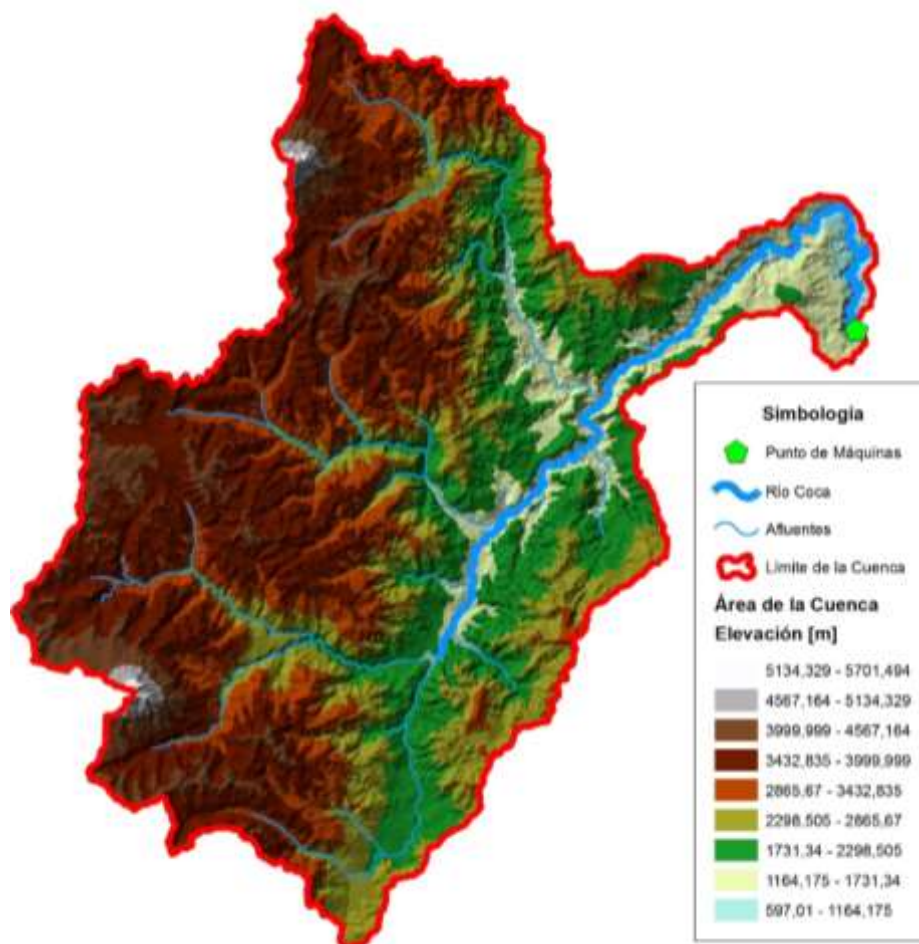


Figura 17. Esquema de la cuenca del río Coca hasta el punto de control en la casa de máquinas.

4.6 Orden de la corriente

El sistema de drenaje se forma de la corriente principal y sus tributarios, el orden hace referencia a la red de drenaje, en este caso el río Coca es de orden 3. Para determinar el orden de la corriente se usó el método Pfafstetter que subdivide la cuenca hidrográfica identificando los 4 mayores afluentes en términos de área y longitud al río principal luego se proyecta hasta el límite de la cuenca mayor (Zambrano, Torres, & Ibarra, 2011), este método identifica las zonas que tienen

mayor acumulación de agua y en dónde confluyen para obtener el orden de la corriente. En la Figura 18 se puede observar el orden de los ríos.

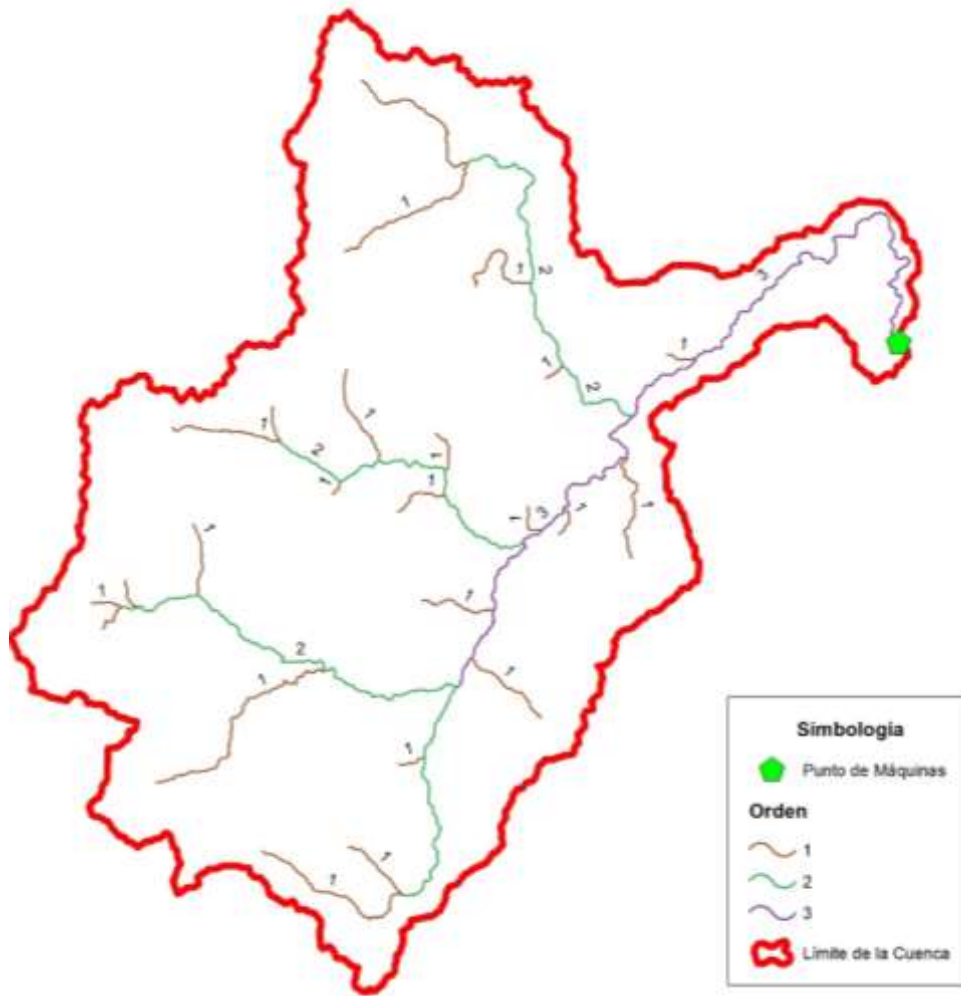


Figura 18. Orden de los ríos afluentes y principales

4.7 Forma de la cuenca

Mantiene relación directa con el tiempo de concentración en llegar al desagüe de la cuenca, desde sus demarcaciones más lejanas y se determina con el índice de Gravelius.

4.7.1 Índice de Gavelius

Índice de compacidad, indica una relación entre el perímetro de la cuenca y el área, entre más cercano sea a 1 la cuenca se asemeja más a una circunferencia, como se especifica en la Tabla 5.

$$K_c = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A_c}}$$

Dónde:

K_c : Coeficiente de compacidad

P : Perímetro de la cuenca en km.

A_c : Área de drenaje de la cuenca, en Km^2 .

Tabla 5

Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad.

Clase de Forma	Índice de Compacidad	Forma de la cuenca	Posibilidad de crecidas con mayores caudales
Clase I	1.0 -1.25	Circular	Alta
Clase II	1.25-1.50	Oval Redonda a Oval oblonga	Media
Clase III	1.50-1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Bajo

Nota. Fuente: (Lux, 2016)

4.8 Factor de forma (kf)

La ecuación de Horton expresa la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca, indica que tan rectangular es la cuenca. Si una cuenca tiene un factor de forma bajo, está menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor forma, si el valor es mayor a uno indica que el río principal corto y formará grandes crecidas (Horton, 1945). En la Tabla 6 se especifican los límites de coeficiente de forma.

$$k_f = \frac{A_c}{L^2}$$

Dónde:

k_f : Factor de forma

A_c : Área de la cuenca, en Km^2

L^2 : Longitud de la Cuenca, en km .

Tabla 6

Límites de coeficiente de forma (kf)

Kf	Forma de la cuenca	Crecidas
0.10 – 0.18	Muy poco achatada	Muy poco susceptibles
0.18 – 0.36	Ligeramente achatada	Ligeramente susceptibles a crecidas
0.36 – 0.54	Moderadamente achatada	Moderadamente susceptibles a crecidas
0.54 – 1.00	Ligeramente redonda	Susceptible a crecidas
≥ 1.00	Redonda	Muy susceptibles a crecidas

Nota. Fuente: (OMM, 2012)

4.9 Densidad de Drenaje

Es la relación entre la longitud total de las corrientes de agua de todos los órdenes y el área de la cuenca; si la cuenca tiene pocas bifurcaciones de afluentes su densidad es baja y alta en caso contrario, esto ocurre cuando el orden de la corriente es mayor (Farfán, Urbina, Ferreira, & Brandan, 2010).

$$D_d = \frac{L_r + \sum(L_{i_n})}{A_c}$$

Dónde:

D_d : Densidad de Drenaje

L_{i_n} : Longitud de afluentes, en metros

L_r : Longitud del río principal, medido por el cauce en metros.

A_c : Área de drenaje de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

La densidad de drenaje oscila entre 0.5 Km/Km² para cuencas con drenaje pobre, mientras que las cuencas con alto drenaje llegan hasta 3.5 km/ Km². (Morales & Topón , 2016)

4.10 Sinuosidad de las corrientes de agua

Es la relación entre la longitud de la corriente del río principal determinada en la extensión del cauce y la longitud del valle del río principal determinada en línea curva o recta.

$$S = \frac{L_r}{L_c}$$

Dónde:

L_c : Longitud del cauce principal medido en línea recta o curva, en kilómetros.

L_r : Longitud del cauce principal, en kilómetros.

A partir del valor de sinuosidad se puede estimar la velocidad de escorrentía del agua en el desarrollo de la corriente, si la sinuosidad es menor o igual de 1.25 esta es baja un río recto.

4.11 Propiedades de relieve de la cuenca

Tiene una considerable importancia, las principales características de la cuenca son: pendiente de la cuenca, altura media de la cuenca y pendiente de la corriente principal.

4.12 Pendiente de la cuenca

Es un factor para definir las crecidas de los caudales de los afluentes, esta caracterización sirve para evaluar el comportamiento de esta ante un evento de precipitación torrencial. Para el cálculo de la misma se utilizó la herramienta *slope* de ArcMap para calcular posteriormente la pendiente media de la cuenca (Quintero, Ávila, & Ávila, 2016). En la Figura 19 se muestra el mapa de pendientes de la cuenca, y en la Tabla 7 se encuentra la frecuencia de los valores de la pendiente.

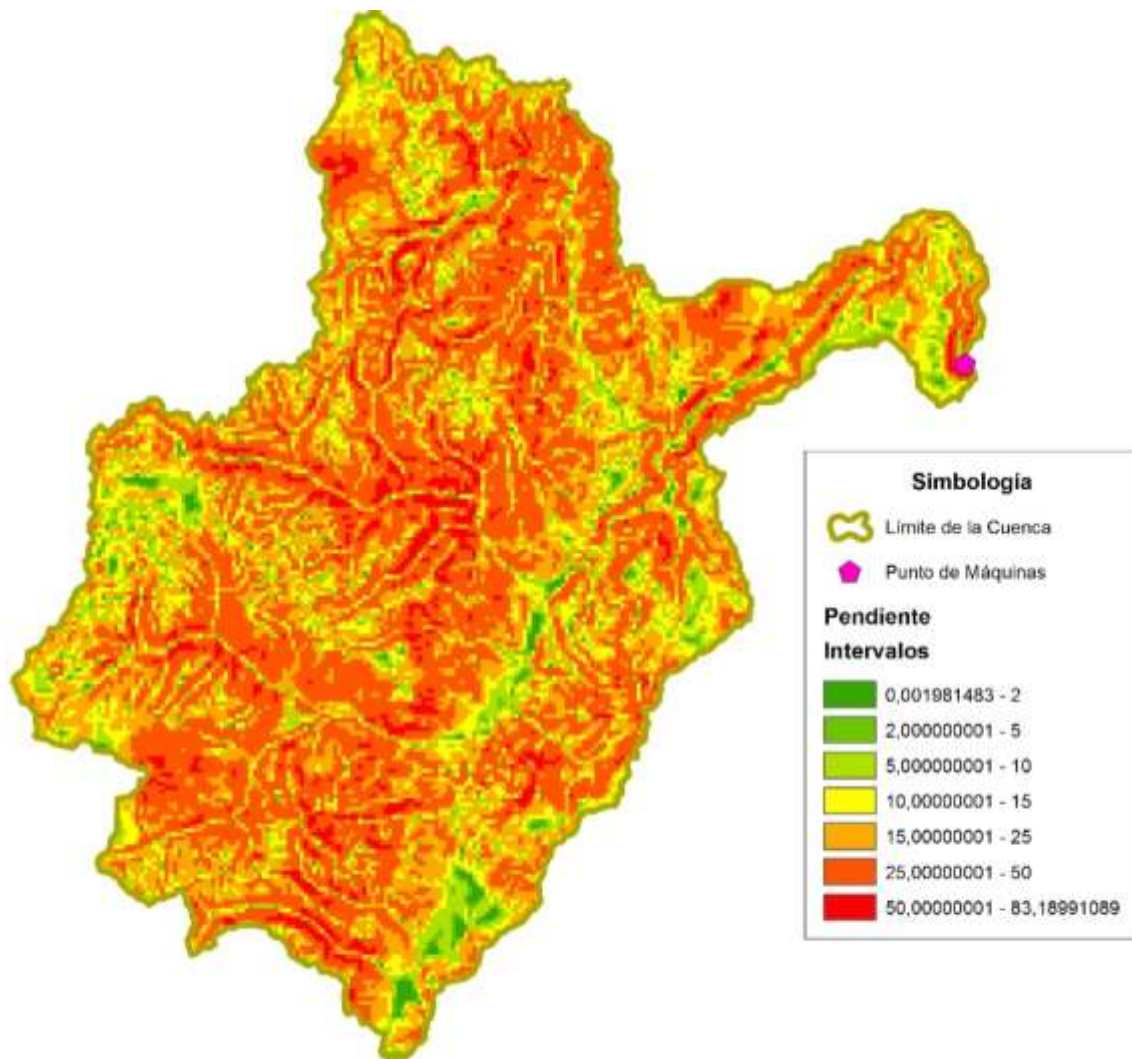


Figura 19. Pendientes en la cuenca

Tabla 7
Valores de la pendiente de la cuenca

VALUE	COUNT [# pix]	AREA	MIN (%)	MAX (%)	MEAN (%)	SUM (%)
1	274	43552153.8	0.00198148	1.99676001	0.8883003	243.394282
2	639	101568709	2.00447845	4.99748802	3.7224289	2378.63207
3	2375	377504983	5.00362682	9.99889183	7.77613588	18468.3227
4	3424	544242973	10.0002213	14.9981203	12.534831	42919.2615
5	7396	1175590253	15.0002842	24.9987411	19.9877504	147829.402
6	10465	1663406165	25.0061207	49.9902649	34.8131397	364319.507
7	1156	183745583	50.0080566	83.1899109	56.299623	65082.3641
Promedio de la pendiente de la cuenca						24.922884

Cálculos:

Se realizó considerando el número de píxeles, para asignar pesos en la media ponderada:

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n COUNT_i * MEAN_i}{\sum_{i=1}^n COUNT_i}$$

$$Y_c = \frac{641240.883}{25729} = 24.92 \%$$

4.13 Altura media de la cuenca

Resulta de la relación entre la suma de la cota máxima y la cota mínima que coincide con el punto de desagüe de la cuenca dividida para 2.

$$H_m = \frac{H_{max} + H_{min}}{2}$$

Dónde:

H_m : Altura media, en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm).

H_{max} : Altura máxima, en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm).

H_{min} : Altura mínima, en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm).

Para este caso práctico se consideraron todas las alturas que existen en el área y posteriormente se calculó la altura media de la cuenca. Ver Tabla 8

Tabla 8

Valores de altura del relieve

VALUE	COUNT [#pix]	AREA [m2]	MIN [m]	MAX [m]	MEAN [m]	SUM [m]
1	274	43552153.8	798.832458	4399.05908	2452.92919	672102.599
2	639	101568709	699.789429	5196.88965	2685.00575	1715718.68
3	2375	377504983	674.160461	4842.72559	2706.0152	6426786.09
4	3424	544242973	699.390137	4799.97803	2867.2026	9817301.7
5	7396	1175590253	681.977173	5631.41113	2906.62236	21497379
6	10465	1663406165	697.899963	5725.24365	2910.55207	30458927.4
7	1156	183745583	828.664612	5543.57373	3017.33999	3488045.03
Elevación promedio del relieve						2879.09598

Cálculos:

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n COUNT_i * MEAN_i}{\sum_{i=1}^n COUNT_i}$$

$$H_m = \frac{390576.6}{320} = 1220.55m$$

4.14 Pendiente del río Principal

Este parámetro influye sobre la velocidad del agua y la forma del hidrograma.

En este caso se calculó la pendiente usando una extracción de los valores de pendiente en el río posteriormente calcular la pendiente media del río. En la figura 20 se muestra un esquema de la pendiente del río principal.

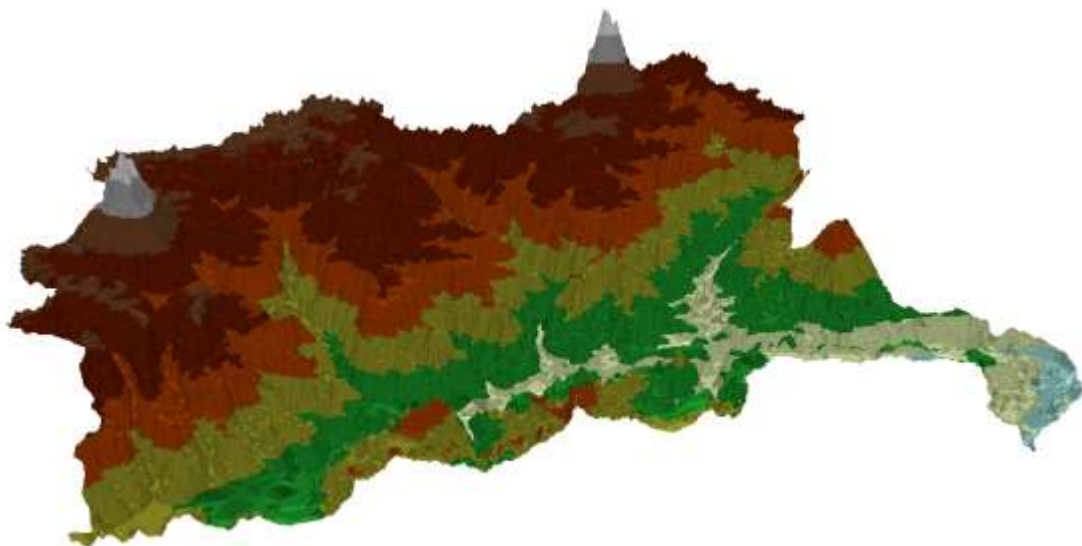


Figura 20. Representación de la cuenca proyectada sobre el MDE.

Cálculos:

Se realizó el cálculo de la pendiente media del río con la relación entre la diferencia de la cota más alta del río y la cota más baja del río para la longitud del cauce principal

$$Y_r = \frac{H_{Ymax} - H_{Ymin}}{L_r}$$

$$Y_r = \frac{1698.08 - 674.16}{101750} = 0.010063 = 1 \%$$

4.15 Tabla resumen de resultados

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos de los cálculos antes mencionados para la caracterización morfométrica de la cuenca en el punto de máquinas de la represa Coca Codo Sinclair. En la Tabla 9 se encuentra los valores de los diferentes parámetros.

Tabla 9.*Tabla resumen de parámetros morfológicos de la cuenca*

Nº	Nombre del parámetro	Símbolo	Ecuación/Herramienta	Unidad	Valor
1	Longitud del río principal	L_r	-	km	101.75
2	Área de la cuenca	A_c	-	km ²	4090.47
3	Perímetro de la cuenca	P	-	km	399.61
4	Longitud axial	L_c	-SIG	km	110.81
5	Coficiente de compacidad	K_c	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A_c}}$	adimensional	1.76
6	Coficiente de forma	K_f	$K_f = \frac{A_c}{L_c^2}$	adimensional	0.33
7	Pendiente longitudinal del río principal	Y_r	Slope-SIG	%	1%
	Altura máxima del río principal	H_{Ymax}	DEM-SIG	m	1698.08
	Altura mínima del río principal	H_{Ymin}	DEM-SIG	m	674.16
8	Altura media de la cuenca	H_m	SIG	m	2879.09
	Altura máxima de la cuenca	H_{max}	DEM-SIG	m	4725.24
	Altura mínima de la cuenca	H_{min}	DEM-SIG	m	674.16
9	Pendiente promedio de la cuenca	Y_c	Slope-SIG	%	24.92
10	Densidad de drenaje	D_d	$D_d = \frac{L_r + \sum L_{i,n}}{A_c}$	km/km ²	0.109
11	Sinuosidad	S	$S = \frac{L_r}{L_c}$	adimensional	1.21

4.16 Tiempos de concentración

Es el tiempo que tarda el agua en llegar al punto de desagüe desde el punto hidrológicamente más alejado. Algunos autores desarrollaron algunas fórmulas para calcular los tiempos de concentración (Morales & Topón , 2016)

Autor: Kirpich (1940)

$$t_c = \frac{0.066356 * L_r^{0.77}}{Y_r^{0.385}}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de concentración

L_r : Longitud del río principal, medido por el cauce en kilómetros.

Y_r : Pendiente promedio del cauce, en m/m

Autor: Ven T. Chow (1959)

$$t_c = \frac{0.2734 * L_r^{0.64}}{Y_r^{0.32}}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de concentración

L_r : Longitud del río principal, medido por el cauce en kilómetros.

Y_r : Pendiente promedio del cauce, en m/m

En la Tabla 10 se presentan los valores de los tiempos de concentración en horas de los diferentes autores y el promedio.

Tabla 10

Resumen de tiempos de concentración de la cuenca calculados

Autor	Tiempo de concentración (tc) [horas]
Kirpich	13.73
Ven T Chow	22.99
Goroshkov	14.24
Témez	24.15
Sandoval	15.58
Promedio	18.14

4.17 Curva hipsométrica.

La curva hipsométrica determina el porcentaje área de la cuenca que se encuentra por encima de una determinada cota. La curva hipsométrica que se ha determinada para la cuenca en estudio indica una cuenca en equilibrio la cual está en su fase de madurez.

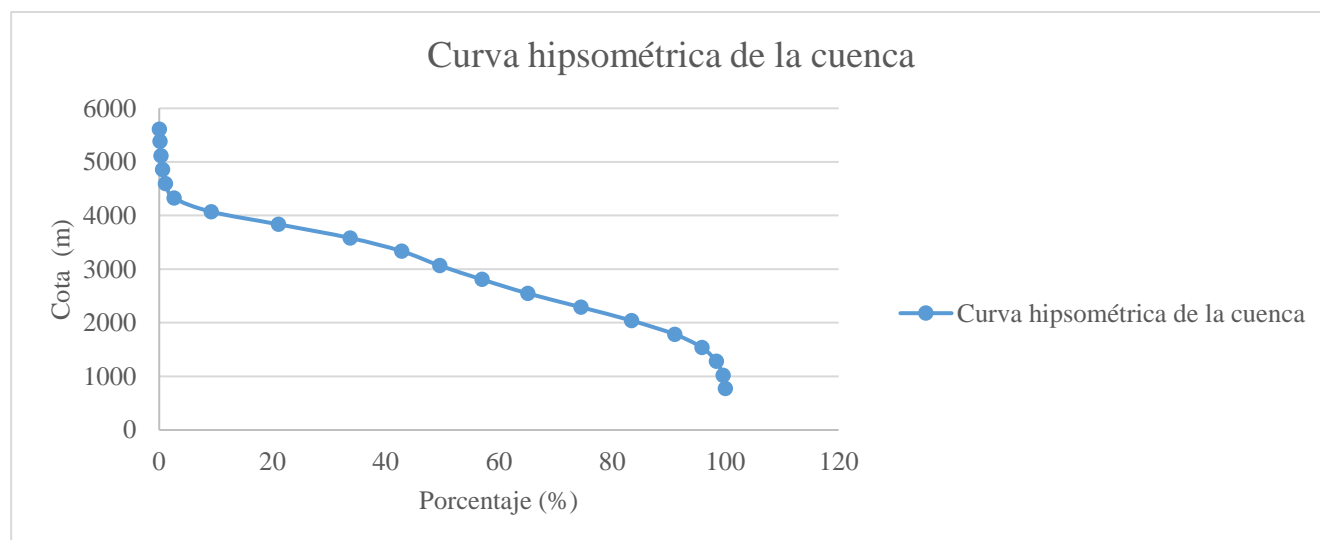


Figura 21. Curva hipsométrica de la cuenca

CAPÍTULO V: ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA Y SU INFORMACIÓN HIDROMETEOROLOGICA.

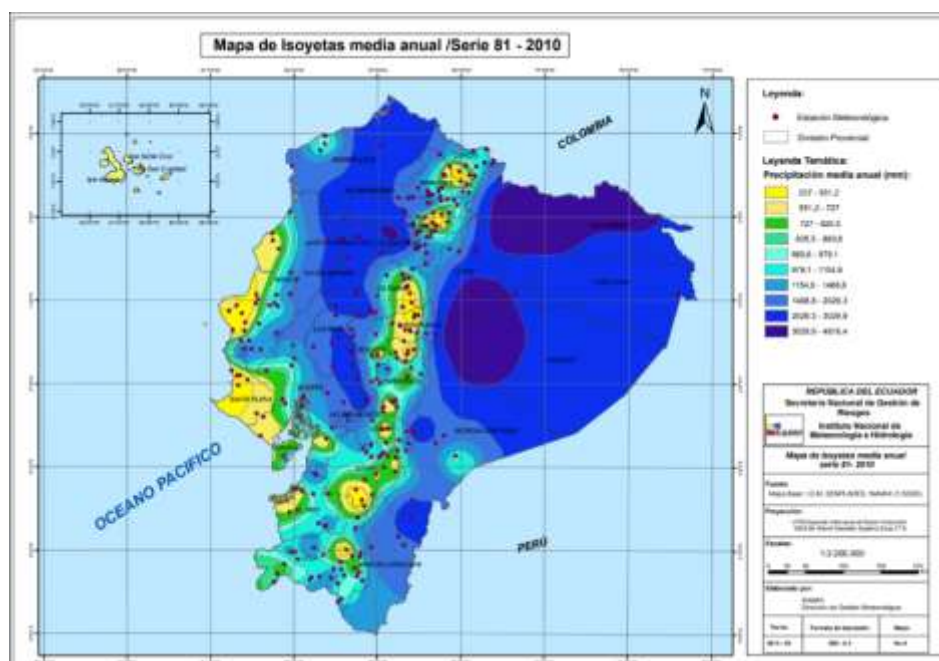
5.1 Obtención de series climatológicas.

El elemento fundamental de estudio para esta investigación es la información hidrometeorológica de la cuenca del río Coca. Para esto, todas las series de datos climatológicas fueron obtenidas de las bases de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

El problema principal que tiene esta información, es la falta de datos que existen en las series y la poca cantidad de años de lecturas de los datos, para lo cual se tuvo que recurrir a los métodos de relleno de datos y de extrapolación de datos mencionados anteriormente.

5.2 Precipitación

La precipitación media anual de la cuenca del río Coca va desde 980 mm anuales en su parte más alta, hasta 4816.4 mm anuales en su parte más baja en la zona de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Este promedio ha sido obtenido del mapa de isoyetas presentado por el INAMHI de las series de datos desde 1981 hasta 2010. Esta precipitación presentada nos indica que la cuenca del río Coca esta mayoritariamente en la región de selva tropical



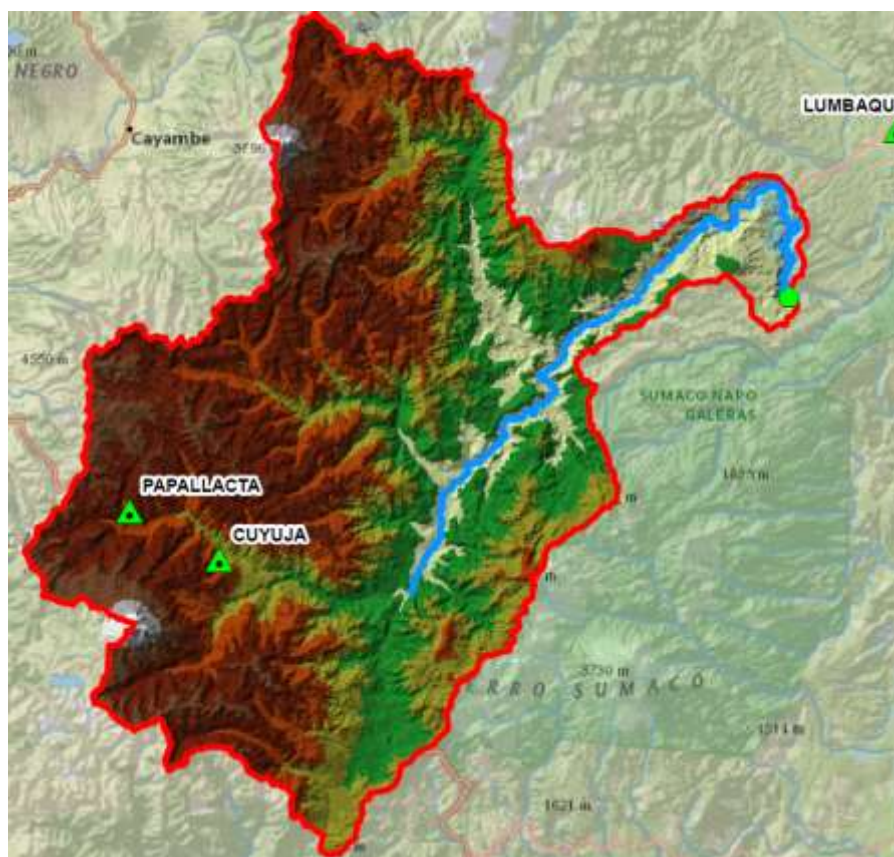


Figura 23. Esquema referencial de la ubicación de las estaciones dentro de la cuenca.

Estas estaciones tienen períodos de observación algo similares, pero al momento de calcular la precipitación media anual promediando las precipitaciones mensuales, existían series con datos faltante de varios meses, lo cual reflejaba un porcentaje de error bastante alto con respecto a otras estaciones en el mismo año que si tenían la lectura completa de los 12 meses.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982	269.2	330	477.8	691.5			275.4	95	231.5	273.6	540.5	195
1983	173.5	170.4	336.9	323.5	328.1	516.2	386.4	184	235.6	489	414.7	316.8
1984	439.7			549.3	392.3	433.1	273.8	277.4	320.4			
1985							291.1	330.5	295.5	408.9	396.1	191.6
2006												278.1
2007	622.9	626.3	511.2	703.7	486.3					710.9		
2008			86.8	77.9	164.1	165.4	77	84.7	76.8			
2010												1701.8
2011	66.7	608.3						373.2				571.4
2012	550.3		1816.2	730	766.9	892.6	955.7	334.9	1516.4	1987.4	2362.5	2236
2013		291.2	226.8	370.1	378	325.4	198.1	502	189.7	281.1	273.6	187.9
2014	112.8	290.9	312.7	296.2	399.7	201.7	252.7	145.9	290.7	196.2	512	122.1
2015	326	295	446.3	423.4	407.6	209.6	429.2	166.2		132.8	353	75.3
2016		255.3	373.3			744.2			254.8	369	621.6	
2017					137.7	237.5		264.9	412.8	341.2	644.6	416.4
2018	553.1	232.8	493.9	951	340.7	275.1	225.2	121	193.5	140.8	622.5	442.6

Figura 24. Serie de la estación Lumbaqui con datos faltantes en rojo y datos existentes en verde

En la Figura 24 se indica un ejemplo de cómo se presentaban los datos climatológicos en un principio. Al momento de calcular la precipitación media anual, estos valores se calculan con un alto porcentaje de error por la cantidad de datos mensuales faltantes.

Se procedió a rellenar estas series con métodos de regresión lineal para poder obtener la mayor confiabilidad posible. Se calculó la correlación lineal existentes entre los datos mensuales para poder estimar los datos faltantes en base a esta correlación lineal.

Con esta estimación realizada, se logró completar los datos faltantes para las distintas series y poder obtener tres estaciones con series completas similares para la obtención de los mapas de isoyetas anuales mediante el programa ArcMap para su posterior análisis.

Tabla 12*Precipitación media anual con datos rellenos mediante correlación lineal*

ESTACIÓN	Lumbaqui	Papallacta	Cuyuja
2004	5215.2	1270.8	1449.6
2005	4876.8	1221.6	1434
2006	5871.6	1089.6	1339.2
2007	5403.6	1282.8	1706.4
2008	5008.8	1366.8	1712.4
2009	4986	1353.6	1552.8
2010	4827.6	1662	1658.4
2011	5413.2	1635.6	1622.4
2012	5637.6	1317.6	1533.6
2013	4638	1308	1412.4
2014	5094	1390.8	
2015	5211.6		

Con estos tres períodos completos de las tres estaciones de entre 2004-2013, se realiza un modelamiento de estos valores y se obtienen isoyetas anuales de la cuenca para poder analizar el cambio de precipitaciones que se ha producido a lo largo de los años.

5.3 Temperatura.

Al igual que en las precipitaciones, los registros de temperatura fueron proporcionados por el INAMHI. Así mismo, hubieron varios datos faltantes en estos registros por lo cual en base al método de correlación lineal se puede establecer una correlación negativa entre la altura a la que se encuentra ubicada la estación y la temperatura promedio medida (Armenta , Villa , & Jácome, 2016). Es decir el valor de temperatura tendría una relación inversamente proporcional con la altura.

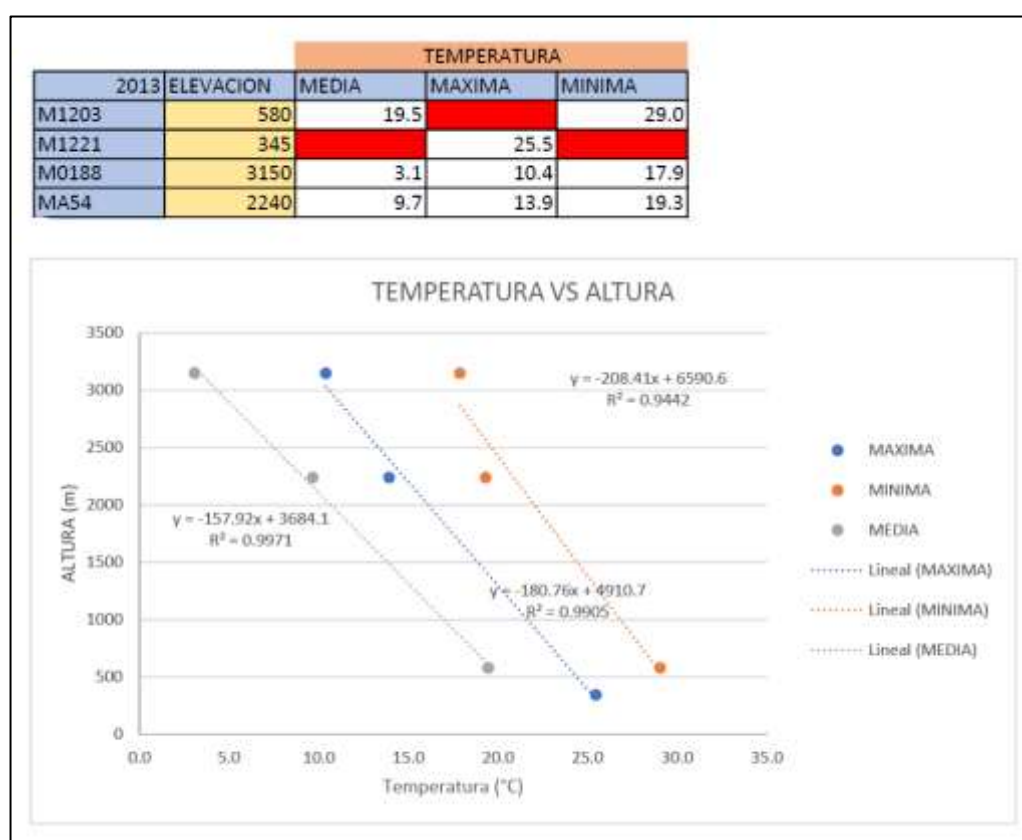


Figura 25. Relación altura vs temperatura del año 2012 con datos faltantes en rojo.

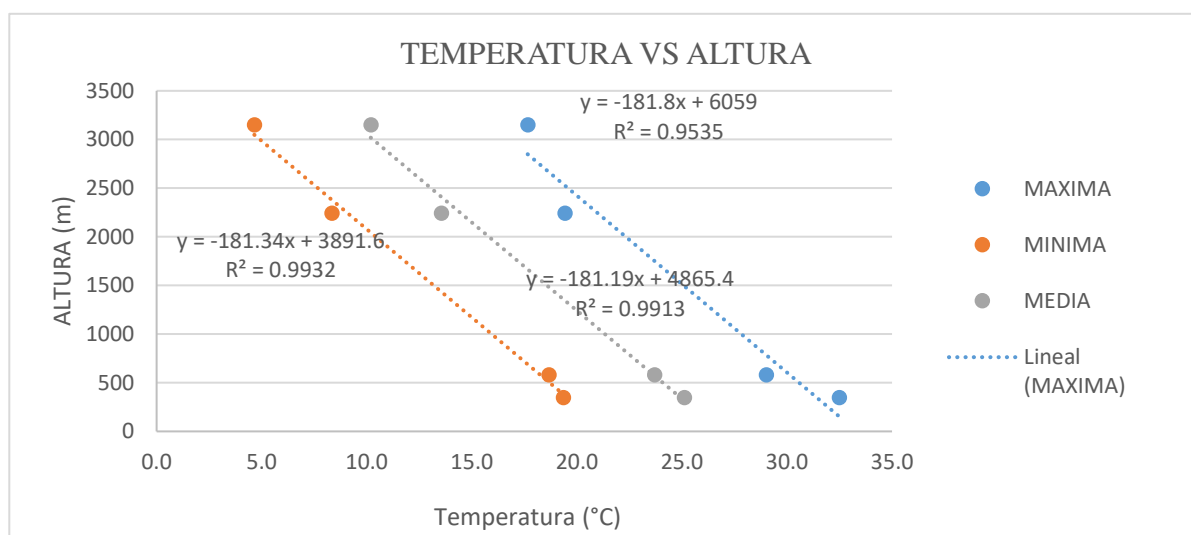


Figura 26. Relación altura vs temperatura del año 2012 con datos completados por correlación lineal.

Como podemos observar en las líneas de tendencia de la Figura 26, la temperatura disminuye a medida que la altura aumenta. Los factores de correlación lineal indican una elevada aproximación a una recta ($R^2 \geq 0.9$). Esto nos permite estimar los valores de temperatura de las otras estaciones a diferente altitud a partir de las ecuaciones de estas líneas.

Las estaciones que fueron utilizadas para el análisis de los datos fueron las siguientes:

Tabla 13

Estaciones con datos de temperatura más representativos de la cuenca

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA
M1203	Lumbaqui	0° 2' 26" N	77° 20' 2" W	580 m
M0188	Papallacta	0° 21' 54" S	78° 8' 41" W	3150 m
M1221	San José de Payamino	0° 30' 14" S	77° 19' 3" W	345 m
M1124	Sierrazul	0° 40' 26"	77° 55' 36"	2240 m

Con las ecuaciones obtenidas de las líneas de tendencia, se pudo estimar los datos faltantes de las estaciones mencionadas. Con los datos extrapolados de temperatura se pudo obtener valores de los períodos desde 2003 hasta 2013. A partir de estas series completadas se puede realizar la modelación en el software ArcMap para la obtención del mapa de isotermas de la cuenca.

5.4 Caudales

Las series hidrológicas de los caudales fueron proporcionadas por la Unidad de Negocios Coca Codo Sinclair. El período de toma de datos viene desde 1972 hasta 2017. Se han tomado datos de caudales mensuales en cada año. El caudal promedio de todos estos años es 290,4 m³/s.

El período de mayor caudal a través de los años empieza desde el mes de abril y termina en el mes de septiembre. Aunque en los últimos años, más específicamente desde 2012, se presenta un aumento en este período. En estos últimos años los caudales empiezan aumentar desde el mes de marzo y terminan en septiembre. Esto coincide con el aumento de los períodos secos y húmedos que se dieron en las distintas estaciones meteorológicas. Se nombra período seco si el caudal medido es menor que la media y período húmedo si el caudal es mayor que la media.

ANO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1972	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO
1973	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1974	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO
1975	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO
1976	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1977	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1978	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO
1979	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1980	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
1981	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1982	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1983	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1984	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1985	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1986	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO
1987	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1988	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO
1989	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
1990	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1991	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1992	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1993	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1994	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO
1995	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1996	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
1997	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
1998	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO
1999	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2000	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2001	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
2002	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2003	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	SECO
2004	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
2005	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
2006	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
2007	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO
2008	SECO	HUMEDO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
2009	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
2010	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
2011	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	HUMEDO
2012	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO
2013	SECO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2014	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2015	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	HUMEDO
2016	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO
2017	SECO	SECO	SECO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO

Figura 27. Períodos secos y húmedos a través de los años

Estos caudales fueron medidos en el río Coca en la unión del río Salado con el Coca, aquí se haya una obra de captación. En este caso las series no tuvieron que ser rellenadas o extrapoladas ya que el período que se tiene es bastante extenso y completo para realizar un análisis de cambio.

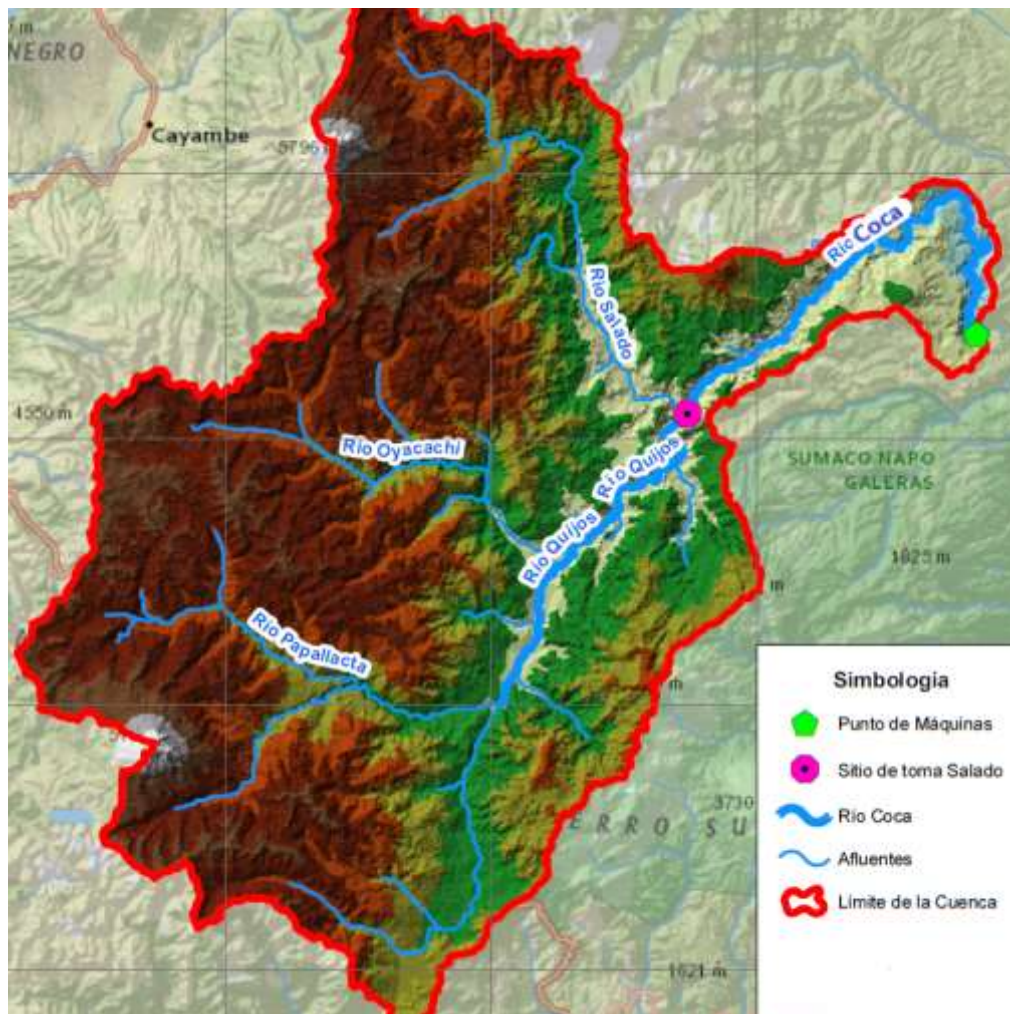


Figura 28. Sitio de toma de caudales en la unión del río Salado con el río Quijos.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE FACTORES CLIMATOLÓGICOS Y TENDENCIAS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

Con las series climatológicas completas y extendidas, se puede determinar los mapas de isoyetas en base a las precipitaciones y así mismo los mapas de isothermas en base a las temperaturas obtenidas.

Las isoyetas e isothermas son líneas que se presentan en un plano cartográfico y al igual que las curvas de nivel representan una misma altura en un terreno, estas isolíneas representan un mismo valor a lo largo de toda su extensión. En el caso de las isoyetas, éstas unen a todos los puntos de un mismo valor de precipitación y en las isothermas, unen a todos los puntos de un mismo valor de temperatura.

6.1 Cálculo de la precipitación media de la cuenca

Con las tres estaciones, Lumbaqui, Cuyuja, Papallacta, se pudo modelar en el software ArcMap los modelos para la obtención de los mapas de isoyetas. Lo que hace básicamente ArcMap es tomar las coordenadas de cada una de las estaciones, colocarlas en el plano y a partir de la precipitación media anual de esa estación, obtenida de la serie climatológica de esa estación, extrapola los datos de una estación a la otra, creando varios puntos con todas las precipitaciones extrapoladas a partir de estas estaciones. Luego se unen todos los puntos con un mismo valor de precipitación y se obtienen las isoyetas.

Como anexo se presenta los mapas de isoyetas de todo el período 2004-2013. Ver anexo A.

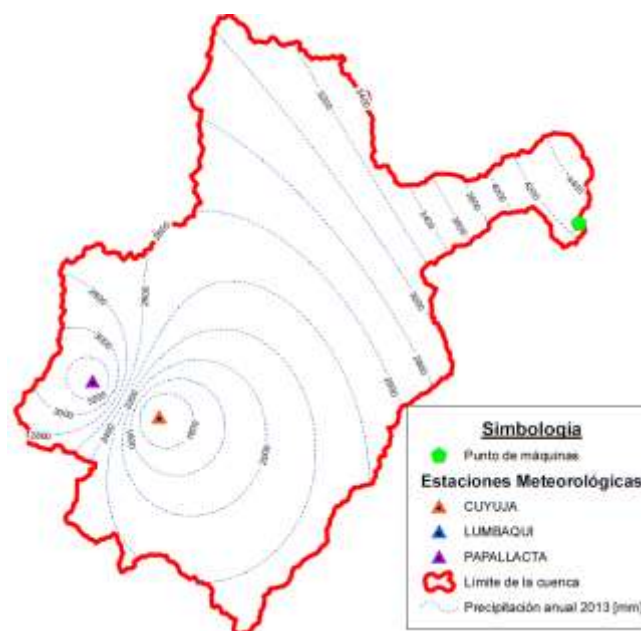


Figura 29. Mapa de Isoyetas del año 2013

En los mapas de isoyetas se pueden observar ciertos cambios en la precipitación año a año, estos cambios son los buscados para analizar la tendencia de la precipitación a través del tiempo y tratar de estimar a futuro la variación de precipitación.

Sin embargo, es un poco dificultoso tratar de adivinar el promedio de precipitación en toda la cuenca con solo ver las isoyetas. Para analizar la variación de precipitación de una manera más clara y que englobe a toda la cuenca se debe calcular la precipitación media de la cuenca utilizando el método de las isoyetas.

A continuación, se presenta dos tablas de cálculo de la precipitación media de cada uno de los años en los que se pudo obtener datos mínimos para la realización de las isoyetas como ejemplo.

Tabla 14*Cálculo de precipitación media de la cuenca para el año 2005*

Isoyetas (mm)	Prom. Isoyetas (mm)	Sub-áreas (km ²)	A*I
4600			
4600	4600	39.48	181608
4600			
4400	4500	76.58	344614.95
4400			
4200	4300	55.41	238267.72
4200			
4000	4100	27.34	112125.16
4000			
3800	3900	34.89	136090.5
3800			
3600	3700	42.28	156458.95
3600			
3400	3500	70.38	246347.85
3400			
3200	3300	183.93	606985.49
3200			
3000	3100	390.66	1211064.6
3000			
2800	2900	487.51	1413796.4
2800			
2600	2700	516.08	1393437.6
2600			
2400	2500	517.92	1294810
2400			
2200	2300	593.01	1363939.2
2200			
2000	2100	596.24	1252114.5
2000			
1800	1900	278.14	528471.71
1800			
1600	1700	126.40	214885.1
1600			
1600	1600	54.14	86627.838
1600			
SUMATORIA		4090.47	10781645.5

Nota. La precipitación media es 2635.8 mm. Es la división de la sumatoria de A*I para el área total.

Tabla 15
Cálculo de precipitación media de la cuenca para el año 2008

Isoyetas (mm)	Isoyetas prom. (mm)	Área (km)	A*I
4800			
4800	4800	17.51	84026.40
4800			
4600	4700	76.53	359707.45
4600			
4400	4500	69.31	311890.05
4400			
4200	4300	30.20	129878.06
4200			
4000	4100	33.39	136886.70
4000			
3800	3900	43.59	169994.77
3800			
3600	3700	61.97	229288.62
3600			
3400	3500	175.46	614120.49
3400			
3200	3300	378.01	1247442.90
3200			
3000	3100	543.32	1684301.29
3000			
2800	2900	505.83	1466909.88
2800			
2600	2700	545.04	1471610.74
2600			
2400	2500	659.35	1648374.94
2400			
2200	2300	570.26	1311604.90
2200			
2000	2100	245.80	516188.40
2000			
1800	1900	107.73	204694.60
1800			
1800	1800	27.15	48863.52
1800			
Sumatoria		4090.47	11635783.74

Nota. La precipitación media es 1422.3 mm.

A continuación, se presenta una tabla con los valores de precipitación media de la cuenca para el período 2004-2013.

Tabla 16
Precipitación media anual de la cuenca del río Coca

Año	Precipitación media (mm)
2004	2714.5
2005	2635.8
2006	2704.3
2007	2807.7
2008	2844.6
2009	2757.8
2010	2894.2
2011	2963.9
2012	2771.0
2013	2619.7

Con las precipitaciones medias calculadas cada año podemos determinar si en este período ha existido una variación que indique una tendencia al aumento o disminución de la precipitación en los próximos años.

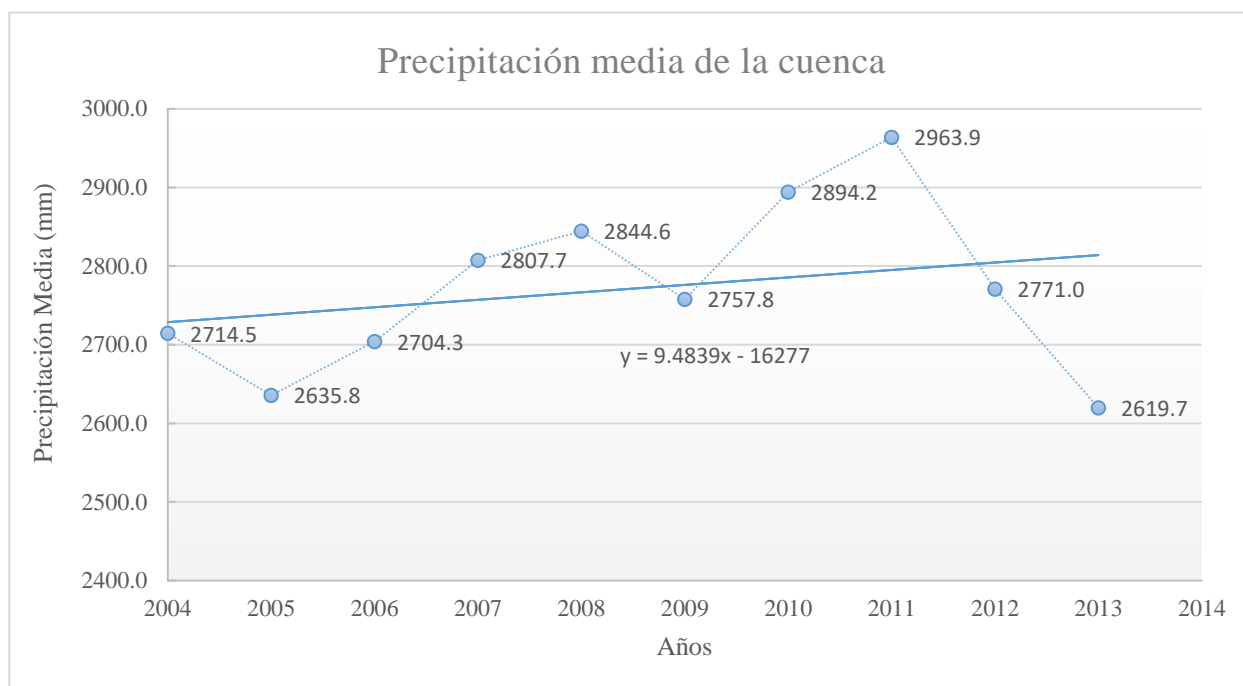


Figura 30. Variación de la precipitación media anual de la cuenca a través del tiempo

En la Figura 30 se presenta el gráfico de dispersión de la variación de la precipitación media de la cuenca a través del tiempo. Estos puntos nos dan una línea de tendencia con una ecuación en la cual se puede diferenciar una pendiente $m=9.48$, esta pendiente es positiva, indicando así, que la precipitación media anual de la cuenca del río Coca tiende hacia el aumento.

6.2 Cálculo de la temperatura media de la cuenca.

De la misma manera que se procedió en las isoyetas, se procederá con las isotermas. A partir de las series rellenadas y extrapoladas de las estaciones Lumbaqui, San José de Payamino, Sierrazul y Papallacta, se realizan los modelos digitales en ArcMap para la obtención de las isotermas. Al igual que en las isoyetas, se calcula el aporte en las subáreas de cada isoterma para luego promediar estos aportes térmicos.

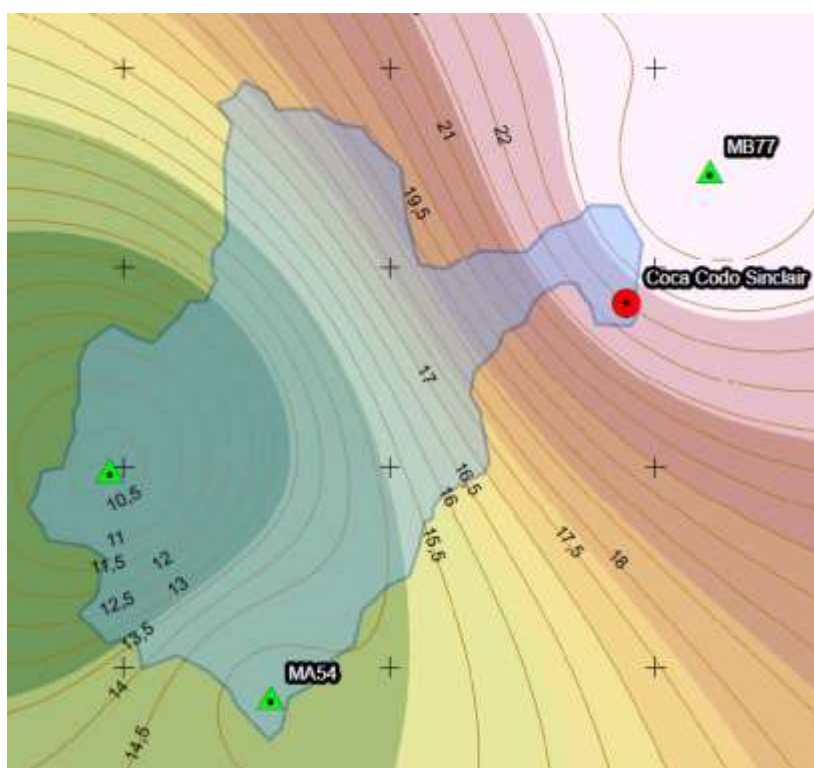


Figura 31. Mapa de isotermas del año 2004 modelado en ArcMap

En los mapas de isotermas se pueden observar las variaciones de temperatura a través del espacio geográfico de la cuenca. Podemos observar que en la casa de máquinas de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair se tiene aproximadamente 21.5°C de temperatura. Si observamos los mapas de

isotermas de cada año, podremos observar como existen ligeros cambios en la temperatura en cada uno de los puntos de la cuenca, pero para un entendimiento general de la cuenca, se debe calcular la temperatura media de cada año en base a las isotermas. En el Anexo B se presentan los mapas de isotermas para el período 2004-2014.

Tabla 17

Cálculo de temperatura media de la cuenca para el año 2004

Isotermas (°C)	Isotermas promedio (°C)	Sub-Área (km ²)	A*I
24			
23	23.5	34.96	821.61879
23			
22	22.5	117.53	2644.3575
22			
21	21.5	49.14	1056.4627
21			
20	20.5	57.98	1188.6597
20			
19	19.5	111.15	2167.5225
19			
18	18.5	228.47	4226.7506
18			
17	17.5	330.09	5776.5749
17			
16	16.5	342.81	5656.3322
16			
15	15.5	517.40	8019.778
15			
14	14.5	751.23	10892.835
14			
13	13.5	420.84	5681.3264
13			
12	12.5	360.33	4504.1
12			
11	11.5	380.64	4377.3486
11			
10	10.5	387.89	4072.824
Sumatoria		4090.47	61086.491

Nota. La temperatura media es 14.9°C. Es la división de la sumatoria de A*I para el área total.

Tabla 18*Cálculo de temperatura media de la cuenca para el año 2005*

Isotermas (°C)	Isotermas promedio (°C)	Sub-Área (km ²)	A*I
25			
24	24.5	1.38	33.9129
24			
23	23.5	106.06	2492.4806
23			
22	22.5	77.14	1735.569
22			
21	21.5	46.56	1001.1432
21			
20	20.5	63.54	1302.6069
20			
19	19.5	174.66	3405.9284
19			
18	18.5	264.69	4896.8204
18			
17	17.5	333.12	5829.5999
17			
16	16.5	335.01	5527.6813
16			
15	15.5	716.19	11100.899
15			
14	14.5	567.35	8226.6189
14			
13	13.5	387.16	5226.714
13			
12	12.5	346.33	4329.1126
12			
11	11.5	423.45	4869.6292
11			
10	10.5	247.81	2601.9736
10			
Sumatoria		4090.46	62580.689

Nota. La temperatura media es 15.3°C. Es la división de la sumatoria de A*I para el área total.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados de la temperatura media anual de la cuenca para el período 2004-2014.

Tabla 19
Temperatura media anual de la cuenca del río Coca.

Año	Temperatura media anual (°C)
2004	14.9
2005	15.3
2006	15.0
2007	14.8
2008	14.5
2009	14.7
2010	14.9
2011	14.4
2012	14.4
2013	14.6
2014	14.5

Con las temperaturas medias calculadas, podemos observar si existe una variación de la temperatura en toda la cuenca a través de los años. Calculando la ecuación de tendencia de esta variación, se puede estimar la temperatura que tendrá la cuenca en algunos años.

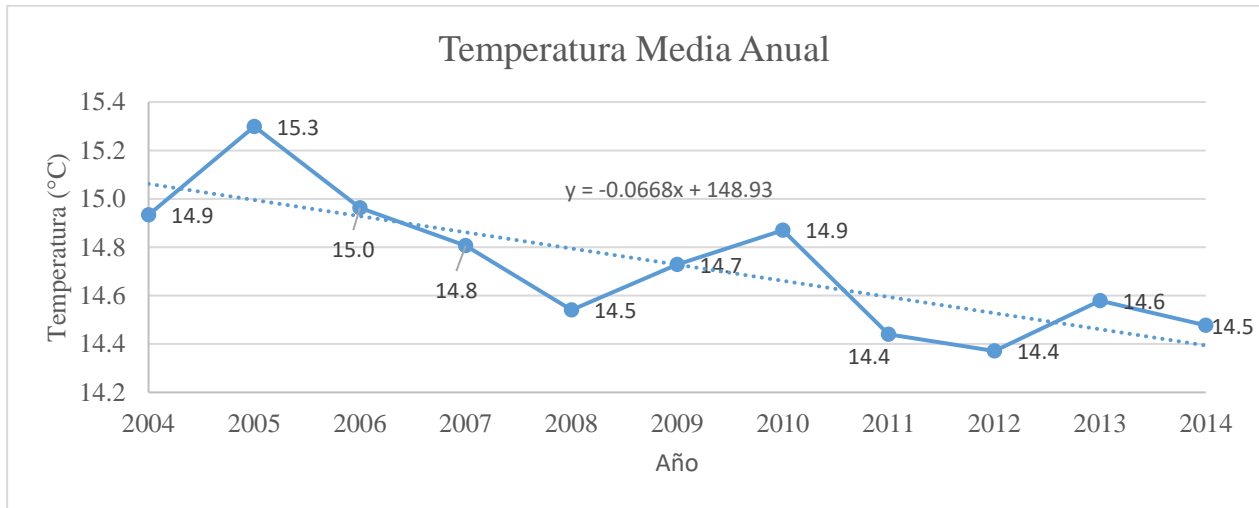


Figura 32. Variación de la temperatura media anual en el período 2004-2014

6.3 Caudales

Con las series de datos proporcionadas por la Unidad de Negocios del Coca Codo Sinclair podremos estimar una tendencia hacia el aumento o disminución de los caudales a lo largo de los años.

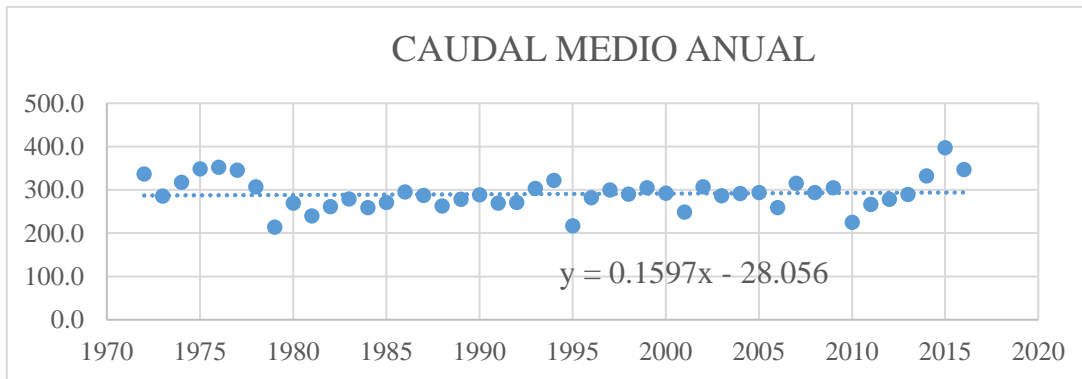


Figura 33. Variación del caudal medio anual según los datos medidos en el sitio de toma Salado.

Como podemos observar, en la pendiente de $m=0.1597$ nos indica una pequeña tendencia positiva de estos valores. Esto quiere decir que los caudales van aumentar a través del tiempo, al igual que las precipitaciones y la temperatura.

Sin embargo, para llevar a cabo esta investigación es necesario, calcular los caudales medios anuales a partir de la precipitación media de la cuenca presentada anteriormente.

Para este cálculo se utilizó la fórmula según (Sandoval , 2019) que indica en su libro “Diseño de Obras Hidrotécnicas”:

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6}$$

En donde C indica el coeficiente de escurrimiento, P es la precipitación media de la cuenca, y A es el área de la cuenca.

6.3.1 Cálculo del coeficiente de escorrentía

Existen varias metodologías para el cálculo del coeficiente de escorrentía de la cuenca, tomaremos algunas de las mencionadas por (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2011). Estos métodos calculan los coeficientes en función de distintos parámetros como la pendiente de la cuenca, el uso de la tierra, tipo de suelo, etc. A continuación, se presenta una tabla resumen de los coeficientes calculados

Tabla 20

Coeficiente de escorrentía de la cuenca según varios autores.

Método	C
Prevert	0.6
Nadal	0.4815
Anónimo	0.55
Schwab	0.60
Promedio	0.5575

Se obtuvo mediante varias metodologías los diferentes coeficientes de escorrentía. De estos valores se calcula su promedio, en este caso $C=0.6$, para utilizar este coeficiente promedio en el cálculo del caudal medio.

6.3.2 Cálculo del caudal medio anual de la cuenca

El cálculo del caudal medio anual se realiza en función de la precipitación media de la cuenca, calculada anteriormente en este capítulo.

Cálculo del caudal medio anual del año 2004:

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2714.5 \text{ mm } \textit{precipitación año 2004}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2714.5 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{211256212}{10^6} = 211.26 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2005

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2635.8 \text{ mm } \textit{precipitación año 2005}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2635.8 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{205131377}{10^6} = 205.13 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2006

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2704.3 \text{ mm } \textit{precipitación año 2006}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2704.3 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{210462396}{10^6} = 210.46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2007

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2807.7 \text{ mm } \textit{precipitación año 2007}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2807.7 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{218509511}{10^6} = 218.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2008

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2844.6 \text{ mm } \textit{precipitación año 2008}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2844.6 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{221381257}{10^6} = 221.38 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2009

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2757.8 \text{ mm } \textit{precipitación año 2009}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2757.8 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{2757.8}{10^6} = 214.63 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2010

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2894.2 \text{ mm } \textit{precipitación año 2010}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2894.2 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{225241381}{10^6} = 225.24 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2011

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2963.9 \text{ mm } \textit{precipitación año 2011}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2963.9 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{230665790}{10^6} = 230.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2012

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2771 \text{ mm } \textit{precipitación año 2012}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2771 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{215653330}{10^6} = 215.65 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del caudal medio anual del año 2013

$$Q_0 = \frac{31.71 * C * \bar{P} * A}{10^6};$$

$$C = 0.6; \quad \bar{P} = 2619.7 \text{ mm } \textit{precipitación año 2013}; \quad A = 4090.46 \text{ km}^2$$

$$Q_0 = \frac{31.71 * 0.6 * 2619.7 * 4090.46}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{203878393}{10^6} = 203.88 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se presenta una tabla resumen de los caudales medios anuales calculados.

Tabla 21

Caudal medio anual en función de la precipitación media anual de la cuenca.

Año	Caudal medio (m^3/s)
2004	211.26
2005	205.13
2006	210.46
2007	218.51
2008	221.38
2009	214.63
2010	225.24
2011	230.67
2012	215.65
2013	203.88

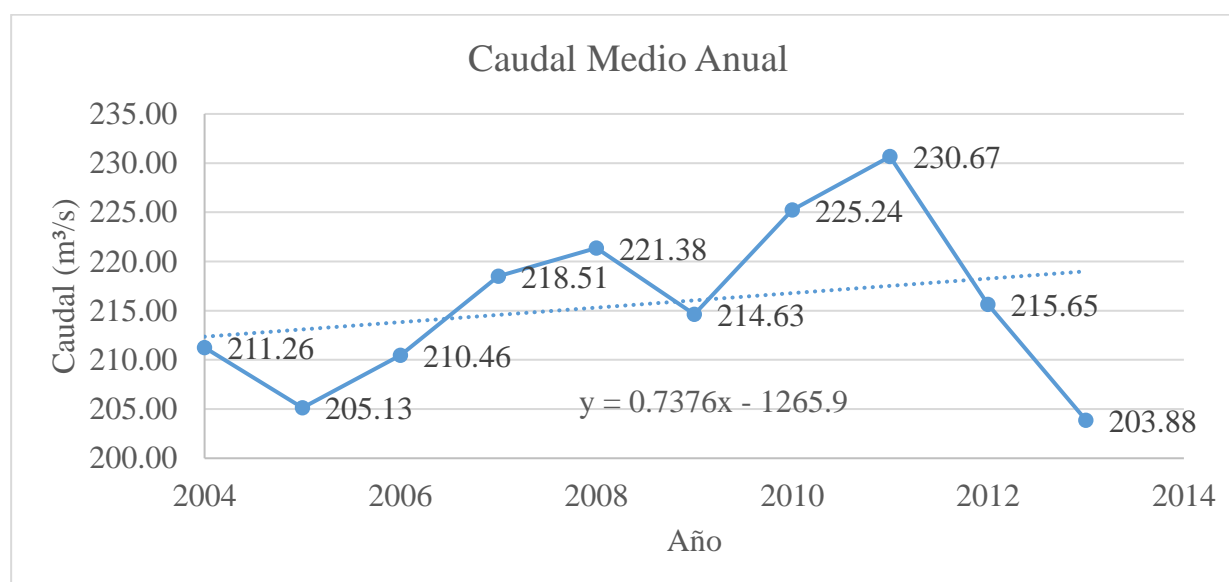


Figura 34. Variación del caudal medio anual en función de la precipitación. Período 2004-2013.

6.4 Relación de factores climatológicos.

Los factores climatológicos como la temperatura, precipitación y caudales están estrechamente relacionados entre sí. Esto quiere decir que en la mayoría de los casos si existe una variación en uno de estos factores, esta variación está relacionada muy probablemente con la variación de algún otro factor climatológico. Aunque también existen otros indicadores que hacen que estos valores varíen como en el caso de los caudales, además de depender de la precipitación, también depende del factor de escurrimiento que tenga la cuenca.

A continuación, se presenta los tres gráficos de dispersión que representan la variación de la precipitación, temperatura y caudal medio. En estos gráficos se puede observar como en ciertos períodos hay variaciones de un factor que influyen en otro.

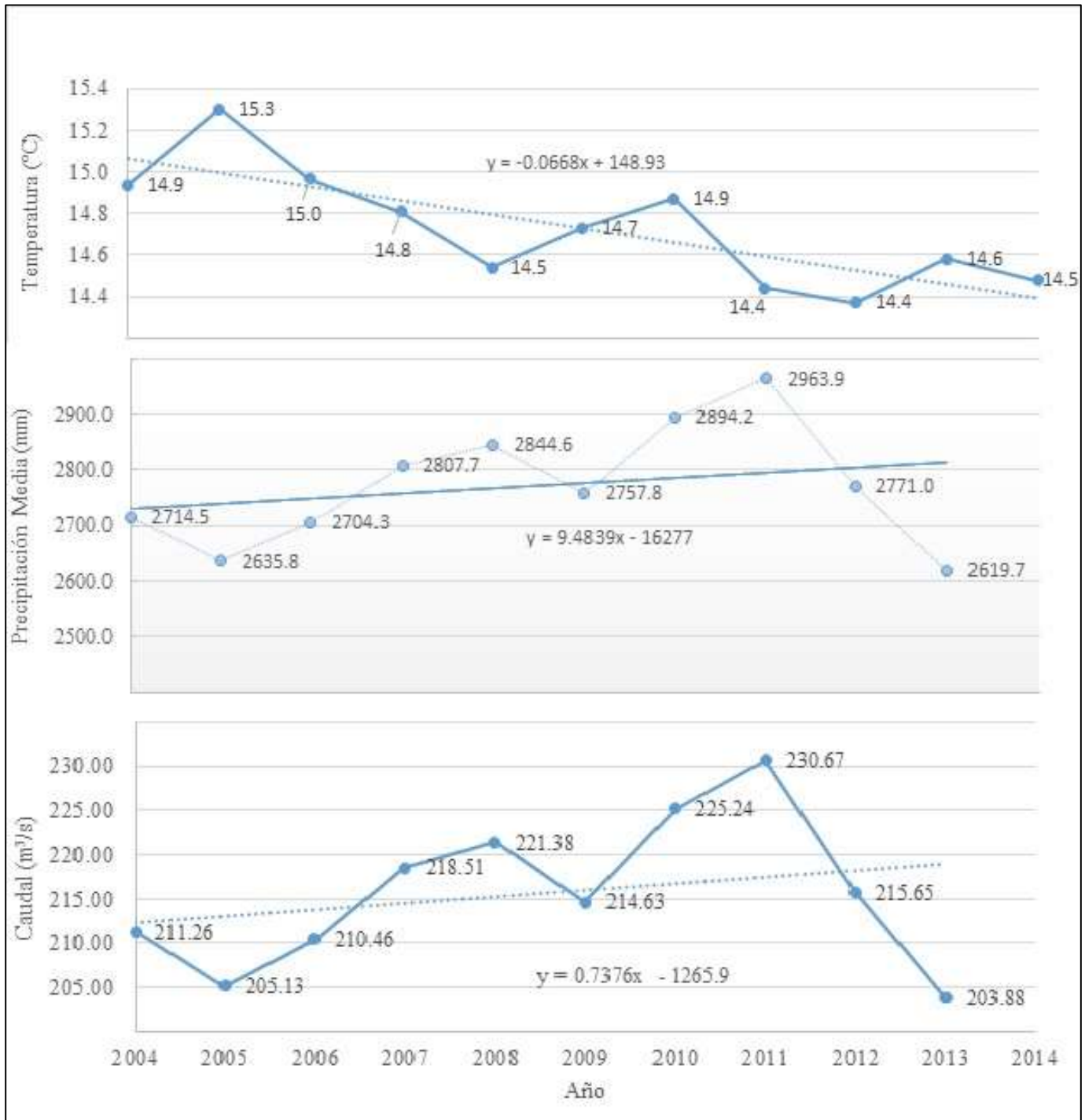


Figura 35. Comparación de temperatura, precipitación y caudal medio anual en el período 2004-2013.

En la Figura 35 podemos observar las tendencias de crecimiento de las precipitaciones y caudales. Por otro lado, la temperatura tiene una tendencia a decrecer en los próximos años en la cuenca.

Existen ciertos períodos en los que se evidencia una correlación inversa entre la temperatura y precipitación, esto sucede en el período 2004-2008 en el cual se puede observar que mientras la temperatura decrece, la precipitación aumenta. Lo mismo sucede en los años 2011-2013.

La proporcionalidad inversa se mantiene en el período 2008-2010 en el cual se observa un aumento de la temperatura y en el mismo período se observa un decrecimiento en las precipitaciones.

6.5 Caudal ecológico.

Una vez calculado los caudales medios anuales de la cuenca procedemos a calcular los caudales ecológicos. Como se ha mencionado anteriormente, el caudal ecológico es una parte del caudal medio el cual se mantiene para asegurar la correcta manutención del ecosistema del río.

Para calcular el caudal ecológico utilizaremos la fórmula propuesta por (Sandoval & Aguilera, 2014) :

$$Q_{eco} = a_e \frac{\bar{P}A}{10^6}$$

a_e es un coeficiente que va desde 1 a 2.5. El valor que se obtiene sin aplicar el coeficiente es en condiciones de equilibrio, pero este valor puede variar por condiciones de uso de agua y otras

caracterizaciones específicas. (Sandoval & Aguilera, 2014). Para este caso utilizaremos un valor de 2.5 para el cálculo.

A continuación se presenta una tabla resumen de los caudales ecológicos en base a los caudales de cada año

Tabla 22

Caudal ecológico en el período 2004-2013

Año	Caudal ecológico (m^3/s)
2004	27.76
2005	26.95
2006	27.65
2007	28.71
2008	29.09
2009	28.20
2010	29.60
2011	30.31
2012	28.34
2013	26.79

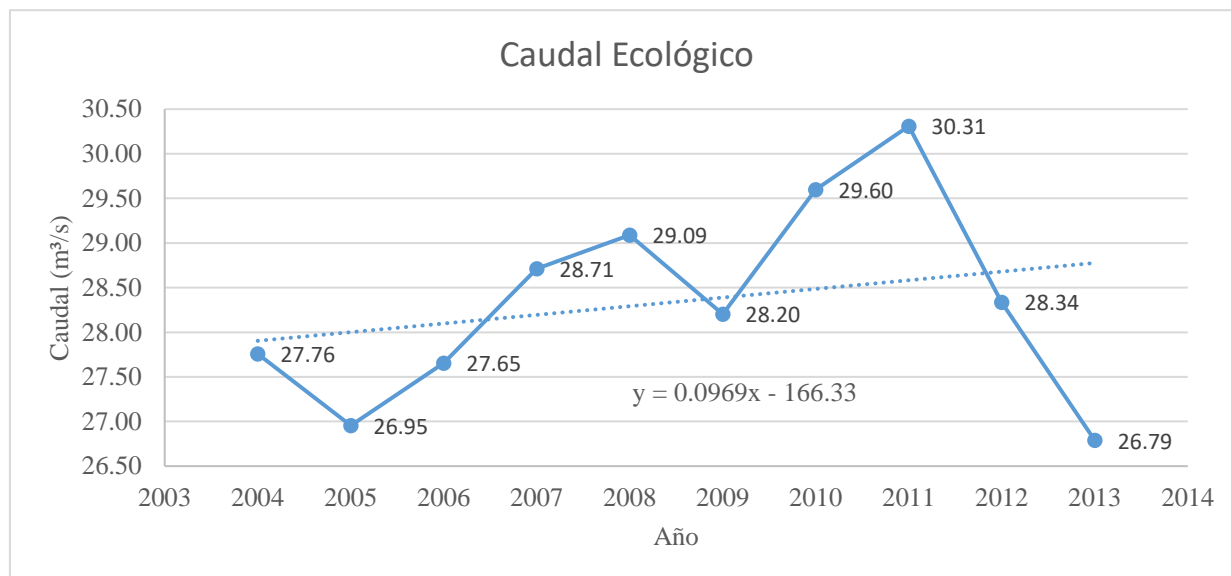


Figura 36. Variación del caudal ecológico en el período 2004-2013

En la Figura 36 podemos observar la variación del caudal ecológico a través del tiempo. Se observa que la tendencia es hacia el aumento del caudal ecológico ya que el caudal medio también tiene una tendencia hacia el aumento.

Según la Ley de Recursos Hídricos del Ecuador el caudal ecológico es el 10% del caudal medio multianual. En el caso de la cuenca en estudio, el caudal ecológico sería $21.65 \text{ m}^3/\text{s}$ en el lugar del Salado. Pero tomando en cuenta la variación que está teniendo el caudal a través de los años, existe una alta probabilidad de que exista un aumento en este valor a próximos años.

Con la ecuación obtenida de la línea de tendencia de caudales ecológicos podemos estimar el valor probable de este caudal en unos años. A continuación, se presenta el cálculo al año 2050.

Ecuación de la línea de tendencia:

$$y = 0.0969x - 166.33$$

Donde x = año; y = caudal ecológico estimado.

El año a estimar será 2050, entonces $x=2050$

$$y = 0.0969(2050) - 166.33$$

$$y = 32.31 \text{ m}^3/\text{s}$$

En el caso del año 2050 el caudal ecológico será de $32.31 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el año 2070 el caudal ecológico será de $34.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Este aumento del caudal ecológico representa el 20% del que se tiene actualmente.

6.6 Impacto en Coca Codo Sinclair.

La Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair necesita de $286.6 \text{ m}^3/\text{s}$ para la generación de 1500 MW de potencia para la cual fue concebida, aunque Synohidro (empresa constructora de la hidroeléctrica) indica que las turbinas solo pueden generar esa potencia 4 horas diarias (Jiménez & Terneus , 2019). Con las tendencias en aumento de los caudales medios y ecológicos, debería replantearse una estrategia para el mejor aprovechamiento de el recurso hídrico ya que con el aumento del caudal medio se podría generar mucha más energía para el país.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- A pesar de que los expertos en cambio climático aseguran un aumento de temperatura de hasta 2°C para el año 2050, en la cuenca del Río Coca se estimó un descenso de la temperatura de hasta 2°C.
- La precipitación y la temperatura de la cuenca tienen una relación inversamente proporcional, mientras que la precipitación y los caudales tienen una relación directamente proporcional, esto indica que los factores climatológicos están relacionados estrechamente entre sí.
- Se determinaron tendencias ascendentes en la precipitación y los caudales, mientras que la tendencia de la temperatura es descendente.
- El caudal ecológico para el año 2050 se estimó en $32.31 \text{ m}^3/\text{s}$. Mientras que para el año 2070 el caudal ecológico se estimó en $34.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Este aumento del caudal ecológico representa el 20% del que se tiene actualmente.
- El caudal medio anual para el año 2050 se estimó en $246.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto representa un aumento del 15% del promedio actual.

7.2 RECOMENDACIONES

- Mejorar el aprovechamiento de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair por la tendencia de crecimiento de los caudales para una mayor generación de energía eléctrica.
- Colocar estaciones de aforo en la cuenca del río Coca para poder verificar las tendencias calculadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Amat y León , C. (2008). *El cambio climático no tiene fronteras: Impacto del cambio climático en la comunidad andina*. Lima.
- Armenta , G. E., Villa , J. L., & Jácome, P. (Junio de 2016). *United Nations Development Program*. Obtenido de <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/EQU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf>
- Asamblea Constituyente . (2008). *Constitución de la República del Ecuador* . Montecristi .
- Barchiesi, S., Davies, P. E., Kulindwa, K., Lei, G., & Martínez Río del Río , L. (2018). Aplicación de los caudales ecológicos con beneficios para la sociedad y distintos ecosistemas de humedales en los sistemas fluviales. *Nota sore Políticas de Ramsar*.
- Beceiro, M. S. (2010). Proceso de concertación de los caudales ecológicos. *XII Congreso nacional de comunidades regantes de España*, (pág. 27). Tarragona.
- Biblioteca Pública de San Jorge. (23 de febrero de 2013). *Wikipedia* . Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Eugiko_presa_-_Presa_de_Eugui.JPG
- Cáceres, B., Jordan, E., Ungerechts, L., Francou, B., & Peñafiel, A. (2010). Evaluación Geométrica del casquete glaciar del volcán Cotopaxi usando fotogrametría digital. *Glaciares. nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas*.
- Calles López, J. (2019). *iagua.es*. Recuperado el 2019, de <https://www.iagua.es/blogs/juan-calles-lopez/caudal-ecologico-ecuador>
- Camilloni, I. (2008). Cambio Climático. *Ciencia hoy*, 39.
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Balarezo, A. L., Narváez, C., & Morocho, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. . *IDESIA*, 81-90.
- Cartaya, S., Zurita , S., & Montalvo , V. (2016). Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador. *La Técnica*, 94-106.
- Cótlar, H., Galindo, A., González , I., Pineda, R., & Ríos, E. (2013). *Cuencas Hidrograficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México: Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.

- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Lavado, W., Carranza, J., Cochonneau, G., De Oliveira, E., . . . Vauchel, P. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. *GEO-ATMOSFÉRICA RPGA*, 99-130.
- Farfán, F., Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones y Salta. *Ciencia*, 5, 7-22.
- Hansen, J., Persin , A., Hendrickson , M., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global Surface Temperature Change. *Reviews Of Geophysics*, 48.
- Horton, R. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hudrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of Ameerica Bulletin*. USA.
- Huguenin, C. (2016). Caudal Ecológico en el mundo y Costa Rica. San Ramón de La Unión .
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. M. (2011). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%20%ADa.pdf>
- Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología . (2011). Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/uploads/downloads/2015/02/PLAN-ESTRATEGICO-INAMHI.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (Septiembre de 2013). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Obtenido de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/docum_institucion/MapasBiblioteca/mapa%20de%20isoyetas%20anual%2081-2010.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2008). *Cambio climático 2007 Informe de síntesis* .
- Jensen, R. (2013). *Climate Change Impacts on Glacier Retreat and Mountain Hydrology and its Implications*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Jiménez , S., & Terneus , F. (2019). Nexo agua-energía: Análisis del flujo hídrico del proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. *INGENIUS*, 53-62.
- López, J. F. (Abril de 2019). *Economipedia* . Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/varianza.html>
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Maestría en Energía y Ambiente*, 1-8.
- Martínez, A. (Noviembre de 2006). *Oasificación* . Obtenido de www.oasification.com
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador*. Quito .

- Ministerio del Ambiente del Ecuador . (2011). *Segunda Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2011). *Segunda Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito: Gráficas Arboleda.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito: Manthra Comunicación .
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). *Evaluación de los Impactos del Cambio Climático sobre la Producción Hidroeléctrica en Ecuador* . Quito .
- Morales, A., & Topón , E. (2016). *Ubicación y diseño de una obra de regulación de caudales sobre el río Quijos*. Sangolquí.
- Naranjo, L. G. (2010). *Cambio climático en un paisaje vivo: Vulnerabilidad y adaptación en la Cordillera Real Oriental de Colombia, Perú y Ecuador*. Santiago de Cali: Comunicaciones WWF.
- OMM. (2012). Índice normalizado de precipitación, guía del Usuario OMM. *Organización Meteorológica Mundial*.
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Sanguesa, C., León, L., & Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC*, 172-185.
- Quintero, H., Ávila, L., & Ávila, L. (2016). *Morfometría Microcuenca Montañera*. Socorro: Universidad Libre.
- Ramírez, E. (2006). Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos. La Paz.
- Rodriguez, R. M. (2014). *Meteorología y Climatología*. Fundación Española para la Ciencia y Tecnología.
- Rosas, L. (2009). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*. UICN SUR.
- Sánchez, J. I. (2018). *El Cambio Climático y los Caudales Ecológicos: Elementos Determinantes de la Construcción de Nuevas Obras Hidráulicas en España*. Alicante.
- Sandoval , W. R. (2019). *Diseño de Obras Hidrotécnicas*. Sangolquí : Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Sandoval, W., & Aguilera, E. (2014). Determinación de Caudales en Cuencas con Poca Información. *Revista Ciencia UNEMI*, 100-110.

- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). *Atlas de Glaciares y Aguas Andinas. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos.* . Arendal: UNESCO, GRID.
- Sorribas, M., Paiva, R., Melack, J., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., . . . Costa, M. H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*.
- Van Vliet, M., Franssen, W., Yearsley, J., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D., & Kabat, P. (2013). Global River Discharge and Water Temperature Under Climate Change. *Global Environmental Change*, 450-464.
- Zambrano, A., Torres, J., & Ibarra, J. (2011). Delimitación, codificación de las cuencas hidrográficas según los métodos de Pfafstetter y Strahler utilizando Modelos de Elevación Digital y técnicas de Teledetección. *XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, 1105-1113.