



Para citar este artículo: Palacios, T. Quishpe, D. Andrade, G. Armenta, G. Arias, M & Gavilanes, S. Análisis de la sensibilidad del caudal aprovechable para generación hidroeléctrica del proyecto “El Tigre” ante los efectos del cambio climático. *Sostenibilidad: económica, social y ambiental*, 6, 97-122, <https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad.25382>

Análisis de la sensibilidad del caudal aprovechable para generación hidroeléctrica del proyecto “El Tigre” ante los efectos del cambio climático

Analysis of the sensitivity of the flow for hydroelectric generation of the "El Tigre" project to the effects of climate change

Teresa Alejandra Palacios Cabrera

Universidad Central del Ecuador, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-6223-0141>
tapalacios@uce.edu.ec

Diego Quishpe Landeta

Ministerio del Ambiente de Ecuador, Ecuador
agdgqgl@hotmail.com

Guido Andrade

Consultor independiente, Ecuador
guidoandrade@yahoo.com

Guillermo Armenta

Consultor independiente, Colombia
motsvansk@gmail.com

Margarita Arias

Membro del colectivo ciudadano Cuenca ciudadana para vivir y de Bici-ñan, Ecuador
ao.margarita24@gmail.com

Sandra Lucía Gavilanes López

Universidad Central del Ecuador, Ecuador
slgavilanes@uce.edu.ec



RESUMEN

Esta investigación genera información valiosa, que permite analizar y evaluar la sensibilidad del caudal aprovechable para generación hidroeléctrica del proyecto “El Tigre” ante los efectos del cambio climático; el análisis plantea propuestas de mitigación y adaptación de la cuenca del río Guayllabamba y las subcuencas como el río Alambí, que provee alternativas y acciones a ser consideradas en el diseño de obras y actividades con miras a la sostenibilidad de las inversiones realizadas en propuestas del gobierno ecuatoriano para el cambio de matriz energética y mega obras en el país. En la metodología se utiliza varios modelos de cambio climático (—GMC), en cuanto a la precipitación cuyas proyecciones indican que, para la zona de estudio existe una probabilidad significativa de incremento de eventos extremos denominados “tormentas” cuyo resultado incide en el aumento en los caudales por día en la zona de intervención del proyecto.

El Proyecto El Tigre soportaría un 87% del caudal de crecida, por lo que el diseño del proyecto no requiere modificación desde el punto de vista estructural, para enfrentar el aumento de precipitaciones como resultado del cambio climático, sin descuidar las medidas de adaptación que se requieren realizar, relacionadas con el manejo integral de la cuenca.

La infraestructura de El Tigre ha sido diseñada para soportar caudales superiores con tiempos de retorno de 100 años, que, bajo los escenarios de cambio climático analizados se prevé que en un futuro no cause daños a la central hidroeléctrica. Siendo necesario contar con el plan de manejo para la cuenca del área de influencia del proyecto.

Palabras clave: hidroeléctrica, caudales, cambio climático, modelos, cuenca, matriz energética, precipitación.

ABSTRACT

This research generates valuable information that allows analyzing and evaluating the sensitivity of the flow for hydroelectric generation of the "El Tigre" project to the effects of climate change; the analysis proposes mitigation and adaptation proposals for the Guayllabamba river basin and sub-basins such as the Alambí river, which provides alternatives and actions to be considered in the design of works and activities for the sustainability of the investments made in proposals of the Ecuadorian government for the change of energy matrix and mega works in the country. The methodology uses several climate change models (-GMC), in terms of precipitation whose projections indicate that, for the study area, there is a significant probability of an increase in extreme events called "storms", the result of which affects the increase in daily flows in the project intervention area.

The El Tigre Project would support 87% of the flood flow, so the project design does not require modification from the structural point of view, to face the increase in precipitation as a result of climate change, without neglecting the adaptation measures that need to be carried out, related to the integrated management of the basin.

El Tigre's infrastructure has been designed to withstand higher flows with return times of 100 years, which, under the climate change scenarios analyzed, are not expected to cause damage to the hydroelectric plant in the future. It is necessary to have a management plan for the watershed in the project's area of influence.

Keywords: hydroelectric, hydroelectric power, climate change, modeling, basin, energy matrix, precipitation.

1. Introducción

El proceso de cambio en la matriz productiva y energética en Ecuador generó notables inversiones en infraestructura hidráulica (—centrales hidroeléctricas, proyectos multipropósito, entre otros); ante esto, es importante conocer las amenazas del cambio climático al sector hidroeléctrico.

El recurso hídrico constituye el elemento indispensable para el desarrollo de los territorios, así como la supervivencia de las especies; sin embargo, el cambio climático afecta a los ecosistemas de diferente manera e intensidad, unos más evidentes que otros. El informe (UNESCO, ONU-AGUA, 2020), define al Cambio Climático como los cambios en la intensidad y la frecuencia de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, ya que dichos cambios incluyen un descenso de las temperaturas extremadamente bajas, un aumento de las temperaturas extremadamente altas, la subida de los niveles extremadamente altos del mar y un aumento en el número de los eventos de lluvias torrenciales en una serie de regiones.

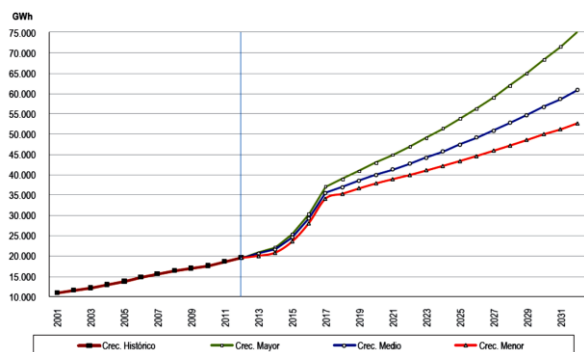
El presente trabajo, busca articular la investigación científica y la planificación en torno a los proyectos hidroeléctricos, ante el cambio de matriz energética y las consecuencias que se derivan del cambio climático. Ecuador ha planteado energías limpias con el cambio de matriz energética del país, considerando una transición de una economía dependiente del petróleo a una economía verde. En este sentido, el efecto del cambio climático a los recursos hídricos puede ser determinante para alcanzar el Buen Vivir, según lo planteado en la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025.

Con este criterio (—vulnerabilidad), es importante conocer las posibles variaciones en el caudal aprovechable en el río Guayllabamba en donde se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre” cuando se incorpora y considera variables de cambio climático, para lo cual se realiza estimaciones de precipitación al año 2099, cálculos hidrológicos y variación del caudal aprovechable basados en análisis de precipitación—escorrentía y propuestas de manejo y gestión de la cuenca que permitan orientar futuras intervenciones y mitigar los riesgos asociados ante este cambio global.

Este proyecto busca analizar la sensibilidad del caudal aprovechable para generación hidroeléctrica del proyecto “El Tigre” siendo importante las proyecciones de caudal máximo mediante el uso de modelos hidrológicos empíricos que incluya variables como precipitación, temperatura, humedad entre otras, lo cual permita desarrollar medidas adaptativas para obras y actividades del proyecto hidroeléctrico.

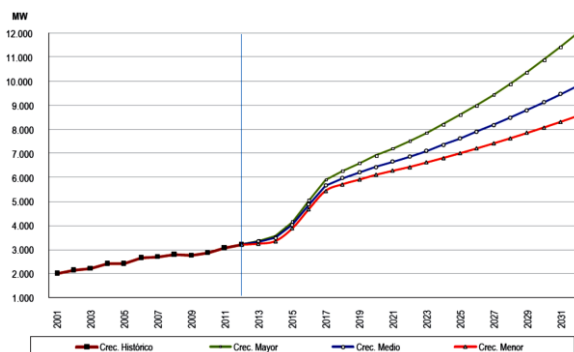
Se considera la oferta y demanda eléctrica en el Ecuador como uno de los componentes esenciales para el desarrollo económico del país. Bajo este precedente es indispensable poder determinar el comportamiento actual y futuro de la oferta y demanda eléctrica e hídrica, considerando los posibles impactos producidos por variables políticas, económicas, sociales, ambientales y tecnológicas.

Figura 1. Proyección de la demanda anual de energía eléctrica



Fuente: Plan Maestro de Electrificación 2013 – 2022. CONELEC

Figura 2. Proyección de la demanda anual de potencia eléctrica



Fuente: Plan Maestro de Electrificación 2013 – 2022. CONELEC

La política del gobierno ecuatoriano es asegurar el abastecimiento permanente y continuo de energía eléctrica, en las mejores condiciones y escenarios de calidad, a los menores costos posibles de producción que permitan tarifas de venta asequibles al usuario final, promoviendo e incentivando el desarrollo de la hidroelectricidad, la energía renovable y la eficiencia energética. La matriz energética del país aún depende, de los combustibles fósiles que afectan significativamente la economía del país, y el calentamiento global.

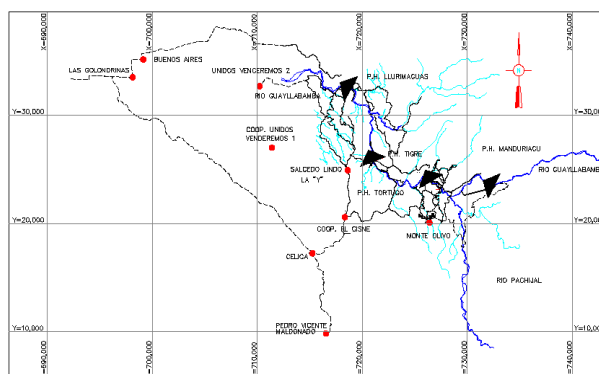
2. Metodología

2.1. Área de estudio

El Proyecto Hidroeléctrico (—P.H.) El Tigre con una potencia instalada de 80 MW, se localizan al norte de Ecuador sobre el río Guayllabamba, en el tramo que fluye en los límites de las Provincias de Pichincha, Imbabura y Esmeraldas.

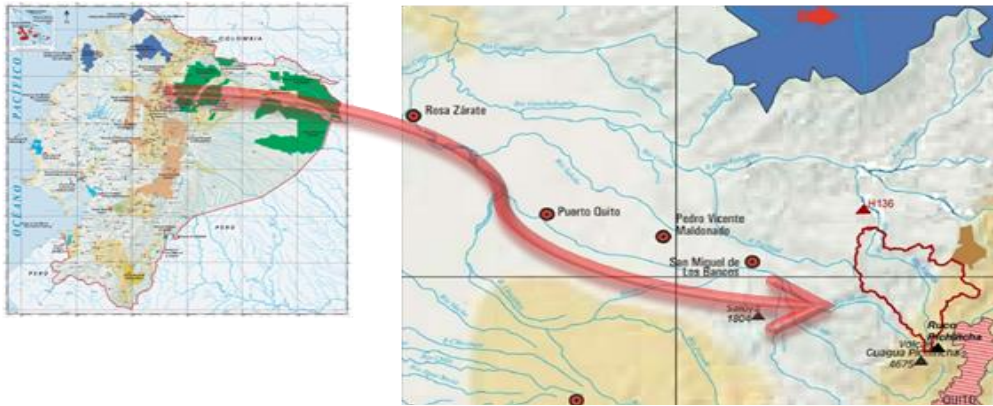
El área de estudio está comprendida entre las cotas 04561 msnm en el Ruco Pichincha y 1050 msnm hasta el sitio en donde se ubica la estación Alambí en Churupamba H136 en la Parroquia Nanegal, área que corresponde a una zona montañosa, gran parte de la cuenca de drenaje se encuentra cubierta de pastizales, cultivos aislados de maíz y bosques arbustivos en las laderas aledañas a los ríos y quebradas.

Figura 3. Ubicación al Proyecto El Tigre



Fuente: Estudio de factibilidad avanzada, Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre” – HIDROEQUINOCCIO EP

Figura 4. Área de estudio



Fuente: ECOLAP y MAE. 2007. Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Quito, Ecuador

2.2.Climatología, hidrología y crecidas en el sitio del Proyecto

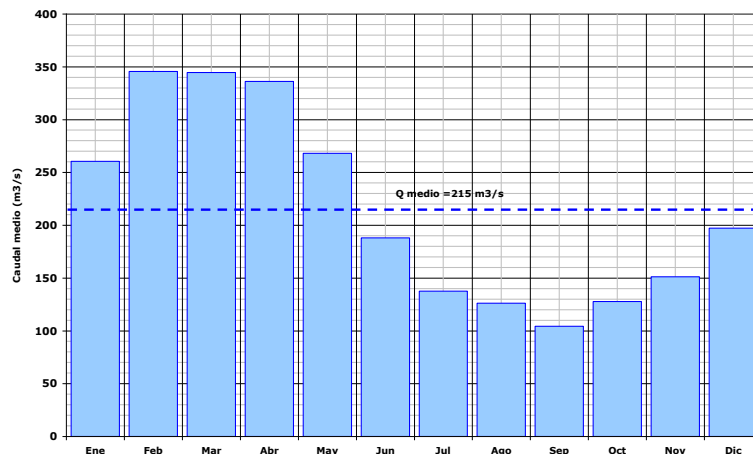
El Proyecto Hidroeléctrico El Tigre recibe la influencia del régimen hidrológico de la vertiente del Océano Pacífico que hidrológicamente es complementaria a la vertiente oriental del Océano Atlántico, los proyectos ubicados en la cuenca del Guayllabamba complementarán la producción hidro energética de los proyectos de la cuenca amazónica. La temperatura media oscila entre 25°C a 28°C y la precipitación total anual en la zona de los proyectos, registrada en la Estación Pachijal, Mashpi, es de 3045 mm al año.

Se ha considerado las estaciones hidrométricas: Guayllabamba DJ Alambi H-146 (—1964-2006) y Guayllabamba DJ Pachijal H-147 (—1979 -1988) y la estación meteorológica Pachijal, Mashpi M-046. Entre las estaciones H-146 y H-147 se complementaron los datos de periodos similares con los datos de la estación H-147, de donde se obtiene los valores de caudal aprovechable en el sitio del Proyecto Hidroeléctrico El Tigre.

2.3.Caudales del Proyecto Hidroeléctrico El Tigre

El estudio hidrológico se realizó con el caudal medio anual para el proyecto El Tigre es de 215 m/s.

Figura 5. Caudales medios mensuales, para el Proyecto Hidroeléctrico El Tigre



Fuente: Estudio de factibilidad avanzada, Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre” – HIDROEQUINOCCIO-EP

Para escenarios climáticos se han utilizados los modelos de circulación general atmósfera océano (—GCM), cuya metodología de evaluación y validación ha sido desarrollada por la (—Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático y Primer Reporte Bienal de Actualización, 2016). Estos modelos tienen una representación tridimensional, caracterizan el clima global con una resolución horizontal que varía entre 250 y 600 km para distintas capas verticales, entre 10 y 20 capas en la atmósfera y hasta 30 en los océanos.

2.4. Modelos de Cambio Climático para Ecuador (—GMC)

Un escenario de cambio climático es una representación del clima y de la concentración de gases de efecto invernadero (—GEI), permite anticiparse a los posibles hechos y generar un accionar eficaz a los cambios sociales, ambientales, económicos y políticos necesarios para no llegar a una situación proyectada de un futuro desfavorable.

La metodología aplicada corresponde a un downscaling dinámico desarrollado por la TCN del Ecuador en base a trabajos previos desarrollados por IDEAM et. al (—2015); utiliza modelos globales del clima con una resolución de unos 25km, definidos sobre una región limitada en este caso la estación M 339 ubicada en el río Alambí, en el presente estudio se utilizará la mayor precipitación registrada en el periodo 2011-2099 bajo los RCP 4,5 y 8,5. Se utiliza la información nacional de los modelos globales que mejor representan el clima de referencia y que la precipitación hasta el año 2100 para la cuenca del río Alambí.

Modelos de cambio climático:

- MIROC-ESM, El modelo del sistema terrestre MIROC (—Model for Interdisciplinary Research on Climate – Earth System Model).
- IPSL-CM5A-LR, desarrollado por Institut Pierre-Simon Laplace.
- CSIRO-Mk3.6.0, desarrollado por Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence.

2.5. Modelo Hidrológico con Escenarios de Cambio Climático

El efecto de cambio climático (—2011-2099) sobre el caudal disponible para la generación en el Proyecto Hidroeléctrico, se identificó la relación entre la precipitación y su influencia en el caudal producido en el río, para evidenciar el “modelo lluvia – escorrentía”, el cual depende directamente de las características topográficas, geológicas, climáticas y de la vegetación de la cuenca, siendo necesario caracterizar la cuenca.

2.5.1. Delimitación del área

Para determinar el valor de la superficie, se demarca la cuenca siguiendo la línea de cumbres, y/o la divisoria de aguas, sean estos humedales lagunas, ciénagas, llanuras, entre otros; este trabajo con sistemas de información geográfica.

Se utilizó las cartas topográficas del IGM a escala 1:50 000, las curvas de nivel generadas a escala 1:5 000 a partir de la información LIDAR de SIGTIERRAS, ubicando los sitios de interés para el cálculo de los caudales.

2.5.2. Forma de la Cuenca, Kc

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad, si una cuenca tuviera la forma de un círculo tendría un $K_c = 1$.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{A^{1/2}} \quad \text{Ec. 1}$$

2.5.3. Factor de Forma, Kf

Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que una de misma área y mayor factor de forma.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec. 2}$$

2.5.4. Pendiente Media de la Cuenca, S

Se determina mediante un modelo digital del terreno o DTM en un SIG, donde se ha generado un mapa de pendientes para toda la cuenca.

2.5.5. Longitud del Cauce Principal, Lc

Se determina midiendo el curso de agua, a lo largo de su cauce desde la sección de interés, hasta la divisoria en el sitio más alto de la cuenca.

2.5.6. Pendiente del Cauce Principal, Sc

Para el cálculo se utilizó un CAD y se obtiene los perfiles longitudinales de todos los cauces, y se aplica un método aproximado para determinar la pendiente media de los mismos.

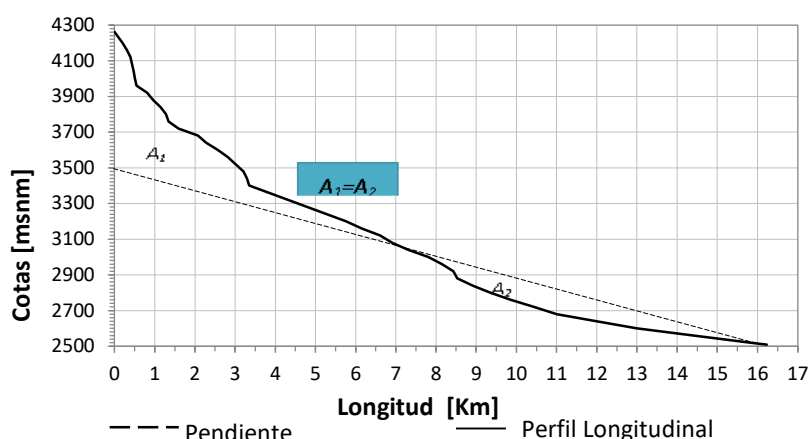
2.5.7. Densidad de drenaje, Dd

Para el cálculo se utilizó un CAD para obtener la longitud total de todos los cauces de cada cuenca.

$$Dd = \frac{L_{TC}}{A} \quad \text{Ec. 3}$$

A mayor densidad de drenaje más dominante es el flujo en un cauce frente al flujo a través de una ladera, en el presente estudio se tiene alta densidad de drenaje.

Figura 6. Perfil longitudinal de un río y pendiente media del cauce principal



Fuente: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

El río Alambí desde su nacimiento sigue un eje en sentido sur-norte y es alimentado por numerosas sub-cuencas como la de los ríos Ambuasí, Blanco, Pichán y quebradas que fluyen en sentido sur-norte y sureste-noroeste, formando una extensa red de drenaje que dan cuenta de una precipitación considerable en esta cuenca, la densidad de drenaje es de 1.4 km por cada km², la pendiente media del río hasta el sitio de captación es de 5.5% y, la elevación media de la cuenca es de 3500 msnm.

Características físicas de la cuenca hidrográfica delimitada hasta la estación hidrométrica Alambí en Churupamba.

Tabla 1. Ubicación y características Físicas de las áreas de drenaje

Cuencas	Coordenadas WGS84-UTM		Área [km ²]	Perímetro [km]	Coef. Comp. Kc	Coef. Forma Kf	Longitud Cauce Principal [km]	Longitud Total Cauces [km]	Densidad Drenaje Dd	Pend. Cuenca [%]	Pend. Cauce [%]
	X	Y									
Alambi-G.	756109,9	10024042,8	538,2	145,5	1,8	0,1257	65,44	814,35	1,5131	47,8	4,013
Tulipe	756346,3	10021358,1	7,8	54,3	1,7	0,1324	24,241	134,69	1,7317	37,52	4,4224
H0136	757911,3	10016117,1	436,5	118,3	1,6	0,1624	51,843	644,98	1,4776	47,8	4,6522
Sacuañal	760730,1	10013930,9	9,0	42,9	1,3	0,2	21,1	145,65	1,6361	37,52	6,2013
Pichan	760237,4	10014521,5	94,2	91,1	1,8	0,1	36,9	288,59	1,4863	50,69	6,0664

Fuente: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

2.6.Suelos y cubierta vegetal de la zona

La cuenca del río Alambí, está compuesta por pastizales, cultivos aislados de maíz y caña de azúcar, vegetación arbustiva y pequeñas áreas de bosque en las empinadas laderas junto al cauce de los ríos. Los suelos muestran presencia de limos arcillosos y arenas. La clasificación hidrológica de los suelos de la zona corresponde a un suelo tipo B cuyas características son moderadamente bajo potencial de escorrentía. Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos, bien drenados y suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas. (—Nomsalve Sáenz , 1999)

2.7.Registros meteorológicos

Se utilizó las series de datos de los anuarios meteorológicos del INAMHI, considerando la precipitación media mensual, precipitación máxima, temperaturas medias, máximas y mínimas. Las estaciones con las que se caracterizó la precipitación y temperatura se tomaron del Plan Maestro de Electrificación 2023- 2022 CONELEC y permitió determinar la intensidad, duración y frecuencia de lluvia.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas

COD	NOMBRE	TIPO	LATITUD			LONGITUD			ALT. (m)	PROV.	FECHA INSTALACIÓN	INSTIT. ENCARGADA	TIPO DE INFORMACIÓN
			GG	MM	SS	GG	MM	SS					
M001	INGUINCHO	CO	0 °	15 '	30 " N	78 °	44 '	3 " W	3185	IMBABURA	08-oct-76	IINAMHI	Precipitación Acum.
M046	PACHIJAL MASHPI	CP	0 °	11 '	22 " N	78 °	57 '	0 " W	560	PICHINCHA	15-dic-76	INECEL	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
													Temperatura
													Temperatura Absoluta
M086	SAN VICENTE DE PUSIR	CP	0 °	29 '	39 " N	78 °	2 '	29 " W	1870	CARCHI	01-ago-84	INERHI	Precipitación Acum.
M106	LITA	CO	0 °	52 '	5 " N	78 °	26 '	59 " W	720	MABABURA	01-jun-64	INAMHI	Precipitación Acum.
M154	CAYAPAS	CO	0 °	51 '	28 " N	78 °	57 '	44 " W	55	SMERALDA	01-dic-64	INAMHI	Precipitación Acum.
M156	QUININDÉ (Convento Madres Laur	CO	0 °	18 '	28 " N	79 °	28 '	8 " W	109	SMERALDA	20-sep-63	INAMHI	Precipitación Acum.
M212	MINDO INECEL	CP	0 °	2 '	52 " S	78 °	44 '	8 " W	1235	PICHINCHA	27-feb-76	INECEL	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
													Temperatura
													Temperatura Absoluta
M213	LA PERLA	CP	0 °	11 '	34 " N	78 °	40 '	10 " W	1410	PICHINCHA	04-sep-76	INECEL	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
													Temperatura
													Temperatura Absoluta
M216	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	CP	0 °	1 '	0 " N	78 °	53 '	24 " W	1115	PICHINCHA	26-nov-75	INECEL	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
													Temperatura
													Temperatura Absoluta
M318	APUELA - INTAG	PV	0 °	21 '	34 " N	78 °	30 '	41 " W	1620	IMBABURA	10-jun-64	INAMHI	Precipitación Acum.
M325	GARCÍA MORENO	PV	0 °	14 '	2 " N	78 °	37 '	37 " W	1950	IMBABURA	06-dic-75	INAMHI	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
M326	SELVA ALEGRE IMBABURA	CP	0 °	15 '	4 " N	78 °	24 '	34 " W	1800	IMBABURA	04-jun-74	INAMHI	Precipitación Acum.
M327	CHONTAL BAJO	PV	0 °	14 '	0 " N	78 °	50 '	0 " W	700	IMBABURA	21-sep-67	INAMHI	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.
M337	SAN JOSÉ DE MINAS	PV	0 °	10 '	8 " N	78 °	23 '	35 " W	2440	PICHINCHA	03-jul-64	INAMHI	Precipitación Acum.
M339	NANEGALITO	PG	0 °	4 '	0 " N	78 °	40 '	35 " W	1653	PICHINCHA	08/07/1964	INAMHI	Precipitación Acum.
													Precipitación Máx.

Nota: CP: climatológica principal; PV: pluviométricas; PG: pluviográficas; CO climatológica ordinaria

Fuente: Anuarios Meteorológicos del INAMHI. Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

2.8.Registros hidrométricos

Se utilizó los registros hidrométricos de la estación Alambí en Churupamba H136, Tabla 3.

Tabla 3. Estación hidrométrica Alambi en Churupamba.

CÓD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	TIPO	CUENCA	Coord WGS84 - UTM		ALTURA (msnm)	PROV	TIPO INFORMACION DISPONIBLE
				X UTM (m)	Y UTM (m)			
H136	ALAMBI EN CHURUPAMBA	LG	80	757924.35	10016084.55	1050	17	Caudales Aforos Curva de Descarga

Fuente: INAMHI y Anuarios Hidrológicos del Inamhi; Nota: En la columna “tipo” LG es Limnigráfica; Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP.

2.9. Caracterización climática

La estación Alambí en Churupamba está ubicada en la estribación occidental de la Cordillera de Los Andes lo que significa que recibe mayor influencia de las masas de aire húmedo proveniente del Océano Pacífico.

La lluvia anual media de la zona es de 2219 mm, una temperatura anual media de 20.7°C, valores extremos absolutos de 5°C y 34°C. En la tabla 4 y 5 se encuentran los valores de caudal máximo y medias de precipitación de cada estación respectivamente.

Tabla 4. Caudal máximo asociado a los períodos de retorno

Periodo de retorno Tr (años)	Caudal Máximo (m³/s)
2	914
5	1361
10	1673
20	1983
25	2077
50	2400
100	2725
200	3060
500	3523
1000	3892
2000	4277
5000	4768

Fuente: Estudio de factibilidad avanzada, Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre” – HIDROEQUINOCCIO EP

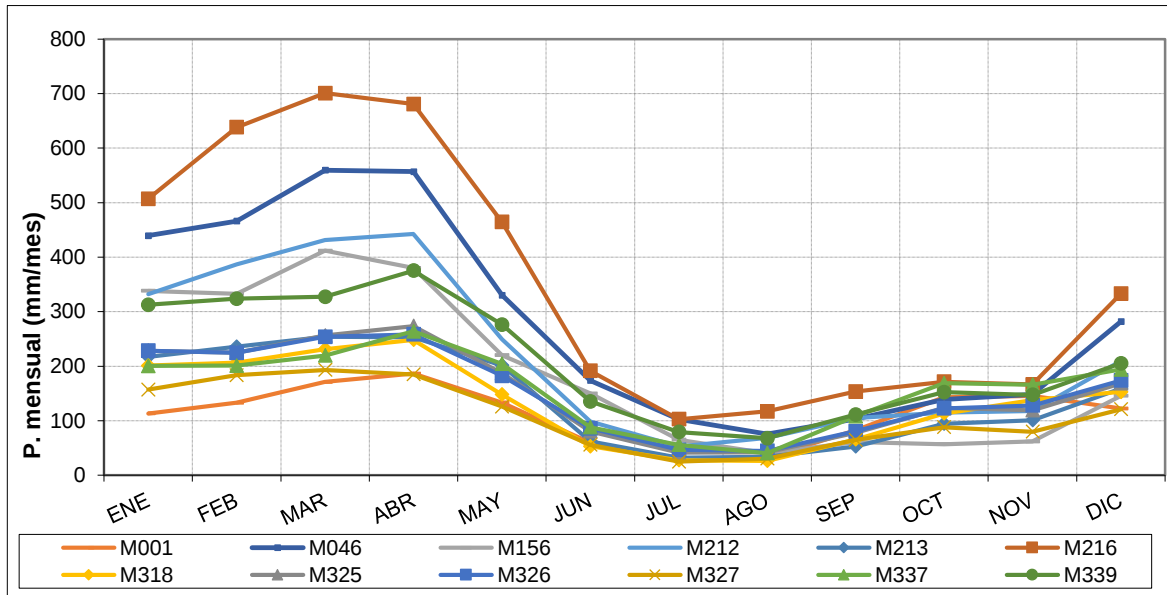
Tabla 5. Precipitaciones medias mensuales por estación

CODIGO	ESTACIÓN	ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANNUAL
M001	INGUINCHO	3185	113.3	133.0	171.3	186.4	133.3	60.1	31.2	32.3	82.5	143.1	145.7	122.5	1360.9
M046	PACHIJAL MASHPI	560	439.4	466.2	559.6	556.8	330.4	173.8	102.8	75.6	103.5	139.1	148.4	281.8	3536.4
M156	QUININDÉ (Conv. Madres Lurib	109	338.2	332.6	411.8	380.3	220.3	150.1	65.2	40.5	61.0	56.9	62.0	145.6	2345.1
M212	MINDO-INECEL	1235	332.0	386.8	431.2	442.8	249.3	98.4	52.6	68.3	105.1	114.7	117.8	209.7	2551.8
M213	LA PERLA	1410	217.4	235.9	254.4	252.7	201.6	62.4	32.4	34.1	52.9	94.5	101.0	159.3	1752.8
M216	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	1115	507.0	638.3	700.8	680.7	464.6	191.3	102.8	117.3	153.6	171.6	166.5	333.0	4052.3
M318	APUELA - INTAG	1620	201.1	206.5	231.4	248.4	147.9	53.1	27.6	26.6	65.7	113.3	137.8	153.1	1615.7
M325	GARCÍA MORENO	1950	228.3	225.0	256.3	273.6	187.3	80.6	41.4	42.0	77.8	123.8	119.3	168.5	1831.2
M326	SELVA ALEGRE-IMBABURA	1800	228.5	224.7	254.0	258.3	182.3	86.0	46.7	44.5	80.7	122.9	128.0	174.0	1835.0
M327	CHONTAL BAJO	700	157.0	183.6	193.2	184.9	125.9	55.8	24.9	30.6	64.8	88.2	80.0	120.9	1301.3
M337	SAN JOSÉ DE MINAS	2440	200.5	201.0	219.6	264.1	204.3	88.0	55.9	40.5	108.3	168.8	166.2	194.2	1924.4
M339	NANEGALITO	1653	312.8	323.7	327.4	375.1	276.3	135.5	79.5	67.9	111.2	152.4	147.3	205.3	2521.4
	MEDIA	1231.2	280.8	294.9	328.1	343.4	243.4	121.0	71.6	63.7	101.3	135.6	130.4	195.7	2219.0

Fuente: INNAMHI y Anuarios Hidrológicos del INAMHI, Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

Nota: La precipitación media mensual y anual son el promedio multianual de cada mes y año de cada estación.

Figura 7. Variación estacional de precipitación en la cuenca del río ALAMBI



Fuente: INNAMHI y Anuarios Hidrológicos del INAMHI.

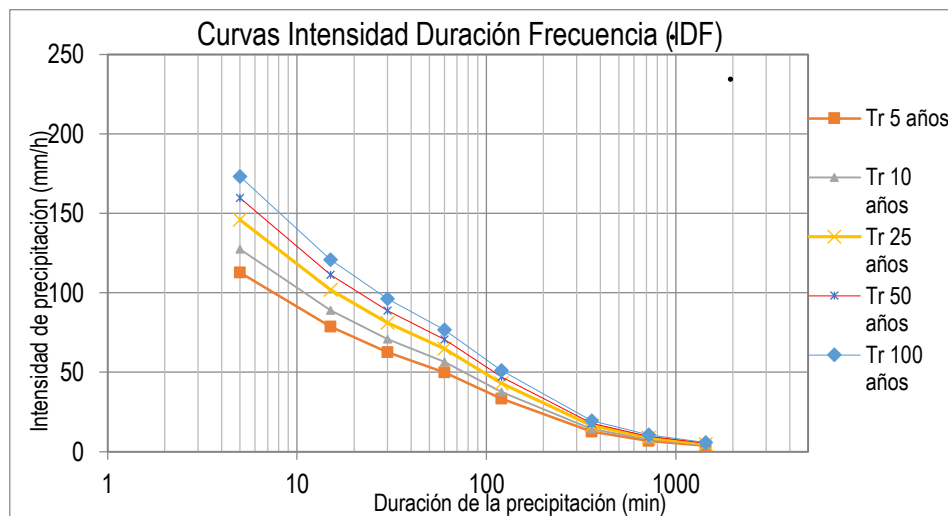
Nota: La precipitación media mensual y anual son el promedio multianual de cada mes y año de cada estación.

Elaboración: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

2.9.1. Intensidad de precipitación

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvia se elaboraron para 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720 y 1440 minutos de duración y para 5, 10, 25, 50 y 100 años de período de retorno, partiendo del estudio de lluvias intensas en Ecuador (INAMHI 2015), a continuación, se presentan la ecuación y las curvas correspondientes. Se considera las Ecuaciones de intensidad, duración y frecuencia (—IDF).

Figura 8. Curvas de Intensidad Duración Frecuencia



Fuente: Estudio de lluvias intensas del INNAMHI (2015)

Elaboración: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

2.9.2. Temperatura

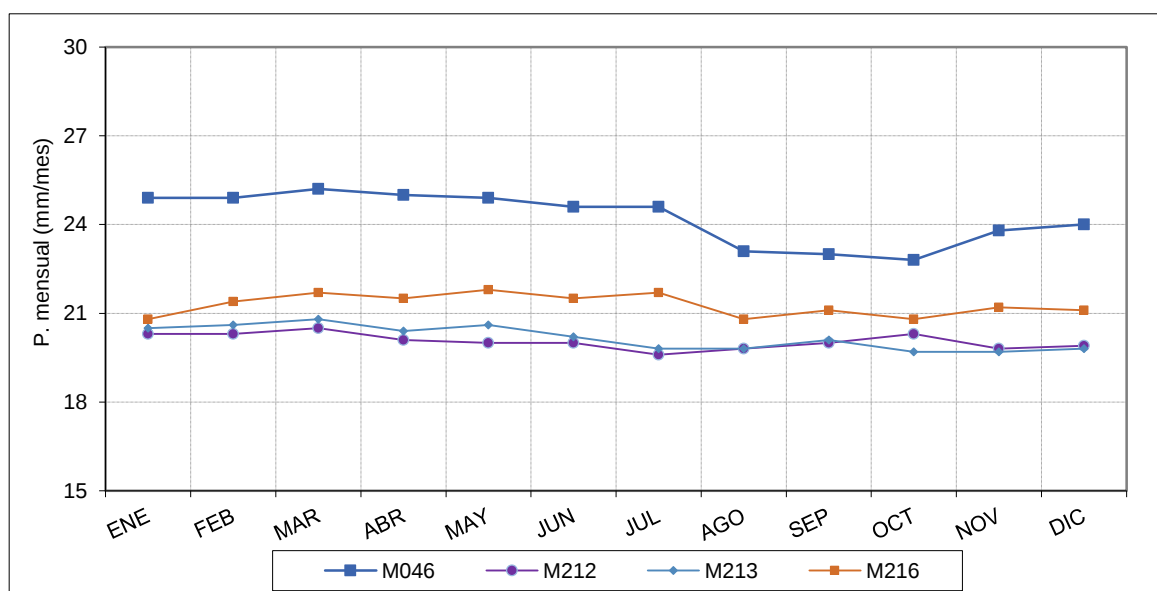
Se presenta los cuadros resumen de la precipitación media mensual, mínima y las máximas absolutas de las cuatro estaciones que presentan información climática en la zona.

Tabla 6. Tabla de temperaturas

CÓDIGO	ESTACIÓN	ALTITUD	Temperatura media mensual	Temperatura máxima absoluta	Temperatura mínima absoluta
M046	PACHUALMASHPI	560	23.4	34.0	14.5
M212	MINDO-INECEL	1236	19.4	29.6	8.5
M213	LA PERLA	1410	19.8	28.6	8.6
M216	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	1115	20.3	29.0	11.4
		10800	20.7	34.0	17.0

Fuente: INNAMHI y Anuarios Hidrológicos del INAMHI. Elaboración: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

Figura 9. Variación estacional de la temperatura media mensual



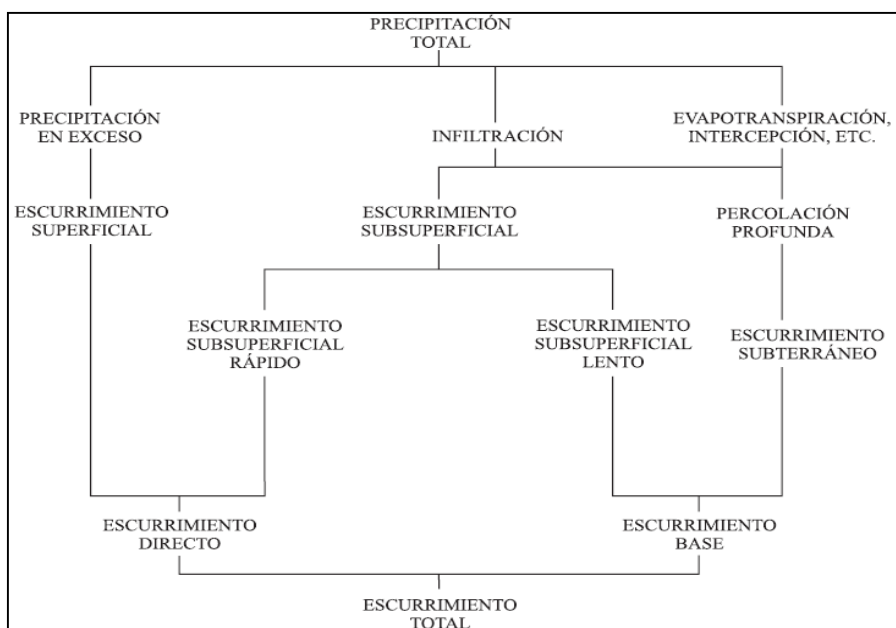
Fuente: INNAMHI y Anuarios Hidrológicos del INAMHI.
Elaboración: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

En la figura 9 se observa que la temporada más cálida se extiende de diciembre a junio en la temporada Invernal, en los meses de verano es decir de julio a noviembre se experimentan las menores temperaturas medias en la zona.

2.10. Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica de las áreas de drenaje de los ríos y quebradas son necesarias para entender los procesos físico-geográficos que condicionan la presencia de caudales. En la figura 10 se describe la variación estacional: precipitación, infiltración, escurrimiento superficial, escurrimiento sub-superficial y percolación, además de la evaporación desde el suelo.

Figura 10. Variación estacional de la temperatura media mensual



Fuente: Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico (Chow, 1964:14-214-3). Elaboración: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>

3. Resultados y discusión

3.1. Cálculo de caudales en áreas de drenaje

Para las cuencas mayores a 5 km² el cálculo del caudal se realiza mediante la modelación hidrológica de cuencas utilizando el método del Soil Conservation Service SCS con la ayuda del programa HEC-HMS. El modelo opera mediante la subdivisión de una cuenca en subcuencas tomando como criterio los tributarios de la corriente principal. Permite simular la transformación de una lluvia histórica o hipotética en caudal, mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos.

El programa tiene tres módulos principales, la cuenca, la precipitación y el control, en el modelo se considera precipitación histórica, características del suelo, morfometría de las subcuencas e información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escurrimiento, en el cual se especificaron los siguientes parámetros:

- Para la infiltración, el método del número de curva CN, que asocia la cobertura vegetal y el tipo del suelo;
- Para la transformación de la lluvia en escurrimiento fue usado el método del Soil Conservation Service SCS;
- No se tomó en cuenta el flujo base.

Se trabajó con caudales para 50 y 100 años de período de retorno mediante la modelación hidrológica en el programa HEC-HMS.

3.2. Intensidad de precipitación

Según el estudio “DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN” (—INAMHI,2015), la relación Intensidad-Duración-Frecuencia (—IDF) correspondiente a la precipitación registrada en la estación Nanegalito M339, ubicada en las coordenadas geográficas: latitud sur 0°4'0'' y longitud oeste 78°40'35'' a una altura 1653 msnm, donde las ecuaciones (—IDF) son:

Tabla 7. Ecuaciones de intensidad, duración y frecuencia (IDF), para la zona de estudio

Estación	Duraciones de lluvia en minutos		Ecuación IDF	N°
	Desde (min)	Hasta (min)		
NANEGALITO M339	5	41.1	$I_{Tr} = 106,54 \cdot Idtr \cdot t^{-0.38}$	Ec. 4
	41.1	1440	$I_{Tr} = 772,11 \cdot Idtr \cdot t^{-0.913}$	Ec. 5

Fuente: INAMHI (2015). Elaboración Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

I_{Tr} , Intensidad en mm/hora, $Idtr$ (—coeficiente asociado al período de retorno en años)
 t , Duración de la lluvia en minutos.

Para el presente estudio la duración de la lluvia es igual al tiempo de concentración, dichas duraciones de la lluvia dependen de la ecuación a aplicar.

Tabla 8. Coeficiente $Idtr$ asociado a cada período de retorno para la zona de estudio

Idtr					
2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
2,88	3,58	4,05	4,64	5,07	5,5

Fuente: INAMHI (2015).

Elaboración: Estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Guayllabamba – HIDROEQUINOCCIO EP

3.3. Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda el agua de escorrentía procedente del punto hidrológicamente más alejado para llegar al punto de salida de la cuenca y constituir un caudal de aporte constante. Para el cálculo de este tiempo, se utilizaron seis diferentes ecuaciones de cálculo que son: Soil Conservation Service SCS, Hathaway, Viparelli, Puglisi, Merlo y Kirpich.

3.3.1. Soil Conservation Service SCS

$$tc = 3,42L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{-0.7} \left(\frac{S}{100} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. 6}$$

El CN número de curva (—coeficiente asociado a la cobertura vegetal, uso del suelo, capacidad de infiltración), en el presente estudio se utilizó el valor de 76, el cual corresponde al promedio ponderado de las áreas que conforman la cuenca del Río Alambi y está dado por una condición de humedad antecedente alta (—tipo II) es decir, entre tres y cinco días de lluvia antes del evento extremo a calcularse; un tipo de cobertura vegetal cuya condición hidrológica es buena y tiene un moderado potencial de escorrentía, en especial para las zonas desprovistas de vegetación original y suplantada por cultivos; y, se considera que el suelo es tipo C con tasa de infiltración lenta, con potencial de escorrentía moderadamente alto cuando están muy húmedos, que pueden ser pobremente drenados a moderadamente bien drenados, con texturas moderadamente finas a finas y con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta. (—Nomsalve Sáenz , 1999)

Tabla 9. Numero de curva (CN) para la zona de estudio

Nº	Cuenca	CN
1	Alambi-G.	75
2	Tulipe	73
3	H0136	75
4	Saguañal	73
5	Pichan	77
6	Alambi	73
7	PichánAlambi-H0136	76
8	H0136-Alambi G. (Promedio)	76

Fuente: Valdivieso P. (2011), Tesis “Incidencia del cambio en el uso del suelo en los caudales; casos de estudio: cuencas de los ríos Alambi, Intag y Quijos”. EPN – Quito.

3.3.2. Hathaway;

El valor de CN es utilizado para el cálculo del tiempo de concentración según la ecuación 7, y además es el dato para determinar la infiltración en el método de cálculo del caudal utilizado en el programa Hec-HMS.

$$tc = 36,36.(L.n)^{0,467} (S)^{-0,234} \quad \text{Ec. 7}$$

Tabla 10. Valores referenciales de la rugosidad para aplicar ecuación de HATHAWAY

Tipo de superficie	Valores de n
Lisa e impermeable	0,02
Lisa, suelo desnudo	0,10
Cobertura pobre, cultivos en surcos o suelo desnudo moderadamente rugoso	0,20
Pastos	0,40
Bosques, follaje al final de la temporada de crecimiento	0,60
Bosques coníferos o bosques maderables con pastos de raíces profundas.	0,80

Fuente: Aparicio. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México D.F. 2005.
Referencia: U. S. Bureau of Reclamation. Design of Small Dams. U. S. Government Printing Office, Washington, 1974

3.3.3. Viparelli

$$tc = 60 \frac{L}{v}$$

Ec. 8

Tabla 11. Velocidades medias para determinar el tiempo de concentración (tc) para aplicación de ecuación VIPARELLI

Velocidad media [m/s]						
Sc [%]		Bosque	Pastos	Canal natural no bien definido	Sc [%]	V [m/s]
0	3	0.3	0.5	0.3	1 2	0.6
4	7	0.6	0.9	0.9	2 4	0.9
8	11	0.9	1.2	1.5	4 6	1.2
12	15	1.1	1.4	2.4	6 8	1.5

Fuente: Aparicio. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México D.F. 2005.
Referencia: U. S. Bureau of Reclamation. Design of Small Dams. U. S. Government Printing Office, Washington, 1974.

3.3.4. Puglisi, Zanframundo 1978

$$tc = 6L^{\frac{2}{3}}(H_{max} - H_o)^{-\frac{1}{3}}$$

Ec. 9

3.3.5. Tournon da Merlo 1973

$$Tc = \frac{0,396L}{\sqrt{i} \left(\left(\frac{S}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{i}{i_v}} \right)^2}$$

Ec. 10

3.3.6. Kirpich 1940

$$tc = 3,96L^{0,77} \left[\frac{1000L}{H_{max} - H_0} \right]^{0,385}$$

Ec. 8

3.4. Modelación con HEC-HMS

El HEC-HMS es un programa de simulación hidrológica, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, perdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa (—Palacios, 2022).

Para la modelación se consideró:

- Para separar la lluvia neta de la lluvia total (—Loss Method) se empleó el método de número de curva del SCS (—SCS Curve Number).
- Para transformar la precipitación neta a escorrentía directa (—Transform Method), se utilizó el método de hidrograma unitario sintético del SCS (SCS Unit Hydrograph).
- Para el tránsito de caudales (—Routing Method), se usó el método de Muskingum.

Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

- Precipitación histórica o de diseño.
- Características del suelo.
- Morfométrica de las subcuencas.
- Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
- Información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (—métodos de tránsito).

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, se consideró:

- Registros de caudales máximos instantáneos históricos.
- Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos.

3.5. Precipitación histórica o de diseño

Se construyó los hietogramas a diferentes frecuencias a partir de información pluviométrica, para lo cual se utilizó la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones que se encuentran en zonas representativas de la cuenca del río Alambi bajo los escenarios de cambio climático RCP 4,5 y RCP 8,5.

Los valores de caudal obtenidos usando el modelo lluvia – escorrentía, son comparados con valores de caudal obtenidos de registros históricos para determinar el valor de caudal de crecida probable el mismo que está relacionado a un período de retorno de 100 años en el sitio del proyecto, y con la modelación de cambio climático, es posible conocer el impacto en la intensidad de lluvias a futuro en la cuenca del río Alambí, con lo cual es posible conocer el impacto que podría tener el cambio climático global en el caudal.

3.6. Cálculo de la precipitación y caudales máximos en área de estudio utilizando la caracterización de la cuenca y datos históricos con la utilización de HEC-HMS

3.6.1. Cálculo del tiempo de concentración (tc)

Se considerar que a menos tiempo de concentración la velocidad media estimada en el cauce será mayor y viceversa, esta velocidad en la zona, no excede 1,5 m/s y los valores de tiempo de concentración son los que se derivan de la aplicación de la ecuación Viparelli (—Ec. 8), con la que se obtiene una velocidad promedio de 1,1 m/s.

Tabla 12. Tiempos de concentración en minutos, calculados en minutos

N.º	Cuenca	<i>tc [min]</i>	<i>tc [min]</i>	Precipitación máxima [mm/año]	Q [m³/s] Hec – Hms
		<i>Viparelli</i>	<i>Adoptado</i>	Tr = 100 años	Tr = 100
1	Alambi-G.	908,9	908,9	128,0	405,3
2	Tulipe	336,7	336,7	117,4	48,4

N.º	Cuenca	<i>tc</i> [min]	<i>tc</i> [min]	Precipitación máxima [mm/año]	Q [m³/s] Hec – Hms
		Viparelli	Adoptado	Tr = 100 años	Tr = 100
3	H0136	720,0	720,0	125,5	343,7
4	Sacuañal	292,7	292,7	116,0	57,9
5	Pichan	511,9	511,9	121,8	174,2
6	Alambi	390,5	390,5	119,0	86,6
7	PichánAlambi-H0136	277,6	277,6	115,5	45,6
8	H0136-Alambi G.	251,8	251,8	114,5	21,2

Elaboración: Los Autores con apoyo de la Ing. Margarita Arias Ortega M.Sc.- Hidróloga

3.6.2. Cálculo de la intensidad de precipitación máxima asociada (I_{Tr})

Cálculo de la Intensidad de precipitación máxima asociada a un período de retorno:

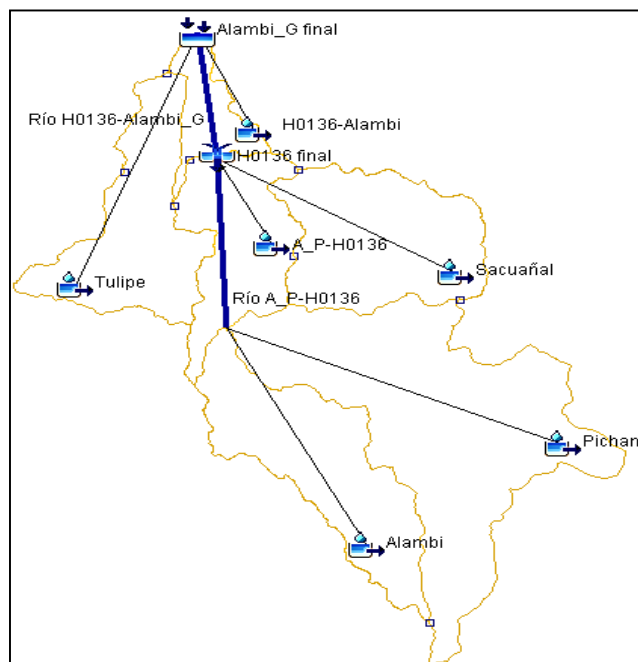
$$I_{Tr} = 772,11 \cdot Idtr * t^{-0.913} \quad \text{Ec: 11}$$

(—Ec. 2:), debido a que todos los tiempos de concentración (— t_c) son mayores a 41,1 minutos, los resultados de este cálculo se observan en la tabla 7.

3.6.3. Cálculo de caudal asociado a la precipitación máxima en un período de retorno de 100 años.

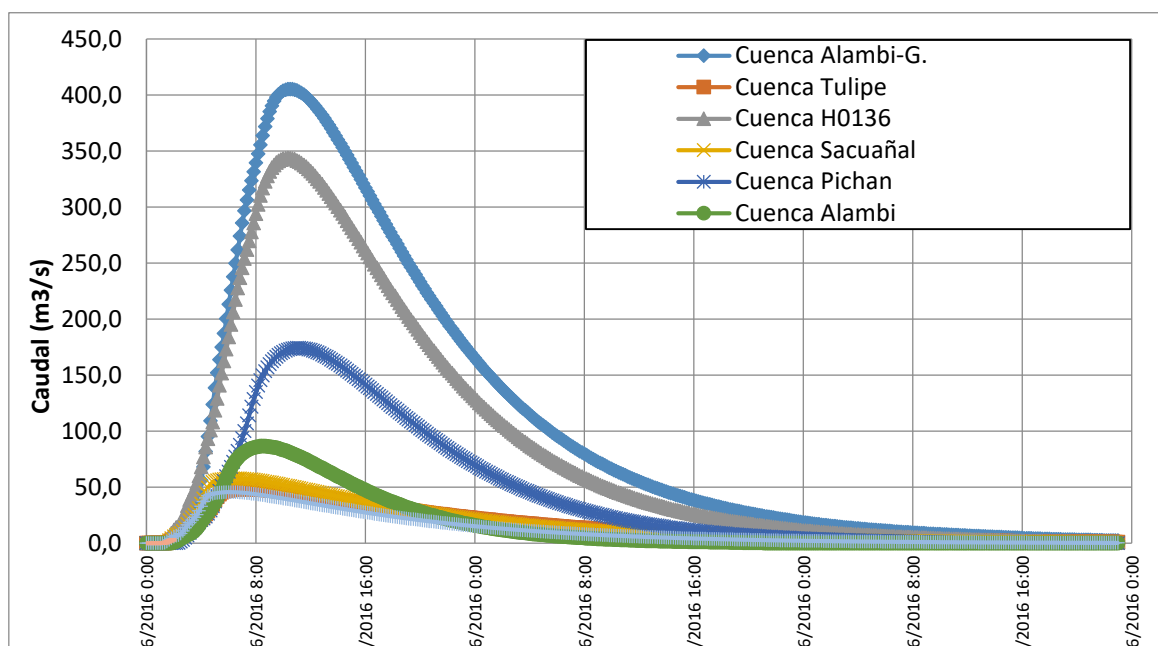
La modelación con HEC-HMS para un período de retorno de 100 años, permitió calcular los caudales. Estos resultados permiten contar con un factor de seguridad para el control de crecidas con las estructuras hidráulicas diseñadas.

Figura 11. Subdivisión del área de la cuenca del Río Alambi hasta la junta con el Río Guayllabamba



Elaboración: Los Autores con apoyo de la Ing. Margarita Arias Ortega M.Sc.- Hidróloga

Figura 12. Hidrograma de crecida resultante de la cuenca del río Alambi



Elaboración: Los Autores con apoyo de la Ing. Margarita Arias Ortega M.Sc.- Hidróloga

3.7. Validación de los resultados obtenidos.

Resultados de la aplicación del modelo para un período de retorno de 100 años.

Tabla 13. Caudal máximo de crecidas en la estación hidrológica Alambi en Churupamba H-0136, con período de retorno de 100 años, utilizando diferentes modelos

SITIO DE CONTROL	Caudal pico de Crecida (m³/s) Modelo lluvia – escorrentía Hec – Hms Tr = 100
H0136(Estación Hidrológica Alambi en Churupamba)	238

Elaboración: Los Autores

3.8. Validación del modelo:

El modelo se validó utilizando los valores de caudal medidos desde 1964 hasta el 2006, incorporando el dato de la crecida extraordinaria sucedida el 13 de abril 2011 y la huella de crecida máxima en la estación Alambi en Churupamba – H0136, lo cual se puede visualizar en la figura 13 y en la tabla 9, y a través del método lluvia – escorrentía utilizando el modelo HUSCS (—Unit Hidrograf, Soil Consevation Service USA).

Tabla 14. Valores de caudal de crecida calculada con método estadístico, en la estación hidrológica Alambi en Churupamba H-0136

Periodo de Retorno (años)	Caudal pico de Crecida (m³/s)	Caudal pico de las crecidas m³/s
5	238	53
10	272	81
25	309	123
50	333	264
100	355	327

Fuente: “Descripción hidrológica del proyecto hidroeléctrico Palmira – Nanegal”; Hidroequinoccio EP – 2012.

Tabla 15. Comparación de resultado de caudal máximo de crecidas en la estación hidrológica Alambi en Churupamba H-0136, con período de retorno de 100años, utilizando diferentes modelos

SITIO DE CONTROL	Q [m³/s] Modelo lluvia – escorrentía Hec – Hms Tr = 100 ACTUAL INVESTIGACION 1	Q [m³/s] Método estadístico Tr = 100 ESTUDIO DE HIDROEQUINOCCIO EP 2	% Desviación Entre 1 y 2	Q [m³/s] Modelo lluvia – caudal HUSCS Tr = 100 ESTUDIO DE HIDROEQUINOCCIO EP 3	% Desviación Entre 1 y 3
H0136(Estación Hidrológica Alambi en Churupamba)	343,7	355	3,29%	327	-4,86%

Elaboración: Los Autores

Los resultados obtenidos presentan una desviación menor al 5% con relación a los valores calculados, calificando que el proceso es confiable.

El modelo lluvia – escorrentía, y el software HEC – HMS, puede utilizarse para el cálculo de valores de caudal con datos de lluvias futuras obtenidos de la aplicación de modelos de cambio climático utilizados para esta investigación.

3.9.Cálculo de la precipitación y caudales máximos en área de estudio utilizando modelos de cambio climático para la cuenca con la aplicación de HEC-HMS

Para la obtención de las precipitaciones máximas, en la cuenca de estudio Río Alambi, se utilizaron tres modelos de circulación global (—MCG) que son: CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, con dos proyecciones de incremento de temperatura, de 4,5°C y 8,5°C, generadas por calentamiento global, llamado también Representative Concentration Pathways, cuyas siglas son RCP. (—CSIRO, 2001; IPSL, 2008; National Institute for Environmental Studies, 2010). En las figuras 13, 14 y 15, se puede observar el comportamiento de la precipitación máxima con los tres modelos de circulación global (—MCG), con un incremento de temperatura de hasta 4,5°C, denominado RCP 4,5 y con un incremento de temperatura de hasta 8,5°C, denominado RCP 8,5

Figura 13. Precipitación esperada utilizando el modelo de circulación global CSIRO-Mk3-6-0 con RCP 4,5 y 8,5

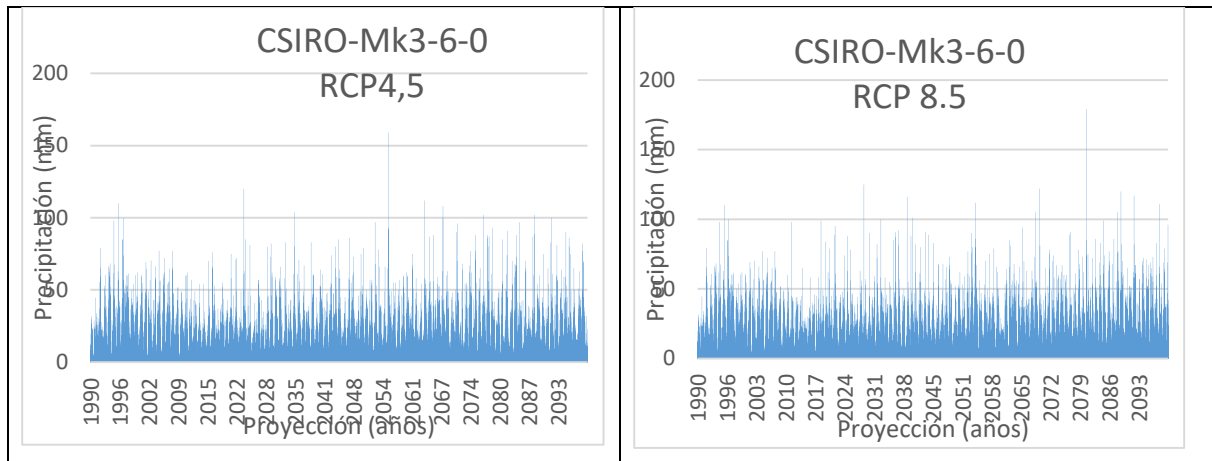


Figura 14. Precipitación esperada utilizando el modelo de circulación global IPSL-CM5A-LR con RCP 4,5 y 8,5.

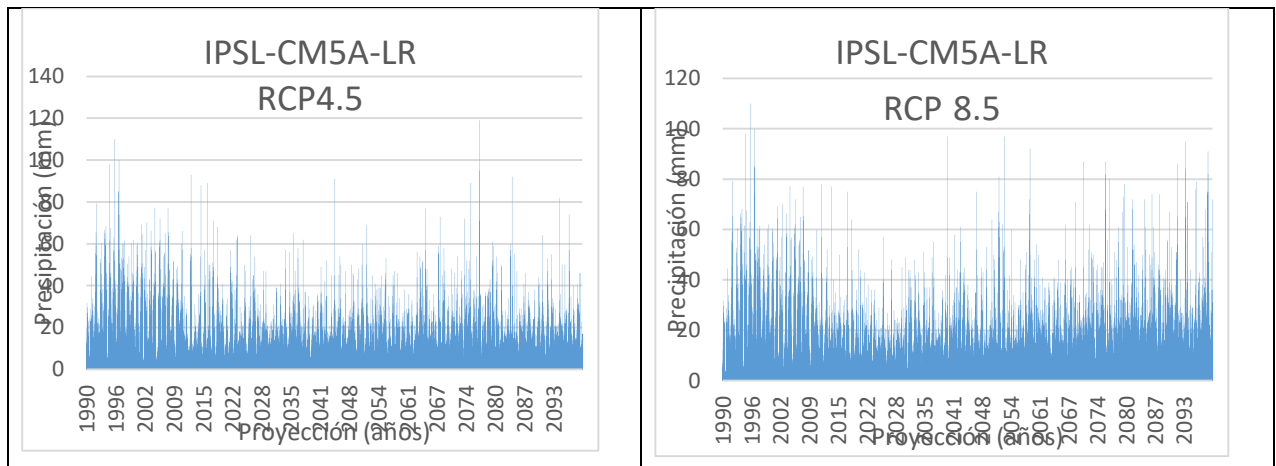
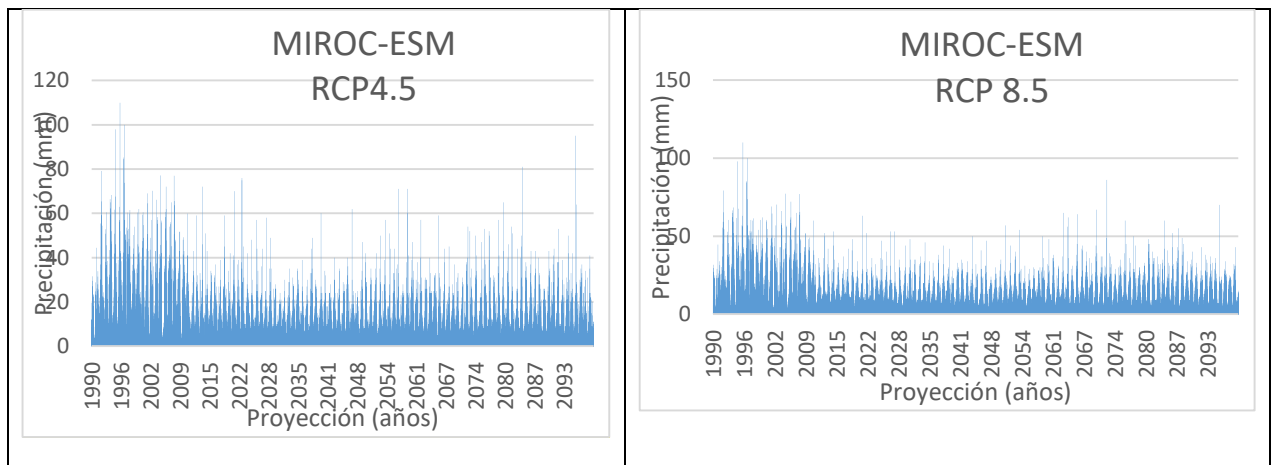


Figura 15. Precipitación esperada utilizando el modelo de circulación global MIROC-ESM con RCP 4,5 y 8,5



Obtenido el comportamiento y los máximos valor de precipitación en los tres modelos de circulación global con un RCP de 4,5 y 8,5, se procede a calcular los caudales asociados a la

precipitación máxima obtenida de los tres modelos en un período de retorno de 100 años, el cálculo de caudal se determina mediante la modelación hidrológica en el programa HEC-HMS, estos caudales se comparan con los caudales obtenidos de la modelación con programa HEC-HMS basada en los datos de la intensidad de medidos en la cuenca y proyectados a un período de 100 años, lo cual se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16. Proyección de caudales en la cuenca del río Alambi sin la aplicación de MCG y con la aplicación de MCG

Nº	Cuenca	Caudal máximo [m³/s] con modelación con Hec – Hms para período de retorno de 100 años		
		Proyección de datos medidos en la cuenca	Proyección con MCG a RCP de 4,5	Proyección con MCG a RCP de 8,5
1	Alambi-G.	405,3	665,8	802,2
2	Tulipe	48,4	80,4	96,4
3	H0136	343,7	561,7	677,0
4	Sacuañal	57,9	100,6	121,8
5	Pichan	174,2	270,3	322,1
6	Alambi	86,6	145,6	178,0
7	PichánAlambi-H0136	45,6	78,8	94,9
8	H0136-Alambi G.	21,2	35,7	42,6

Elaboración: Los Autores con apoyo de la Ing. Margarita Arias Ortega M.Sc.- Hidróloga

Con los resultados de la tabla 16 se determina que el efecto del cambio climático sobre la cuenca del río Alambi, da un incremento en cantidad y frecuencia en las precipitaciones máximas, lo que se traduce en un incremento del caudal máximo probable en un período de retorno de 100 años

Tabla 17. Caudal máximo esperado en el sitio del Proyecto El Tigre con la aplicación de MCG y RCP de 4,5 y 8,5

Caudal máximo cuenca del río Alambí, obtenido de la aplicación de MCG con RCP de 4,5 y 8,5 con periodo de retorno de 100años		Factor de relación entre el caudal en el río Alambí y el caudal en el sitio del proyecto El Tigre	Caudal máximo, proyectado con la aplicación de MCG con RCP de 4,5 y 8,5 con periodo de retorno de 100años	
Sitio de aplicación del calculo	caudal calculado q [m3/s] tr = 100 años		Sitio de aplicación del calculo	Caudal proyectado con factor de relación de cuencas q [m3/s] tr = 100 años
Alambi-G final (Río Alambi en la desembocadura con el Río Guayllabamba) con RCP 4,5	665,8	6,72	Sitio de implantación del Proyecto El Tigre en el río Guayllabamba con RCP 4,5	4.474
Alambi-G final (Río Alambi en la desembocadura con el Río Guayllabamba) con RCP 8,5	802,2	6,72	Sitio de implantación del Proyecto El Tigre en el río Guayllabamba con RCP 8,5	5.391

Elaboración: Los Autores

El caudal máximo de crecida en el Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre” con la aplicación de los modelos de circulación global MCG es de 4.474 m³/s para un RCP de 4,5 y de 5.391 m³/s para un RCP de 8,5; y considerando el estudio de factibilidad avanzada, el Proyecto el Tigre ha sido diseñado para soportar crecidas máximas de 4.768 m³/s, podemos concluir que el proyecto soportaría, sin inconveniente, el caudal máximo de crecida, por efecto de cambio climático, resultante del incremento de temperatura en el planeta de 4,5°C, en los próximos 100 años.

3.10. Análisis de la cuenca

Analizados los resultados de tendencia al incremento de eventos extremos y mayor precipitación en la zona bajo los RCP 4,5 y 8,5 se sugiere realizar acciones orientadas a mejorar las condiciones físicas de la cuenca y evitar daños ocasionados por la mayor frecuencia de eventos extremos y sedimentación en el PH El Tigre.

Los problemas identificados que se relacionan con la situación actual y los posibles efectos del cambio climático son jerarquizado.

Tabla 18. Matriz de jerarquización de problemas en la cuenca

PROBLEMA/SINERGIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	TOTAL
1 El recurso hídrico es escaso en relación con la demanda y los escenarios de CC		2	3	2	3	2	1	1	2	3	2	2	2	5	2	2	3	37
2 Escasa capacidad organizativa, carencia de registro y catastros que impiden la gobernanza y GIRH.	5		5	3	3	2	2	2	1	5	2	1	3	5	2	1	1	43
3 Deterioro de la calidad y cantidad del agua por el uso inapropiado del suelo.	5	5		3	3	2	2	2	1	5	2	1	3	5	2	1	1	43
4 Agricultura y ganadería en altas pendientes elevadas, lo que provoca erosión, degradación paisajística, avance de la frontera agrícola.	4	5	4		2	2	2	1	4	5	2	2	3	4	1	1	1	43
5 Uso de técnicas agrícolas inapropiadas, técnicas riesgosas para la conservación de suelos, como el roturado con rastras, el riego por inundación.	5	5	5	3		3	1	2	2		2	2	2	5	1	2	2	42
6 Quema o desbroce de vegetación de áreas que luego de ser cultivadas por un período corto, son virtualmente abandonadas porque han perdido sus nutrientes, falta de inversión de los propietarios, cambio de actividad o domicilio, etc.	4	5	4	3	3		2	2	1	3	2	1	3	5	2	1	1	42
7 Manejo indiscriminado de agroquímicos. (Eutrofización)	4	4	4	2	4	2		3	3	4	2	2	2	5	1	2	2	46
8 Minería metálica y concesiones futuras.	3	3	3	2	4	2	3		3	3	2	1	3	5	1	2	2	42
9 Minería no metálica y extracción de material granular del lecho de los ríos.	4	3	4	2	2	2	1	1		5	2	2	2	3	2	2	3	40
10 Restricciones al aprovechamiento hidroenergético por sedimentos: Ante efectos de CC el dragado será continuo, de alto costo, no alcanza a recuperar la capacidad de regulación del embalse, cuya vulnerabilidad es cada vez será mayor.	5	5	5	3	3	2	2	1	4		3	4	3	5	4	3	3	55
11 Procesos de inestabilidad del terreno.	5	5	5	5	5	2	1	1	2	5		2	2	5	2	2	3	52
12 Alta tasa de fraccionamiento del suelo: Minifundio sobreexplotado.	5	5	5	5	5	2	4	3	4	4	3		3	4	4	4	2	62
13 Crecimiento desigual de la población con predominio de la población urbana contaminación de aguas	4	5	4	5	5	2	1	1	2	5	2	2		5	2	2	3	50
14 Falta de Ordenamiento del uso del suelo para evitar que la población pueda ser afectada por inundaciones, deslizamiento y otros desastres, uso de suelo que deben ser actualizados periódicamente.	5	5	5	3	3	4	4	3	3	5	3	4	3		3	3	3	59
15 Red hidrometeoro lógica deficitaria por lo que se requiere mejorar la red de monitoreo en la cuenca.	4	4	4	5	5	2	3	4	2	5	4	4	4	5		4	4	63
16 Falta de vigilancia de la calidad del agua en los diferentes ríos de la cuenca.	4	5	4	3	3	2	2	2	1	5	3	3	3	5	2		2	49
17 Incremento de la vivienda dispersa en el área periurbana o de influencia de los principales cantones dentro la cuenca que agranda los costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura para el abastecimiento de servicios básicos (agua potable, alcantarillado, energía eléctrica).	5	5	5	5	5	2	1	1	2	5	2	2	2	5	2	2		51

Elaboración: Los Autores

En el Ecuador, la necesidad de manejar armónica y sustentablemente una cuenca hidrográfica ha estado asociada a problemas y potencialidades de los principales recursos naturales renovables (—agua, suelo y cubierta vegetal), a la acción antrópica en relación con su uso de suelo, y a los impactos de deterioro y contaminación.

Para el caso de estudio, por su carácter estratégico en términos de generación hidroeléctrica, la propuesta debe considerar el mediano y corto plazo, el propender a gestionar la dinámica social, económica y ambiental actual para asegurar la provisión del recurso agua en el futuro, seguida de una propuesta que aportarían a fortalecer la resiliencia de la cuenca ante los efectos determinados por el cambio climático en el marco de una gestión integral e integrada de la cuenca.

4. Conclusiones

Los valores de caudal obtenidos luego del proceso de transformación lluvia – escorrentía, son comparados con valores de caudal obtenidos de registros históricos para determinar el caudal de crecida probable, el mismo que está relacionado a un período de retorno de 100 años en el sitio del proyecto, y con la modelación de cambio climático, es posible conocer el impacto en la intensidad de lluvias a futuro en la cuenca del río Alambí, y el impacto que podría tener el cambio climático global en el caudal.

El Proyecto El Tigre soportaría un 87% del caudal de crecida, por lo que el diseño del proyecto no requiere modificación desde el punto de vista estructural, para enfrentar el cambio en el comportamiento de las precipitaciones como consecuencia de cambio climático, sin descuidar las medidas de adaptación que se requieren realizar, relacionadas con el manejo ambiental de la cuenca.

Para estudiar los posibles impactos en el caudal aprovechable para la generación en el Proyecto Hidroeléctrico “El Tigre”, se utilizó tres modelos de circulación global MCG que son: CSIRO-Mk3.6.0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, considerando los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 para un período de retorno de 100 años.

Los modelos de circulación global MCG determinan la variación de parámetros como precipitación por efectos del calentamiento global, por lo que la presente investigación determina el caudal máximo esperado, en la cuenca del río Alambi.

Los caudales máximos probables asociados a la precipitación máxima, se obtuvieron mediante el modelamiento basado en el hidrograma unitario con apoyo del programa HEC-HMS, utilizando las lecturas históricas de precipitación, realizadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, con lo cual se proyecta los caudales a un período de 100 años.

El modelamiento de la cuenca del río Alambi, utilizando el Programa HEC-HMS, en el período de retorno de 100 años, se comparó con cálculos realizados en la misma cuenca utilizando proyecciones estadísticas y el modelamiento lluvia – caudal HUSCS, concluyéndose que el modelo resultante de esta investigación difiere en menos del 5% a los modelos aplicados anteriormente en el mismo sitio de estudio, por lo que se concluye que el modelo aplicado en la presente investigación es aceptable para la determinación de caudales de crecida.

Aplicando los modelos de circulación global MCG, para conocer los efectos de cambio climático en el caudal aprovechable en el Proyecto El Tigre, se concluye que, con un escenario RCP 4.5, el caudal máximo en el sitio del proyecto será de 4.474 m³/s, mientras que para un escenario RCP 8.5 el caudal máximo será de 5.391 m³/s, para un período de 100 años.

Se confirma la hipótesis planteada debido a que el efecto del cambio climático influye en el caudal máximo esperado en el proyecto hidroeléctrico “El Tigre”, generando un impacto económico en su implementación, pues es necesario invertir los recursos necesarios para implementar un plan manejo adecuado para la cuenca del área de influencia del proyecto.

Referencias

CONECEL. (2013). Plan maestro de electrificación 2013-2022. Quito: autor.

Convención marco de las Naciones Unidas. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Nueva York: autor.

CSIRO. (2001). Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence. Australia: autor.

IPCC. (2002). Cambio climático y biodiversidad. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Minghua, Z., Bretherton, C. S., Blossey, P. N., Austin, P. H., Bacmeister, J. T., Bony, S., & Briant, F. (2013). Results from the first phase of an international project to understand the physical mechanisms of low cloud feedbacks in single column models. *Journal of Advances in Modeling Earth SYSTEMS*, 826-842.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2009). Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo. Quito: autor.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., & Rose, S. K. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature. International Weekly Journal of Science*, 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

National Institute for Environmental Studies. (2010). Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo). Japon: autor.

Nomsalve Sáenz , G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Alfaomega.

Ortiz-Ospina, E., & Max , R. (2016). World population growth, 1750-2100. Nueva York: World Population Growth.

Pabón, J. D. (2011). El cambio climático en la región de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia-Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

PACC. (2011). El cambio climático y sus implicaciones en los países andinos. Quito: Ministerio del Ambiente.

Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. (2015). Bogotá: UNFCCC.

Sánchez Brito, H. (2015). Simulación hidrológica de la cuenca del río Alambi en Nanegal frente del uso del suelo y su impacto en el recurso hídrico. Quito: UPS.

Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático y Primer Reporte Bienal de Actualización. (2016). Quito: PNUD.

Watanabe, M., Minoru, C., Yukiko, I., & Masahide, K. (2011). Convective Control of ENSO Simulated in MIROC. American Meteorological Society, 543-562.
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3878.1>