UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON
SEDE SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CAUDALES DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN LORENZO A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA "VISOR DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO" (EUROCLIMA) EN SAN CARLOS, ALAJUELA, COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

DANNY MORA SOLÓRZANO
SUYEN WESTIN BONILLA
ESTUDIANTES DE LICENCIATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ING. LUIS GUILLERMO LORÍA SALAZAR MSc, PhD.
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ING. ALEXANDER BOGANTES SOLANO
TUTOR DE TESIS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COSTA RICA, SETIEMBRE, 2024

Tribunal Examinador

Este Trabajo Final de Graduación fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton

_____

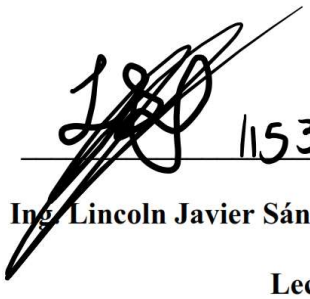
Ing. André Alexander Bogantes Solano

Tutor

_____

Laura Prendas Castillo, MSc.

Presidente



Ing. Lincoln Javier Sánchez Hernández, MEng.

Lector

Declaración Jurada

Yo Danny Mora Solórzano, cédula [redacted] estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton, declaro bajo de fe de juramento y consciente de la responsabilidad civil y penal de este acto, que este Trabajo Final de Graduación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores como si fuera de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos a los 19 días del mes de setiembre de 2024.

Danny Mora S.

Danny Mora Solórzano

Cédula [redacted]

Declaración Jurada

Yo Suyen Westin Bonilla, cédula [redacted] estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton, declaro bajo de fe de juramento y consciente de la responsabilidad civil y penal de este acto, que este Trabajo Final de Graduación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores como si fuera de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos a los 19 días del mes de setiembre de 2024.

SUYEN ANDREA WESTIN BONILLA (FIRMA)

Firmado digitalmente por SUYEN ANDREA WESTIN BONILLA (FIRMA)
Fecha: 2024.09.18 21:26:42 -06'00'

Suyen Westin Bonilla

Cédula [redacted]

Dedicatorias

Las personas más importantes de mi vida son mi familia, con lágrimas en los ojos escribo estas líneas dedicando esta carrera a mi amada esposa Magally Herrara Cuadra, pilar fundamental en mi vida, a mis hijos Sarah Mora y Daniel Mora quienes son mis motores, a mis padres ejemplos de lucha a seguir y finalmente pero no menos importante a Dios quien me da la fuerza y sabiduría para seguir adelante.

Danny Mora Solórzano

A mi madre Delmy, mi hijo Felipe y mi esposo Edson. Esta tesis es el resultado de su amor, apoyo y sacrificio. Ustedes son mi fuente de inspiración, es gracias a ustedes que nunca renuncié a llegar a la meta, en donde hoy estoy. El sueño invaluable que hoy se cumple es dedicado a ustedes, a quienes amo con todo mi corazón.

Suyen Westin Bonilla

Agradecimientos

Las gracias a Dios por permitirme concluir mis estudios, por nunca dejarme solo ante la adversidad y las pruebas a las que he logrado sobre ponerme.

Estoy y estaré agradecido por siempre con mi esposa Magally Herrera Cuadra, mujer luchadora, que día con día me impulso a ser y lograr la culminación de esta tesis y carrera. Con mis padres Agustín Mora Quesada y Melania Solorzano Jiménez quienes me han brindado su apoyo incondicional durante toda mi vida y no tengo como pagarles.

A mi compañera y amiga de tesis y carrera Suyen Westin por toda la paciencia y esmero que ha colocado en esta tesis, que sin lugar a dudas es un producto de altísima calidad.

En fin, el agradecimiento es con la vida que me ha permitido dar lucha y forjarme como persona de bien, para servirle al prójimo y al amor… en el infinito siempre se puede más.

Danny Mora Solórzano

A mi madre Delmy, mi hijo Felipe y mi esposo Edson, quienes me apoyaron y se sacrificaron así mismos para ayudarme a alcanzar uno de mis propósitos de vida.

A todos quienes contribuyeron a mi desarrollo académico y a la culminación de esta tesis, sus aportes valiosos permitieron enriquecerme con sabiduría.

A Danny, mi compañero de tesis, gracias por ser un compañero de mil batallas durante toda la carrera y también en nuestro trabajo final de graduación.

Suyen Westin Bonilla

Carta del Tutor

San Carlos, 19 de setiembre de 2024

Señores

Universidad Isaac Newton

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la tesis elaborada el estudiante Danny Mora Solórzano, cédula [redacted] titulada "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica", período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto el estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

ANDRE ALEXANDER BOGANTES SOLANO (FIRMA)

Firmado digitalmente por ANDRE ALEXANDER BOGANTES SOLANO (FIRMA)
Fecha: 2024.09.20 13:10:34 -06'00'

Ing. André Alexander Bogantes Solano

Tutor de tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta del Tutor

San Carlos, 19 de setiembre de 2024

Señores

Universidad Isaac Newton

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la tesis elaborada la estudiante Suyen Westin Bonilla, cédula [redacted] titulada "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica", período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto el estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

ANDRE ALEXANDER BOGANTES SOLANO (FIRMA)

Firmado digitalmente por ANDRE ALEXANDER BOGANTES SOLANO (FIRMA)
Fecha: 2024.09.20 13:10:58 -06'00'

Ing. André Alexander Bogantes Solano

Tutor de tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta del Lector

San Carlos, 19 de setiembre de 2024

Señores

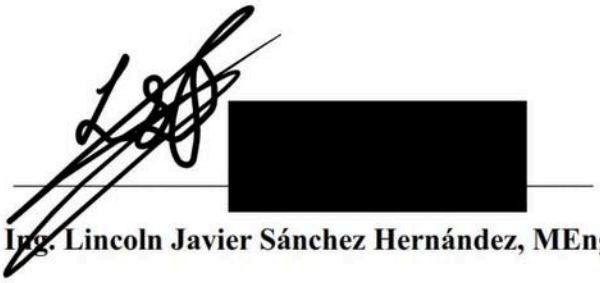
Universidad Isaac Newton

Estimados señores:

En mi calidad de Lector designado a la Tesis elaborada el estudiante Danny Mora Solórzano, cédula [redacted] titulada "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica", período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,



Ing. Lincoln Javier Sánchez Hernández, MEng.

Lector de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta del Lector

San Carlos, 19 de setiembre de 2024

Señores

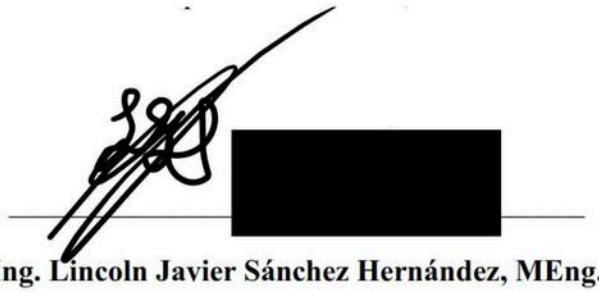
Universidad Isaac Newton

Estimados señores:

En mi calidad de Lector designado a la Tesis elaborada la estudiante Suyen Westin Bonilla, cédula [redacted] titulada "Evaluación del impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a través de la herramienta "Visor de escenarios de cambio climático" (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica", período 2024, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,



Ing. Lincoln Javier Sánchez Hernández, MEng.

Lector de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Nota aclaratoria: En aras de procurar la sencillez de estilo, este documento no hace distinción de género en la redacción, pero rechaza toda discriminación que por este medio pudiere darse.

Índice de contenidos

Tribunal Examinador I

Declaración Jurada II

Declaración Jurada III

Dedicatorias IV

Agradecimientos V

Carta del Tutor VI

Carta del Tutor VII

Carta del Lector VIII

Carta del Lector IX

Resumen Ejecutivo 15

Abstract 16

Capítulo 1: Introducción 17

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación 17

1.1.1 Contexto 17

1.1.2 Justificación 18

1.1.3 Problema de Investigación 21

1.1.4 Estado del Arte 22

1.1.4.1 Inicios del Concepto de Cambio Climático en la Sociedad. 22

1.1.4.2 Origen del Cambio Climático. 24

1.1.4.3 Impactos del Cambio Climático en el Recurso Hídrico. 25
1.2 Objetivos de la Investigación 31
1.2.1 Objetivo General 31
1.2.2 Objetivos Específicos 32
1.3 Las Variables de la Investigación 32
1.3.1 Las Variables de la Investigación 32
1.3.2 Matriz de la Investigación 33
1.4 Alcances 34
1.5 Formulación de la Hipótesis de la Investigación 34
Capítulo 2: Marco Teórico 35
2.1 Análisis del Estudio Hidrológico de la Cuenca 36
2.1.1 Localización de la Cuenca 37
2.1.2 Descripción de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo 39
2.1.3 Caracterización de la Cuenca 42
2.1.3.1 Perímetro. 42
2.1.3.2 Área. 42
2.1.3.3 Índices de Compacidad / Forma (Gravelius). 43
2.1.3.4 Pendiente Media de la Cuenca. 44
2.1.3.5 Pendiente Longitudinal del Cauce Principal. 46
2.1.3.6 Curva Hipsométrica de la Cuenca 47
2.1.3.7 Altitud Media de la Cuenca. 48

2.1.3.8 Densidad Hidrográfica y Número de Orden de las Cuencas. 48

2.1.3.9 Densidad de Drenaje. 49

2.1.3.10 Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra. 50

2.1.3.11 Climatología de la Cuenca. 51

2.2 Caudales de Factibilidad (vigentes) y los Caudales de Generación en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. 53

2.2.1 Caudales de Factibilidad (Vigentes) 53

2.2.2 Caudales de Generación 54

2.3 Proyecciones de Precipitación con la Herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). 58

2.3.1 Escenarios SSP 63

2.3.2 Promedio de Modelos 65

2.3.3 Precipitación 65

2.3.4 Periodo de Análisis 65

2.3.5 Periodo Base 66

2.3.6 Periodo de Proyección 66

2.4 Marco Legal 66

2.4.1 Síntesis del Marco Legal Nacional 67

2.4.2 Leyes Nacionales Asociadas al Cambio Climático 68

Capítulo 3: Marco Metodológico 69

3.1. Tipo de Investigación 69

3.1.1 Naturaleza de la Investigación: Cuantitativa 69

3.1.2 Carácter de la Investigación: Exploratorio 69

3.2 Sujetos y Fuentes de Información 70

3.2.1 Sujetos de Información 70

3.2.2 Fuentes de Información: Primaria, Secundaria o Terciaria 74

3.3 Muestra y Población 77

3.3.1 Tipo de Muestra 77

3.3.2 Descripción de la Muestra 78

3.3.3 Descripción Estadística de la Población en Estudio 79

3.4 Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos 80

3.4.1 Diseño de Instrumentos 80

3.4.2 Aplicación de Instrumentos 80

3.5 Estrategia de Intervención 81

3.5.1 Estrategia de Intervención 81

3.5.2 Paradigma Analítico de Datos 82

3.5.3 Diagrama de Gantt 82

Capítulo 4: Análisis e Interpretación de los Resultados 83

4.1 Presentación de los Resultados para las Variables de Análisis 83

4.1.1 Variables del Estudio Hidrológico 83

4.1.2 Variables de Caudal de Factibilidad 86

4.1.3 Variables de Caudales de Generación 88

4.1.4 Variables de Proyecciones de Precipitación 90

4.2 Análisis y Discusión de los Resultados para las Variables de Análisis 95

4.2.1 Comparación de Resultados 95

4.3 Aceptación o Rechazo de la Hipótesis 97

Capítulo 5: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones 98

5.1 Limitaciones de la Investigación 98

5.2. Conclusiones 99

5.3 Recomendaciones 101

Capítulo 6: Propuesta de Investigación 103

Referencias 104

Apéndices 107

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de variables de análisis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 33

Tabla 2. Tabla de caudales de factibilidad del MINAE en Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE. Fuente: Ministerio de Ambiente y energía. 54

Tabla 3. Histórico de Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L. 57

Tabla 4. Sujetos de Información. Fuente: Danny mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 74

Tabla 5. Fuentes de Información. Fuente: Danny mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 77

Tabla 6. Diagrama de Gantt sobre el proceso de tesis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 82

Tabla 7. Variables del estudio hidrológico. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta. 84

Tabla 8. Análisis de precipitaciones por el método de polígono de Thiessen. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 86

Tabla 9. Tabla comparativa de caudales de factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024 con datos de la Dirección de Aguas del MINAE. 87

Tabla 10. Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo (2013-2023). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de CONELÉCTRICAS R.L. 89

Tabla 11. Precipitación proyectada para el periodo 2013-2024 en la cuenca del Río San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA). 94

Tabla 12. Comparación de Resultados de las Variables de Análisis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 96

Tabla 13. Leyes nacionales. Fuente: Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030 (PNACC). 113

Tabla 14. Entrevista aplicada al Encargado de Descarbonización y Ambiente de CONELÉCTRICAS R.L. Fuente: D. Hidalgo, comunicación personal, 16 de julio del 2024. .. 114

Tabla 15. Ventas en colones por m^3/s. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 115

Índice de figuras

Figura 1. Principales cuencas hidrográficas de Costa Rica. Fuente: Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua, Boletín AGUA/2021 36

Figura 2. Localización de cuenca aprovechada por la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta. 38

Figura 3. Croquis de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 41

Figura 4. Superficie de la Cuenca en Hoja Cartográfica San Lorenzo, coordenadas Lamberth. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024 43

Figura 5. DEM (Modelo de Elevación Digital). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 45

Figura 6. Escorrentía de la cuenca. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 46

Figura 7. Acumulado de red de drenaje. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 49

Figura 8. Fotografía aérea de Google Earth de cuenca aprovechada. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 51

Figura 9. Precipitación promedio anual. Fuente: atlas climatológico del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 52

Figura 10. Medidor de flujo ultrasónico por Efecto Doppler. Fuente: Veto y Cía. Ltda.. 56

Figura 11. Polígono de Thiessen - Áreas tributarias por estación meteorológica. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 85

Figura 12. Escenario base (1981-2010) y escenario de proyección (2015-2044) para época seca (enero-junio) del "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 92

Figura 13. Escenario base (1981-2010) y escenario de proyección (2015-2044) para época lluviosa (julio-diciembre) del "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 93

Figura 14. Vista Aérea de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L. 107

Figura 15. Toma Presa de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L. 108

Figura 16. Planificación nacional del cambio climático. Fuente: Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030 (PNACC). 109

Índice de gráficos

Gráfico 1. Temperatura vs Irradiación Solar. Fuente: Climate NASA. 23

Gráfico 2. Curva hipsométrica cuenca río San Lorenzo. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta. 47

Gráfico 3. Histórico de Caudales Promedio en Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 58

Gráfico 4. Proyecciones de las emisiones totales y concentraciones de GEI (cantidades de CO_2 para el año 2100). Fuente: Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del IPCC. .. 64

Gráfico 5. Comparativo de caudales de factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024 con datos de la Dirección de Aguas del MINAE. 88

Gráfico 6. Comparativo de Caudales de Generación y Caudales de Factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de CONELÉCTRICAS R.L y la Dirección de Aguas del MINAE. 90

Gráfico 7. Comparativa de Caudales de Generación, Proyección y Factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024. 96

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Índice de compacidad / forma. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022. 43

Ecuación 2. Pendiente media de la cuenca. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022. 44

Ecuación 3. Pendiente longitudinal del cauce principal. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022. 46

Ecuación 4. Densidad hidrográfica. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022. 48

Ecuación 5. Densidad de drenaje. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022. 49

Ecuación 6. Tamaño de muestra. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 79

Ecuación 7. Teorema de Proporcionalidad para Caudal Proyectado en el periodo 2015-2044. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024..... 95

Índice de abreviaturas en orden alfabético

ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
BCIE	Banco Centroamericano de Integración Económica
CGR	Contraloría General de la República de Costa Rica
CIVCO	Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica
CNE	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias
CONAVI	Consejo Nacional de Vialidad
CRTM05	Costa Rica Transversal Mercator 05
DCC	Dirección de Cambio Climático de Costa Rica
GEI	Gases Efecto Invernadero
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo)
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IMN	Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
MERCI-CR	Metodología de Evaluación de Riesgo Climático en Infraestructura de Costa Rica
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNACC	Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica
PEG	Plan de Expansión de la Generación
PNA	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica
Q	Caudal en unidades de metros cúbicos entre segundo (m^3/s)
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSP	Shared Socioconomic Pathways (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas)
tlla	Provincias pluviométricas
TEC	Instituto Tecnológico Nacional
UCR	Universidad de Costa Rica

Resumen Ejecutivo

Para inicios de 1972 la ONU presenta la hipótesis de cambio climático y la necesidad de poder aumentar los controles en la atmosfera para lograr entender el fenómeno del cambio climático en sus inicios; no obstante, es hasta el año 1992 que la ONU define el concepto de cambio climático como las alteraciones causadas de forma directa o indirecta por las actividades humanas y que afectan la atmosfera en todo el mundo, provocando la variabilidad en los climas de cada zona geográfica. Costa Rica no es la excepción del caso en cuanto a la variabilidad de los climas, por esta razón la presente investigación está enfocada en los impactos o cambios que ocasiona o que podría ocasionar (predicciones) el cambio climático en las precipitaciones, las cuales son las generadoras de materia prima o recurso hídrico (caudal) para la producción de energía de la central hidroeléctrica San Lorenzo (Alajuela, San Ramon, San Lorenzo), en donde se situara esta investigación, propiamente en su cuenca hidrográfica. El objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo respecto a las proyecciones de precipitación generadas con la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

La evaluación o comparación se realiza con datos de caudales turbinados desde el año 2013 y hasta el año 2023 (10 años), comparando estos datos contra los valores obtenidos para caudales de predicción de las precipitaciones de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), que se calcularán mediante el teorema de proporcionalidad, que involucra datos del histórico de caudales de generación (2013-2023), caudales de factibilidad vigentes (2007) y predicciones de precipitación (2015-2044) de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

Abstract

By the beginning of 1972, the UN presented the hypothesis of climate change and the need to increase atmospheric controls to be able to understand the phenomenon of climate since its beginnings. Nevertheless, it wasn't until 1992 that the UN defined the concept of climate change as alterations caused directly or indirectly by human activities affecting the atmosphere worldwide, leading to variability in the climates of different geographical areas. Costa Rica is no exception to climate variability, which is why this research focuses on the impacts and changes that climate change causes or could cause (predictions) on precipitation, wich are the sources of raw material or water resources (flow) for the energy production of the San Lorenzo hydroelectric plant (Alajuela, San Ramon, San Lorenzo), where this research will take place, specifically in its hydrological basin. The main goal of this research is to evaluate the impact of climate change on the generation flows of the San Lorenzo Hydroelectric Plant concerning the precipitation projections generated with the "Climate Change Scenario Viewer" tool (EUROCLIMA, wich will be calculated using the proportionality theorem, that involves data from the historical generation flows (2013-2023), current feasibility flows (2007) and precipitation predictions (2015-2044) from the “Climate Change Scenario Viewer” tool (EUROCLIMA).

The evaluation or comparison is made with turbine flow data from 2013 to 2023 (10 years), comparing these data against the predicted flow values for precipitation from the "Climate Change Scenario Viewer" tool (EUROCLIMA) of the National Meteorological Institute (IMN), which will be calculated using the proportionality theorem, involving historical generation flow data (2013-2023), current feasibility flows (2007), and precipitation predictions (2015-2044) from the "Climate Change Scenario Viewer" tool (EUROCLIMA).

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación

1.1.1 Contexto

Costa Rica cuenta con dos estaciones de clima muy bien definidas en todo el año: la seca (llamada también verano), inicia a finales de diciembre y termina alrededor de abril y la lluviosa (igualmente llamada invierno), inicia en mayo y termina en diciembre. El mes más lluvioso suele ser octubre y el más seco febrero. Estas delimitaciones en cuanto a tiempo y zona geográfica definen claramente que no hay transiciones significativas en el clima, por lo que el periodo de época seca y época lluviosa suelen ser largos y los eventos climatológicos entre ellos afectan por largo tiempo las diferentes zonas del país causando que no se puedan amortiguar los efectos adversos que el cambio en el clima trae consigo.

Según S. Rojas (2014):

> La cuenca en cuestión se sitúa en la región alta del río San Carlos. La estación más significativa para esta cuenca es la 69-14-02 Jabillos, localizada en el río Jabillos (San Carlos), con un área de captación de 551.8 km² y una altitud de 125 msnm. Esta estación se encuentra aguas abajo de la unión de los ríos San Lorenzo y Balsa, que forman el río Jabillos. Administrada por el ICE, la estación ha estado registrando caudales diarios promedio desde 1964 hasta el presente.
>
> El régimen de precipitación en la cuenca es característico de la vertiente del Caribe (Zona Norte) y no presenta un período seco definido. El análisis de las lluvias incluyó varias estaciones representativas de la cuenca del río San Carlos, como Chachagua y Pocosol, ubicadas cerca del río San Lorenzo. Las precipitaciones máximas ocurren entre julio y

> octubre, con valores entre 400 y 600 mm, mientras que las mínimas se registran en marzo y abril, con lluvias de 50 a 200 mm. La precipitación media anual en la cuenca tributaria a la estación Jabillos, para el período 1978-2010, es de 4,100 mm, mientras que en la parte media de la subcuenca del río San Lorenzo es de 4,566 mm. (p. 3).

En los últimos 10 años, en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo con punto de aforo sobre el río San Lorenzo específicamente en la Toma de agua (coordenadas CRTM-2005 longitud -84.55058204 y latitud 10.28975578), que se encuentra muy cerca de donde se unen los ríos Jamaraical y San Lorencito, se da el ingreso del recurso hídrico mediante el canal de conducción hacia los embalses para luego ser turbinado y medido. Estos datos de medición poseen una tendencia bien marcada a la disminución del recurso hídrico disponible para la generación hidroeléctrica, además, hilando de manera más profunda dentro de los datos de caudales turbinados, se observa una gran variabilidad de los promedios anuales y de los meses entre sí. Información obtenida a través de una entrevista aplicada al Encargado de Descarbonización y Ambiente de CONELÉCTRICAS R.L. (D. Hidalgo, comunicación personal, 16 de julio del 2024).

1.1.2 Justificación

Costa Rica enfrenta una alta vulnerabilidad ante los impactos negativos del cambio climático. Entre las pérdidas registradas se encuentran la falta del recurso hídrico para la generación de energía hidroeléctrica en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo en época seca y la afectación en su infraestructura hidráulica en época lluviosa, así lo afirmó N. Cruz: “si las lluvias comunes en la zona se vuelven más intensas y en períodos cortos, no se pueden almacenar para la generación de energía, sino que deben ser liberadas para asegurar la integridad de las obras.” (2010,

p.2). Los pronósticos futuros del cambio climático indican que la frecuencia y la intensidad de los fenómenos climáticos extremos solo aumentarán. A esto se sumarán los posibles impactos del aumento del nivel del mar en puertos, comunidades y zonas costeras. Las altas temperaturas y las precipitaciones intensas son cada vez más comunes y extremas.

La Contraloría General de la República ha afirmado que año tras año, se destinan recursos a la reconstrucción o rehabilitación debido a los efectos negativos del cambio climático, lo que pone en peligro las finanzas públicas y los importantes avances sociales alcanzados por los costarricenses. (2017, pp. 2-3). Por esto, es imprescindible dejar de centrarse únicamente en atender emergencias y comenzar a invertir en la prevención de riesgos y en la adaptación al cambio climático. Persisten debates sobre las acciones que se deben tomar para evitar o mitigar los desastres, así como sobre la distribución equitativa de responsabilidades a nivel país. Se ha avanzado poco en el desarrollo de estrategias claras de adaptación al cambio climático.

En noticias recientes de Costa Rica, se ha vivido la amenaza a racionamientos eléctricos debido a la falta de recurso hídrico para generación hidroeléctrica, el Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) publicó:

> … el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) informó que el país se enfrenta a una "sequía meteorológica" en ciertas regiones del país debido al Fenómeno de El Niño. El director del IMN, Werner Stolz, explicó que la sequía meteorológica se ha presentado en particular en la vertiente del Caribe y el Pacífico Norte y que en los próximos meses se espera que en el Caribe se tenga un 15% de déficit hídrico (2023, párr. 3-4).

Ante esta realidad del país y a la falta de recurso hídrico es que de la misma forma el Seminario Universidad publicó:

> La Comisión Nacional de Emergencias (CNE) declaró una alerta preventiva de categoría amarilla ante los datos meteorológicos que muestran una sequía mayor de la esperada por la influencia del fenómeno El Niño, pues en este año se registra un faltante generalizado en el país, incluso con un 45% de déficit en la zona norte del Caribe. (2023, párr. 1).

Es así que estos acontecimientos climatológicos llevaron a que el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) anunciara racionamientos eléctricos en el país, con la finalidad de asegurar el recurso eléctrico de manera sostenida. El Seminario Universidad publicó al respecto:

> El Grupo ICE anunció este lunes racionamientos de electricidad debido a la caída en los niveles de reserva energética del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), generado por un descenso crítico en los caudales de las hidroeléctricas y el incumplimiento de los proveedores de las plantas térmicas alquiladas para hacer frente a la época seca. (2024, párr. 1).

En la zona donde se ubica la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, propiamente en la cuenca, se perciben los efectos descritos anteriormente y con más fuerza la disminución en las precipitaciones y por ende la disminución en el recurso hídrico utilizado para la producción de energía eléctrica, por esto se da una disminución en los ingresos económicos de la central, lo que causa un efecto adverso en las utilidades de la empresa, así como en el precio al consumidor. De aquí la importancia de poder generar predicciones climáticas enfocadas en la zona de estudio, que permitan una mayor precisión de cálculo del recurso hídrico para la generación hidroeléctrica en las diferentes épocas del año; además, gestionar diferentes planes de adaptación y mitigación al cambio climático. Información obtenida a través de una entrevista aplicada al Encargado de Descarbonización y Ambiente de CONELÉCTRICAS R.L. (D. Hidalgo, comunicación personal, 16 de julio del 2024).

1.1.3 Problema de Investigación

En tiempos recientes, en Costa Rica se han observado cambios importantes en los patrones de precipitación y aumentos en las temperaturas. El comportamiento del clima no es típico, ya que la frecuencia e intensidad de múltiples fenómenos pueden aumentar o disminuir. Por lo tanto, el clima de Costa Rica, en sus distintas regiones, será marcado por extremos secos, como la sequía del 2008 y lluviosos, tal como sucedió durante el episodio de El Niño de 2014-2015.

Si bien es cierto que estos cambios en el clima se han venido percibiendo por la ciudadanía y se mantienen en constante observación por diferentes entidades nacionales como lo son el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), no se ha probado por medio de estudios hidrológicos que el cambio climático esté afectando los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Dada la importancia de la generación de energía hidroeléctrica, es importante contar con un estudio hidráulico de cambio climático en caudales y precipitaciones en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, que sirva como base para iniciar con una serie de programas en adaptación y mitigación del impacto provocado por los efectos adversos que trae consigo el cambio climático.

Con el fin de estimular la acción climática, reducir vulnerabilidades, daños materiales, aprovechar oportunidades y fortalecer capacidades adaptativas para la innovación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo vale la pena preguntarse:

¿Existe un efecto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo respecto a las proyecciones de precipitación en la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) en la zona de San Carlos, Alajuela, Costa Rica?

1.1.4 Estado del Arte

1.1.4.1 Inicios del Concepto de Cambio Climático en la Sociedad. Para entender mejor concepto de cambio climático, se analizarán a través del tiempo el surgimiento de este concepto y se observará la necesidad de adaptabilidad que ha demostrado el hombre a los diferentes sectores afectados por este.

El concepto de "cambio climático" fue presentado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), por vez primera en la Cumbre de Estocolmo de 1972, en específico, en su recomendación 79 señala que: "de ser necesario, se establezcan nuevos programas para llegar a entender mejor la circulación general de la atmósfera y las causas de los cambios climáticos, sean esas de origen natural o resultado de las actividades humanas (ONU, 1973)". (González, 2020, p. 20).

Así es que la ONU presenta en 1972 una necesidad de conocimiento y estudio de las causas que provocan el cambio climático en la atmósfera. Deja esta inquietud en la sociedad para que científicamente se pueda demostrar cuales son las causas que provocan estos cambios climáticos, ya sean de origen natural o provocados por el hombre. Esto porque se observa que a través del tiempo están ocurriendo efectos dañinos y perjudiciales al ser humano, que afectan el existir de las sociedades, su relación con el medio ambiente y el hábitat en el que desarrollan sus actividades.

En la siguiente imagen se observa el comportamiento de la temperatura en grados Celsius (°C) contra la irradiancia solar total en (W/m^2), la cual muestra que después del año 1970 hay una disminución significativa en la irradiancia con respecto a la temperatura la cual muestra una tendencia al alza de casi 1 °C en el transcurso de los últimos 50 años. Esto es una prueba del cambio climático percibido por la ONU en el año 1972.

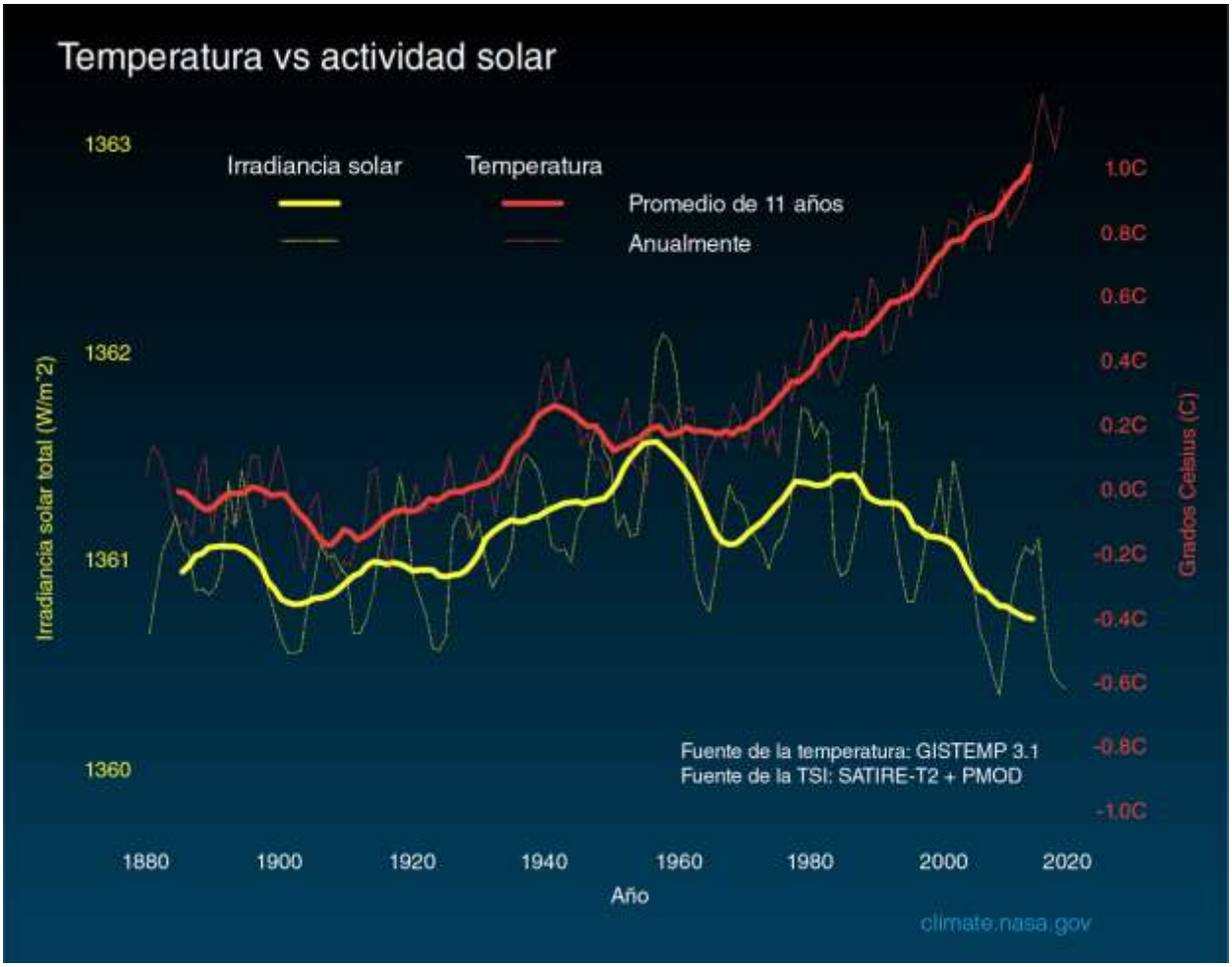


Gráfico 1. Temperatura vs Irradiación Solar. Fuente: Climate NASA.

Ahora, con la alerta de la ONU sobre el cambio climático en 1972 y la necesidad de iniciar mediciones para analizarlo, se puede explicar el porqué de la alta variabilidad entre la factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico San Lorenzo y su producción real desde su inicio de operación en el 1997.

Ante la alerta alzada por la ONU en el año 1972 sobre la necesidad de parametrizar el cambio climático en el mundo, los países no tomaron ninguna iniciativa para lograr medir o proyectar el riesgo que el cambio climático podría ocasionar en los caudales de generación

hidroeléctrica en cuanto a factores correctivos, de adaptación o mitigación y sobre todo en la confección de cálculos y aproximaciones de las factibilidades de generación, mismas que son dependientes de los estudios hidrológicos propios de cada zona, tal es el caso de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo en donde la factibilidad original que inicio a regir desde el 1997, tuvo que cambiarse en el año 2007, apenas 10 años después de la puesta en marcha de la central; esto debido principalmente a la variación negativa de la factibilidad contra la producción real de la central; fenómeno causado por el cambio climático que ocasiona una incertidumbre en los diferentes caudales disponibles en el mes, según la época del año y que a la vez causa problemas en el usuario final por el aumento del costo de la energía. Incluso casi 50 años después de la voz de alarma generada por la ONU, en Costa Rica apenas hace 10 años se inició a hablar de manera más seria en cuanto al cambio climático, iniciando programas como la descarbonización con un programa país (CARBONO NEUTRALIDAD).

1.1.4.2 Origen del Cambio Climático. En el año 1992 la ONU describe al cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (p. 3). Hoy día sabemos que a través de millones de años de la existencia del planeta Tierra han existido cambios climáticos por causas naturales que han afectado al ser humano para bien o para mal y que este no solo ha surgido a consecuencia de la actividad humana.

En el año 2021 Lieberman y Gordon mencionan en su obra tres escenarios del cambio climático desde la antigüedad:

> Cada uno de estos escenarios muestra la interacción entre el cambio climático y la historia humana. En el primer caso, un clima con condiciones favorables para el cultivo contribuyó al auge de una floreciente civilización dependiente de la consecución de un gran excedente de productos agrícolas. En el segundo, el busco cambio en la pluviosidad fue tan severo que obligó a la población a abandonar sus hogares. El tercer escenario es un ejemplo de los desafíos que pueden suponer las variaciones climáticas y la resistencia y la capacidad de una sociedad para adaptarse a ellas. (p. 6).

En cada uno de estos escenarios el clima ha actuado de manera diferente, en el primer caso existieron condiciones armónicas entre el clima y la humanidad, en el segundo caso hubo un incremento grande en las precipitaciones lo que generó que los habitantes abandonaran sus poblados y en el tercero las sociedades optaron por adaptarse a estos cambios climáticos por medio de su ingenio, como por ejemplo el uso de calefacción primitiva. Entonces esto muestra la evolución que el ser humano puede tomar ante las consecuencias del cambio climático, porque si bien es cierto que se debe iniciar por el cambio en las costumbres ecológicas de la sociedad actual en pro del cuidado a la madre Tierra, también es cierto que es una realidad que se debe de afrontar con diversos mecanismos de adaptación.

1.1.4.3 Impactos del Cambio Climático en el Recurso Hídrico. Sea el cambio climático de origen natural o producto de la actividad humana, actualmente es una realidad que no solo afecta la forma de vida del ser humano y sino también del medio natural a nivel mundial; sequías extremas, inundaciones, pérdidas en cultivos y cosechas, erosión de los suelos que provocan cambios en la topografía natural, destrucción de la infraestructura debido a este.

El Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) menciona en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026 (2020, p. 31) la situación actual de Costa Rica en cuanto a vulnerabilidades en el recurso hídrico:

- Según AyA, en 2019 los manantiales del país experimentaron una reducción del 20%, afectando en la GAM a unas 500.000 personas.
- Cerca de 335 250 personas no tuvieron acceso al agua potable en 2019, 6,6% del total.
- Hay pérdida de cobertura vegetal en áreas de protección y de recarga acuífera.
- Extracción no sostenible o no reportada; por ejemplo, de pozos ilegales.
- Contaminación de fuentes hídricas.
- Actividades productivas dependientes del recurso hídrico: agricultura, ganadería, pesca, agroindustria, turismo, servicios, producción hidroeléctrica, entre otras.
- Sistemas de riego poco eficientes y obsoletos.
- Sistemas deficientes de potabilización y distribución del agua y del tratamiento de aguas.
- Servicio deficiente de alcantarillado pluvial.
- Pocas opciones financieras para nuevas tecnologías de gestión del agua y energía.
- Falta de ordenamiento territorial con visión de largo plazo, incorporando la variable hídrica.
- Aumento en la demanda del agua en 2020 por la emergencia por el COVID-19.

De la misma forma, en el MINAE describe en el PNA (p. 32) los impactos potenciales debido a las vulnerabilidades presentes en el recurso hídrico:

- Reducción de los servicios ecosistémicos de bosques y humedales, principalmente aquellos asociados al ciclo del agua.

•Desplazamiento del agua dulce por agua salada en los acuíferos costeros.

•Escasez de recurso hídrico en época seca.

•Reducción de la oferta hídrica para consumo humano y para producción y distribución de energía hidroeléctrica.

•Encarecimiento del costo de producción hidroeléctrica.

•Incremento de sequías, por ejemplo, en la Región Chorotega.

•Incendios forestales en algunas regiones en época seca.

•Destrucción parcial o total de obras de captación y conducción del agua por EME.

•Disminución de la capacidad operativa y de servicios de distribución de agua potable.

•Disminución de la capacidad operativa del tratamiento de aguas servidas.

•Demanda insatisfecha por la reducción en la disponibilidad del recurso.

•Conflictos entre usuarios por el recurso hídrico.

•Pérdida de competitividad de sectores productivos.

•Reducción del bienestar y la calidad de vida de las familias.

•Seguridad hídrica futura limitada por el riesgo de contaminación de fuentes de agua.

Según lo expuesto anteriormente, se evidencia un cambio actual en la decreciente disponibilidad de recurso hídrico para su uso en los diferentes sectores, en este caso de gran interés, para la generación hidroeléctrica. Según el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), en Costa Rica, del 100% de generación de energía, el 99% son renovables, de los cuales el 70% corresponde a energía hidroeléctrica (s.f, párr. 1-5). Esto detalla la gran relevancia e importancia que tiene la generación hidroeléctrica a nivel país, donde el impacto negativo en las

plantas de generación hidroeléctrica provocaría un colapso en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

En el año 2023, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) publicó el Plan de Expansión de la Generación 2022-2040 (PEG) en el que expresó uno de sus objetivos: “En el mediano plazo, el PEG 2022 plantea la adición del Proyecto Hidroeléctrico Fourth Cliff (2030) … Estos proyectos son necesarios para proveer el respaldo que requiere el sistema ante una alta penetración de energías renovables variables.” (p. 11).

Así las cosas, se ve el interés de la continuidad del negocio para la generación hidroeléctrica, asegurar este tipo de proyectos ante el cambio climático, crear proyectos resilientes es un pilar fundamental para el progreso energético de Costa Rica.

Analizando la información anterior, la finalidad de crear sistemas de adaptación y mitigación del cambio climático es el de evitar el potencial colapso de los sistemas de vida existentes, corresponde al ser humano el encontrar la solución a esta problemática actual y futura si no se interviene en el cambio. De ahí la importancia de tomar acciones que no comprometan la integridad del medio natural en el que se habita. Dado que las actividades diarias del ser humano traen consecuencias medio ambientales con ellas.

Si no se trabaja en la búsqueda de soluciones de adaptación y mitigación, las consecuencias implicarían mayores riesgos económicos, sociales y de infraestructura en el ecosistema de la sociedad, los cuales se pueden convertir en daños irreversibles que podrían incidir en el abandono de los pobladores a las ciudades en las que habitan, en busca de mejores condiciones de vida (Lieberman y Gordon, 2021, p. 7).

Así mismo, la cultura ecológica debe hacerse presente, a fin de evitar esta problemática en tiempos venideros, por medio de la educación a la generación futura y de la aplicación en

simultáneo en cuanto a la implementación de sistemas de adaptación y mitigación en el campo de la ingeniería que ayuden a prevenir los efectos del cambio climático en todos los sectores que se han visto afectados y porque no, revertir el daño causado hasta el momento.

En Costa Rica se ha venido trabajando poco a poco en la implementación de herramientas que ayuden a adaptar y mitigar los efectos del cambio climático. El MINAE expresó "si bien es cierto Costa Rica no cuenta con una ley de cambio climático que norme los temas específicos de adaptación y mitigación" (2017, p. 36), se han decretado ciertas normativas a fin de que se realice un trabajo en conjunto a nivel país, donde se sienten las diferentes instituciones responsables que asuman la coordinación, implementación y monitoreo a fin de que se cumplan los lineamientos establecidos; es así que el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), crea la Dirección de Cambio Climático (DCC), esta es la dependencia encargada de coordinar y gestionar la política pública de cambio climático en Costa Rica. La DCC elabora el Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2018-2030 (PNACC), como parte de un conjunto de instrumentos de planificación estratégica que establece los ejes y lineamientos de acción que tiene el objetivo general de:

> Transitar hacia un modelo de desarrollo resiliente de la sociedad costarricense, que evite las pérdidas humanas y moderar los daños materiales generados por los efectos adversos del cambio climático contribuya a la calidad de vida de las poblaciones más vulnerables y aproveche las oportunidades para innovar y transformar los sectores productivos y asegurar la continuidad de los servicios públicos. (MINAE, 2017, p. 55).

Para lograr este objetivo se formula el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026 (PNA), en este se desarrollan los ejes y lineamientos de la PNACC con

base en la definición de temas estratégicos, metas globales, acciones concretas, responsables y calendarios de implementación.

En esa dirección, es que la DCC crea una herramienta llamada MERCI-CR (Metodología de Evaluación de Riesgo Climático en Infraestructura de Costa Rica), la cual es una propuesta metodológica simplificada y adaptada a la realidad nacional, la cual puede aplicarse tanto para infraestructura pública como privada, sea esta existente, en proceso de diseño o inclusive en etapas previas, como prefactibilidad o factibilidad. La misma fue creada por la Dirección de Cambio Climático (DCC) del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE), Insti-tuto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA) y la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ), además, un grupo ampliado de colaboradores de otras ocho instituciones que contribuyeron en el proceso, Contraloría General de la República (CGR), Comisión Nacional de Emergencias (CNE), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Universidad de Costa Rica (UCR), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).

Actualmente, en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, la empresa CONELÉCTRICAS R.L ha iniciado algunos esfuerzos para contrarrestar los impactos que se vienen percibiendo respecto al cambio climático de una manera más severa y que afecta directamente el recurso hídrico utilizado para la generación hidroeléctrica, por ejemplo, hace ya 5 años se inició un programa de carbono neutralidad en el país en el cual se encuentra incluida la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, se han reforzado estructuralmente los diques en la Casa Máquinas y

en bordes de toma, para amortiguar el impacto que ha ido creciendo en frecuencia de avenidas máximas de último diseño, se están instalando estaciones meteorológicas en los límites de la cuenca con la finalidad de monitorear en tiempo real las precipitaciones y generar historial con indicadores que se encuentre propiamente focalizados en este espacio reducido de cuenca. Con esta última acción se inicia con un plan inteligente de adaptación y mitigación al cambio climático en donde el objetivo principal es poder ajustar las proyecciones anuales de generación de energía, que son importantes para predecir un modelo de oferta y demanda que se ajuste a la realidad de la disponibilidad del recurso hídrico en los diferentes meses del año, ya que este ajuste a la realidad traería consigo un beneficio económico al usuario final de esta energía eléctrica (cambio metodología tarifaria ante Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)). Información obtenida a través de una entrevista aplicada al Encargado de Descarbonización y Ambiente de CONELÉCTRICAS R.L. (D. Hidalgo, comunicación personal, 16 de julio del 2024).

1.2 Objetivos de la Investigación

A continuación, se presentan el objetivo general y los específicos de la investigación:

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el impacto del cambio climático en los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo respecto a las proyecciones de precipitación en la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) en San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Analizar el estudio hidrológico de la cuenca del Río San Lorenzo en San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

2. Identificar los caudales de factibilidad (vigentes) y los caudales de generación en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

3. Formular escenarios posibles de proyección de la precipitación en la zona de San Carlos desarrollados por el "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

4. Evaluar los caudales de factibilidad (vigentes), los caudales de generación y los caudales de proyección de la precipitación desarrollados con la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

1.3 Las Variables de la Investigación

En este apartado se redactan las variables de la investigación, las forman parte del fundamento de la hipótesis planteada para solucionar el problema de investigación.

1.3.1 Las Variables de la Investigación

Variable independiente: un análisis hidrológico de la cuenca, de los caudales de generación y de las proyecciones de precipitación.

Variable dependiente: evaluación del impacto del cambio climático en las precipitaciones en la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo en la zona de San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

Variable interviniente: por medio de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EU-ROCLIMA).

1.3.2 Matriz de la Investigación

Matriz de variables de análisis			
Hipótesis	**Conceptos**	**Variables**	**Indicadores**
Un análisis del estudio hidrológico de la cuenca, de los caudales de generación y de las proyecciones de precipitación desarrolladas por la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) permitirá hacer una evaluación del impacto del cambio climático en las precipitaciones en la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo en la zona de San Carlos, Alajuela, Costa Rica.	**Estudio hidrológico:** es un estudio climático que se realiza de la cuenca hidrológica en estudio.	Caracterización de la cuenca a través de la extracción de información climática de bases de datos, cálculo de variables por medio de metodologías científicamente aprobadas, así como la obtención de los caudales de factibilidad del proyecto antes de su ejecución y puesta en marcha.	Caracterización de la cuenca: perímetro, área, índice o factor de forma, pendiente media de la cuenca, pendiente de la cuenca, pendiente longitudinal del cauce principal, curva hipsométrica, densidad de corriente, densidad de drenaje, cobertura vegetal y uso de la tierra, climatología (precipitación).
	Caudales de generación: son los caudales usados para la para generación hidroeléctrica.	Control de caudales de generación de la cuenca hidrológica en estudio. Cálculo de valor promedio de caudales de generación (turbinado).	Tipos de caudal que entran a la Central Hidroeléctrica San Lorenzo: Caudal de generación (turbinado), caudal vertido sobre cresta, caudal por descarga de fondo, caudal ecológico.
	Proyecciones de precipitación: elaboración de escenarios climáticos para estudiar las posibles variaciones de la precipitación en la cuenca hidrológica en estudio.	Precipitación generada a través de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), los cuales deben compararse con los datos de la cuenca hidrológica en estudio.	Elaboración de escenarios proyección de precipitación a través de la herramienta EUROCLIMA: Escenario SSP, promedio modelos PSDM, variable precipitación, periodo de análisis, periodo base y periodo de proyección.
	Evaluación del impacto del cambio climático: análisis de las variaciones entre los diferentes caudales de la cuenca hidrológica en estudio.	Comparación de los caudales de factibilidad (vigentes), los caudales de generación y los caudales de proyección de la precipitación desarrollados con la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).	Establecimiento de una relación entre los caudales de factibilidad (vigentes), los caudales de generación y los caudales proyectados.

Tabla 1. Matriz de variables de análisis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

1.4 Alcances

Con esta investigación y análisis de información se pretende comprobar el hecho de que existe un impacto en el cambio climático en las precipitaciones de la zona de San Carlos, las cuales han venido escaseando en verano y aumentando en invierno. Esta situación afecta la industria de generación hidroeléctrica llevando la problemática desde lo económico hasta lo social. Por ello es necesario marcar un precedente sobre la existencia de la problemática de cambio climático.

Al establecer el concepto de cambio climático en la cuenca hidrológica en estudio y convertirlo en un tema de realidad actual, permitirá avanzar y tomar acciones en materia de adaptación y mitigación de cambio climático, creación de nuevas formas de aprovechar en mayor medida el recurso hídrico disponible en época seca, desarrollo de un nuevo modelo tarifario que incluya la variabilidad del cambio climático y la implementación de un mayor control mediante un centro de despacho de energía en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

1.5 Formulación de la Hipótesis de la Investigación

Un análisis del estudio hidrológico de la cuenca, de los caudales de generación y de las proyecciones de precipitación desarrolladas por la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) permitirá hacer una evaluación del impacto del cambio climático en las precipitaciones en la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo en la zona de San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

Capítulo 2: Marco Teórico

En el presente apartado se analizará el comportamiento de la precipitación en la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, a través de los caudales de factibilidad (vigentes), de los caudales de generación y de la proyección de las precipitaciones desarrolladas por la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA).

La presente investigación se encuentra enfocada en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, cuya cuenca es parte de la cuenca hidrológica del Río San Carlos (ver Figura 1). Para realizar esta investigación se profundiza en los conceptos de cambio climático y una de sus variables más representativas y afectada por este fenómeno como lo es la precipitación, se recolectarán datos de caudales de generación (turbinados) de la central hidroeléctrica, se analizarán los estudios hidrológicos de la cuenca y se confrontarán contra valores del sistema “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) el cual toma como base las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

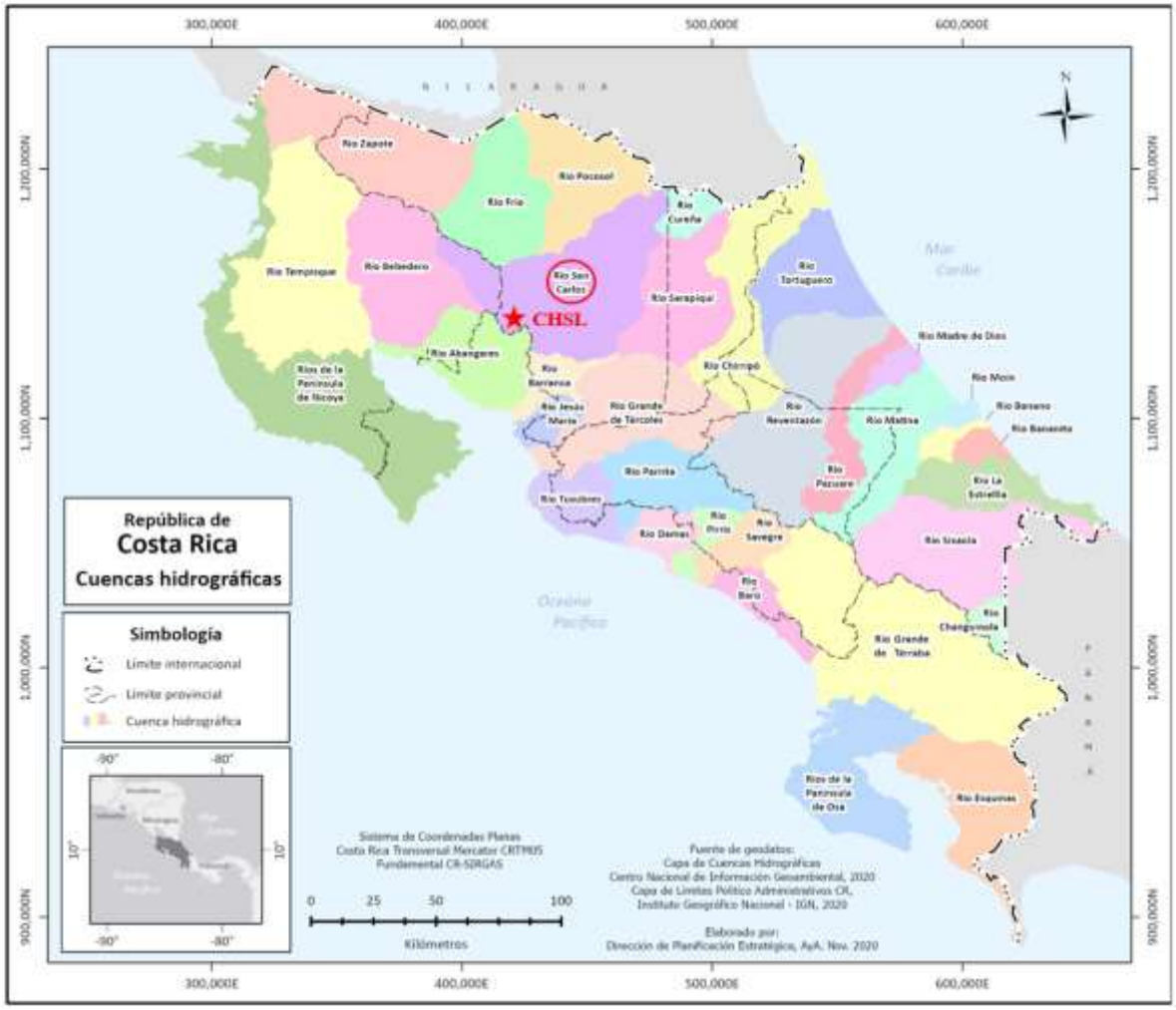


Figura 1. Principales cuencas hidrográficas de Costa Rica. Fuente: Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua, Boletín AGUA/2021

2.1 Análisis del Estudio Hidrológico de la Cuenca

Conocer los elementos que caracterizan la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, tales como perímetro, área, índice de compacidad o factor de forma, pendiente media de la cuenca, pendiente longitudinal del cauce principal, curva hipsométrica de la cuenca, densidad de corriente, densidad de drenaje, cobertura vegetal y uso de la tierra, climatología (precipitación), permitirá evaluar los riesgos potenciales a los que se está expuesta y ofrecer soluciones de ingeniería adecuadas. Conocer los valores de las variables anteriores, permitirá al ingeniero

predecir el comportamiento de escorrentía y la velocidad de infiltración del suelo de la cuenca hidrológica para proponer soluciones hidráulicas adecuadas para cada zona geográfica. Las cuencas hidrológicas son muy importantes para el ciclo natural del agua, una cuenca con un correcto funcionamiento facilitará la obtención del recurso hídrico necesario para generación hidroeléctrica, así como para usos domésticos, industriales, ganaderos y de agricultura.

En el año 1978, Holdridge expresó que "¿Qué es entonces la zona de vida, sino un conjunto de ámbitos específicos de los factores climáticos principales? Esta sí a través de los efectos de la temperatura, la precipitación y la humedad puede imaginarse como un grupo de zonas de vida, relacionadas entre" (p. 10).

Para esto es necesario conocer el clima pasado, el clima presente y realizar proyecciones el clima en el futuro en las diferentes partes del mundo, sin este conocimiento no es posible tener las herramientas lógicas para tomar decisiones que permitan adaptar los sistemas actuales al embate del clima en el presente y futuro.

Una vez se tenga a disposición la información climatológica de la cuenca hidrográfica, esta debe agruparse no arbitrariamente, sino basándose en parámetros lógicos, que permitan segregar la información con bases científicas que permitan hacer un correcto uso de la información, en pro de manejar la información en grupos que tengan similitudes en sus características elementales de forma balanceada.

2.1.1 Localización de la Cuenca

La cuenca en estudio se ubica en la provincia de Alajuela, en el cantón de San Ramón, en el distrito de San Lorenzo. Es importante tener clara la localización de la cuenca, ya que la mayoría

de cálculos que se realizan en los estudios hidrológicos dependen directamente de la zona del país en la que se encuentra. Esto porque las zonas climáticas en Costa Rica están muy marcadas por las cordilleras centrales del país que separan el Caribe del Pacífico, dividiendo el país en tres grandes vertientes (Pacífico, Atlántico y Río San Juan), así las cosas, la ubicación de la cuenca queda definida según S. Rojas (2014):

> El río San Lorenzo pertenece a la sub-vertiente Norte-Atlántica del país con elevaciones variando desde los 1,700 hasta 320 msnm, esta última en el sitio de derivación. Este río es afluente del río San Carlos y se ubica en la parte sureste de su cuenca, y el cual hasta la desembocadura en el río San Juan (frontera con Nicaragua) posee un área de drenaje de 2,650 km². Políticamente, la cuenca de interés se encuentra dentro de la provincia de Alajuela, cantón de San Ramón. (p. 9).

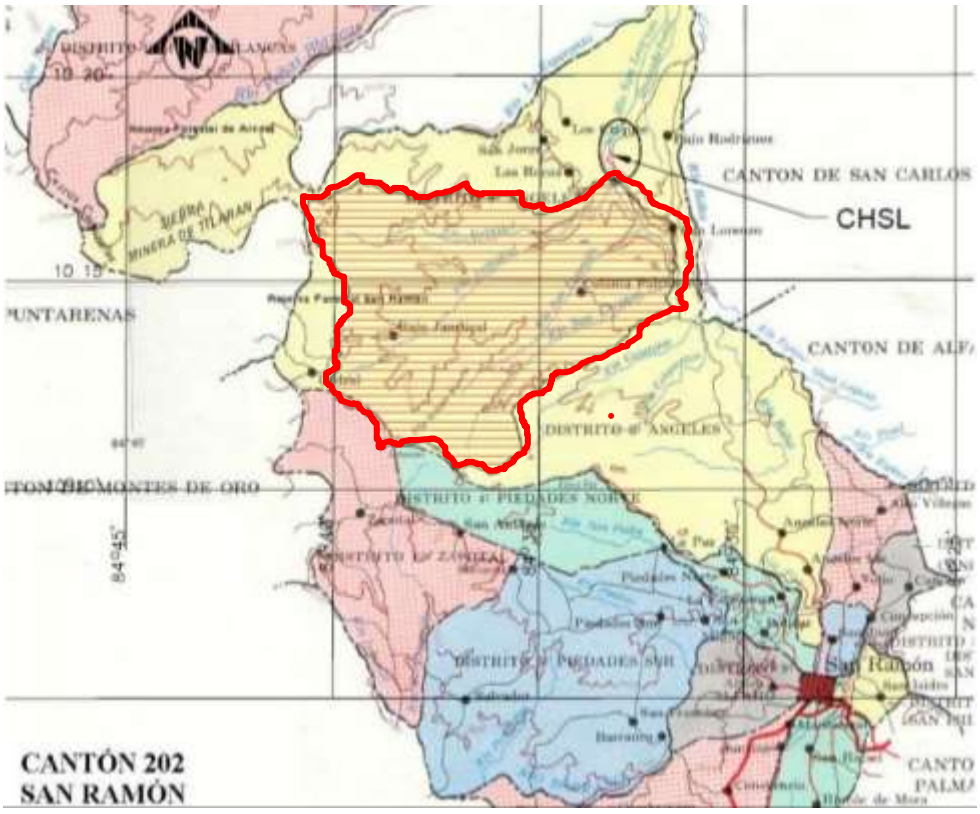


Figura 2. Localización de cuenca aprovechada por la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta.

2.1.2 Descripción de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo

El Proyecto Hidroeléctrico San Lorenzo fue concebido de manera conceptual entre el año 1990 y 1995, iniciando su construcción en el año 1995 y finalizando en el año 1997. La puesta en marcha de la operación de la central se realizó en junio del año 1997 y esta fue diseñada con los volúmenes, caudales y precipitaciones disponibles en los años previos a su construcción, valores de la cuenca hidrológica del Río San Lorenzo. La Central Hidroeléctrica San Lorenzo es administrada por CONELÉCTRICAS R.L, un consorcio de 4 cooperativas del sector eléctrico (COOPELESCA R.L, COOPESANTOS R.L, COOPEGUANACASTE R.L y COOPEALFARORUIZ R.L) quienes son los encargados del suministro eléctrico a 150 000 habitantes de zona de San Carlos.

Los equipos electromecánicos son de origen francés y fueron instalados por ALSTHOM NEYRPIC MINI HYDRO. La capacidad instalada de la Central alcanza los 17,73 MW con 2 turbinas tipo Francis de eje horizontal, con una potencia de 8,865 MW cada una, una caída neta de 92.50 m y un consumo de caudal nominal entre ambas turbinas de 20 m^3/s. La central hidroeléctrica está conformada por los siguientes elementos:

Toma y presa: es una estructura de concreto masivo, que intervienen el Río San Lorenzo en la coordenada este 768281.00 m y coordenada norte 1138474.00 m (UTM), propiamente en la zona 16P norte. Con una longitud de vertedor tipo CREAGER de 60 m, con una elevación de cresta de 21 m, que se encuentra en una cota de 330 msnm con un volumen de 63000 m^3. Es importante mencionar que sobre esta obra de toma-presa se encuentra un puente público vehicular el cual es parte de la estructura principal, que une las comunidades de Bajo Rodríguez con Las Rocas.

Canal de conducción: es una estructura en concreto reforzado, diseñada y construida en corte de ladera de la margen derecha aguas debajo de la presa, en forma trapezoidal, con una solera de 4 m, una altura de 3,30 m, un espejo de agua de 5,64 m, una longitud total de 1956 m y diseñada para transportar un caudal de 20 m^3/s. Para mantenimiento del canal se construyó paralelo a él un camino con acabado en lastre compactado y en zonas más complejas del camino se colocó concreto con rodillo compactado RCC.

Embalses y sifón: son estructuras construidas mediante diques de enrocados y arcillas compactadas que funcionan por gravedad. La central dispone de dos embalses de regulación diaria con una capacidad de 35600 m^3 para el embalse 1 y 53000 m^3 para el embalse 2, el nivel máximo de abatimiento de los embalses es de 329,10 msnm. Estos están unidos mediante un sifón de concreto reforzado, con un diámetro 3,30 m, una longitud total de 246m y una capacidad de trasiego de flujo de caudal de 22 m^3/s.

Antecámara: es una obra de concreto reforzado en el extremo noreste del embalse 2, esta funciona como transición entre el reservorio y la tubería de presión. Además, en esta obra es donde se encuentra la descarga de fondo del embalse que funciona para hacer la limpieza de sedimentos generados en el proceso.

Tubería de presión: es construida en acero al carbón, con una longitud total de 421 m, un diámetro de 2,90 m y una caída de 92,50 m. La misma se encuentra anclada al suelo mediante 4 bloques de concreto reforzado separados cada 100 m, existen monturas entre los anclajes principales separados cada 15 m.

Casa de máquinas: la misma posee un área aproximada de 600 m^2, la super estructura está construida en acero y lámina estructural #26, la subestructura está construida en concreto reforzado. Dentro de la casa de máquinas se encuentran las 2 turbinas tipo Francis de doble eje

horizontal, con una potencia de 8.865 MW y un consumo de 10 m³/s cada una, además se encuentra todo el equipo electromecánico e hidráulico para el control de toda la operación.

Línea de transmisión: inicia en la casa de máquinas San Lorenzo y tiene su llegada en la subestación del ICE en Ciudad Quesada con una tensión nominal de 34.5 kV, tiene una longitud total de 17 km y está soportada por postes de madera de 90 cm de diámetro en la base y 11 m de altura, el conductor de energía principal es en aluminio de calibre 559.5 MCM, el hilo guarda es un conductor de aluminio 3/0, sujetado con aisladores de porcelana, en creceros y arriostres en acero.

Los apartados anteriores describen las características principales de la infraestructura que compone la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, con la finalidad de comprender los componentes de la planta los cuales son requeridos para la generación hidroeléctrica, en la siguiente figura se presenta un croquis de estos componentes:



Figura 3. Croquis de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

2.1.3 Caracterización de la Cuenca

Es necesario conocer las características morfológicas de la cuenca hidrológica con punto de aforo en la toma de agua (coordenadas CRTM-2005 longitud -84.55058204 y latitud 10.28975578), esto para tener un panorama más amplio a la hora de realizar los análisis climatológicos y comparaciones debidas en el capítulo de Análisis e Interpretación de los Resultados, seguidamente se describen las características morfológicas del análisis del estudio hidrológico de la cuenca en estudio.

2.1.3.1 Perímetro. El cálculo de perímetro de la cuenca se realiza con el método automático del programa QGIS, mismo que requiere como entradas principales un DEM (modelo de elevación digital), y un punto de aforo para la delimitación. El perímetro se define con la delimitación de la cuenca en el parte aguas. Para el perímetro de la cuenca, S. Rojas determinó que su longitud es de 55.7 km (2013, p. 10).

2.1.3.2 Área. El cálculo de superficie de la cuenca se realiza con el método automático del programa QGIS, mismo que requiere como entradas principales un DEM (modelo de elevación digital) y un punto de aforo para la delimitación, con este método S. Rojas determina para el área de la cuenca una superficie de 138.1 km² (2013, p. 10).

En la siguiente figura se aprecia el perímetro y superficie de la cuenca hidrológica del Río San Lorenzo, la cual se modela sobre la hoja cartográfica San Lorenzo en escala 1:50000. En ella se aprecian los afluentes de la cuenca, así como la topografía de la zona.

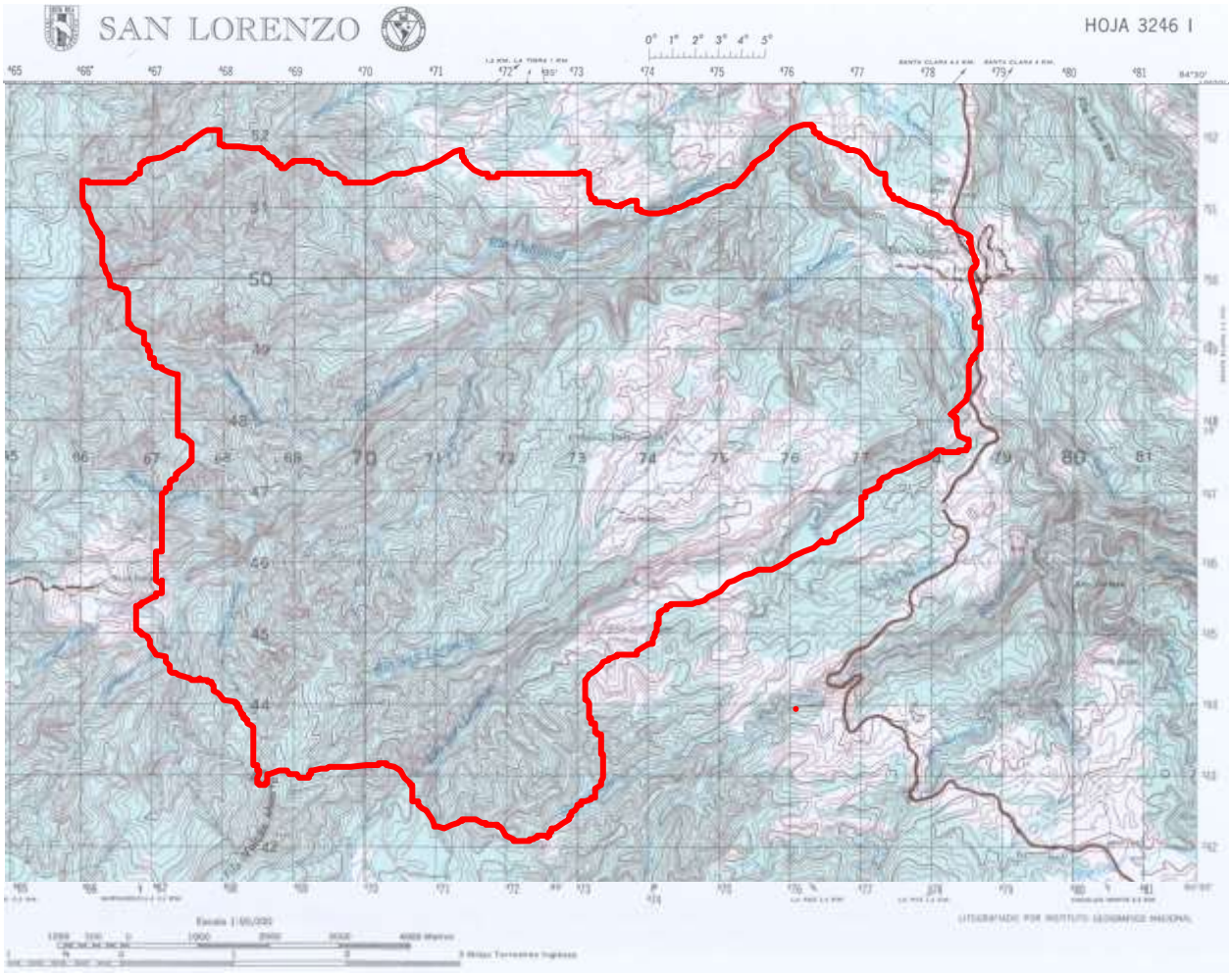


Figura 4. Superficie de la Cuenca en Hoja Cartográfica San Lorenzo, coordenadas Lamberth. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024

2.1.3.3 Índices de Compacidad / Forma (Gravelius). La forma de la cuenca se define por medio del coeficiente de compacidad o índice de Gravelius. k=1 cuenca circular, k>1 cuenca alargada. El coeficiente utiliza la siguiente fórmula:

$$k = \frac{0{,}28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 1. Índice de compacidad / forma. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022.

k = Coeficiente de capacidad

P = Perímetro de la cuenca en km

A = Área de la cuenca en km²

Para este valor S. Rojas calculó K=1.327: “Se puede observar que el valor está alejado de la unidad, lo que se explica por la forma irregular de la cuenca.” (2013, p. 11).

2.1.3.4 Pendiente Media de la Cuenca. El grado de erosión a esperar en la cuenca depende directamente de la pendiente media de la misma, por lo que se procedió a medir la longitud de contornos o curvas de nivel cada 200 metros dentro de los límites de la subcuenca. La fórmula de Horton establece:

$$S = \frac{D \cdot L}{A}$$

Ecuación 2. Pendiente media de la cuenca. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022.

S= pendiente de la cuenca en fracción

D= desnivel constante entre curvas de nivel en km

L= longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca en km

A= área de la cuenca en km²

S. Rojas utilizó el método de Horton para este cálculo, donde se obtuvo una pendiente media de la cuenca de P=40%. (2013, p. 13).

En la siguiente figura se observan las alturas topográficas dentro de la cuenca hidrológica en estudio expresadas mediante una escala de colores generada por un DEM (modelo de elevación digital), las cuales van desde los 400 msnm hasta los 1300 msnm.

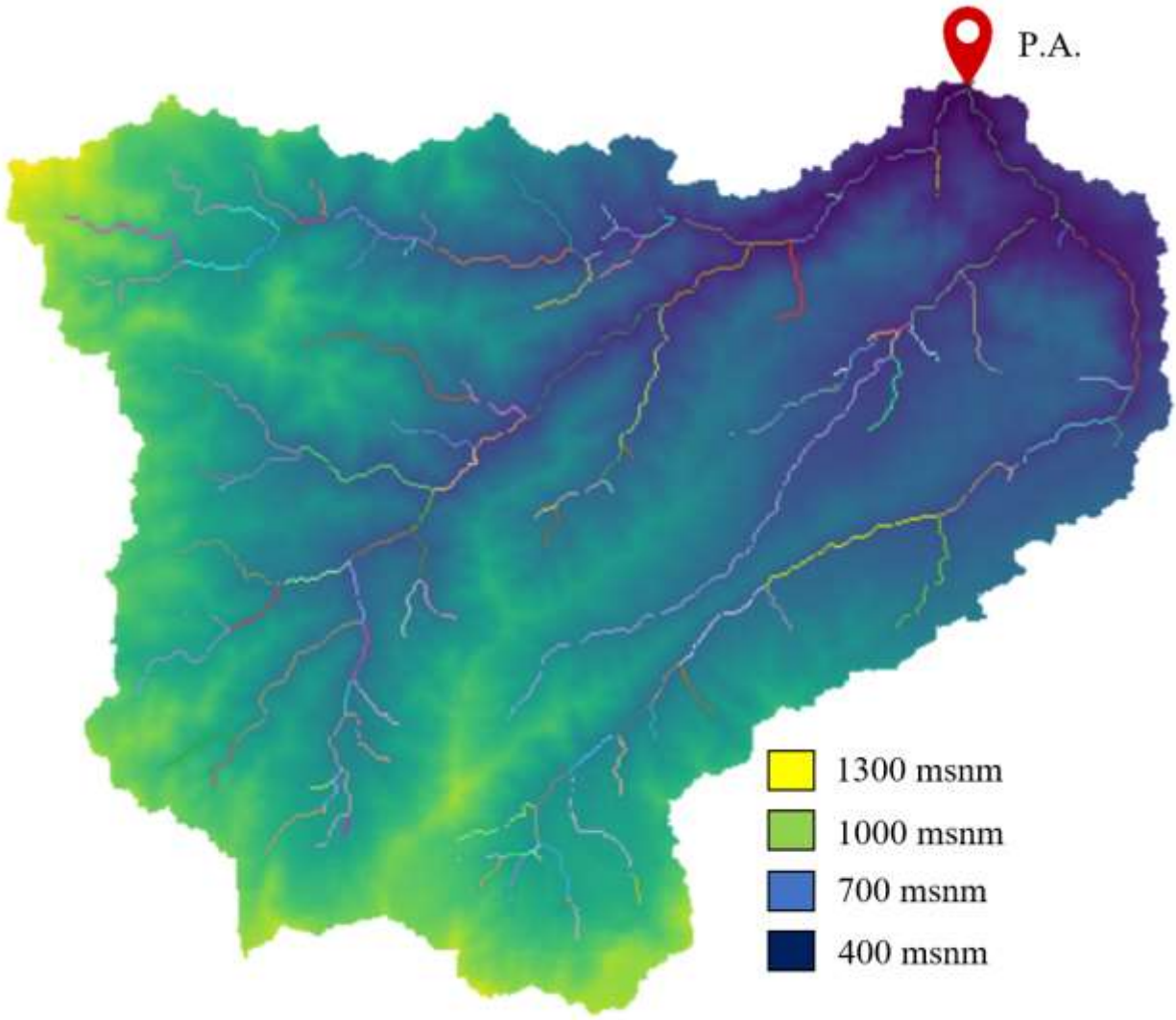


Figura 5. DEM (Modelo de Elevación Digital). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

En la siguiente figura se muestra un esquema de la cuenca donde se evidencia la escorrentía de cada uno de los afluentes de la cuenca, en la leyenda se observan dos texturas, la textura gris clara identifica zonas de escorrentía con topografía plana y la textura gris oscura identifica zonas de escorrentía con topografía elevada.

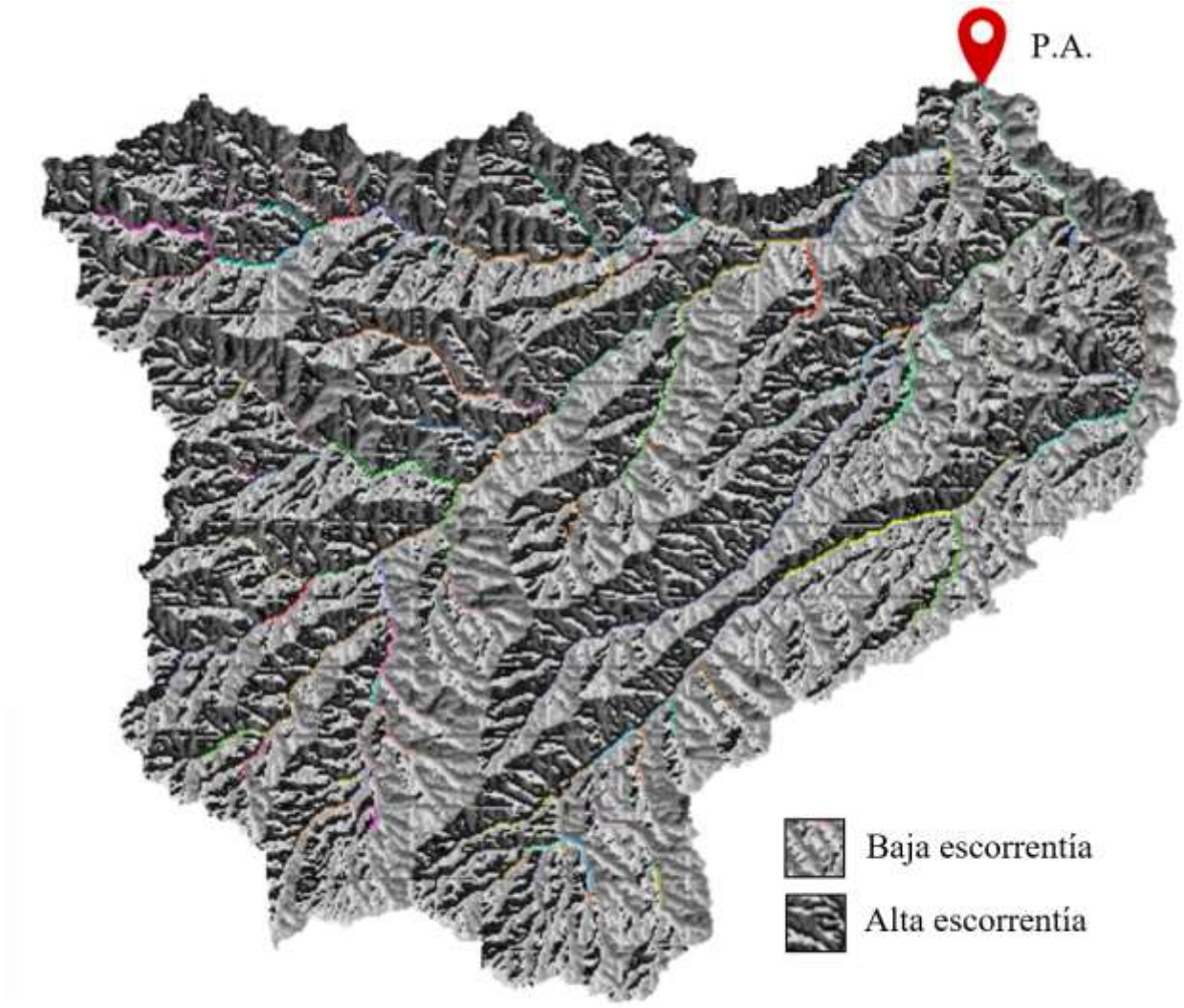


Figura 6. Escorrentía de la cuenca. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

2.1.3.5 Pendiente Longitudinal del Cauce Principal. Proporciona una idea de las pendientes que tiene un cauce en los distintos tramos de su recorrido, se obtiene ploteando la longitud del cauce contra su altitud, donde:

$$S = \frac{H}{A \cdot L}$$

Ecuación 3. Pendiente longitudinal del cauce principal. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022.

S= pendiente del cauce

H= diferencia de cotas entre los extremos del cauce en km

L= longitud del cauce en km

En este caso se obtuvo un valor para la pendiente longitudinal del cauce principal de S=4.07%.

2.1.3.6 Curva Hipsométrica de la Cuenca. La representación gráfica de la topografía o relieve medio de la cuenca se detallan por medio de la curva hipsométrica.

En la siguiente gráfica se explica el comportamiento de la elevación de la pendiente de la cuenca contra el porcentaje de área bajo la elevación.

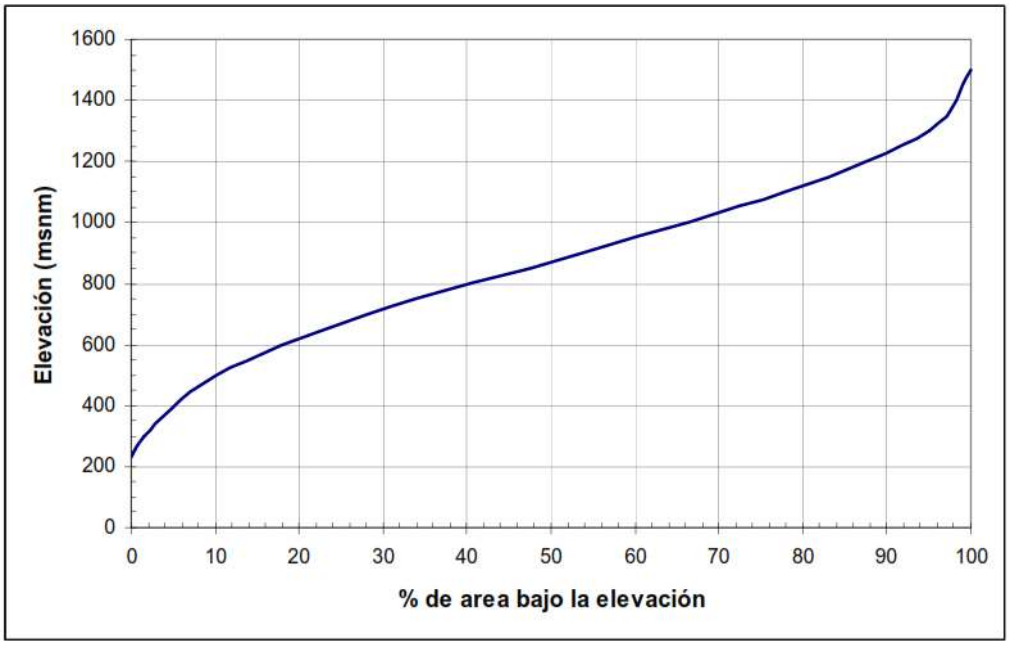


Gráfico 2. Curva hipsométrica cuenca río San Lorenzo. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta.

2.1.3.7 Altitud Media de la Cuenca. En el año 2013 S. Rojas determinó en el estudio hidrológico de la cuenca de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo que:

> La altitud media de la cuenca tiene especial interés en las zonas de montaña, pues influye en el escurrimiento y en otros elementos que a su vez afectan el régimen hidrológico (precipitación, temperatura, etc.). Este valor se obtiene de la curva hipsométrica y es el correspondiente a un 50% del área. Hasta el sitio de derivación de la CHSL la elevación media es de 880 msnm. (p. 14).

2.1.3.8 Densidad Hidrográfica y Número de Orden de las Cuencas. Relación entre en número de corriente y el área drenada. El número de orden por su parte está asociado al número de afluentes al cauce aguas arriba, donde:

$$Dc = \frac{LN}{A}$$

Ecuación 4. Densidad hidrográfica. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022.

Dc= densidad de corriente

Nc= número de corrientes

A = área total de la cuenca en km²

S. Rojas determinó que para la cuenca de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo el número de corrientes es 55, el orden de la cuenca es 3 y que la es 35%. (2013, p. 14).

En la siguiente figura se pueden observar la cantidad de afluentes de drenaje en la cuenca hidrológica en estudio, estos se distinguen por su longitud y color, los cuales se reconocen como red de drenaje terciaria, secundaria y principal.

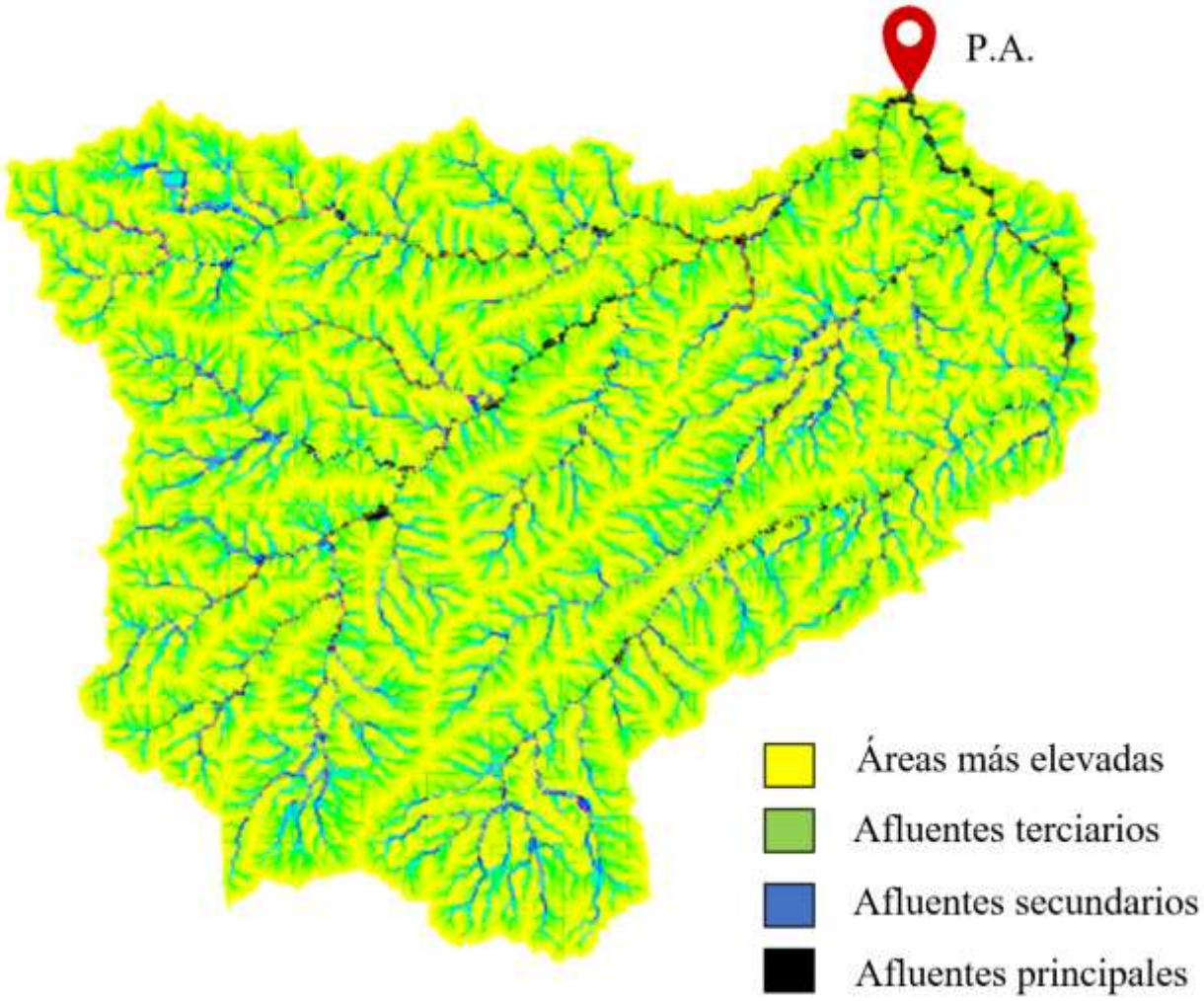


Figura 7. Acumulado de red de drenaje. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

2.1.3.9 Densidad de Drenaje. La densidad de drenaje es la relación que existe entre la longitud total de las corrientes y el área drenada, donde:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Ecuación 5. Densidad de drenaje. Fuente: Máximo Villón Béjar, Hidrología 2022.

Dd= densidad de drenaje en km/km²

L = longitud total de las corrientes en km

A = área total de la cuenca en km²

Según S. Rojas, el resultado para la cuenca en estudio es una longitud total de 105 km y densidad drenaje de Dd= 0.76 (2013, p. 15).

Valores altos: mayores a 1, indican poca cobertura vegetal, suelo fácilmente erosionable, suelos impermeables.

Valores bajos: menores a 1, indican cobertura vegetal densa, suelos duros, poco erosionable, suelos muy permeables.

Clasificación: La efímera solo lleva agua inmediatamente después de que llueve, en el caso de la intermitente lleva agua la mayor parte del tiempo, cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce y la perenne contiene agua todo el tiempo.

2.1.3.10 Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra. En el estudio hidrológico de la cuenca de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, S. Rojas determinó la cobertura vegetal predominante según la clasificación mundial de la vegetación de la UNESCO según la siguiente forma “Bosque Lluvioso Tropical Submontano. Siempreverde. Sobre formas de origen volcánico: 50%, Bosque Lluvioso Tropical Submontano. Siempreverde. Suelos tipo ultisoles: 30%, Potreros: 20%” (2013, p. 15).

En la siguiente figura se muestra una vista aérea de Google Earth, en ella se puede apreciar la cobertura vegetal y el uso de la tierra en la superficie de la cuenca de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, donde se observa la cobertura boscosa y los potreros.

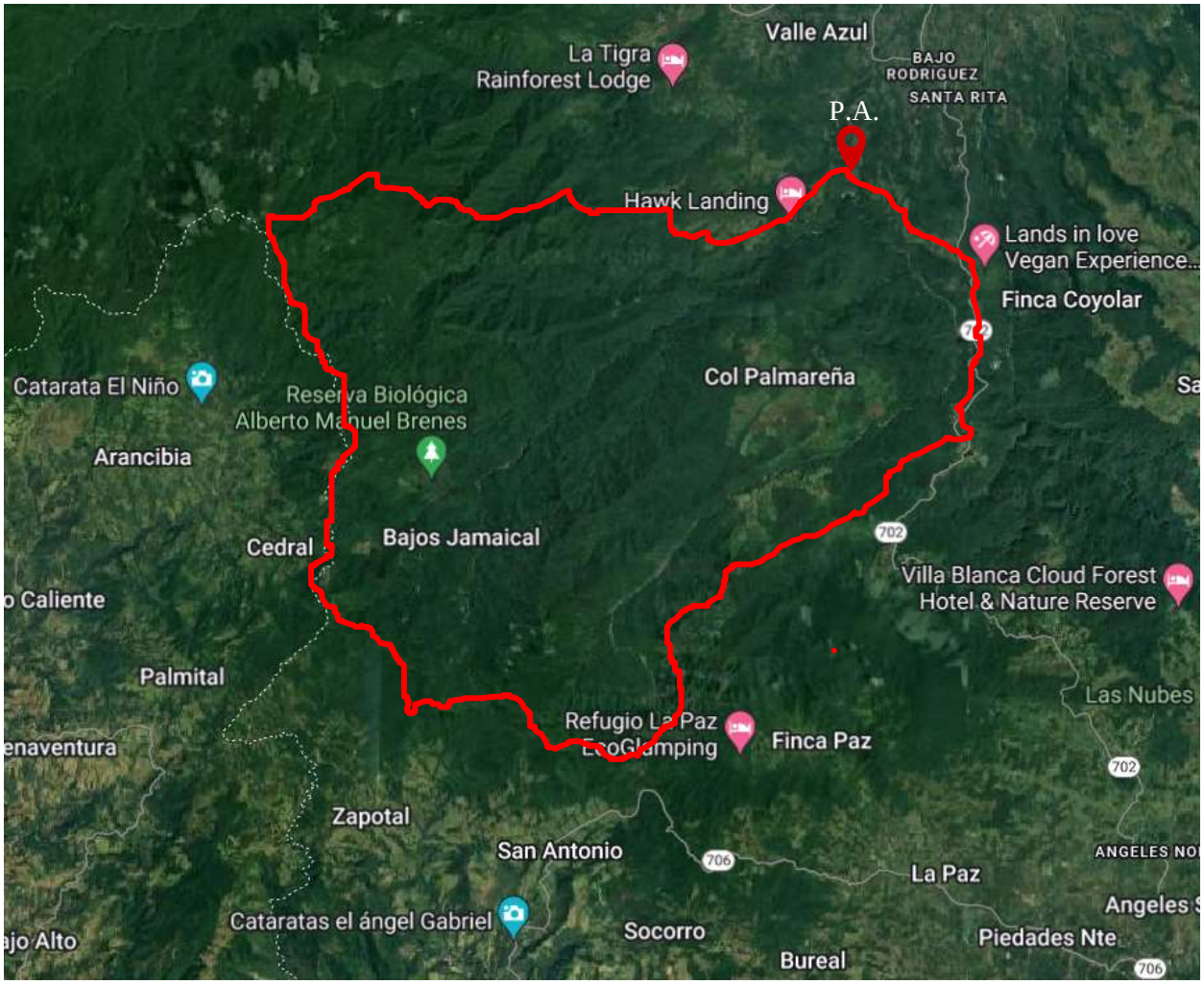


Figura 8. Fotografía aérea de Google Earth de cuenca aprovechada. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

2.1.3.11 Climatología de la Cuenca. La cuenca aprovechada por la C.H. San Lorenzo se ubica en la zona arriba del pie de monte de la Divisoria Continental del lado Atlántico. Al estar en la parte alta de dichas estribaciones de las cadenas montañosas, se tiene un patrón de lluvias del tipo orográfico con intensidades variables y en general se considera como clima muy húmedo. (S. Rojas, 2013, p. 17).

Con base en lo anterior, se logra evidenciar del estudio hidrológico del año 2013 que se caracteriza el tipo de lluvias en la cuenca como orográficas, las cuales son lluvias de altas intensidades y sostenidas en el tiempo. Así mismo el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) a través del atlas climatológico, el cual es una herramienta que reúne los datos captados por diferentes estaciones meteorológicas a nivel nacional (636 estaciones en total), promedia la precipitación anual en la zona de San Carlos, Alajuela, donde se ubica la cuenca hidrológica en estudio en 3000-4000 mm por m², tal como se evidencia en la siguiente figura:

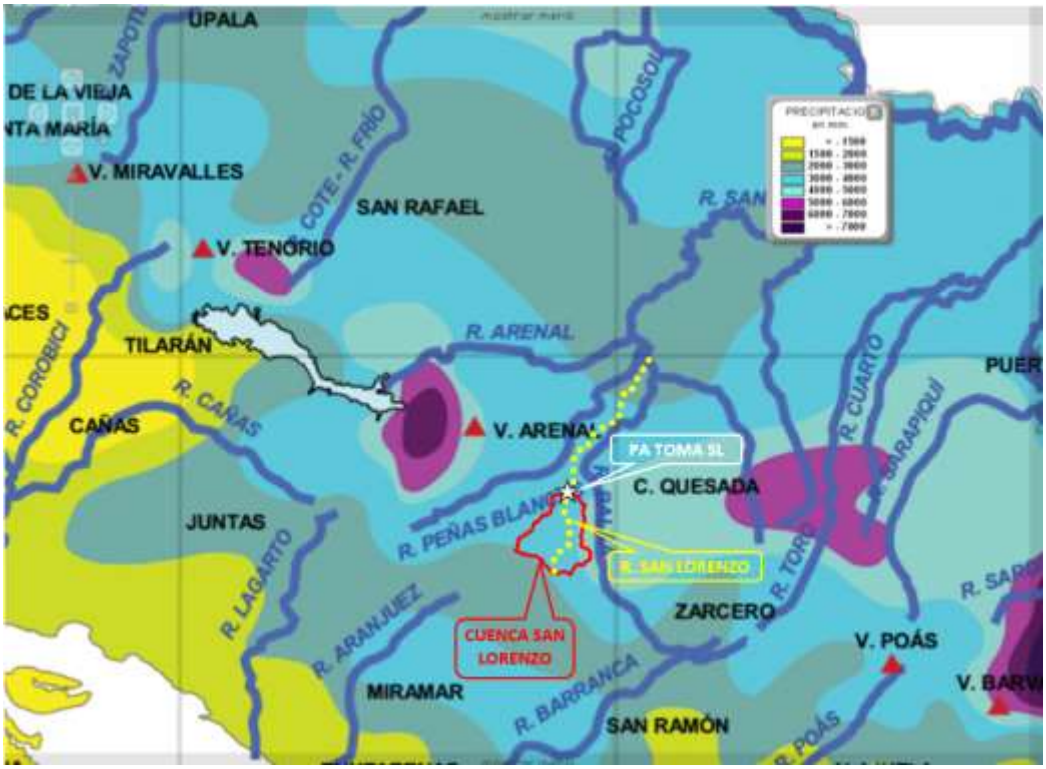


Figura 9. Precipitación promedio anual. Fuente: atlas climatológico del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

Para entender el clima en la zona de estudio se utilizó la clasificación climática de Thornthwaite, misma que delimita el 100% del área de la cuenca y define los grupos climáticos predominantes en ella, según S. Rojas: “G4: 39% Clima muy húmedo, caliente, estación seca corta,

con déficit menor de 35 días intermitentes. G7: 39% Clima muy húmedo, caliente, estación seca corta con déficit moderado de agua. H2(a): 22% Clima excesivamente húmedo, caliente, sin estación seca." (2013, p. 18).

Según S. Rojas (2013, p. 23):

> … se presenta un mapa de isoyetas preparado sobre la base de la precipitación para el período 1978 - 2010. Esta figura indica que la precipitación media anual en la cuenca tributaria de la estación Jabillos, para el período 1978 -2010, es de 4,100 mm.

En análisis de la información anterior, se observa que de forma general se puede decir que el clima prominente en la cuenca es muy húmedo, caliente, estación seca corta, con déficit moderado de agua. Según el IMN, climas con precipitaciones con tlla entre 2000-4000 mm se clasifican como regiones lluviosas.

2.2 Caudales de Factibilidad (vigentes) y los Caudales de Generación en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

2.2.1 Caudales de Factibilidad (Vigentes)

Como parte del análisis hidrológico de la cuenca, los caudales de factibilidad son calculados mediante un estudio hidrológico realizado antes de la construcción del proyecto, justamente para analizar la viabilidad técnica y rentabilidad económica.

Para el caso propio de la cuenca del río San Lorenzo, se tiene una factibilidad que fue realizada con datos antes del año 1997, posteriormente se solicita una actualización de esta factibilidad en el año 2007, debido a que la empresa CONELÉCTRICAS R.L logra demostrar que

la factibilidad anterior difiere mucho de la realidad, siendo muy superiores los caudales de factibilidad con respecto a los caudales disponibles para generación.

En la siguiente tabla se puede observar el extracto de la Concesión de Aprovechamiento de Aguas N° R-0186-2007-AGUAS-MINAE la cual indica los caudales en m³/s recomendados para producción hidroeléctrica en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, los cuales se otorgaron según la disponibilidad de recurso hídrico en la cuenca hidrológica en estudio antes del año 2007.

MES	CAUDALES RECOMENDADOS A OTORGAR
ENERO	14.800
FEBRERO	10.200
MARZO	6.900
ABRIL	6.000
MAYO	8.400
JUNIO	13.200
JULIO	17.800
AGOSTO	20.000
SETIEMBRE	20.000
OCTUBRE	20.000
NOVIEMBRE	20.000
DICIEMBRE	20.000

Tabla 2. Tabla de caudales de factibilidad del MINAE en Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE. Fuente: Ministerio de Ambiente y energía.

La medida de actualización de la factibilidad, responde a la necesidad de ajustar los presupuestos de producción de la central para poder realizar proyecciones de energía más apegadas a la realidad climática de la cuenca y por ende lograr una mejor planificación a nivel de ingresos económico contra gastos de la operación y mantenimiento de la central.

2.2.2 Caudales de Generación

Para analizar la información de manera más eficiente se puede estudiar la precipitación de la cuenca hidrológica en estudio por medio de un control detallado de los caudales de generación,

que permitan ordenar y filtrar la información más importante en la zona donde se ubica la central hidroeléctrica; esta se puede filtrar por mes de interés o bien por época (seca o lluviosa), esto permitirá ver de forma global y más simplificada las características de la precipitación en la cuenca hidrológica. Se pueden observar los caudales brutos contra los caudales de generación, a fin de determinar cuánto es el caudal liberado el cual no puede usado para generación a causa de la mala calidad del recurso hídrico (basura, ramas, troncos, piedras, otros). Con dicho análisis se puede estimar si el proyecto es factible a futuro o bien si será riesgoso y así analizar las medidas preventivas a considerar.

Según M. Villón (2002) la cuenca hidrográfica es: "… es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido." (p. 21).

Es así que se entiende que todas las precipitaciones dentro del área de la cuenca hidrológica son parte del caudal que compone el afluente, por ello, es necesario conocer el histórico de las precipitaciones en la zona y hacer proyecciones a futuro, de esta manera se asegura que los sistemas de adaptación que se usen no solo son idóneos para el tipo de clima actual, sino que también resistirá los posibles cambios de las precipitaciones en el futuro, con estos datos disponibles se maneja la información básica de la problemática a remediar.

Los datos de caudales de generación que se utilizarán en esta investigación son datos de caudales turbinados por las unidades generadoras de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, estos datos se miden por medio de un sensor ultrasónico que utiliza el Efecto Doppler, el cual consiste en el lanzamiento de ondas que rebotan dentro de la tubería donde ingresa el flujo de agua, estas

ondas generan el dato de caudal en m³/s. Actualmente en la central se utiliza un equipo medidor de flujo ultrasónico fijo y otro portátil de la marca KATflow 200.

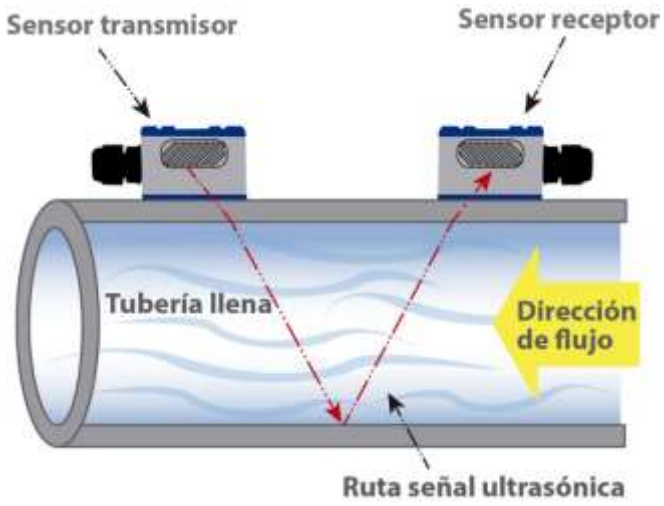


Figura 10. Medidor de flujo ultrasónico por Efecto Doppler. Fuente: Veto y Cía. Ltda.

El caudal natural de la cuenca hidrológica, es la sumatoria de los siguientes caudales:

Caudal de generación (turbinado): caudal útil para generación hidroeléctrica consumido por las unidades generadoras.

Caudal vertido sobre cresta: caudales limpios debido a las crecidas, los cuales no pueden ser utilizados por exceder la capacidad de diseño en la boca de toma en el ingreso de la central.

Caudal por descarga de fondo: caudales con sedimento excesivo por encima del límite permitido para ingreso a generación (el cual es de 1 partícula por millón ppm).

Caudal ecológico: el MINAE establece como norma que las centrales de generación hidroeléctricas deben dejar fluir sobre el tramo del río afectado (que comprende desde la toma de agua hasta la casa de máquinas) un 10% del caudal promedio anual, que se define en la factibilidad aceptada por la Dirección de Aguas, para el caso de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo el caudal promedio anual es de 15,5 m³/s, por lo tanto, el caudal ecológico es de 1,55 m³/s; ahora bien, el

caudal ecológico está compuesto por el caudal de rebose y caudal de aporte, según la norma técnica publicada por la Dirección de Aguas el 20 de mayo del 2004 en el diario oficial La Gaceta, el caudal de rebose es el caudal que se deja fluir desde la toma de agua y el caudal de aporte se da cuando existen afluentes que descargan sobre el cauce principal en el tramo del río afectado (que comprende desde la toma de agua hasta la casa de máquinas), este aporte debe de ser igual o inferior al 5% del caudal promedio anual.

En la siguiente tabla se aprecian todos los caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, desde enero del año 2002 hasta diciembre del año 2023. En esta tabla se observan los valores de caudal promedio de generación por mes, los cuales más adelante van a ser comparados con los caudales de factibilidad y con los caudales proyectados.

Histórico de Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo												
Año	**Enero**	**Febrero**	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Julio**	**Agosto**	**Septiembre**	**Octubre**	**Noviembre**	**Diciembre**
	m³/s	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**
2002	17,18	7,91	5,52	3,93	10,56	10,14	17,57	17,57	15,18	16,27	17,49	12,00
2003	12,32	8,52	4,27	5,88	9,76	15,66	15,92	13,14	11,57	12,50	14,61	17,51
2004	14,04	7,66	9,62	8,54	14,34	16,72	16,37	14,09	14,88	15,58	17,05	13,81
2005	17,78	11,45	4,16	3,87	8,58	11,93	11,46	11,82	9,84	8,63	15,87	9,93
2006	13,96	12,26	6,39	4,50	7,42	11,50	16,25	13,70	14,05	11,17	12,96	16,51
2007	7,18	5,49	4,91	4,47	11,35	11,40	15,53	13,64	17,05	13,17	15,94	10,32
2008	9,87	4,22	3,17	2,82	6,42	16,34	17,70	16,60	11,91	14,96	15,92	14,75
2009	11,56	12,08	9,87	4,47	5,93	9,58	12,04	13,48	9,31	14,34	17,00	8,81
2010	14,18	9,38	15,66	-	-	10,85	11,00	11,12	15,59	13,99	18,52	20,51
2011	19,26	9,83	6,69	4,01	6,89	7,76	15,44	11,88	13,63	17,15	13,66	16,06
2012	11,61	5,31	4,50	4,05	5,67	11,01	11,64	14,37	15,57	12,42	21,14	18,83
2013	8,19	4,48	6,96	3,71	6,51	12,42	14,33	15,77	14,31	16,81	15,21	10,74
2014	9,54	5,28	3,43	3,39	3,99	15,31	18,32	13,84	15,71	12,91	16,92	20,69
2015	11,39	16,65	6,81	3,88	5,28	15,62	19,42	15,50	14,22	15,08	16,07	13,53
2016	11,70	14,90	5,33	3,45	3,84	11,94	13,37	13,93	15,62	17,65	15,36	16,64
2017	13,32	5,73	4,20	4,06	11,54	12,95	16,08	19,04	16,97	17,87	17,71	15,89
2018	19,24	6,76	3,37	3,29	5,47	12,83	14,34	11,65	9,00	15,57	12,53	6,28
2019	3,19	2,70	3,01	2,30	5,45	8,18	10,87	11,29	13,45	14,02	12,13	17,94
2020	10,62	6,23	3,75	2,92	3,26	15,61	15,91	15,08	16,28	15,50	18,23	18,70
2021	10,16	7,65	0,01	8,39	10,59	13,11	15,97	18,29	15,54	18,50	17,06	15,45
2022	6,58	4,81	4,29	4,84	13,57	17,42	19,58	16,57	16,35	17,17	17,74	8,51
2023	6,35	4,42	3,19	2,50	2,33	5,90	11,01	14,31	11,81	17,20	14,98	11,01
Prom. Mes	*11,53*	*7,90*	*5,41*	*4,06*	*7,06*	*12,57*	*14,88*	*14,24*	*13,94*	*14,87*	*16,03*	*14,40*

Tabla 3. Histórico de Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L.

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento del caudal promedio anual segregado mes por mes con datos de la tabla anterior, dichos datos se muestran en escala de color azul en contraste con el caudal promedio mensual de todos los años. Este gráfico muestra de una manera sencilla el comportamiento de la disponibilidad del caudal para generación, donde se evidencia un caudal disminuido en los meses de enero a mayo y un incremento gradual de junio a diciembre.

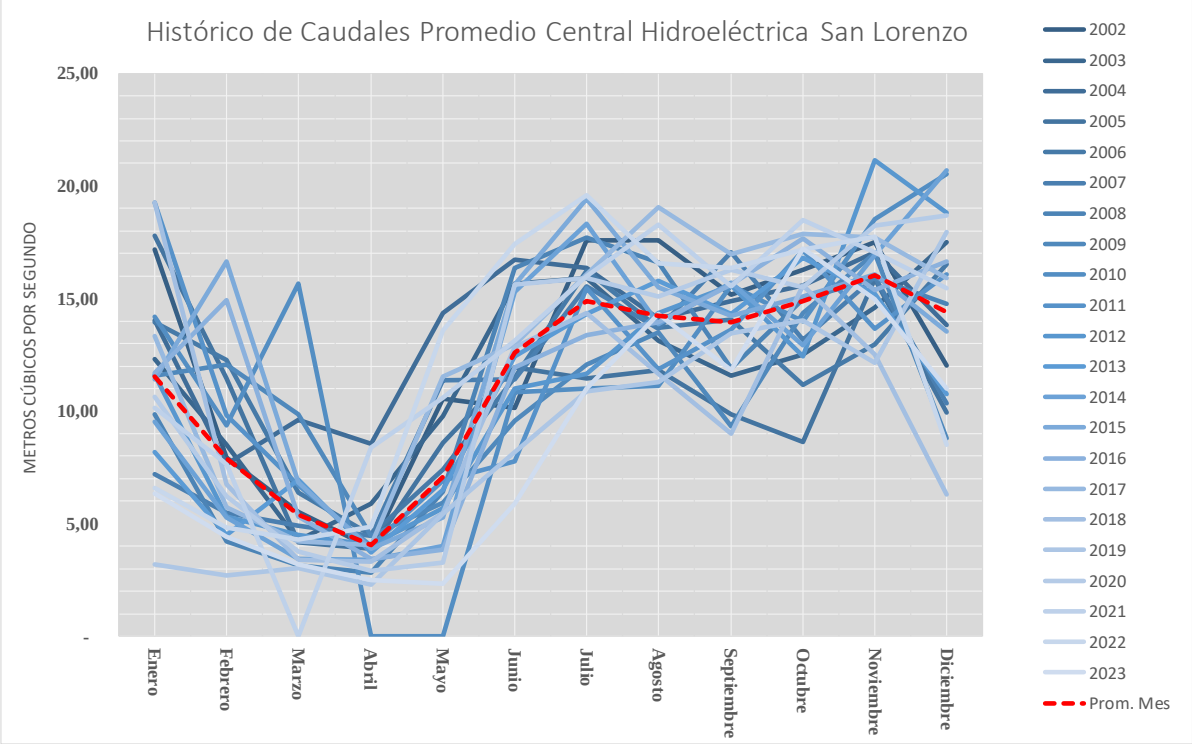


Gráfico 3. Histórico de Caudales Promedio en Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

2.3 Proyecciones de Precipitación con la Herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

Realizar una proyección de los eventos futuros, permitirá contar con información basada en eventos reales con un comportamiento distintivo y con un grado de incremento o decremento

del fenómeno que se tome como base, en el cual se deben generar distintos escenarios a fin de tener información suficiente que permita tomar medidas de seguridad. En el año 2021 Alvarado expresó:

> Una de las principales prácticas para enfrentar y reducir los efectos negativos del cambio climático es el de implementar estrategias de adaptación ante los impactos observados y proyectados. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) ha sostenido que los análisis de riesgo futuro deben de ser el pilar que soporte esas estrategias de adaptación (p. 5).

La afirmación anterior sustenta la base de realizar proyecciones basadas en el clima pasado y actual, con la finalidad de efectuar acciones en materia de adaptación y mitigación que permitan soportar la variabilidad climática en el tiempo para los proyectos de generación hidroeléctrica.

Según Alvarado (2021):

> Para el análisis del riesgo futuro son fundamentales los siguientes aspectos en relación con el componente de amenaza representado por el cambio climático: (1) la elaboración de los escenarios de cambio climático regionales para analizar las condiciones actuales y de cambio de las variables climáticas básicas (como precipitación, temperatura, viento, radiación, etc) y (2) la evaluación de la variabilidad climática, particularmente el análisis de los eventos climáticos extremos (p.5).

Esta información es de suma importancia a la hora de ser analizada y utilizada como insumo requerido para los estudios de riesgo en proyectos de generación hidroeléctrica, lo que conlleva a la utilización de información real y verificada de eventos pasados y actuales con

aproximaciones a la realidad para eventos futuros, lo que otorga seguridad en cálculos de diseño ajustados a una nueva realidad en cambio climático.

Así mismo se analiza de la cita anterior que debe de estudiarse la variabilidad en el clima, por ejemplo, la frecuencia en los eventos climáticos extremos, suelen provocar daños graves en la infraestructura hidráulica de las represas de agua, dado que la misma no está diseñada para este tipo de eventos; de ahí se deriva la importancia de aplicar factores de seguridad contra el cambio climático. A su vez, la falta de recurso hídrico para la generación hidroeléctrica debe ser atendida mediante un mejor aprovechamiento del recurso disponible.

La herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) es una iniciativa del Global Gateway que construye alianzas entre la Unión Europea y las regiones de América Latina y el Caribe (ALC). Es así que Instituto Meteorológico Nacional (IMN) comparte con EUROCLIMA la información climática recolectada por las 636 estaciones meteorológicas a nivel nacional, la cual sirve como insumo para el programa en relación a la generación de los diferentes escenarios de proyección climática. Para la presente investigación se utiliza la última versión de la herramienta CMIP6.

El objetivo de EUROCLIMA es dar acompañamiento a los países latinoamericanos en el fortalecimiento de su gobernanza climática y el diseño, actualización e implementación de políticas climáticas, que les permitan tener una legislación y planes adaptados a sus realidades y acceso a la financiación.

En la presentación del "Taller Nacional de Usuarias/os del visor de Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica" celebrada en 21 de febrero de 2024 en Costa Rica, se menciona el origen de la herramienta dadas las **necesidades detectadas** en el "Taller intersectorial tiempo y clima-agua-cambio climático" sobre Prevención y gestión de fenómenos hidrometeorológicos

extremos y medidas de adaptación al cambio climático, donde se mencionan las siguientes necesidades (pp. 2-3):

Disponer de herramientas para:

• Planificar y gestionar la reducción del riesgo asociado a eventos extremos

• Evaluar impactos futuros en los recursos hídricos

• Evaluación económica de los impactos y las medidas de adaptación

• Consideración del cambio climático en las normativas vigentes para la gestión hídrica

• Generación de escenarios de cambio climático de alta resolución (regionalizados) para Centroamérica

• Mejor resolución posible para que sea una información útil para los diferentes sectores socioeconómicos sobre las condiciones climáticas futuras con objetos de que puedan evaluar el impacto sobre los sectores productivos, defensa civil e infraestructuras y planificar las correspondientes medidas de adaptación.

• Uso de metodologías comunes para toda la región

• Elaborados por instituciones oficiales (SMHN)

• Financiación a través del programa EUROCLIMA gestionado por la FIIAPP

Entre los productos que ofrece la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) se pueden mencionar:

• Proceden de proyecciones a escala diaria.

• Variables son obtenidas mediante técnicas de regionalización dinámica y estadística.

• Resolución de rejilla: 50 km (resolución dinámica), 25 km (regionalización estadística de temperatura) y 5 km (regionalización estadística de precipitación).

• Contemplan cinco escenarios de emisión (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), así como un escenario de referencia (histórico).

• Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) son 5 escenarios diseñados por la Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) con un gradiente de forzamiento radiactivo para el año 2100, en los que se consideran diferentes alternativas en las emisiones de gases de efecto invernadero, desde el incremento a la disminución.

• En función de estos escenarios de emisión, aplicando los modelos climáticos globales, pueden estimarse los escenarios climáticos previstos.

Para proyectar la precipitación futura en la cuenca hidrológica donde se ubica la Central Hidroeléctrica San Lorenzo se deben de definir ciertos parámetros en la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). Entonces, para entender los resultados de las proyecciones de precipitación generadas por el programa, se requiere hacer un estudio detallado de las variables utilizadas por este y analizar el porqué de su uso como parámetro de los escenarios de proyección en la precipitación de la cuenca.

Para sustentar lo anterior, es así que desde el año 1978 Holdridge expresó la importancia de clasificar y ordenar la información climatológica disponible de las zonas en estudio:

> es factible segregar combinaciones de zonas de vida que coincidan con rangos climáticos definidos. Estableciendo parámetros numéricos que definan divisiones igualmente balanceadas, … una vez que se definen precisamente con parámetros climáticos los grupos de zonas de vida, estas pueden compararse con mayor eficiencia y llegar a determinar los efectos de los factores individuales o de varias combinaciones de factores. (p. 3).

Estos parámetros climáticos sirven como filtro de la información que se desea analizar para la cuenca hidrológica en estudio y en los diferentes escenarios de proyección. El análisis de la información puede realizarse desde un factor climático en específico o bien desde grupos de factores que deseen analizarse en simultáneo. La finalidad de la aplicación de estos parámetros en los diferentes escenarios de proyección es el de tener la oportunidad de observar la variación de los resultados de la precipitación según los parámetros sean modificados.

Para comprender los parámetros de clasificación del "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), a continuación, se analizan sus principales características:

2.3.1 Escenarios SSP

Los escenarios SSP (Trayectorias socioeconómicas compartidas por sus siglas en inglés) son 5 escenarios diseñados por la Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) los cuales se identifican según las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) que contenga cada uno, esto son descritos por la IPCC como:

> …incluyen escenarios con emisiones de GEI altas y muy altas (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y emisiones de CO_2 que prácticamente se duplican con respecto a los niveles actuales para 2100 y 2050, respectivamente; escenarios con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5) y emisiones de CO_2 que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo; y escenarios con emisiones de GEI muy bajas y bajas que disminuyen hasta llegar a emisiones netas iguales a cero en torno a 2050 o después de esta fecha, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas de CO_2 (SSP1-1.9 y SSP1-2.6). (2021, p. 12).

Para la presente investigación se utiliza el escenario SSP5-8.5 debido a que es el que representa el escenario más crítico, esto sustentando en que Costa Rica no posee una Ley de Cambio Climático. Esto según la afirmación de Alvarado:

> … considerado como el escenario "business-as-usual" (asume que las tendencias futuras de desarrollo siguen las del pasado y no se producirán cambios en las políticas de emisiones de GEI), por el contrario, es un escenario sin ningún control de mitigación, que se caracteriza por el considerable aumento de las emisiones durante el siglo XXI. (2021, p. 8)

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento del GEI de acuerdo a los diferentes escenarios SSP y que posee cálculos aproximados desde el año 2015 hasta el año 2100, tal como se refirió en la cita anterior.

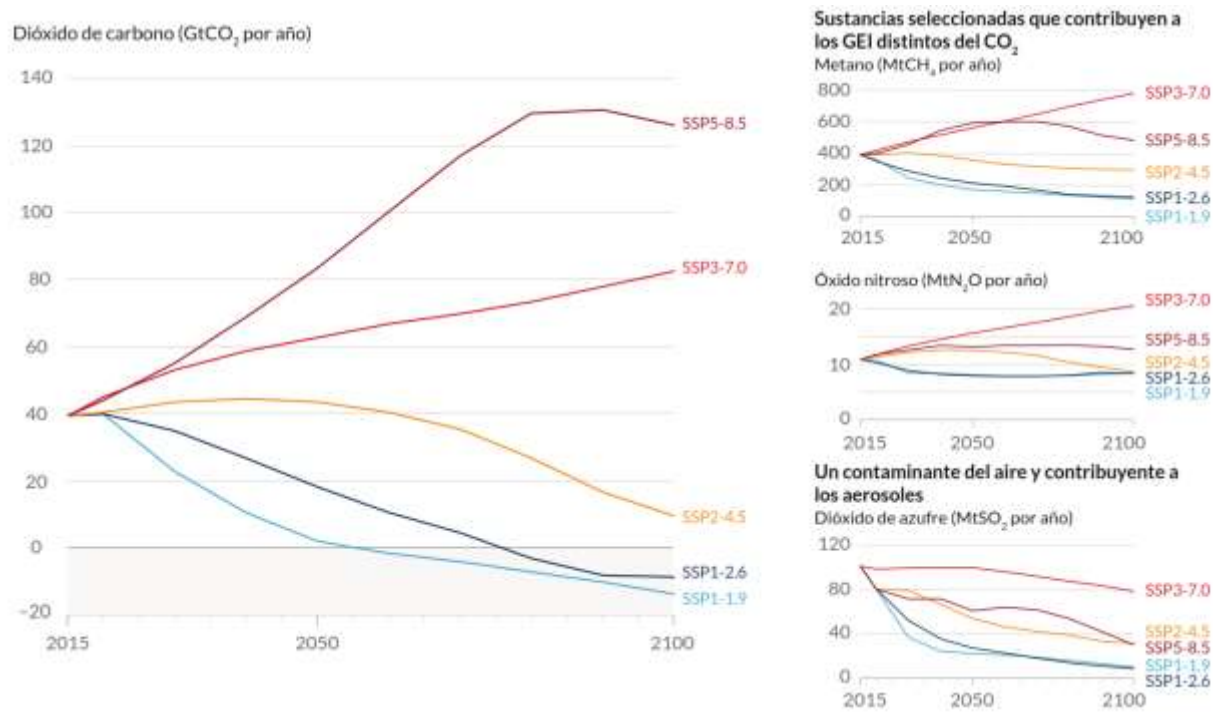


Gráfico 4. Proyecciones de las emisiones totales y concentraciones de GEI (cantidades de CO_2 para el año 2100). Fuente: Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del IPCC.

2.3.2 Promedio de Modelos

Los GCMs (Modelos Climáticos Globales por sus siglas en inglés) o EDMs (Servidor de datos meteorológicos por sus siglas en inglés), típicamente conocidos en español como PSDM (Interpretación directa de imágenes en profundidad), estos son descritos por Global Gateway, la Unión Europea y las regiones de América Latina y el Caribe (ALC) en la Guía de buen uso del Visor de escenarios de cambio climático de Centroamérica como: "estos modelos son programas de gran complejidad capaces de realizar simulaciones climáticas para todo el planeta." (s.f. p. 1).

2.3.3 Precipitación

El "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) permite filtrar diferentes variables tales como temperatura, viento, precipitación y otros; en la presente investigación se utiliza la variable de la precipitación, debido a su influencia directa sobre los caudales de generación y factibilidad, además es el insumo principal de la herramienta para generar las proyecciones de caudal que posteriormente serán comparadas en el capítulo 4 de análisis de resultados.

2.3.4 Periodo de Análisis

Se realizará el análisis en las dos épocas climáticas presentes en Costa Rica, la época seca y la época lluviosa, por tanto, el análisis se realiza en dos partes, una del mes de enero hasta el mes mayo (época seca) y la otra del mes de junio al mes de diciembre (época lluviosa). La división elegida para el análisis de la proyección de la precipitación es acorde al comportamiento climático típicos y de los caudales de generación presentes en la cuenca hidrológica en estudio.

2.3.5 Periodo Base

Este periodo es la base de datos numérica de los diferentes escenarios SSP y de las variables de análisis (temperatura, viento, precipitación y otros). Para el caso particular de esta investigación, se tomará el periodo base más cercano disponible en el "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), el cual se comprende valores reales desde el año 1981 hasta el año 2010 inclusive.

2.3.6 Periodo de Proyección

Este periodo es la proyección datos numéricos obtenidos por la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) para las variables de análisis (temperatura, viento, precipitación y otros). Para el caso particular de esta investigación, se utilizarán los datos obtenidos para la precipitación en un futuro proyectado del año 2015 hasta el año 2044 inclusive.

2.4 Marco Legal

Costa Rica es altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático. Las pérdidas registradas incluyen destrucción de carreteras, puentes, impactos en vivienda, sistemas de alcantarillado colapsados, sequías y falta de recurso hídrico para el consumo de la población y para la generación de energía hidroeléctrica, entre otros. El impacto ambiental, económico y a la infraestructura va en aumento año tras año. No se pue den seguir atendiendo emergencias, sin invertir en la prevención de riesgos y en la adaptación al cambio climático.

Como respuesta ante estos retos, y con apoyo de la Cooperación Española, de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), en alianza con el Ministerio de

Planificación y Política Económica (MIDEPLAN) y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), han formulado una Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2018-2030 (PNACC), para su ejecución se formula el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026 (PNA).

Costa Rica posee diversos instrumentos legales que ratifican compromisos a nivel internacional. A pesar de la falta de una legislación específica sobre cambio climático que regule aspectos concretos de adaptación y mitigación, hay regulaciones sectoriales o temáticas (ambientales o de gestión de riesgos) que sirven como marco habilitador para la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030 (PNACC) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026 (PNA).

2.4.1 Síntesis del Marco Legal Nacional

La Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) está respaldada por un amplio conjunto de normas y políticas públicas. Su objetivo es fortalecer el marco normativo y complementar los instrumentos de política existentes para fomentar la resiliencia en los sectores productivos, las comunidades humanas y los ecosistemas de Costa Rica.

los principales hitos en políticas ambientales y climáticas del país, evidencian que las políticas de cambio climático que se han implementado durante más de dos décadas; el marco nacional ha evolucionado en concordancia con los compromisos internacionales adquiridos por Costa Rica. La trayectoria que el país ha tenido desde el marco legal proporciona una base sólida para una nueva generación de instrumentos más integrales que promuevan enfoques multisectoriales.

2.4.2 Leyes Nacionales Asociadas al Cambio Climático

Los componentes de este marco se pueden categorizar como instrumentos estratégicos (políticas, estrategias y planes oficializados mediante decretos y acuerdos) y normas de diversa jerarquía, todos los cuales constituyen la base que habilita la puesta en marcha de la PNACC. En la tabla 4, se presenta una síntesis de aquellos considerados de mayor relevancia y vinculación para la implementación de esta Política.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN) menciona en la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026 (2017, p. 46):

Ley Orgánica del Ambiente, nº 7554

Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo, nº 8488

Ley General de la Administración Pública, nº 6227, del 2 de mayo de 1978

Código Municipal

Ley de Planificación Urbana, nº 4240

Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos, nº 7779

Ley de desarrollo, promoción y fomento de la actividad agropecuaria orgánica, nº 8591

Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018 “Alberto Cañas Escalante”

Estrategia Nacional de Cambio Climático (decreto)

Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030

Política Nacional del Mar Costa Rica 2013-2028

Política Nacional de Salud (2015)

Capítulo 3: Marco Metodológico

En este capítulo del trabajo se analizarán los sujetos y fuentes de información en los que se sustentó el marco teórico de esta investigación, de la misma forma se analizará la forma empleada para el desarrollo de la misma; esto permitirá un mayor entendimiento de la metodología empleada en la investigación realizada.

3.1. Tipo de Investigación

3.1.1 Naturaleza de la Investigación: Cuantitativa

La presente investigación es de tipo cuantitativa, dado que la misma responde al análisis de variables numéricas proyectadas, las cuales pueden ser medidas y calculadas para posteriormente ser analizadas y comparadas con datos reales. “Los datos se encuentran en forma de números (cantidades) y, por tanto, su recolección se fundamenta en la medición (en los casos se miden las variables contenidas en las hipótesis).” (Fernández & Mendoza, 2018, p. 6).

Adicionalmente, según Fernández & Mendoza (2018) “Al final, con los estudios cuantitativos se pretende describir, explicar y predecir los fenómenos investigados, buscando regularidades y relaciones causales entre elementos (variables). Esto significa que la meta principal es la prueba de hipótesis y la formulación y demostración de teorías” (p. 7). Lo anterior sustenta la ejecución del marco teórico de la presente investigación, en él se comprueba que las variables numéricas fueron calculadas, proyectadas y posteriormente analizadas.

3.1.2 Carácter de la Investigación: Exploratorio

El carácter o alcance de la presente investigación se centra en el tipo exploratorio, esto se debe a que en general el tema de cambio climático ha sido muy poco explorado o más bien dicho,

un tema de reciente interés. El caso de desarrollar proyecciones de cambio climático en la cuenca hidrológica de una central hidroeléctrica para predecir el comportamiento futuro de las precipitaciones que forman los caudales de generación hidroeléctrica, es un tema exploratorio y de interés actual, dado que en la actualidad no se cuentan con sistemas comprobados ni cálculos establecidos, para que a través de una consultoría en ingeniería se pueda comprobar la factibilidad futura de un proyecto hidroeléctrico, así como determinar las medidas en materia de adaptación y mitigación que el mismo requiere para resistir los efectos del cambio climático. Fernández & Mendoza (2018, p. 105) mencionaron al respecto lo siguiente:

> Exploratorio
>
> Los estudios que se inician con este alcance:
>
> • Investigan fenómenos o problemas poco estudiados, de los cuales se tienen dudas o no se han abordado en el contexto
>
> • Identifican conceptos o variables e hipótesis promisorias para indagar
>
> • Preparan el terreno para estudios más amplios, elaborados y profundos
>
> • Indagan desde una perspectiva innovadora

3.2 Sujetos y Fuentes de Información

3.2.1 Sujetos de Información

En este apartado se mencionan los sujetos de información consultados, de ellos se utilizaron datos de control reales obtenidos de instrumentos de monitoreo y equipos de medición, metodologías empleadas por la comunidad científicas en la ingeniería civil hidráulica, así como información relevante obtenida por instituciones públicas que sirvieron de sustento para el análisis y verificación de los datos obtenidos.

Sujetos de Información			
Ítem	**Sujeto**	**Origen de la fuente**	**Fuente consultada**
1	Donald Hidalgo Saborío	Encargado de Descarbonización y Ambiente CONELÉCTRICAS R.L.	Comunicación personal
2	Benjamín Lieberman Elizabeth Gordon	Benjamín Lieberman es doctor y profesor de Historia en la Universidad Estatal de Fitchburg (Massachusetts). Elizabeth Gordon es doctora y catedrática de la Facultad de Ciencias Geográficas y de la Tierra en la Universidad Estatal de Fitchburg (Massachusetts).	El cambio climático en la historia de la humanidad, desde la prehistoria hasta el presente
3	Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua CTIE-Agua	Comité integrado por instituciones públicas de Costa Rica, cuya actividad depende del recurso hídrico con el objetivo de instalar en el país la capacidad, sostenida en el tiempo, de levantar y recopilar la información estadística necesaria para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.	Boletín AGUA/2021
4	Consorcio Nacional de Empresas de Electrificación de Costa Rica R.L. (CONELÉCTRICAS R.L)	Consorcio compuesto por las cooperativas de electrificación rural de Costa Rica, encargada de la administración de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.	Control de datos sobre caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo
5	EUROCLIMA (Herramienta climática que proyecta escenarios climáticos)	Herramienta creada por Global Gateway, la Unión Europea y las regiones de América Latina y el Caribe (ALC).	Guía de buenas prácticas y Visor de Escenarios de Cambio Climático (Generación de Escenarios de Cambio Climático de alta resolución para Centroamérica)

6	Roberto Hernández Sampieri Christian Paulina Mendoza Torres	Roberto Hernández-Sampieri es licenciado en Ciencias de la comunicación y tiene un diplomado en consultoría, maestro y doctor en Administración. Autor de obras. Christian Paulina Mendoza Torres es licenciada en Comunicación, maestra y doctora en Administración.	Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta
7	Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).	Institución pública de Costa Rica encargada de la generación de energía, así como de brindar el servicio de electricidad y telecomunicaciones en Costa Rica	Plan de Expansión de la Generación 2022-2040.
8	Instituto Meteorológico Nacional (IMN)	Institución adscrita a MINAE, que tiene a cargo la coordinación de todas las actividades meteorológicas del país	Atlas Climatológico de Costa Rica: con la información de las 636 estaciones meteorológicas del IMN del país.
9	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.	Guía y Bases físicas
10	Leslie R. Holdridge	Doctor, botánico, ecólogo y climatólogo estadounidense. Autor de obras.	Libro: Ecología basada en las zonas de vida
11	Luis Fernando Alvarado Gamboa	Investigador en el Instituto Meteorológico Nacional.	Libro: Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica
12	Máximo Villón Béjar	Ingeniero Agrícola y Catedrático TEC.	Libro: Hidrología
13	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	Institución pública de Costa Rica encargada de la gestión, explotación y generación de energía por recursos naturales	Política y Plan de Cambio Climático en Costa Rica Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.
14	Organización de las Naciones Unidas (ONU)	Es una organización internacional que proporciona un foro para que sus países miembros puedan reunirse, discutir problemas comunes y encontrar soluciones compartidas.	Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, año 1972.

15	Sergio Rojas Araya	Ingeniero Civil	Estudio Hidrológico Central Hidroeléctrica San Lorenzo
16	Agencia Estatal de Meteorología	Institución del Ministerio para Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España.	Proyecto Generación de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución para Centroamérica.
17	Banco Interamericano de Integración Económica	Entidad financiera cuya principal fuente de financiamiento multilateral son recursos financieros para el desarrollo de los países que conforman el Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)	El acompañamiento histórico del BCIE a Costa Rica busca que la totalidad de su energía eléctrica provenga de fuentes renovables
18	Contraloría General de la República	Institución pública del Gobierno de Costa Rica, encargada de la auditoria de proyectos de inversión a nivel nacional en las diferentes instituciones que lo ejecutan.	Informe de opiniones y sugestiones “Presión sobre la hacienda pública en un contexto de variabilidad y cambio climático: desafíos para mejorar las condiciones presentes y reducir los impactos futuros” San José: CGR DFOE-AE-OS-00001-2017
19	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	Institución pública de Costa Rica encargada de la gestión, explotación y generación de energía por recursos naturales	Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.
20	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Periódico digital creado por la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: CNE emite alerta amarilla por faltante de lluvias mayor al previsto.
21	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Periódico digital creado por la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: Un 66% de los sistemas del AyA presentarán déficit hídrico en la estación seca por fenómeno de El Niño

22	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Periódico digital creado por la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: ICE anuncia racionamientos de electricidad por descenso crítico en caudales de hidroeléctricas e incumplimiento de plantas térmicas alquiladas
23	Nidia Cruz	Consultora de Ambiente y Desarrollo	Publicación en revista Éxito Empresarial: Cambio climático y sus repercusiones en el diseño y vida útil de las infraestructuras civiles

Tabla 4. Sujetos de Información. Fuente: Danny mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

3.2.2 Fuentes de Información: Primaria, Secundaria o Terciaria

Fuentes de Información			
Ítem	**Sujeto**	**Fuente consultada**	**Tipo de fuente**
1	Donald Hidalgo Saborío	Comunicación personal	Primaria: Entrevista con el Encargado de Ambiente y Proyectos de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.
2	Benjamín Lieberman Elizabeth Gordon	El cambio climático en la historia de la humanidad, desde la prehistoria hasta el presente.	Secundaria: Libro que explica los orígenes del cambio climático.
3	Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua CTIE-Agua	Boletín AGUA/2021	Terciaria: Información estadística sobre las fuentes de recurso hídrico en el país.
4	Consorcio Nacional de Empresas de Electrificación de Costa Rica R.L. (CONELÉCTRICAS R.L)	Control de datos sobre caudales de generación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo	Primaria: Departamento de monitoreo que controla los caudales reales que se utilizan Generación en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

5	EUROCLIMA (Herramienta climática que proyecta escenarios climáticos)	Guía de buenas prácticas y Visor de Escenarios de Cambio Climático (Generación de Escenarios de Cambio Climático de alta resolución para Centroamérica)	Secundaria: Programa basado en información suministrada por las instituciones meteorológicas de cada país, con la cual se realizan proyecciones aproximadas.
6	Roberto Hernández Sampieri Christian Paulina Mendoza Torres	Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta	Secundaria: Libro sobre la perspectiva de un autor sobre metodologías de la investigación.
7	Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).	Plan de Expansión de la Generación 2022-2040.	Secundaria: Programa y plan de expansión futura en materia de generación eléctrica en Costa Rica, basado en las necesidades de mejora del país.
8	Instituto Meteorológico Nacional (IMN)	Atlas Climatológico de Costa Rica: con la información de las 636 estaciones meteorológicas del IMN del país.	Primaria: Datos reales en materia climática captados por estaciones meteorológicas en Costa Rica.
9	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)	Guía y Bases físicas	Secundaria: Creación de metodologías nuevas en materia de Cambio Climático basándose datos de otras instituciones internacionales para crear mejora a nivel mundial.
10	Leslie R. Holdridge	Libro: Ecología basada en las zonas de vida	Secundaria: Libro sobre la perspectiva de un autor sobre zonas de vida y el desarrollo de estas en los diferentes climas del país.
11	Luis Fernando Alvarado Gamboa	Libro: Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica	Secundaria: Libro sobre la aplicación de escenarios climáticos para desarrollar proyecciones climáticas futuras basados en datos e información del Instituto Meteorológico Nacional.
12	Máximo Villón Béjar	Libro: Hidrología	Secundaria: Libro referente a cálculos para cuencas hidrológicas basado en metodologías ya aplicadas.

13	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	Política y Plan de Cambio Climático en Costa Rica Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.	Secundaria: Política y Plan de Cambio Climático en Costa Rica, basado en análisis de datos de otras instituciones que reflejan las necesidades de mejora del país.
14	Organización de las Naciones Unidas (ONU)	Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, año 1972.	Terciaria: Foro internacional basado en las necesidades de mejora a nivel mundial.
15	Sergio Rojas Araya	Estudio Hidrológico Central Hidroeléctrica San Lorenzo	Secundaria: Consultoría en hidrología, aplicando metodologías ya existentes en el campo de la ingeniería y basando en consultas a bases de datos del Instituto Meteorológico Nacional.
16	Agencia Estatal de Meteorología	Proyecto Generación de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución para Centroamérica.	Primaria: Obtienen los datos de primera fuente con equipos especializados, es una institución similar al IMN en Costa Rica.
17	Banco Interamericano de Integración Económica	El acompañamiento histórico del BCIE a Costa Rica busca que la totalidad de su energía eléctrica provenga de fuentes renovables	Secundaria: Depende de la información que suministran las entidades de cada país para la toma de decisiones.
18	Contraloría General de la República	Informe de opiniones y sugestiones “Presión sobre la hacienda pública en un contexto de variabilidad y cambio climático: desafíos para mejorar las condiciones presentes y reducir los impactos futuros” San José: CGR DFOE-AE-OS-00001-2017	Secundaria: Obtiene información de proyectos ejecutados por otras instituciones y realiza sus respectivos análisis en función de la Ley que aplicable.
19	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.	Secundaria: Estudio técnico requerido para el otorgamiento de permisos solicitados analizando datos suministrados de otras instituciones.

20	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: CNE emite alerta amarilla por faltante de lluvias mayor al previsto.	Terciaria: Replica información de otras fuentes
21	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: Un 66% de los sistemas del AyA presentarán déficit hídrico en la estación seca por fenómeno de El Niño	Terciaria: Replica información de otras fuentes
22	Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)	Noticia: ICE anuncia racionamientos de electricidad por descenso crítico en caudales de hidroeléctricas e incumplimiento de plantas térmicas alquiladas	Terciaria: Replica información de otras fuentes
23	Nidia Cruz	Publicación en revista Éxito Empresarial: Cambio climático y sus repercusiones en el diseño y vida útil de las infraestructuras civiles	Secundaria: Creación de contenido desde la propia percepción del autor sin metodologías aplicada y probadas científicamente.

Tabla 5. Fuentes de Información. Fuente: Danny mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

3.3 Muestra y Población

3.3.1 Tipo de Muestra

En la presente investigación se podrá calcular el tamaño del error en las predicciones realizadas con la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) basadas datos reales del año 2013 hasta el año 2023.

Lo anterior se fundamenta en la afirmación realizada en el año 2014 por Fernández & Baptista: “Las muestras probabilísticas tienen muchas ventajas; quizá la principal sea que puede medirse el tamaño del error en nuestras predicciones.” (p. 177).

Es de esta forma que se puede afirmar que el tipo de muestra utilizado para el análisis de la presente investigación corresponde a un muestreo probabilístico aleatorio simple, debido a que en este trabajo de investigación se realizan comparaciones entre las muestras de tal forma que para el resultado es irrelevante si las muestras poseen diferentes o iguales variables entre sí. Según lo afirmado por Fernández & Baptista:

> En ocasiones, el interés del investigador es comparar sus resultados entre segmentos, grupos o nichos de la población, porque así lo señala el planteamiento del problema. Por ejemplo, efectuar comparaciones por género (entre hombres y mujeres), si la selección de la muestra es aleatoria, tendremos unidades o elementos de ambos géneros, no hay problema, la muestra reflejará a la población. (2014, pp. 180-181).

3.3.2 Descripción de la Muestra

La muestra de la presente investigación se basa en el análisis del comportamiento de 3 tipos de caudales presentes en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, entre ellos están:

- Caudales de factibilidad (vigentes).
- Caudales de generación (turbinados).
- Caudales de proyección de precipitación.

Fernández & Baptista definieron la muestra como: "… la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población." (2014, p. 173).

Es así que los caudales mencionados anteriormente son parte de una población total de caudal, la cual incluye otros tipos de caudal que no se estudiaron en este proyecto de investigación, tales son el caudal vertido sobre cresta, caudal por descarga de fondo, caudal ecológico, entre otros.

3.3.3 Descripción Estadística de la Población en Estudio

El caudal promedio anual de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo es de 11,30 m³ / s, este valor corresponde entre el 80% y el 90% de la población de estudio total, el porcentaje restante son caudales no estudiados en este trabajo de investigación.

Para determinar si la muestra es representativa (hace referencia a que todos los elementos de un grupo tengan las mismas oportunidades de ser elegidos), se debe aplicar la siguiente fórmula estadística:

$$\text{Tamaño de Muestra} = \frac{N \cdot Z^2 \cdot \sigma^2}{(N-1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot \sigma^2}$$

Ecuación 6. Tamaño de muestra. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

Donde:

N = Población de estudio

Z = Nivel de confianza

σ = Desviación estándar

e = Margen de error

En ella se considerarán los siguientes valores según lo especificado por Fernández & Mendoza (2018, p. 203): “Comúnmente, hay dos niveles de error (5% y 1%, o 0.05 y 0.01 en términos de proporción) y de confianza (95% y 99%, o 0.95 y 0.99 en proporciones) utilizados”

En aplicación de la fórmula anterior, la muestra calculada para la presente investigación es de un caudal promedio de 12 m³ / s, por lo que el valor 11,30 m³ / s de caudal promedio anual es muy cercano a la muestra calculada, esto permite determinar que la muestra sí es representativa de la población para en análisis de la investigación.

3.4 Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos

3.4.1 Diseño de Instrumentos

La presente investigación toma como base los datos suministrados por instrumentos de monitoreo de caudal de generación (sensor ultrasónico que utiliza el Efecto Doppler) el cual está ubicado dentro de la tubería donde ingresa el flujo de agua, de equipos de medición (estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional) los cuales centralizan su información por medio de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) y permiten proyectar escenarios futuros de cambio climático, de fuentes bibliográficas en materia técnica y legal, los cuales entregan información sobre los caudales de factibilidad (vigentes), así como de la realidad actual de la precipitación en la cuenca hidrológica en estudio y por último de la aplicación de una entrevista a un funcionario con más de 30 años de experiencia de la empresa CONELÉCTRICAS R.L encargada de la administración y operación de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, esta entrevista permitió obtener un panorama del funcionamiento y contexto de los caudales de generación utilizados.

3.4.2 Aplicación de Instrumentos

En este trabajo de investigación se aplicaron los siguientes instrumentos que permitieron obtener los datos analizados en el capítulo 4:

Para obtener los caudales de generación promedio se utilizó la información de cantidad de recurso hídrico en un tiempo determinado por medio de un sensor ultrasónico, estos se tabulan en una matriz que permita organizar la información por mes y por año al mismo tiempo.

Para obtener datos de los caudales proyectados se utiliza la información de precipitación que proyecta la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

Los caudales de factibilidad se obtuvieron de la revisión bibliográfica técnica y legal de la Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.

Y el contexto y situación actual en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo se obtiene por medio de la entrevista realizada al funcionario de la empresa CONELÉCTRICAS R.L encargada de la administración y operación, en la cual se realizan las siguientes 3 preguntas:

1. ¿Cuál ha sido el comportamiento y la tendencia observada en los datos sobre los caudales destinados a generación hidroeléctrica en la Central Hidroeléctrica y desde hace cuánto tiempo se ha observado este comportamiento?

2. ¿Existe alguna relación entre las tendencias de los caudales y los ingresos del negocio?

3. ¿Qué medidas se han estado ejecutando a través de CONELÉCTRICAS R.L para contrarrestar los efectos negativos del Cambio Climático que afectan la producción en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo?

3.5 Estrategia de Intervención

3.5.1 Estrategia de Intervención

En la presente investigación se organizan los datos numéricos de caudales de generación, factibilidad y proyectados a través del programa Microsoft Excel, el cual es un software apropiado para analizar los datos; estos datos se tabulan y sobre ellos se aplican fórmulas de promedio, reglas de tres (Teorema de la proporcionalidad de Thales de Mileto), porcentajes, entre otros. Estas estrategias permiten analizar los valores de precipitación proyectados por la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA). La finalidad de esta estrategia es determinar el grado de error de las predicciones de la herramienta y comparar los valores numéricos proyectos contra los valores reales de caudal del año 2013 hasta el año 2023.

3.5.2 Paradigma Analítico de Datos

El objetivo del análisis de la presente investigación es el de demostrar que la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) es un software que va a devolver datos confiables y seguros en cuanto a predicción de cambio climático, para que por medio de él los profesionales en ingeniería puedan realizar una recopilación y análisis de datos cuantitativos que permitan examinar relaciones, patrones y regularidades en fenómenos observables y medibles, que les permitan tomar medidas de adaptación y mitigación de cambio climático orientadas al futuro en proyectos de generación hidroeléctrica y otras ramas de la ingeniería.

3.5.3 Diagrama de Gantt

ACTIVIDAD	MAYO 2024		JUNIO 2024				JULIO 2024				AGOSTO 2024				SETIEMBRE 2024
SEMANA	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
Reunión inicial de tesis con el Dr. Alonzo Álvarez Vega															
Elaboración del capítulo 1: Introducción															
Envío a revisión del capítulo 1															
Elaboración de correcciones del capítulo 1															
Elaboración del capítulo 2: Marco teórico															
Envío a revisión del capítulo 2															
Elaboración de correcciones del capítulo 2															
Elaboración del capítulo 3: Marco metodológico															
Elaboración de capítulo 4: Análisis de resultados															
Elaboración de capítulo 5: Limitaciones, conclusiones y recomendaciones															
Envío a revisión de capítulos 2, 3, 4 y 5															
Elaboración de correcciones del capítulo 2, 3, 4 y 5															
Lectura de tesis															
Defensa de tesis															

Tabla 6. Diagrama de Gantt sobre el proceso de tesis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

Capítulo 4: Análisis e Interpretación de los Resultados

En este capítulo se evaluarán las variables de análisis vistas en el marco teórico, se desarrollarán valores de caudal y precipitación promedios para las épocas seca y lluviosa, para escenarios reales del pasado, escenarios reales actuales y escenarios proyectados, que posteriormente serán comparados entre sí, a fin de determinar si los valores proyectados se acercan a la realidad y si la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) es una herramienta confiable para el cálculo de impacto de cambio climático en centrales de generación hidroeléctrica.

4.1 Presentación de los Resultados para las Variables de Análisis

4.1.1 Variables del Estudio Hidrológico

Los elementos que caracterizan la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo, tales como perímetro, área, índice de compacidad o factor de forma, pendiente media de la cuenca, pendiente de la cuenca, pendiente longitudinal del cauce principal, curva hipsométrica de la cuenca, densidad de corriente, densidad de drenaje, cobertura vegetal y uso de la tierra, climatología (precipitación) se resumen en la siguiente tabla de resultados según S. Rojas (2013, p.p 10-15).

Caracterización de la Cuenca de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo			
Ítem	**Variable**	**Valor**	**Unidad**
1	Perímetro	55,7	kilómetro (km)
2	Área	138,1	kilómetro cuadrado (km²)
3	Índice de compacidad o factor de forma	1,327	adimensional
4	Pendiente media de la cuenca	40	porcentaje (%)
5	Pendiente longitudinal del cauce principal	4,07	porcentaje (%)
6	Altitud media de la cuenca	880	metros sobre el nivel del mar (msnm)
7	Número de corrientes	55	unidad
8	Orden de la cuenca	3	adimensional
9	Densidad hidrográfica	35	porcentaje (%)
10	Densidad de drenaje	0,76	adimensional
11	Cobertura vegetal y uso de la tierra	80 bosque 20 potreros	porcentaje (%)
12	Climatología (precipitación)	4100	milímetro/año (mm/año)

Tabla 7. Variables del estudio hidrológico. Fuente: Estudio Hidrológico por Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta.

Se realiza el cálculo de la precipitación de acuerdo a los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas del IMN cercanas a la zona de estudio (Balsa, Hotel Villa Blanca e ICT Santa Clara) y se aplica el método de polígono de Thiessen mismo que puede ser analizado en la página 78 del libro Hidrología por el ingeniero Máximo Villón Béjar catedrático del Instituto Tecnológico Nacional (TEC), con el cual se determina la precipitación media anual de la cuenca en estudio.

En la siguiente imagen se observa la influencia de las estaciones meteorológicas sobre la superficie de la cuenca hidrológica.

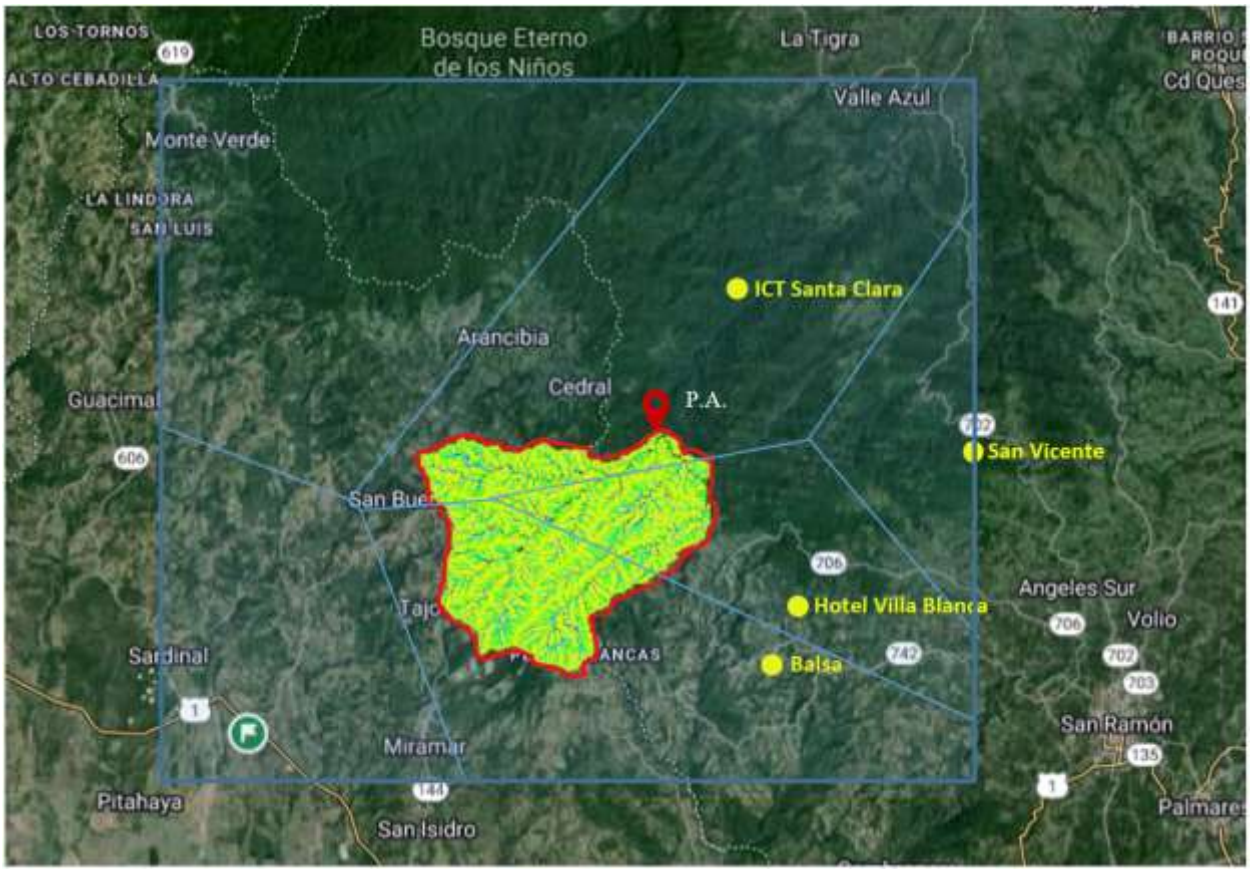


Figura 11. Polígono de Thiessen - Áreas tributarias por estación meteorológica. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

En la siguiente tabla se realiza la distribución de precipitación por media áreal, según la influencia de la estación meteorológica sobre la superficie utilizando el método de Polígono de Thiessen.

Análisis precipitaciones por polígono de Thiessen Estaciones meteorológicas del IMN								
N° Estación	**Nombre**	**X (Este)**	**Y (Norte)**	**Precipitación media Anual (mm)**	**Temperatura media anual (C°)**	**Área km²**	**Precipitación media Anual (mm) * Área km²**	**Peso % de Área (km²)**
1	Adifort	429178,9	1157521,6	3458,59	24,7			
2	**Balsa**	**445549,4**	**1125079,0**	**2754,52**	**20,8**	**42,441**	**116904,58**	**30,73%**
3	**Hotel_Villa_Blanca**	**446984,6**	**1128210,6**	**3258,69**	**21,3**	**64,867**	**211381,44**	**46,97%**
4	**ICT_San_Clara**	**443774,4**	**1145672,4**	**4478,35**	**23,5**	**30,792**	**137897,35**	**22,30%**
5	San_Vicente	456794,9	1136707,4	5348,25	22,1			
6	Pitahaya_PuntaArenas	411548,4	1112028,0	2369,35	24,5			
7	San_Mateo_Alajuela	443072,0	1098231,3	2487,25	24,5			
8	Bagaces_Guana_Taboga	371042,8	1144230,6	1826,65	26,5			
					Total	**138,10**	**466183,38**	**1,00**

Precipitación media anual (mm) * km^2	3375,69

Tabla 8. Análisis de precipitaciones por el método de polígono de Thiessen. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

Se analizan los datos de precipitación obtenidos por S. Rojas en el Estudio Hidrológico del año 2013 (4100 mm) y se distingue una diferencia entre los datos de la precipitación media anual de un 17,66%. Esto se debe a que las estaciones meteorológicas utilizadas en el Estudio Hidrológico del año 2013 son del ICE (en este caso Jabillos), que tiene una ubicación más cercana a la cuenca hidrológica en estudio, por lo que los datos son más precisos. De la misma forma, se puede afirmar que el cálculo de 3375,69 mm es un dato correcto, dado que se encuentra dentro del rango definido para la zona como región lluviosa con tlla entre 3000-4000 mm de precipitación anual según el IMN, esto según la Figura 9 del capítulo 3.

4.1.2 Variables de Caudal de Factibilidad

Los caudales de factibilidad se obtuvieron de la Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE del año 2007, vigentes en la actualidad.

En la siguiente tabla se puede comparar la factibilidad con datos antes del año 1997, denominada factibilidad 1 y la actualización con los datos del año 2007, denominada factibilidad

2; adicionalmente, se puede observar el diferencial porcentual que existe entre la factibilidad 1 y la factibilidad 2, donde se dan una disminución de caudales otorgados en los últimos 5 meses del año (agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre), aplicando disminuciones importantes en porcentajes de más de 15%. En análisis de lo anterior observado, se evidencia un cambio en las tendencias climáticas en cuanto a precipitación dentro de la cuenca hidrológica a la que pertenece la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

Histórico de Caudales de Factibilidad			
Mes	**Caudal de Factibilidad (Antes del 1997)**	**Caudal de Factibilidad (R-186-2007)**	**Δ (%) Comparativo de Caudales**
	m^3/s	**m^3/s**	**%**
enero	14,80	14,80	0,00
febrero	10,20	10,20	0,00
marzo	6,90	6,90	0,00
abril	6,00	6,00	0,00
mayo	8,40	8,40	0,00
junio	13,20	13,20	0,00
julio	17,80	17,80	0,00
agosto	20,30	20,00	-1,48
septiembre	20,60	20,00	-2,91
octubre	22,50	20,00	-11,11
noviembre	24,00	20,00	-16,67
diciembre	21,80	20,00	-8,26

Tabla 9. Tabla comparativa de caudales de factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024 con datos de la Dirección de Aguas del MINAE.

En la tabla anterior, para la columna de factibilidad 2, la cual contiene el derecho de explotación hidroeléctrica vigente, se destacan los caudales promedios de enero a junio con un valor de 9,92 m^3/s para época seca y para época lluviosa de julio a diciembre un caudal de 19,63 m^3/s; estos valores son los requeridos para el análisis de cambio climático.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de los caudales de factibilidad 1 (año 1997) y los caudales de factibilidad 2 (año 2007), gráficamente se aprecia la diferencia de caudales disponibles para aprovechamiento a partir del mes de agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre.

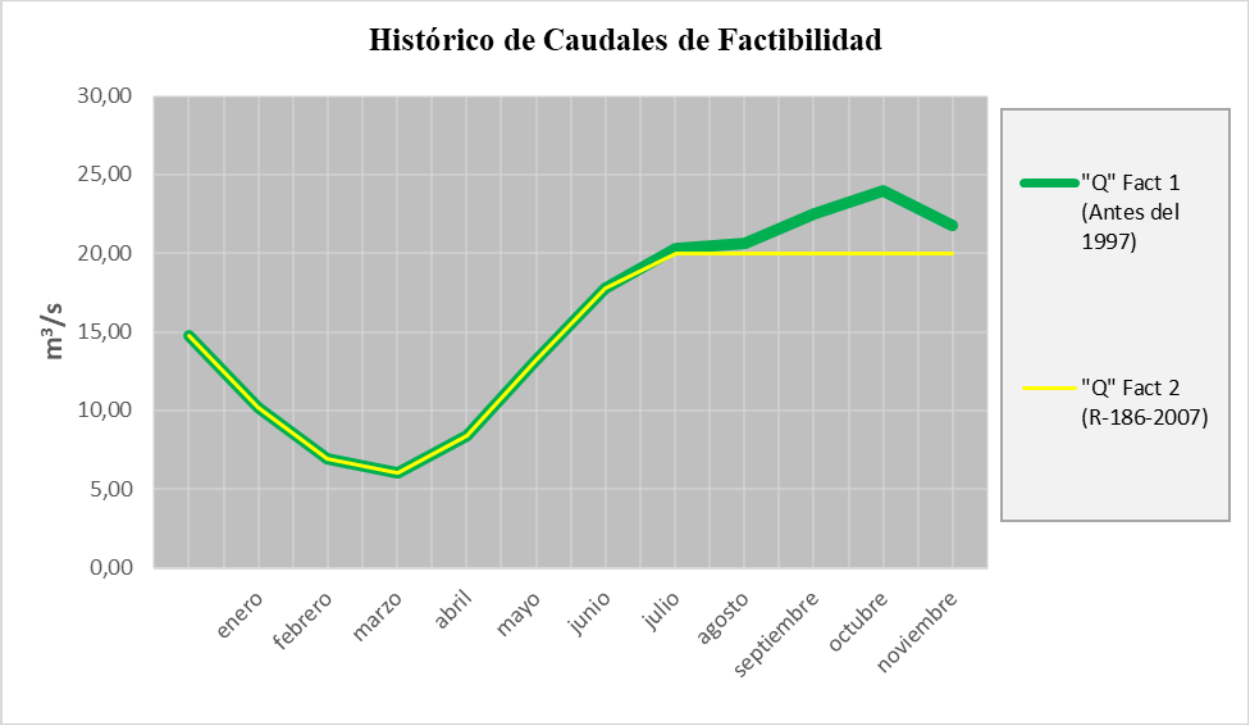


Gráfico 5. Comparativo de caudales de factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024 con datos de la Dirección de Aguas del MINAE.

4.1.3 Variables de Caudales de Generación

Estos valores se obtienen del monitoreo de los caudales del recurso hídrico que pasan por la turbina ubicada en casa de máquinas en la Central Hidroeléctrica, para poder hacer uso de estos datos, es necesario realizar un promedio por mes del periodo comprendido entre el año 2013 hasta el año 2023.

En la siguiente tabla se distinguen los meses de enero a junio (escala de color rojo) como los meses más secos y los meses de julio a diciembre (escala de color azul) como los meses más húmedos, los promedios mensuales se observan en las celdas color azul.

Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo (2013 - 2023)													
Año	**Enero**	**Febrero**	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Julio**	**Agosto**	**Septiembre**	**Octubre**	**Noviembre**	**Diciembre**	**Promedio Anual**
	m³/s	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**	**m³/s**
2013	8,19	4,48	6,96	3,71	6,51	12,42	14,33	15,77	14,31	16,81	15,21	10,74	10,79
2014	9,54	5,28	3,43	3,39	3,99	15,31	18,32	13,84	15,71	12,91	16,92	20,69	11,61
2015	11,39	16,65	6,81	3,88	5,28	15,62	19,42	15,50	14,22	15,08	16,07	13,53	12,79
2016	11,70	14,90	5,33	3,45	3,84	11,94	13,37	13,93	15,62	17,65	15,36	16,64	11,98
2017	13,32	5,73	4,20	4,06	11,54	12,95	16,08	19,04	16,97	17,87	17,71	15,89	12,95
2018	19,24	6,76	3,37	3,29	5,47	12,83	14,34	11,65	9,00	15,57	12,53	6,28	10,03
2019	3,19	2,70	3,01	2,30	5,45	8,18	10,87	11,29	13,45	14,02	12,13	17,94	8,71
2020	10,62	6,23	3,75	2,92	3,26	15,61	15,91	15,08	16,28	15,50	18,23	18,70	11,84
2021	10,16	7,65	0,01	8,39	10,59	13,11	15,97	18,29	15,54	18,50	17,06	15,45	12,56
2022	6,58	4,81	4,29	4,84	13,57	17,42	19,58	16,57	16,35	17,17	17,74	8,51	12,29
2023	6,35	4,42	3,19	2,50	2,33	5,90	11,01	14,31	11,81	17,20	14,98	11,01	8,75
Prom. Mes	*10,03*	*7,24*	*4,03*	*3,89*	*6,53*	*12,84*	*15,38*	*15,03*	*14,48*	*16,21*	*15,81*	*14,13*	*11,30*

Tabla 10. Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo (2013-2023). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de CONELÉCTRICAS R.L.

De la tabla anterior se calcula los valores promedio de caudal de los meses enero a junio con 7,43 m³/s y julio a diciembre con un valor de 15,17 m³/s; estos valores promedio de caudal son los que se necesitarán para realizar las comparaciones correspondientes.

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de los caudales destinados a generación hidroeléctrica los cuales se tabulan en la tabla anterior y el promedio de estos, así mismo en esta gráfica se sobrepone el comportamiento de los caudales de factibilidad, de esta manera se puede observar el comportamiento de manera gráfica de los caudales en estudio.

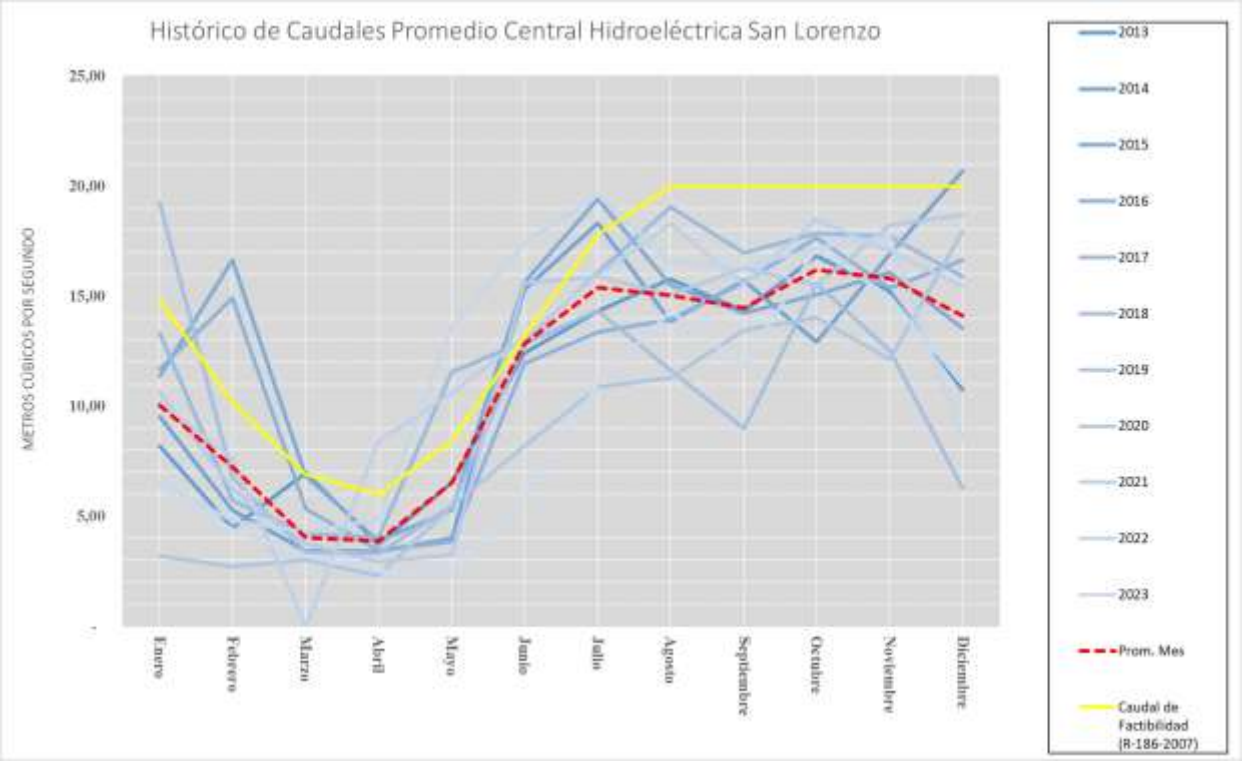


Gráfico 6. Comparativo de Caudales de Generación y Caudales de Factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de CONELÉCTRICAS R.L y la Dirección de Aguas del MINAE.

4.1.4 Variables de Proyecciones de Precipitación

La proyección de precipitación se obtiene a través de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), donde se aplican filtros para los escenarios SSP, el promedio modelos, el periodo de análisis, el periodo base y el periodo de proyección, con los cuales se obtendrán los valores proyectados para la precipitación.

Las siguientes dos figuras se obtienen del programa, la primera corresponde al periodo de época seca (enero a junio), donde el primer esquema muestra el comportamiento en mm/día del escenario base (1981-2010) y el segundo esquema muestra la proyección del comportamiento de la precipitación en % de desviación con respecto al periodo base. La segunda figura pertenece al

periodo de la época lluviosa (julio a diciembre), donde los esquemas en ella presentan la misma disposición de orden y contenido. Se analiza la información contenida en las imágenes tipo rastér donde se generan resultados para la época seca de 5 mm/día en el periodo base (1981-2010), mientras que en la proyección de un futuro próximo con un escenario SPP5-8.5 se obtiene un rango de desviación de -5% a -10%. Para la época lluviosa el programa arroja resultados de 15 mm/día y una desviación de 5% a 10%.

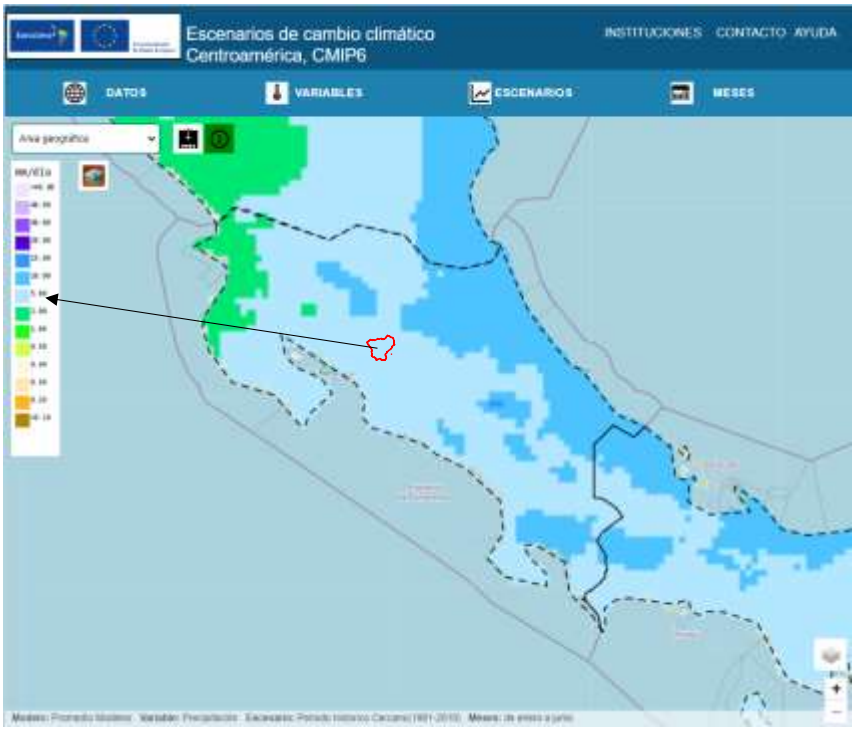
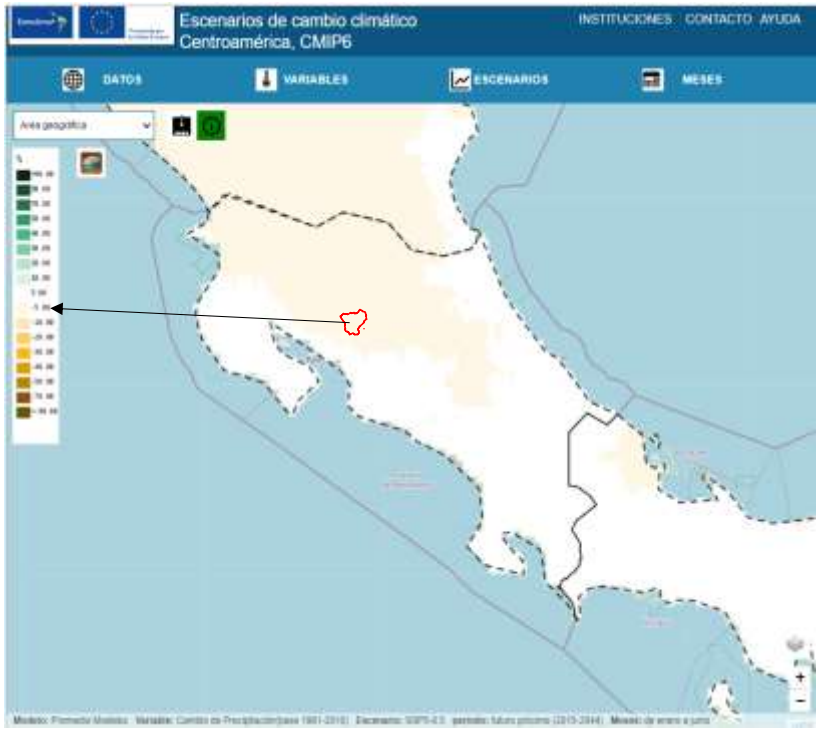
Mes	Escenario Base (1981-2010)
Enero - Junio	
Mes	Escenario Proyección Análogo 16 modelos (SSP5-8.5 - 2015-2044)
Enero - Junio	

Figura 12. Escenario base (1981-2010) y escenario de proyección (2015-2044) para época seca (enero-junio) del "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

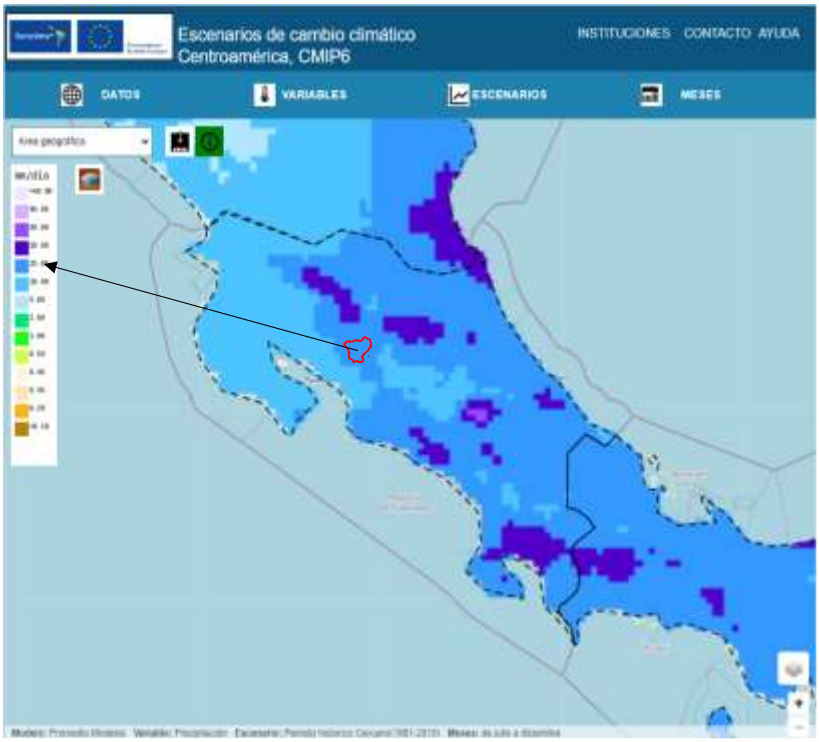
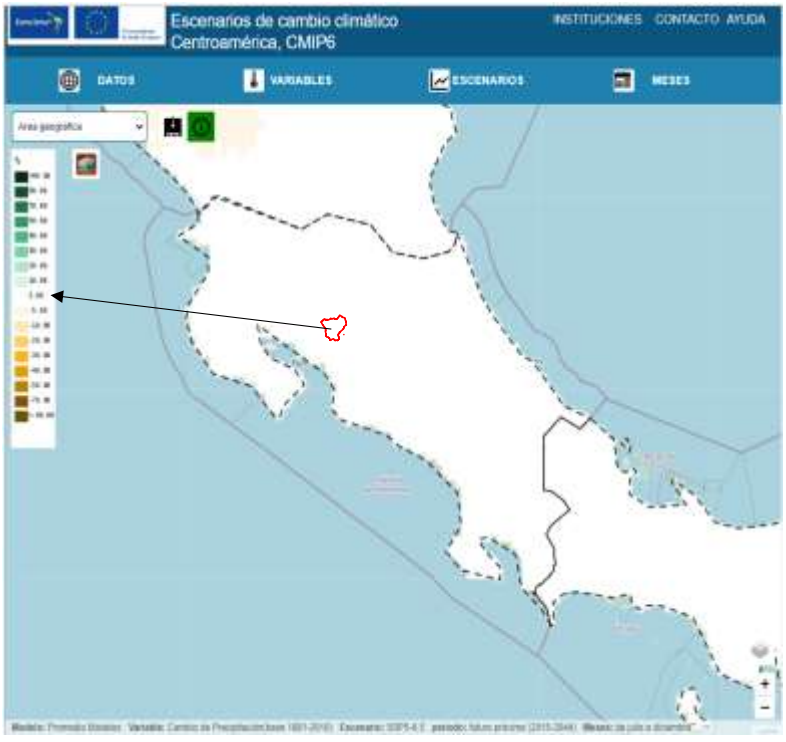
Mes	Escenario Base (1981-2010)
Julio - Diciembre	
Mes	Escenario Proyección Anólogo 16 modelos (SSP5-8.5 - 2015-2044)
Julio - Diciembre	

Figura 13. Escenario base (1981-2010) y escenario de proyección (2015-2044) para época lluviosa (julio-diciembre) del "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA). Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

En la siguiente tabla se obtienen los valores de precipitación para la época seca y época lluviosa. La columna 3 y 4 son valores de precipitación en mm/día y valores de predicción en % de desviación respecto al periodo base obtenidos de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), respectivamente. Estos mm/día se multiplican por la cantidad de días de la época (seca o lluviosa) de la columna 2, para obtener un valor acumulado de precipitación que se muestra en la columna 5, posteriormente para obtener el valor acumulado de precipitación proyectada se debe de multiplicar el valor de precipitación acumulada de la columna 5 por el % de desviación de la columna 4, obteniendo el resultado de predicción de precipitación en mm/semestre en la columna 7.

Es así que se obtienen valores para la precipitación en la época seca del escenario base de 905 mm/semestre y para proyección de 837,13 mm/semestre; mientras que para la época lluviosa se obtienen valores de precipitación en el escenario base de 2760 mm/semestre y para el futuro proyectado de 2967 mm/semestre.

Datos SSP5-8.5 (2015-2044)						
Mes	**Días del mes**	**Base (1981-2010)**	**Predicción (2015-2044)**	**Base (1981-2010)**	**Predicción (2015-2044)**	**Diferencia Base - Predicción**
		mm/día	**% comparativo**	**mm/semestre**	**mm/semestre**	**mm/semestre**
Enero-Junio	181	5,00	-7,5%	905,00	837,13	-67,88
Julio-Diciembre	184	15,00	7,5%	2760,00	2967,00	207,00
			mm/año	*3665,00*	*3804,13*	*139,13*

Tabla 11. Precipitación proyectada para el periodo 2013-2024 en la cuenca del Río San Lorenzo. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024, con datos de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA).

4.2 Análisis y Discusión de los Resultados para las Variables de Análisis

4.2.1 Comparación de Resultados

En la siguiente tabla se observan todas las variables de análisis, las mismas corresponden a caudal de factibilidad (1997-2007) en la columna 2, caudal de proyección (2015-2044) en la columna 5, el cual se obtiene con el Teorema de Proporcionalidad, donde el caudal de factibilidad (1980-2007) se multiplica por la precipitación del periodo base (1981-2010) del Visor y este resultado se divide entre la precipitación proyectada (2015-2044) del Visor (columna 2 multiplicada por la columna 3 y dividida entre la columna 4), obteniéndose así un valor de caudal proyectado para el periodo de 2015-2044 de 9,17 m³/s para la época seca y 21,11 m³/s para la época lluviosa, en la misma tabla se observa el valor de caudal de generación (2013-2023) en la columna 6.

$$\frac{Precipitación\ base\ (mm/semestre)}{Caudal\ de\ Factibilidad\ (m^3/s)} = \frac{Precipitación\ proyectada\ (mm/semestre)}{X}$$

Ecuación 7. Teorema de Proporcionalidad para Caudal Proyectado en el periodo 2015-2044. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024

Donde X es el caudal proyectado para generación hidroeléctrica en el futuro del periodo comprendido entre el año 2015 al año 2044.

En la columna 7, se comparan los caudales proyectados (2015-2044) para la época seca y la época lluviosa (obtenidos con la ecuación 1) contra los caudales de generación real (2013-2023), esta comparación determina una desviación positiva de los caudales proyectados de un 23,52% y un 39,11% con respecto a los caudales de generación reales en la actualidad.

No se incluye dentro de la comparación los caudales de factibilidad (2007-2027), debido a que estos por ser valores superiores a los caudales de generación, se entiende que no son valores reales que puedan ser comparados, porque se alejan de la realidad actual.

Comparación de Resultados de las Variables de Análisis						
Descripción de Variables / Época	Caudal de Factibilidad (m^3/s)	Precipitación base (mm/semestre)	Precipitación Proyectada Escenario SSP5-8.5 (mm/semestre)	Caudal Proyectado (m^3/s)	Caudal de Generación (m^3/s)	Desviación (%)
	2007-2027	1981-2010	2015-2044	2015-2044	2013-2023	2013-2023
Enero-Junio	9,92	905,00	837,13	9,17	7,43	23,52
Julio-Diciembre	19,63	2760,00	2967,00	21,11	15,17	39,11

Tabla 12. Comparación de Resultados de las Variables de Análisis. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

En la siguiente gráfica se observan una comparación del comportamiento de los caudales de generación, los caudales de proyección y los caudales de factibilidad, se evidencia el déficit de caudal de generación respecto a la proyección lograda mediante la ecuación 1 con valores de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA)

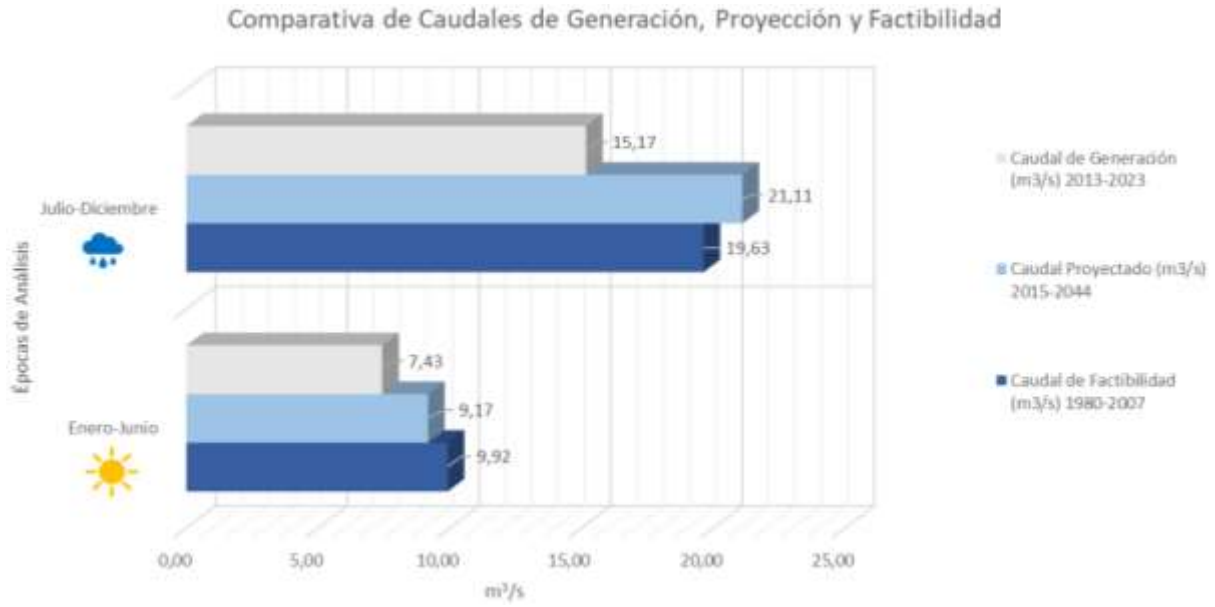


Gráfico 7. Comparativa de Caudales de Generación, Proyección y Factibilidad. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.

4.3 Aceptación o Rechazo de la Hipótesis

Los resultados anteriores demuestran que el Visor está por encima de la realidad, el visor no marca la tendencia a la baja como se observa en los caudales de generación monitoreados y observados en los últimos años por CONELÉCTRICAS R.L, se analiza que el Visor marca un cambio abrupto en sentido contrario a la tendencia actual (marca mayor disponibilidad de recurso hídrico), lo cual no responde a la realidad, dado que los caudales proyectados para un periodo 2015-2044 se comparan con caudales de generación reales del periodo 2013-2023, existen 8 años en común entre ambos escenarios que deberían arrojar resultados muy semejantes, sin embargo, las diferencias superan el 20% y en variables tan importantes como los son caudales para generación hidroeléctrica, una desviación en estas proporciones podría ocasionar pérdidas económicas en la producción de la central hidroeléctrica y afectación la facturación de energía eléctrica del usuario final .

Por esta razón se rechaza la hipótesis de que la herramienta “Visor de Escenarios de Cambio Climático” (EUROCLIMA) es una herramienta adecuada para proyectar, comprobar y evaluar el impacto del cambio climático en la cuenca hidrológica de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo.

Capítulo 5: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Limitaciones de la Investigación

En cuanto a la información disponible sobre metodologías para el desarrollo de la presente investigación, es escaza de encontrar, si bien es cierto el tema de cambio climático es un tema que está resonando mucho en la comunidad científica e ingenieril, no siempre se encuentran metodologías ya establecidas para confirmar un nexo de relación entre cambio climático como factor de riesgo y proyectos de generación hidroeléctrica, es así que la presente investigación, crea un método innovador de comprobación y analiza la existencia de riesgo de cambio climático en la cuenca hidroeléctrica del Río San Lorenzo.

Otra limitante encontrada en el proceso de investigación es que su fondo respecta mucho a como predecir el clima futuro, si bien es cierto la información que complementa los resultados de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) contiene proyecciones del clima a 50, 100 y 200 años, basadas en periodos base reales, lo cierto es que la realidad puede ser otra, por lo que la investigación va a estar prevista de incertidumbres.

Para finalizar este apartado de limitaciones, se encontró que la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), no permite delimitar un área de estudio, por lo que corresponde realizar un cálculo manual de la ubicación de la cuenca que permita analizar los datos en el programa, esto limita la obtención de resultados con un alto grado de exactitud.

5.2. Conclusiones

Como parte del análisis final de lo aprendido y valorado del presente trabajo de investigación, se mencionan las siguientes conclusiones:

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se analiza el Estudio Hidrológico de la cuenca del Río San Lorenzo elaborado por el Ing. Sergio Rojas Araya de Edificadora Beta, propiedad intelectual de CONELÉCTRICAS R.L en el que se muestran las características climáticas y morfológicas de la cuenca en estudio, en conclusión se determina que la variable de precipitación es de 4100 mm lo que clasifica a la cuenca como región lluviosa por encontrase entre 2000-4000 mm tlla, el índice de factor de forma es de K= 1.327, lo que explica una forma alargada para la cuenca, la pendiente media de la cuenca es de P= 40% lo que muestra una buena escorrentía, el 50% de la superficie de la cuenca se encuentra en una elevación de 880 msnm según la curva hipsométrica y la densidad de drenaje de la cuenca es de Dd= 0.76 lo que indica que los suelos son de cobertura vegetal densa, duros, poco erosionables y muy permeables, es decir gran capacidad de infiltración de los suelos; es así que conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca es una de las principales importancias en este proyecto de investigación.

La Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), pone a disposición para consulta pública las Concesiones de Aprovechamiento de Agua para cuerpos de agua de dominio público y privado, es así que se obtienen los datos de caudales de factibilidad otorgados para explotación del recurso hídrico en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo los cuales son de 9,92 m^3/s en promedio durante la época seca y de 19,63 m^3/s en promedio durante la época lluviosa, estos caudales son analizados contra el control de caudales de generación los mismos son de 7,43 m^3/s en promedio en verano y 15,17 m^3/s en promedio en invierno, observándose así una diferencia de hasta el 25% de menor caudal disponible para generación según el control mensual de caudales

de generación que realiza la empresa CONELÉCTRICAS R.L, donde se tabulan los comportamiento del caudal turbinado y se analiza la existencia de tendencias a la baja de la disponibilidad del recurso hídrico existente en la cuenca en estudio durante los últimos años, este registro ha sido de mucha utilidad para la presente investigación como patrón real de comparación.

Se generan escenarios de proyección de precipitaciones para la cuenca hidrológica del Río San Lorenzo desarrollados por la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA), el mismo es un programa amigable e intuitivo de utilizar, aporta una simbología que explica los valores en mm/día de la precipitación para los escenarios base y un % de desviación para los escenarios proyectados, esta información permite trasladar la precipitación en términos de caudal para ser comparados y analizados con otros tipos de caudal, es así que se obtiene un caudal de 9,17 m^3/s para la época seca y 21,11 m^3/s para la época lluviosa, estos valores de caudal proyectado están por encima de los caudales de generación los cuales son reflejo de la realidad en el presente.

La metodología empleada mostró valores de comparación entre caudales proyectados y caudales de generación reales que permitieran determinar la existencia de similitudes entre dichos caudales para el periodo del año 2013 al año 2023, pero por el contrario, se encontraron diferencias de un 23.52% para época seca y de un 39,11% para época lluviosa, con respecto a la realidad actual, lo que lleva a concluir que en términos de caudal, ese porcentaje de desviación es significativamente elevado, lo que podría significar pérdidas económicas semestrales de ₡335 999 301,35 para la época seca y ₡317 258 334,97 para la época lluviosa.

Al término de este trabajo de investigación, en análisis de estas conclusiones, no se recomienda el uso de la herramienta como insumo para generar proyecciones de caudal en el tiempo futuro.

En análisis de los caudales de factibilidad otorgados y los caudales de generación reales, se establece un cambio en la disponibilidad de recurso hídrico disponible para generación de energía hidroeléctrica, por lo que se puede afirmar que existe un efecto de cambio climático, la metodología empleada en este proyecto de investigación para su comprobación permite encender una alerta para tomar medidas de planificación, tanto a nivel presupuestario, productivo y en la operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo a fin de adaptar y mitigar los efectos adversos del cambio climático.

5.3 Recomendaciones

Considerando la importancia que tiene esta investigación y en función de los resultados obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda a la empresa CONELÉCTRICAS R.L considerar la instalación de una red de estaciones meteorológicas propias enfocadas en el monitoreo del comportamiento climático de la precipitación en la cuenca del Río San Lorenzo, a fin de obtener datos en tiempo real que permitan generar una alerta temprana en las variaciones del flujo del caudal, de la misma forma se obtendrá información histórica que sirva de insumo para elaborar un estudio hidrológico que evalúe y dimensione el cambio climático presente en la zona y que impactará de forma directa los caudales de generación futuros.

Se recomienda el trámite de actualización de la Concesión de Aprovechamiento de Aguas ante la Dirección de Aguas del MINAE, a fin de establecer nuevos caudales de explotación, más ajustados a la realidad climática de la cuenca. Así mismo se recomienda la aplicación de estudios hidrológicos de cambio climático podría establecerse a través del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) como un requisito obligatorio para visado de planos para proyectos de

generación de energía hidroeléctrica, así también como requisito obligatorio en el trámite de solicitudes de Concesión de Aprovechamiento de Aguas ante la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), este estudio puede ayudar a los propietarios de proyectos de generación a visualizar un posible futuro en cuanto a cambio climático se refiere y así determinar si un proyecto de este tipo será o no rentable en el futuro (producción, operación y mantenimiento que se deba aplicar para recuperar la inversión).

Se recomienda a la empresa CONELÉCTRICAS R.L generar una matriz de riesgos, donde se definan los principales peligros que podría ocasionar el cambio climático, a fin de aplicar planes de acción que permitan la adaptación y mitigación de estos, también se recomienda realizar campañas de racionamiento eléctrico en horas pico, con la finalidad de asegurar el abastecimiento eléctrico continuo en el tiempo para los abonados de la zona, de esta manera asegurar el suministro de caudales para la generación.

Se recomienda a los encargados de la herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) la posibilidad de incluir información propia del usuario como la inserción de la cuenca hidrológica, marcar puntos de aforo, entre otros, esto permitirá un manejo más amigable y exacto de las proyecciones sustraídas del programa.

La herramienta "Visor de Escenarios de Cambio Climático" (EUROCLIMA) demostró ser una herramienta útil para este tipo de estudios hidrológicos, por lo que realizar un ajuste a los escenarios base más similares a la realidad que existió en el pasado, permitirá generar escenarios de proyección SSP con datos más reales.

Capítulo 6: Propuesta de Investigación

En Costa Rica concibe la descarbonización y la resiliencia como medios para transformar su modelo de desarrollo y alcanzar un futuro más justo y próspero en materia de cambio climático. Las políticas que está desarrollando el país en materia de cambio climático no profundizan directamente en la evaluación de la potencial afectación a la falta de recurso hídrico para generación de energía hidroeléctrica. Para cumplir este objetivo, el país lleva años fortaleciendo sus capacidades de planificación en la acción climática.

El impacto del cambio climático ha venido siendo de especial interés en los últimos años, dado que cada vez son más las repercusiones negativas que trae consigo los eventos y fenómenos de la naturaleza en cualquier época del año, dado la baja capacidad de reacción que tiene el país ante eventos crónicos que no satisfacen la seguridad social que se requiere.

Es así que se propone como continuación al presente trabajo de investigación la creación de una matriz de clasificación de riesgos en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo que permita definir las acciones a realizar en materia de adaptación y mitigación, las cuales deben ser capaces de analizar el nivel de riesgo (muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo); la clasificación final obtenida en esta matriz genera diferentes respuestas para proyectos de tipo riesgoso, vulnerable o bien viable. Desarrollar una herramienta que sirva como base para analizar los efectos del cambio climático y aprender las necesidades de adaptación a los patrones futuros del clima, ayudará a adaptar las metodologías de aprovechamiento del recurso hídrico disponible y planificar labores de mantenimiento preventivo en centrales de generación hidroeléctrica.

Referencias

Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio para Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. (21 de febrero de 2024). Proyecto Generación de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución para Centroamérica. Taller Nacional de Usuarias/os del visor de Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica. Costa Rica.

Alvarado, L. F. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

Banco Interamericano de Integración Económica. (s.f). *El acompañamiento histórico del BCIE a Costa Rica busca que la totalidad de su energía eléctrica provenga de fuentes renovables.*

Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua. (2021). *Boletín AGUA/2021*

Consorcio Nacional de Empresas de Electrificación de Costa Rica R.L. (2024). *Caudales de Generación Promedio de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo (2013 - 2023)*

Contraloría General de la República (2017). Informe de opiniones y sugestiones *"Presión sobre la hacienda pública en un contexto de variabilidad y cambio climático: desafíos para mejorar las condiciones presentes y reducir los impactos futuros"* San José: CGR DFOE-AE-OS-00001-2017

Cruz, N. (2011). *Cambio climático y sus repercusiones en el diseño y vida útil de las infraestructuras civiles*. Éxito Empresarial, V. 153, 2011.

Global Gateway, la Unión Europea y las regiones de América Latina y el Caribe (ALC). (s.f.). *Guía de buen uso del Visor de escenarios de cambio climático de Centroamérica.*

González, S. (2021). *El Antropoceno y el espacio común, palancas para enfrentar el cambio climático*. Territorios, (44), 15-32. https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.8630

Hernández, R. Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Editorial McGraw-Hill.

Instituto Costarricense de Electricidad. (2023). *Plan de Expansión de la Generación 2022-2040.*

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*

Hidalgo, D. (2024, 8 de julio). *Comunicación personal.*

Holdridge, L. (1978). *Ecología basada en las zonas de vida*. Editorial IICA.

Lieberman, B. Gordon, E. (2021). *El cambio climático en la historia de la humanidad, desde la prehistoria hasta el presente*. Editorial Almuzara.

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). *Manual Técnico del Departamento de Aguas*. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 20 de mayo del 2004.

Ministerio de Ambiente y Energía. (2007). *Concesión de Aprovechamiento de Aguas N°. R-0186-2007-AGUAS-MINAE.*

Ministerio de Ambiente y Energía. (2020). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-20260.*

Ministerio de Ambiente y Energía. (2017). *Política Nacional de Adaptacion al Cambio Climatico de Costa Rica 2018-2030*.

Murillo, Á. Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). (2023). CNE emite alerta amarilla por faltante de lluvias mayor al previsto.

https://semanariouniversidad.com/pais/cne-emite-alerta-amarilla-por-faltante-de-lluvias-mayor-al-previsto/

ONU. (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Naciones Unidas. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf

Pomareda, F. Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). (2023). Un 66% de los sistemas del AyA presentarán déficit hídrico en la estación seca por fenómeno de El Niño. https://semanariouniversidad.com/pais/un-66-de-los-sistemas-del-aya-presentaran-deficit-hidrico-en-la-estacion-seca-por-fenomeno-de-el-nino/

Pomareda, F. Seminario Universidad de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). (2024). ICE anuncia racionamientos de electricidad por descenso crítico en caudales de hidroeléctricas e incumplimiento de plantas térmicas alquiladas. https://semanariouniversidad.com/pais/ice-anuncia-racionamientos-de-electricidad-por-descenso-critico-en-caudales-de-hidroelectricas-e-incumplimiento-de-plantas-termicas-alquiladas/

Rojas, S. *Estudio Hidrológico de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo*. Edificadora Beta.

Villón, M. (2002). *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Apéndices



Figura 14. Vista Aérea de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L.



Figura 15. Toma Presa de la Central Hidroeléctrica San Lorenzo. Fuente: CONELÉCTRICAS R.L.



Figura 16. Planificación nacional del cambio climático. Fuente: Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030 (PNACC).

Leyes nacionales			
Ley Orgánica del Ambiente, nº 7554	Artículo 26, inciso b). La autoridad competente *"Velará por el control, la prevención y la difusión de los factores físicos, químicos, biológicos y sociales..."* Artículo 28. *Políticas del ordenamiento territorial.* *Es función del Estado, las municipalidades y los demás entes públicos, definir y ejecutar políticas nacionales de ordenamiento territorial, tendientes a regular y promover los asentamientos humanos y las actividades económicas y sociales de la población, así como el desarrollo físico-espacial, con el fin de lograr la armonía entre el mayor bienestar de la población, el aprovechamiento de los recursos naturales y la conservación del ambiente.* Artículo 102.- *Contralor del Ambiente.* *Se crea el cargo de Contralor del Ambiente, adscrito al despacho del ministro del Ambiente y Energía, quien lo nombrará. Su tarea será vigilar la aplicación correcta de los objetivos de esta ley y de las que, por su naturaleza, le correspondan.* *Estará obligado a denunciar cualquier violación de esta ley y las conexas, ante la Procuraduría Ambiental y de la Zona Marítimo Terrestre, así como ante el Ministerio Público.*	Mandato legal	Establece una función, de cumplimiento obligatorio para las entidades públicas sectoriales y territoriales. en la elaboración y ejecución de políticas de ordenamiento territorial. Establece el desarrollo-físico espacial y la armonía entre el bienestar de la población, el aprovechamiento de los recursos y la conservación de la biodiversidad. Habilita a las entidades públicas y las municipalidades para integrar la adaptación al cambio climático en las políticas y acciones de planificación del territorio. Habilita procesos de control del cumplimiento de la normativa ambiental, que incluiría la política de adaptación.
Ley Nacional de Emergencias y	*Su objeto es reducir las causas de*	Mandato	Establece un mandato de reducción de las

Norma	Sección	Tipo de contribución	Contribución
Prevención del Riesgo, nº 8488	*pérdidas de vida y las consecuencias sociales, económicas y ambientales, inducidas por los factores de riesgo de origen natural y antrópico.* *Artículo 5. Toda política de desarrollo del país debe incorporar tanto los elementos necesarios para un diagnóstico adecuado del riesgo y de la susceptibilidad al impacto de los desastres, así como los ejes de gestión que permitan su control.* *Artículo 14. Competencias ordinarias de prevención de la Comisión: …c) Dictar resoluciones vinculantes sobre situaciones de riesgo, desastre y peligro inminente, basadas en criterios técnicos y científicos, tendientes a orientar las acciones de regulación y control para su eficaz prevención y manejo, que regulen o dispongan su efectivo cumplimiento por parte de las instituciones del Estado, el sector privado y la población en general.* *Artículo 25. Es responsabilidad del Estado costarricense prevenir los desastres; por ello, todas las instituciones estarán obligadas a considerar en sus programas los conceptos de riesgo y desastre e incluir las medidas de gestión ordinaria que les sean propias y oportunas para evitar su manifestación, promoviendo una cultura que tienda a reducirlos.*	legal	causas del riesgo, aplicable al riesgo climático. Establece la obligación de integrar en las políticas de desarrollo nacional soluciones específicas de gestión del riesgo. Habilita a las entidades públicas a planificar y presupuestar acciones de adaptación al riesgo climático en sus propios procesos de planificación. Habilita la integración de resoluciones vinculantes en materia de adaptación, a partir de una articulación entre sistemas.
Ley General de la Administración Pública, nº 6227, del 2 de mayo de 1978	Artículo 4. *"La actividad de los entes públicos deberá estar sujeta en su conjunto a los principios fundamentales del servicio público, para asegurar su continuidad, su eficiencia, su adaptación a todo cambio en el régimen legal o en la necesidad social que satisfacen y la igualdad en el trato de los destinatarios, usuarios o beneficiarios".*	Mandato legal	Obliga a las entidades públicas a asegurar la continuidad y otros aspectos de la adaptación a cambios en el contexto del servicio que brindan. Establece un mandato sectorial de adaptación.
Código Municipal	Artículo 4.- *La municipalidad posee la autonomía política, administrativa y financiera que le confiere la Constitución Política.* Artículo 10.- *Las municipalidades podrán integrarse en federaciones y confederaciones; sus relaciones se*	Mandato legal	Establece la autonomía territorial y la iniciativa de planificación y presupuestaria. Habilita la conformación de espacios de gestión territorial que superan lo administrativo.

Norma	Sección	Tipo de contribución	Contribución
	establecerán en los estatutos que aprueben las partes, los cuales regularán los mecanismos de organización, administración y funcionamiento de estas entidades, así como las cuotas que deberán ser aportadas. Para tal efecto, deberán publicar en La Gaceta un extracto de los términos del convenio y el nombramiento de los representantes.		
Ley de Planificación Urbana, nº 4240	Artículo 15.- Conforme al precepto del artículo 169 de la Constitución Política, reconózcase la competencia y autoridad de los gobiernos municipales para planificar y controlar el desarrollo urbano, dentro de los límites de su territorio jurisdiccional.	Mandato legal	Establece una escala de planificación autónoma, que debe integrar la política de adaptación. Los municipios deben planificar y presupuestar, porque está en su propio mandato.
Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos, nº 7779	Esta ley tiene como fin fundamental proteger, conservar y mejorar los suelos en una gestión sostenible e integrada con los demás recursos naturales, mediante el fomento y la planificación ambiental adecuada	Mandato legal	Promueve prácticas productivas de conservación de suelos y el agua en tierras de uso agrícola, que contribuyan a la resiliencia del sector agropecuario reduciendo la vulnerabilidad de pequeños productores ante los efectos adversos del cambio climático.
Ley de desarrollo, promoción y fomento de la actividad agropecuaria orgánica, nº 8591	Esta ley busca el desarrollo, promoción y fomento de la actividad agropecuaria orgánica. Tiene por objeto facilitar los instrumentos necesarios para el desarrollo, la administración y el control de la actividad agropecuaria orgánica, conocida también como agricultura ecológica o biológica, con el propósito de lograr un efectivo beneficio para la salud humana, animal y vegetal, y como complemento de las políticas públicas referidas al uso del suelo, el recurso hídrico y la biodiversidad.	Mandato legal	Promoción de la agricultura sostenible implica un uso más eficiente del agua y reducciones en el uso de insumos y pesticidas. La promoción de la agricultura orgánica contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y la vulnerabilidad de pequeños productores agropecuarios ante los efectos adversos del cambio climático.
	Otros instrumentos		
Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018 "Alberto Cañas Escalante"	Incluye consideraciones de mitigación y adaptación al cambio climático dentro de la gestión ambiental, tales como el ordenamiento territorial, el uso de energías limpias para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y el fortalecimiento de la cultura y la educación ambientales. Cuenta con un apartado específico de "Gestión del riesgo y adaptación al cambio climático", en el que tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad y aumentar la	Mandato estratégico	Establece mecanismos de gestión aplicables a la adaptación. Define una prioridad nacional que debe ser observada por las entidades que planifican la inversión pública.

Norma	Sección	Tipo de contribución	Contribución
	resiliencia.		
Estrategia Nacional de Cambio Climático (decreto)	*Reducir los impactos sociales, ambientales y económicos del cambio climático y tomar ventaja de las oportunidades (...) por medio de iniciativas de mitigación y acciones de adaptación para que Costa Rica mejore la calidad de vida de sus habitantes y de sus ecosistemas.* Reducir la vulnerabilidad de los sectores socioproductivo, con el fin de disminuir los impactos negativos de la amenaza climática y aprovechar las ventanas de oportunidad que se deriven.	Mandato estratégico	Establece una base general de política.
Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030	Lineamiento 13. *Presupuesto para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático.* Lineamiento 16. *Protección de la inversión en infraestructura.*	Mandato estratégico	Establece objetivos y mecanismos comunes.
Política Nacional del Mar Costa Rica 2013-2028	*El Estado costarricense gestiona de manera integral, sostenible, equitativa y participativa, los espacios marinos y costeros, sus bienes y servicios, con los recursos económicos y humanos necesarios, para el bienestar de sus ecosistemas y de sus habitantes.*	Mandato estratégico	
Política Nacional de Salud (2015)	Define los ejes ordenadores y los lineamientos estratégicos en materia de salud pública. En el ámbito V, la Política aborda la "Gestión integral del riesgo y adaptación al cambio climático" y plantea algunas estrategias en esta materia para su área de competencia y para todo el país. Además, las autoridades de salud han venido desarrollando algunos instrumentos para la prevención de las enfermedades que se verán exacerbadas por los efectos del cambio climático. Entre ellos destacan los siguientes: Ley 8839, Gestión de Residuos Decreto 36551, Reglamento para contaminantes atmosféricos provenientes de calderas y hornos Decreto 30221, Reglamento de emisión de contaminantes atmosféricos Decreto 32327 Reglamento de la	Mandato estratégico	Establece un ámbito específico de acción en materia de adaptación al cambio climático.

Tabla 13. Leyes nacionales. Fuente: Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030 (PNACC).

ENTREVISTA	
Nombre:	Donald Hidalgo Saborío
Edad:	50 años
Profesión:	Ingeniero Civil
Lugar de trabajo:	CONELECTRICAS R.L.
Puesto que ocupa:	Encargado de Descarbonización y Ambiente
Experiencia en el puesto:	26 años
Pregunta 1	Hablando especificamente de la cuenca del Río San Lorenzo, podría responder: ¿Cuál ha sido el comportamiento y la tendencia observada en los datos sobre los caudales destinados a generación hidroeléctrica en la Central Hidroeléctrica y desde hace cuánto tiempo se ha observado este comportamiento?
Bueno inicié trabajando en CH San Lorenzo como operador de planta y electricista y recuerdo que en los meses de setiembre, octubre y noviembre de 1998, las condiciones del tiempo eran muy diferentes, podríamos decir que se mantenía un "temporal" casi constante. Recuerdo que las unidades se trabajaban día y noche a plena potencia y que las parrillas de la toma las tenían que limpiar con el agua para arriba de la cintura; el agua era muy abundante. Pero en los últimos 10 años, eso ha cambiado significativamente, los veranos son más secos y prolongados; las creidas del río son muy intensas, pero no mantienen un flujo constante del agua. Hemos notado que la cuenca del río San Lorenzo, aporta crecidas muy repentinas y que también trae una cantidad significativa de sedimentos. El Jamaical también ha venido decreciendo su caudal, aunque sea la cuenca más larga.	
Pregunta 2	¿Existe alguna relación entre las tendencias de los caudales y los ingresos del negocio?
Claro, la disminución de los caudales golpea directamente los ingresos de la empresa y durante las llenas del río, como ahora son tan intensas, el arrastre de los sedimentos hace que el agua no sea "aprovechable", ya que debimos analizar que cantidad de sedimentos podíamos manejar en los embalses y los sedimentadores. Después de registrar las cocentraciones de los sedimentos por medio de los conos Imhoff durante muchas llenas, se logró determinar que debíamos de cerrar las compuertas cuando las crecidas venían muy cargadas de sedimentos; lo que se podría ver como una contradicción, ya que aunque hubiese mucha agua en una llena, con esas cantidades de sedimentos no se debía dejar entrar a los embalses. El proyecto de colocar sensores en la cuenca del San Lorenzo, con el fin de adelantarnos a las crecidas repentinas y así aprovechar el "agua límpia" antes de que llegue la llena y la "ensucie" y no sea aprovechable; pensando en una adaptación al cambio climático.	
Pregunta 3	¿Qué medidas se han estado ejecutando a través de CONELÉCTRICAS R.L para contrarrestar los efectos negativos del Cambio Climático que afectan la producción en la Central Hidroeléctrica San Lorenzo?
Las medidas de mitigación han sido de casi todos los años, desde el reforzamiento de los diques de la toma aguas abajo de la presa, como también los diques detrás de las casas de máquinas. El manejo de las aguas pluviales a lo largo de las fincas que bordean los canales y la infraestructura en general, han logrado contener los embates de las grandes concentraciones de lluvia en lapsos de tiempo muy cortos. En CHSL, después de su construcción se reservaron más de 90 hectareas para regeneración natural del bosque. También debemos mencionar que desde la construcción de la Central Hidroeléctrica Sigifredo Solís Solís, se visualizó la creación de un vivero forestal con el fin de repoblar las áreas que serían impactadas por los movimientos de tierras y así se creó Eco-Vivero El Gavilán; el cual posterior a la reforestación de las zonas cercanas en ambos proyectos, continuó con la donación de plántulas a escuelas, colegios, ASADAS, agrupaciones y personas físicas. Actualmente se tiene contabilizado más de 100.000 árboles donados desde su creación. Además, desde el año 2017 formamos parte de programa país de la Carbono Neutralidad y desde el 2022 somos una empresa Bandera Azul. Actualmente, están instalando estaciones meteorológicas en los límites de la cuenca con el fin de monitorear en tiempo real las precipitaciones y generar historial con indicadores propios de la cuenca. Con esta última acción, se busca gestionar un plan de adaptación y mitigación al cambio climático en donde el objetivo principal es poder ajustar las proyecciones anuales de generación de energía y así buscar un benefício para la empresa.	

Tabla 14. Entrevista aplicada al Encargado de Descarbonización y Ambiente de CONELÉCTRICAS R.L. Fuente: D. Hidalgo, comunicación personal, 16 de julio del 2024.

Venta en colones por m^3/s				
Periodo	**2020**	**2021**	**2022**	**Promedio**
1 semestre	₡ 203 304 729	₡ 170 097 008	₡ 203 765 828	₡ 192 389 188
2 semestre	₡ 52 765 940	₡ 48 817 291	₡ 58 812 888	₡ 53 465 373

Periodo	**Caudal Proyectado (m3/s)**	**Caudal de Generación (m3/s)**	**Diferencia (m3/s)**	**Venta**
	2015-2044	**2013-2023**		
Enero-junio	9,17	7,43	1,75	₡335 999 301,35
Julio-diciembre	21,11	15,17	5,93	₡317 258 334,97
Afectación por cambio climático				*₡653 257 636,32*

Tabla 15. Ventas en colones por m^3/s. Fuente: Danny Mora Solórzano y Suyen Westin Bonilla, 2024.