



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022**

Ing. Axel Estiven Avalos García

Asesorado por M.Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Guatemala, noviembre 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. AXEL ESTIVEN AVALOS GARCÍA

ASESORADO POR M. SC. ING. GAMALIEL GIOVANNI ZAMBRANO RUANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
DIRECTORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Alfredo Boj de León
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 7 de noviembre de 2022.



Ing. Axel Estiven Avalos García

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.739.2023



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022**, presentado por: **Ing. Axel Estiven Avalos García**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, noviembre de 2023

JFGR/gaoc



Guatemala, noviembre de 2023

LNG.EEP.OI.739.2023

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022”**

presentado por **Ing. Axel Estiven Avalos García** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022** del estudiante **Axel Estiven Avalos García** quien se identifica con número de carné **null** del programa de Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DEL INDE EN EL PERIODO DE 2007 A 2022"** del estudiante **Axel Estiven Avalos García** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné null.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Ing. Qco. Gamaliel Zambrano
Col. 686

Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida, sabiduría y la oportunidad de estudiar esta maestría.
Mi esposa	Por apoyarme incondicionalmente en todas las etapas de mis estudios.
Mis padres	Por haberme amado, apoyado, motivado e instruido con principios y valores que me han acompañado toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser la casa de estudios que me abrió sus puertas y me permitió lograr esta meta.

Mis amigos Por ser de gran ayuda y apoyo en el transcurso de la maestría.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Cambio climático	5
2.2. Gases de efecto invernadero	5
2.3. Indicadores meteorológicos	5
2.3.1. Temperatura global.....	6
2.3.2. Precipitación	6
2.4. Hidrología	7
2.4.1. Caudal de ríos.....	7
2.5. Hidroeléctricas	7
2.5.1. Tipos de hidroeléctricas	8
2.5.2. Embalses	8
2.5.3. Hidroeléctricas del INDE	9
2.6. Análisis de datos	14
2.6.1. Correlación	15

2.6.2.	Tendencia.....	16
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	17
3.1.	Diseño.....	17
3.2.	Enfoque.....	17
3.3.	Alcance	18
3.4.	Unidad de análisis	18
3.5.	Variables	18
3.6.	Fases del desarrollo de la investigación	20
3.6.1.	Fase 1. Revisión documental	20
3.6.2.	Fase 2. Recopilación y análisis de datos de temperatura global	20
3.6.3.	Fase 3. Recopilación y análisis de datos de precipitación pluvial local, caudal de ríos y niveles de embalses.....	20
3.6.4.	Fase 4. Recopilación y análisis de datos de generación hidroeléctrica	21
3.6.5.	Fase 5. Análisis del comportamiento de las variables.....	22
3.6.6.	Fase 6. Análisis de impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica.....	22
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	23
4.1.	Temperatura global	23
4.2.	Precipitación pluvial regional	24
4.3.	Nivel de embalses	28
4.4.	Caudales.....	30
4.5.	Generación eléctrica	32
4.6.	Correlación de datos	34

4.7.	Tendencia.....	35
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
5.1.	Temperatura global.....	39
5.2.	Precipitación pluvial regional	40
5.3.	Nivel de embalses	41
5.4.	Caudales	43
5.5.	Generación hidroeléctrica.....	44
5.6.	Tendencia.....	45
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	REFERENCIAS	51
	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Hidroeléctrica Chixoy	10
Figura 2.	Hidroeléctrica Aguacapa	10
Figura 3.	Hidroeléctrica Jurún Marinalá.....	11
Figura 4.	Hidroeléctrica Los Esclavos	11
Figura 5.	Hidroeléctrica Palín II	12
Figura 6.	Hidroeléctrica Santa María.....	12
Figura 7.	Hidroeléctrica El Porvenir.....	13
Figura 8.	Hidroeléctrica El Salto	13
Figura 9.	Hidroeléctrica Chichaic	14
Figura 10.	Comportamiento de variables para diferentes valores del coeficiente.....	16
Figura 11.	Gráfica del comportamiento de la temperatura global anual.....	23
Figura 12.	Gráfica del comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual.....	24
Figura 13.	Comportamiento de la precipitación pluvial promedio mensual por año.....	25
Figura 14.	Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada	25
Figura 15.	Comportamiento de la precipitación pluvial promedio mensual	26
Figura 16.	Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual Jurún Marinalá	26
Figura 17.	Comportamiento de la precipitación pluvial mensual Jurún Marinalá	27

Figura 18. Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual Los Esclavos	27
Figura 19. Comportamiento de la precipitación pluvial promedio Los Esclavos	28
Figura 20. Limnigrama del nivel del agua anual promedio del embalse Chixoy	28
Figura 21. Gráfica del comportamiento del nivel del agua del embalse Chixoy por año	29
Figura 22. Limnigrama del nivel del agua promedio del embalse Amatitlán	29
Figura 23. Gráfica del comportamiento del nivel del agua del embalse Amatitlán por año	30
Figura 24. Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Chixoy	31
Figura 25. Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Aguacapa	31
Figura 26. Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Jurún Marinalá.....	32
Figura 27. Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Los Esclavos.....	32
Figura 28. Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada central Chixoy.....	33
Figura 29. Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada la central Aguacapa	33
Figura 30. Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada Jurún Marinalá	34
Figura 31. Comportamiento de la generación hidroeléctrica central Los Esclavos.....	34

TABLAS

Tabla 1.	Cuadro de resumen de variables	19
Tabla 2.	Resultados del coeficiente de correlación de Pearson.....	35
Tabla 3.	Significancia de la tendencia en la serie temporal de temperatura promedio anual	35
Tabla 4.	Significancia de la tendencia en las series temporales de precipitación pluvial.....	36
Tabla 5.	Significancia de la tendencia en las series temporales de nivel de embalse	36
Tabla 6.	Significancia de la tendencia en las series temporales de caudales de ríos.....	37
Tabla 7.	Significancia de la tendencia series temporales de generación hidroeléctrica	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
GW	Gigavatio
M³/s	Metros cúbicos por segundo
mm	Milímetros de lluvia
MW	Megavatio
msnm	Metros sobre el nivel del mar
W	Vatio

GLOSARIO

AGU-H	Nemotécnico para identificar a la central hidroeléctrica Aguacapa.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista
Caudal	Cantidad de agua que fluye por un río o cause por unidad de tiempo. La unidad de medida en el Sistema Internacional es metros cúbicos por segundo (m^3/s).
CHX-H	Nemotécnico para identificar a la central hidroeléctrica Chixoy.
Embalse	Depósito natural o artificial para acumular agua, que luego se transporta hasta una central hidroeléctrica para producir energía.
GISS	Instituto de Estudios del Espacio Goddard.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación de Guatemala.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.
JUR-H	Nemotécnico para identificar a la central hidroeléctrica Jurún Marinalá.

LES-H	Nemotécnico para identificar a la central hidroeléctrica Los Esclavos.
Matriz energética	Conjunto de fuentes de energía renovable y no renovable que participan en la generación eléctrica de Guatemala y que conforman el Sistema Eléctrico Nacional.
MEM	Ministerio de Energía y Minas de Guatemala
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América.
Potencia	Proporción de corriente eléctrica que se transfiere en un circuito eléctrico por unidad de tiempo. Es la cantidad de energía que genera o disipa un elemento durante un período de tiempo. La unidad de medida en el Sistema Internacional es vatio (W).

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE en el periodo de 2007 a 2022. Se obtuvieron datos históricos de la NASA, el INSIVUMEH y el AMM para identificar y evaluar las variaciones que han ocurrido en la temperatura global, precipitación pluvial regional, nivel de embalses, caudal de ríos y generación hidroeléctrica en las 4 hidroeléctricas con mayor capacidad instalada del INDE (Chixoy, Aguacapa, Jurún Marinalá y Los Esclavos), graficando el comportamiento y analizando la tendencia que ha tenido cada variable a través del tiempo.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre las diferentes variables climáticas, hidrológicas y de generación eléctrica obtenidas para relacionarlas. La temperatura global y la precipitación pluvial tienen una relación inversamente proporcional débil, con un coeficiente promedio de -0.28 . La precipitación pluvial regional y los caudales de ríos, así como la relación entre los caudales y la generación eléctrica presentaron una relación de proporcionalidad fuerte, con un coeficiente de 0.76 y 0.78 respectivamente.

Se determinó que el aumento de la temperatura global incide en los patrones climáticos globales y por ende en la precipitación pluvial de las diferentes regiones de Guatemala. Estas variaciones climáticas disminuyen la cantidad del recurso hídrico disponible en las cuencas del país y limitan la capacidad de generación de las hidroeléctricas que forman parte del Sistema Eléctrico Nacional.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El 2019 fue el segundo año más caluroso de todos los tiempos y marcó el final de la década más calurosa registrada. Los niveles de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera aumentaron hasta niveles récord. El cambio climático ha afectado a todos los países y ha alterado las economías y transformado distintos estilos de vida. Los sistemas meteorológicos han cambiado, los niveles del mar han incrementado y los fenómenos meteorológicos han sido cada vez más extremos (Naciones Unidas, s.f.).

Contexto general

La energía hidroeléctrica es una fuente muy importante de energía para la región Centroamericana, representando aproximadamente 50 % de la generación eléctrica y con importantes inversiones previstas para los próximos 10 años. Dado que los estudios sobre cambio climático han proyectado cambios en los patrones de precipitación, temperatura, y disponibilidad de agua en la región que podrían impactar al sector, es importante conocer la relación que existe entre dichos acontecimientos y la generación hidroeléctrica cuyo principal insumo de producción es el agua pluvial (Grünwaldt, 2016).

Descripción del problema

Según información pública emitida por el Ministerio de Energía y Minas, para abril de 2023 las centrales hidroeléctricas de Guatemala contaron con una capacidad instalada total de 1,341.33 MW, lo cual representa un 37 % de la matriz energética del país. Siendo la tecnología de generación con más participación en

el país, es de vital importancia determinar la magnitud del riesgo que el cambio climático representa para la estabilidad del sistema eléctrico nacional, ya que una merma parcial o total de generación en este sector podría significar un desabastecimiento de energía para el sistema eléctrico, aunado a un aumento general en el precio de la energía, lo cual frenaría el crecimiento económico y el desarrollo social del país (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

Formulación del problema

A continuación, se detalla la pregunta central cuya respuesta ayudará a cumplir el objetivo general de la presente investigación, así como las preguntas auxiliares que ayudarán a contestar la pregunta central.

Pregunta central

¿Cuál es el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE?

Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué variaciones climáticas globales han ocurrido en el periodo de 2007 a 2022?
- ¿Qué variaciones han ocurrido en los niveles de lluvia, caudales de ríos y niveles de embalses de las cuencas correspondientes a las hidroeléctricas del INDE en el periodo de 2007 a 2022?

- ¿Qué variaciones de generación eléctrica han ocurrido en las hidroeléctricas del INDE en el periodo de 2007 a 2022?
- ¿Cómo se relacionan las variaciones climáticas globales y regionales con la generación hidroeléctrica del INDE?

Delimitación del problema

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación que se estudió:

Delimitación Contextual

El estudio de impacto del cambio climático se contextualizó en el ámbito de generación hidroeléctrica en Guatemala dado que no se había realizado un estudio que determinará la magnitud de dicho fenómeno en la estabilidad del sistema energético del país. Para dicho análisis se utilizaron datos meteorológicos como: temperatura global, precipitación pluvial, caudales de ríos, niveles de embalses, así como datos de generación eléctrica.

Se delimitó el estudio a las 4 hidroeléctricas del INDE con mayor potencia únicamente, ya que estas 4 centrales representan más del 90 % de la capacidad del INDE y esta institución, a la vez, es la empresa de generación con más capacidad instalada y es representativa de todo el sector hidroeléctrico del país.

Delimitación geográfica

Para el estudio se utilizaron datos de temperatura global. Sin embargo, estos se relacionaron con datos meteorológicos, hídricos y de generación eléctrica de

las hidroeléctricas del INDE y sus respectivas cuencas por lo que la delimitación geográfica es Guatemala.

Delimitación Histórica

La delimitación histórica del estudio fue de enero de 2007 a diciembre de 2022. Se escogió analizar este rango de tiempo dado que el cambio climático global ha tenido las mayores consecuencias en la última década transcurrida por lo que se buscó comparar los datos desde los inicios del fenómeno hasta el presente para obtener tendencias.

OBJETIVOS

General

Analizar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE en el periodo de 2007 a 2022.

Específicos

1. Evaluar las variaciones climáticas globales que han ocurrido.
2. Identificar las variaciones pluviales, de caudales de ríos y niveles de embalses que han ocurrido en las cuencas correspondientes a las hidroeléctricas del INDE.
3. Determinar las variaciones de generación hidroeléctrica que han ocurrido.
4. Relacionar las variables climáticas y de generación hidroeléctrica.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El diseño que se adoptó es no experimental, pues en el análisis de impacto de cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE que se realizó, no se manipularon variables sino se observó el comportamiento de fenómenos naturales y de generación a lo largo del tiempo. Es por esto por lo que la investigación también es de tipo longitudinal o diacrónica, ya que se midieron muestras de la misma población en un periodo largo de tiempo para analizar el comportamiento de los datos y obtener tendencias. Las variables que se analizaron son temperatura global, precipitación, caudal de ríos, nivel de embalses y generación hidroeléctrica. Las variaciones climáticas son las variables independientes y la generación hidroeléctrica es la variable dependiente.

Fases del desarrollo de la investigación:

- Fase 1. Revisión documental: en esta fase se realizó la búsqueda, revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática tratada, como tesis, trabajos de graduación, artículos científicos, libros y páginas web para la elaboración de los antecedentes y el marco teórico de la investigación.
- Fase 2. Recopilación y análisis de datos de temperatura global: en esta fase se recopilaron los datos históricos de temperatura global en el periodo de 2007 a 2022. Se tabularon los datos originales, se hicieron cálculos de promedio y se elaboraron gráficas del comportamiento de esta variable a través del tiempo.

- Fase 3. Recopilación y análisis de datos de precipitación pluvial local, caudal de ríos y niveles de embalses: en esta fase se recopilaron los datos históricos de precipitación pluvial regional, niveles de embalses y caudales de ríos. Se tabularon los datos, se calcularon promedios y se elaboraron gráficas del comportamiento de estas variables a través del tiempo.
- Fase 4. Recopilación y análisis de datos de generación hidroeléctrica: en esta fase se recopilaron los datos reportados mensualmente de generación eléctrica en cada una de las 4 centrales hidroeléctricas del INDE analizadas. Se tabularon los datos y se realizaron cálculos de generación acumulada anual. Se elaboraron gráficas del comportamiento de la generación eléctrica a través del tiempo.
- Fase 5. Análisis del comportamiento de las variables: se identificaron mediciones atípicas presentes en cada base de datos y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para los siguientes pares de series de datos: temperatura global y precipitación pluvial regional, precipitación pluvial regional y nivel de embalses, nivel de embalses y caudal de ríos, y caudal de ríos y generación eléctrica.
- Fase 6. Análisis de impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica: en esta fase se determinó el grado del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE y se hizo un análisis del efecto que tiene dicho fenómeno en el subsector hidroeléctrico y el parque de generación eléctrico de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Las hidroeléctricas son centrales de generación de energía eléctrica que funcionan por medio del aprovechamiento de la energía del agua. Estas dependen de un flujo constante de agua que proviene de cuencas hídricas naturales para operar con eficiencia. Mientras mayor sea la caída y el caudal del recurso hídrico disponible, mayor es la potencia que la central podrá generar. Para regular y aprovechar de mejor manera el recurso, algunas hidroeléctricas construyen embalses de agua para prevenir el desabastecimiento durante sequías o estacionalidades, sin embargo, todas las hidroeléctricas sufren de variaciones en su generación ya sea a corto, mediano o largo plazo debido a las variaciones climáticas que afectan la cantidad de agua disponible en las cuencas hídricas en las que se encuentran.

El cambio climático es una realidad que ha demostrado tener consecuencias muy severas en diferentes áreas del mundo, sus ecosistemas y, por ende, en la vida cotidiana de la sociedad moderna. Dentro de las implicaciones más notables se encuentran los cambios de patrones de precipitación en las diferentes regiones del planeta, lo cual ha cambiado drásticamente la naturaleza de muchas cuencas hídricas y la cantidad de agua con la que disponen a través del tiempo.

Para abril de 2023, el 37 % de la matriz energética de Guatemala es hidroeléctrica, por lo que el país tiene una fuerte presencia de esta tecnología y la estabilidad del sistema eléctrico depende en gran medida de esta. Por esta razón, es importante comprender el grado de incidencia que tiene el cambio climático en la generación hidroeléctrica del país. El Instituto Nacional de

Electrificación (INDE) es la entidad pública encargada de velar por el abastecimiento de parte de la demanda energética del país y, según información publicada en la página oficial de la institución, cuenta con 9 hidroeléctricas instaladas con una potencia total de 542 MW, siendo el agente con mayor participación en la generación hidroeléctrica del país (Instituto Nacional de Electrificación, s. f.).

La presente investigación analizó el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE, con el fin de obtener el grado de incidencia que ha tenido este en el sector en los últimos años y el grado de vulnerabilidad que este fenómeno representa para el sistema eléctrico nacional. Se recopilaron datos históricos meteorológicos, hidrológicos y de generación hidroeléctrica para poder hacer un análisis estadístico y gráfico de estos con el fin de poder comparar las variables planteadas, realizar proyecciones y hacer conclusiones que son de provecho para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico nacional.

El trabajo se desarrolló en 5 capítulos principales. El primer capítulo presenta los antecedentes del estudio, donde se detallan las investigaciones previas que dan fundamento al presente análisis. El segundo está conformado por el marco teórico, donde se definen los conceptos básicos para que el lector se familiarice con la temática del estudio. El tercer capítulo es el desarrollo de la investigación, en el cual se definen las características del estudio, las variables analizadas, las fases del desarrollo de la investigación y las técnicas de análisis empleadas. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos para cada objetivo y fase de estudio correspondiente. Por último, en el quinto capítulo se interpretan y se discuten los resultados para dar respuesta a las preguntas de investigación formuladas.

1. ANTECEDENTES

En la actualidad existen trabajos de investigación que se basan en cambio climático y generación hidroeléctrica, los cuales ayudaron como soporte para la presente investigación. A continuación, se mencionan algunos que aportan información importante:

En la tesis *Efectos del cambio climático en la generación hidroeléctrica con énfasis en proyecciones de generación-transmisión eléctrica en Colombia* (Ospina, 2009) se analizó la vulnerabilidad de los recursos hidrológicos de las cuencas Bajo Magdalena y Sinú-Caribe en Colombia ante diferentes escenarios de cambio climático en la región. El trabajo utiliza métodos como modelos de circulación general, reducción de escala, Sistema de Evaluación y Planeación del Agua, análisis matemático y aplicación de métodos estadísticos para analizar la incidencia del potencial cambio climático sobre el sector hidroeléctrico, encontrando el grado de vulnerabilidad de este.

Se determinó que las cuencas analizadas presentan un aumento de temperatura, disminución de precipitación pluvial y por ende un déficit del recurso hídrico con el tiempo. Se obtuvieron 3 grados de vulnerabilidad del sector hidroeléctrico con su respectiva probabilidad y frecuencia: bajo 22.2 %, medio 33.3 % y alto 44.4 %. Este trabajo es relevante para la presente investigación dado que utiliza métodos matemáticos, estadísticos y predictivos para el análisis de la magnitud del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica en una cuenca específica.

De manera paralela, Rössler (2009) hizo un análisis de la relación demanda/oferta de electricidad y clima a través de la construcción de escenarios futuros de cambio climático en la Cuenca del Comahue en Argentina, se determinaron las vulnerabilidades en la generación hidroeléctrica y esto permitió establecer los principales problemas en el funcionamiento del sistema. Se determinó que existe una disminución en la generación eléctrica de la cuenca de hasta un 26 % debido a sequías en las usinas hidroeléctricas. Este trabajo es relevante para la presente investigación dado que estudia las incidencias del cambio climático en la generación hidroeléctrica a través del análisis de datos meteorológicos y escenarios de sequía para determinar la vulnerabilidad del sistema.

Otro importante análisis es el planteado en la tesis *Impactos del Cambio Climático en la Generación de Energía Renovable y en la Demanda de Electricidad* Solaun, (2019) donde se abordan los impactos del cambio climático en la generación renovable y en la demanda de electricidad, proporcionando una introducción a las transformaciones más relevantes proyectadas y desarrollando metodologías y análisis cuantitativos que determinan el impacto específico en tres casos de estudio: análisis de los más relevantes estudios que proporcionan estimaciones cuantitativas de cambio en la generación renovable debido al cambio climático.

Determinar los cambios esperados en la generación hidroeléctrica y eólica en plantas específicas proporcionan proyecciones físicas y económicas de los cambios esperados, junto con conclusiones para el desarrollo de políticas energéticas; y análisis de cómo el cambio climático puede afectar a la demanda de electricidad de una región, debido a los cambios esperados en la temperatura. Se estimó que la reducción en la producción hidroeléctrica debido al cambio climático será entre el 30 y 49 % a final del siglo en las plantas generadoras del

sur de España. Se calculó un incremento en el consumo diario de electricidad entre el 0.2 y 5.6 % debido a los cambios de temperatura. Este trabajo es relevante para la presente investigación porque utiliza metodologías de predicción de escenarios de generación hidroeléctrica tomando en cuenta posibles cambios en la demanda de energía ocasionadas por el cambio climático.

Siguiendo la línea de antecedentes de metodologías para el análisis de impacto de cambio climático en la generación hidroeléctrica, la disertación *Impacts of climate change on hydropower generation and developing adaptation measures through hydrologic modeling and multi objective optimization* Chilkoti, (2019) plantea la cuantificación del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica, las utilidades asociadas y consecuentemente sugiere medidas de adaptación a través del manejo adaptativo de reservorios.

Se adoptó un modelo de simulación en cadena de fenómenos hidrológicos y potencia hidráulica para evaluar los impactos proyectados del cambio climático en la generación hidroeléctrica. Se usaron métodos de modelaje hidrológico como algoritmos evolutivos multi objetivo (MOEA) por sus siglas en inglés y la herramienta de análisis de tierra y agua (SWAT) por sus siglas en inglés. Se analizó la cuenca del río Saugeen y el río Magpie en Ontario, Canadá. Se calculó que los cambios en las utilidades de la generación hidroeléctrica comparados con los datos actuales para cada una de las 4 estaciones del año será 21.1 %, 18.4 %, -13.4 % y -15.9 %, respectivamente, para mediados de siglo y 23.1 %, 19.5 %-20.1 % y -22.9 % para escenarios al final del siglo.

Se estimó que un manejo adaptativo a través de la optimización multi objetivo de los niveles de reservorios de agua, incrementa la rentabilidad de los proyectos y reduce la vulnerabilidad del sistema ante el cambio climático en 24 %.

Este trabajo es relevante para la presente investigación porque utiliza metodologías de análisis hidrológico modernas y propone métodos para mitigar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica a través de la gestión de los embalses de agua.

Finalmente, el artículo *Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador* Mehedi y Wyseure, (2018) es relevante para la presente investigación porque analiza datos meteorológicos históricos recopilados en un periodo de tiempo seleccionado para correlacionarlos con la generación hidroeléctrica correspondiente a través del estudio del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica en la cuenca del Rio Jubones, Ecuador, utilizando la herramienta de análisis de tierra y agua (SWAT) integrado con el sistema de información geográfica (GIS).

En el estudio se validaron y calibraron los parámetros del modelo de forma mensual con respecto a datos meteorológicos observados entre 1985 y 1998; dando como resultado que, aunque el cambio climático aumentará la generación hidroeléctrica durante la época húmeda, durante la época seca tendrá reducciones significativas de hasta 13.14 % con respecto a la referencia actual como consecuencia de una reducción del 17.00 % en el caudal del río.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos globales. Estos cambios pueden ser naturales, pero desde el siglo XIX, las actividades humanas a través de la revolución industrial han sido el principal motor de dicho fenómeno, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas y, consecuentemente, la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Naciones Unidas, s. f.).

2.2. Gases de efecto invernadero

Un gas de efecto invernadero (GEI) es un gas que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Este proceso es la fundamental causa del efecto invernadero que provoca el calentamiento global. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases fluorados [HFC, PFC, SF₆, entre otros] (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022).

2.3. Indicadores meteorológicos

El conocimiento del clima se difunde a través de diversas vías de comunicación como lo son los informes técnicos, gráficos climáticos, animaciones en tiempo real, presentaciones y libros destinados al público general. Un enfoque prometedor para transmitir la realidad del cambio climático

consiste en desarrollar indicadores, es decir, números y escalas destinados a realizar el seguimiento del estado o nivel de algún aspecto del clima. El uso de indicadores presenta una serie de ventajas ya que estos están cuantificados, son objetivos, se basan en datos ofrecidos por prácticamente todos los países y demuestran cambios a lo largo del tiempo (Williams, 2017).

2.3.1. Temperatura global

La temperatura global de la tierra es la temperatura de equilibrio de radiación, es una media de las temperaturas en las diferentes áreas del mundo en un periodo determinado y para calcularla se utilizan datos captados por estaciones meteorológicas de todo el mundo tanto de mediciones en tierra como en la superficie de los mares y funciona como un indicador del clima global (Saavedra, Gutiérrez, Del Campo, 2019).

2.3.2. Precipitación

La precipitación es agua en estado líquido o sólido que cae de la atmósfera y desciende hasta llegar a la superficie de la tierra. Dentro de este fenómeno se contempla la lluvia, la llovizna, la nieve, la aguanieve y el granizo. La pluviosidad es la cantidad de precipitación en un área de la superficie terrestre, es medida en mm equivalentes al número de litros de agua por cada metro cuadrado de superficie. Es un indicador del clima en una región y determina los niveles de humedad en el ambiente y la cantidad de agua que albergarán los ríos y lagos de este (Ambientum, s. f.).

2.4. Hidrología

La hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. Proporciona los métodos para analizar y resolver los problemas prácticos que se presentan en el diseño, la planeación y la operación de estructuras hidráulicas (Villón, 2002).

2.4.1. Caudal de ríos

El caudal de un río es el volumen de agua que circula por el cauce de este, y se mide en m^3/s . El régimen fluvial es el comportamiento del caudal de agua en promedio que lleva un río en cada mes a lo largo del año. Las características de la superficie de la cuenca y el clima son los factores que más influyen en el caudal de un río. En temporada de lluvia, aumenta mientras que durante el verano disminuye. El momento de mayor caudal se llama creciente o crecida y se produce como consecuencia de factores meteorológicos como grandes precipitaciones y deshielos. El menor caudal de un río se llama estiaje y por lo general se repite cada año en la misma época (Alvarado, 2017).

2.5. Hidroeléctricas

Según la empresa de consultoría en energías renovables VValner:

Una central hidroeléctrica transforma la energía hidráulica de un curso de agua, natural o artificial, en energía eléctrica renovable. El proceso tiene lugar en varios pasos y se basa en la transformación de la energía potencial contenida en las masas de agua, situadas a mayor altitud respecto a las turbinas de generación

de la central. El funcionamiento incluye un elemento de contención, conocido como presa o dique, que interrumpe el curso de agua, creando una acumulación que puede ser un depósito o un embalse. Mediante obras de aducción, canales y túneles de derivación, el agua se transporta a la galería de presión y, a través de unas tuberías forzadas, se dirige a las turbinas hidroeléctricas gracias al uso de válvulas de entrada y dispositivos de regulación de caudal, en función de la demanda de energía. El agua acciona las turbinas, generando energía mecánica, y sale de ellas a un canal de desagüe, a través del cual se devuelve al río (VALNER, s. f.).

2.5.1. Tipos de hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se dividen en dos categorías principales, según el tipo de sistema que utilizan: centrales de agua fluyente o a filo de agua y centrales de embalse. En las centrales de agua fluyente se utiliza la velocidad del caudal natural de un río situado en dos niveles diferentes. El agua se transporta a través de un túnel de derivación sin la ayuda de tuberías forzadas y llega hasta las turbinas. En las centrales de embalse se utiliza un embalse aguas arriba, puede ser natural como en el caso de un lago o artificial mediante la construcción de una presa. A diferencia de los sistemas de agua fluyente, los embalses permiten controlar el caudal del agua y, por lo tanto, la producción de energía renovable (Enel, s. f.).

2.5.2. Embalses

Un embalse es una estructura hidráulica que contiene un gran depósito de agua, formado naturalmente o construido de manera artificial. Los embalses hechos por el hombre cuentan con una presa, la cual es una estructura de

contención que sirve para cerrarlos. Esta estructura hidráulica debe soportar las posibles condiciones extremas presentes en una cuenca hídrica.

Los usos más comunes de los embalses son: riego, abastecimiento de agua potable a poblaciones aledañas, producción de energía hidroeléctrica y actividades de ocio. La ventaja más importante que permite un embalse es la regulación del recurso hídrico a través del tiempo, asegurando un suministro estable de agua a pesar de variaciones climáticas, estacionalidades o sequías (Valdivielso, s.f.).

2.5.3. Hidroeléctricas del INDE

El Instituto Nacional de Electrificación (INDE) es una entidad estatal, autónoma y descentralizada, la cual goza de autonomía funcional, patrimonio propio, personalidad jurídica y plena capacidad para adquirir derechos y contraer obligaciones en materia de su competencia. Sus principales fines y obligaciones son: dar solución a la escasez de energía eléctrica en el país, procurar que haya energía disponible para satisfacer la demanda en todo momento y usar de forma eficiente y sostenible los recursos naturales del país para su aprovechamiento energético (INDE, s. f.).

El INDE cuenta con 9 centrales de generación hidroeléctrica en Guatemala:

Chixoy tiene una capacidad instalada de 300 MW y está ubicada en Alta Verapaz.

Figura 1.

Hidroeléctrica Chixoy



Nota. Fotografía aérea del embalse Chixoy. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Aguacapa tiene una capacidad instalada de 90 MW y está ubicada en Santa Rosa.

Figura 2.

Hidroeléctrica Aguacapa



Nota. Fotografía aérea de la hidroeléctrica Aguacapa. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Jurún Marinalá tiene una capacidad instalada de 60.85 MW y está ubicada en Escuintla.

Figura 3.

Hidroeléctrica Jurún Marinalá



Nota. Fotografía aérea de la hidroeléctrica Jurún Marinalá. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Figura 4.

Hidroeléctrica Los Esclavos



Nota. Fotografía aérea de la hidroeléctrica Los Esclavos. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Palín II tiene una capacidad instalada de 6.1 MW y está ubicada en Escuintla.

Figura 5.

Hidroeléctrica Palín II



Nota. Fotografía de la hidroeléctrica Palín II. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Santa María tiene una capacidad instalada de 5.031 MW y está ubicada en Quetzaltenango.

Figura 6.

Hidroeléctrica Santa María



Nota. Fotografía de la hidroeléctrica Santa María. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

El Porvenir tiene una capacidad instalada de 2.280 MW y está ubicada en San Marcos.

Figura 7.

Hidroeléctrica El Porvenir



Nota. Fotografía de la hidroeléctrica El Porvenir. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egge/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

El Salto tiene una capacidad instalada de 2.124 MW y está ubicada en Escuintla.

Figura 8.

Hidroeléctrica El Salto



Nota. Fotografía de la hidroeléctrica El Salto. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egge/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

Chichaic tiene una capacidad instalada de 0.600 MW y está ubicada en Alta Verapaz.

Figura 9.

Hidroeléctrica Chichaic



Nota. Fotografía de la hidroeléctrica Chichaic. Obtenido del Instituto Nacional de Electrificación (2022). *Plantas de Generación del INDE* [Fotografía]. (<https://www.inde.gob.gt/egee/#hidroelectricas>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

2.6. Análisis de datos

El análisis de datos es el estudio exhaustivo de un conjunto de información cuyo objetivo es obtener conclusiones que permitan tomar decisiones. Es examinar e interpretar una base de datos con el fin de dar solución al planteamiento de un problema o cuestión. Existen dos tipos de análisis de datos, cuantitativo y cualitativo. En el análisis cuantitativo la información es numérica por lo que se pueden elaborar estadísticas exactas mientras que el análisis cualitativo consiste en información no numérica por lo regular en forma textual. Existen varias herramientas para el análisis de datos como lo son: matemática, estadística, econometría, métodos numéricos, métodos gráficos, entre otros (Westreicher, 2020).

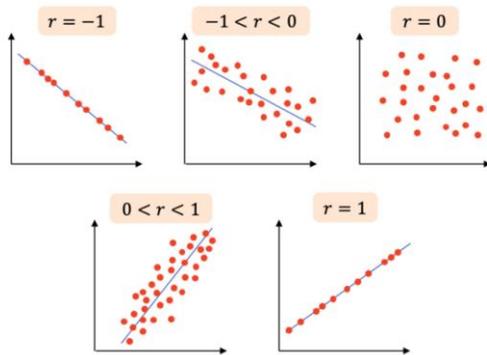
2.6.1. Correlación

Según Garriga, (2010) el coeficiente de correlación de Pearson, también llamado coeficiente de correlación lineal o simplemente coeficiente de correlación, es un índice estadístico que establece la relación entre dos variables o series de datos analizados. Para calcularlo se debe dividir la covarianza de las dos variables por la raíz cuadrada del producto de sus varianzas. Este coeficiente cuantifica la dependencia lineal que existe entre los datos y determina un valor numérico para definir el grado de relación entre el comportamiento de las variables con lo cual se pueden hacer comparaciones y conclusiones.

También indica que el valor del coeficiente de correlación de Pearson está entre -1 y +1, ambos incluidos. Si el coeficiente es -1, significa que las variables tienen una correlación negativa perfecta; si es entre -1 y 0, tienen correlación negativa; si es 0 tienen una correlación lineal nula; si es entre 0 y 1, tienen una correlación positiva y si es 1 tienen una correlación positiva perfecta. De este modo al calcular el coeficiente se pueden hacer interpretaciones de la relación que existe entre 2 variables a medida que se acerque más a uno de los parámetros límite del coeficiente.

Figura 10.

Comportamiento de variables para diferentes valores del coeficiente



Nota. Representaciones gráficas del comportamiento de los datos con diferentes valores del coeficiente de correlación de Pearson. Obtenido de Probabilidad y Estadística (2021). ¿Qué es el coeficiente de correlación de Pearson? (<https://www.probabilidadyestadistica.net/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>), consultado el 15 de octubre de 2022. De dominio público.

2.6.2. Tendencia

La prueba no paramétrica SROC (Spearman Rank Order Correlation) se basa en la asignación de un valor R a cada observación, igual a 1 para la mayor observación y N para la menor. Posteriormente se calcula la diferencia entre el valor asignado R_i y la posición relativa de la observación i y el estadístico T como:

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (R_i - i)^2}{N(N^2 - 1)}$$

$$T = R_s \sqrt{\frac{N - 2}{1 - R_s^2}}$$

El estadístico T posee distribución t de Student con $N - 2$ grados de libertad. La hipótesis nula H_0 es rechazada cuando $T > \alpha/2$ o $T < -\alpha/2$ (Paoli, 2010).

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo con base en la metodología planteada para alcanzar los objetivos antes establecidos.

3.1. Diseño

El diseño que se adoptó es no experimental, pues en el análisis de impacto de cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE que se realizó, no se manipularon variables sino se observó el comportamiento de fenómenos naturales y de generación a lo largo del tiempo. Es por esto por lo que la investigación también es de tipo longitudinal o diacrónica, ya que se midieron muestras de la misma población en un periodo largo de tiempo para analizar el comportamiento de los datos y obtener tendencias. Las variaciones climáticas fueron las variables independientes y la generación hidroeléctrica fue la variable dependiente.

3.2. Enfoque

La investigación tiene enfoque cuantitativo, ya que se consideraron únicamente variables cuantitativas de tipo continua de mediciones climáticas y de generación para el análisis del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE, utilizando diferentes métodos numéricos, estadísticos y gráficos para el análisis y comparación de los datos.

3.3. Alcance

El alcance del estudio que se realizó fue relacional, dado que este se centró en medir la relación que puede existir entre el cambio climático y la generación hidroeléctrica del INDE. La investigación es de tipo documental ya que se utilizaron bases de datos meteorológicos y de generación históricos de la NASA, INSIVUMEH y AMM para lograr analizar, comparar y relacionar los fenómenos de cambio climático con la generación hidroeléctrica.

3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis que se estudió es el parque de generación hidroeléctrico de Guatemala. Específicamente, se analizaron las 4 centrales hidroeléctricas más grandes pertenecientes al Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

3.5. Variables

Las variables que se analizaron son temperatura global, precipitación pluvial regional, caudal de ríos, nivel de embalses y generación hidroeléctrica.

Tabla 1.*Cuadro de resumen de variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operativa
Temperatura global (°C)	Se define como la temperatura de equilibrio de radiación en la superficie de la Tierra, es una media de las temperaturas en las diferentes áreas del mundo en un periodo determinado.	Es una media de la temperatura superficial en diferentes zonas del mundo. Se obtuvieron mediciones mensuales de la base de datos de la NASA durante el periodo de 2007 a 2022.
Precipitación pluvial (mm)	Es agua en estado líquido o sólido que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.	Son mediciones de pluviosidad en diferentes regiones y estaciones del año. Se obtuvieron mediciones mensuales de la base de datos del INSIVUMEH durante el periodo de 2007 a 2022.
Caudal de ríos (m ³ /s)	Es el volumen de agua que circula por el cauce de un río por unidad de tiempo.	Son mediciones de flujo volumétrico en las diferentes cuencas correspondientes a las hidroeléctricas del INDE en diferentes estaciones del año. Se obtuvieron mediciones mensuales de la base de datos del AMM durante el periodo de 2007 a 2022.
Nivel de embalse (msnm)	Es la altura del agua contenida en un embalse de regulación hidroeléctrico.	Son mediciones del nivel de agua en los embalses correspondientes a las hidroeléctricas del INDE en diferentes estaciones del año. Se obtuvieron mediciones mensuales de la base de datos del AMM durante el periodo de 2007 a 2022.
Generación hidroeléctrica (GWh)	Es energía eléctrica generada a través del aprovechamiento de la fuerza del agua.	Es el registro de la energía generada en las diferentes hidroeléctricas del INDE en diferentes estaciones del año. Se obtuvieron datos mensuales de la base de datos del AMM durante el periodo de 2007 a 2022.

Nota. Tabla de definición conceptual y operativa de las 5 variables principales de la investigación.

Elaboración propia, usando Microsoft Office Excel.

3.6. Fases del desarrollo de la investigación

La investigación se desarrolló en 6 fases como se describe a continuación:

3.6.1. Fase 1. Revisión documental

En esta fase se realizó la búsqueda, revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática tratada, como tesis, trabajos de graduación, artículos científicos, libros y páginas web. Estas fuentes son el fundamento para la realización del análisis de impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), tanto para la sección de antecedentes como para la redacción del marco teórico.

3.6.2. Fase 2. Recopilación y análisis de datos de temperatura global

En esta fase se recopilaron los datos medidos mensualmente por el instituto GISS de la NASA del indicador de temperatura global en el periodo de 2007 a 2022. Se tabularon los datos originales en una hoja de Microsoft Office Excel y se realizaron cálculos para transformar los datos originales en formato de indicador a datos de temperatura en grados Celsius. Se hicieron cálculos de promedio de temperatura anual para cada año estudiado y se elaboraron gráficas del comportamiento de la temperatura global a través del tiempo.

3.6.3. Fase 3. Recopilación y análisis de datos de precipitación pluvial local, caudal de ríos y niveles de embalses

En esta fase se recopilaron los datos de precipitación pluvial mensual medidos por estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes puntos

estratégicos de Guatemala y monitoreadas por el INSIVUMEH. Se hizo un análisis geográfico utilizando las coordenadas de las estaciones meteorológicas y las de las 4 hidroeléctricas analizadas junto con la herramienta de mapeo global en línea Google Earth para determinar las 3 estaciones meteorológicas más cercanas y representativas para cada una de las cuencas correspondientes a las 4 hidroeléctricas estudiadas. Se generaron 4 mapas representando la ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas en relación con la ubicación de la hidroeléctrica correspondiente. Se tabularon los datos de precipitación pluvial de las estaciones meteorológicas seleccionadas y se calculó el promedio de estas para obtener la precipitación pluvial promedio en cada hidroeléctrica analizada. Se hicieron cálculos de la precipitación pluvial acumulada anual en cada una de las hidroeléctricas y se elaboraron gráficas de su comportamiento a través del tiempo.

Se recopilaron los datos de los caudales de los ríos correspondientes a las 4 hidroeléctricas del INDE analizadas, así como los niveles de los embalses Chixoy y Amatitlán. Los datos se recopilaron de los archivos históricos publicados en la página del AMM del año 2007 al 2022. Se tabularon los datos en una hoja de Microsoft Office Excel y se realizaron cálculos de promedios anuales. Se elaboraron gráficas del comportamiento de los caudales y los niveles de embalses a través del tiempo.

3.6.4. Fase 4. Recopilación y análisis de datos de generación hidroeléctrica

En esta fase se recopilaron los datos reportados mensualmente de generación eléctrica en cada una de las 4 centrales hidroeléctricas del INDE analizadas en el periodo de 2007 a 2022, consultando los reportes históricos respectivos en la página del AMM. Se tabularon los datos en una hoja de

Microsoft Office Excel y se realizaron cálculos de generación acumulada anual. Se elaboraron gráficas del comportamiento de la generación eléctrica a través del tiempo.

3.6.5. Fase 5. Análisis del comportamiento de las variables

En esta fase se realizó un análisis crítico del comportamiento de las variables estudiadas a través del tiempo. Se identificaron mediciones atípicas presentes en cada base de datos y se evaluó su causa con el fin de omitir los datos no representativos en la comparación general de los resultados según cada caso particular. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para los siguientes pares de series de datos: temperatura global y precipitación pluvial regional; precipitación pluvial regional y nivel de embalses; nivel de embalses y caudal de ríos; y caudal de ríos y generación eléctrica.

3.6.6. Fase 6. Análisis de impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica

En esta fase se determinó el grado del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica del INDE y se hizo un análisis crítico del efecto que tiene dicho fenómeno en el subsector hidroeléctrico y el parque de generación eléctrica de Guatemala. Se proyectaron futuros escenarios donde se analizó el alcance potencial de este fenómeno en el país en base los resultados obtenidos, así como recomendaciones para mitigar su posible impacto de manera sostenible y asegurar la estabilidad del sistema eléctrico nacional.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

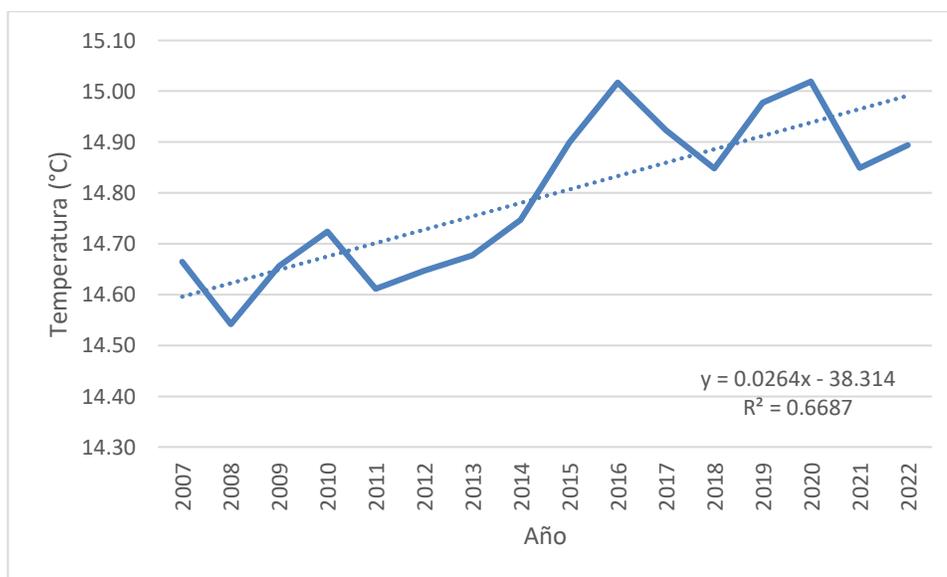
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la investigación.

4.1. Temperatura global

A continuación, se presenta la temperatura global.

Figura 11.

Gráfica del comportamiento de la temperatura global anual



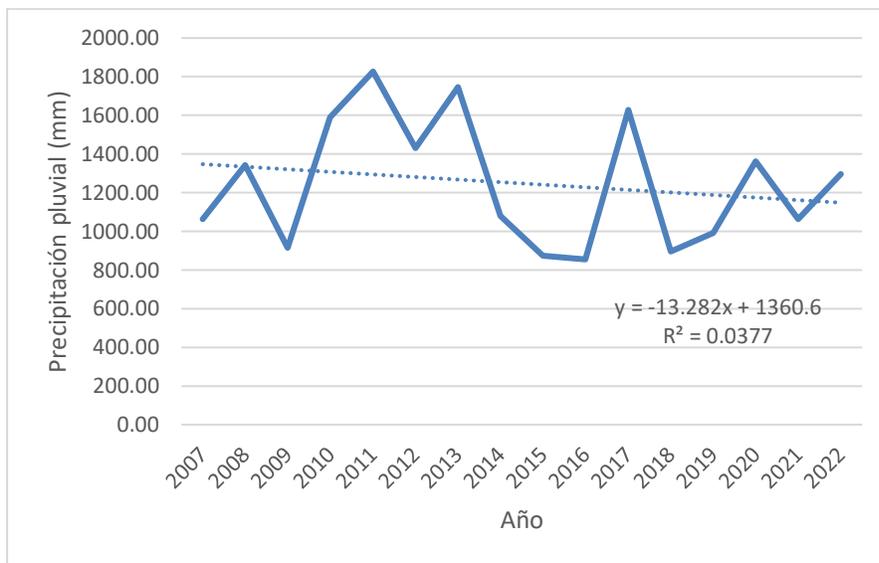
Nota. Curva y regresión calculados con datos promedio del indicador de temperatura global mensual registrada por la NASA. Elaboración propia, usando Excel.

4.2. Precipitación pluvial regional

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la variable de precipitación pluvial en cada una de las 4 hidroeléctricas analizadas.

Figura 12.

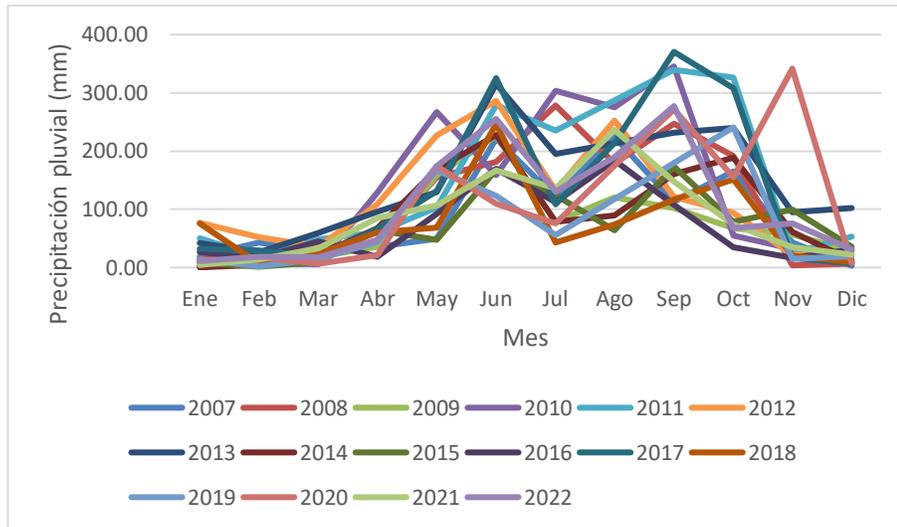
Gráfica del comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual



Nota. Curva calculada con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Chixoy PCH, Sacapulas y Cubulco. Elaboración propia usando Excel.

Figura 13.

Comportamiento de la precipitación pluvial promedio mensual por año

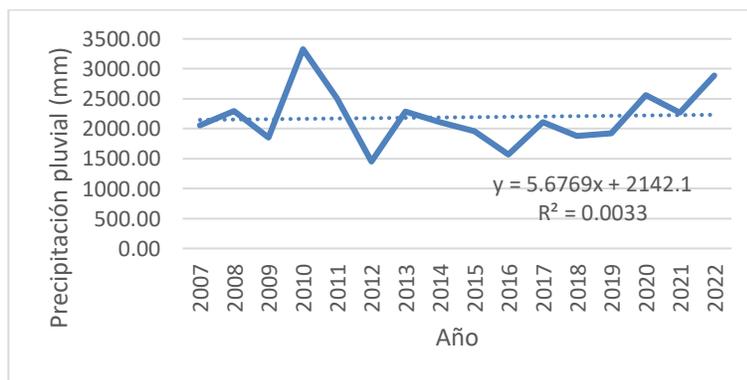


Nota. Curvas calculadas con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Chixoy PCH, Sacapulas y Cubulco. Elaboración propia.

- Región de la hidroeléctrica Aguacapa

Figura 14.

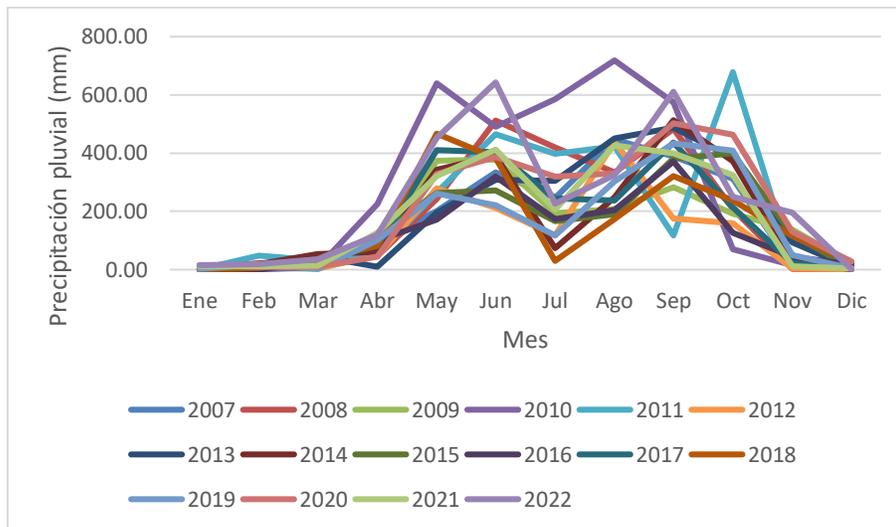
Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada



Nota. Curva calculada con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Sabana Grande, INSIVUMEH y Los Esclavos. Elaboración propia usando Excel.

Figura 15.

Comportamiento de la precipitación pluvial promedio mensual

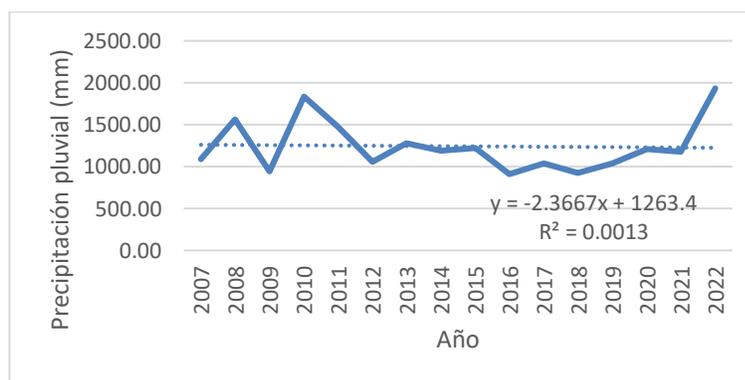


Nota. Curvas calculadas con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Sabana Grande, INSIVUMEH y Los Esclavos. Elaboración propia, usando Excel.

- Región de la hidroeléctrica Jurún Marinalá

Figura 16.

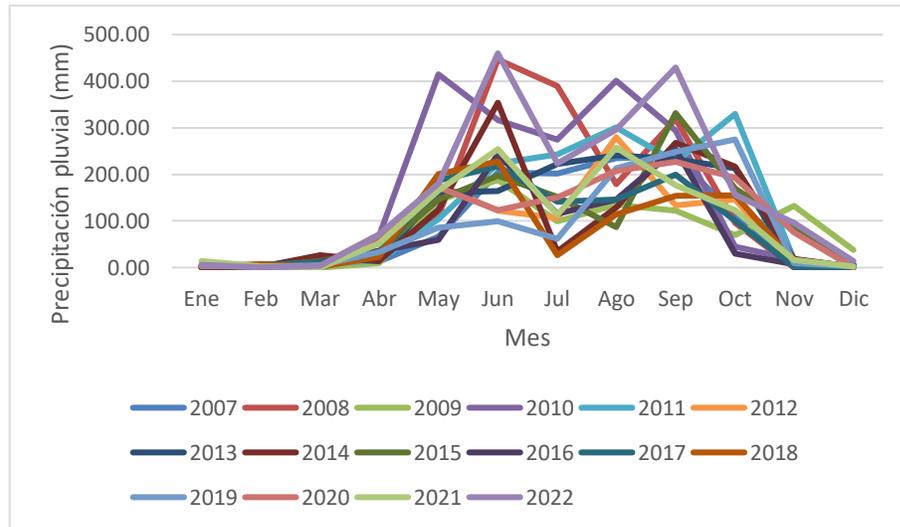
Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual Jurún Marinalá



Nota. Curva calculada con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Alameda ICTA, Suiza Contenta e INSIVUMEH. Elaboración propia usando Excel.

Figura 17.

Comportamiento de la precipitación pluvial mensual Jurún Marinalá

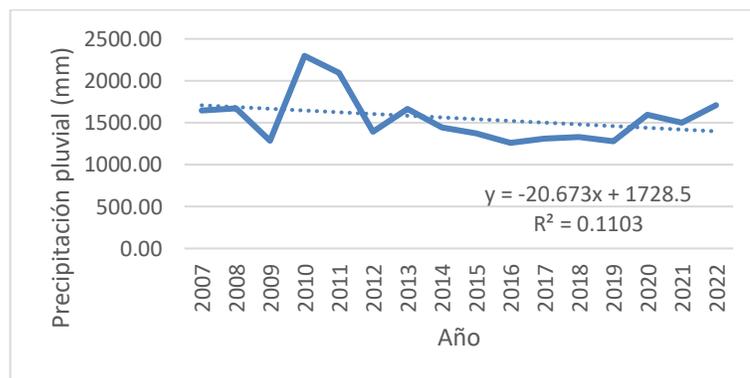


Nota. Curvas calculadas con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Alameda ICTA, Suiza Contenta e INSIVUMEH. Elaboración propia, usando Excel.

- Región de la hidroeléctrica Los Esclavos

Figura 18.

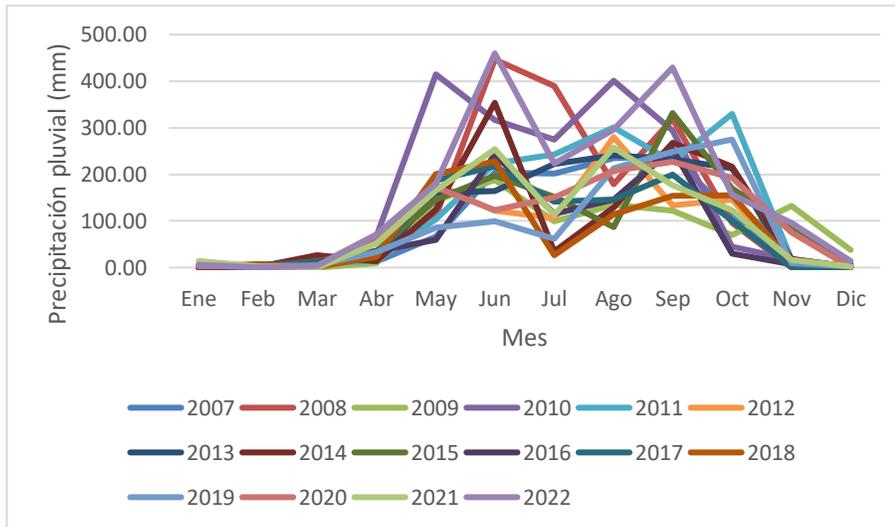
Comportamiento de la precipitación pluvial acumulada anual Los Esclavos



Nota. Curva calculada con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Los Esclavos, INSIVUMEH y Quezada. Elaboración propia usando Excel.

Figura 19.

Comportamiento de la precipitación pluvial promedio Los Esclavos



Nota. Curvas calculadas con el promedio de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas Los Esclavos, INSIVUMEH y Quezada. Elaboración propia, usando Excel.

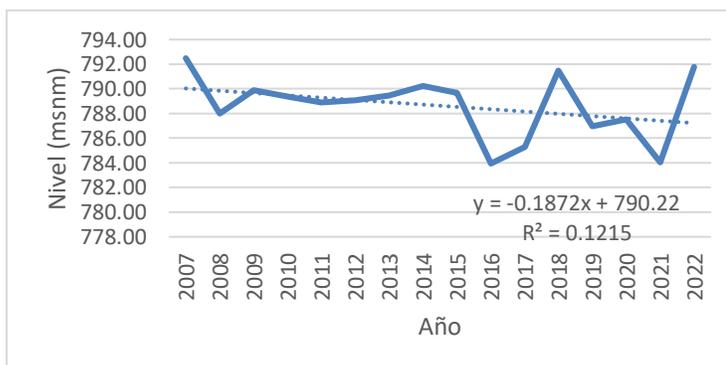
4.3. Nivel de embalses

A continuación, se presenta el nivel de embalses.

- Embalse Chixoy

Figura 20.

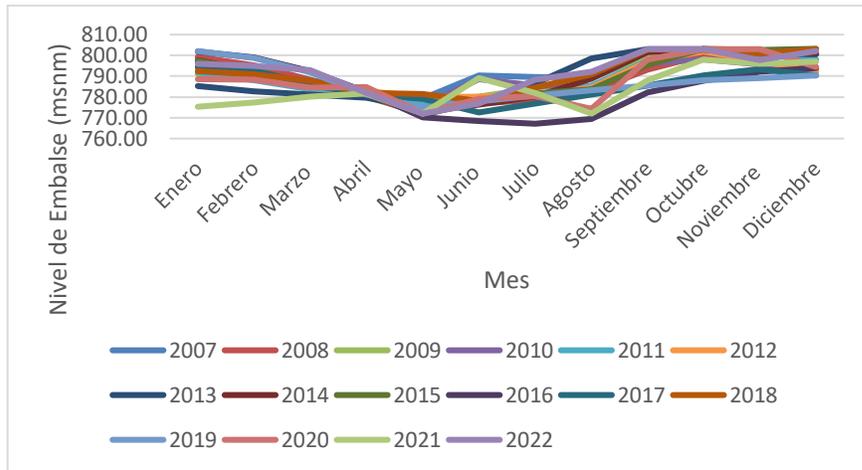
Limnigrama del nivel del agua anual promedio del embalse Chixoy



Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

Figura 21.

Gráfica del comportamiento del nivel del agua del embalse Chixoy por año

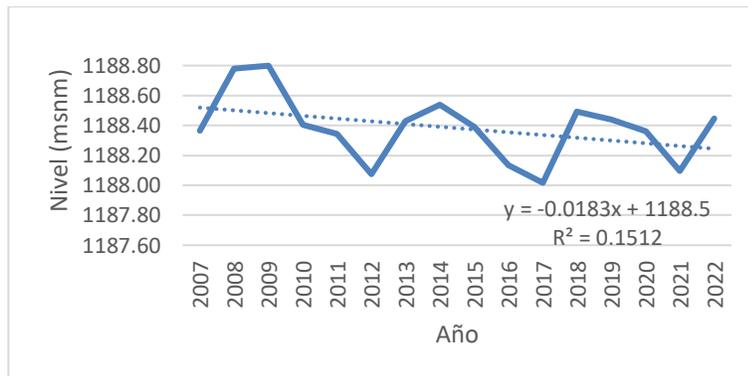


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Embalse Amatitlán

Figura 22.

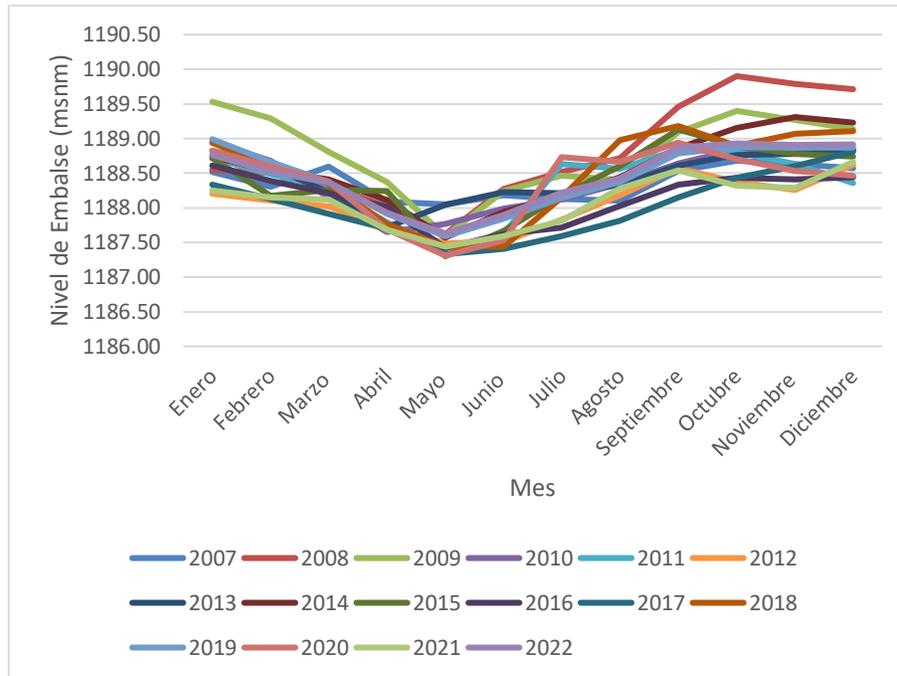
Limnigrama del nivel del agua promedio del embalse Amatitlán



Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

Figura 23.

Gráfica del comportamiento del nivel del agua del embalse Amatitlán por año



Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia utilizando Excel.

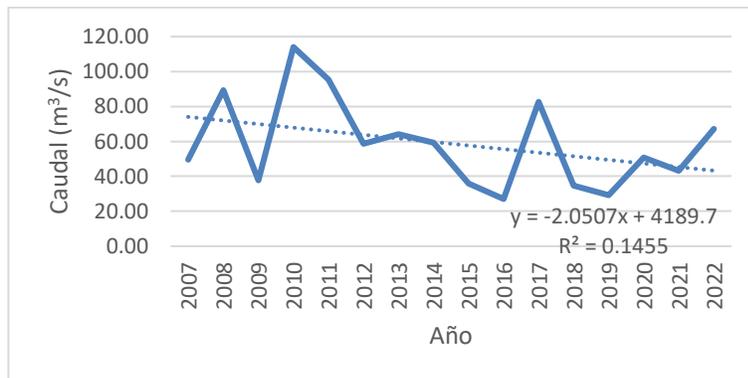
4.4. Caudales

A continuación, se presentan los caudales de las diversas hidroeléctricas.

- Caudal de la hidroeléctrica Chixoy

Figura 24.

Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Chixoy

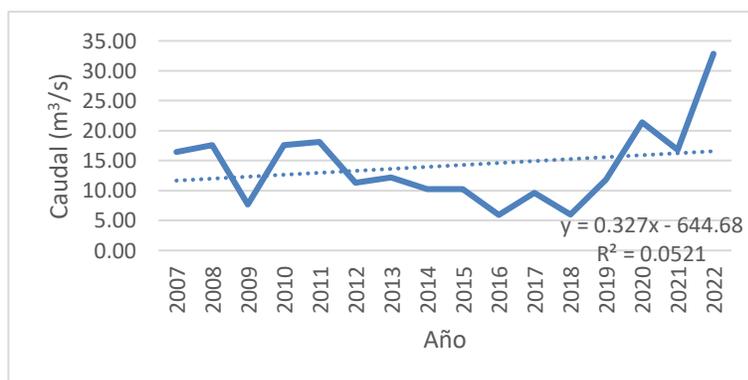


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia utilizando Excel.

- Caudal de la hidroeléctrica Aguacapa

Figura 25.

Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Aguacapa

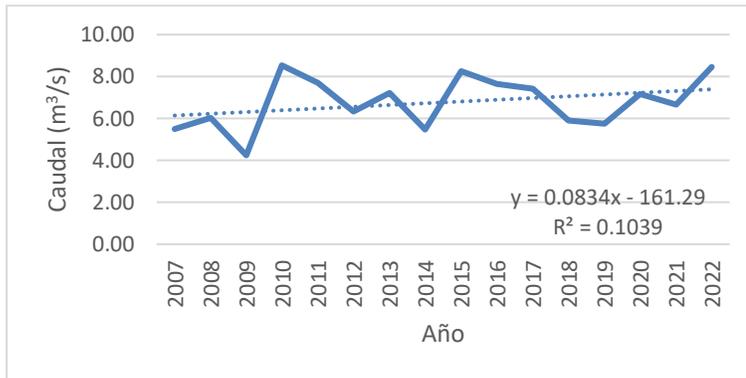


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Caudal de la hidroeléctrica Jurún Marinalá

Figura 26.

Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Jurún Marinalá

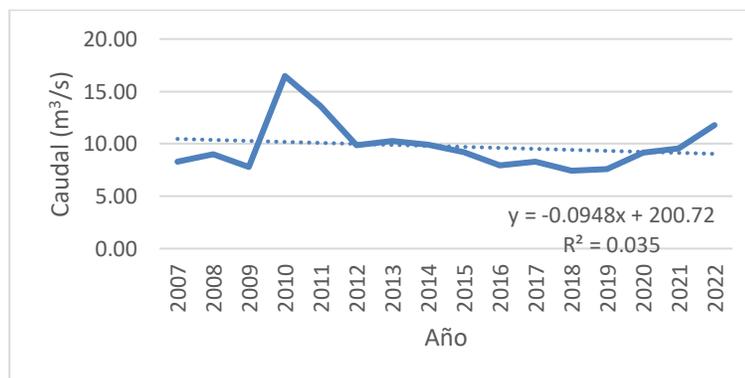


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Caudal de la hidroeléctrica Los Esclavos

Figura 27.

Hidrograma del caudal de agua promedio en la hidroeléctrica Los Esclavos



Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

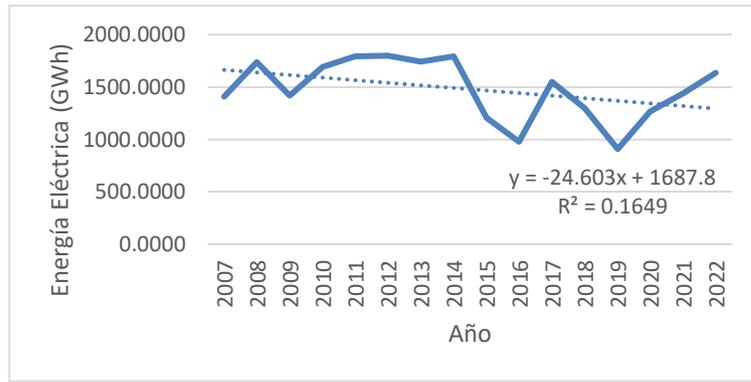
4.5. Generación eléctrica

A continuación, se presenta la generación eléctrica de cada hidroeléctrica.

- Generación de hidroeléctrica Chixoy

Figura 28.

Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada central Chixoy

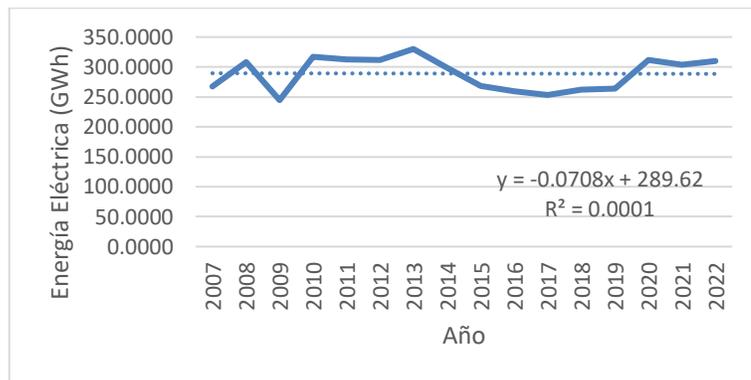


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Generación de hidroeléctrica Aguacapa

Figura 29.

Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada la central Aguacapa

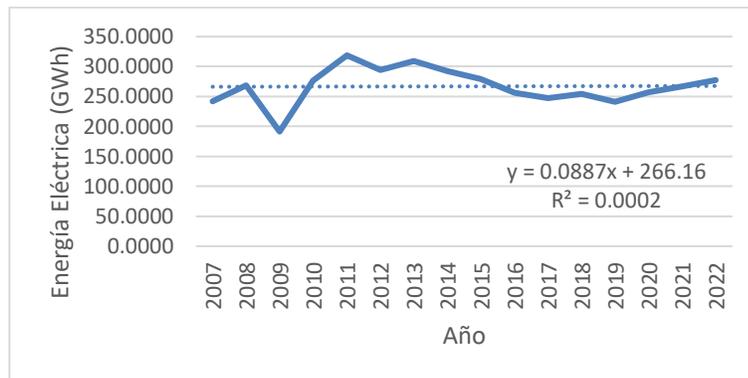


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Generación de hidroeléctrica Jurún Marinalá

Figura 30.

Comportamiento de la generación hidroeléctrica acumulada Jurún Marinalá

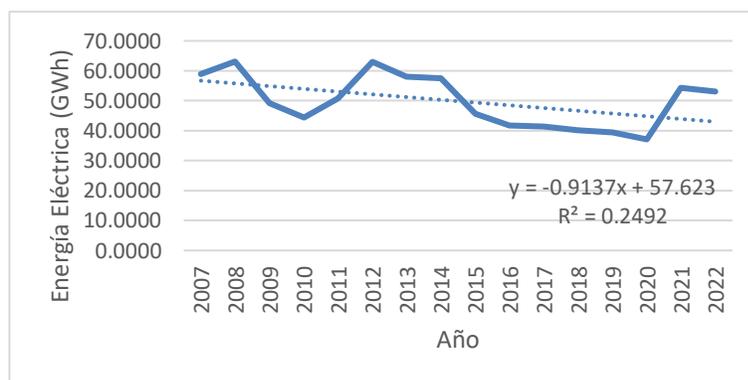


Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

- Generación de hidroeléctrica Los Esclavos

Figura 31.

Comportamiento de la generación hidroeléctrica central Los Esclavos



Nota. Curva calculada con datos históricos del AMM. Elaboración propia, utilizando Excel.

4.6. Correlación de datos

En la siguiente tabla se presentan los resultados del coeficiente de correlación de Pearson.

Tabla 2.*Resultados del coeficiente de correlación de Pearson*

Variable Independiente	Variable Dependiente	CHX-H	AGU-H	JUR-H	LES-H	Promedio
Temperatura Global	Precipitación Pluvial Regional	-0.38	-0.07	-0.25	-0.43	-0.28
Precipitación Pluvial Regional	Caudal	0.82	0.73	0.58	0.92	0.76
Caudal	Generación	0.59	0.85	0.91	0.77	0.78
Precipitación Pluvial Regional	Nivel de Embalse	-0.26	N/A	-0.23	N/A	-0.25

Nota. Calculado con las series de datos históricos promedio de cada variable. Elaboración propia, utilizando Excel.

4.7. Tendencia

A continuación, se presenta la tendencia.

Tabla 3.*Significancia de la tendencia en la serie temporal de temperatura promedio anual*

Pendiente	Coeficiente Rs	Estadístico T		Tendencia
		Calculado	Teórico	
Positiva	0.78	4.70	2.14	Significativa

Nota. Calculado con las series de datos históricos promedio de temperatura global. Elaboración propia, utilizando Excel.

Tabla 4.*Significancia de la tendencia en las series temporales de precipitación pluvial*

Planta	Pendiente	Coeficiente Rs	Estadístico T		Tendencia
			Calculado	Teórico	
Chixoy	Negativa	0.21	0.82	2.14	No significativa
Aguacapa	Positiva	0.09	0.35	2.14	No significativa
Jurún Marinalá	Negativa	0.11	0.41	2.14	No significativa
Los Esclavos	Negativa	0.26	1.00	2.14	No significativa

Nota. Calculado con las series de datos históricos de precipitación pluvial. Elaboración propia, utilizando Excel.

Tabla 5.*Significancia de la tendencia en las series temporales de nivel de embalse*

Planta	Pendiente	Coeficiente Rs	Estadístico T		Tendencia
			Calculado	Teórico	
Chixoy	Negativa	0.29	1.11	2.14	No significativa
Jurún Marinalá	Negativa	0.21	0.82	2.14	No significativa

Nota. Calculado con las series de datos históricos de niveles de embalse. Elaboración propia, utilizando Excel.

Tabla 6.*Significancia de la tendencia en las series temporales de caudales de ríos*

Planta	Pendiente	Coeficiente Rs	Estadístico T		Tendencia
			Calculado	Teórico	
Chixoy	Negativa	0.33	1.29	2.14	No significativa
Aguacapa	Positiva	0.06	0.22	2.14	No significativa
Jurún Marinalá	Positiva	0.25	0.95	2.14	No significativa
Los Esclavos	Negativa	0.07	0.28	2.14	No significativa

Nota. Calculado con las series de datos históricos de caudales de ríos. Elaboración propia, utilizando Excel.

Tabla 7.*Significancia de la tendencia series temporales de generación hidroeléctrica*

Planta	Pendiente	Coeficiente Rs	Estadístico T		Tendencia
			Calculado	Teórico	
Chixoy	Negativa	0.39	1.58	2.14	No significativa
Aguacapa	Negativa	0.11	0.40	2.14	No significativa
Jurún Marinalá	Positiva	0.08	0.30	2.14	No significativa
Los Esclavos	Negativa	0.54	2.37	2.14	Significativa

Nota. Calculado con las series de datos históricos de generación hidroeléctrica. Elaboración, propia utilizando Excel.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se discutirán los resultados obtenidos en la sección anterior según las fases de investigación para responder a los objetivos del estudio.

5.1. Temperatura global

Al observar la gráfica de temperatura superficial global promedio a través del tiempo se observa que los datos tienden al alza y al aplicar la regresión lineal a estos resulta una ecuación lineal con pendiente positiva y un coeficiente R^2 de 0.67 lo cual indica que efectivamente la temperatura global ha ido en aumento en el periodo de tiempo analizado y que tenderá a seguir incrementando en los próximos años. Sin embargo, dado que esta variable es un dato promedio global y se calcula con mediciones de estaciones ubicadas en todo el mundo varía muy poco de un dato al otro, manteniéndose relativamente estable durante todos los meses del año ya que mientras el hemisferio norte se calienta en los meses de junio y julio, el hemisferio sur se enfría y ocurre lo opuesto en los meses de enero y diciembre, equilibrando así la temperatura general del planeta en todos los meses.

Debido a este fenómeno la variable de temperatura global en el periodo de tiempo analizado registra variaciones mínimas de un dato al otro de tal forma que la variación máxima entre el año más frío y el más cálido registrado en el periodo de estudio es de menos de 0.5 °C. Se determinó que este comportamiento es uno de los factores que influyó en el resultado del coeficiente de correlación de Pearson entre la temperatura global y la precipitación pluvial

regional el cual fue de -0.28 ya que la variable de temperatura no presenta cambios tan drásticos en el tiempo mientras que la variable de precipitación pluvial sí los presenta en mayor medida.

Con este resultado no se puede afirmar que la variable de precipitación pluvial regional en las hidroeléctricas analizadas este directamente relacionada a la variable de temperatura global pero sí indica que existe una tendencia a que las variables se relacionen de forma inversamente proporcional, es decir, a mayor temperatura global, menor probabilidad de lluvia hay en las regiones estudiadas. Esta tendencia se reforzó al observar que los 3 años más cálidos registrados en el periodo analizado (2016, 2019 y 2020) coinciden con los 3 años de menor precipitación pluvial en las 4 regiones analizadas.

5.2. Precipitación pluvial regional

La precipitación pluvial promedio anual calculada para la hidroeléctrica Aguacapa fue de 2,190 mm. Este resultado no es congruente con el resto de valores de las demás hidroeléctricas ya que es considerablemente superior a los demás mientras que, climáticamente, se conoce que esta zona del país es más seca que la zona de la hidroeléctrica Chixoy. La variación en el resultado se debe al método escogido para el cálculo de la precipitación pluvial regional ya que se tomaron en cuenta los datos medidos por las 3 estaciones meteorológicas del INSIVUMEH más cercanas a la hidroeléctrica, siendo una de estas la estación Sabana Grande, ubicada en el municipio de Escuintla, departamento de Escuintla. Este es uno de los departamentos más húmedos del país, por lo que las mediciones de esta estación efectivamente son mayores que todas las demás estaciones seleccionadas y hacen que el promedio de lluvia calculado para la hidroeléctrica Aguacapa sea mayor.

Este mismo efecto influye en la relación entre la precipitación pluvial regional y los caudales de los ríos ya que al hacer un promedio de los datos de lluvia medidos por las diferentes estaciones meteorológicas del INSIVUMEH distribuidas en la periferia de las hidroeléctricas analizadas se obtiene un resultado que es representativo de la región en general, más no necesariamente es representativo de la lluvia que efectivamente surte las cuencas correspondientes a las hidroeléctricas ya que podría ser que existan barreras topográficas en la zona que viertan el agua pluvial percibida por las estaciones en otras cuencas ajenas a las hidroeléctricas. Consecuentemente, las variaciones pluviales promedio de la región podrían verse desfasadas o inconsistentes con las variaciones en los caudales de los ríos.

Este efecto se evidencia al observar el coeficiente de correlación obtenido entre la precipitación pluvial regional y el caudal de los ríos para las 2 hidroeléctricas con estaciones meteorológicas más dispersas y menos representativas, Aguacapa y Jurún Marinalá mientras que para las hidroeléctricas Chixoy y Los Esclavos, donde las estaciones meteorológicas aledañas sí son representativas del agua pluvial que efectivamente surte los cauces de los ríos, se aprecia un coeficiente de correlación mayor de 0.82 y 0.92 respectivamente.

5.3. Nivel de embalses

Para los dos embalses analizados, Chixoy y Amatitlán, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson negativo entre la variable de precipitación pluvial y el nivel de embalse. Según estos resultados, a nivel general de los datos recopilados, el nivel de los embalses tiende a disminuir a medida que la precipitación pluvial incrementa. Sin embargo, esta tendencia es incongruente ya que es ilógico afirmar que mientras menos lluvia haya en la región, mayor será el nivel del agua en embalse. Por esta razón y porque los coeficientes son

estadísticamente débiles (-0.26 y -0.23 respectivamente) se decidió ignorar este resultado y no tomarlo en cuenta en el análisis de la relación general entre cambio climático y la generación hidroeléctrica.

Una posible causa de este resultado es que, en el caso del embalse Chixoy, el nivel de agua es monitoreado y administrado de tal forma que siempre se mantenga dentro de un rango mínimo de 770 y máximo de 803 msnm; si el nivel sube demasiado, la presa abre compuertas que desfogan el agua excedente hacia el cauce del río y si el nivel baja demasiado, cierran compuertas y declaran a la central como indisponible para la generación hidroeléctrica. En el caso del lago de Amatitlán el nivel del agua en el lago se mantiene prácticamente constante en 1,888 msnm todo el tiempo y solo sufre pequeñas variaciones de décimas de metros sobre el nivel del mar de forma estacional. Este fenómeno hace que ambos embalses permanezcan con niveles de agua relativamente constantes en el tiempo y que no reaccionen proporcionalmente a los cambios drásticos en los niveles de precipitación pluvial anual correspondiente a cada uno.

Otro factor que influye en este resultado es el hecho que los embalses están diseñados para retener agua justo en los periodos donde el recurso hídrico es escaso para así poder utilizarlo para generar energía por lo que a pesar de que deje de llover en una temporada determinada, es posible que el nivel del embalse permanezca sin una variación mayor debido a que se está almacenando el agua para usarla más adelante. Este factor también influye en que haya un desfase entre la reacción inmediata de los niveles de los embalses ante las variaciones en la precipitación pluvial de las regiones correspondientes.

En las figuras 21 y 23 de la sección de resultados se observa una tendencia marcada en el nivel de agua de los embalses Chixoy y Amatitlán respectivamente

donde año con año se disminuye el nivel progresivamente desde el mes de febrero llegando al mínimo en mayo y luego comienza a aumentar en junio y llega a su máximo en los meses de septiembre y octubre. Este comportamiento coincide con la temporada tradicional de verano e invierno en Guatemala donde regularmente los meses de marzo y abril son los más secos y los meses de agosto y septiembre son los más copiosos a nivel general como se puede apreciar en las figuras 13 y 17 de la sección de resultados para las regiones de la hidroeléctrica Chixoy y Jurún Marinalá respectivamente.

A partir de este análisis, se determinó que gráficamente sí se aprecia una relación proporcional entre la precipitación pluvial y los niveles de embalse por lo que se tomó esta tendencia como el resultado representativo para las evaluaciones generales y conclusiones del estudio en vez de tomar como indicador el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables.

5.4. Caudales

Se observó que para 3 de las 4 plantas hidroeléctricas analizadas, el caudal máximo registrado en el periodo de tiempo analizado fue en el año 2010 lo cual coincide con los valores de precipitación pluvial, ya que estos también fueron los más altos durante este año. Este comportamiento se le atribuye a la tormenta tropical Agatha que impacto a Guatemala en ese año.

Al analizar el comportamiento de la gráfica de precipitación pluvial acumulada anual en la región del embalse Chixoy y la gráfica de caudal promedio anual en el río que surte a la central se observó que, aunque el coeficiente R^2 de la regresión lineal aplicada en ambas series de datos es bajo por lo que la regresión calculada no se considera representativa, ambas gráficas presentan una tendencia a la baja conforme a los años transcurridos. Este comportamiento

no solo indica que existe una relación proporcional en las variables de precipitación pluvial y caudal de ríos, sino que también es indicio de que esta región del país ha sufrido una disminución en la cantidad de lluvia anual que recibe y por ende ha habido una disminución en los caudales de los ríos de esta región.

Se observó que el caudal de la planta Jurún Marinalá ha sido el más estable de todas las plantas analizadas en el lapso estudiado. Teniendo valores de caudal de agua promedio anual comprendidos entre 4.24 y 8.53 m³/s. Este comportamiento se debe a que el recurso hídrico de esta planta proviene del Río Michatoya, el cual es un efluente del Lago de Amatitlán y el INDE tiene cierto grado de control sobre el caudal de este ya que puede regular la apertura de compuertas hidráulicas ubicadas en la desembocadura del lago. Consecuentemente la generación eléctrica de la planta Jurún Marinalá es la más estable y constante a través del tiempo comparado con las otras 3 centrales analizadas.

5.5. Generación hidroeléctrica

El AMM coordina a todas las centrales de generación eléctrica del país, indicando a cada una los parámetros de operación en función de la demanda horaria prevista. Las centrales son despachadas de acuerdo con un orden de mérito en base a los costos operativos de cada planta. Las centrales hidroeléctricas tienen costos operativos bajos ya que no utilizan combustibles para operar por lo que estas casi siempre son despachadas con prioridad en el orden de mérito para así reducir el precio de la energía generada en el sistema.

Sin embargo, el AMM puede considerar no despachar a una central hidroeléctrica, aunque esta sí esté disponible con el fin de reservar el agua en su

respectivo embalse para que luego sea despachada a su máxima capacidad en la banda horaria de demanda máxima y así ayudar a mitigar el alza de los precios de la energía durante la demanda máxima. Aparte de las pausas o mermas en la generación hidroeléctrica gestionadas por el AMM, las centrales hidráulicas también realizan mantenimientos preventivos y correctivos a las turbinas y maquinaria relacionada con la generación de forma periódica. Estos mantenimientos también hacen que la planta no genere energía a pesar de que sí exista disponibilidad del recurso hídrico (caudal) en ese momento.

La gestión del AMM en el despacho de las centrales hidroeléctricas, los mantenimientos programados y el hecho que las centrales hidroeléctricas tienen una capacidad máxima de agua que pueden turbinar para generar energía a pesar de que haya un caudal alto en el río hacen que la variable de caudal de ríos y la variable de generación eléctrica tengan un coeficiente de correlación de Pearson promedio de 0.78 y no un valor más cercano a 1. A pesar de este fenómeno, el valor de 0.78 es considerado estadísticamente aceptado ya es mayor a 0.6 por lo que evidentemente las 2 variables sí están relacionadas entre sí y se asegura que a mayor caudal de agua disponible en el río, más energía eléctrica se podrá generar.

5.6. Tendencia

Al hacer la prueba estadística de tendencia de Spearman Rank Order Correlation sobre las series de datos analizados se reveló que la temperatura global en efecto tiene una tendencia al alza estadísticamente significativa, lo cual confirma que esta variable seguirá incrementando en los años por venir. Sin embargo, se observó que para todas las demás variables analizadas; es decir, precipitación pluvial, caudal de ríos, nivel de embalses y generación hidroeléctrica (con excepción de la generación hidroeléctrica de la planta Los

Esclavos la cual presentó una tendencia a la baja) no se encontró una tendencia estadísticamente significativa en ninguna de las series a pesar de que la curva de los datos sí tiene una pendiente.

Esto significa que, aunque los datos aparentan tener un cierto comportamiento al alza o la baja, estadísticamente no es lo suficientemente fuerte para ser considerado una tendencia. Este fenómeno se puede deber a que se está analizando una serie de datos relativamente corto (16 años) y que a medida que se incremente el número de años en el periodo analizado, el cálculo de la tendencia probablemente será más significativo estadísticamente.

CONCLUSIONES

1. La temperatura global promedio no ha tenido variaciones drásticas en el periodo de 2007 a 2022, manteniéndose en una oscilación inferior a 0.5 °C entre los datos promedio calculados. Sin embargo, se determinó que la temperatura global se ha mantenido al alza en este periodo y presenta una tendencia significativa a incrementar a una razón de 0.03 °C anuales lo cual tendrá un impacto gradual en los patrones climáticos globales.
2. La precipitación pluvial acumulada anual en promedio para las regiones de las hidroeléctricas Chixoy, Aguacapa, Jurún Marinalá y Los Esclavos presenta una tendencia a la baja estadísticamente no significativa en el periodo de 2007 a 2022. Los niveles de agua en los embalses Chixoy y Amatitlán no presentan variaciones significativas en el tiempo, sin embargo, sí presentan una relación directa con los niveles de precipitación pluvial regional. Los caudales de los ríos Chixoy y Los Esclavos presentan una tendencia a la baja estadísticamente no significativa mientras que los de Aguacapa y Jurún Marinalá tienen una tendencia leve al alza durante el periodo analizado, sin embargo, esta no es estadísticamente significativa.
3. La generación hidroeléctrica acumulada anual para las centrales Chixoy y Aguacapa presentan una tendencia a la baja, pero no significativa estadísticamente, Los Esclavos sí presenta una tendencia significativa a la baja mientras que Jurún Marinalá presenta una tendencia al alza, sin embargo, no es significativa. El promedio de generación de las 4 centrales

tiene una tendencia disminuir a una razón de 6.3747 GWh anuales en el periodo de tiempo de 2007 a 2022, lo cual representa una merma del 0.28 % en la generación promedio anual que han tenido estas centrales en el periodo analizado.

4. Existe una relación inversamente proporcional débil entre la temperatura global y la precipitación pluvial y una relación proporcional fuerte entre la precipitación pluvial y los caudales, así como entre los caudales y la generación hidroeléctrica. Aunque el coeficiente de correlación entre la precipitación pluvial y el nivel de embalses resultó ser negativo, gráficamente se observó una relación positiva entre estas variables.
5. El aumento de la temperatura global incide en los patrones climáticos globales y por ende en la precipitación pluvial de las diferentes regiones de Guatemala. Estas variaciones climáticas disminuyen la cantidad del recurso hídrico disponible en las cuencas del país y limitan la capacidad de generación de las hidroeléctricas que forman parte del Sistema Eléctrico Nacional.

RECOMENDACIONES

1. Considerar el efecto de fenómenos meteorológicos globales como El Niño y La Niña en los datos históricos obtenidos para el periodo analizado, evaluando el impacto que han tenido sobre el comportamiento de las variables, así como analizando los datos atípicos derivados de estos fenómenos para mejorar la exactitud y representatividad de los cálculos de coeficiente de correlación de Pearson entre las variables.
2. Que el INSIVUMEH incremente la cantidad de estaciones meteorológicas en toda la extensión de la Republica de tal forma que existan estaciones representativas de la pluviosidad en todas las regiones del país para poder tener mediciones más específicas de las zonas del país. También que implemente una herramienta de monitoreo de indicadores de cambio climático global, facilitando el acceso a los datos a través de su página web para futuras investigaciones.
3. Ampliar el estudio actual considerando más centrales hidroeléctricas tanto del INDE como de propiedad privada distribuidas en otras regiones de Guatemala y con característica de operación diferentes.
4. Crear un modelo predictivo de futuros escenarios de cambio climático y su impacto en la disponibilidad del recurso hídrico en las cuencas de Guatemala y, por ende, en la generación hidroeléctrica del país.

5. Que el Ministerio de Energía y Minas cree una plataforma virtual donde se tenga acceso a los datos históricos de las variables estudiadas para que sea más fácil obtenerlas en futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (marzo 2022). *Descripción general de los gases de efecto invernadero*. EPA. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Alvarado, E. (2017). *Manual de Medición de Caudales*. Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático.
- Ambientum. (s. f.). *Las precipitaciones atmosféricas*. Autor. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/las-precipitaciones-atmosfericas.asp
- Chilkoti, V. (2019). *Impacts of climate change on hydropower generation and developing adaptation measures through hydrologic modeling and multi-objective optimization*. Universidad de Windsor.
- Enel Green Power. (s. f.). *Central Hidroeléctrica*. Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/central-hidroelectrica>
- Fuentes, J. (2013). *Impacto Hidrológico Asociado al Proceso de Urbanización en la subcuenca del Río Villalobos, Guatemala*. [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Archivo digital. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UCR.000023866>

Garriga, A. *et al.* (2010). *Introducción al Análisis de Datos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Giudici, P. Ingrassia, S. Vichi, M. (2013). *Statistical Models for Data Analysis*. Springer International Publishig.

Grünwaldt, A. (2016). *¿Que podría significar el cambio climático para las hidroeléctricas en Centroamérica?* Banco de Desarrollo Interamericano. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/que-podria-significar-el-cambio-climatico-para-las-hidroelectricas-en-centroamerica/>

Instituto Nacional de Electrificación. (2020). *Un Recorrido Por La Historia del INDE*. Autor. <https://www.inde.gob.gt/blogs/un-recorrido-por-la-historia-del-inde/>

Instituto Nacional de Electrificación. (s. f.). *Plantas de Generación del INDE*. INDE. <https://www.inde.gob.gt/egee/>

Madrid, A. (2015). *Manual Técnico del Cambio Climático y las Energías Renovables*. AMV Ediciones.

Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Informe de Monitoreo Semanal del Desempeño de los Indicadores Energéticos*. Autor.

Mehedi, M. Wyseure, G. (2018). *Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador*. *Water Science and Engineering*, 11(2) 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.07.002>

Naciones Unidas. (s. f.). *¿Qué es el Cambio Climático?* Naciones Unidas.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

Ospina. J. (2009). *Efectos del cambio climático en la generación hidroeléctrica con énfasis en proyecciones de generación-transmisión eléctrica en Colombia*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital. https://repositorio.unam.mx/contenidos/efectos-del-cambio-climatico-en-la-generacion-hidroelectrica-con-énfasis-en-proyecciones-de-generacion-transmision-84311?c=9YjnW5&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_1&as=0

Paoli. C. Malinow. G. (2010). *Criterios Para la Determinación de Crecidas de Diseño en Sistemas Climáticos Cambiantes*. Universidad Nacional del Litoral.

Rössler. C. (2009). *La Crisis Energética en un Mundo con Cambio Climático La Opción Nucleoeléctrica en Argentina*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Martín]. Archivo digital.
<https://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/163>

Saavedra, A. Gutiérrez, D. Del Campo, R. (2019). *¿A qué nos referimos cuando hablamos de la temperatura global?* Agencia Estatal de Meteorología.
<https://aemetblog.es/2019/05/30/a-que-nos-referimos-cuando-hablamos-de-la-temperatura-global/#:~:text=As%C3%AD%2C%20la%20temperatura%20global%20de,de%20energ%C3%ADa%20emitida%20por%20radiaci%C3%B3n>.

Solaun. K. (2019). *Impactos del cambio climático en la generación de energía renovable y en la demanda de electricidad*. [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Archivo digital. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=254313>

Valdivielso. A. (s. f.). *¿Qué es un embalse?* IAGUA. <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-embalse>

VVALNER. (s. f.). *Energía Hidroeléctrica*. VVALNER. <https://vvalner.com/energiahidroelectrica/>

Villón, M. (julio 2002). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Westreicher. G. (2020). *Análisis de datos*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/analisis-de-datos.html>

Williams. M. (2017). *Uso de indicadores para explicar nuestro clima cambiante a las instancias normativas y a la opinión pública*. Organización Meteorológica Mundial. <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/uso-de-indicadores-para-explicar-nuestro-clima-cambiante-las-instancias-0>

APÉNDICES

A continuación, se presentan los apéndices con tablas y figuras de elaboración propia que sirvieron para realizar cálculos y obtener los resultados de la investigación.

Apéndice 1.

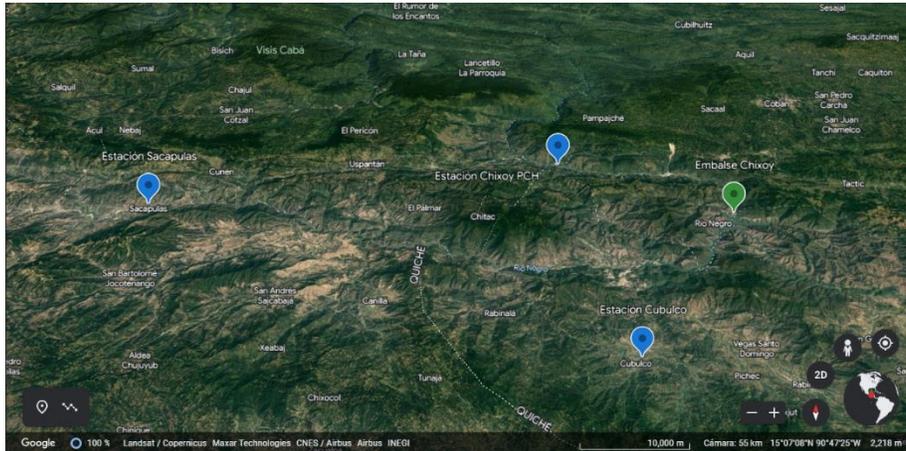
Tabulación de temperatura global promedio por mes para cada año (°C)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	15.02	14.70	14.73	14.76	14.69	14.61	14.60	14.60	14.60	14.58	14.59	14.50
2008	14.30	14.38	14.74	14.53	14.49	14.49	14.60	14.46	14.61	14.67	14.69	14.54
2009	14.64	14.53	14.54	14.61	14.65	14.64	14.74	14.68	14.72	14.65	14.79	14.68
2010	14.75	14.84	14.92	14.84	14.76	14.68	14.63	14.67	14.63	14.71	14.81	14.45
2011	14.52	14.48	14.66	14.65	14.53	14.62	14.71	14.74	14.57	14.66	14.59	14.61
2012	14.49	14.49	14.58	14.72	14.78	14.65	14.58	14.65	14.72	14.79	14.78	14.53
2013	14.71	14.62	14.67	14.54	14.61	14.69	14.60	14.69	14.77	14.69	14.83	14.70
2014	14.76	14.55	14.78	14.80	14.86	14.67	14.58	14.83	14.87	14.81	14.67	14.78
2015	14.86	14.90	14.96	14.76	14.80	14.81	14.73	14.81	14.85	15.09	15.06	15.16
2016	15.17	15.37	15.36	15.11	14.95	14.80	14.84	15.02	14.91	14.89	14.92	14.87
2017	15.03	15.14	15.17	14.94	14.91	14.72	14.82	14.87	14.77	14.90	14.88	14.93
2018	14.82	14.85	14.89	14.89	14.82	14.77	14.82	14.77	14.80	15.02	14.82	14.91
2019	14.93	14.95	15.17	15.01	14.85	14.91	14.94	14.95	14.93	15.01	14.99	15.09
2020	15.17	15.24	15.17	15.13	15.02	14.92	14.90	14.88	14.99	14.89	15.11	14.81
2021	14.82	14.64	14.89	14.76	14.78	14.84	14.92	14.82	14.92	15.00	14.94	14.86
2022	14.91	14.89	15.05	14.84	14.84	14.92	14.93	14.95	14.90	14.97	14.73	14.80

Nota. Datos calculados a partir del indicador de temperatura global de la NASA. Elaboración propia, utilizando Excel.

Apéndice 2.

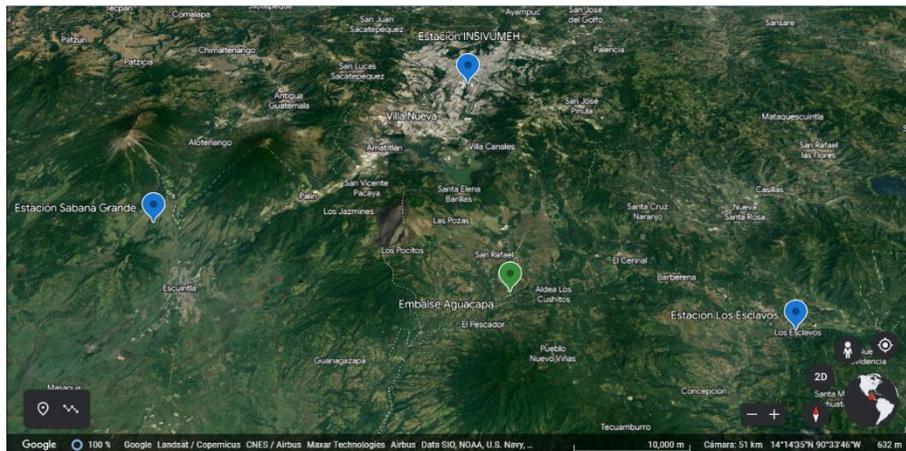
Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH



Nota. Mapa de la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH seleccionadas para la hidroeléctrica Chixoy. Elaboración propia, utilizando la herramienta Google Earth.

Apéndice 3.

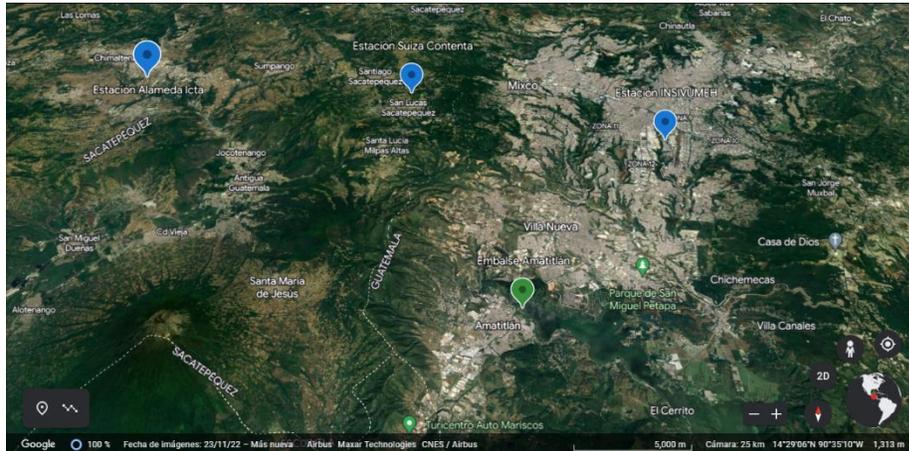
Ubicación geográfica de las estaciones hidroeléctrica Aguacapa.



Nota. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH seleccionadas para la hidroeléctrica Aguacapa. Elaboración propia utilizando la herramienta Google Earth.

Apéndice 4.

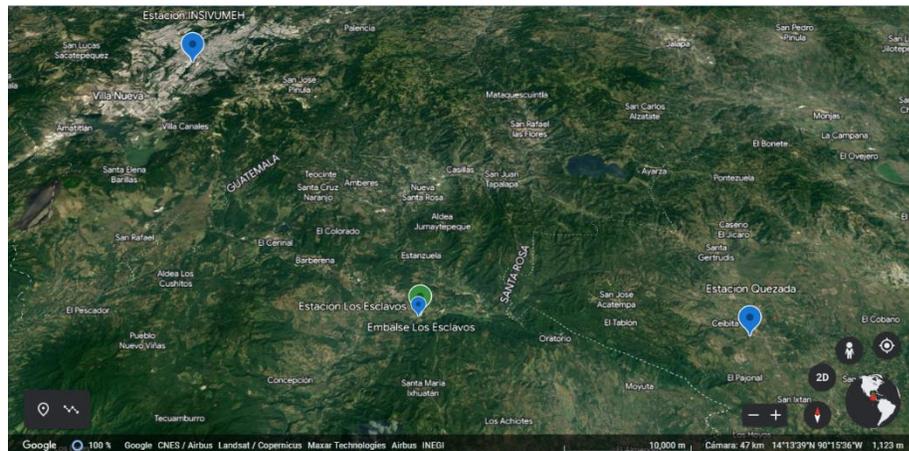
Estaciones meteorológicas del INSIVUMEH hidroeléctrica Jurún Marinalá.



Nota. Mapa de la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH seleccionadas para la hidroeléctrica Jurún Marinalá. Elaboración propia, utilizando la herramienta Google Earth.

Apéndice 5.

Ubicación geográfica estaciones INSIVUMEH hidroeléctrica Los Esclavos



Nota. Mapa de la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH seleccionadas para la hidroeléctrica Los Esclavos. Elaboración propia, utilizando la herramienta Google Earth.

Apéndice 6.

Tabulación de precipitación pluvial acumulada anual por hidroeléctrica (mm).

Año	CHX-H	AGU-H	JUR-H	LES-H
2007	1063.67	2055.45	1088.95	1642.87
2008	1344.10	2298.28	1565.73	1668.13
2009	914.43	1855.40	942.80	1286.73
2010	1589.68	3327.92	1834.57	2297.77
2011	1826.73	2504.13	1476.73	2092.43
2012	1431.57	1452.15	1057.27	1395.00
2013	1746.10	2287.68	1281.82	1664.72
2014	1080.32	2109.35	1187.43	1442.38
2015	874.25	1957.23	1221.97	1375.20
2016	854.77	1569.35	910.47	1259.83
2017	1627.93	2109.55	1035.45	1311.42
2018	897.07	1875.22	926.67	1327.25
2019	992.73	1922.63	1040.97	1279.60
2020	1361.97	2562.03	1208.57	1594.77
2021	1062.17	2267.07	1178.77	1498.77
2022	1296.27	2893.00	1934.23	1707.87

Nota. Precipitación pluvial acumulada anual. Elaboración propia utilizando Excel.

Apéndice 7.

Tabulación de nivel de embalse promedio anual (msnm).

Año	Chixoy	Amatitlán	Año	Chixoy	Amatitlán
2007	792.49	1188.36	2015	789.67	1188.39
2008	787.98	1188.78	2016	783.94	1188.13
2009	789.88	1188.80	2017	785.30	1188.02
2010	789.36	1188.40	2018	791.48	1188.49
2011	788.91	1188.35	2019	786.96	1188.44
2012	789.07	1188.07	2020	787.53	1188.36
2013	789.44	1188.43	2021	784.05	1188.09
2014	790.25	1188.54	2022	791.77	1188.45

Nota. Elaboración propia, utilizando Excel.

Apéndice 8.

Tabulación de caudal promedio anual de ríos para cada hidroeléctrica (m³/s).

Año	CHX-H	AGU-H	JUR-H	LES-H
2007	49.45	16.46	5.49	8.28
2008	89.26	17.57	6.03	9.03
2009	37.64	7.69	4.24	7.78
2010	114.03	17.63	8.53	16.47
2011	95.41	18.10	7.69	13.62
2012	58.53	11.28	6.33	9.84
2013	64.24	12.23	7.21	10.25
2014	59.41	10.24	5.48	9.90
2015	36.00	10.21	8.26	9.21
2016	27.02	5.93	7.64	7.96
2017	82.72	9.67	7.43	8.29
2018	34.68	6.02	5.90	7.43
2019	29.07	11.81	5.75	7.56
2020	50.69	21.43	7.15	9.13
2021	43.27	16.76	6.67	9.54
2022	67.03	32.85	8.45	11.80

Nota. Elaboración propia, utilizando Excel.

Apéndice 9.

Tabulación de generación eléctrica acumulada anual para cada hidroeléctrica

Año	CHX-H	AGU-H	JUR-H	LES-H
2007	1406.2234	267.7722	241.5642	58.9272
2008	1734.7777	308.2016	268.6614	63.0944
2009	1417.9459	244.5728	191.4027	49.1363
2010	1691.8320	317.0233	276.2886	44.3366
2011	1794.1130	312.7705	318.7412	50.8073
2012	1798.3809	312.0405	294.0201	63.0272
2013	1743.4557	330.0091	309.2063	58.0201
2014	1790.8271	298.7381	292.4598	57.4948
2015	1205.4398	268.5268	278.7407	45.6818
2016	980.0045	259.4202	255.7985	41.6965
2017	1551.7461	253.3849	246.8195	41.3358
2018	1296.6112	262.5025	254.4348	40.1197
2019	907.3875	263.4156	241.4413	39.5110
2020	1266.6885	311.5334	257.0405	37.1059
2021	1439.8641	304.0815	266.4828	54.2903
2022	1634.1543	310.3350	277.5871	53.1224

Nota. Generación eléctrica acumulada anual. Elaboración propia, utilizando Excel.