



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:
MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN RECURSOS
HÍDRICOS

TEMA:

“ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LAS MICROCUENCAS
HIDROGRÁFICAS DE ALAO, MAGUAZO Y CEBADAS EN EL PERÍODO 1981-
2020 CON EL USO DE RCLIMDEX Y CLIMPACT.”

AUTOR:

Ing. Kotaro Kasai

TUTOR:

Ing. Ivan Ríos García, Ph.D.

Riobamba – Ecuador

2025

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LAS MICROCUENCAS HIDROGRÁFICAS DE ALAO, MAGUAZO Y CEBADAS EN EL PERÍODO 1981- 2020 CON EL USO DE RCLIMDEX Y CLIMPACT.”** ha sido elaborado por el Ingeniero Kotaro Kasai, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 28 de enero, de 2025



Ing. Iván Ríos García, Ph.D.

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Kotaro Kasai**, con número único de identificación **TT7311078**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Índices de Cambio Climático para las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas en el período 1981- 2020 con el uso de RClindex y ClimPACT” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, enero de 2025



Ing. Kotaro Kasai

N.U.I. TT7311078

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo inquebrantable durante todo este camino académico, quienes siempre han sido mi mayor inspiración para superar los retos.

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo, docentes, y de manera especial a mi tutor: Ing. Iván Ríos García, Ph.D., por su valiosa orientación, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo del desarrollo de este proyecto. Gracias por su dedicación y por enseñarme a valorar la rigurosidad y la disciplina en la investigación.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo y motivación, así como por los momentos compartidos que hicieron más llevadero este proceso. También extendo mi gratitud a las instituciones que facilitan la información, los recursos y las herramientas necesarias para la ejecución de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, han contribuido a la realización de este proyecto. Este logro no habría sido posible sin ustedes.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto con todo mi amor y gratitud a mis padres, quienes han sido mi mayor fortaleza y ejemplo de perseverancia. Este logro es tan suyo como mío, porque sin su apoyo constante y sacrificios, este sueño no habría sido posible.

A mi familia en general, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

También dedico este trabajo a mis amigos y colegas que me acompañaron en este camino, compartiendo aprendizajes, risas y desafíos.

Finalmente, lo dedico a todas las personas que luchan por superar sus límites y alcanzar sus metas, recordándoles que, con esfuerzo y dedicación, todo es posible.

Kotaro Kasai

ÍNDICE GENERAL

Certificación del Tutor.....	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Dedicatoria.....	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas.....	x
Índice de Figuras.....	xi
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
Introducción.....	1
Capítulo 1.....	3
1.1 Generalidades.....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación de la investigación.....	6
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica.....	10
2.1. Antecedentes Investigativos.....	10
2.2 Fundamentación Legal.....	18
2.2.1 Legislación internacional.....	18
2.2.2 Legislación nacional.....	19

2.2.3	Legislación de recursos hídricos	20
2.3	Fundamentación Teórica.....	21
2.3.1	Climatología	21
2.3.2	Variabilidad climática	21
2.3.3	Cambio climático	22
2.3.4	Sistema Climático	24
2.3.5	Cambio climático abrupto	24
2.3.6	Elementos del clima	25
2.3.7	Microcuenca hidrográfica	27
2.3.8	Geomorfología de la cuenca hidrográfica	27
2.3.9	Índices del cambio climático.....	27
Capítulo 3	Diseño Metodológico	32
3.1.	Enfoque de la Investigación.....	32
3.2.	Diseño de la Investigación.....	32
3.3.	Tipo de Investigación.....	33
3.3.1.	Explicativa	33
3.3.2.	Longitudinal.....	33
3.4.	Nivel de Investigación	33
3.4.1.	Descriptiva	33
3.4.2.	Teórica	34
3.5.	Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos.....	34
3.6.	Etapa 1: Análisis de las características geomorfológicas e hidrológicas de las microcuencas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, con el propósito de comprender las posibles evidencias de cambio climático en la región.	35
3.6.1	Descripción del área de estudio:.....	35

3.6.2	Ubicación geográfica.....	36
3.6.3	Características geomorfológicas e hidrológicas.....	37
3.6.4	Clima y vegetación.....	37
3.6.5	Vulnerabilidad al cambio climático	37
3.7	<i>Etapa 2: Determinación de las tendencias actuales de la temperatura, precipitación y extremos climáticos en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, mediante el uso del Software RClimdex para determinar la variabilidad climática actual.</i>	38
3.7.1	Descripción de las herramientas RClimdex y Climpact.....	38
3.7.2	Preparación y validación de datos climáticos	40
3.7.3	Variables seleccionadas.....	41
3.7.4	Uniformización de datos a formato estándar.....	41
3.7.5	Control de calidad de datos	43
3.7.6	Cálculo de índices climáticos y sus tendencias.....	43
3.8	Proyección de escenarios futuros de precipitación y temperatura en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, utilizando el software RClimdex para determinar variabilidad climática para el año 2050.....	45
3.8.1	Selección de Escenario Climático Relevante	45
3.8.2	Realizar las proyecciones utilizando herramientas RClimdex y Climpact para el año 2050.....	47
	Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados.....	48
4.1	Descripción de la zona de estudio.....	48
	Figura 3: Ubicación de la microcuenca del río Alao	51
	Fuente: Autor.....	53
4.2	Información Ambiental Básica	55
4.3	Homogenización y confiabilidad de las series temporales	58

4.4 Precipitación No nula (Non-Zero Prec)	65
4.5 Temperatura Máxima Diaria (TX).....	65
4.6 Temperatura Mínima Diaria (TN)	66
4.7 Rango Diurno de Temperatura (DTR).....	66
4.8 Índices de extremos climáticos	66
4.9 Escenario RCP4.5 para analizar la variabilidad de precipitación y temperatura en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas para el año 2050.	84
4.10 Discusión de los Resultados: Análisis del cambio Climático en las microcuencas de estudio.....	90
Capítulo 5 Conclusiones.....	93
Recomendaciones	94
Referencias Bibliográficas	95
Apéndice.....	103
Apéndice A. Parámetros de red de la microcuenca del río Cebadas	103
Apéndice B. Parámetros de red de la microcuenca del río Maguazo	103
Apéndice C. Parámetros de red de la microcuenca del río Alao	104
Apéndice D. Caracterización de las unidades hidrográficas en el software ArcMap	104
Apéndice E. Cambio de tendencia en las microcuencas.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 conexión entre los índices y el cambio climático	31
Tabla 2: Parámetros morfométricos de la Unidad Hidrográfica Maguazo	50
Tabla 3: Parámetros morfométricos de la Unidad hidrográfica Alao	52
Tabla 4: Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Cebadas	54
Tabla 5: Índices de extremos climáticos con RClimdex	67
Tabla 6: Índices de extremos climáticos con ClimPACT	69
Tabla 7: Escenario Global RCP4.5 para 2050	84
Tabla 8: Cambio en los valores promedio de temperatura mínima y máxima	84
Tabla 9: Cambio en los valores promedio de precipitación (mm)	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Microcuencas de Cebadas, Maguazo y Alao	36
Figura 2: Ubicación de la microcuenca del río Maguazo	49
Figura 3: Ubicación de la microcuenca del río Alao	51
Figura 4: Ubicación de la microcuenca del río Cebadas	53
Figura 5: Cálculo del porcentaje de pendientes de las unidades hidrográficas	55
Figura 6: Identificación de la cobertura vegetal de las microcuencas Cebadas y Alao	57
Figura 7: Identificación de la cobertura vegetal de las microcuencas Maguazo	57
Figura 8: Series temporales microcuenca Alao	59
Figura 9: Series temporales microcuenca Cebadas	60
Figura 10: Series temporales microcuenca Maguazo	61
Figura 11: Serie temporal homogenizada Alao	62
Figura 12: Serie temporal homogenizada Cebadas	63
Figura 13: Serie temporal homogenizada Maguazo	63
Figura 14: Valores atípicos mensuales de las microcuencas	64
Figura 15: Índices de CDD de las Unidades Hidrográficas	71
Figura 16: Análisis de los índices de la precipitación total anuales de las microcuencas	73
Figura 17: R10MM en las microcuencas, Alao, Maguazo y Cebadas	75

Figura 18: Análisis de los índices R95P en las Unidades Hidrográficas	77
Figura 19: Análisis del cálculo de los índices R99P de las microcuencas	79
Figura 20: Análisis de los índices RX en las Unidades Hidrográficas	81
Figura 21: Análisis de los índices SDII en las Unidades Hidrográficas	83
Figura 22: Índice días consecutivos secos en las microcuencas para períodos proyectados	86
Figura 23: Índice de precipitación estandarizado y evapotranspiración para las microcuencas de estudio en un período proyectado	88

RESUMEN

El presente estudio analiza la caracterización morfométrica, climática e hidrológica de las microcuencas de los ríos Maguazo, Alao y Cebadas, ubicadas en la región interandina del Ecuador, con el objetivo de evaluar su respuesta frente al cambio climático. A través de herramientas especializadas como RClimdex y ClimPACT, se calcularon índices de extremos climáticos para el período 1981-2020, incluyendo SDII, RX1day, RX5day, PRCPTOT y CDD. Los resultados revelan diferencias significativas en la dinámica hídrica de las microcuencas. La unidad hidrográfica del río Maguazo, con un área reducida y forma alargada, presenta tiempos de escurrimiento prolongados, mientras que las microcuencas de los ríos Alao y Cebadas, con mayor tamaño y pendientes pronunciadas, muestran respuestas hidrológicas más rápidas. Se identificaron tendencias consistentes de incremento en la intensidad y frecuencia de lluvias extremas, así como un aumento en la precipitación total anual, lo que refleja el impacto del cambio climático en la región. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas y destacan la necesidad de una gestión integral de microcuencas, monitoreo continuo y políticas de adaptación al cambio climático. Este trabajo contribuye al entendimiento de la dinámica hídrica regional y proporciona una base para la toma de decisiones en la planificación y manejo de recursos hídricos.

Palabras claves: *Cuencas, índices climáticos, cambio climático, morfometría, hidrología, región interandina.*

ABSTRACT

This study analyzes the morphometric, climatic, and hydrological characterization of the Maguazo, Alao, and Cebadas River micro-watersheds located in Ecuador's inter-Andean region to assess their response to climate change. Using specialized tools such as RClimdex and ClimPACT, extreme climate indices for the 1981–2020 period were calculated, including SDII, RX1day, RX5day, PRCPTOT, and CDD. The results reveal significant differences in hydrological dynamics among the micro-watersheds. The Maguazo watershed, with a small, elongated area, exhibits prolonged runoff times, while the Alao and Cebadas watersheds, characterized by larger areas and steep slopes, display faster hydrological responses. Consistent trends of increased intensity and frequency of extreme rainfall events, as well as annual total precipitation, were identified, reflecting the impact of climate change in the region. These findings align with previous studies and underscore the importance of integrated watershed management, continuous monitoring, and climate change adaptation policies. This research contributes to understanding regional hydrological dynamics and provides a foundation for decision-making in water resource management and planning.

Keywords: *Watersheds, climate indices, climate change, morphometry, hydrology, inter-Andean region.*

Reviewed by:



Lic. Eduardo Barreno Freire. Msc.

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604936211

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la variabilidad climática son problemas de gran relevancia que afecta a toda la humanidad. En las últimas décadas, se ha observado una notable alteración en la atmósfera terrestre, principalmente debido al uso excesivo de combustibles fósiles. Este fenómeno ha provocado un aumento en los niveles de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales han influido directamente en el cambio climático a nivel global (Fernanda et al., 2023). Según el sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la temperatura media global ha incrementado aproximadamente 0.85 °C entre 1880 y 2012, como resultado del incremento de los GEI (IPCC, 2023).

Las unidades hidrográficas desempeñan un papel crucial en la gestión y distribución del agua, siendo especialmente sensibles a las variaciones climáticas que afectan su dinámica hidrológica. En este contexto, el análisis de los índices de cambio climático es fundamental para comprender las transformaciones que están ocurriendo y para implementar estrategias de adaptación y mitigación (Hernández, 2024).

Este estudio se centra en las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas, ubicadas en una región de alta biodiversidad y relevancia hídrica en Ecuador, presentan características geomorfológicas e hidrológicas particulares que las convierten en objetos de estudio prioritarios frente al cambio climático. Estas áreas han sido testigos de patrones climáticos cambiantes durante las últimas décadas, los cuales afectan la disponibilidad y calidad del agua, así como la estabilidad de los ecosistemas locales y las actividades humanas (Núñez, 2020).

El período de estudio 1981-2020 se elige para analizar las tendencias históricas de temperatura, precipitación y eventos extremos mediante herramientas robustas como RCLimdex y ClimPACT, desarrolladas para el cálculo y análisis de índices climáticos. Estas herramientas permiten evaluar los cambios en los indicadores climáticos definidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), proporcionando una base científica para la identificación de evidencias del cambio climático (Rivera, 2022).

Este trabajo considera la proyección de escenarios futuros de precipitación y temperatura para el año 2050, en base a datos derivados de modelos climáticos globales y regionales ajustados a las condiciones locales. Estas proyecciones son esenciales para entender las posibles implicaciones del cambio climático y para el diseño de estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos en las microcuencas (Alberca, 2022).

La finalidad del estudio es obtener los índices de cambio climático en las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas durante el periodo 1981-2020, utilizando las herramientas ClimPACT y RCLimdex. Este análisis se complementa con el cumplimiento de los objetivos específicos que incluyen: el análisis geomorfológico e hidrológico de las microcuencas, la evaluación de las tendencias climáticas actuales y la proyección de escenarios futuros. Los resultados obtenidos servirán de referencia para la formulación de políticas y estrategias adaptativas frente al cambio climático en la región.

CAPÍTULO 1

1.1 Generalidades

El cambio climático es uno de los desafíos importantes a nivel global, afectando significativamente los patrones climáticos y, por ende, la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos. En Ecuador, estas alteraciones tienen un impacto directo en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, ubicadas en la provincia de Chimborazo. Estas microcuencas son fundamentales para el abastecimiento de agua potable, riego agrícola y conservación de la biodiversidad local (GADPCH,2014).

Estas microcuencas forman parte de la subcuenca del río Chambo, que a su vez pertenece a la Demarcación Hidrográfica de Pastaza y contribuyen al sistema hidrográfico del Amazonas. La región se caracteriza por su topografía montañosa y una diversidad climática que la hace especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático.

Estudios recientes han evidenciado cambios en los patrones de precipitación y temperatura en la región andina de Ecuador, afectando la oferta hídrica y los ecosistemas locales (MAATE,2023). A nivel provincial y cantonal, se han observado tendencias en la variabilidad climática que influyen en la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades agrícolas.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo analizar los índices de cambio climático en el período 1981-2020, utilizando herramientas especializadas como RClindex y ClimPACT. Estas herramientas permiten calcular indicadores climáticos estandarizados, facilitando la detección de tendencias y extremos climáticos (IPCC,2021). El análisis de estos índices es esencial para comprender la magnitud y dirección de los

cambios climáticos en las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas, y para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación adecuadas.

1.2 Planteamiento del problema

El cambio climático representa una amenaza significativa para la disponibilidad, calidad y cantidad de agua, lo que a su vez genera riesgos importantes para el acceso a este recurso vital y el saneamiento básico en el Ecuador. Los cambios hidrológicos inducidos por el cambio climático, como los incrementos de temperatura y las alteraciones en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones, están afectando significativamente la planificación y la explotación sostenible de los recursos hídricos (Bautista et al., 2020).

El informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) destaca algunas preocupaciones “Existe la probabilidad de más del 50% de que el aumento de la temperatura global alcance o supere los 1,5°C entre 2021 y 2040 en los escenarios estudiados (Rivas & Conde, 2022). Este aumento en la temperatura tiene implicaciones directas en los ciclos hidrológicos, modificando la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas e inundaciones repentinas, lo que dificulta aún más la gestión y planificación de los recursos hídricos.

En la actualidad el cambio climático, el crecimiento demográfico y la disponibilidad del agua son preocupaciones de primer orden en la temática ambiental (Salas, 2023). El uso y demanda del agua se incrementa en función del crecimiento de la población y la calidad del recurso, así también, en las corrientes superficiales es afectada negativamente en su proceso de autodepuración debido al aumento de la temperatura (Larrea & Maldonado, 2022).

El cambio climático es innegable e incierto, sus consecuencias e impactos en el recurso hídrico tiene una alta tasa de incertidumbre y constituye un problema para la toma de decisiones por parte de las autoridades nacionales y locales. A nivel global y regional, los modelos climáticos existentes entregan información y protección del clima, sin embargo, a nivel urbano o nivel de microcuenca hidrográfica la información es reducida (Morán, 2020).

En este contexto, a nivel local, en las microcuencas hidrográficas estratégicas como Alao, Maguazo y Cebadas, ubicadas en el Cantón Riobamba de la provincia de Chimborazo, se evidencia la necesidad de contar con datos e índices de cambio climático específico. Estos datos son fundamentales para comprender y anticipar los impactos de este fenómeno en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, especialmente en lo que respecta al abastecimiento de agua potable y el riego agrícola, que son vitales para la subsistencia de las comunidades locales (Hernández, 2024).

Además, la Empresa Pública de Agua Potable de Riobamba (EP-EMAPAR), la Empresa Eléctrica de Riobamba (EERSA S.A.) y los Gobiernos Parroquiales de Pungalá y Cebadas consideran necesario ampliar el conocimiento sobre el clima en estas microcuencas debido a su carácter multipropósito (Porrás & Jácome, 2020). Las principales variables meteorológicas que deberían ser analizadas, especialmente en términos de sus valores extremos, son la precipitación y la temperatura del aire, con un énfasis particular en su tendencia (Zavala, 2024). Esto permitirá fomentar la realización de proyecciones orientadas hacia un desarrollo sostenible para sectores clave como el abastecimiento de agua para consumo humano en la ciudad de Riobamba, la generación de energía eléctrica regional, la agricultura y ganadería, principales fuentes de materia prima en el país.

A fin de comprender el comportamiento de los elementos meteorológicos, sus valores extremos, y las consecuencias asociadas a estos, se plantea la siguiente pregunta de investigación o hipótesis:

¿Los cambios observados en los patrones de precipitación y temperatura en el período y análisis de 40 años pueden apoyar la construcción de indicadores que evidencian cambio climático en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas?

1.3 Justificación de la investigación

La realidad del cambio climático es indiscutible, con evidencia visible en las transformaciones que el planeta ha experimentado a lo largo del tiempo (Tuaza et al., 2023). Estos cambios se reflejan en el aumento del nivel del mar, el deshielo de casquetes polares y glaciares, las fluctuaciones extremas de temperatura y las olas de frío y calor, todos ellos claros indicios de su impacto global (Almeida et al., 2023).

Según el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), el periodo entre 1995 y 2021 se encuentra entre los más cálidos registrados desde 1850. Cambios en la temperatura del océano, variaciones en los ecosistemas, la reducción de las estaciones frías, el retroceso de los glaciares y el aumento del nivel del mar son pruebas contundentes de que el planeta está experimentando un calentamiento (Alabar, 2020).

Para mitigar el cambio climático, se requiere un esfuerzo global significativo. Aunque el Convenio de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, con la participación de 189 países, representa un paso importante, es esencial también emprender acciones locales.

En Ecuador, estudios han mostrado una tendencia al alza en las temperaturas, con incrementos de al menos 0,1 °C por década. Esto ha conllevado un aumento en el número de días y noches cálidas en un 1-2% por década, mientras que los días y noches frías han disminuido entre un 1-1,5% por década (Armenta, 2020).

Los cambios climáticos no solo afectan al medio ambiente, sino también, al bienestar humano, la salud, la economía, y sectores como la agricultura, ganadería y pesca. En la sierra centro de Ecuador, los fenómenos hidrometeorológicos están ocurriendo con mayor frecuencia e intensidad, lo que subraya la relevancia del cambio climático y sus consecuencias económicas, afectando la calidad de vida de los habitantes (Bennett, 2023).

Un aspecto crítico es el agua, puesto que la región andina de Ecuador enfrenta una situación particular, debido a que gran parte de su población vive en zonas donde la escasez de agua es cada vez más preocupante. Por lo tanto, es fundamental promover el uso adecuado y la distribución eficiente del agua, así como la conservación de sus fuentes.

Este estudio se enfocó en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas en la provincia de Chimborazo, Ecuador. Estas microcuencas son vitales para el suministro de agua potable a la ciudad de Riobamba, el riego de las comunidades locales y la generación de energía hidroeléctrica en la región.

La conexión entre el ciclo hidrológico y el cambio climático se manifiesta en los riesgos climáticos relacionados con el agua, como la escasez, el exceso y la contaminación. Los fenómenos climáticos extremos y la variabilidad climática tienen un impacto directo en

el sector del agua, saneamiento e higiene, lo que resalta la necesidad de disponer de datos e índices climáticos que reflejen esta realidad a nivel de microcuena (Álvarez, 2020).

El objetivo central de esta investigación es calcular los índices de cambio climático propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) del IPCC. A través del uso de datos de plataformas satelitales, este estudio busca entender mejor los efectos del cambio climático en el comportamiento hidrológico de las microcuenas. Además, permitirá analizar los impactos de las anomalías asociadas a fases extremas de variabilidad y cambio climático.

Se espera que los resultados obtenidos evidencien la existencia o no de los efectos del cambio climático en las microcuenas estudiadas. La información resultante será clave para la planificación y gestión de los recursos hídricos, considerando las variaciones en los patrones de precipitación y el aumento de fenómenos climáticos extremos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Calcular los Índices de Cambio Climático para el período 1981-2020 en las microcuenas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas mediante el uso de las herramientas ClimPACT y RClindex.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características geomorfológicas e hidrológicas de las microcuenas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, con el propósito de comprender las posibles evidencias de cambio climático en la región.

- Determinar las tendencias actuales de la temperatura, precipitación y extremos climáticos en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, mediante el uso del Software RClindex para determinar la variabilidad climática actual.
- Proyectar escenarios futuros de precipitación y temperatura en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, utilizando el software RClindex para determinar variabilidad climática para el año 2050.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA

2.1. Antecedentes Investigativos

Los estudios sobre cambio climático han ganado relevancia en las últimas décadas debido a la necesidad de comprender cómo las variaciones en los patrones ambientales afectan a los ecosistemas y a los recursos hídricos. A nivel global, investigaciones como las realizadas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) destaca un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, tales como inundaciones y sequías, asociados con el calentamiento global. En el ámbito regional, en América Latina y Ecuador, se han realizado estudios que identifican la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas ante estos fenómenos.

En Ecuador, investigaciones previas han explorado los impactos del cambio climático en cuencas mayores, pero existe una brecha de conocimiento en cuanto a las microcuencas hidrográficas como Alao, Maguazo y Cebadas. Estas unidades hídricas se caracterizan por su importancia en el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica, lo que subraya la necesidad de evaluar su vulnerabilidad ante el cambio climático mediante herramientas estandarizadas como RClindex y ClimPACT.

El informe “Estado del Clima en América Latina y el Caribe”, desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial (OMN, 2023), nos convoca a una reflexión mediante el análisis de las siguientes conclusiones, el año 2023 fue el año más cálido del que se tiene constancia.

Las crecidas y deslizamientos de tierra provocados por las intensas precipitaciones causaron multitud de víctimas mortales y pérdidas económicas en toda la región. En São Sebastião (Brasil) se acumularon 683 mm de lluvia en 15 horas, lo que produjo un corrimiento de tierras que provocó el fallecimiento de al menos 65 personas, así también, el calor extremo durante todo el año ocasionó consecuencias para la salud, como el exceso de mortalidad entre 2000 y 2019, del orden de 36695 defunciones.

El estudio titulado “Adaptación al Cambio Climático y Justicia Climática” aborda las diversas perturbaciones y presiones climáticas que afectan a América Latina y el Caribe (ALC). Sus autores concluyen que entre 1930 y 2019, la región experimentó aproximadamente 840 eventos climáticos adversos, siendo las inundaciones, tormentas y sequías los más comunes (Rivas & Conde, 2022). América Latina se posiciona como la segunda región del mundo más vulnerable a desastres climáticos, especialmente aquellos de rápida evolución, como inundaciones y huracanes (Ramos et al, 2020). Así mismo, fenómenos de evolución lenta, como el aumento de las temperaturas y la elevación del nivel del mar, también son frecuentes en la región (Almeida et al., 2023). Estos eventos ya están impactando los medios de vida y los bienes de las personas, especialmente aquellas en condiciones de vulnerabilidad.

El estudio anticipa que el cambio climático acelerará e intensificará los impactos de los fenómenos relacionados con el clima en la región de ALC, manifestándose en un incremento de las temperaturas extremas, mayor incidencia de sequías y alteraciones en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones (OMN, 2023). Estos cambios afectan

directamente las actividades agrícolas, los servicios ecosistémicos y la producción de cultivos, lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria, hídrica y la salud de la población.

Pita (2022) menciona: El cambio climático se considera el mayor desafío que enfrenta la humanidad en este siglo. En el estudio “Detección de Cambio Climático en la cuenca del río Conchos mediante índices climáticos”, se analizaron 6 de los 27 índices propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), además de integrar el análisis del Índice de Precipitación Estándar (SPI) y el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estándar (SPEI). Estos índices fueron calculados utilizando datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, recogidos entre 1951 y 2010.

Los datos fueron sometidos a rigurosos controles de calidad y homogeneización de 106 estaciones de precipitación y 97 estaciones de temperatura ubicadas en la cuenca del río Conchos, utilizando la librería CLIMATOL en el lenguaje R (Chávez, 2024). Esto permitió crear una malla homogeneizada de las tres variables climáticas durante un período de 60 años. Se llevaron a cabo análisis de tendencias lineales y su significancia estadística, destacando un aumento en la temperatura mínima extrema en los años recientes.

Con los índices normalizados, se identificaron dos periodos de sequía intensos en las décadas de 1950 y 1990, que se prolonga hasta principios del siglo XXI. Estos resultados concuerdan con las observaciones del IPCC, que señalan una mayor frecuencia y duración de eventos extremos húmedos y secos en las últimas décadas.

Alabar (2020), en el artículo denominado “Análisis Temporal de Índices Climáticos de Precipitación de las Provincias de Jujuy y Salta”, se analizó la creciente frecuencia de eventos extremos asociados. Este estudio tiene como objetivo evaluar índices de precipitación y analizar sus tendencias en seis estaciones meteorológicas, abarcando los periodos de 1957-2017, 1968-2017 y 1987-2017.

Utilizando series de datos diarios de precipitación, se calcularon los índices climáticos mediante el programa R-Climdex, y se analizaron sus tendencias y significancia estadística empleando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall.

Las estaciones de Orán Aero y La Quiaca Aero mostraron tendencias positivas significativas en los índices de cantidad máxima de lluvia en un día (Rx1day) y en cinco días consecutivos (Rx5day) durante el periodo 1957-2017. Los incrementos esperados para estos índices son de 0,289 mm/año y 0,489 mm/año, respectivamente.

Aragón (2020), menciona en el artículo denominado “Estudio de Registros Extremos de Precipitación asociados al Cambio Climático en el Parque Nacional Cultural Chingaza, durante el período de 1981 al 2010”, el comportamiento estadístico y espacial de la precipitación, así como de los extremos climáticos definidos por el ETCCDI, utilizando el paquete estadístico RCLimDex en el Parque Nacional Natural Chingaza. El análisis abarcó un área de hasta 12 km de perímetro, basado en 19 series climatológicas diarias durante el período 1981-2010. Para la estimación de datos faltantes, se aplicó el método de ponderación de la distancia inversa en RStudio, seguido de un riguroso control de calidad con la herramienta RCLimTool.

El análisis reveló un régimen pluviométrico monomodal, con un pico de precipitación en el segundo cuatrimestre del año. Se observó que la precipitación promedio anual es menor en el noroeste del parque, donde las altitudes alcanzan los 3100 m.s.n.m., y aumenta hacia el sudeste. Durante el período de referencia climatológica, los índices extremos de precipitación que mostraron una tendencia positiva fueron: Rx1day, SDII, R95p, y más acentuadamente en CDD en comparación con CWD. En contraste, se registró una tendencia negativa en los índices Rx5day, R10, y PRCPTOT.

La investigación “Efectos del Cambio Climático sobre eventos extremos en dos cuencas interandinas representativas de Bolivia” (Villazon & Lipa, 2022). Evaluó los cambios proyectados en eventos climáticos extremos, específicamente en la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima, como consecuencia del cambio climático en dos cuencas interandinas características, una perteneciente a la cuenca Amazónica (Rurrenabaque) y la otra a la cuenca del Plata (San Josecito) en Bolivia. La metodología empleada se basa en la aplicación del método de escalamiento estadístico *Quantile Delta Mapping* (QDM) a ocho modelos climáticos regionales (RCM) que fueron generados mediante el escalamiento dinámico RCA4 en el marco del proyecto *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX). Las proyecciones climáticas abarcan el futuro cercano (2036-2065) y el futuro lejano (2070-2099), bajo dos escenarios de trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 y RCP 8.5), comparados con el período de control 1980-2009.

Los datos observados de temperatura para el período de control provienen del Balance Hídrico Superficial de Bolivia, mientras que los datos de precipitación se

obtuvieron de la grilla meteorológica GMET. El estudio proporcionó una proyección conjunta de los índices extremos climáticos propuestos por el *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), revelando una tendencia general al alza en la mayoría de los índices en ambas cuencas estudiadas.

La investigación desarrollada en el Estado de Chiapas denominada “Índices de Cambio Climático en el Estado de Chiapas, México, en el período 1960 - 2009” (Orozco & Mora, 2020). Resume que, en las últimas tres décadas, los periodos cálidos han superado los valores promedio históricos.

En este estudio, se determinó la tendencia de los índices climáticos basados en temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas del estado de Chiapas, México, durante el período 1960-2009. Para el análisis, se utilizaron series históricas de datos provenientes de 16 estaciones climatológicas distribuidas en la región, empleando el módulo RClimDex para la obtención de los índices climáticos.

Los resultados mostraron que el número de estaciones con una tendencia positiva significativa superó al de aquellas con tendencia negativa significativa. De las 16 estaciones analizadas y los 8 índices considerados, 42 combinaciones presentaron una tendencia positiva significativa, mientras que solo 18 mostraron una tendencia negativa significativa. Se observó que el 63% de las estaciones analizadas presentaron una tendencia positiva para la temperatura máxima extrema (TXx), el 50% para el rango diurno de temperatura (DTR), el 44% para la temperatura máxima más baja (TXn), el 38% para el número de días con temperatura mínima inferior a 20°C (TR20), el 31% para la temperatura mínima más alta

(TNx), y el 25% para la temperatura mínima extrema (TNn). Solo el 6% mostró una tendencia positiva significativa para el número de días con temperatura máxima superior a 25°C (SU25) y para el número de días consecutivos sin lluvia (CDD).

El mapeo de los resultados no reveló tendencias concentradas en ninguna zona específica del estado. Todos los índices basados en la temperatura mostraron patrones de comportamiento similares y consistentes, reflejando una tendencia general hacia el calentamiento. Estos hallazgos son coherentes con estudios previos realizados tanto en la región como en otras partes del mundo.

Vincenti (2020), concluye que, debido a su ubicación geográfica y características locales, Ecuador, un país situado en la costa occidental de América del Sur, presenta una alta vulnerabilidad frente a eventos climáticos extremos, lo que puede incrementar las pérdidas económicas y humanas asociadas a estos riesgos. Este estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de los eventos extremos diarios de temperatura y precipitación durante el periodo de 1965 a 2015. Después de realizar un exhaustivo control de calidad utilizando el paquete Climatol, se calcularon 12 índices de Cambio Climático recomendados por el ECTCCDI a través del software RClindex. Las tendencias fueron obtenidas mediante regresión lineal utilizando el método de mínimos cuadrados. Los resultados revelan un aumento significativo en la temperatura máxima promedio (Tmaxmedio), la temperatura mínima promedio (Tmin media), y la temperatura mínima más alta (TNX) en toda el área de estudio. Por otro lado, los índices de precipitación muestran una variación generalizada en toda la zona analizada.

La Tesis de Grado denominada “Índices de Cambio Climático y su Afectación a la Agricultura, Caso de Estudio Cantón Guano”, examina los posibles impactos del cambio climático en la agricultura de Ambato y sus alrededores, utilizando los índices recomendados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (ECTCCDI). Para el cálculo de estos índices, se utilizaron datos diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación de cuatro estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio: Puyo (M008), Píllaro (M0127), Pedro Fermín (M0128), y Querochaca (M0258). Los registros, que abarcan un periodo de 35 a 55 años, fueron proporcionados por el INAMHI. La conversión de formatos se llevó a cabo utilizando Python, seguido de un riguroso control de calidad de las series climáticas, y finalmente, los cálculos se realizaron en RClmDex.

Los resultados indican que, en la región de la Sierra (Ambato y sus alrededores), los efectos del cambio climático son leves e incluso potencialmente beneficiosos, como un ligero aumento de las temperaturas mínimas, lo que reduce el riesgo de heladas, y sin un incremento significativo en eventos extremos de lluvia. Sin embargo, en la estación de Puyo se observa un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones extremas, así como en las temperaturas mínimas y máximas.

En conclusión, se visualiza la necesidad de implementar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático, especialmente en la región sierra, donde los cambios proyectados son más pronunciados.

2.2 Fundamentación Legal

La fundamentación legal de esta investigación se basa en normativas internacionales, nacionales y sectoriales que promueven la gestión sostenible de los recursos hídricos y la adaptación al cambio climático (Tello & Sánchez, 2019).

2.2.1 Legislación internacional

Acuerdo de París (2015): Este instrumento legal, adoptado en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), establece compromisos vinculantes para limitar el aumento de la temperatura global y promover la adaptación al cambio climático. Ecuador, como parte firmante, tiene la obligación de implementar medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer los sistemas de monitoreo climático.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): En particular, el ODS 13 insta a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos, mientras que el ODS 6 aboga por la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de la Agenda 2030 establece la meta de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este objetivo se relaciona directamente con la investigación, puesto que la identificación de zonas hídricas prioritarias contribuye a mejorar la gestión y protección de los recursos hídricos, promoviendo la sostenibilidad y equidad en el acceso al agua (Del Pilar, 2020).

2.2.2 Legislación nacional

Constitución de la República del Ecuador (2008) La Constitución del Ecuador garantiza el derecho al agua en varios artículos. El artículo 12 reconoce al agua como un derecho humano fundamental, y el artículo 318 establece que el agua es patrimonio estratégico de uso público, lo cual implica que su manejo debe priorizar la sostenibilidad y el interés colectivo. Además, el artículo 395 establece que las políticas ambientales deben garantizar la conservación y regeneración de los ciclos naturales, particularmente el agua, lo que respalda la identificación de zonas hídricas críticas (Salazar, 2024).

Código Orgánico del Ambiente (2017) Este código regula la protección de la naturaleza y los recursos naturales. El artículo 36 enfatiza la protección de áreas protegidas, como el ACUS, y promueve la conservación de ecosistemas estratégicos para la sostenibilidad hídrica. El artículo 70 subraya la importancia de proteger los ecosistemas que intervienen en la regulación del ciclo hidrológico, un principio clave para la identificación de zonas de interés hídrico. Además, el artículo 95 establece la necesidad de planes de manejo ambiental que consideren la sostenibilidad del agua (Mendoza, 2022).

Decreto Ejecutivo No. 1038 (2016) Este decreto establece los lineamientos para la gestión de las Áreas de Conservación y Uso Sustentable (ACUS), definiendo la necesidad de elaborar planes de manejo que incluyan la conservación de los recursos hídricos (Tello & Sánchez, 2019).

La identificación de zonas de interés hídrico en el ACUS de la zona de estudio se alinea con los principios y disposiciones legales mencionadas, contribuyendo al

cumplimiento de las obligaciones ambientales y sociales del Ecuador, y asegurando la conservación y uso racional del agua para las generaciones futuras.

2.2.3 Legislación de recursos hídricos

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2014):

Establece los principios de la gestión integrada de los recursos hídricos y regula la protección de las fuentes hídricas, incluyendo las microcuencas hidrográficas (Arellado et al., 2019).

Plan Nacional para el Buen Vivir: Este instrumento de planificación incluye estrategias para enfrentar los efectos del cambio climático, con énfasis en la conservación de recursos hídricos (Palacios, 2019).

Reglamento para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (2015): Regula la planificación y gestión de las cuencas y microcuencas hidrográficas y promueve su sostenibilidad ante los efectos del cambio climático.

Política Nacional de Cambio Climático (2012): Define lineamientos para la adaptación y mitigación del cambio climático, con énfasis en la protección de ecosistemas sensibles como las microcuencas hidrográficas (Medina Peña et al., 2022).

Estrategia Nacional de Biodiversidad 2020: Incluye objetivos relacionados con la protección de los recursos hídricos frente a los impactos del cambio climático (Alberca, 2022).

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 *Climatología*

Es una rama de las Ciencias de la Tierra dedicada al estudio del clima y sus variaciones a lo largo del tiempo. Esta ciencia no sólo analiza las causas y la distribución de los diferentes tipos de clima, sino que también, investiga cómo funcionan los sistemas climáticos, sus fluctuaciones y su impacto en diversas actividades, como los recursos hídricos y la salud humana (Almeida et al., 2023).

El clima, en términos precisos, se refiere a las condiciones atmosféricas habituales de un lugar específico durante un período determinado. La climatología explica el clima a través de una combinación de descripciones estadísticas que abarcan la tendencia central y la variación de factores como la temperatura, las precipitaciones, la presión atmosférica, la humedad y el viento, además, considera fenómenos meteorológicos característicos de una región en particular en un momento dado (Caso, 2020).

2.3.2 *Variabilidad climática*

Britton (2021). Se refiere a las fluctuaciones que ocurren en el clima a lo largo de diferentes períodos de tiempo, que pueden ser intraestacionales, interanuales o incluso Interdecenales. Este término está generalmente asociado con cambios que modifican los procesos de la atmósfera y los océanos, así como la superficie terrestre y sus propiedades, tanto a nivel intraestacional como interdecenal.

Entre sus manifestaciones se incluyen el incremento de temperaturas, alteraciones en los regímenes de precipitación y el aumento de eventos extremos como sequías e inundaciones.

2.3.3 *Cambio climático*

Se refiere a las modificaciones sistemáticas en las características del clima, observadas a través de estadísticas como la media y la varianza, que ocurren durante períodos prolongados, abarcando décadas o incluso siglos. Estos cambios pueden manifestarse como aumentos o disminuciones en fenómenos como las precipitaciones extremas. A lo largo de la historia climática de la Tierra, las variaciones climáticas han sido principalmente el resultado de factores naturales, como la irradiación solar y la evolución de los componentes naturales del sistema climático (Connors & Haughey, 2020).

Sin embargo, en la actualidad, existe evidencia sólida que señala que las actividades humanas están influyendo significativamente en el sistema climático. Los cambios notables en las condiciones climáticas, detectados a través de análisis estadísticos de la media y sus características, suelen prolongarse por largos períodos de tiempo, a menudo décadas o más (Pita, 2022).

El clima puede alterarse por eventos naturales internos o por fuerzas externas, como variaciones en el ciclo solar, erupciones volcánicas, o el uso inadecuado del suelo (Porrás & Jácome, 2020). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1°, destaca que las alteraciones del clima son consecuencia de las actividades humanas, que han modificado la composición de la atmósfera, sumándose a

los cambios naturales observados en tiempos comparables. La CMNUCC distingue claramente entre los cambios climáticos inducidos por la actividad humana y aquellos que ocurren debido a causas naturales (Chávez, 2024).

El término cambio climático abarca la variación del clima en relación con la historia climática global o regional, afectando a todos los parámetros meteorológicos (como temperatura, presión barométrica, precipitaciones, nubosidad, entre otros) en escalas de tiempo variadas. A menudo se utiliza como sinónimo de calentamiento global y se emplea de manera general para referirse a los cambios observados en el clima actual. Según la CMNUCC, el cambio climático se refiere específicamente a aquellas alteraciones provocadas por la actividad humana (Bennett, 2023).

El cambio climático puede ser natural, ocurre de manera continua por causas naturales, o artificial, cuando es inducido por la acción humana. Este fenómeno no solo implica un aumento de las temperaturas globales, sino también, modificaciones en las precipitaciones, la cobertura nubosa y otras variables del sistema atmosférico.

Dado lo complejo del cambio climático y las múltiples interacciones involucradas, la única manera de evaluar estos cambios es mediante el uso de modelos computacionales que simulan la física de la atmósfera y los océanos (Orozco & Mora, 2020). Sin embargo, la naturaleza caótica de estos modelos implica un alto grado de incertidumbre, lo que limita su capacidad para predecir cambios futuros significativos en aspectos tanto económicos como biológicos.

2.3.4 Sistema Climático

Es un conjunto complejo compuesto por cinco componentes que interactúan entre sí: la atmósfera, la biosfera, la litosfera, la criosfera e hidrosfera. La atmósfera es la capa de gases que rodea el planeta, compuesta principalmente de nitrógeno y oxígeno, aunque también contiene otros gases en pequeñas cantidades, además de vapor de agua y nubes.

La biosfera abarca todos los seres vivos y sus ecosistemas, así como, la materia orgánica muerta presente en la Tierra y sus interacciones. La litosfera es la capa sólida superficial del planeta, que incluye la corteza terrestre y los fondos marinos. La criosfera comprende las áreas de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido, como la nieve y el hielo. Por último, la hidrosfera abarca el agua en estado líquido que se distribuye tanto en la superficie terrestre como debajo de ella, incluyendo ríos, mares, océanos y acuíferos subterráneos (Bautista, 2021).

Este sistema es dinámico y está en constante evolución debido a factores como su propia dinámica interna, las erupciones volcánicas, la variabilidad solar y las influencias humanas. La complejidad y amplitud del Sistema Climático lo hacen susceptible a cambios continuos a lo largo del tiempo (Villazon & Lipa, 2022).

2.3.5 Cambio climático abrupto

Según Thielen et al. (2024) el cambio climático abrupto se refiere a alteraciones significativas que ocurren en un corto período de tiempo, como pocas décadas, y que persisten (o se espera que persistan) durante al menos ese mismo lapso. Estos cambios

drásticos están provocando graves alteraciones tanto en los sistemas naturales como en los sistemas humanos.

2.3.6 Elementos del clima

El análisis climático se enfoca en evaluar diversos datos, entre los que se incluyen la temperatura del aire, las precipitaciones, la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, la evaporación, la presión atmosférica y la radiación solar.

Temperatura del aire

En meteorología, la temperatura del aire es una de las variables más comúnmente medidas en diversos entornos. Esta temperatura se registra mediante un termómetro expuesto al aire, que debe estar protegido de la radiación solar directa para evitar lecturas inexactas. Las unidades de medida empleadas son grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) y grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Porrás & Jácome, 2020).

Temperatura del punto de rocío

Se refiere a la temperatura a la cual el aire alcanza la saturación, provocando la condensación del vapor de agua. Esta medida se obtiene mediante un psicrómetro (Venegas, 2020).

Temperatura máxima y mínima

Generalmente, la temperatura más alta del día se registra entre las 14:00 y las 16:00 horas, por otra parte, la temperatura más baja suele ocurrir entre las 06:00 y las 08:00 horas (Benavides & Pucha, 2020).

Precipitación

La precipitación se origina a partir de la caída directa de gotas de agua o cristales de hielo que se han derretido. Las gotas más grandes suelen formarse en nubes más altas, donde la humedad del aire es mayor, facilitando la condensación del vapor de agua en las capas atmosféricas. A medida que las gotas se acumulan, su peso las hace descender, alcanzando velocidades que varían entre 4 y 8 m/s, dependiendo de su tamaño y de la influencia del viento. El diámetro de las gotas de lluvia puede oscilar entre 0,7 y 5 milímetros, siendo 1 milímetro el tamaño típico de una gota de lluvia común (Hernández, 2024).

La lluvia se produce cuando el aire húmedo asciende y se enfría, lo que provoca una rápida condensación debido a que, a temperaturas más bajas, el aire no puede retener tanto vapor de agua. Este fenómeno puede ocurrir de las siguientes maneras:

- **Convección:** Se produce cuando una masa de aire caliente asciende debido a su menor densidad en comparación con el aire circundante. A medida que asciende, la masa de aire se enfría, provocando la condensación y, en consecuencia, la formación de lluvia convectiva (Calles, 2020).
- **Lluvia orográfica:** Este tipo de lluvia ocurre cuando una masa de aire es forzada a elevarse a altitudes más frías al encontrarse con una barrera topográfica, como una cadena montañosa. La elevación provoca el enfriamiento de la masa de aire, resultando en condensación y precipitación, conocida como lluvia orográfica (Carpio et al., 2024).
- **Lluvia frontal o ciclónica:** Este fenómeno ocurre cuando una masa de aire caliente se encuentra con una masa de aire frío. Como estas masas de aire no se mezclan

fácilmente, el aire caliente es forzado a elevarse sobre el aire frío, lo que provoca su enfriamiento, condensación y, finalmente, precipitación en forma de lluvia frontal o ciclónica (Caso, 2020).

2.3.7 *Microcuenca hidrográfica*

Es una unidad básica de gestión de recursos hídricos, definida por el área geográfica donde se recoge y drena el agua hacia un punto común. Su análisis es crucial para entender los impactos locales del cambio climático (Larrea & Maldonado, 2022).

2.3.8 *Geomorfología de la cuenca hidrográfica*

El análisis de las formas y características del relieve en el ámbito de una cuenca hidrográfica incluye el estudio de los procesos geológicos y geomorfológicos que moldean su paisaje. Esto abarca la evaluación de elementos como la topografía, las pendientes, la altitud y la disposición del terreno, junto con la identificación de ríos, valles, montañas, colinas, suelos y otros componentes que conforman el entorno natural. (Jaya & Rodríguez, 2023).

2.3.9 *Índices del cambio climático*

Un índice se define como la relación entre dos o más indicadores, y en el contexto de la variabilidad climática, un índice de este tipo puede revelar la existencia de cambios climáticos. Para este estudio, es crucial comprender en profundidad los índices climáticos propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) del IPCC. Esto implica analizar qué determinan, cómo funcionan y cómo se emplearán a lo largo de esta investigación (Orozco & Mora, 2020).

Tn90p

El índice $Tn90p$ representa la frecuencia con la que la temperatura mínima diaria en un mes excede el percentil 90, calculado a lo largo de un año. Este cálculo se centra en una ventana móvil de 5 días. Para obtener este índice, se recomienda utilizar el método descrito en el Anexo D del manual del usuario de ClimDex. El porcentaje del tiempo en que se cumple la condición $T_{nij} > T_{nin90}$ determina el valor del índice, donde T_{nij} es la temperatura mínima diaria y T_{nin90} es el umbral del percentil 90 (SENAMHI, 2024b).

TNx

El indicador TNx se refiere a la Temperatura Mínima Más Alta. Representa diaria registrada durante un mes dentro de un período determinado (SENAMHI, 2024a). En otras palabras, es la mayor temperatura mínima diaria que ocurre en cada mes, calculada como:

$$TNx_{kj} = \max (T_{nkj}) \quad (1)$$

Tx90p

El índice $Tx90p$ indica la frecuencia de la Temperatura Máxima Diaria durante un período determinado supera el percentil 90, centrado en una ventana de al menos 5 días. Se recomienda calcular este índice siguiendo el método descrito en el Anexo D del manual del usuario de ClimDex. El índice se expresa como el porcentaje del tiempo en que se cumple la condición $T_{xij} > T_{xin90}$, donde T_{xij} es la temperatura máxima diaria y T_{xin90} es el umbral del percentil 90.

T_{xr}

El indicador T_{Xx} , conocido como Temperatura Máxima Extrema, se refiere a la temperatura máxima diaria registrada en un mes durante un período determinado. Específicamente, este índice representa la temperatura máxima más alta alcanzada cada mes, calculada como:

$$T_{Xxkj} = \max (T_{xkj}) \quad (2).$$

DTR

El índice DTR, que significa Intervalo Diurno de Temperatura (Diurnal Temperature Range), representa la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima registradas diariamente durante el período de datos analizado. Este intervalo se calcula restando la temperatura mínima de la máxima para cada día dentro del conjunto de datos (Caso, 2020).

CDD

Se refiere a los Días Secos Consecutivos (Consecutive Dry Days), mide la cantidad diaria de precipitación en un día dentro del período de análisis. Este índice identifica el mayor número de días consecutivos en los que la precipitación diaria es inferior a 1 mm ($RR_{ij} < 1\text{mm}$) (SENAMHI, 2024b).

R95pTot

El índice R95pTot indica la cantidad de días extremadamente lluviosos registrados. Se calcula evaluando la precipitación diaria que excede el umbral del percentil 95 en los días lluviosos dentro del período analizado (Álvarez, 2020).

R99pTot

Se refiere a los días extremadamente lluviosos. Este índice mide la cantidad de precipitación diaria en los días lluviosos que se encuentra en el percentil 99 durante el período de 1961-1990. Representa la suma total del número de días extremadamente lluviosos en el período analizado (SENAMHI, 2024a).

R20

Mide la cantidad de precipitación diaria que supera los 20 mm, considerado como lluvia abundante, durante un período específico. Para determinar el número de días con precipitación superior a 20 mm, se debe cumplir la condición $RR_{ij} \geq 20$ mm, donde RR_{ij} representa la cantidad de precipitación registrada en el día i del R20 (INAMHI, 2020).

Relación entre los índices y el cambio climático

Tabla 1 conexión entre los índices y el cambio climático

Índices	Unidad	Relación
Temperatura Mínima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tn90p)	°C / mes	Los GEI fuerzan un incremento de temperatura haciendo que las noches cálidas se incrementan. Es una medida directa del número de noches cálidas. Este indicador podría reflejar efectos potencialmente dañinos por la ausencia del enfriamiento nocturno, principal contribuyente del estrés térmico.
Temperatura Mínima Más Alta en Cada Mes (TNx)	% / mes	
Temperatura Máxima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tx90p)	°C	Los GEI fuerzan un incremento de temperatura haciendo que las temperaturas durante el día se incrementan. También se puede interpretar como una medida de mayor heliofanía-menor cobertura nublosa-.
La Máxima Temperatura de Cada Mes (TXx)	%	
Rango Diurno de Temp. Máx. Menos Temp. Mín Mensual (DTR)	Días	Se espera la disminución del DTR como consecuencia directa del aumento del calentamiento nocturno (aumento de temperaturas mínimas). Por otro lado, la disminución en DTR puede deberse a la reducción de la insolación diurna a través del engrosamiento de la cobertura nubosa gris (que generaría disminución de las temperaturas máximas). Para llegar a conclusiones es necesario revisar los valores de temperaturas máximas y mínimas.
Número de Días Secos Consecutivos Registrados (CDD)	Días	Los GEI fuerzan un incremento de la temperatura generando incremento de evaporación, favoreciendo potencialmente a las sequías.
Días Muy Húmedos Registrados (R95pTot)	mm	Los GEI generan un incremento del ciclo hidrológico, puesto que favorecen la nucleación del vapor de agua en lluvia. Asimismo, el incremento de temperatura permite que la atmosfera contenga más vapor de agua disponible, y por lo tanto se espera un incremento de precipitaciones intensas y/o extremas.
Días Extremadamente Húmedos (R99pTot)	mm	
Número de Días Con Una Precipitación mayor/igual a 20mm (r20mm)	°C	

CAPÍTULO 3

DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la Investigación

El enfoque de esta investigación es de tipo cuantitativo, se denomina así porque trata con fenómenos que se pueden medir, a través de la utilización de técnicas estadísticas para el análisis de los datos recogidos, su propósito más importante radica en la descripción, explicación, predicción y control objetivo de sus causas y la predicción de su ocurrencia a partir del desvelamiento de las mismas, fundamentando sus conclusiones sobre el uso riguroso de la métrica o cuantificación, tanto de la recolección de sus resultados como de su procesamiento, análisis e interpretación (Sanabria Yépez et al., 2022).

Los objetivos del trabajo de investigación implican la recopilación y el análisis de datos numéricos y cuantitativos, como datos de precipitación y temperatura de las plataformas satelitales. La hipótesis planteada se centra en la relación entre variables cuantificables, como la modificación en los patrones de precipitación y temperatura que evidencien cambio climático a nivel de microcuenca hidrográfica.

3.2. Diseño de la Investigación

El diseño de la presente investigación es de tipo no experimental, descriptivo y longitudinal, debido a que se basa en la recopilación y análisis de datos climáticos históricos, sin manipulación directa de variables, con el propósito de describir las tendencias y variaciones de los índices de cambio climático en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas durante el período 1981-2020 (Porras & Jácome, 2020).

3.3. Tipo de Investigación

3.3.1. Explicativa

La investigación explicativa es aquella que tiene relación causal, no sólo persigue describir o acercarse a un problema, sino que intenta precisar qué las provocó. Puede valerse de diseños experimentales y no experimentales para conocer las principales causas y consecuencias que han generado los cambios climáticos en los años 1981-2020 en las microcuencas hidrográficas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas.

3.3.2. Longitudinal

Se emplea cuando el interés del investigador es analizar cambios a través del tiempo en determinadas variables o en las relaciones entre éstas. Recolectan datos a través del tiempo en puntos o períodos especificados, para hacer inferencias respecto al cambios sus determinantes y consecuencias.

El estudio es longitudinal, debido a que se estableció un período para el análisis de las variables como fue 1981-2020, para identificar los índices del cambio climático.

3.4. Nivel de Investigación

3.4.1. Descriptiva

La investigación descriptiva se efectúa cuando se desea describir, en todos sus componentes principales, una realidad. En la investigación se exponen las variables de estudio pues se pretende conocer y analizar los índices del cambio climático para el período 1981-2020 en las microcuencas hidrográficas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas.

3.4.2. Teórica

Como su nombre indica, aquella que se realiza a partir de la información hallada en documentos de cualquier especie, como fuentes bibliográficas, hemerográficas o archivísticas. El análisis documental es un conjunto de operaciones encaminadas a representar un documento y su contenido bajo una forma diferente de su forma original, con la finalidad posibilitar su recuperación posterior. (Gómez, 2011).

El nivel de investigación de este estudio es teórico. Esta investigación se enfoca en la construcción y validación de nuevos marcos teóricos relacionados con los índices de cambio climático en las microcuencas hidrográficas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas. Se pretende aplicar un modelo teórico que explique la variabilidad climática y sus impactos en estas regiones. El enfoque teórico permite profundizar en el análisis de las tendencias climáticas a largo plazo, basándose en una revisión de la literatura existente y en la formulación de nuevas hipótesis. A través del uso de las herramientas RClimdex y ClimPACT, se analizarán los datos climáticos históricos para construir un marco conceptual robusto que pueda servir de base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

3.5. Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos

La información analizada para el estudio fueron los datos diarios de temperatura y precipitación del período comprendido entre 1981 y 2020 de las estaciones hidrometeorológicas pertenecientes a las microcuencas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas de la provincia de Chimborazo.

Los valores fueron extraídos de la información satelital disponible para la zona de estudio. Se utilizó datos de la plataforma Google Earth Engine, mediante scripts específicos

se accedió a datos de precipitación y temperatura para la zona de estudio y para el período seleccionado.

Para el cálculo de los índices de cambio climático en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, se desarrollaron tres etapas:

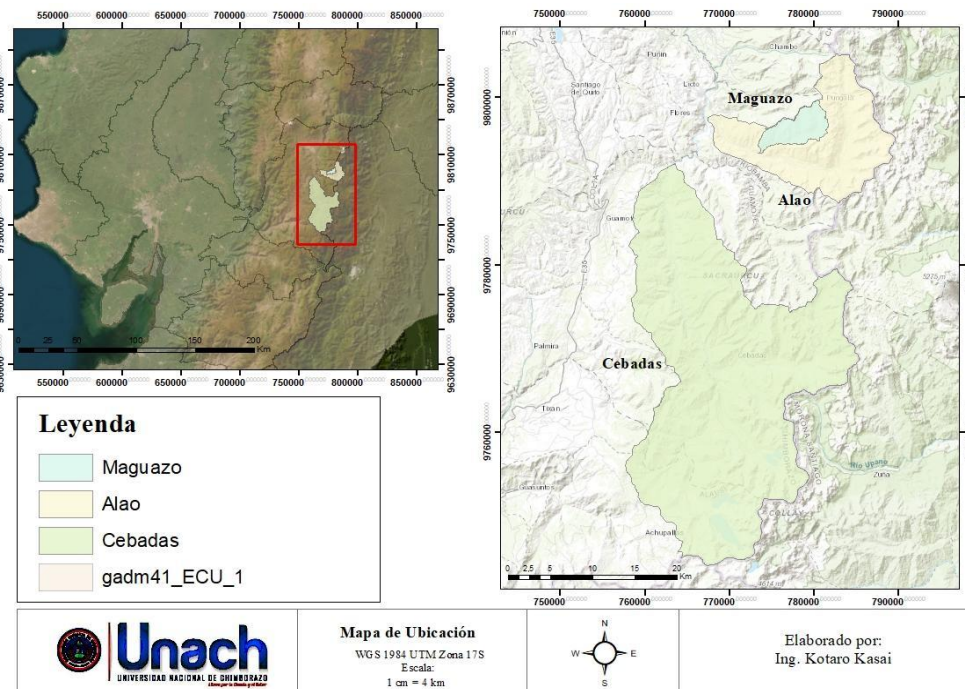
3.6. Etapa 1: Análisis de las características geomorfológicas e hidrológicas de las microcuencas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, con el propósito de comprender las posibles evidencias de cambio climático en la región.

En esta etapa se recopiló y analizó información básica sobre las microcuencas estudio, estableciendo una línea base con datos relevantes sobre sus características geomorfológicas.

3.6.1 Descripción del área de estudio:

El presente estudio se centra en las microcuencas hidrográficas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, ubicadas en la región central de Ecuador (figura 1), específicamente en la provincia de Chimborazo. Estas microcuencas forman parte de la cuenca alta del río Pastaza, un sistema hidrológico de gran importancia para el abastecimiento de agua, la producción agrícola, la generación de energía hidroeléctrica y la conservación de ecosistemas estratégicos (Tuaza et al., 2023).

Figura 1: Microcuencas de Cebadas, Maguazo y Alao



Fuente: Autor

3.6.2 Ubicación geográfica

Las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas se encuentran en la vertiente oriental de los Andes ecuatorianos, caracterizadas por una combinación de altitudes que varían desde los 2500 metros hasta más de 4500 metros sobre el nivel del mar. Esta variabilidad altitudinal influye significativamente en los patrones climáticos, generando una alta diversidad de condiciones meteorológicas que van desde climas templados hasta fríos y húmedos (Pita, 2022).

3.6.3 Características geomorfológicas e hidrológicas

Las microcuencas se caracterizan por una geomorfología compleja dominada por pendientes pronunciadas, suelos volcánicos de alta fertilidad y una densa red de drenaje conformada por ríos, quebradas y humedales. La presencia de glaciares, páramos y bosques montanos en estas áreas contribuye a su papel como zonas de recarga hídrica y regulación del caudal de los ríos (SSC, 2020).

Los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, principales corrientes fluviales de las microcuencas, presentan un régimen hidrológico influenciado por las precipitaciones estacionales, con mayores aportes de agua durante la época lluviosa. Estas microcuencas son fuente de agua para diversas actividades económicas y sociales, como la agricultura, la ganadería y el consumo doméstico (Rvas & Conde, 2022).

3.6.4 Clima y vegetación

El clima en las microcuencas varía desde templado húmedo en las zonas bajas hasta frío húmedo en las partes más altas, con precipitaciones anuales que oscilan entre 800 y 1200 mm. Las temperaturas promedio varían entre los 5 °C y los 18 °C, dependiendo de la altitud. La vegetación predominante incluye ecosistemas de páramo, bosque andino y áreas de cultivo en las zonas intervenidas por actividades humanas (Sanabria Yépez et al., 2022).

3.6.5 Vulnerabilidad al cambio climático

Debido a su ubicación en una región de alta montaña, estas microcuencas son particularmente sensibles a los efectos del cambio climático. Las alteraciones en los patrones de precipitación, el retroceso de los glaciares y el aumento en la frecuencia de eventos

climáticos extremos, como inundaciones y sequías, representan riesgos importantes para los ecosistemas y las comunidades humanas que dependen de estos recursos.

Este contexto geográfico y ambiental resalta la necesidad de evaluar los índices de cambio climático en estas microcuencas, proporcionando información clave para la planificación y gestión sostenible de sus recursos hídricos.

3.7 Etapa 2: Determinación de las tendencias actuales de la temperatura, precipitación y extremos climáticos en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, mediante el uso del Software RClimdex para determinar la variabilidad climática actual.

3.7.1 Descripción de las herramientas RClimdex y Climpact

Se presenta las principales características de las herramientas computacionales que se utilizaron en el presente trabajo.

RClimdex

Es un software desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Center (NCDC) de la NOAA. Este programa está diseñado para calcular un conjunto de 34 índices climáticos básicos recomendados por el Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI). Dichos índices evalúan tendencias y eventos climáticos extremos basándose en datos diarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

El propósito principal de RClimdex es estandarizar el análisis de índices climáticos a nivel global, lo que permite la comparación de resultados entre diferentes regiones y

proyectos de investigación. Los índices generados incluyen métricas de frecuencia, intensidad y duración de eventos climáticos extremos, como días cálidos, noches frías, precipitaciones intensas y períodos secos prolongados (Alexander et al., 2006).

RClimdex opera en el entorno estadístico R, lo que permite a los usuarios integrar y personalizar sus análisis. La herramienta se ha utilizado ampliamente en estudios recientes debido a su capacidad para analizar variabilidad climática con alta precisión (Alexander et al., 2006).

Climpact

Climpact es una herramienta computacional diseñada específicamente para calcular indicadores climáticos relevantes para diversos sectores socioeconómicos, como la salud, la agricultura y la gestión de recursos hídricos. Estos indicadores, basados en datos diarios de temperatura y precipitación, documentan la variabilidad y el cambio climático a nivel local y regional. La herramienta admite datos provenientes de estaciones meteorológicas, observaciones satelitales o reanálisis climáticos, proporcionando flexibilidad en su aplicación (Sillmann et al., 2019).

El propósito principal de Climpact es proporcionar información climática precisa y relevante que pueda ser utilizada para la evaluación del impacto del cambio climático y la elaboración de propuestas de adaptación. Sus resultados son fundamentales para proyectos orientados a la sostenibilidad ambiental (Alexander, 2016).

Climpact opera principalmente en el entorno de programación R y permite un análisis detallado de los resultados (Zhang et al., 2011).

3.7.2. Preparación y validación de datos climáticos

Se seleccionaron datos de ERA5 como la base de datos para este proyecto, debido a su alta resolución y capacidad para representar de manera precisa las condiciones climáticas a escala local. Los análisis atmosféricos, como ERA5, integraron observaciones meteorológicas de múltiples fuentes con modelos meteorológicos avanzados, utilizando técnicas de asimilación de datos. Esto permite generar representaciones continuas de variables meteorológicas en el espacio y el tiempo, mejorando significativamente las simulaciones climáticas (Erwan, et al., 2024).

ERA5, desarrollado por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF), ofreció una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ y temporal de una hora, junto con importantes avances en física atmosférica y ciencia de datos (Hersbach et al., 2020).

3.7.2 *Preparación y validación de datos climáticos*

Se seleccionaron datos de ERA5 como la base de datos para este proyecto, debido a su alta resolución y capacidad para representar de manera precisa las condiciones climáticas a escala local. Los análisis atmosféricos, como ERA5, integraron observaciones meteorológicas de múltiples fuentes con modelos meteorológicos avanzados, utilizando técnicas de asimilación de datos. Esto permite generar representaciones continuas de variables meteorológicas en el espacio y el tiempo, mejorando significativamente las simulaciones climáticas (Erwan, et al., 2024).

ERA5, desarrollado por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF), ofreció una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ y temporal

de una hora, junto con importantes avances en física atmosférica y ciencia de datos (Hersbach et al., 2020).

3.7.3 Variables seleccionadas

Para el análisis de las microcuencas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, se descargaron los siguientes datos horarios del periodo 1981-2020:

- Temperatura del aire: Máxima y mínima diaria.
- Precipitación acumulada diaria.

La selección de estas variables responde a la necesidad de evaluar tendencias en temperatura, precipitación y extremos climáticos, considerando su impacto directo en los sistemas hidroclimáticos.

3.7.4 Uniformización de datos a formato estándar

La uniformización implicó la transformación de los datos brutos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación a un formato estándar, compatible con las herramientas computacionales seleccionadas.

Estructura del archivo

Los datos fueron organizados en archivos de texto plano (ASCII), con una estructura tabular y columnas ordenadas en la siguiente secuencia:

- **AÑO:** Año de registro.
- **MES:** Mes de registro.
- **DÍA:** Día del mes.

- **PRCP:** Precipitación diaria en milímetros.
- **TMÁX:** Temperatura máxima diaria en grados Celsius.
- **TMÍN:** Temperatura mínima diaria en grados Celsius.

Cada columna fue separada por espacios, cumpliendo con los requisitos del formato delimitado por espacios del programa RClindex y Climpac (Zhang et al., 2011).

Gestión de datos faltantes

Los valores ausentes en las series temporales fueron codificados con el estándar -99,9, manteniendo el orden cronológico de los registros. Esto es fundamental para evitar errores en el cálculo de índices climáticos, puesto que los algoritmos utilizados requieren una representación uniforme de las ausencias de datos (Sillmann et al., 2021).

Conversión de unidades

Las precipitaciones fueron convertidas a milímetros y las temperaturas a grados Celsius, asegurando la consistencia en las unidades utilizadas. Este paso evitó discrepancias que pudieran surgir por diferencias en las convenciones de medición entre las bases de datos originales (Peterson et al., 2020).

Validación del formato

Una vez transformados, los archivos se verificaron en términos de sintaxis y completitud mediante scripts en R para asegurar la compatibilidad total con las herramientas analíticas.

3.7.5 Control de calidad de datos

El control de calidad de los datos climáticos fue fundamental para garantizar series temporales consistentes y confiables. En este estudio, se utilizó el software RClimdex, seleccionando la opción "Load Data and Run QC". Este proceso permitió organizar cronológicamente los registros, reemplazar valores faltantes con NA, y corregir errores como precipitación negativa o temperaturas máximas inferiores a las mínimas.

Para la aplicación de Climpac, se desarrolló un script en lenguaje R para automatizar la detección y corrección de estos errores. Este procedimiento aseguró datos uniformes y listos para el cálculo de índices climáticos, siguiendo estándares internacionales y recomendaciones recientes (Zhang & Yang, 2016).

3.7.6 Cálculo de índices climáticos y sus tendencias

Se seleccionaron 14 índices climáticos de los 27 estándares definidos por el ETCCDI, considerando su aplicabilidad a las condiciones de la región ecuatorial. Estos índices permiten analizar extremos climáticos, variabilidad de temperatura y patrones de precipitación relevantes para las microcuencas estudiadas.

Temperatura:

- TX: Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria
- TN: Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria
- TX90p: Porcentaje de días cálidos.
- TN10p: Porcentaje de noches frías.

- DTR: Rango de temperatura diurna.
- CSDI: Duración de períodos fríos
- DTR: Rango diurno de temperatura

Precipitación:

- PRCPTOT: Precipitación anual total.
- CDD: Días consecutivos secos.
- CWD: Días consecutivos húmedos.
- RX1day: Precipitación máxima en un día.
- R10mm: Días con precipitación ≥ 10 mm.
- R95p: Días muy húmedos
- R99p: Días extremadamente secos

Análisis de Tendencias

Una vez calculados los índices, se realizó un análisis de tendencias utilizando la prueba estadística de Mann-Kendall. Esto permitió identificar patrones significativos de cambio climático en cada microcuenca.

El análisis de tendencias se enfocó en índices relevantes para la región ecuatorial, como el número de días cálidos, noches frías y eventos extremos de precipitación. Este enfoque permitió destacar características climáticas específicas en las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas, asegurando que los resultados fueran interpretados dentro del contexto local.

3.8 Proyección de escenarios futuros de precipitación y temperatura en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas, utilizando el software RCLimdex para determinar variabilidad climática para el año 2050.

La metodología para proyectar escenarios climáticos futuros se basa en la verificación de tendencias históricas y el análisis de índices de cambio climático a partir de datos procesados con RCLimdex, utilizando un escenario climático.

3.8.1 Selección de Escenario Climático Relevante

Los Modelos Climáticos Globales (GCMs) son herramientas computacionales que simulan patrones climáticos futuros basados en ecuaciones de dinámica de fluidos y parámetros físicos como la concentración de gases de efecto invernadero y la constante solar.

Estos modelos operan en una malla tridimensional del planeta, donde cada celda representa un área específica y permite analizar la transferencia de energía y materia.

El presente estudio utiliza datos de GCMs generados en centros internacionales, siguiendo estas etapas:

Simulación Base:

- Los GCMs generan proyecciones para períodos de referencia (1970-2000) y futuro (2041-2060) bajo el escenario RCP4.5.
- La simulación produce resultados a resoluciones típicas de 50 km².

Reducción de Escala Espacial:

- Para mejorar la aplicabilidad en subcuencas, se aplica un proceso de downscaling utilizando interpolaciones de alta resolución espacial (1 km²).
- Este método asume una alta autocorrelación espacial, es decir, los cambios climáticos proyectados son consistentes dentro de áreas geográficamente cercanas.

Corrección de Sesgos y Calibración:

- Se utilizan datos observados actuales WorldClim para ajustar las proyecciones de los GCMs.
- Este proceso es crítico, puesto que los GCMs no reproducen con precisión el clima actual en todas las ubicaciones, por lo que se requiere ajustes para alinear los datos simulados con las condiciones locales.

El escenario seleccionado fue el RCP4.5 (Trayectoria Representativa de Concentración 4,5) es una proyección moderada que asume una mitigación efectiva de emisiones de gases de efecto invernadero, con políticas globales implementadas para estabilizar la concentración de CO₂ en aproximadamente 650 ppm hacia el año 2100. Este escenario se seleccionó debido a:

- Su carácter optimista, aunque realista, alineado con metas internacionales como el Acuerdo de París.
- Proyecciones de un aumento de la temperatura global media entre 1,8 °C y 2,6 °C respecto a niveles preindustriales para finales del siglo XXI.
- El equilibrio planteado entre desarrollo económico y mitigación ambiental.

3.8.2 Realizar las proyecciones utilizando herramientas RCLimdex y Climpact para el año 2050.

Con los datos corregidos y ajustados:

Se procesan las variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) en

RCLimdex para calcular índices climáticos relevantes, como:

- TXx (máxima temperatura extrema).
- TNn (mínima temperatura extrema).
- PRCPTOT (precipitación total anual).
- R10mm/R20mm (días con lluvia intensa).

Los índices se proyectan para identificar tendencias y variabilidad climática hacia 2050.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

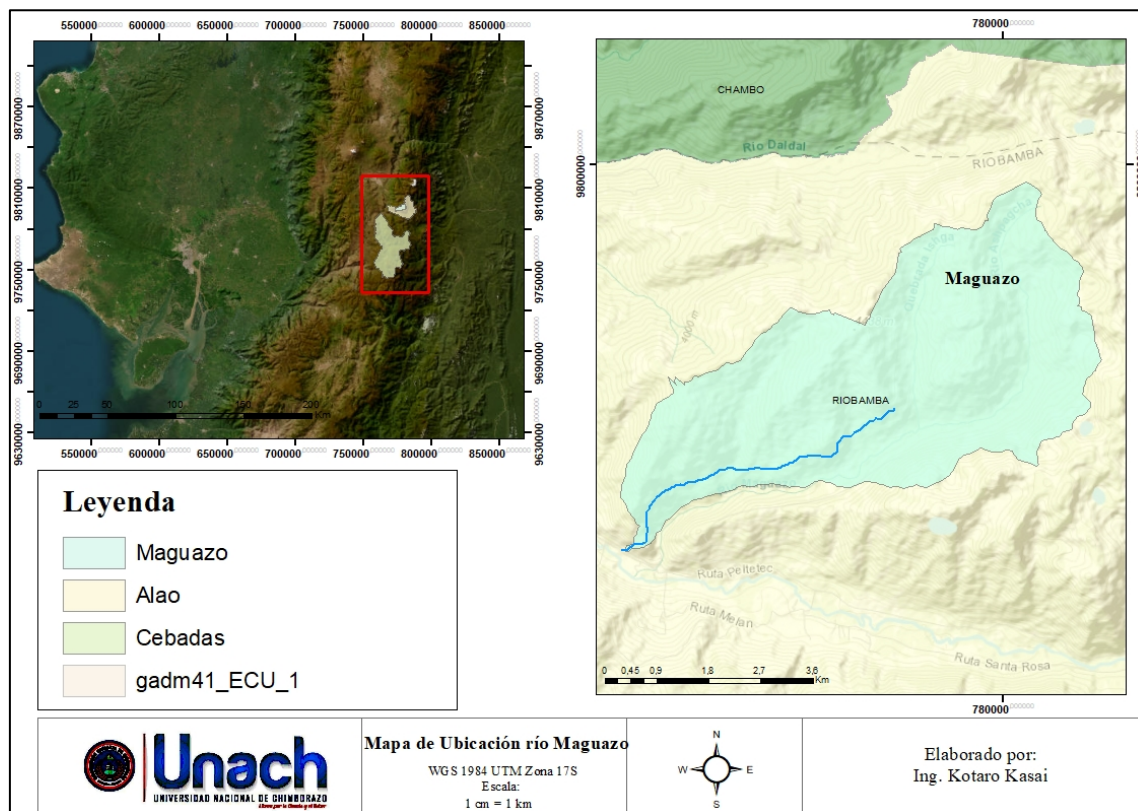
4.1 Descripción de la zona de estudio

El presente estudio se centra en las microcuencas de los ríos Alao, Maguazo y Cebadas, pertenecientes a la Demarcación Hidrográfica de Pastaza en la División Hidrográfica del Ecuador. Estas microcuencas forman parte de la cuenca 28 76 (río Pastaza) y, específicamente, de la subcuenca del río Chambo. Este sistema hídrico es fundamental para el desarrollo económico, social y ambiental de la región andina ecuatoriana, al contribuir con servicios ecosistémicos clave como el suministro de agua potable, riego agrícola y generación de energía eléctrica (MAATE, 2022).

Microcuenca del río Maguazo

El río Maguazo es una de las principales corrientes fluviales que atraviesan la microcuenca, ubicada en la parroquia Pungalá, en las comunidades de Peltetec y Alao. La microcuenca es parte de la red hídrica del río Alao y está estrechamente vinculada con el desarrollo agrícola y social de la región. Este río presenta una dinámica compleja debido a la interacción de factores ambientales y antrópicos, lo que lo convierte en un objeto de estudio relevante en escenarios de cambio climático y uso intensivo de recursos hídricos (PDOT Riobamba, 2023).

Figura 2: Ubicación de la microcuenca del río Maguazo



Fuente: Autor

En la (figura 2) se analizó la ubicación de la microcuenca Maguazo, su división política administrativa corresponde a la provincia de Chimborazo y se encuentra en la parroquia de Pungalá, que limita al norte con Chambo, al este con Pablo Sexto, al Oeste con Licto y al sur con Cebadas.

La microcuenca del río Maguazo, con un área de 25,19 km² y un perímetro de 27,05 km, presenta una forma alargada, evidenciada por un índice de compacidad de 1,52 y un factor de forma de 0,65 (tabla 2). Su pendiente media alcanza el 55,15%, indicando un terreno montañoso y abrupto, con altitudes que varían entre 3797 m.s.n.m y 3369 m.s.n.m.

La red hídrica tiene un orden 3, con una densidad de drenaje de $0,32 \text{ km}^{-1}$, una longitud total de 14 km y 8 canales principales, lo que señala una estructura de drenaje simple.

Tabla 2: Parámetros morfométricos de la Unidad Hidrográfica Maguazo

Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km^2	25,19
Perímetro	P	km	27,05
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,52
Ancho medio	B	adimensional	4,00
Longitud media	Lc	km	6,22
Factor de forma	Ff	adimensional	0,65
Relación de elongación	Re	adimensional	0,91
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,43
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	55,15
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	3
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	14,00
Densidad de drenaje	Dt	km^{-1}	0,32
Número de canales	Nt	adimensional	8
Altura Máxima río	Hmax	msnm	3797
Altura mínima del río	Hmin	msnm	3369
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	68,80
Tiempo de concentración	Tc	min	9,81
Tiempo de retardo	Tr	min	5,88

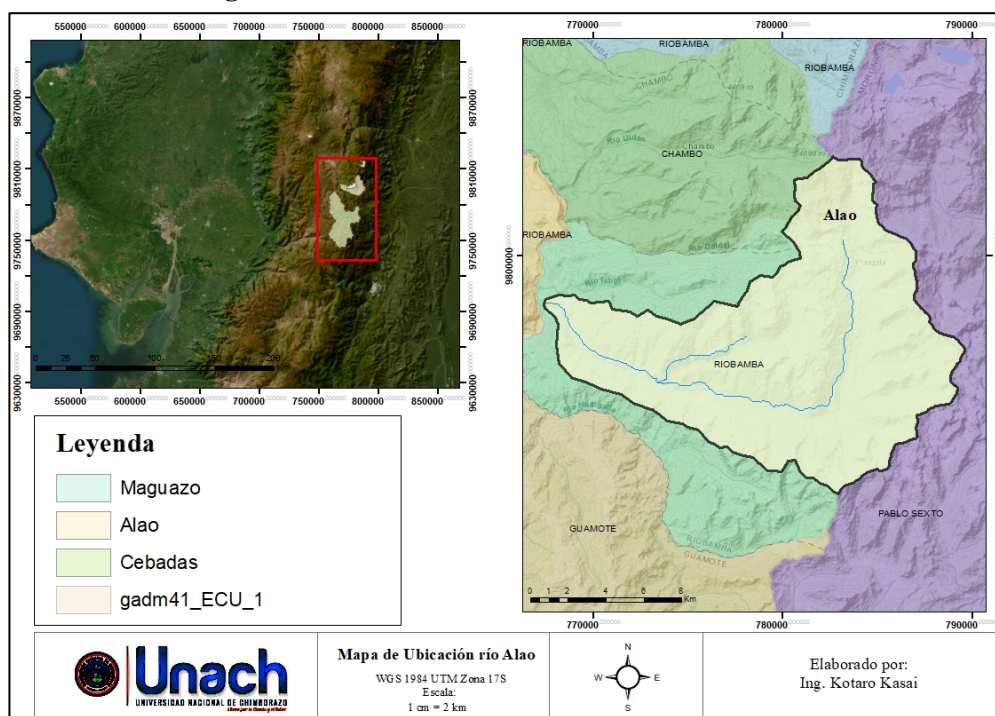
Fuente: Autor

El cauce principal muestra una elevada inclinación con una pendiente media del 68,80%, mientras que los tiempos de concentración y retardo son de 9,81 y 5,88 minutos, respectivamente, reflejando una rápida respuesta hídrica ante eventos de precipitación. Estas características hacen de esta microcuenca una región dinámica, con alta escorrentía y una red hidrográfica eficiente pero poco compleja.

Microcuenca del río Alao

La microcuenca del río Alao abarca un área aproximada de 185,87 km² y está ubicada en las estribaciones de los Andes, con coordenadas UTM Datum 84: 778.564,41 E y 9' 796.687,44 N. Este río es un afluente principal del río Chambo, con un flujo hídrico que desempeña un rol estratégico en el sistema hidrográfico del río Pastaza. Su relevancia radica en el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Riobamba y su utilización en actividades agropecuarias y generación de energía hidroeléctrica.

Figura 3: Ubicación de la microcuenca del río Alao



Fuente: Autor

La microcuenca se ubica en la provincia de Chimborazo y colinda con Morona Santiago, y su área de influencia incluye varias parroquias: Pungalá, Chambo, Licto, Cebadas y Pablo Sexto (figura 3).

Tabla 3: Parámetros morfométricos de la Unidad hidrográfica Alao

Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	Km ²	185,56
Perímetro	P	km	71,65
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,48
Ancho medio	B	adimensional	6,53
Longitud media	Lc	km	28,39
Factor de forma	Ff	adimensional	0,23
Relación de elongación	Re	adimensional	0,54
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,45
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	53,17
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	4
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	36
Densidad de drenaje	Dt	Km ⁻¹	0,08
Numero de canales	Nt	adimensional	14
Altura Máxima rio	Hmax	msnm	3573
Altura mínima del rio	Hmin	msnm	2861
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	23,95
Tiempo de concentración	Tc	min	39,91
Tiempo de retardo	Tr	min	23,95

Fuente: Autor

La microcuenca, abarca un área total de 185,56 km², con un perímetro de 71,65 km y una longitud media del cauce principal de 28,39 km (tabla 3).

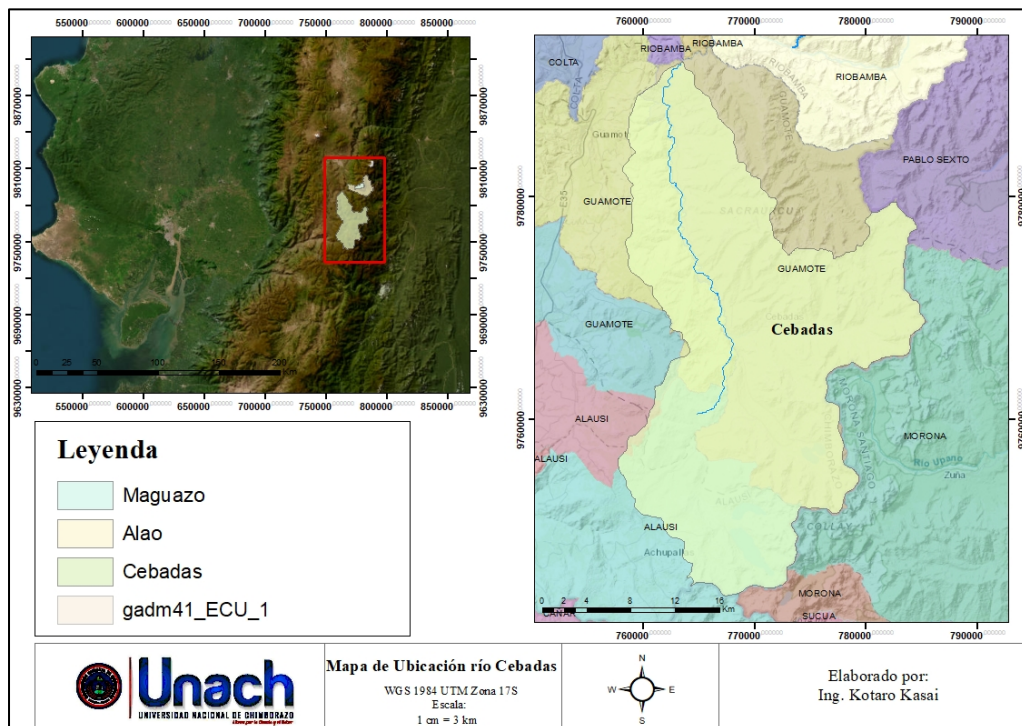
El índice de compacidad calculado es de 1,48, y la relación de circularidad es de 0,45, lo que indica una forma irregular.

La respuesta hidrológica, el tiempo de concentración de la microcuenca es de 39,91 minutos y el tiempo de retardo es de 23,95 minutos, lo que refleja una respuesta relativamente rápida.

Microcuenca del río Cebadas

La microcuenca del río Cebadas, ubicada en la provincia de Chimborazo en su mayoría, con un área dentro de Morona Santiago (figura 4), es de gran importancia para las parroquias cercanas, como: Guamote, Palmira, Tixán, Achupallas, Zunac, Río Blanco y Cebadas (Herrera et al., 2022).

Figura 4: Ubicación de la microcuenca del río Cebadas



Fuente: Autor

La microcuenca abarca un área de 709,24 km² con un perímetro de 158,16 km, lo que refleja una forma moderadamente compacta según su índice de compacidad (1,67) y su relación de circularidad (0,40).

Tabla 4: Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Cebadas

Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km ²	709,24
Perímetro	P	km	158,16
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,67
Ancho medio	B	adimensional	16,97
Longitud media	Lc	km	41,70
Factor de forma	Ff	adimensional	0,40
Relación de elongación	Re	adimensional	0,71
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,35
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	39,07
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	4
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	88
Densidad de drenaje	Dt	km ⁻¹	0,12
Número de canales	Nt	adimensional	22
Altura Máxima río	Hmax	msnm	3545
Altura mínima del río	Hmin	msnm	2950
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	27,80
Tiempo de concentración	Tc	min	61,74
Tiempo de retardo	Tr	min	37,05

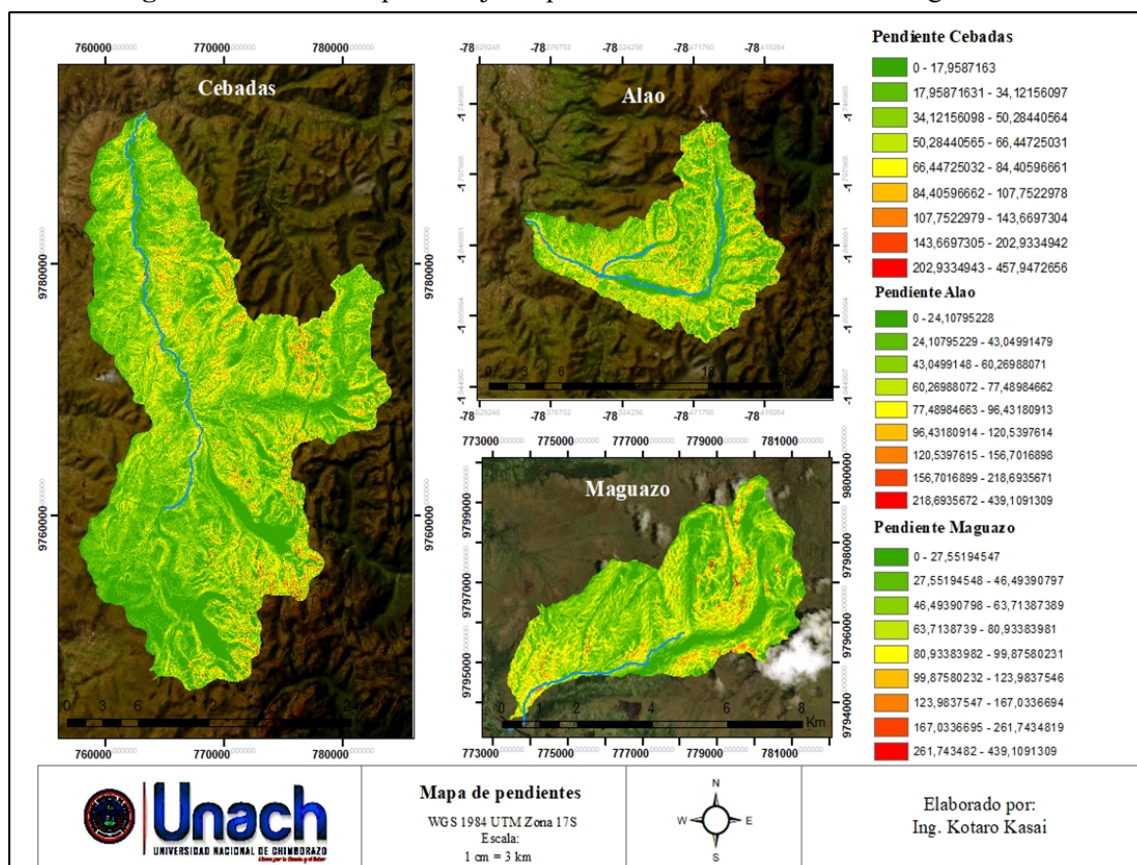
La pendiente media de la cuenca alcanzó el 39,07%, lo cual indica una topografía pronunciada, mientras que la densidad de drenaje fue baja (0,12 km⁻¹), con un total de 22 canales identificados y una longitud de red hídrica de 88 km. Se determinó una altura máxima de 3545 msnm y una altura mínima de 2950 msnm, con una pendiente media del cauce principal de 27,80. Además, el tiempo de concentración fue de 61,07 minutos y el tiempo de retardo de 37,05 minutos, destacando la rápida respuesta de la cuenca a eventos hidrológicos (tabla 4). Estos resultados permiten caracterizar las propiedades geomorfológicas e hidrológicas de la microcuenca, proporcionando una base para evaluar su dinámica hidrológica y su respuesta frente al cambio climático y eventos extremos.

4.2 Información Ambiental Básica

Caracterización de la pendiente de las microcuencas

El mapa de pendientes presentado en la (figura 5) detalla las características topográficas de las microcuencas de los ríos Cebadas, Alao y Maguazo. Este análisis es fundamental para comprender las dinámicas geomorfológicas e hidrológicas de cada microcuenca, permitiendo identificar zonas críticas de manejo y conservación.

Figura 5: Cálculo del porcentaje de pendientes de las unidades hidrográficas



Fuente: Autor

La microcuenca del río Cebadas muestra una predominancia de pendientes moderadas a altas, distribuidas de manera heterogénea. Las áreas con mayores pendientes, superiores al 66%, se concentran principalmente en las zonas montañosas al norte de la cuenca. Estas regiones presentan una alta susceptibilidad a procesos erosivos y deslizamientos, particularmente en eventos de lluvias extremas. Las pendientes más bajas, que oscilan entre 0% y 17%, se localizan a lo largo del cauce principal y en los valles, favoreciendo la acumulación de sedimentos y posibles usos agrícolas. La microcuenca del río Alao presenta una topografía más irregular, con pendientes que varían significativamente. Las pendientes bajas, de 0% a 24%, se encuentran concentradas en las zonas aledañas al cauce principal, lo que sugiere que estas áreas tienen un mayor potencial para actividades agrícolas o de conservación. Sin embargo, las pendientes altas, superiores al 77%, representan zonas críticas que podrían ser vulnerables a deslizamientos y procesos de erosión. Esto destaca la necesidad de implementar estrategias de manejo de suelo y reforestación para prevenir la degradación del terreno. La microcuenca del río Maguazo se caracteriza por una menor proporción de áreas con pendientes bajas (0% a 27%), las cuales se ubican predominantemente en la parte central de la cuenca y a lo largo del cauce principal. Las pendientes moderadas a altas, que superan el 120%, se localizan en las zonas montañosas y bordes de la microcuenca. Estas pendientes extremas generan una alta propensión a la escorrentía superficial rápida, lo que puede influir en el tiempo de concentración y aumentar el riesgo de inundaciones en las partes bajas de la cuenca.

Cobertura vegetal en las unidades hidrográficas

Los mapas de cobertura vegetal (figura 6 y 7), de las microcuencas Cebadas, Alao y Maguazo evidencian un uso intensivo del suelo para actividades agrícolas, siendo más pronunciado en Cebadas y Maguazo, mientras que Alao presenta una mayor conservación de bosque nativo, particularmente en zonas altas.

Figura 6: Identificación de la cobertura vegetal de las microcuencas Cebadas y Alao

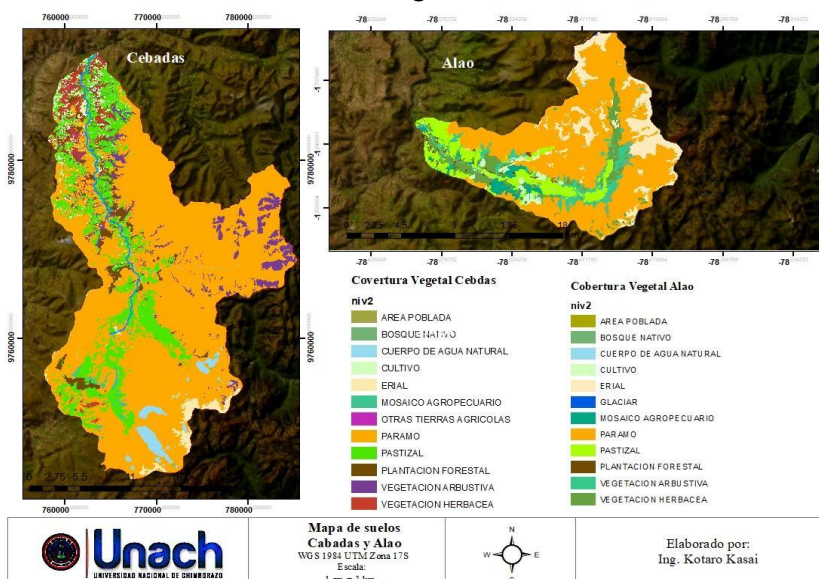
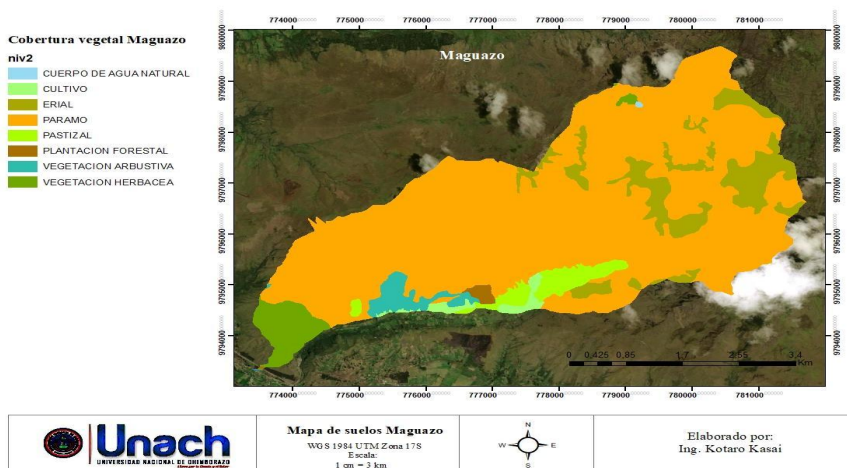


Figura 7: Identificación de la cobertura vegetal de la microcuenca Maguazo



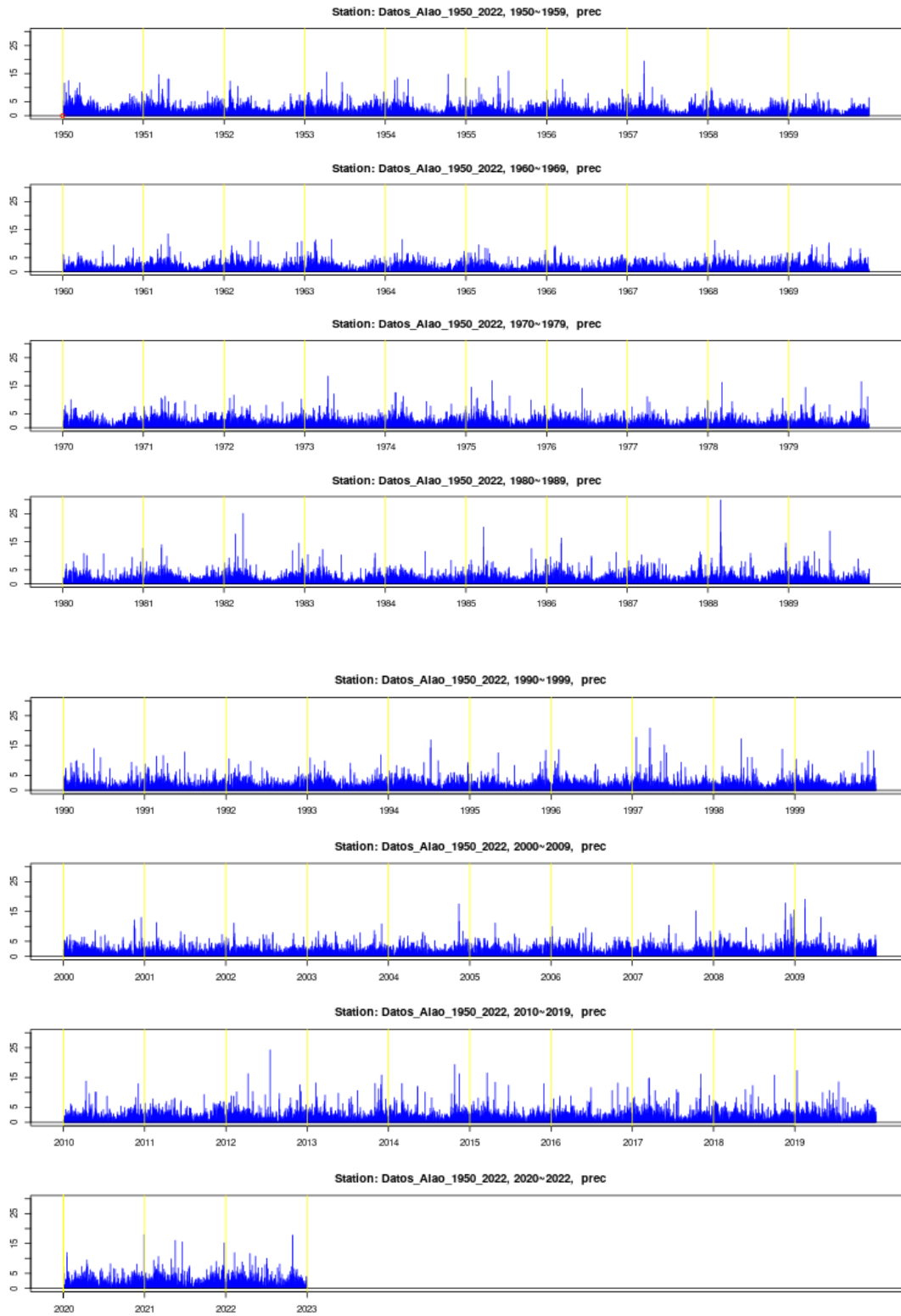
Fuente: Autor

Estas áreas boscosas y los páramos, presentes en todas las microcuencas, desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica y la protección de los suelos, aunque están en constante presión debido a la expansión agrícola. La presencia de mosaicos agropecuarios, vegetación arbustiva y herbácea en las áreas de transición resalta la necesidad de estrategias de manejo sostenible que equilibren la actividad económica con la conservación ambiental. Es crucial priorizar la reforestación, la conservación de páramos y bosques, así como el monitoreo continuo de los cambios en la cobertura vegetal para garantizar la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos en estas microcuencas estratégicas.

4.3 Homogenización y confiabilidad de las series temporales

El proceso de control de calidad implementado mediante el software ClimPACT no identificó la presencia de datos inconsistentes en las series temporales de precipitación y temperatura para las microcuencas hidrográficas de Alao (figura 8), Maguazo (figura 9) y Cebadas (figura 10), en el período de estudio (1981-2020). Este resultado respalda la confiabilidad de los datos utilizados, lo cual es esencial para garantizar la robustez de los análisis de índices climáticos.

Figura 8: Series temporales microcuenca Alao



Fuente: Autor

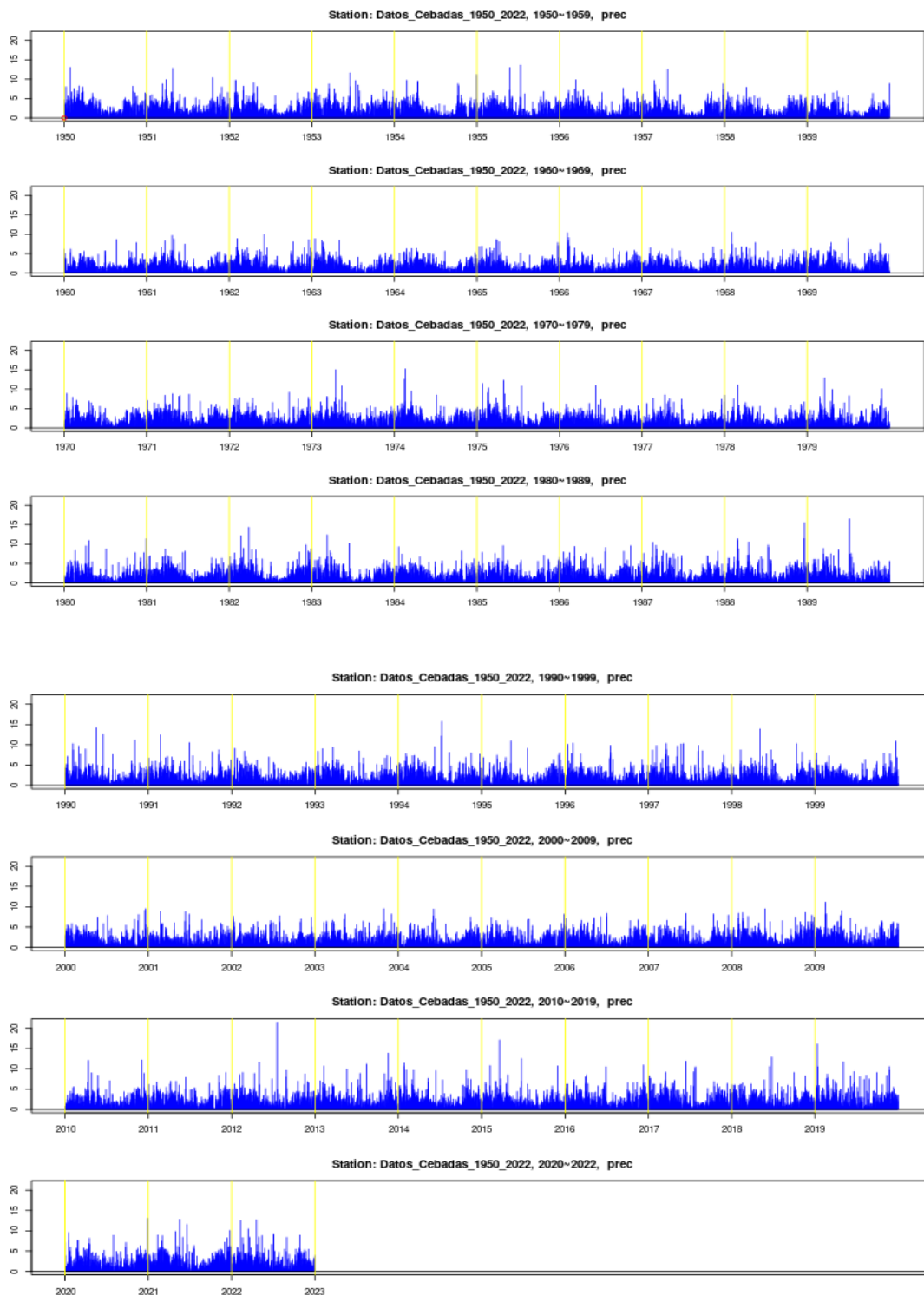
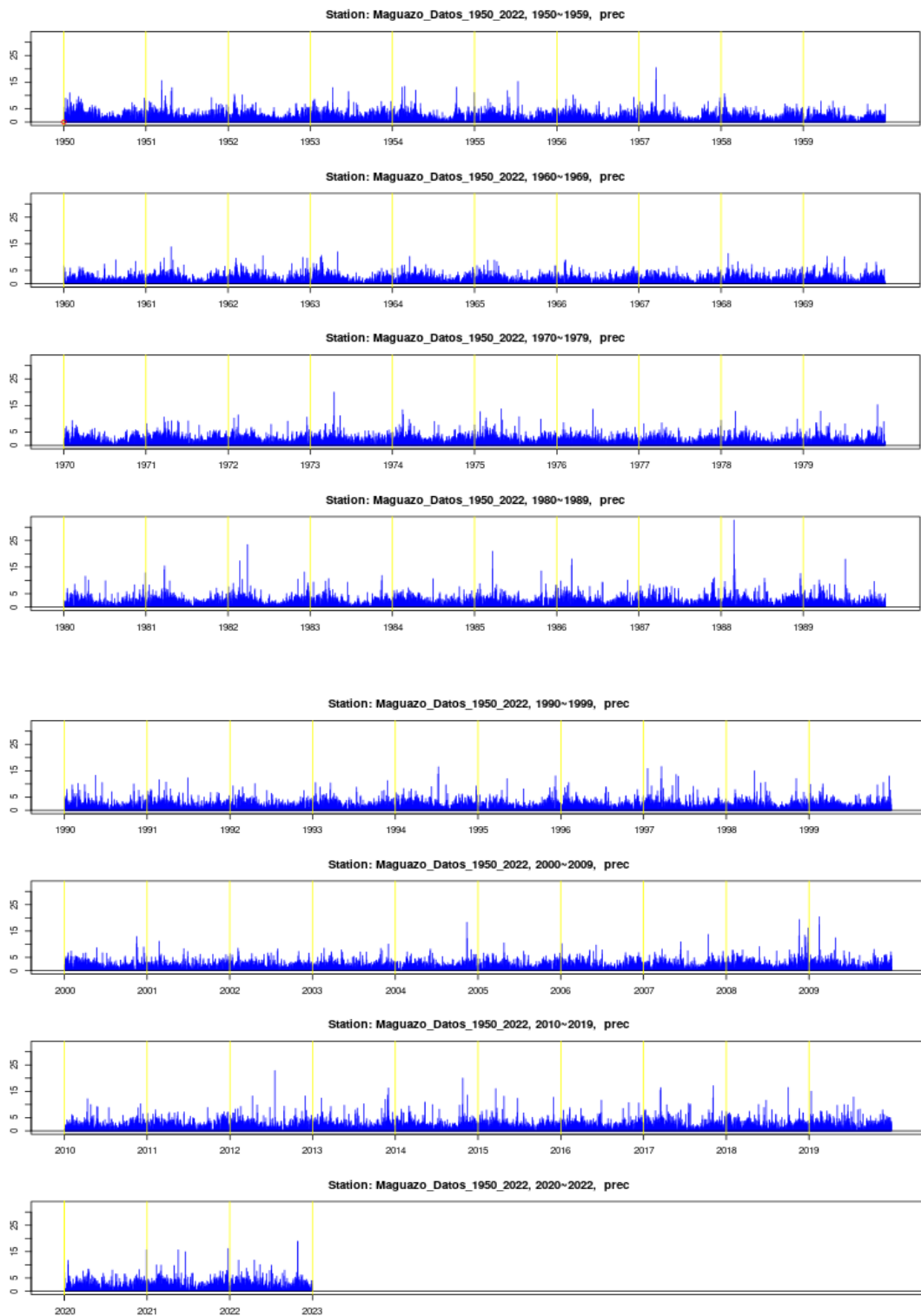
Figura 9: Series temporales microcuenca Cebadas**Fuente:** Autor

Figura 10: Series temporales microcuencia Maguazo

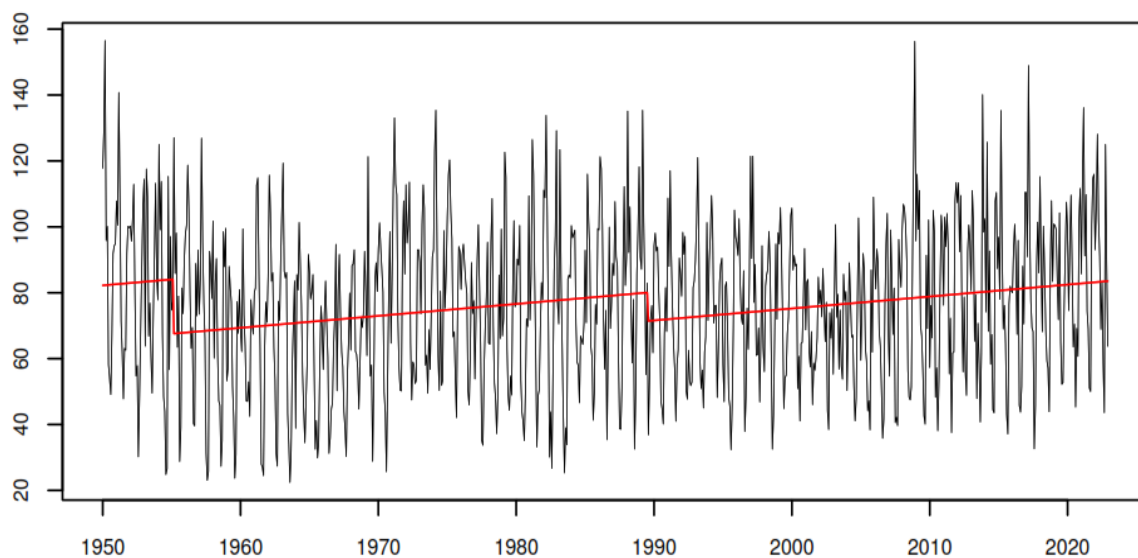
Fuente: Autor

Las figuras: 8, 9 y 10 correspondientes a los niveles diarios de precipitación para las tres microcuencas, distribuidos en intervalos de décadas. Las gráficas permiten visualizar patrones consistentes de variabilidad interanual e intranual en las precipitaciones.

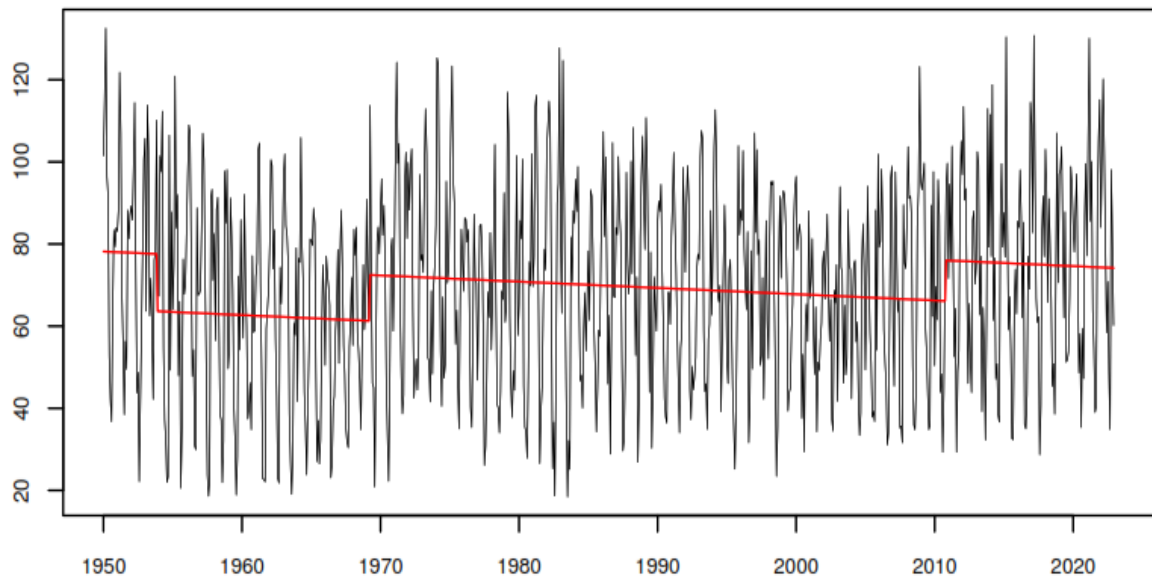
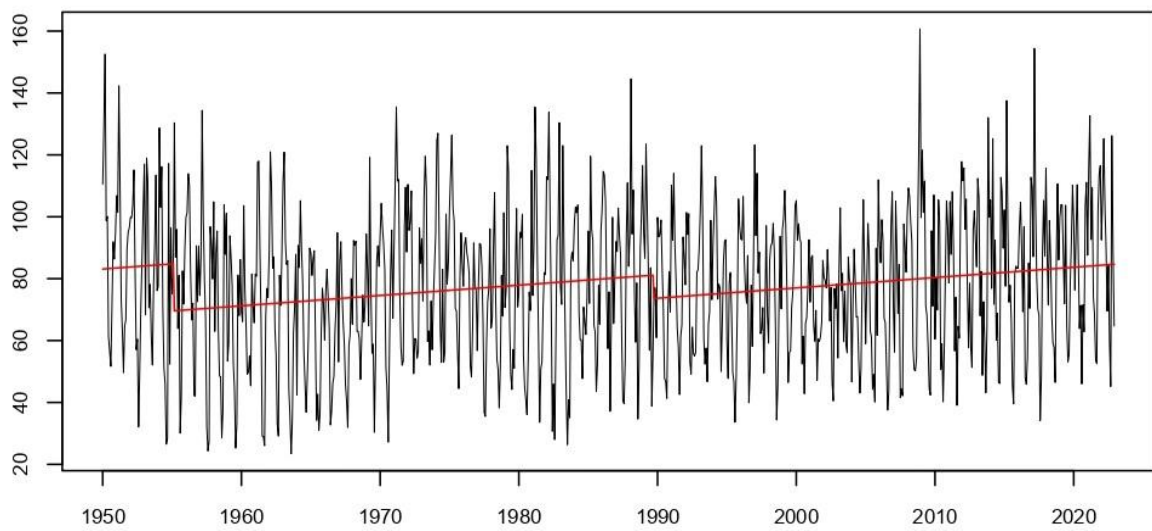
Este análisis fue complementado con una verificación cruzada utilizando los procedimientos estándar de calidad de datos de ClimPACT, tales como la detección de valores extremos no justificables y posibles anomalías en las tendencias.

Se realizó una homogenización previa de las series temporales con el software RHtest V4, para corregir posibles discontinuidades causadas por cambios en las estaciones, instrumentos o procedimientos de medición. Esto asegura que las tendencias climáticas observadas reflejen variaciones naturales y no errores de muestreo o alteraciones metodológicas.

Figura 11: Serie temporal homogenizada Alao
Base series and regression fit

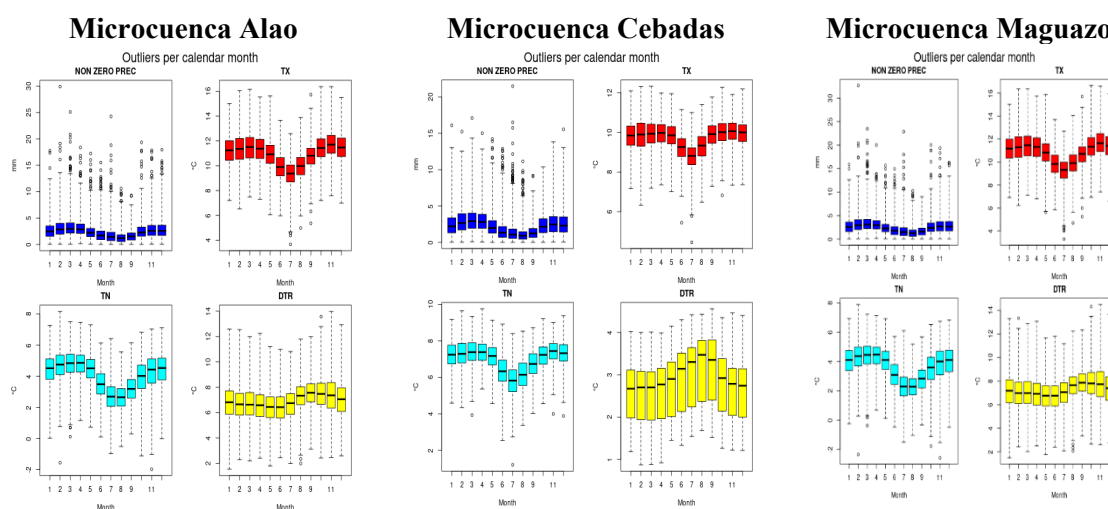


Fuente: Autor

Figura 12: Serie temporal homogenizada Cebadas**Base series and regression fit****Fuente: Autor****Figura 13: Serie temporal homogenizada Maguazo****Base series and regression fit****Fuente: Autor**

Las figuras: 11,12 y 13 de series temporales de las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas, presentan en el eje de las X los años, en el eje de las Y precipitación en milímetros, las líneas dentro de las gráficas indican la precipitación mensual a lo largo del tiempo (1950-2022), considerando el período (1981-2020), la línea roja representa la regresión ajustada en el tiempo.

Figura 14: Valores atípicos mensuales de las microcuencas



Fuente: Autor

En la (figura 14), se presentan los valores atípicos detectados para las variables climáticas evaluadas en las microcuencas de Alao, Maguazo, y Cebadas durante el período de análisis. Los resultados reflejan eventos extremos que se desvían significativamente de las distribuciones normales, permitiendo evaluar la variabilidad climática en las zonas de estudio.

4.4 Precipitación No nula (Non-Zero Prec)

Microcuencas de Alao y Maguazo: Se identificaron valores atípicos altos de precipitación diaria en febrero (36 mm) y marzo (25 mm). Estos valores indican eventos extremos de lluvia ocurridos en días específicos y representan episodios inusualmente intensos, aislados de la distribución típica de lluvias diarias.

Microcuenca del Río Cebadas: En julio, se detectó un valor atípico alto de (26 mm), refleja un evento extremo de precipitación intensa. En nuestro análisis se identifica la presencia de lluvias intensas que, aunque puntuales, tienen un impacto en el régimen hídrico y la dinámica de la cuenca.

4.5 Temperatura Máxima Diaria (TX)

Microcuencas de Alao y Maguazo: Los valores atípicos altos de temperatura máxima diaria alcanzaron 16 °C en septiembre, lo que indica un evento de calentamiento extremo asociado a condiciones de alta radiación solar y bajas precipitaciones.

Valores atípicos bajos de 3 °C fueron registrados en julio, relacionado con fenómenos de enfriamiento inusual durante eventos específicos de nubosidad prolongada.

Microcuenca del Río Cebadas: En julio, se observó un valor atípico bajo de 4 °C, evidenciando condiciones de enfriamiento extremo en esta microcuenca durante el mismo período.

4.6 Temperatura Mínima Diaria (TN)

Microcuencas de Alao y Maguazo: Los valores atípicos bajos alcanzaron $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en febrero y noviembre, estas condiciones extremas de enfriamiento nocturno están asociadas a cielos despejados y pérdida radiactiva.

Microcuenca del Río Cebadas: Un valor atípico bajo de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue registrado en julio, se evidencian eventos de enfriamiento extremos durante este mes, coincidentes con las tendencias observadas en TX.

4.7 Rango Diurno de Temperatura (DTR)

Microcuencas de Alao y Maguazo: Se observaron valores atípicos altos de $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en octubre, reflejando una amplificación del rango térmico diario vinculada a cielos despejados y condiciones secas que favorecen la máxima radiación solar durante el día y enfriamiento intenso durante la noche.

Valores atípicos bajos de $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en agosto indican una reducción significativa del rango térmico, asociado con alta nubosidad y lluvias persistentes que inciden tanto las temperaturas diurnas como nocturnas.

4.8 Índices de extremos climáticos

El análisis de los índices de extremos climáticos calculados con RCLimdex y ClimPACT revela patrones significativos de variabilidad en las microcuencas de Alao, Maguazo y Cebadas durante el período 1981-2020.

Los índices que cumplieron con el criterio de aprobación ($p\text{-value} < 0,2$) para considerarlos estadísticamente significativos fueron: CDD, PRCPTOT, R10MM, R95P, R99P, RX1day y SDII.

Tabla 5: Índices de extremos climáticos con RClimdex

Índice	Significado	Microcuena	Slope	P-value	Estadísticamente significativo
CDD	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Alao	-0,032	0,018	Si
		Cebadas	-0,051	0,004	Si
		Maguazo	-0,03	0,021	Si
CWD	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	Alao	0,013	0,932	No
		Cebadas	-0,044	0,691	No
		Maguazo	0,038	0,77	No
PRCPTOT	Precipitación total al año	Alao	1,241	0,021	Si
		Cebadas	1,033	0,03	Si
		Maguazo	1,282	0,013	Si
R10MM	Número de días con precipitación intensa >10mm	Alao	0,029	0,003	Si
		Cebadas	0,021	0,003	Si
		Maguazo	0,028	0,002	Si
R20MM	Número de días con precipitación intensa >20mm	Alao	0,001	0,462	No
		Cebadas	0,001	0,22	No
		Maguazo	0,001	0,576	No
R95P	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	Alao	0,964	0,001	Si
		Cebadas	0,767	0	Si
		Maguazo	0,919	0,001	Si

R99P	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	Alao	0,49	0,001	Si
		Cebadas	0,422	0,002	Si
		Maguazo	0,471	0,003	Si
RX1day	Máximo anual de precipitación en 1 día	Alao	0,061	0,007	Si
		Cebadas	0,033	0,028	No
		Maguazo	0,064	0,008	Si
RX5day	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	Alao	0,065	0,173	Si
		Cebadas	0,011	0,684	No
		Maguazo	0,073	0,16	Si
SDII	Intensidad de Lluvia (Precipitación anual total/ número de días húmedos) PRCP>1mm	Alao	0,003	0,024	Si
		Cebadas	0,002	0,056	Si
		Maguazo	0,002	0,047	Si

Fuente: Autor

Tabla 6: Índices de extremos climáticos con ClimPACT

Índice	Significado	Microcuena	Slope	P-value	Estadísticamente significativo
CDD	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Alao	0	0,105	Si
		Cebadas	-0,053	0,005	Si
		Maguazo	-0,018	0,071	Si
CWD	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	Alao	0,025	0,841	No
		Cebadas	-0,029	0,742	No
		Maguazo	0,029	0,742	No
PRCPTOT	Precipitación total al año	Alao	1,519	0,013	Si
		Cebadas	1,301	0,017	Si
		Maguazo	1,539	0,009	Si
R10MM	Número de días con precipitación intensa >10mm	Alao	0,024	0,007	Si
		Cebadas	0	0,006	Si
		Maguazo	0,025	0,002	Si
R20MM	Número de días con precipitación intensa >20mm	Alao	0	0,464	No
		Cebadas	0	0,226	No
		Maguazo	0	0,578	No
R95P	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	Alao	0,963	0,003	Si
		Cebadas	0,711	0,002	Si
		Maguazo	0,887	0,002	Si
R99P	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	Alao	0,399	0,004	Si
		Cebadas	0,27	0,012	Si
		Maguazo	0,427	0,002	Si
RX1day	Máximo anual de precipitación en 1 día	Alao	0,059	0,004	Si
		Cebadas	0,024	0,08	Si
		Maguazo	0,064	0,004	Si

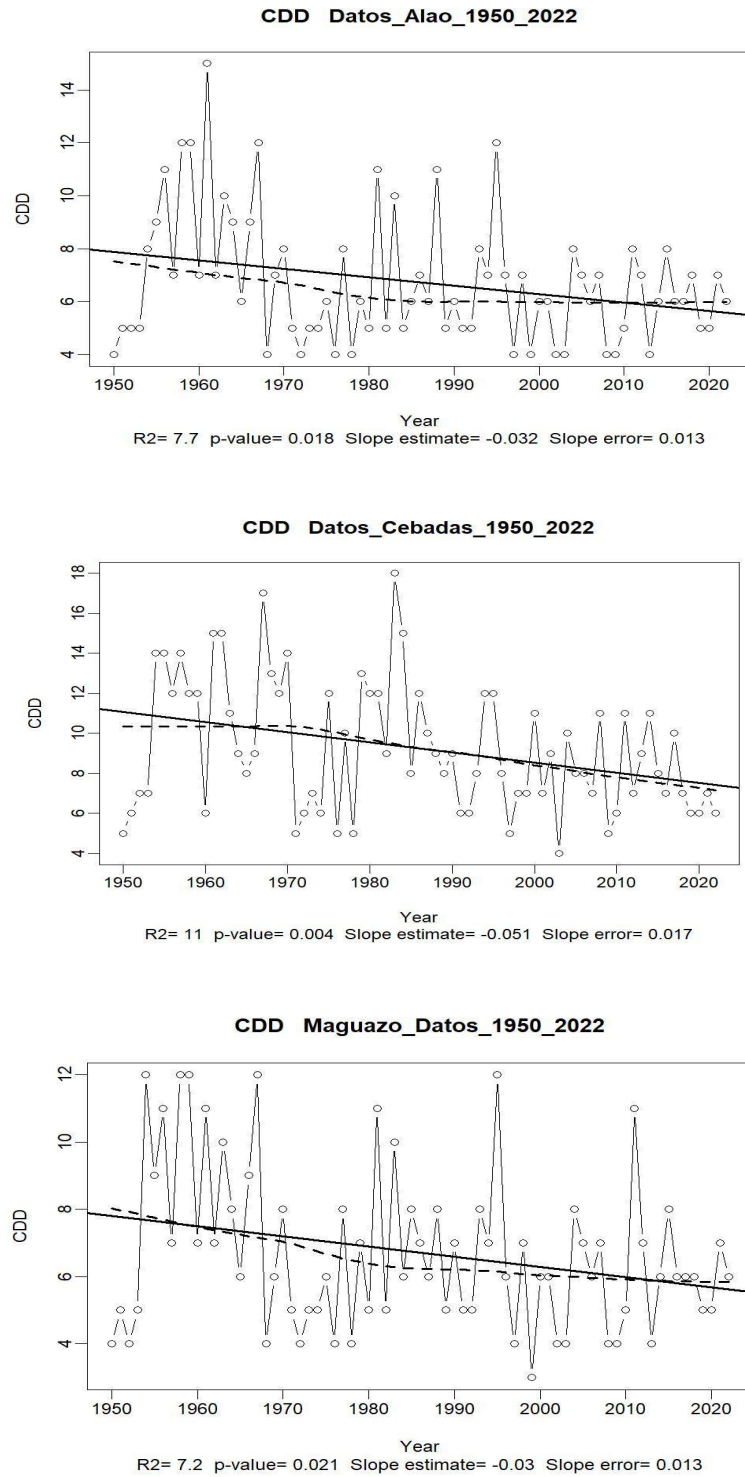
RX5day	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	Alao	0,043	0,28	No
		Cebadas	0,013	0,637	No
		Maguazo	0,051	0,21	No
SDII	Intensidad de Lluvia (Precipitación anual total/ número de días húmedos) PRCP>1mm	Alao	0,003	0,056	Si
		Cebadas	0,002	0,063	Si
		Maguazo	0,002	0,104	Si

Fuente: Autor

Índice CDD Mayor número de días secos consecutivos en un año

Los resultados de RClindex (tabla 5) y ClimPACT (tabla 6) son consistentes, durante el período 1981-2020, las tres microcuencas muestran una disminución significativa en los días secos consecutivos, particularmente en Cebadas, con una tendencia (-0,051 días/año) más pronunciada en comparación con Alao (-0,032 días/año) y Maguazo (-0,03 días/año) (figura 15). Esto implica que los períodos de sequía extrema han disminuido ligeramente en frecuencia durante las últimas décadas.

Figura 15: Índices de CDD de las Unidades Hidrográficas.



Fuente: Autor

En la (figura 15) podemos observar que en la microcuenca del río Alao, el número máximo de días secos consecutivos varía entre 15 y 25 días durante el período de análisis. La microcuenca del río Cebadas presenta rangos entre 28 y 40 días, destacándose como la microcuenca más vulnerable a largos períodos de sequía. La microcuenca del río Maguazo presenta un rango moderado de 18 a 30 días, con un comportamiento más homogéneo respecto a las otras microcuencas.

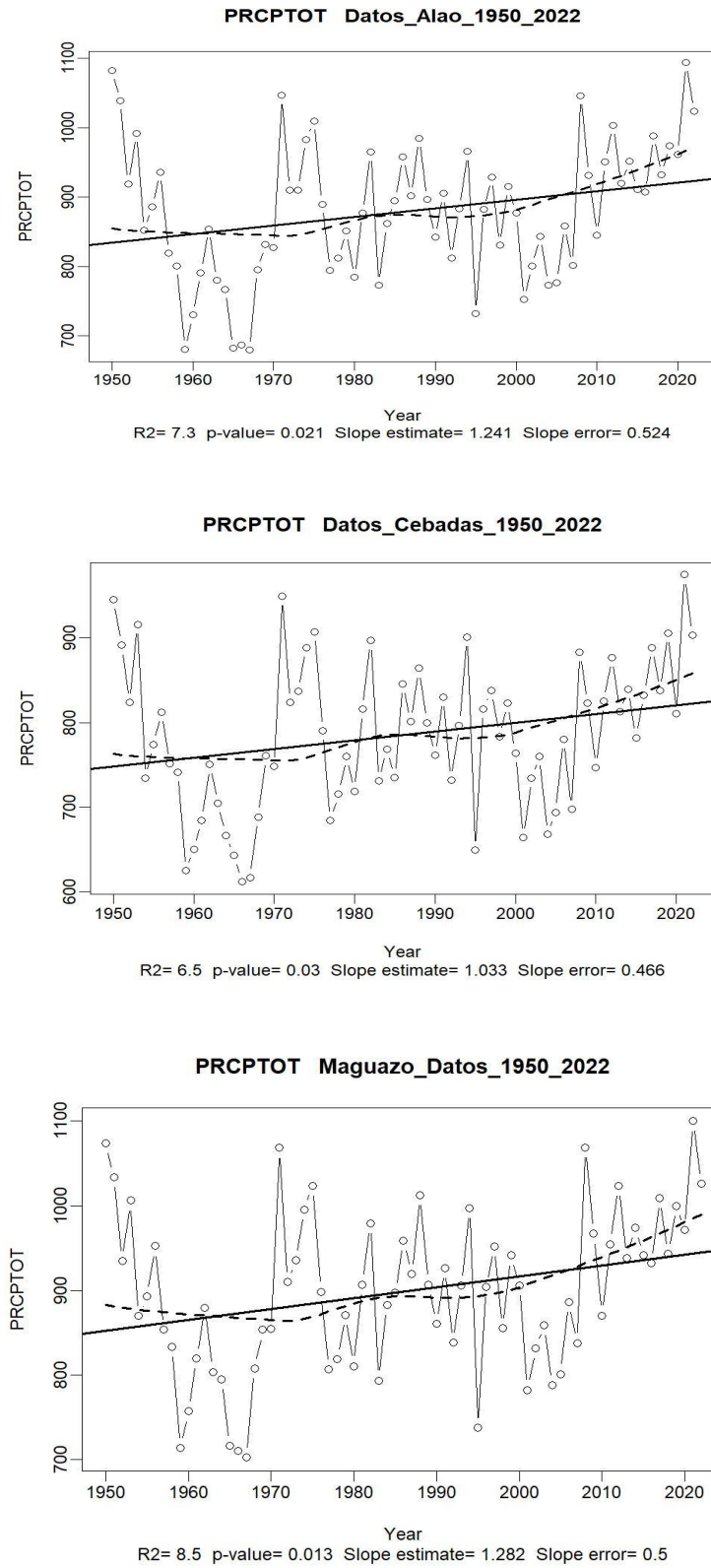
En el período base (1950-1980), los días secos consecutivos eran más frecuentes y severos, especialmente en Cebadas. En el período 1981-2020, la reducción en la magnitud de CDD está asociada a un climático en la región.

En términos absolutos, la disminución de los días secos consecutivos es más pronunciada en Cebadas, con una reducción promedio de 2 días cada 40 años. En Alao y Maguazo, la reducción es menor, con una disminución aproximada de 1 día cada 40 años.

Índice PRCPTOT Precipitación total anual

La aplicación de las herramientas RClimdex y ClimPACT muestran tendencias positivas en las tres microcuencas, confirmando el aumento de la precipitación anual durante el período de estudio. Este aumento está alineado con las proyecciones de cambio climático, donde se espera que en regiones de montaña se concentren mayores cantidades de lluvia.

Figura 16: Análisis de los índices de la precipitación total anuales de las microcuencas



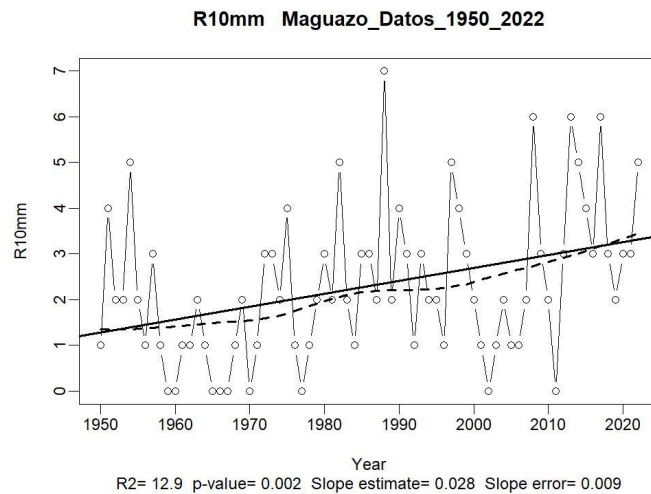
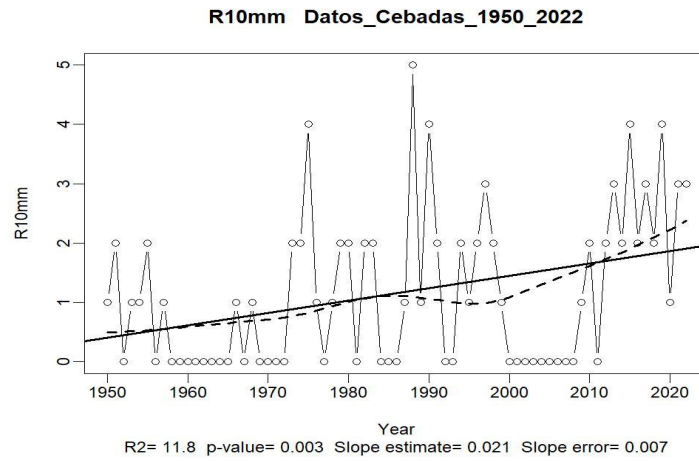
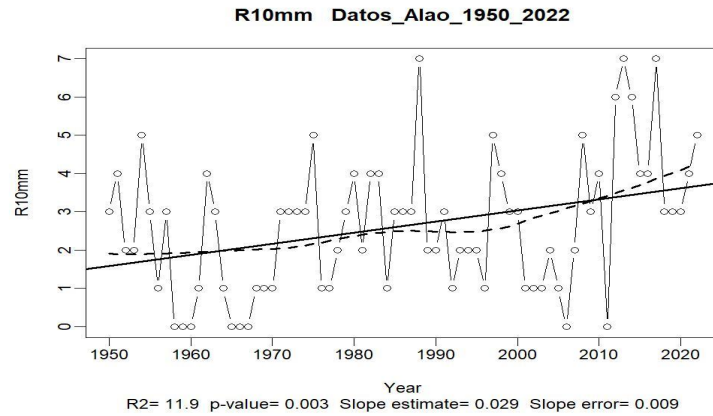
Fuente: Autor

En las microcuencas de los ríos Alao y Maguazo la precipitación anual oscila entre 800 y 1300 mm, con un incremento moderado pero constante (1,2 mm/año). La microcuenca del río Cebadas (1,033 mm/año) presenta un rango de precipitación total anual más bajo, entre 700 y 1,100 mm (figura 16). En comparación con el período base (1950-1980), los valores de precipitación total anual han mostrado un incremento promedio de 40-60 mm por década en las tres microcuencas.

Índice R10MM Número de días con precipitación intensas > 10mm

El índice R10MM permite identificar eventos de lluvia intensa, en la (figura 17) se puede observar un incremento en el número de días con precipitaciones intensas en las microcuencas de Alao y Maguazo, con magnitudes que oscilan entre 0,024 y 0,029 días/año. En la microcuenca del río Cebadas los incrementos son menores con valores de 0,021 días/año.

Figura 17: R10MM en las microcuencas, Alao, Maguazo y Cebadas.



Fuente: Autor

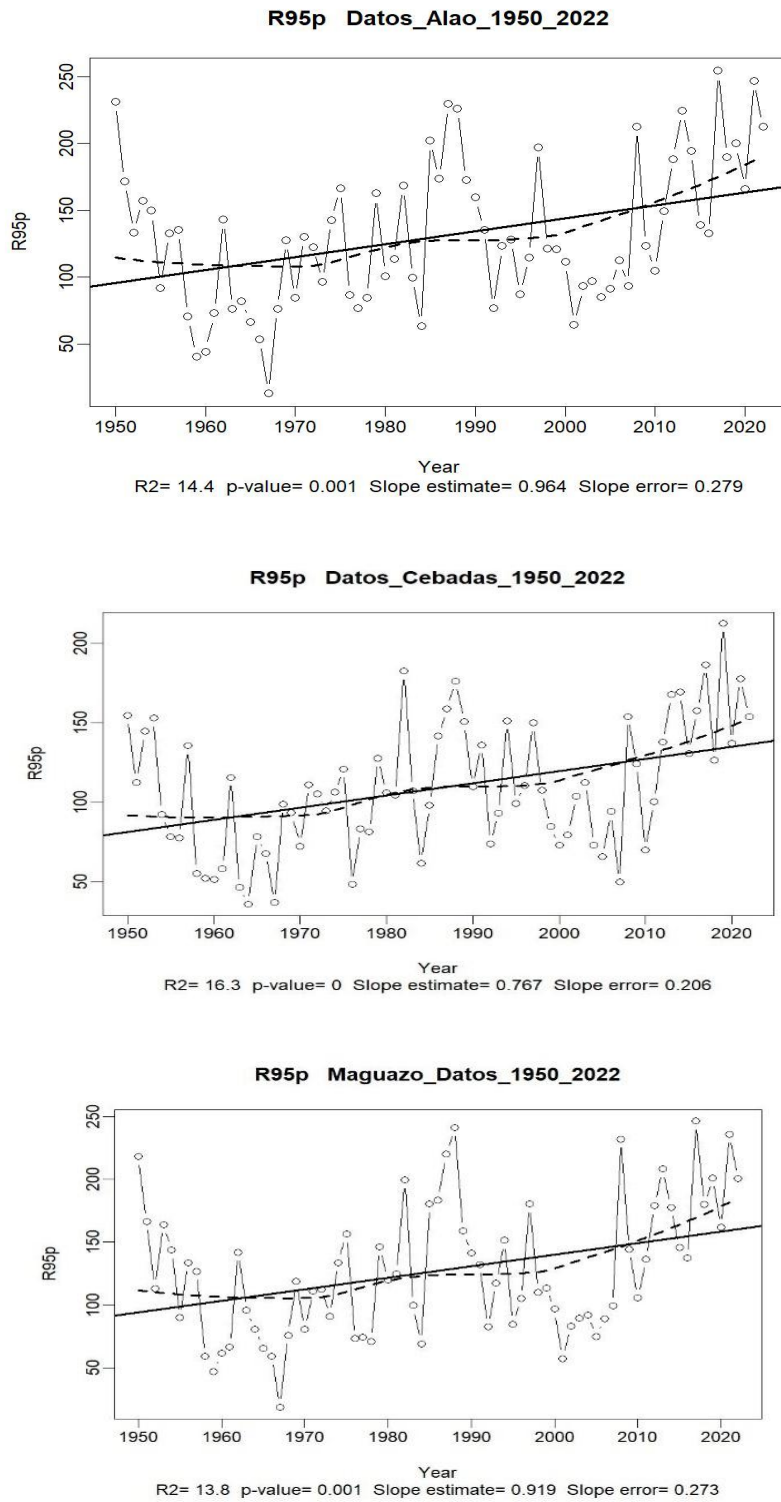
En la microcuenca del río Alao, el número de días con lluvias intensas que sobrepasan los 10 mm aumentó en 1 día adicional cada 35 años, la microcuenca del río Cebadas tiene un comportamiento más estable y se observa valores constantes, la microcuenca del río Maguazo presenta un incremento de 1 día adicional cada 40 años.

Los resultados observados están alineados con los efectos proyectados del cambio climático, en la zona de estudio se podría predecir un aumento en la intensidad y frecuencia de eventos extremos de precipitación.

Índice R95P Precipitación anual total en que RR>95 percentil

Los programas, RCLimdex y ClimPACT, reportan un aumento en la precipitación anual acumulada asociada a eventos extremos (>95 percentil) en las tres microcuencas analizadas (figura 18), con valores que oscilan entre 0,767 mm/año y 0.964 mm/año. Este incremento corresponde a la intensificación de las lluvias extremas, vinculada a los efectos del cambio climático en la región andina del Ecuador.

Figura 18: Análisis de los índices R95P en las Unidades Hidrográficas



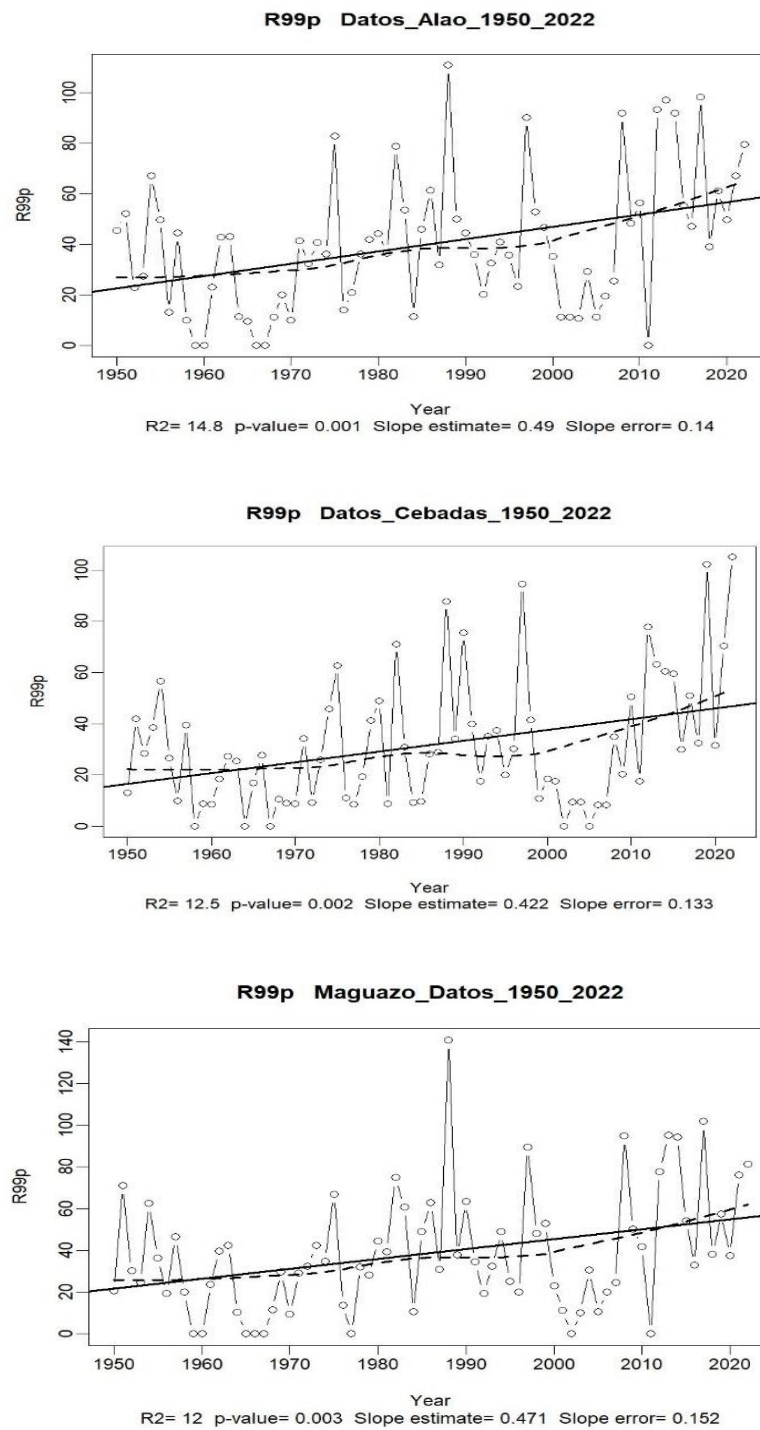
Fuente: Autor

En las microcuencas de los ríos Alao y Maguazo, se observa un incremento de aproximadamente 38,56 mm 36,76 mm en el total de precipitación extrema acumulada durante el período 1981-2020 (40 años), en tanto que en la microcuenca del río Cebadas el aumento acumulado es menor en comparación con las otras microcuencas 30,68 mm. Durante el período 1981-2020, se observa un patrón consistente de aumento en la intensidad de los eventos de precipitación extrema, destacando que estos eventos están contribuyendo de manera creciente al total anual de precipitación en las tres microcuencas.

Índice R99P Precipitación anual total en que RR>99 percentil

Los resultados del índice R99P que mide la precipitación total anual atribuida a eventos de lluvia extrema que superan el percentil 99 de la distribución histórica, se pueden observar en la (figura 19), con aumentos significativos en la precipitación anual asociada a eventos extremadamente intensos (> 99 percentil) en las tres microcuencas, este aumento es consistente con los impactos de cambio climático.

Figura 19: Análisis del cálculo de los índices R99P de las microcuencas.



Fuente: Autor

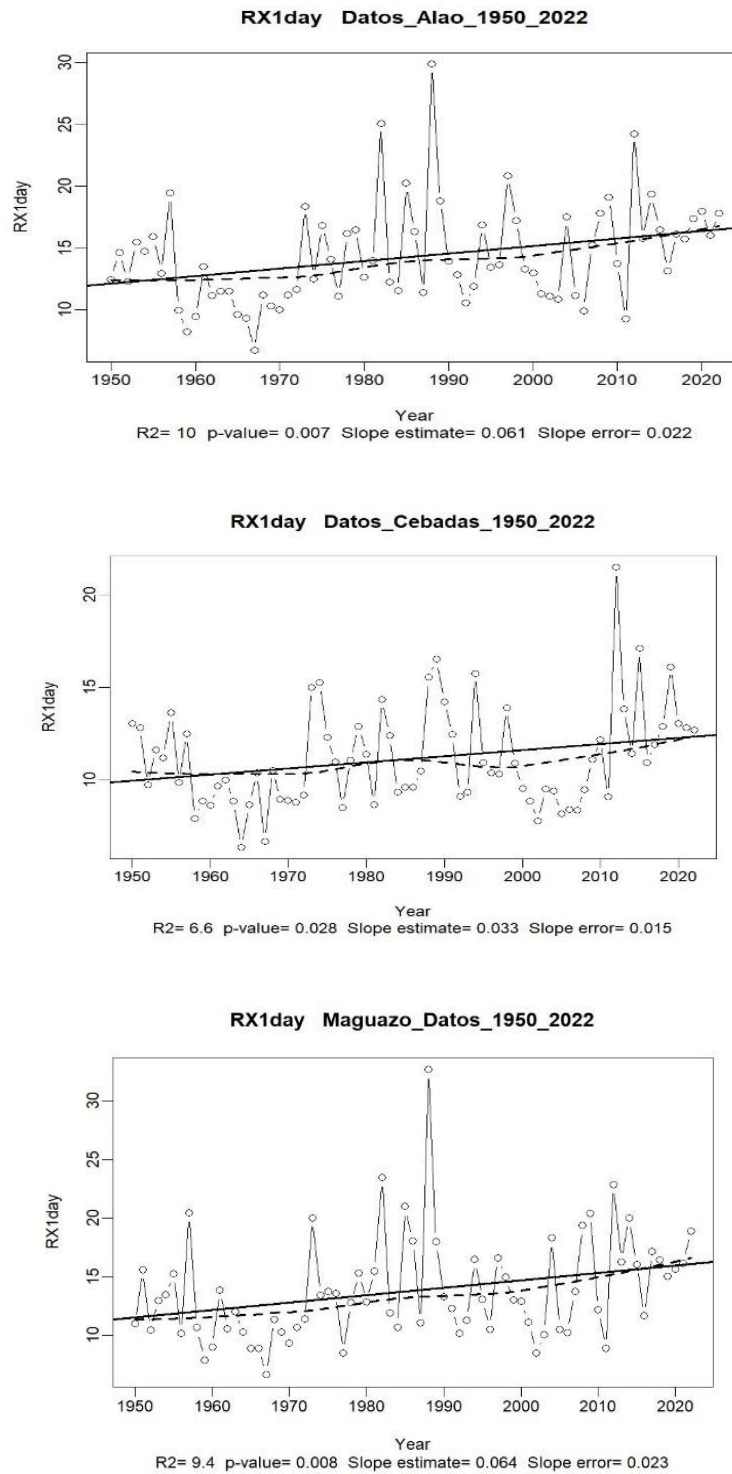
En la microcuenca del río Alao, se reporta el mayor incremento acumulado aproximadamente 19,6 mm adicionales de precipitación extrema durante el período de estudio, la microcuenca del río Cebadas presenta el menor incremento, con un aumento acumulado de 16,88 mm, para el caso de la microcuenca del río Maguazo los incrementos acumulados alcanzan valores de 18,84 mm.

Índice RX 1 día máximo anual de precipitación en 1 día

Las herramientas utilizadas reportan incrementos en el índice RX1 day en las tres microcuencas (figura 20), indicando un aumento en la intensidad de los eventos extremos diarios de precipitación.

Los incrementos más altos se observan en las microcuencas de Maguazo y Alao con valores de 0,064 mm/año y 0,059 mm/año respectivamente.

Figura 20: Análisis de los índices RX en las Unidades Hidrográficas



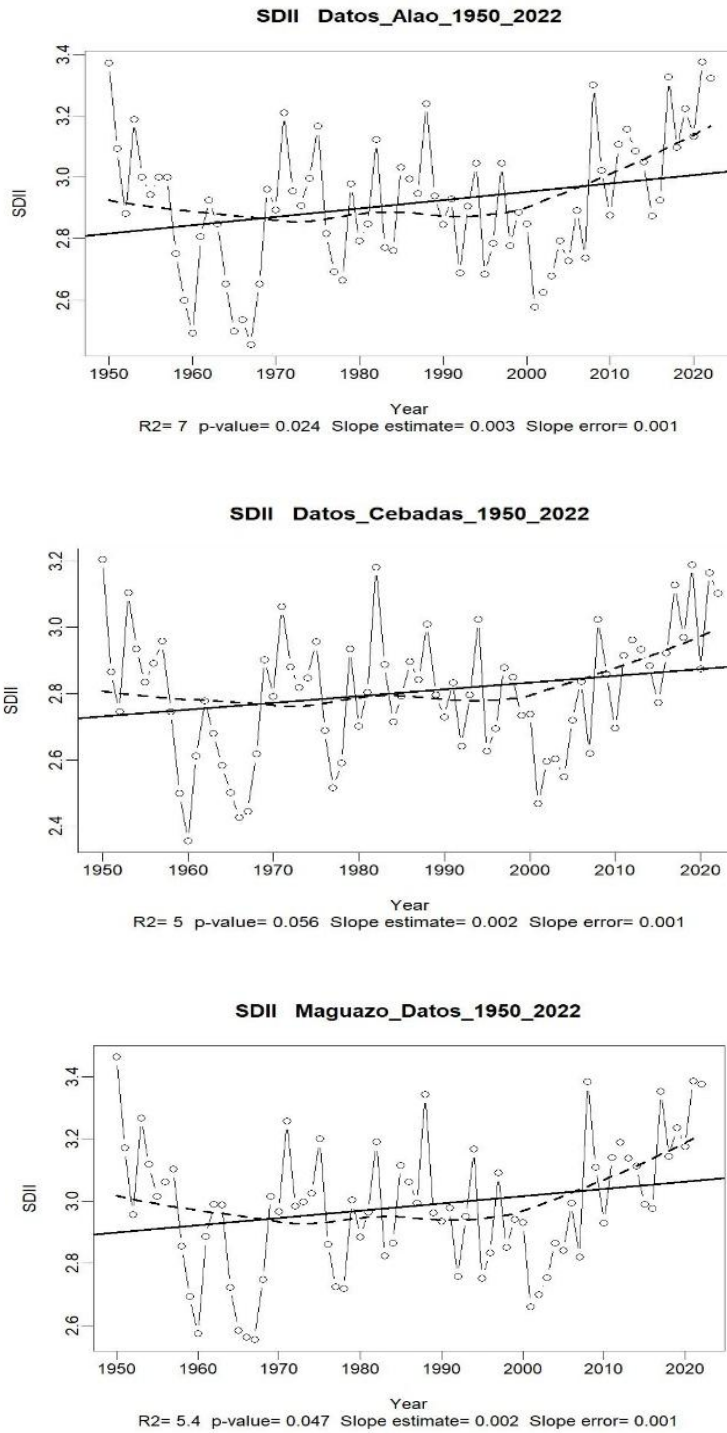
Fuente: Autor

Los resultados muestran una intensificación gradual de la máxima precipitación diaria en las microcuencas, con mayores incrementos en las últimas dos décadas (2000-2020). En la microcuenca de los ríos Alao y Maguazo se reportan incrementos acumulados de aproximadamente 2,44 mm y 2,56 mm en el período 1981-2020, en tanto que en la microcuenca del río Cebadas se reporta un aumento acumulado de 1,32 mm para el período de estudio.

Índice SDII Intensidad de Lluvia (Precipitación anual total/ número de días húmedos) PRCP>1mm.

En referencia al índice SDII los resultados tanto de RClindex como de ClimPACT muestran un incremento en la intensidad promedio de lluvia en las tres microcuencas. En la (Figura 21), podemos observar un incremento acumulado de 0,12 mm/día en 40 años, en tanto que para las microcuencas de los ríos Cebadas y Maguazo el incremento acumulado es de 0,08 mm/día.

Figura 21: Análisis de los índices SDII en las Unidades Hidrográficas



Fuente: Autor

El índice SDII muestra una tendencia ascendente en la intensidad promedio de lluvia en días húmedos en las tres microcuencas analizadas durante el período 1981-2020. Los aumentos son más pronunciados en las últimas dos décadas, coincidiendo con un incremento en la variabilidad climática.

4.9 Escenario RCP4.5 para analizar la variabilidad de precipitación y temperatura en las microcuencas hidrográficas de Alao, Maguazo y Cebadas para el año 2050.

Este escenario supone que las emisiones globales de gases de efecto invernadero comienzan a disminuir alrededor de 2040, estabilizándose hacia 2100. Implica la implementación de políticas climáticas y tecnologías para reducir emisiones.

Tabla 7: Escenario Global RCP4.5 para 2050

Aspecto	RCP4.5
Concentración de CO ₂ (2050)	500 -550 ppm
Temperatura Global (2050)	Incremento 1,3 y 1,9 °C
Reducción de emisiones	Si, implementada desde 2040
Energías renovables	Incremento significativo
Impactos climáticos	Moderados, aún gestionables

En la (tabla 7) se puede observar que en el escenario global se espera un incremento de temperatura media global entre 1,3 y 1,9 °C, se espera alteraciones en la distribución de lluvias y moderados impactos en eventos extremos como olas de calor y sequías.

Tabla 8: Cambio en los valores promedio de temperatura mínima y máxima a nivel de subcuencas hidrográficas entre la línea base y el escenario de cambio climático al año 2050.

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Río Chambo	1,5	1,4	1,54	1,6	1,8	2	2,1	1,7	1,4	1,5	1,5	1,4	1,62
Río Patate	1,6	1,5	1,55	1,6	1,85	2,1	2,1	1,8	1,5	1,6	1,6	1,5	1,66

(Bustamante, 2017).

Para la región andina del Ecuador se espera posibles incrementos de temperaturas (tabla 8), en la subcuenca del río Chambo se espera en promedio un incremento de la temperatura mínima y máxima de 1,62 °C para el 2050.

Tabla 9: Cambio en los valores promedio de precipitación (mm) a nivel de subcuencas hidrográficas entre la línea base y el escenario de cambio climático al año 2050.

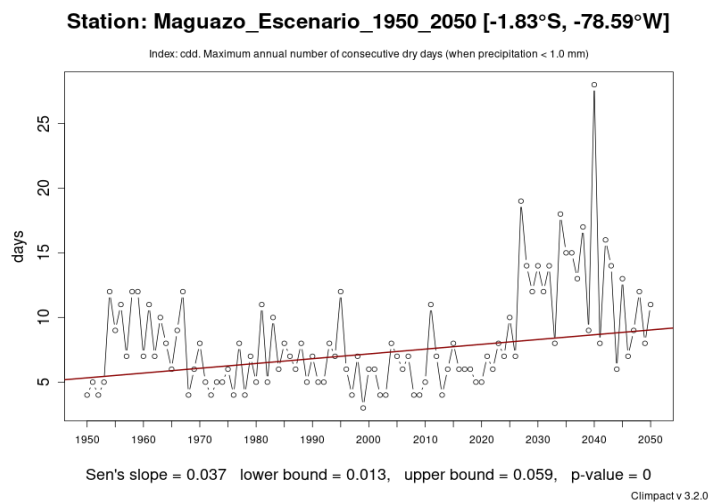
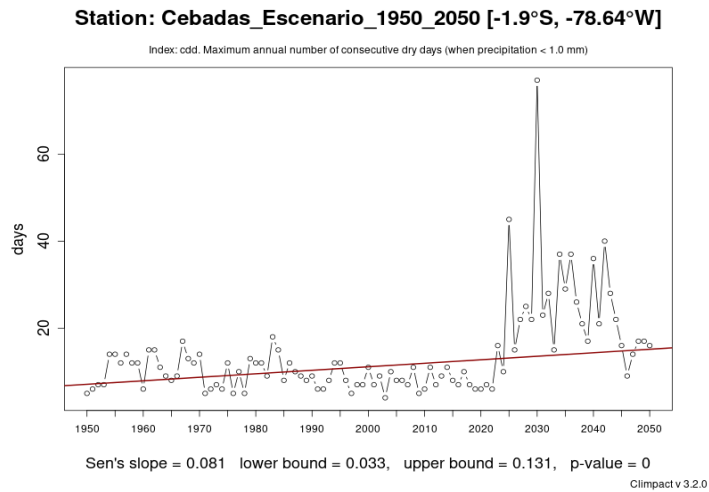
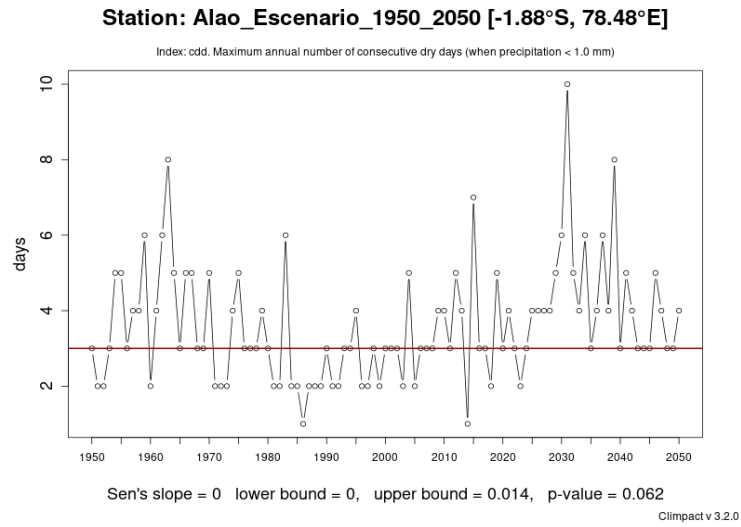
Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Chambo	-18	-2,9	-11	-72	-18	-7,1	-11	-16	-17	-15	-11	-23
Río Patate	-33	-2,2	-3,1	-88	-17	23	-17	-15	-15	-14	-6,9	-26

(Bustamante, 2017).

En la (tabla 9) se observan para el año 2050 disminuciones en la precipitación anual o cambios en la distribución temporal (lluvias más intensas en menor tiempo).

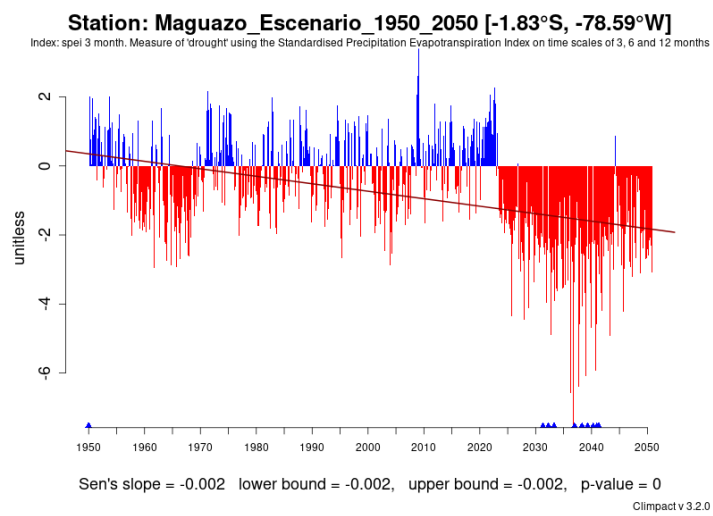
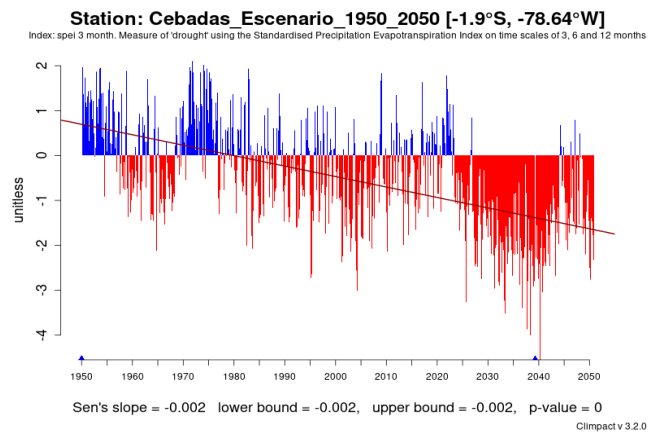
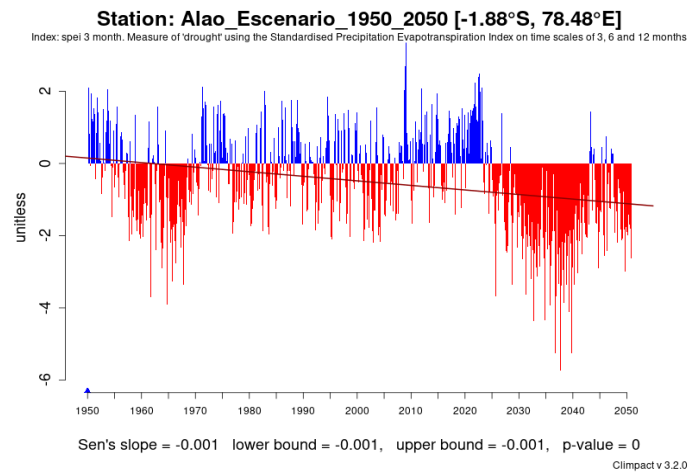
Con los datos corregidos y ajustados se procesaron las variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) y con RClimdex se obtuvieron los resultados de los índices climáticos relevantes.

Figura 22: Índice días consecutivos secos en las microcuencas para períodos proyectados.



En la (figura 22), en relación con el índice de días consecutivos secos, se puede observar la frecuencia de períodos secos, en los que la precipitación es menor a 1 mm. En las microcuencas de estudio para el período 1950-2050 bajo un escenario proyectado no presentan tendencias significativas al aumento o disminución del número máximo de días consecutivos secos. Entre 1950 y 2000, se observa una menor variabilidad en los días secos, con valores que oscilan en su mayoría entre 2 y 20 días consecutivos. A partir del año 2000, especialmente después de 2030, se evidencia una mayor frecuencia de picos extremos, alcanzando hasta 60 días consecutivos secos en la microcuenca del río Cebadas.

Figura 23: Índice de precipitación estandarizado y evapotranspiración para las microcuencas de estudio en un período proyectado.



La (figura 23), muestra la evolución del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración para tres meses, se puede apreciar que en las microcuencas de estudio una tendencia negativa, aunque los valores son pequeños, su acumulación a lo largo de 100 años genera un deterioro en el balance hídrico, esto implica un incremento gradual en la frecuencia de las condiciones de sequía, que son concordantes con los escenarios de cambio climático.

A partir del año 2000, las condiciones de déficit hídrico se vuelven más persistentes, con eventos extremos que alcanzan con valores que alcanzan a -6, caracterizando sequías extremas. Las condiciones húmedas son cada vez menos frecuentes hacia las últimas décadas, especialmente después del año 2020.

La tendencia negativa del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración indica que los aumentos en la temperatura proyectados para el período 1950-2050 están contribuyendo al incremento de la ETP, lo que intensifica los déficits hídricos, incluso en escenarios donde las precipitaciones se mantienen constantes o muestran un ligero aumento.

La disminución del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración a lo largo del tiempo indica que las condiciones hídricas en la región de estudio estarán sujetas a mayores presiones debido al cambio climático, afectando tanto los sistemas naturales como las actividades humanas, incluidas la agricultura y el abastecimiento de agua potable.

Los valores negativos en el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración durante varias décadas, especialmente en las últimas proyecciones (2020-2050), evidencia un aumento en la duración y recurrencia de eventos de sequía, lo que podría afectar a la seguridad hídrica y la sostenibilidad de los recursos.

4.10 Discusión de los Resultados: Análisis del cambio Climático en las microcuencas de estudio.

El análisis de la variabilidad y tendencias climáticas en las microcuencas de los ríos Alao, Cebadas y Maguazo, correspondiente al período 1981-2020, se fundamentó en el uso de herramientas especializadas como RClindex y ClimPACT. Estas herramientas permitieron calcular índices de extremos climáticos como SDII (Intensidad de Lluvia), RX1day (Máximo de un día), R95P RX5day (Máximo de cinco días consecutivos), PRCPTOT (Precipitación Total Anual) y CDD (Días Consecutivos Secos)

Los resultados obtenidos confirman que las microcuencas estudiadas están experimentando cambios significativos en sus patrones de precipitación, con un aumento en la intensidad y frecuencia de lluvias extremas, acompañado de una disminución en los períodos secos. Estos hallazgos reflejan el impacto del cambio climático en la dinámica hídrica regional.

El índice **PRCPTOT** muestra una tendencia positiva en las precipitaciones anuales para las microcuencas de los ríos Alao, Cebadas y Maguazo, se evidencia un incremento sostenido en la cantidad total de lluvia. Estos resultados coinciden con los reportes de la **Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (SCNCC, 2017)**, que documenta un aumento promedio del 13% en las precipitaciones de la región interandina. Según Álvarez (2020), este patrón es evidente en varias zonas de la Sierra ecuatoriana, corroborando los hallazgos de este estudio.

De manera similar, Rivera (2022), reporta un incremento ligero en las precipitaciones anuales en la zona norte de Chimborazo, que coincide con la tendencia creciente observada

en las microcuencas analizadas. Este fenómeno también ha sido documentado en otras regiones andinas. Por ejemplo, el estudio de Villazon & Lipa (2022), en Guaranda y Loja evidencia tendencias similares de aumento en la precipitación, indicando un patrón regional más amplio vinculado al cambio climático.

Los índices de precipitación extrema, como **RX1day** y **RX5day**, muestran un incremento en la intensidad de lluvias de corta duración. Esto coincide con los informes del **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (SNMHE, 2020)**, que destacan un aumento en la frecuencia de eventos extremos en la región interandina durante las últimas dos décadas. Este cambio en la dinámica de las lluvias extremas se asocia con la intensificación de eventos meteorológicos, un fenómeno atribuido al calentamiento global.

El análisis de las temperaturas máximas y mínimas complementa el estudio de las precipitaciones. Según Thielen (2024), las precipitaciones extremas han aumentado en los últimos 50 años, con mayor intensidad en la Sierra Central, que incluye a Chimborazo. Este estudio destaca que el cambio climático está impulsando lluvias más intensas en eventos de corta duración, lo que concuerda con los resultados de este análisis.

Por otro lado, Caso (2020), identifican una correlación entre el incremento de las precipitaciones extremas y las temperaturas máximas durante los meses más cálidos. Este hallazgo ratifica que el calentamiento global está potenciando tanto la intensidad de las lluvias como el aumento general de las temperaturas. El INAMHI (2020) también reporta un incremento de 0,5 °C en la temperatura media anual en la región Sierra, un factor que amplifica la capacidad de la atmósfera para retener vapor de agua, resultando en lluvias más intensas y menos frecuentes, como se observa en los resultados del índice SDII.

El análisis de los índices climáticos revela un patrón consistente de incremento en la intensidad y frecuencia de lluvias extremas, así como un aumento en la precipitación total anual en las microcuencas de los ríos Alao, Cebadas y Maguazo. Estos cambios están estrechamente vinculados al incremento de las temperaturas en la región andina, reforzando la hipótesis de que el cambio climático está transformando la dinámica hídrica regional.

Los hallazgos de este estudio son coherentes con investigaciones previas en la región andina ecuatoriana, destacando la importancia de continuar monitoreando y evaluando los efectos del cambio climático para una mejor gestión y adaptación a los desafíos hídricos futuros.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Las microcuencas de los ríos Maguazo, Alao y Cebadas presentan características geomorfológicas particulares que influyen directamente en su dinámica hidrológica. La microcuenca del río Maguazo, con un área reducida y forma alargada, presenta tiempos de escurrimiento más prolongados, mientras que las microcuencas de los ríos Alao y Cebadas, con áreas significativamente mayores y formas más irregulares, exhiben tiempos de respuesta hidrológica relativamente rápidos. Estas diferencias resaltan la diversidad de las dinámicas hídricas en la región interandina.

El análisis de los índices climáticos evidenció un incremento en la intensidad y frecuencia de eventos de lluvias extremas, así como un aumento en la precipitación total anual en las tres microcuencas estudiadas. Este patrón coincide con las proyecciones de cambio climático para la región andina, que registran un aumento en la intensidad de lluvias de corta duración y una disminución en la frecuencia de períodos secos.

Los resultados confirmaron que el calentamiento global está intensificando las precipitaciones extremas y aumentando la temperatura media anual en la región interandina. Estos cambios no solo transforman la dinámica hídrica de las microcuencas, sino que también, incrementan los riesgos asociados a eventos extremos, como inundaciones y erosión del suelo.

Los hallazgos de este estudio son consistentes con investigaciones previas realizadas en la región andina ecuatoriana, lo que resalta la importancia de los análisis climáticos como

base para comprender las transformaciones ambientales y proponer estrategias de mitigación y adaptación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar estrategias de manejo integral de las microcuencas, considerando sus características morfológicas e hidrológicas, con el fin de reducir los riesgos asociados a eventos climáticos extremos y promover una gestión sostenible de los recursos hídricos, así también, fortalecer los sistemas de monitoreo hidrometeorológico en las microcuencas de los ríos Alao, Cebadas y Maguazo, y priorizar el seguimiento de índices climáticos como SDII, RX1day y PRCPTOT para evaluar con precisión los impactos del cambio climático.

Por otra parte, diseñar e implementar políticas públicas enfocadas en la adaptación al cambio climático, que incluyan programas de reforestación, conservación de suelos y uso eficiente del agua en las zonas interandinas, fomentar la investigación interdisciplinaria para profundizar en el estudio de los efectos del cambio climático sobre las dinámicas hídricas regionales, integrando metodologías innovadoras y análisis multi-temporales, por último, se recomienda, desarrollar programas de capacitación para las comunidades locales, orientados a incrementar su conocimiento sobre la relación entre el cambio climático y los recursos hídricos, que promuevan prácticas sostenibles y resilientes frente a eventos extremos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabar, F. (2020). *Provincias de jujuy y salta temporary analysis of climate precipitation indices in jujuy and salta provinces*. 13(2), 7–13.
- Alberca, J. (2022). *Estimation of the effect of climate change on the flows of the medium-high basin of the Piura River using GCM from CMIP6*.
- Alexander, L. V., et al. (2006), *Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*, J. Geophys. Res., 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Alexander, L. & Herold, n. 2016. *ClimPACT2: Indices and software*. Available from <https://climpact-sci.org/assets/climpact2-user-guide.pdf>.
- Almeida, L. Q. De, Paula, A., Feitosa, R., Freitas, A. G. De, Souza, E. A. De, Souza, J. L. De, & Tirelo, B. (2023). *Riesgo de desastre y cambio climático : un breve análisis a partir del estudio de caso de Galinhos* ,. 111–125.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. (2020). *Observed trends in daily temperature extreme indices in Aguascalientes, Mexico*. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1425-1445.
- Aragón, M. (2020). *Estudio de registros extremos de precipitación asociados al cambio climático en el Parque Nacional Natural Chingaza durante el periodo de 1981–2010*. 11. <https://doi.org/10.21500/20275846.4252>
- Arellado, M., Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*.

[https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas hidrográficas.pdf](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf)

Armenta, G. (2020). *Análisis de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos para Ecuador*.

Bautista, F. (2021). *The Clic-MD software a tool to analyze thousands of data in seconds : trends of climate and agro climatic indices El software Clic-MD es una herramienta para analizar miles de datos en segundos : tendencias del clima e índices agroclimáticos*. 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2637>

Bautista, F., Pacheco, A., & Ayala, G. (2020). *Indicadores de cambio climático con datos diarios (ICC)* (Issue Icc).

Benavides, H., & Pucha, F. (2020). *En el hábitat de las especies y los o . D . S*.

Bonilla, J., Pérez, S., & Guzmán, A. (2019). *Hidrografía y ecosistemas andinos: estudio de las microcuencas del río Chambo*. Editorial Universitaria, Quito.

Britton, E. (2021). *Entendiendo el cambio climático*.

Calles, J. (2020). *Proyecciones climáticas y sus impactos en el ecosistema páramo de Tungurahua*.

Carpio, C., Cruz-meléndez, C., Ordóñez, R., & Travela, J. C. (2024). *Desafíos urgentes frente al cambio climático*.

Caso, D. (2020). *Software para identificar las tendencias de cambio climático a nivel local: un estudio de caso en Yucatán, México*. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.073>

Castellanos, D. (2019). *La educación ambiental como estrategia de sensibilización para el*

reconocimiento y apropiación del territorio en comunidades pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Río Tunjuelo. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 19–22.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22776/CastellanosVillamilDeisyYescenia2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chávez, M. (2024). *Guía sobre escenarios de cambio climático.*

Connors, S., & Haughey, E. (2020). *El cambio climático y la tierra.*

Del Pilar, M. (2020). *reconocimiento de la naturaleza y de sus componentes como sujetos de derechos.*

Erwan Cornillault, Philippe Peyrille, Fleur Couvreur, Romain Roehrig. *Large-Scale Drivers of Tropical Extreme Precipitation Events: The Example of French Overseas Territories.* *Geophysical Research Letters*, 2024, 51 (15), pp.e2024GL108770. [ff10.1029/2024GL108770](https://doi.org/10.1029/2024GL108770). [ffhal-04668780f](https://doi.org/10.1029/2024GL108770)

Fernanda, Y., Pereira, U., & Ortiz, N. Q. (2023). *Cambio climático y variabilidad espaciotemporal (serie 1980-2020) de la temperatura en Tolima , Colombia Climate change and spatiotemporal variability of temperature Resumen.* 7–15.

Herrera, L., Castillo, M., & Vargas, R. (2022). *Evaluación de la calidad del agua en microcuencas andinas: un enfoque multidimensional.* *Revista de Ciencias Ambientales*, 38(2), 85-102.

Hernández, D. (2024). *Práctica de Hidrología Superficial.*

INAMHI. (2020). *Anuario meteorológico № 53-2013.*

IPCC, 2021: Annex VI: Climatic Impact-driver and Extreme Indices [Gutiérrez J.M., R.

- Ranasinghe, A.C. Ruane, R. Vautard (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2205–2214, doi:10.1017/9781009157896.020.
- Jaya, V., & Rodríguez, E. (2023). *Determinación de la oferta hídrica en las microcuencas de los ríos Ishpi, Daldal, Uldán y quebrada Cachipata, en la Provincia de Chimborazo*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10872>
- Larrea, A., & Maldonado, C. (2022). *Determinación de la oferta hídrica de la microcuenta Guamote*. 1–76. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10251/1/Larrea_Maldonado_2022_Determinación de la oferta hídrica de la microcuenta Guamote y quebrada Compuene Gorge%2C en la provincia de Chimborazo %281%29.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10251/1/Larrea_Maldonado_2022_Determinación%20de%20la%20oferta%20hídrica%20de%20la%20microcuenta%20Guamote%20y%20quebrada%20Compuene%20Gorge%2C%20en%20la%20provincia%20de%20Chimborazo%20%281%29.pdf)
- Medina Peña, R., Sarango Rodríguez, J. A., Vivanco Vargas, G., & Guerra Aguayo, G. A. (2022). El derecho al agua según el derecho internacional. Casos Ecuador y Bolivia. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 5(3), 224–233. <https://doi.org/10.62452/nrb4ag88>
- Mendoza, I. (2022). Políticas públicas ambientales y desarrollo turístico sostenible en las áreas protegidas de Ecuador Environmental. *Revista de Estudios Andaluces*, 43, 0–1. <https://doi.org/10.12795/rea.2022.i43>

- MAATE, & FAO. (2022c). *Metodología para el diseño de indicadores para el Sistema MRV de adaptación a nivel nacional, sectorial y subnacional*. Proyecto GCP/ECU/102/GCR – GCF Generación de un marco conceptual para el Registro Nacional de Cambio Climático (RNCC) y diseño del siste.
- Moran, J. (2020). *SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE PROYECCIÓN PARA EL CAMBIO*. 2100.
- MAATE. (2023). *Reporte anual sobre recursos hídricos en la región amazónica*. Quito, Ecuador.
- Núñez, J. (2020). *Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta*.
- OMN, O. M. mundial. (2023). *Estado del clima en América Latina y el Caribe*.
- Orozco, C., & Mora, A. (2020). *Índices de cambio climático en el estado de Chiapas , México , en el periodo 1960-2009 * Climate change indices in the state of Chiapas , Mexico , for the period 1960-2009 Resumen. April.*
<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.476>
- PDOT Riobamba. (2023). *Plan de ordenamiento territorial y gestión de recursos hídricos de la subcuenca del río Chambo*. Riobamba, Ecuador.
- Palacios, S. (2019). *Facultad De Ingeniería Civil Carrera De Ingeniería Civil Machala 2019*. 1–170. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15069>
- Pita, O. (2022). *Deteccion de cambio climatico en la cuenca del rio Conchos, mediante indices climaticos*.

- Porras, G., & Jácome, P. S. (2020). *PARA ECUADOR , BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.*
- Rivera, P. (2022). *Comparación de series mensuales de precipitación y temperaturas de los Modelos CMIP6 para Guatemala.* 9, 132–149.
- Rvas, A., & Conde, C. (2022). *De acuerdo con los últimos escenarios del IPCC-2022. December.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20064.15369>
- Salas, C. (2023). “*Reporte con recomendaciones sobre las necesidades de datos e información relacionada al estudio del cambio climático.*” 2(producto D), 1–67.
- Salazar, K. (2024). “*Gobernanza y calidad de los servicios ecosistémicos: caso cuenca hidrográfica Rio Carchi 2012-2020.*”
- Sanabria Yépez, C. V., Nieto Cañarte, C. A., Burgos Carpio, B. A., & Loaiza Espinoza, M. E. (2022). Descripción hidrogeomorfológica de la Cuenca Alta del río Sibimbe (Bolívar, Ecuador) con fines de riego. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2), 1141–1149. <https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.173>
- SENAMHI. (2024a). *Condiciones actuales de precipitación y perspectivas climáticas, hidrológicas y agrometeorológicas en la región andina Actualizado a enero 2024.*
- SENAMHI. (2024b). *Monitoreo de sequías meteorológicas.* 1–9.
- Sillmann, J., Sippel, S., & Russo, S. (Eds.). (2019). *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment.* Amsterdam: Elsevier. doi:10.1016/C2017-0-01794-9.
- SSC. (2020). *Convenio para la Implementación del Sistema de Apoyo a la Gestión del Riesgo Climático para la Seguridad Alimentaria de la Cuenca del Río Jubones (Datos*

- y Pronóstico*) Actualizado Abril 2018. 1–70.
- Tello, G., & Sánchez, A. (2019). *Necesidad de su reversión desde las políticas públicas con enfoque bioético e environmental contamination in the water-bearing to Ecuador . Need of his reversion from the public policies with focus bioético.* 1053–1079.
- Thielen, D. R., Puche, M. L., Ramoni-perazzi, P., Bianchi, G., Ledezma, E. Z., Quintero, A., Marquez, M., & Rojas, W. (2024). *Respuestas de las precipitaciones en Venezuela al actual calentamiento sin precedentes de las aguas oceánicas globales.* 24, 22–43. <https://doi.org/10.59427/rcli/2024/v24.22-43>
- Tuaza, L., Craig, A., Johnson, M., & Mcburney, W. (2023). *Luis Alberto Tuaza Castro | Craig Anthony Johnson | Matthew Willis McBurney 1.*
- Venegas, J. (2020). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el periodo 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito.*
- Villazon, M. F., & Lipa, C. A. (2022). *Efectos del cambio climático sobre eventos extremos en dos cuencas interandinas representativas en bolivia Effects of Climate Change on Extreme Events in Two Representative Inter-A ... July.*
- Vincenti, S. S. (2020). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el distrito metropolitano de Quito.* 16(2), 23–47.
- Zhang, X. et al., 2011: *Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data.* WIREs Climate Change, 2(6), 851–870, doi:10.1002/wcc.147

Zhang, C., Y. Wang, K. Hamilton, and A. Lauer, 2016: *Dynamical downscaling of the climate for the Hawaiian islands*. Part II: Projection for the late twenty-first century.

Journal of Climate, 29, 8333–8354, doi:10.1175/jcli-d-16-0038.1

APÉNDICE

Apéndice A. Parámetros de red de la microcuenca del río Cebadas

Parámetros de red	
Lt	88,00
A	709,24
Dd	0,12
Nt	22
Dt	0,03
Hmin	2950,00
Hmax	3545,00
Lc	41,7
Sm	14269
Tc(h)	1,03
Tc(min)	61,74
Tr(h)	0,62
Tr(m)	37,05

Apéndice B. Parámetros de red de la microcuenca del río Maguazo

Parámetros de red	
Lt	14
A	25,19
Dd	0,5557761
Nt	8
Dt	0,3175863
Hmin	3369
Hmax	3797
Lc	6,22
Sm	68,810289

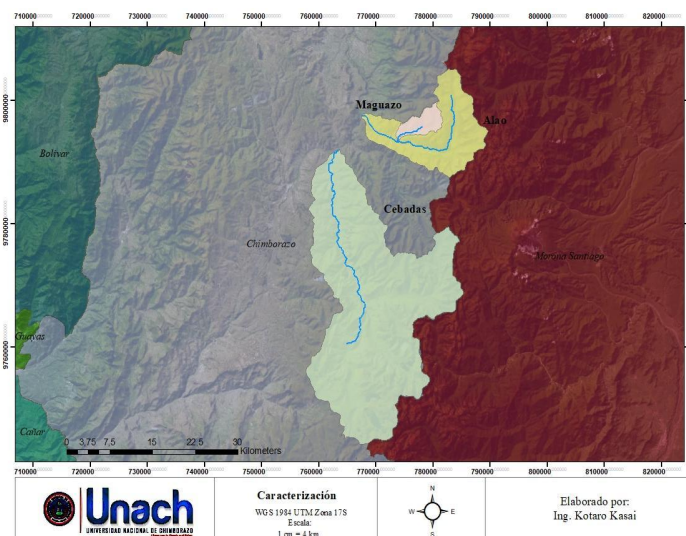
Tc(h)	0,1634291
Tc(min)	9,8057444
Tr(h)	0,0980574
Tr(m)	5,8834467

Apéndice C. Parámetros de red de la microcuenca del río Alao

Parámetros de red	
Lt	36
A	185,56
Dd	0,19
Nt	14
Dt	0,075447295
Hmin	2861
Hmax	3573,00
Lc	28,39
Sm	25,07925326
Tc(h)	0,665157522
Tc(min)	39,91
Tr(h)	0,40
Tr(m)	23,95

Apéndice D. Caracterización de las unidades hidrográficas en el software

ArcMap



Apéndice E. Cambio de tendencia en las microcuencas

