



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS
CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Hidráulico

AUTORES:

Melina Yessenia Morocho Mesa

Juan Manuel Quindil Ayala

TUTOR:

Ing. Andy Giler Ormaza

LATACUNGA- OCTUBRE 2024-MARZO 2025

Latacunga, febrero 21 de 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **Morocho Mesa Melina Yessenia** y **Quindil Ayala Juan Manuel** declaramos ser autores del proyecto de titulación "**Tendencias En La Serie De Tiempo De Datos Hidrológicos Con Mann Kendall En La Cuenca De Rio Napo**", siendo el **Ing. Andy Miguel Giler Ormaza** tutor (a) del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



Morocho Mesa Melina Yessenia
CC. 1756332878



Quindil Ayala Juan Manuel
CC. 0550699615

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **MELINA YESSSENIA MOROCHO MESA** identificado con cédula de ciudadanía No.175633287-8 de estado civil soltero , a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Hidráulica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO.”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2021 - Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 19 de febrero de 2025

Tutor: Ing. Andy Miguel Giler Ormaza M.Sc

Tema: **“TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO.”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo d grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

G) La publicación del trabajo de grado.

- h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que LA CESIONARIA no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido LA CEDENTE declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de LA CESIONARIA el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo LA CEDENTE podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. – LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de LA CEDENTE en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 19 días del mes de febrero del 2025


Morochó Mesa Melina Yessenia
LA CEDENTE

Ing. Idalia Pacheco Tigselema Ph.D.
LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **JUAN MANUEL QUINDIL AYALA** identificado con cédula de ciudadanía No. **055069961-5** de estado civil soltero , a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Hidráulica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO.”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2021 - Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 19 de febrero 2025

Tutor: Ing. Andy Miguel Giler Ormaza M.Sc

Tema: **“TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO.”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

g) La publicación del trabajo de grado.

- h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

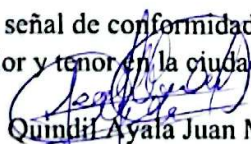
CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 19 días del mes de febrero del 2025

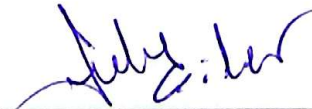

Quindii Ayala Juan Manuel.
EL CEDENTE.

Ing. Idalia Pacheco Tigselema Ph.D.
LA CESIONARIA

Latacunga, febrero 19 del 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **"Tendencias En La Serie De Tiempo De Datos Hidrológicos Con Mann Kendall En La Cuenca De Río Napo"**, propuesto por los estudiantes **Morocho Mesa Melina Yessenia** y **Quindil Ayala Juan Manuel** de la Carrera de **Ingeniería Hidráulica**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Andy Miguel Giler Ormaza
C.C. 1312820325

TUTOR

Latacunga, febrero 19 del 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **"Tendencias En La Serie De Tiempo De Datos Hidrológicos Con Mann Kendall En La Cuenca De Rio Napo"**, propuesto por los estudiantes **Morocho Mesa Melina Yessenia** y **Quindil Ayala Juan Manuel** de la Carrera de **Ingeniería Hidráulica**, me permito indicar que los estudiantes ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad Proyecto de Investigación en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Lector 1 (Presidente)
MSc. Zambrano Navarrete
Xiomara Alejandra
CC: 1313058453

Lector 2
Ing. Cusme Intriago
Rudys Rafael
CC: 1313770891

Lector 3
Ing. Chavez Zapata
Patricio Germanico
CC: 0501305668

AGRADECIMIENTO

El conocimiento es poder, y la carrera es un campo que nos ha permitido aplicar este conocimiento para crear un mundo mejor. Agradezco profundamente a mis seres queridos que han sido mi fuente de inspiración y a todas las personas que de una u otra forma me han brindado su apoyo durante todo este proceso.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido llegar a este punto de mi vida. A mis padres Nelly Mesa y Raúl Cumbal, por su amor incondicional y por creer en mí siempre. A mis hermanas, Karina Morocho y Grace Morocho y a mi hermano Cristian Morocho, por su compañía y apoyo constante.

También quiero agradecer a mi enamorado, Javier Lasso, por su paciencia, apoyo y comprensión durante los momentos más difíciles de todo este proceso.

Agradezco especialmente a mi tutor de tesis Ing. Andy Giler, por su guía y orientación ayudándome a crecer como profesional y a su vez como persona.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi compañero Juan Quindil, por su colaboración y apoyo mutuo a lo largo de la carrera y en este proceso.

Melina Morocho

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi por brindarme un espacio para cumplir mis estudios superiores, también al personal académico de mi carrera, así mismo mi sincero agradecimiento a mi tutor de tesis Ing. Andy Giler MSc, por el apoyo y orientación que me ha brindado durante el proceso. A mi grupo de amigos, en especial a mi compañera de investigación Melina Morocho, con quien nos hemos apoyado mutuamente durante toda la formación y durante la tesis.

A todos ustedes, mi más sincero y eterno agradecimiento.

Juan Quindil

DEDICATORIA

A mi madre, principalmente por ser mi pilar fundamental, gracias a su amor incondicional y su apoyo constante en mi vida. Su ejemplo de mujer dedicada y trabajadora han sido una inspiración para mí. Su fortaleza, firmeza y sabiduría me han guiado y apoyado en cada paso que he dado.

A mi padre, por su guía y orientación, quien indudablemente ha estado para mí.

A mis hermanos, por estar siempre presentes en mi vida, brindándome su apoyo y compañía en momentos difíciles. Su sabiduría y consejos me han ayudado a mantenerme firme y no darme por vencida.

Y a mi enamorado, quien se ha convertido en una fuente de inspiración y crecimiento en mi vida, al igual que mi madre, el ha sido una persona fundamental en mi desarrollo, brindándome su amor, paciencia y compartiendo sus conocimientos conmigo.

Les dedico este trabajo, fruto de mi esfuerzo y dedicación, con la esperanza de que se sientan orgullosos y les recuerde siempre cuánto los amo y aprecio.

Melina Morocho

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis padres, Dolores Ayala y José Quindil, por su constante apoyo y sacrificio. También dedico este trabajo a mis hermanos, hermanas y toda mi familia quienes son la fuente de mi inspiración que me ayuda a seguir adelante.

Juan Quindil

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO: “TENDENCIAS EN LA SERIE DE TIEMPO DE DATOS HIDROLÓGICOS
CON MANN KENDALL EN LA CUENCA DE RIO NAPO”**

Autor/es:

Morocho Mesa Melina Yessenia

Quindil Ayala Juan Manuel

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es encontrar tendencias para analizar las posibles evidencias de cambio climático en los caudales afluentes de la amazonia ecuatoriana específicamente en la cuenca del río Napo. Para este fin, se ha utilizado datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI). Se realizó la selección de cinco estaciones con la mayor disponibilidad de datos posibles en un periodo de 23 años (1991-2013). Hemos aplicado el método Water Resources Council (1981) para valores atípicos en caudales registrados. El relleno para las estaciones con datos discontinuos se aplicó la técnica de imputación Predictive Mean Matching (PMM) de la librería de MICE en RStudio el cual permite conservar la variabilidad de los datos de muestra ingresados. Se empleó el Test de Mann-Kendall en el análisis de tendencias con un nivel de significancia del 10%, monitoreando los caudales a escala anuales y mensuales, de este modo, los resultados a escala mensuales obtenidos revelan tendencias no significantes en tres estaciones (H718, H720 y H721) mientras que en el resto de estaciones (H722 y H731) estos resultados (1.871 y 3.853 respectivamente) en el estadístico Z sugiere un incremento mensual estadísticamente significativo aproximado de 0.0013 m³/s y 0.0547 m³/s.

Palabras clave: Tendencias, caudales, Mann Kendall

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: "TRENDS IN HYDROLOGICAL TIME SERIES DATA USING MANN-
KENDALL IN THE NAPO RIVER BASIN"**

Author/s:

Morocho Mesa Melina Yessenia

Quindil Ayala Juan Manuel

ABSTRACT

The main objective of this study is to identify trends to analyze potential evidence of climate change in the tributary flows of the Ecuadorian Amazon, specifically in the Napo River basin. For this purpose, data provided by the National Institute of Meteorology and Hydrology of Ecuador (INAMHI) has been used. Five stations with the highest possible data availability over a 23-year period (1991-2013) were selected. The Water Resources Council (1981) method was applied to identify outliers in the recorded flows. For stations with discontinuous data, the Predictive Mean Matching (PMM) imputation technique from the MICE library in RStudio was used, which preserves the variability of the input sample data. The Mann-Kendall Test was employed for trend analysis with a significance level of 10%, monitoring flows at both annual and monthly scales. The results at the monthly scale reveal non-significant trends in three stations (H718, H720, and H721), while in the remaining stations (H722 and H731), the results (1.871 and 3.853, respectively) in the Z statistic suggest a statistically significant monthly increase of approximately 0.0013 m³/s and 0.0547 m³/s.

Keywords: Trends, flows, Mann-Kendall.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| ÍNDICE DE TABLAS | 10 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 11 |
| 1. INFORMACIÓN GENERAL | 12 |
| 1.1. Tema del proyecto | 12 |
| 1.2. Modalidad de Titulación | 12 |
| 1.3. Carrera | 12 |
| 1.4. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto | 12 |
| 1.4.1. Investigadores..... | 12 |
| 1.4.2. Tutor..... | 12 |
| 1.5. Área de Conocimiento | 12 |
| 1.6. Línea de investigación | 12 |
| 1.7. Sublíneas de investigación..... | 12 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 2.1. Situación Problemática | 15 |
| 2.2. Formulación del problema | 15 |
| 2.3. Objeto y campo de acción..... | 15 |
| 2.3.1. Objeto de Investigación..... | 15 |
| 2.3.2. Campo de Acción | 16 |
| 2.4. Beneficiarios | 16 |
| 2.4.1. Directos | 16 |
| 2.4.2. Indirectos..... | 16 |
| 2.5. Justificación | 16 |
| 2.6. Objetivos..... | 17 |
| 2.6.1. General | 17 |
| 2.6.2. Específicos | 17 |
| 2.6.3. Sistema de tareas | 18 |
| 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 19 |
| 3.1. Antecedentes del estudio | 19 |
| 3.2. Cambio climático y su relación con los recursos hídricos..... | 20 |
| 3.2.1. Concepto y Contexto del Cambio Climático..... | 20 |
| 3.2.2. Impactos del Cambio Climático en el Ciclo Hidrológico | 21 |
| 3.2.3. Variabilidad Climática en la Región Amazónica Ecuatoriana..... | 23 |

| | |
|--|----|
| 3.2.4. Estudios Previos sobre Cambios en la Hidrología del Río Napo | 24 |
| 3.3. MARCO CONCEPTUAL | 25 |
| 3.3.1. Hidrología y Cuencas Hidrográficas | 25 |
| 3.3.2. Régimen Hidrológico: variabilidad, caudal y patrones de flujo..... | 27 |
| 3.3.3. Cambio Climático y su Relación con la Hidrología..... | 28 |
| 3.3.4. Métodos Estadísticos para la Detección de Tendencias Hidrológicas y Consideraciones en su Aplicación | 29 |
| 3.3.5. Herramientas Utilizadas en el Análisis Hidrológico | 33 |
| 3.3.6. Procesamiento y Corrección de Datos Hidrológicos..... | 35 |
| 4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS | 37 |
| 4.1. Definición de Variables del Estudio | 37 |
| 4.2. Diagrama de Flujo del Proceso de Análisis | 38 |
| 4.3. Datos de Entrada y Fuentes de Información | 39 |
| 4.4. Métodos de Cálculo y Procesamiento de Datos..... | 40 |
| 4.4.1. Preprocesamiento de Datos Hidrológicos | 40 |
| 4.4.2. Aplicación de Métodos Estadísticos para la Detección de Tendencias | 41 |
| 4.5. Herramientas y Software Utilizado..... | 42 |
| 4.6. Contexto geográfico e hidrológico de la cuenca del río Napo..... | 43 |
| 4.6.1. Justificación del enfoque metodológico | 44 |
| 4.7. Consideraciones Metodológicas y Limitaciones del Estudio | 45 |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 47 |
| 5.1. Presentación de Resultados del Análisis Hidrológico | 47 |
| 5.2. Procesamiento, Organización y Análisis de Datos Crudos..... | 47 |
| 5.3. Identificación de Valores Atípicos y Corrección de Datos..... | 48 |
| 5.3.1. Detección de Valores Atípicos | 48 |
| 5.3.2. Imputación de Datos Faltantes con el Método PMM..... | 48 |
| 5.4. Aplicación del Test de Mann-Kendall en la Evaluación de Tendencias Hidrológicas.. | 51 |
| 5.4.1. Análisis de Tendencias en Caudales Medios Anuales | 51 |
| 5.4.2. Análisis de Tendencias en Caudales Medios Mensuales mediante el Test de Mann- Kendall | 55 |
| 5.5. Discusión de resultados | 60 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 62 |
| 7. Bibliografía..... | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Detalle sistema de tareas del proyecto..... | 18 |
| Tabla 2. Causas del cambio climático [18] | 20 |
| Tabla 3. Impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico [24] | 21 |
| Tabla 4. Factores que influyen en la variabilidad climática en la región Amazónica [28] | 23 |
| Tabla 5. Cambios detectados en los patrones climáticos de la Amazonía Ecuatoriana | 24 |
| Tabla 6. Investigaciones sobre la hidrología del río Napo | 25 |
| Tabla 7. Tipos de Cuencas Hidrográficas [33] | 26 |
| Tabla 8. Tipos de Regímenes Hidrológicos [34]..... | 27 |
| Tabla 9. Factores que Influyen en la Hidrología de una Cuenca [36]..... | 28 |
| Tabla 10. Impacto del Cambio Climático en los Procesos Hidrológicos [37] | 29 |
| Tabla 11. Descripción de métodos para detección de tendencias..... | 30 |
| Tabla 12. características del Método Water Resources Council (1981) [43]..... | 31 |
| Tabla 13. Desafíos de Test de Mann-Kendall según escala temporal | 32 |
| Tabla 14. Paquetes utilizados en el análisis hidrológico con RStudio [45]..... | 33 |
| Tabla 15. Ventajas y restricciones del software TREND [46] | 34 |
| Tabla 16. Comparación de herramientas para el análisis hidrológico [48] | 35 |
| Tabla 17. Métodos de detección y eliminación de valores atípicos [49] | 36 |
| Tabla 18. Criterios para la interpretación del Test Mann Kendall [9]..... | 42 |
| Tabla 19. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones hidrométricas analizadas | 47 |
| Tabla 20. Umbrales y valores atípicos | 48 |
| Tabla 21. Resultados del Test de Mann-Kendall en Caudales Medios Anuales | 52 |
| Tabla 22. Resultados del Test de Mann-Kendall en Caudales Medios Mensuales | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Las cuencas hidrográficas [33]..... | 26 |
| Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de análisis hidrológico | 38 |
| Figura 3. Ubicación de la cuenca hidrológica y sus estaciones..... | 44 |
| Figura 4. Representación de la Ubicación de las Estaciones Hidrológicas | 45 |
| Figura 5. Hidrograma de la estación H718 (Quijos en Baeza)..... | 49 |
| Figura 6. Hidrograma de la estación H720 (Misahuallí en Cotundo) | 50 |
| Figura 7. Hidrograma de la estación H721 (Jatunyacu D.J. Iloculín) | 50 |
| Figura 8. Hidrograma de la estación H722 (Yanahurco D.J. Valle) | 50 |
| Figura 9. Hidrograma de la estación H731 (Cosanga A.J. Quijos) | 51 |
| Figura 10. Hidrograma de la estación H718 datos anuales (Quijos en Baeza) | 52 |
| Figura 11. Hidrograma de la estación H720 datos anuales (Misahuallí en Cotundo)..... | 53 |
| Figura 12. Hidrograma de la estación H721 datos anuales (Jatunyacu D.J. Iloculín)..... | 53 |
| Figura 13. Hidrograma de la estación H722 datos anuales (Yanahurco D.J. Valle)..... | 54 |
| Figura 14. Hidrograma de la estación H731 datos anuales (Cosanga A.J. Quijos)..... | 55 |
| Figura 15. Hidrograma de la estación H718 datos mensuales (Quijos en Baeza)..... | 57 |
| Figura 16. Hidrograma de la estación H720 datos mensuales (Misahuallí en Cotundo) | 57 |
| Figura 17. Hidrograma de la estación H721 datos mensuales (Jatunyacu D.J. Iloculín). | 58 |
| Figura 18. Hidrograma de la estación H721 datos mensuales (Jatunyacu D.J. Iloculín). | 58 |
| Figura 19. Hidrograma de la estación H731 datos mensuales (Cosanga A.J. Quijos) | 59 |

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Tema del proyecto

Tendencias en la serie de tiempo de datos hidrológicos con Mann Kendall en la cuenca de río Napo.

1.2. Modalidad de Titulación

Proyecto de investigación.

1.3. Carrera

Ingeniería Hidráulica

1.4. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto

Determinar o evaluar las tendencias como evidencias de posibles cambios climáticos.

1.4.1. Investigadores

Melina Yessenia Morocho Mesa

Juan Manuel Quindil Ayala

1.4.2. Tutor

Ing. Andy Miguel Giler Ormaza

1.5. Área de Conocimiento

| | | | |
|--|-----------------|-------------------|--|
| 25 Ciencias de la Tierra y del Espacio | 2508 Hidrología | 2509 Meteorología | 2509.04 Hidrometeorológica |
| | | | 2509.09 Predicción Numérica Meteorológica |
| | | | 2509.11 Predicción Operacional Meteorológica |

1.6. Línea de investigación

Meteorología, Hidrología, Mecánica de fluidos, Sistema y obras Hidráulicas.

1.7. Sublíneas de investigación

Gestión y Manejo sostenible y/o sustentable de recursos hídricos.

2. INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos son un fenómeno que han estado presentes en la tierra desde su formación [1] presentando un desafío ambiental muy importante en el siglo XXI, de esta manera podemos decir que los recursos hídricos han sido afectados directamente a nivel global [2]. En la Amazonía ecuatoriana, algunos patrones como la precipitación, la variabilidad de caudales en los ríos, la disponibilidad y distribución de agua se han visto afectados por alteraciones de estos efectos, mismos que alteran los ecosistemas y comunidades que necesitan de este recurso vital[3]. El río Napo al ser una cuenca importante en el país, se ha podido evidenciar algunas fluctuaciones en sus parámetros hidrológicos, lo que vendría a ser una posible señal de tendencias significativas encadenando cambios climáticos [4].

En Ecuador, las principales cuencas hidrográficas que abastecen a las centrales hidroeléctricas más importantes del país han mostrado vulnerabilidad por las modificaciones en la dinámica hídrica [5]. Hace poco el país presenció la falta de energía, ocasionada por alteraciones en los caudales de la cuenca del río Napo, la cual se le considera como una de las fuentes clave en la generación de electricidad, perjudicando a comunidades y al sector productivo [6]. Siendo este fenómeno considerado importante, aún hay muy poca información acerca de estudios sobre la variabilidad hidrológica en esta región, lo que limita la toma de decisiones y la implementación de algunas estrategias efectivas que ayuden a la gestión del recurso hídrico [7]. Además, la identificación de tendencias en caudales en el río Napo viene a ser una parte fundamental para valorar el impacto del cambio climático en la accesibilidad del agua en la región, así como en los sectores económicos que dependen de este recurso [8]. Sin embargo, el análisis de estas tendencias requiere de herramientas estadísticas robustas que permitan detectar cambios a lo largo del tiempo en datos hidrológicos históricos.

De igual manera, a nivel internacional se han realizado varios estudios aplicando métodos estadísticos que ayudan a evaluar la ocurrencia de tendencias en las series de caudales y precipitación, permitiendo reflejar el impacto que el cambio climático ha tenido en las cuencas hidrográficas de distintas regiones. Mientras que, algunas investigaciones en América del Norte y Europa han probado que el Test de Mann-Kendall, en conjunto con el método de Sen's Slope, el cual es considerado para identificar cambios en los patrones hidrológicos que no requieren suposiciones sobre la distribución normal de los datos [9]. En la parte de Sudamérica, se han realizado varios estudios en la cuenca del río Amazonas y Paraná en donde se han logrado evidenciar cambios en las tendencias significativas en los caudales por consecuencia de la

variabilidad climática y por el impacto de ciertas actividades antrópicas, como es la deforestación y la regulación hidráulica [10]. A propósito, las investigaciones que se han realizado en la cuenca del río Magdalena en Colombia y el Titicaca en Perú han destacado la importancia que es realizar un análisis de tendencias hidrológicas que ayuden a la planificación de infraestructura hídricas y la mitigación a ciertos riesgos asociados a eventos extremos [11].

La variabilidad natural de los caudales, la inexistencia de datos y la influencia de factores externos como cambios en el uso del suelo o la regulación de embalses, son algunos de los desafíos que enfrenta este análisis de tendencias en series hidrológicas. La localización de tendencias se ve afectada en ciertas ocasiones por la autocorrección que se les aplica a los datos, la determinación de tendencias podría verse afectada por la autocorrelación en sus datos, lo que puede alterar los resultados si no se aplica una técnica adecuada para la corrección de los mismos [12]. Es importante también tener en cuenta que la elección de escala temporal puede influir en la interpretación de resultados, así como la diaria la cual si presenta alta variabilidad puede llegar a dificultar la identificación de tendencias a largo plazo; a escala mensual la estacionalidad de las precipitaciones pueden encubrir leves cambios en el régimen hidrológico, en cuanto a las escalas anuales, si hay una reducción en el número de observaciones se puede limitar la sensibilidad del test para detectar estas variaciones significativas [13].

Para enfrentar estas problemáticas, se han ido desarrollando distintos métodos estadísticos que se puedan emplear en el análisis de tendencias en series hidrológicas. Aparte del test de Mann-Kendall, existen otros métodos que se pueden emplear como el Pettitt's Test, el cual permite identificar puntos de cambio abruptos en las series temporales, otro método sería la regresión lineal, que ajusta las tendencias mediante modelos matemáticos [14]. A pesar de esto, el Test de Mann-Kendall ha sido seleccionado en esta investigación ya que se adecua a su robustez frente a distribuciones no normales y su resistencia a valores atípicos, convirtiéndose en una herramienta confiable para evaluar estas tendencias en datos hidrológicos sin la obligación de transformar la serie original [12].

De esta manera podemos decir que este estudio tiene como finalidad determinar las tendencias significativas en la serie temporal de datos hidrológicos en la cuenca del río Napo aplicando el Test de Mann-Kendall, como primer punto tenemos la organización y el preprocesamiento de datos hidrológicos, que aseguren la integridad y representación temporal de los registros del INAMHI, luego de ello se realizará el tratamiento estadístico de las series temporales, empleando algunas técnicas de detección de valores atípicos de datos faltantes mediante

recursos como Excel, RStudio y Trend. Como siguiente punto se aplicará el Test de Mann-Kendall, esto con el fin de evaluar la existencia de tendencias significativas en las variables hidrológicas de la cuenca y finalmente se interpretarán los resultados y se realizará la validación, mediante la comparación con estudios previos y análisis complementarios.

2.1. Situación Problemática

El cambio climático ha alterado los patrones hidrológicos globales, afectando la disponibilidad del agua y generando incertidumbre en regiones vulnerables como la cuenca del río Napo [15], un afluente clave para la generación hidroeléctrica, la biodiversidad y las comunidades locales. Algunos registros del INAMHI han presentado fluctuaciones en los caudales de las cuencas amazónicas en las últimas décadas, evidenciando tendencias crecientes y decrecientes que varían según la ubicación y condiciones climáticas [16]. Pese a la falta de análisis con pruebas estadísticas limita la comprensión de estos cambios y su impacto a largo plazo. Además, algunos reportes del Ministerio del Ambiente y Agua (MAATE) de Ecuador advierten que la variabilidad en la disponibilidad hídrica puede afectar la planificación de infraestructuras como represas y sistemas de abastecimiento [17], mientras que estudios del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) señalan un incremento en la frecuencia de eventos extremos, como sequías e inundaciones, que podrían comprometer la estabilidad ecológica y socioeconómica de la región [18].

2.2. Formulación del problema

La variabilidad climática altera la disponibilidad de agua y afecta sectores como la generación hidroeléctrica y el abastecimiento poblacional, por ende, los registros hidrométricos son inconsistentes para las proyecciones de cambio climático.

2.3. Objeto y campo de acción

2.3.1. Objeto de Investigación

El principal enfoque para nuestra investigación es el análisis de tendencias en series temporales de datos hidrológicos que nos ayuden a identificar la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Napo. Lo que se busca es demostrar la existencia de comportamientos significativos en los registros de caudales empleando el test de Mann-Kendall, siendo esta una herramienta robusta para la detección de tendencias en datos hidrológicos.

2.3.2. Campo de Acción

El campo de acción de este estudio comprende el estudio de series temporales de datos hidrológicos en la cuenca del río Napo, centrándose en la identificación de tendencias significativas a lo largo del tiempo. Este estudio se desarrollará en el espacio de la hidrología y el cambio climático, con el fin de aplicar métodos estadísticos relacionados con el análisis de registros históricos de caudales. De igual manera, se toma en cuenta el impacto de estas tendencias sobre la gestión de los recursos hídricos, la planificación hidroeléctrica y algunas estrategias de adaptación climática en la Amazonía ecuatoriana.

2.4. Beneficiarios

2.4.1. Directos

Población cercana del Río Napo.

2.4.2. Indirectos

Comunidad científica y estudiantes.

2.5. Justificación

Cuando hablamos del cambio climático, podemos recalcar que es un fenómeno global que ha afectado de manera directa a los ciclos hidrológicos, transformando la disponibilidad y distribución del agua en distintas regiones del mundo. Si nos enfocamos en Ecuador, principalmente en la cuenca del río Napo, dichas alteraciones estaría relacionadas directamente sobre los ecosistemas, las comunidades locales y la infraestructura hídrica [19]. Esta identificación de tendencias significativas en los registros hidrológicos es importante para entender la magnitud de estos cambios y su posible vínculo con la variabilidad climática.

Esta investigación se justifica en la necesidad de originar conocimientos actuales basándose en las evidencias estadísticas firmes, lo que permite analizar la evolución que han tenido los caudales de la cuenca del río Napo a lo largo del tiempo [9]. De tal manera, esta información es fundamental para planificar algunas estrategias en la gestión del recurso hídrico y la planificación de infraestructura hidráulica en esta región. A partir de una perspectiva práctica, los resultados obtenidos en esta investigación servirán a instituciones gubernamentales, organismos ambientales y empresas encargadas del sector hidroeléctrico, ayudando a una mejor toma de decisiones en cuestión de adaptación al cambio climático y también a la gestión

sostenible del agua. Así mismo, podrá aportar información para que se puedan desarrollar algunas estrategias de mitigación, que faciliten la proyección de medidas preventivas frente a escenarios de incremento o reducción de caudales en el río Napo.

En la parte científica, este estudio contribuirá con un análisis minucioso sobre la evolución de los patrones en la cuenca amazónica, incluyendo estudios previos que sirvan como referencia para futuras investigaciones en el campo de la hidrología, el cambio climático y la modelización de series temporales. Finalmente, este trabajo reforzará el conocimiento sobre la resiliencia de los ecosistemas fluviales en el ámbito de variabilidad climática, que faciliten la identificación de indicadores hidrológicos esenciales para el monitoreo y preservación de los recursos hídricos en esta región.

2.6. Objetivos

2.6.1. General

Determinar las tendencias significativas en la serie temporal de datos hidrológicos de la cuenca del Río Napo mediante el Test de Mann-Kendall.

2.6.2. Específicos

- Organizar los datos hidrológicos de la cuenca del Río Napo a partir de registros del INAMHI, asegurando a su integridad y representatividad temporal
- Preprocesar las series temporales mediante la identificación y tratamiento de valores atípicos, utilizando técnicas estadísticas en Excel, RStudio y Trend
- Aplicar el test de Mann-Kendall para evaluar tendencias significativas en las variables hidrológicas, considerando niveles de confianza y significancia estadística.

2.6.3. Sistema de tareas

Tabla 1. Detalle sistema de tareas del proyecto

| Objetivos específicos | Actividades (tareas) | Resultados esperados | Técnicas, Medios e Instrumentos |
|---|--|--|---|
| Organizar los datos hidrológicos de la cuenca del río Napo a partir de registros del INAMHI, asegurando su integridad y representatividad temporal. | <ul style="list-style-type: none"> - Recopilar y sistematizar los registros hidrométricos del INAMHI (1991-2013). - Verificar la calidad y continuidad de los datos, descartando registros incompletos o inconsistentes. - Seleccionar estaciones hidrológicas con datos representativos cercanos a Coca Codo Sinclair y en otras zonas clave de la cuenca. | Base de datos estructurada con series temporales completas, organizadas y representativas. | Datos históricos del INAMHI, software Excel, RStudio. |
| Preprocesar las series temporales mediante la identificación y tratamiento de valores atípicos, utilizando técnicas estadísticas en Excel, RStudio y Trend. | <ul style="list-style-type: none"> - Identificar y eliminar valores atípicos mediante el rango intercuartílico (IQR) y otras pruebas estadísticas. - Aplicar interpolación de datos faltantes utilizando métodos como MICE en R y el método del Water Resources Council (1981). - Normalización y limpieza de datos para mejorar su consistencia. | Conjunto de datos limpios, sin valores atípicos y con datos faltantes imputados de manera confiable. | RStudio (paquetes anomalize, weird, MICE), software TREND, Excel. |

| | | | |
|---|--|---|---|
| <p>Aplicar el test de Mann-Kendall para evaluar tendencias significativas en las variables hidrológicas, considerando niveles de confianza y significancia estadística.</p> | <p>- Ejecutar el test de Mann-Kendall en caudales medios anuales y mensuales para detectar tendencias significativas.</p> <hr/> <p>- Evaluar la significancia estadística de las tendencias mediante intervalos de confianza y pruebas de hipótesis.</p> | <p>Identificación de tendencias significativas en las variables hidrológicas con un análisis estadístico robusto.</p> | <p>RStudio (paquetes Trend, Kendall), software TREND, pruebas de significancia estadística.</p> |
|---|--|---|---|

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. Antecedentes del estudio

El cambio climático es una de las principales preocupaciones ambientales a nivel mundial, con efectos directos sobre los sistemas hidrológicos y la disponibilidad de recursos hídricos. En regiones como la Amazonía ecuatoriana, las alteraciones en los patrones climáticos pueden influir en el régimen hidrológico de los ríos, afectando la sostenibilidad de los ecosistemas y el acceso al agua para las comunidades [20]. El aumento de la variabilidad en la precipitación y la temperatura ha producido cierta incertidumbre en la planificación y gestión del agua, siendo necesaria una evaluación ordenada en las tendencias hidrológicas a lo largo del tiempo.

Como se ha mencionado, esta investigación se focaliza en el análisis de tendencias de cambio climático en la serie temporal de datos hidrológicos en la cuenca del río Napo, por medio de la aplicación del test de Mann-Kendall. De tal manera, que se logre identificar algunos de los cambios significativos en los caudales del río y su posible lazo con el cambio climático, proporcionando a su vez una base científica para que a futuro se pueda emplear ciertas estrategias de adaptación y mitigación en la gestión del agua.

3.2. Cambio climático y su relación con los recursos hídricos

Siendo el cambio climático uno de los acontecimientos ambientales más observado en la actualidad a causa del impacto global en diversos sistemas como naturales y antrópicos. Por ende, uno de los sectores más afectados por este fenómeno han sido las fuentes hídricas, cuya disponibilidad y distribución han sido alteradas por las modificaciones en las conductas climáticas. Este apartado explora la relación entre el cambio climático y los sistemas hidrológicos, abordando su definición, causas, y efectos en la precipitación, escorrentía y eventos extremos como sequías e inundaciones [21].

3.2.1. Concepto y Contexto del Cambio Climático

Definición y causas del cambio climático

El cambio climático se define como la variación significativa en los patrones climáticos de la Tierra a lo largo del tiempo, atribuida principalmente a factores naturales y actividades humanas. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, este fenómeno está fuertemente influenciado por el incremento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producto de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y el uso intensivo de la tierra para la agricultura [18].

Las principales causas del cambio climático se pueden agrupar en dos categorías, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Causas del cambio climático [18]

| Tipo de Causa | Descripción | Ejemplos |
|-------------------|--|--|
| Naturales | Variaciones naturales en la atmósfera y la actividad terrestre que afectan el clima a lo largo del tiempo. | Cambios en la radiación solar, erupciones volcánicas, oscilaciones oceánicas (El Niño, La Niña). |
| Antrópicas | Actividades humanas que aumentan la concentración de gases de efecto invernadero, modificando la temperatura global. | Emisión de CO ₂ por combustibles fósiles, deforestación, urbanización, agricultura intensiva. |

La influencia de estas causas ha generado un incremento en la temperatura global, lo que a su vez ha provocado alteraciones en el ciclo hidrológico, afectando la disponibilidad y calidad del agua a nivel mundial.

Impacto global del cambio climático en los sistemas hídricos

El impacto del cambio climático en los recursos hídricos se manifiesta a través de alteraciones en la cantidad, calidad y distribución del agua. Estos cambios afectan directamente a ecosistemas acuáticos, sectores agrícolas, infraestructuras hidráulicas y el abastecimiento de agua potable [22].

Algunos de los efectos más relevantes en los sistemas hídricos incluyen:

- Alteraciones en la distribución de la precipitación, con periodos más secos en algunas regiones y aumento de lluvias extremas en otras.
- Reducción de la disponibilidad de agua en cuencas hidrográficas, afectando la recarga de acuíferos y la oferta hídrica para el consumo humano y agrícola.
- Aumento de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas e inundaciones súbitas, generando impactos negativos en la infraestructura y los ecosistemas.

3.2.2. Impactos del Cambio Climático en el Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual el agua circula en la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos. Este sistema natural está siendo modificado por el cambio climático, afectando la distribución del agua a nivel global y regional [23]. Los principales impactos en el ciclo hidrológico se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico [24]

| Componente del Ciclo Hidrológico | Impacto del Cambio Climático | Consecuencias |
|---|--|---|
| Precipitación | Aumento en la variabilidad de lluvias. | Regiones más secas o con lluvias extremas. |
| Temperatura | Incremento de la temperatura global. | Mayor evaporación y menor disponibilidad de agua superficial. |

| | | |
|-------------------------|--|---|
| Escorrentía superficial | Cambios en la intensidad y frecuencia de lluvias. | Aumento del riesgo de inundaciones o reducción de flujos de ríos. |
| Humedad del suelo | Pérdida de humedad en suelos debido a sequías prolongadas. | Afectación de la producción agrícola y la biodiversidad. |
| Eventos extremos | Mayor frecuencia de sequías e inundaciones. | Impacto en la seguridad hídrica y daños a la infraestructura. |

Modificaciones en la precipitación y temperatura

En la región amazónica ecuatoriana, la variabilidad en la precipitación se ha intensificado, alterando su estacionalidad y aumentando la frecuencia de eventos extremos, como lluvias intensas seguidas de períodos de déficit hídrico. La cuenca del río Napo, una de las más importantes del país, ha experimentado fluctuaciones en sus precipitaciones que pueden comprometer la estabilidad del recurso hídrico, impactando tanto en la biodiversidad como en la generación hidroeléctrica [25]. La disminución de lluvias en ciertos períodos afecta la disponibilidad de agua en ríos y acuíferos, mientras que el aumento de precipitaciones extremas puede incrementar el riesgo de inundaciones, erosión del suelo y desbordamientos en la cuenca.

Dado que la precipitación es el principal factor que regula el caudal de los ríos, su monitoreo y análisis son esenciales para comprender los efectos del cambio climático en la hidrología del río Napo. La identificación de tendencias en los registros de precipitación permitirá evaluar la magnitud de estos cambios y su impacto en la gestión de los recursos hídricos de la región [25].

Alteraciones en los patrones de escorrentía y disponibilidad del agua

Las variaciones en la temperatura y la precipitación han modificado los flujos de escorrentía superficial en las cuencas hidrográficas. El incremento en la evaporación reduce la cantidad de agua disponible en los ríos, afectando la disponibilidad del recurso hídrico para el consumo humano, la generación hidroeléctrica y la conservación de ecosistemas [26].

En la cuenca del río Napo, estas alteraciones pueden generar impactos en la producción hidroeléctrica de Coca Codo Sinclair, una de las principales represas del país [15].

3.2.3. Variabilidad Climática en la Región Amazónica Ecuatoriana

La región amazónica ecuatoriana es una de las áreas con mayor diversidad climática e hidrológica debido a su ubicación geográfica y a la interacción de múltiples factores atmosféricos. La variabilidad climática en esta región está influenciada por factores de escala global, regional y local, lo que genera cambios en los patrones de precipitación, temperatura y caudales de los ríos [27].

Factores que influyen en la variabilidad climática

La variabilidad climática en la Amazonía ecuatoriana está determinada por factores naturales y antrópicos, que afectan la distribución y frecuencia de las lluvias, así como la temperatura en la región [28]. En la Tabla 4 se resumen los principales factores que influyen en la variabilidad climática de la zona.

Tabla 4. Factores que influyen en la variabilidad climática en la región Amazónica [28]

| Factor | Descripción | Impacto en el Clima de la Amazonía |
|--|--|---|
| El Niño y La Niña (ENSO) | Fenómeno climático que modifica la temperatura del océano Pacífico ecuatorial, alterando los patrones atmosféricos globales. | Provoca periodos de sequía intensa durante El Niño y aumento de precipitaciones en La Niña. |
| Circulación Atmosférica Regional | Influencia de vientos alisios y sistemas de baja presión que afectan la distribución de humedad en la región. | Variaciones en la intensidad y frecuencia de lluvias, afectando los caudales de los ríos. |
| Deforestación y Cambios en el Uso del Suelo | Pérdida de cobertura forestal que altera los ciclos de evapotranspiración y retención de humedad. | Disminución de la humedad en la atmósfera, afectando la generación de lluvias. |
| Cambio Climático Global | Incremento en la temperatura global y cambios en los patrones de circulación atmosférica. | Aumento de la temperatura media y mayor irregularidad en las precipitaciones. |

Estos factores combinados han generado alteraciones en la disponibilidad hídrica y en los patrones de precipitación, lo que impacta directamente en la cuenca del río Napo y en las comunidades que dependen de sus recursos hídricos.

Cambios en los patrones de lluvia y temperatura en la Amazonía

Los registros climáticos han evidenciado cambios significativos en la temperatura y en la cantidad de precipitación en la región amazónica. Según estudios del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, se ha observado un incremento en la temperatura promedio de 0.2 a 0.4 °C por década, acompañado de una reducción en la cantidad de lluvia en ciertos periodos del año [21].

En la Tabla 5, se presentan los principales cambios detectados en los patrones climáticos en la Amazonía ecuatoriana.

Tabla 5. Cambios detectados en los patrones climáticos de la Amazonía Ecuatoriana

| Parámetro | Tendencia Observada | Fuente de Datos |
|---|---|---|
| Temperatura media anual | Incremento de 0.2 - 0.4 °C por década | Reportes Climatológicos [11] |
| Precipitación estacional | Mayor variabilidad interanual, con periodos de déficit y exceso de lluvia | Informes de Variabilidad Climática [17] |
| Eventos extremos (Sequías e inundaciones) | Aumento en la frecuencia de eventos extremos | Evaluaciones Globales del Clima [18] |

Estos cambios en la precipitación y temperatura afectan directamente los caudales de los ríos, incluyendo el río Napo, lo que hace crucial el análisis de sus tendencias hidrológicas mediante herramientas estadísticas.

3.2.4. Estudios Previos sobre Cambios en la Hidrología del Río Napo

La hidrología del río Napo ha sido objeto de múltiples estudios nacionales e internacionales, especialmente debido a su importancia en la generación hidroeléctrica, la biodiversidad y el abastecimiento de agua para las comunidades locales.

Investigaciones nacionales e internacionales relacionadas

Diversos estudios han analizado la evolución de los caudales y la disponibilidad hídrica del río Napo, considerando los efectos del cambio climático y la variabilidad natural. En la Tabla 6, se presentan algunas de las investigaciones más relevantes.

Tabla 6. Investigaciones sobre la hidrología del río Napo

| Autor/Entidad | Año | Hallazgos Clave |
|---------------------------------------|------|---|
| INAMHI | 2015 | Identificación de tendencias de disminución en los caudales medios anuales [29]. |
| MAATE | 2024 | Análisis de impacto de la deforestación en la disponibilidad hídrica de la cuenca [30]. |
| IPCC | 2021 | Estimaciones globales entre el cambio climático y patrones hidrológicos [18]. |
| Yarima Cumandá Recalde Aza | 2020 | Componer la respuesta hidrológica del río Napo frente a escenarios climáticos futuros [31]. |

3.3. MARCO CONCEPTUAL

Este marco conceptual aporta definiciones y algunos fundamentos teóricos importantes para lograr comprender los procesos hidrológicos y la relación que tienen con el cambio climático. En este apartado se puntualizan conceptos básicos acerca de la hidrología y cuencas hidrográficas, abarcando su clasificación, dinámica y los factores que influyen en su comportamiento.

3.3.1. Hidrología y Cuencas Hidrográficas

Las cuencas hidrográficas son una unidad de terreno definida por el área de drenaje de un sistema fluvial, producto de precipitaciones y deshielos que escurren hacia un cuerpo de agua principal, como un río, lago o mar [32]. Al igual que los ríos, estas cuencas suelen tener una divisoria de aguas, separando la escorrentía en diferentes cuencas (Fig. 1). Sus características fundamentales comprenden la superficie de drenaje, la cual representa la extensión del área misma que contribuye al caudal del río; la red hidrográfica que se compone por el sistema de ríos y afluentes que trasladan el agua dentro de la cuenca; la divisoria de aguas la cual se conforma por las líneas topográficas que ayuda a identificar una cuenca de otra; y el uso del

suelo que engloba la composición del territorio en términos de vegetación, urbanización y actividades humanas. Mismos que ayudan a establecer el comportamiento hidrológico de la cuenca con respecto a las variaciones climáticas [32].

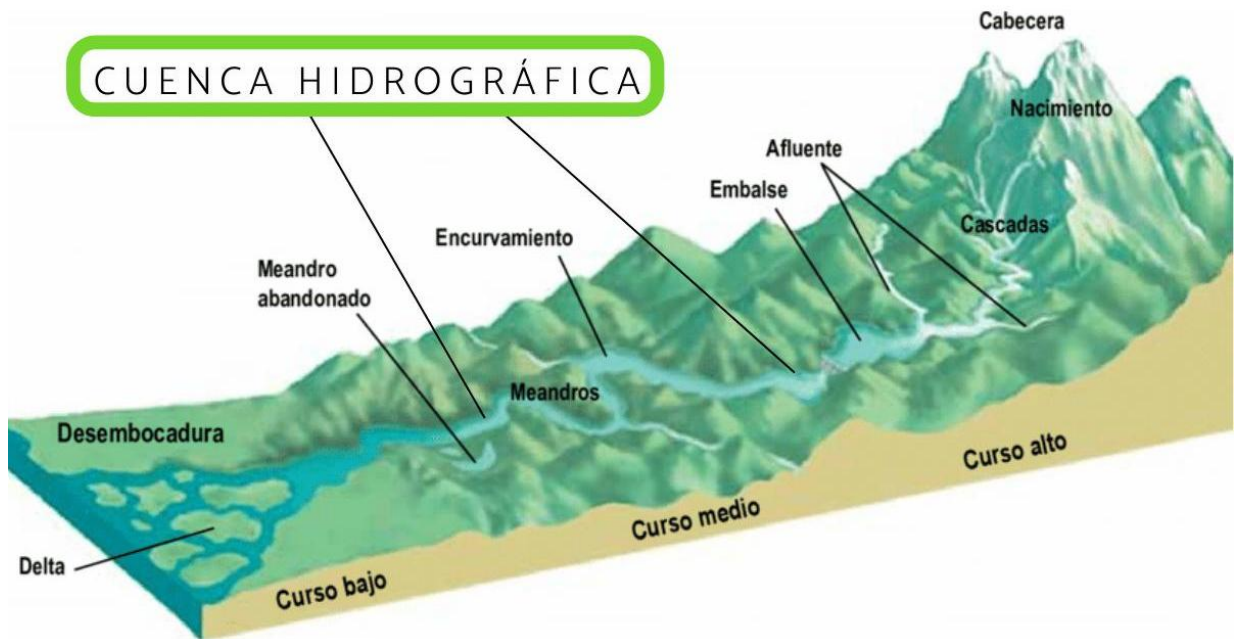


Figura 1. Las cuencas hidrográficas [33]

Tipos de cuencas hidrográficas: endorreicas, exorreicas y arreicas

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar según el destino final de sus aguas [33]. En la Tabla 7 se presentan los tres principales tipos de cuencas.

Tabla 7. Tipos de Cuencas Hidrográficas [33]

| Tipo de Cuenca | Descripción | Ejemplo |
|----------------|--|--------------------------------|
| Exorreica | Drena sus aguas hacia el océano o mar. | Cuenca del río Amazonas. |
| Endorreica | Sus aguas no llegan al mar, sino que terminan en lagos o depresiones cerradas. | Cuenca del Lago Titicaca. |
| Arreica | No tiene un sistema de drenaje definido; el agua se infiltra o se evapora. | Desiertos de Atacama y Sahara. |

La cuenca del río Napo, objeto de estudio de esta investigación, pertenece al sistema exorreico, ya que desemboca en el río Amazonas y finalmente en el océano Atlántico.

3.3.2. Régimen Hidrológico: variabilidad, caudal y patrones de flujo

El régimen hidrológico describe la variabilidad del caudal de un río a lo largo del tiempo, influenciado por factores climáticos, geológicos y antrópicos. Se compone de tres elementos clave: la variabilidad, que hace referencia a los cambios en el caudal del río debido a fluctuaciones climáticas o eventos extremos; el caudal, definido como el volumen de agua que fluye en un punto específico de la cuenca durante un periodo determinado, expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s); y los patrones de flujo, que determinan el comportamiento del caudal a lo largo del año y pueden clasificarse en perennes, intermitentes o efímeros, según la continuidad del flujo en el tiempo [13].

En la Tabla 8, se resumen los principales tipos de régimen hidrológico.

Tabla 8. Tipos de Regímenes Hidrológicos [34]

| Tipo de Régimen | Descripción | Ejemplo |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| Nival | Dominado por el derretimiento de nieve o glaciares. | Ríos en los Andes. |
| Pluvial | Regulado por la precipitación estacional. | Ríos amazónicos como el Napo. |
| Mixto | Combinación de aportes nivosos y pluviales. | Ríos en zonas templadas con montañas. |

El río Napo presenta un régimen pluvial, con variaciones estacionales influenciadas por los ciclos de lluvia en la Amazonía.

Balance hídrico en cuencas hidrográficas

El balance hídrico es un concepto clave en hidrología que representa la relación entre las entradas y salidas de agua en una cuenca. Matemáticamente, se expresa como:

Ecuación 1. Ecuación para el balance hídrico [35]

$$P = E + Q + \Delta S$$

Donde:

P = Precipitación.

E = Evapotranspiración.

Q = Escorrentía.

ΔS = Cambio en el almacenamiento de agua.

Factores que influyen en la hidrología de una cuenca (topografía, uso de suelo, clima)

El comportamiento hidrológico de una cuenca está determinado por múltiples factores físicos y climáticos [36], los cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Factores que Influyen en la Hidrología de una Cuenca [36]

| Factor | Descripción | Impacto en la Cuenca del Río Napo |
|---------------|--|--|
| Topografía | Relieve y pendiente del terreno. | Influye en la velocidad del flujo del agua y la erosión. |
| Uso del suelo | Cobertura vegetal y actividades humanas. | La deforestación reduce la infiltración y aumenta la escorrentía. |
| Clima | Precipitación y temperatura. | Regula la cantidad de agua disponible en los ríos. |
| Geología | Tipo de suelo y formaciones rocosas. | Determina la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua subterránea. |

3.3.3. Cambio Climático y su Relación con la Hidrología

El cambio climático ha generado impactos significativos en los procesos hidrológicos a nivel global, alterando los patrones de precipitación, la disponibilidad de agua y la frecuencia de eventos extremos [26]. La relación entre el cambio climático y la hidrología se manifiesta a través de cambios en el ciclo hidrológico, afectando la recarga de acuíferos, los caudales de los ríos y la calidad del agua.

Interacción entre cambio climático y procesos hidrológicos

El cambio climático afecta directamente la dinámica hidrológica de las cuencas hidrográficas, modificando la cantidad y distribución del agua en el tiempo y el espacio [37]. En la Tabla 10, se resumen los principales efectos del cambio climático sobre los procesos hidrológicos.

Tabla 10. Impacto del Cambio Climático en los Procesos Hidrológicos [37]

| Proceso Hidrológico | Impacto del Cambio Climático | Consecuencias |
|---------------------------|--|---|
| Precipitación | Aumento de lluvias extremas en algunas regiones y reducción en otras. | Sequías prolongadas e inundaciones más frecuentes. |
| Escorrentía | Alteración en la intensidad y duración del flujo superficial. | Mayor erosión del suelo y cambios en la calidad del agua. |
| Infiltración | Modificación en la capacidad de absorción del suelo debido a la deforestación y la urbanización. | Reducción en la recarga de acuíferos. |
| Evapotranspiración | Aumento por incremento de temperatura. | Disminución de la humedad en el suelo. |

El río Napo, al ser parte de la cuenca amazónica, es altamente susceptible a estas alteraciones, lo que podría comprometer la disponibilidad hídrica en la región y afectar la estabilidad ecológica del sistema fluvial [19].

3.3.4. Métodos Estadísticos para la Detección de Tendencias Hidrológicas y Consideraciones en su Aplicación

El análisis de tendencias en series temporales hidrológicas es fundamental para identificar cambios en los patrones de caudales y su relación con la variabilidad climática. Diversos métodos estadísticos han sido aplicados en estudios hidrológicos para la detección de

tendencias, cada uno con sus ventajas y limitaciones según la estructura y características de los datos analizados.

Métodos para la detección de tendencias en datos hidrológicos

Entre los métodos más utilizados en la evaluación de tendencias hidrológicas se encuentran:

Tabla 11. Descripción de métodos para detección de tendencias

| Método | Descripción | Ventajas | Limitaciones |
|-------------------------------|---|---|--|
| Test de Mann-Kendall [9] | Método no paramétrico basado en la comparación de pares de datos en una serie temporal para identificar tendencias monótonas. | No requiere normalidad en los datos; adecuado para datos con valores extremos o distribución no normal. | Sensible a la autocorrelación en datos con alta dependencia temporal. |
| Sen's Slope Estimator [38] | Método complementario al test de Mann-Kendall que estima la magnitud de la tendencia en una serie temporal. | Calcula la pendiente de la tendencia; útil para cuantificar la magnitud del cambio. | No detecta variaciones estacionales en la serie de datos. |
| Prueba de Pettitt [39] | Prueba estadística para la detección de cambios abruptos en series temporales. | Permite identificar puntos de cambio en la serie de datos. | No evalúa tendencias a largo plazo, solo cambios puntuales. |
| Regresión Lineal [40] | Ajuste de una línea de tendencia mediante regresión estadística. | Fácil de interpretar y aplicar. | Requiere que los datos cumplan con supuestos de normalidad y homocedasticidad. |

| | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|
| SARIMA (Seasonal ARIMA) [41] | Modelo de series temporales que captura tendencias y patrones estacionales. | Eficiente para datos con estacionalidad marcada. | Requiere series largas y estacionarias para una buena precisión. |
|---------------------------------------|--|--|--|

De acuerdo con las características de los datos hidrológicos en la cuenca del río Napo, en esta investigación se ha seleccionado el Test de Mann-Kendall, dado que es un método no paramétrico adecuado para analizar series temporales sin distribución normal y con presencia de valores atípicos. Su robustez ante datos con variabilidad natural lo hace una herramienta confiable para la detección de tendencias en caudales. Sin embargo, como el test es ampliamente validado en varias investigaciones hidrológicas y climáticas, nos permite comparar nuestros resultados con estudios similares en la Amazonia ecuatoriana [9].

Método Water Resources Council (1981) y su aplicación en el análisis hidrológico

El Método Water Resources Council (WRC, 1981) es un método que se usa para identificar y ajustar los parámetros atípicos en las distribuciones temporales de caudales. Su finalidad es asegurar la calidad y confiabilidad de los datos hidrométricos, excluyendo los registros que puedan tergiversar el análisis de tendencias y representaciones hidrológicas [42].

Además, este método constituye umbrales tanto altos como bajos para la detección de datos dudosos por medio de la aplicación de las distribuciones estadísticas, asegurando que las observaciones se acoplen a patrones esperados en un rango de nivel de confianza predefinido. En este caso se utiliza una distribución normal y la desviación estándar de los datos para definir ciertos valores críticos superiores e inferiores, accediendo así a la identificación de caudales extraños en una serie hidrológica [14].

La Tabla 12 muestra las principales características del Método Water Resources Council (1981)

Tabla 12. características del Método Water Resources Council (1981) [43]

| Característica | Descripción |
|-----------------------|--|
| Base estadística | Aplicación de distribuciones logarítmicas normales. |
| Parámetros clave | Media logarítmica, desviación estándar y coeficiente de confianza. |

| | |
|--------------------------|--|
| Aplicación en hidrología | Filtración de registros extremos en series de caudales para evitar sesgos en la evaluación de tendencias. |
| Ventajas | Método ampliamente validado y utilizado en estudios hidrológicos; fácil implementación en software estadístico. |
| Limitaciones | Requiere supuestos de normalidad logarítmica en los datos; su efectividad depende de la calidad de los registros originales. |

Retos en la aplicación del Test de Mann-Kendall según la escala temporal

Cuando se realiza un análisis de tendencias hidrológicas, nos enfrentamos a ciertos desafíos que van variando según la escala temporal que se escoja (diaria, mensual, anual). En la siguiente (Tabla 13) se muestra algunos de los principales retos asociados a cada escala.

Tabla 13. Desafíos de Test de Mann-Kendall según escala temporal

| Escala Temporal | Desafíos en la Aplicación del Test de Mann-Kendall |
|-----------------|--|
| Diaria | Alta variabilidad natural en los caudales dificulta la detección de tendencias a largo plazo; presencia de ruido en los datos debido a eventos extremos. |
| Mensual | Influencia de la estacionalidad en los caudales; requerimiento de técnicas de suavización para evitar sesgos en la tendencia detectada. |
| Anual | Menor cantidad de observaciones, lo que puede reducir la sensibilidad del test para detectar tendencias significativas; posible pérdida de detalles en la variabilidad intraanual. |

En este proyecto, se han valorado tendencias en datos mensuales y anuales para disminuir el impacto de la variabilidad diaria y así poder favorecer la interpretación de patrones a lo largo del tiempo.

3.3.5. Herramientas Utilizadas en el Análisis Hidrológico

Este análisis de series hidrológicas solicita el uso de herramientas determinadas que permitan la organización, el procesamiento y la valoración de tendencias en los datos [44]. En este punto se detallan los softwares fundamentales que se usan en esta investigación, así mismo como sus ventajas, funciones y finalmente sus limitaciones.

RStudio (Anomalize, Weird, MICE)

RStudio es una herramienta imprescindible con un entorno de lenguaje de programación integrado para R, se utiliza en el análisis de datos estadísticos e hidrológicos, para importar, acceder, transformar, explorar, trazar y modelar dichos datos [45]. Su versatilidad permite el procesamiento de grandes magnitudes de datos, la aplicación de modelos matemáticos y la representación de resultados de manera eficiente, así como se puede observar en la [Tabla 14].

Tabla 14. Paquetes utilizados en el análisis hidrológico con RStudio [45]

| Paquete | Función Principal | Aplicación en el Proyecto |
|-----------|--|--|
| Anomalize | Detección de valores atípicos y anomalías. | Identificación de datos erróneos o valores extremos en registros hidrológicos. |
| Weird | Evaluación de patrones de series temporales. | Detección de cambios abruptos en los caudales del río Napo. |
| MICE | Imputación de datos faltantes mediante métodos estadísticos. | Corrección de datos incompletos en las estaciones hidrológicas. |

Nota: Estos paquetes facilitan la evaluación en un análisis robusto de datos hidrológicos en la cuenca del río Napo, lo que garantiza la calidad y fiabilidad de los resultados.

Software TREND: funciones, ventajas y limitaciones en el análisis hidrológico

Se puede asegurar que TREND es un software intuitivo y fácil de usar ya que este depende totalmente del análisis de datos ambientales e hidrológicos introducidos [46]. Se apoya en métodos estadísticos no paramétricos como el Test de Mann-Kendall, Sen's Slope y Pettitt's Test, los cuales facilitan la detección de patrones de cambio en series de tiempo [47]. Sus funciones fundamentales comprenden la aplicación de pruebas estadísticas para evaluar tendencias en los datos, la generación de gráficos de evolución temporal que ayuden a representar los cambios a largo plazo y significancia estadística en la variabilidad observada, que ayuden a facilitar la interpretación de resultados en estos estudios hidrológicos [46].

En la (Tabla 15) que se muestra a continuación, se muestran las ventajas y limitaciones del software TREND.

Tabla 15. Ventajas y restricciones del software TREND [46]

| Aspecto | Ventajas | Limitaciones |
|------------------------|--|--|
| Simplicidad en el Uso | Interfaz intuitiva con herramientas preconfiguradas. | No permite el análisis de grandes magnitudes de datos simultáneamente. |
| Métodos Estadísticos | Implementa pruebas específicas para hidrología. | No acepta series temporales diarias muy extensas. |
| Generación de Reportes | Exportación automática de gráficos y análisis. | No permite integración directa con bases de datos en línea. |

En esta investigación, el software Trend se emplea el Test de Mann-Kendall en los datos de caudales de estaciones hidrológicas que se encuentran en la cuenca del río Napo, permitiendo así analizar algún cambio significativo en las tendencias de esta cuenca.

Excel y su aplicabilidad en la organización de datos hidrológicos

Microsoft Excel es un programa y/o herramienta importante para este análisis, debido a su sencillez de uso, la gran capacidad que tiene para organizar grandes magnitudes de información [48]. Cabe aclarar que este no es un software estadístico evolucionado, para esta investigación se aplica en la sistematización, orden y limpieza de datos, permitiendo así depurar valores nulos de las series temporales, el análisis descriptivo favorece el cálculo de promedios, desviación estándar y coeficientes de variabilidad en los caudales, finalmente se pudo visualizar los datos iniciales, por medio de la producción de gráficos de tendencias y distribuciones que proporciona el primer análisis de estos datos.

En la Tabla 16, se comparan las funcionalidades de Excel, RStudio y TREND en el análisis hidrológico.

Tabla 16. Comparación de herramientas para el análisis hidrológico [48]

| Herramienta | Uso en la Investigación | Ventajas | Limitaciones |
|-------------|--|--|---|
| Excel | Organización y análisis descriptivo de datos. | Fácil de usar y ampliamente disponible. | No permite análisis avanzados de series temporales. |
| RStudio | Aplicación de modelos estadísticos y procesamiento de datos. | Versátil, potente y con múltiples paquetes especializados. | Requiere conocimientos en programación. |
| TREND | Detección de tendencias en series temporales hidrológicas. | Especializado en métodos estadísticos no paramétricos. | No permite manejar grandes volúmenes de datos simultáneamente |

El uso combinado de estas herramientas permite un análisis integral de los datos hidrológicos, desde la organización y limpieza de datos (Excel) hasta la detección de tendencias estadísticas (TREND y RStudio).

3.3.6. Procesamiento y Corrección de Datos Hidrológicos

El análisis de series hidrológicas requiere una adecuada preparación de los datos para garantizar la fiabilidad de los resultados. El procesamiento y corrección de datos hidrológicos implica la eliminación de valores atípicos, la interpolación de datos faltantes y la aplicación de técnicas de imputación para minimizar errores en la serie temporal [44].

Eliminación de valores atípicos y datos inconsistentes

Los valores atípicos pueden distorsionar significativamente los resultados de los análisis estadísticos, especialmente en la detección de tendencias [49]. En hidrología, los valores atípicos pueden deberse a errores de medición, fallos en los sensores o eventos climáticos extremos [Tabla 17].

Tabla 17. Métodos de detección y eliminación de valores atípicos [49]

| Método | Descripción | Aplicación en el Estudio |
|-----------------------------|---|--|
| Rango Intercuartílico (IQR) | Identifica valores fuera del rango entre el percentil 25 y 75. | Eliminación de caudales extremos en la serie del río Napo. |
| Desviación Estándar | Considera valores fuera de 3 desviaciones estándar de la media. | Identificación de anomalías en la precipitación. |
| Paquete (R) Anomalize | Detecta patrones atípicos en series temporales. | Filtrado de datos erróneos en estaciones hidrométricas. |

Los valores identificados como atípicos pueden ser eliminados o corregidos mediante técnicas de interpolación, garantizando la coherencia de los datos utilizados en el análisis.

Métodos de interpolación para datos faltantes

Las series hidrológicas a menudo presentan datos faltantes, lo que puede afectar la precisión de los análisis de tendencia. Para corregir estos vacíos en los registros, se emplean técnicas de interpolación y métodos de imputación [44].

Uso del paquete MICE en R

El paquete MICE (Multivariate Imputation by Chained Equations) en RStudio es una herramienta ampliamente utilizada para completar datos faltantes mediante modelos probabilísticos [50].

El proceso de imputación con MICE se basa en la estimación de los valores faltantes a partir de las correlaciones entre variables observadas.

El uso de MICE permite la reconstrucción de series temporales de caudales y precipitación, reduciendo la pérdida de información en el análisis [51].

Aplicación del Water Resources Council (1981) para estimación de datos

El método del Water Resources Council (WRC, 1981) es un enfoque ampliamente utilizado en hidrología para la estimación de valores faltantes en registros de caudales. Se basa en la ecuación:

$$Q_x = \frac{\sum w_i Q_i}{\sum w_i}$$

Donde:

Q_x es el caudal estimado.

Q_i son los caudales de estaciones hidrométricas cercanas.

w_i son coeficientes de ponderación basados en similitud hidrológica.

Este método es útil cuando existen registros incompletos en algunas estaciones, permitiendo reconstruir la serie temporal con base en datos de cuencas cercanas.

Técnicas de imputación y su impacto en la calidad del análisis

La selección del método de imputación adecuado es crucial para minimizar el sesgo y la distorsión en la serie temporal. En la Tabla 17, se comparan las principales técnicas de imputación y su impacto en la calidad del análisis.

Tabla 17. Comparación de técnicas de imputación de datos faltantes [51]

| Técnica | Ventajas | Limitaciones |
|--------------------------------|---|--|
| Interpolación Lineal | Fácil de implementar y rápida en cálculos. | No captura tendencias no lineales. |
| MICE en R | Modelo robusto que preserva la correlación entre variables. | Mayor complejidad computacional. |
| Water Resources Council (1981) | Basado en datos hidrológicos cercanos, útil para caudales. | Depende de la disponibilidad de datos de otras estaciones. |

Para garantizar un análisis hidrológico confiable en la cuenca del río Napo, se empleará una combinación de MICE y el método de Water Resources Council (1981), asegurando la consistencia de los datos reconstruidos.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1. Definición de Variables del Estudio

En este estudio, se han definido las variables que permitirán analizar la evolución de los caudales hidrológicos en la cuenca del río Napo y su relación con los factores climáticos. Estas variables se clasifican en dependiente e independientes, de acuerdo con su función dentro del análisis de tendencias.

Variable dependiente

La variable dependiente que importa en este estudio hidrológico son los caudales de la cuenca del río Napo, los cuales se estiman bajo el análisis estadístico del Test de Mann-Kendall y la pendiente de Sen que es un método complementario

Variables independientes

En la variable independiente se considera la precipitación, siendo esta la cantidad de lluvia que se registra en esta cuenca en ciertos periodos específicos.

Relación entre variables y su impacto en el análisis

Cuando hablamos de una relación de variables se puede mencionar que los caudales se encuentran directamente influenciados por la precipitación. Si existe un aumento en la precipitación, hay un incremento en los caudales; de otra forma si hay una disminución prolongada en las lluvias puede originarse una reducción de caudales y talvez una presencia de sequias.

4.2. Diagrama de Flujo del Proceso de Análisis

Este flujograma de tareas nos permite asegurar el análisis y calidad de los datos, aplicando metodológicas robustas que nos ayuden a detectar tendencias hidrológicas en la cuenca del rio Napo.

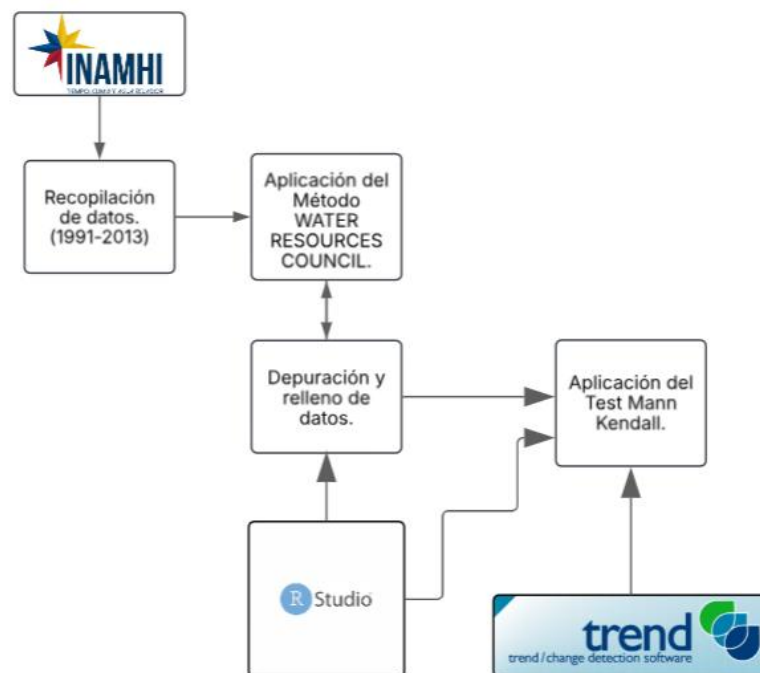


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de análisis hidrológico

La investigación de tendencias en los datos hidrológicos en la cuenca del río Napo una serie de técnicas estructurada que aprueba la recopilación, limpieza, procesamiento y evaluación estadística de los caudales. En la Figura 2, se muestra el flujograma del proceso metodológico que se aplica en esta investigación.

Etapas del Análisis de Datos Hidrológicos

1. **Recopilación de datos:** Se extraen registros hidrométricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) que corresponden a un periodo de 22 años (1991-2013)
2. **Identificación de los datos atípicos aplicando el Método Water Resources Council:** Se ejecutan criterios estadísticos para el reconocimiento de datos faltantes y posteriormente realizar el tratamiento.
3. **Depuración y relleno de datos:** Se lleva a cabo la limpieza de la base de datos por medio de técnicas de interpolación y eliminación de valores inconsistentes, utilizando una de las herramientas anteriormente mencionadas como lo es RStudio.
4. **Aplicación del Test de Mann-Kendall:** Se usan demostraciones estadísticas no paramétricas que ayuden a identificar tendencias significativas en los caudales, empleando RStudio y el software TREND.

4.3. Datos de Entrada y Fuentes de Información

Registros Hidrológicos del INAMHI (1991-2013)

Los datos de caudal que se usaron en este estudio fueron conseguidos a través de los anuarios hidrológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que corresponden a un periodo de 22 años (1991-2013). En el proceso de recopilación, como primer paso se tomaron capturas de pantalla de los valores que se requiera para la investigación, luego de ello se llevaron a transcribir manualmente en hojas de cálculo de Excel.

Criterios de Selección y Validación de Datos

Los datos fueron seleccionados minuciosamente considerando que estos se encuentren completos, considerando también el estado de antigüedad en cuestión de asentamiento o creación de cada estación hidrológica, esta revisión se lo realizó de manera manual, priorizando aquellas con serie de datos más completas. Se descartaron las estaciones que tengan registros inconsistentes o con mayor serie de datos faltantes.

En este apartado el proceso de selección y validación garantiza la representatividad de los datos usados, proporciona una evaluación precisa en las tendencias hidrológicas en la cuenca del río Napo y la relación que tienen con el cambio climático.

4.4. Métodos de Cálculo y Procesamiento de Datos

Para asegurar la naturaleza y precisión de los datos empleados en esta investigación, se emplearon algunos de los métodos estadísticos y técnicas de procesamiento. Estas técnicas permitieron la detección, eliminación de valores atípicos (outliers), la corrección en datos inconsistentes y la identificación de tendencias en las series temporales en los caudales de la cuenca del río Napo.

4.4.1. Preprocesamiento de Datos Hidrológicos

El preprocesamiento de los datos hidrológicos incluyó la eliminación de valores atípicos y la corrección de inconsistencias en las series temporales. Para este propósito, se empleó el método de detección basado en la desviación estándar, el cual se describe a continuación:

Detección de Valores Atípicos con el Método Water Resource Council

Los valores atípicos fueron identificados mediante la siguiente expresión matemática, basada en la desviación estándar:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde:

S_y: Desviación Estándar

n: Número de muestra

y₁: Valor logarítmico base 10, individual de la muestra

\bar{y} : Valor promedio de la muestra

A partir de este cálculo, se establecieron umbrales para la detección de valores sospechosos tanto en la parte alta como baja de la distribución.

Umbral de Datos Dudosos Altos

Los valores atípicos altos fueron determinados mediante la siguiente ecuación:

$$Y_H = \bar{y} + Kn * Sy$$

$$Q_H = (10)^{Y_H}$$

Donde:

YH: Umbral de datos dudosos altos en unidades logarítmicas

\bar{y} : Valor promedio de la muestra

Kn: Valor con nivel de significancia 10% para la distribución normal

Sy: Desviación Estándar

QH: Caudal de umbral alto

Umbral de Datos Dudosos Bajos

De manera similar, los valores atípicos bajos se identificaron mediante:

$$Y_L = \bar{y} - Kn * Sy$$

$$Q_L = (10)^{Y_L}$$

Donde:

QL: Caudal de umbral bajo

YL: Umbral de datos dudosos bajos en unidades logarítmicas

Una vez identificados los valores atípicos, se procedió a la interpolación de datos faltantes mediante el método MICE en RStudio y la técnica propuesta por el Water Resources Council (1981), asegurando la continuidad de las series temporales.

4.4.2. Aplicación de Métodos Estadísticos para la Detección de Tendencias

Para la identificación de tendencias en los caudales hidrológicos de la cuenca del río Napo, se empleó el Test de Mann-Kendall, un método estadístico no paramétrico ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y climatológicos.

El Test de Mann-Kendall evalúa la existencia de una tendencia en una serie temporal sin requerir que los datos sigan una distribución específica. Su aplicación permite determinar si los caudales presentan un comportamiento creciente, decreciente o sin tendencia significativa a lo largo del tiempo.

3.3. Análisis de Tendencias

El análisis de tendencias se llevó a cabo utilizando software TREND. Una vez que los datos limpios fueron ingresados, se procedió a calcular el estadístico Z del test de Mann-Kendall, el cual permitió determinar la existencia de tendencias significativas en la serie temporal, la obtención del estadístico Z y tabla de interpretación de resultados se muestran a continuación en donde se toma como referencia el nivel de significancia del 10%.

Tabla 18. Criterios para la interpretación del Test Mann Kendall [9]

| Significancia | Simbología | Z Estadístico |
|--|------------|---------------|
| Sin tendencia | ST | 0 |
| Tendencia significativa creciente | TSC | $> +1.645$ |
| Tendencia significativa decreciente | TSD | < -1.645 |
| Tendencia no significativa creciente | TNSC | $< +1.645$ |
| Tendencia no significativa decreciente | TNSD | > -1.645 |

4.5. Herramientas y Software Utilizado

Para la recopilación, organización, procesamiento y análisis de los datos hidrológicos en la cuenca del río Napo, se emplearon diversas herramientas y software especializados. Estos programas permitieron la aplicación de métodos estadísticos para la detección de tendencias, el tratamiento de valores atípicos y la organización estructurada de los datos.

RStudio y paquetes aplicados

El software RStudio fue utilizado para el análisis estadístico y la manipulación de datos hidrológicos, mediante la implementación de diversos paquetes especializados:

- **Anomalize:** Aplicado para la detección de valores atípicos en las series de caudales.

- **MICE (Multivariate Imputation by Chained Equations):** Empleado para la interpolación de datos faltantes, asegurando la continuidad de las series temporales.

Software TREND para la evaluación de tendencias hidrológicas

Este software fue aplicado para evaluar las tendencias en la serie temporal de caudales, luego de haber sido rellenados por medio de la aplicación de pruebas estadísticas no paramétricas, con el Test de Mann-Kendall en conjunto con la pendiente de Sen. Esta herramienta permitió determinar la existencia de tendencias significativas en los registros de caudal y analizar la variabilidad de los datos a lo largo del tiempo.

Excel para la organización inicial de datos

Esta herramienta fue empleada en la etapa inicial de esta investigación para la recopilación de datos, así mismo ayudó a facilitar la sistematización y limpieza de los registros hidrométricos. Su funcionalidad ha permitido una correcta organización de series temporales, la eliminación de valores nulos y también a la creación de gráficos preliminares que muestren una visualización inicial de las tendencias de caudales.

El trabajo colectivo de estas herramientas ayudó a obtener un análisis preciso de los datos hidrológicos, accediendo a la identificación de tendencias y en la evaluación de la variabilidad hidrológica.

4.6. Contexto geográfico e hidrológico de la cuenca del río Napo

La cuenca del río Napo es un afluente importante para la Amazonia ecuatoriana, es identificada por su alta biodiversidad y su relevancia por la generación de energía hidroeléctrica, así como el suministro de agua para comunidades locales. El área de este estudio abarca 17,833.91 km², con un perímetro de 795.22 km, que incluye un sistema complejo de ríos y afluentes que conforman su red hidrográfica.

La delimitación hidrográfica de esta cuenca es un componente esencial para esta investigación, ya que nos permite definir el área de estudio, también la influencia de los ríos y los afluentes que lo conforman. En la Figura 3 que se muestra a continuación, podemos observar la delimitación precisa de la cuenca del río Napo, mostrando sus límites, la conexión en sus sistemas de drenaje y la ubicación en conjunto con sus estaciones hidrológicas de monitoreo.

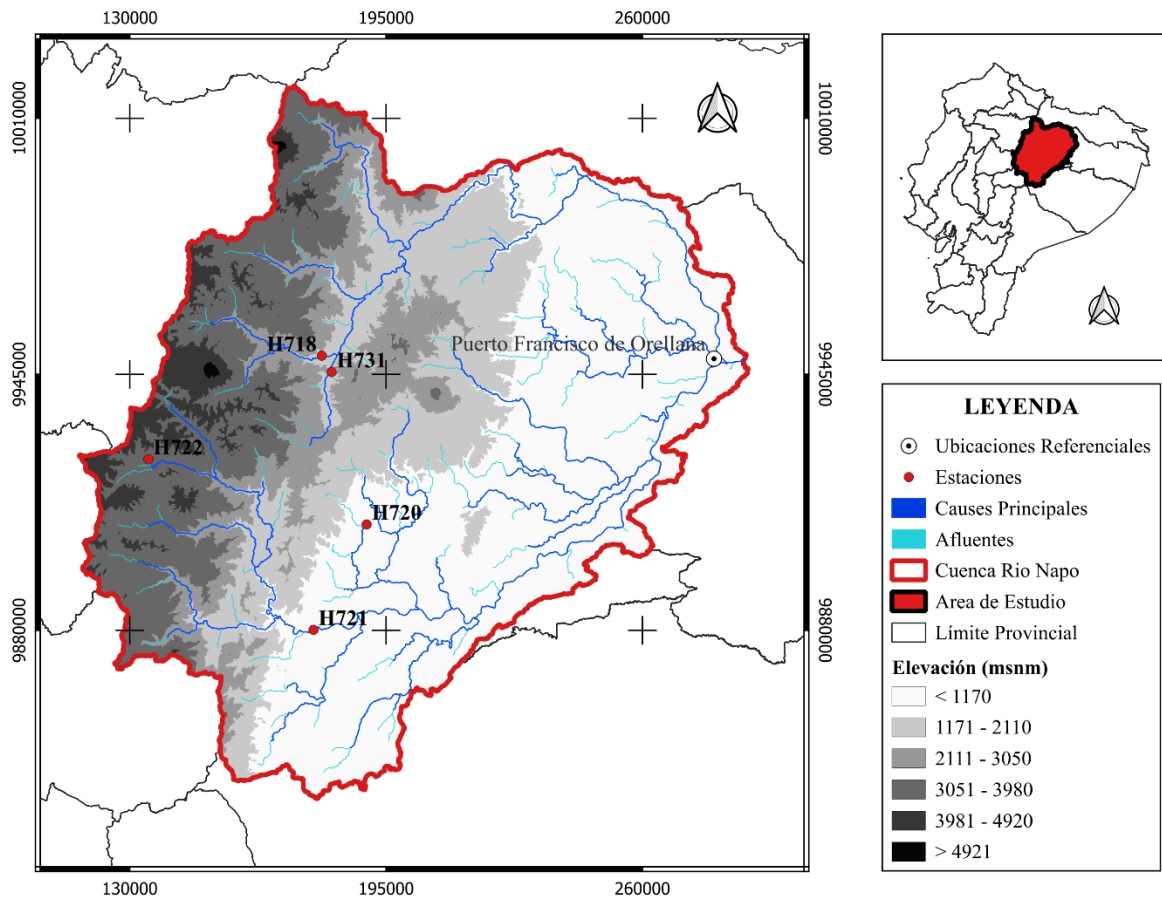


Figura 3. Ubicación de la cuenca hidrológica y sus estaciones

4.6.1. Justificación del enfoque metodológico

Realizar un análisis de tendencias hidrológicas en la cuenca del río Napo, viene a ser una parte esencial para lograr captar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de este recurso hídrico. La metodología adaptada en este estudio se basa en evidencias estadísticas no paramétricas que permitan encontrar algunos cambios significativos en la serie temporal de caudales sin la necesidad de asumir distribuciones específicas en los datos.

El manejo del Test de Mann-Kendall y la consideración de la pendiente de Sen resulta ser adecuado para lograr evaluar tendencias en datos hidrológicos a lo largo del tiempo. De igual manera, se utilizan herramientas de visualización para poder realizar la interpretación de manera grafica las variaciones en los caudales. A continuación, en la Figura 4, se presenta las estaciones hidrológicas que se han usado en esta investigación, además, de los afluentes y caues principales.

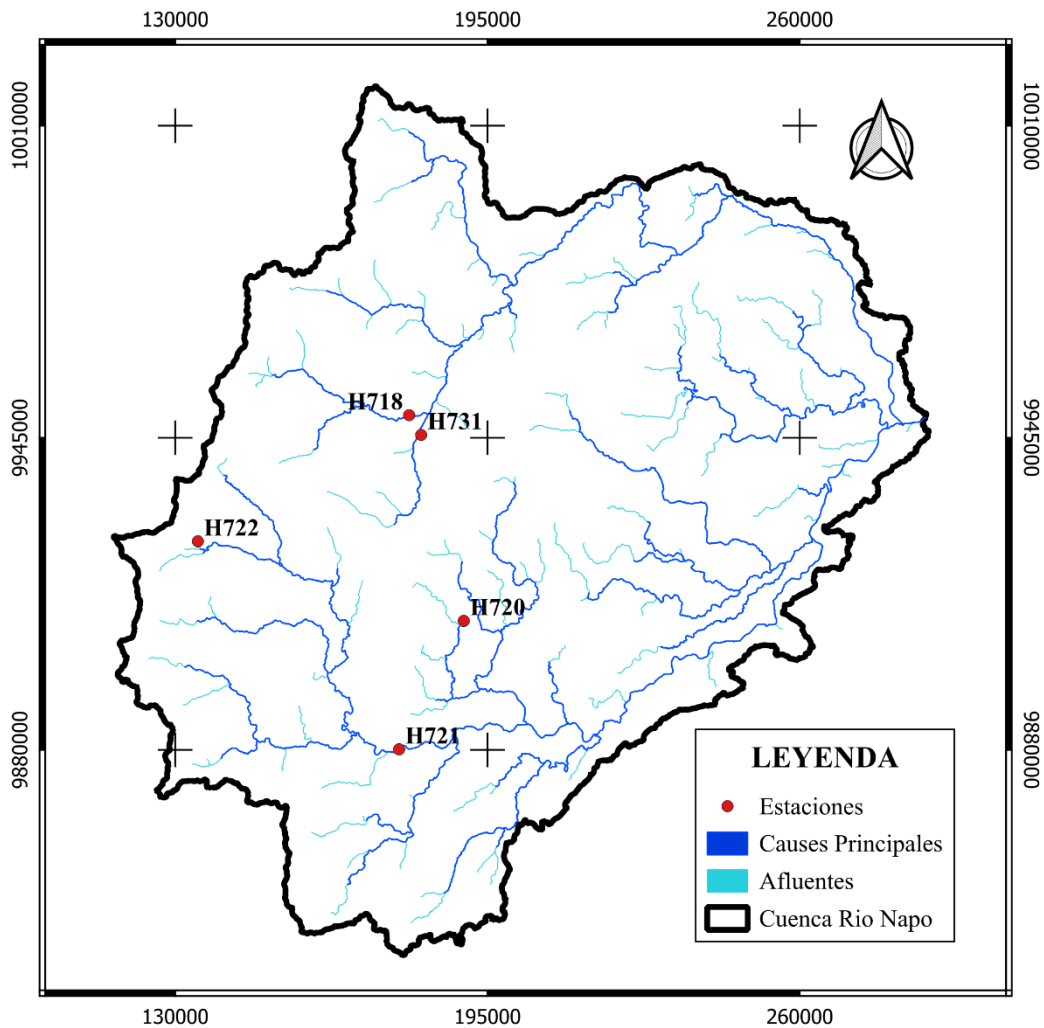


Figura 4. Representación de la Ubicación de las Estaciones Hidrológicas

4.7. Consideraciones Metodológicas y Limitaciones del Estudio

En este punto de la investigación, se ha aplicado una orientación estadística que ayude a la detección de tendencias en la cuenca del río Napo, empleando pruebas no paramétricas y modelos de interpolación de datos. No obstante, como en cualquier estudio hidrológico, existen algunas suposiciones y limitaciones que deberían ser consideradas para poder interpretar los resultados.

Suposiciones efectuadas en el análisis de datos

Durante el procesamiento y análisis de los datos hidrológicos, se asumieron las siguientes condiciones:

- Se tuvo muy en cuenta que los registros de caudales facilitados por el INAMHI son significativos de la realidad hidrológica en la cuenca del río Napo y que los

procedimientos de medición que se usaron en las estaciones cumplen con los estándares de calidad requeridos.

- Se asumió que las tendencias detectadas en los caudales evidencian cambios reales en el régimen hidrológico y no son producto de modificaciones en los métodos de medición o errores en la recopilación de datos.
- En la interpolación de datos faltantes mediante el método MICE y el enfoque del Water Resources Council (1981), se asumió que la variabilidad de los caudales sigue patrones consistentes a lo largo del tiempo.
- Se estableció que los valores atípicos identificados mediante el método establecido correspondían a errores de medición que no reflejan tendencias sistemáticas en la hidrología de la cuenca.

Posibles fuentes de error e incertidumbre en los resultados

A pesar de los esfuerzos por garantizar la precisión del análisis, existen factores que pueden generar incertidumbre en los resultados obtenidos:

- **Disponibilidad y calidad de los datos históricos:** La información utilizada en este estudio abarca el período 1991-2013, lo que puede limitar la capacidad de identificar tendencias a largo plazo si existen cambios en la dinámica hidrológica fuera de este rango temporal.
- **Interpolación de datos faltantes:** Aunque se emplearon técnicas estadísticas para estimar valores ausentes, estos métodos pueden introducir sesgos, especialmente en períodos con datos escasos o con alta variabilidad en los caudales.
- **Limitaciones de los métodos estadísticos:** El Test de Mann-Kendall y la pendiente de Sen son herramientas robustas para la detección de tendencias, pero no permiten identificar las causas subyacentes de los cambios en los caudales, por lo que sus resultados deben interpretarse en conjunto con análisis climáticos.

A pesar de estas limitaciones, la metodología aplicada permite obtener una visión general de la evolución hidrológica de la cuenca del río Napo y proporciona una base para estudios futuros que integren otras variables ambientales y modelos hidrológicos más avanzados.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Presentación de Resultados del Análisis Hidrológico

A continuación, se analizan y describen los resultados obtenidos a partir de los datos extraídos de las estaciones hidrométricas seleccionadas dentro de la cuenca del río Napo. El período de análisis comprende los registros hidrológicos disponibles entre 1991 y 2013, obtenidos del banco de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

5.2. Procesamiento, Organización y Análisis de Datos Crudos

La información utilizada en este estudio fue obtenida de los anuarios hidrológicos del INAMHI, donde se registran los caudales de las estaciones seleccionadas. Sin embargo, la calidad y completitud de los datos varió entre estaciones, presentando falencias significativas en sus registros en alguna de las estaciones.

La Tabla 22 muestra el porcentaje de datos faltantes en cada estación hidrométrica, evidenciando que la estación H718 (Quijos en Baeza) presentó la mayor cantidad de datos ausentes (77%), mientras que la estación H722 (Yanahurco D.J. Valle) tuvo la menor pérdida de registros (1%).

Tabla 19. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones hidrométricas analizadas

| Código | Estación | Coordenada Este | Coordenada Norte | Datos Faltantes (%) |
|--------|----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| H718 | QUIJOS EN BAEZA | 178690.00 m E | 9949705.00 m S | 77 |
| H720 | MISAHUALLI EN COTUNDO | 190071.00 m E | 9906859.00 m S | 16 |
| H721 | JATUNYACU D.J. ILOCULIN | 176602.00 m E | 9880103.00 m S | 45 |
| H722 | YANAHURCO D.J. VALLE | 802636.00 m E | 9923463.00 m S | 1 |
| H731 | COSANGA AJ QUIJOS | 181198.00 m E | 9945587.00 m S | 26 |

5.3. Identificación de Valores Atípicos y Corrección de Datos

5.3.1. Detección de Valores Atípicos

Para garantizar la calidad de los datos hidrológicos analizados, se realizó un estudio de valores atípicos en los caudales registrados. Se aplicó el método Water Resources Council (1981), que establece umbrales de datos dudosos altos y bajos en función de la distribución estadística de la serie temporal de caudales, como se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 20. Umbrales y valores atípicos

| Código | Estación | Umbral de Caudales Altos (m ³ /s) | Valor Atípico (m ³ /s) | Umbral de Caudales Bajos (m ³ /s) | Valor Atípico (m ³ /s) |
|--------|-------------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| H718 | QUIJOS EN BAEZA | 469.26 | | 1.04 | |
| H720 | MISAHUALLI EN COTUNDO | 198.85 | 323.001 | 0.64 | 0.032 |
| H721 | JATUNYACU D.J. ILOCULIN | 6165.54 | | 61.12 | |
| H722 | YANAHURCO D.J. VALLE | 161.83 | | 0.22 | 0.09 y 0.11 |
| H731 | COSANGA AJ QUIJOS | 1210.44 | | 1.63 | 0.351 |

En la Tabla 20, se muestran umbrales y sus valores atípicos encontrados para cada estación, este procedimiento se llevó a cabo en dos fases: antes y después de la imputación de datos faltantes, con el propósito de asegurar que la corrección de valores ausentes no alterara la estructura original de los datos. La eliminación de valores atípicos permitió mejorar la fiabilidad de los registros sin afectar las tendencias naturales de los caudales en cada estación.

5.3.2. Imputación de Datos Faltantes con el Método PMM

Dado que varias estaciones hidrométricas presentaban registros incompletos, se considera además los campos vacíos que quedan luego de la eliminación de valores atípicos, lo que nos lleva a explorar diferentes métodos de interpolación estadística para completar las series temporales. Tras un análisis comparativo, se determinó que la técnica más adecuada era el

Predictive Mean Matching (PMM), implementado en la librería MICE (Multivariate Imputation by Chained Equations) de RStudio.

El método PMM se seleccionó por su capacidad para:

- Preservar la distribución original de los datos, evitando la generación de valores extremos irreales.
- Tomar valores reales de estaciones cercanas para predecir los valores faltantes, asegurando que los registros interpolados se ajusten a la variabilidad natural del caudal.
- Mantener la coherencia de la serie temporal, minimizando posibles sesgos introducidos por la interpolación.

Para mejorar la precisión de la imputación, se seleccionaron estaciones con características hidrológicas similares y ubicaciones geográficas cercanas. Esto garantizó que los valores completados fueran representativos del comportamiento hidrológico de la cuenca.

A continuación, se presentan los hidrogramas de las estaciones hidrométricas tras la imputación de datos, reflejando la continuidad de los registros:

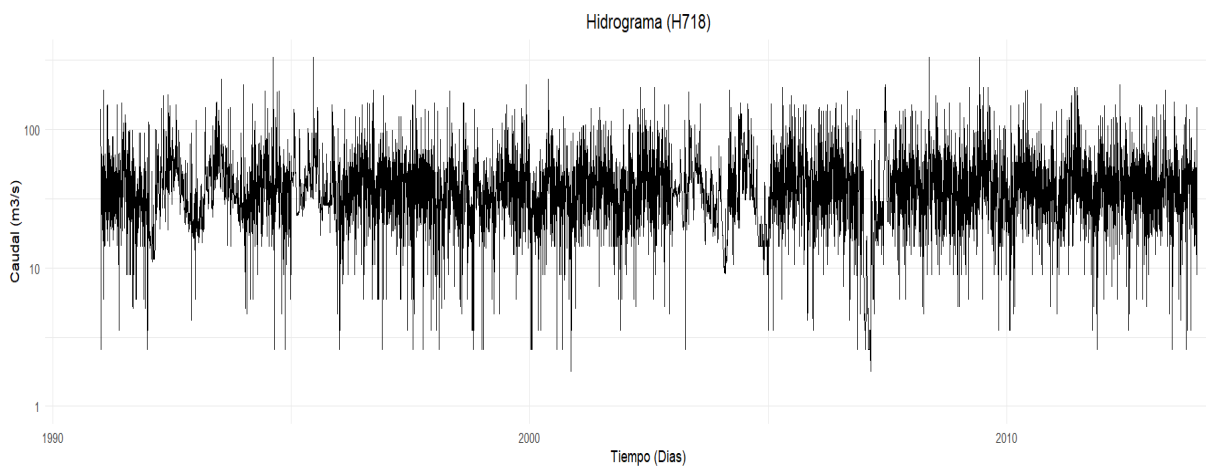


Figura 5. Hidrograma de la estación H718 (Quijos en Baeza)

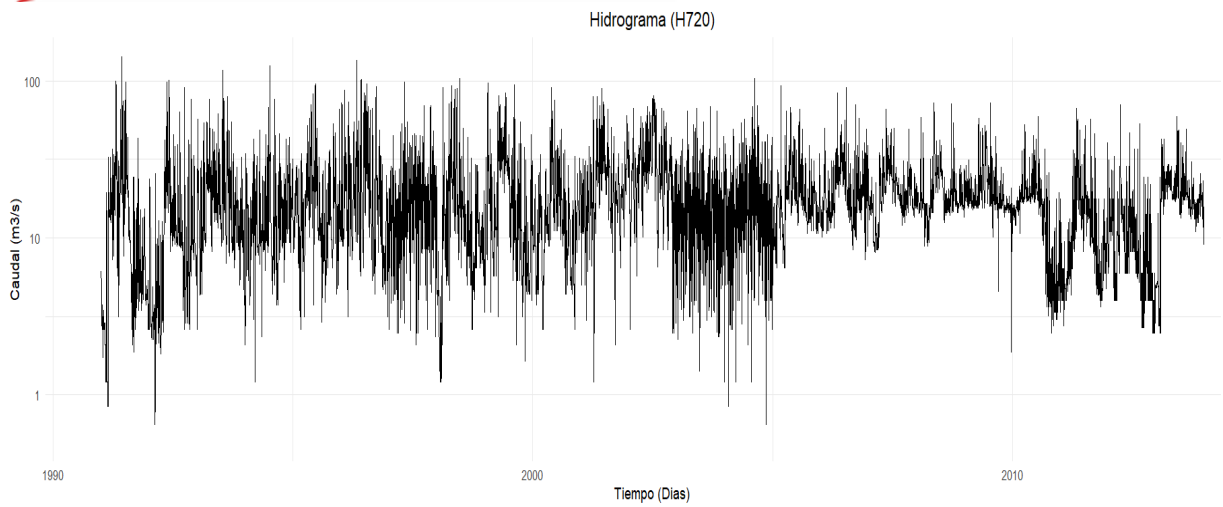


Figura 6. Hidrograma de la estación H720 (Misahuallí en Cotundo)

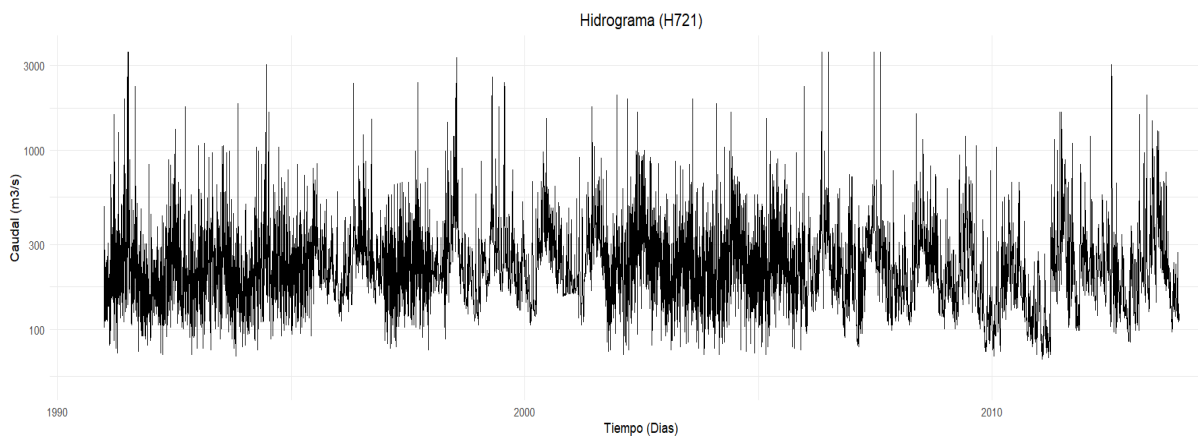


Figura 7. Hidrograma de la estación H721 (Jatunyacu D.J. Iloculín)

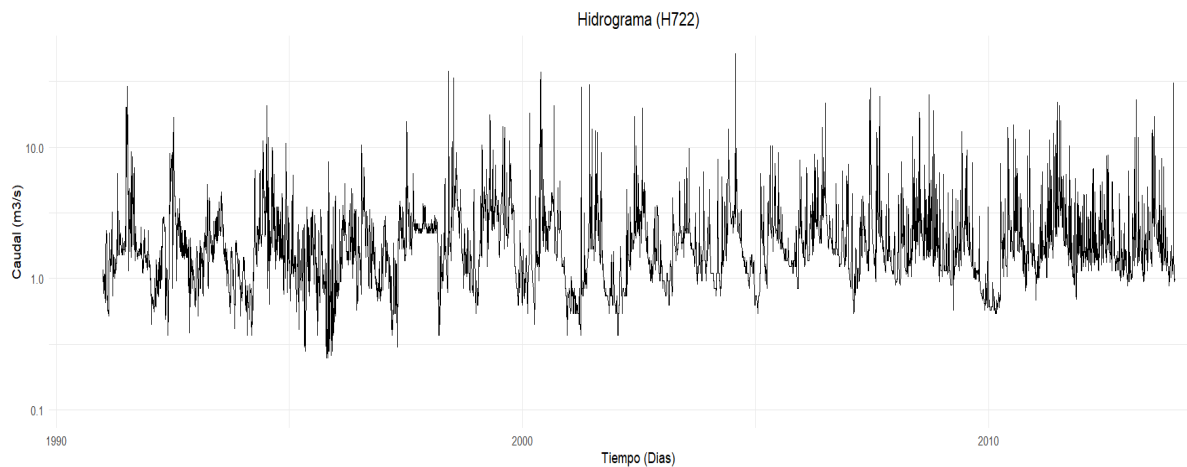


Figura 8. Hidrograma de la estación H722 (Yanahurco D.J. Valle)

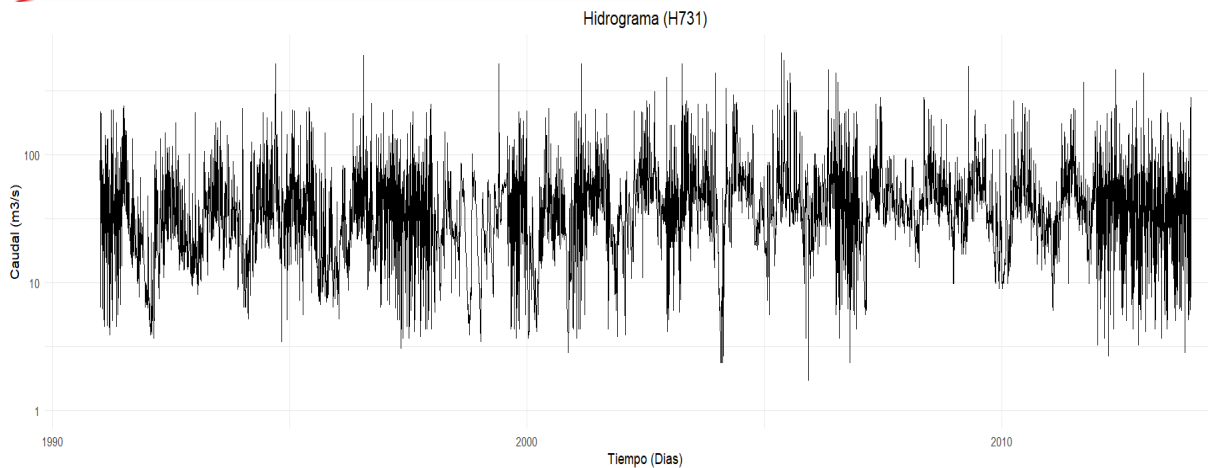


Figura 9. Hidrograma de la estación H731 (Cosanga A.J. Quijos)

En las figuras (7-11) muestran la evolución del caudal en cada estación a lo largo del período de estudio (1991-2013). Se observa que las series temporales imputadas presentan una variabilidad acorde con los datos originales registrados en las estaciones seleccionadas de la cuenca, lo que valida la efectividad del proceso de corrección de datos.

5.4. Aplicación del Test de Mann-Kendall en la Evaluación de Tendencias Hidrológicas

El análisis de tendencias en las series temporales de caudales se llevó a cabo utilizando el Test de Mann-Kendall, una prueba estadística no paramétrica ampliamente utilizada en estudios hidrológicos para detectar la presencia de tendencias en datos temporales sin asumir una distribución específica.

Este análisis se realizó sobre los registros hidrológicos de las estaciones H718, H720, H721, H722 y H731, ubicadas en la cuenca del río Napo, considerando un período de estudio de 22 años (1991-2013). Se evaluaron tendencias en los caudales medios anuales y mensuales, cuyos resultados se presentan a continuación.

5.4.1. Análisis de Tendencias en Caudales Medios Anuales

Para determinar la existencia de tendencias en los caudales medios anuales, se aplicó el Test de Mann-Kendall a cada estación hidrométrica, considerando un nivel de significancia del 10% ($\alpha = 0.10$). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 21 con el valor del estadístico Z y la clasificación de la tendencia detectada.

Tabla 21. Resultados del Test de Mann-Kendall en Caudales Medios Anuales

| Código | Estación | S Total | Dev. Estándar | Z Estadístico | Pendiente de Sen | Tendencia $\alpha=10\%$ |
|--------|----------------------------|------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------------|
| H718 | QUIJOS EN BAEZA | 49 | 37.864 | 1.268 | 0.131 | TNSC |
| H720 | MISAHUALLI EN COTUNDO | 17 | 37.864 | 0.423 | 0.059 | TNSC |
| H721 | JATUNYACU D.J. ILOCULIN | -17 | 37.864 | -0.423 | -0.508 | TNSD |
| H722 | YANAHURCO D.J. VALLE | 26 | 37.864 | 0.66 | 0.0079 | TNSC |
| H731 | COSANGA AJ QUIJOS | 89 | 37.864 | 2.324 | 0.589 | TSC |

Las categorías de tendencia mostradas en la tabla se interpretan de la siguiente manera:

- **TNSC:** Tendencia No Significativa Creciente.
- **TNSD:** Tendencia No Significativa Decreciente.
- **TSC:** Tendencia Significativa Creciente.

De acuerdo con los resultados del Test de Mann-Kendall, se puede observar que:

Los valores de S muestran la cuantificación de valores positivos para las estaciones H718, H720, H722, H731 lo que sugiere tendencias crecientes, a diferencia de la estación H721 en el cual se ha obtenido un valor negativo mostrando tendencia decreciente.

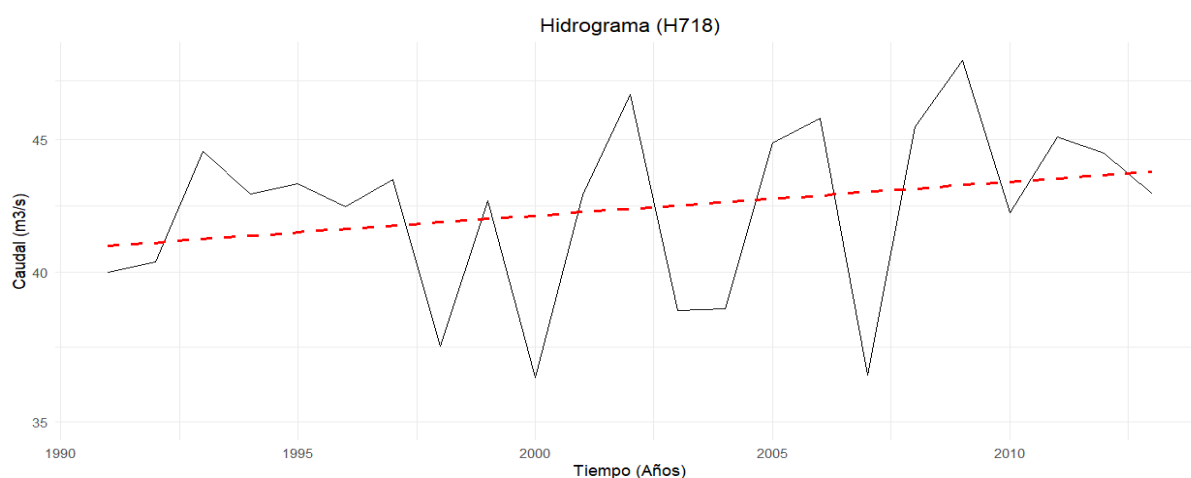


Figura 10. Hidrograma de la estación H718 datos anuales (Quijos en Baeza)

En la Figura 10 se puede visualizar la evolución de los caudales a lo largo del tiempo, la estación Quijos en Baeza detecta una tendencia no significativa creciente (TNSC) con un valor $Z = 1.268$. (Tabla 23). Esta estación presentó una falencia del 77% de datos (Tabla 22), lo que puede afectar la detección de tendencias significativas. Aunque se aplicó la imputación de datos, la cantidad de valores interpolados podría estar dificultando la identificación de una tendencia clara, además el valor de Sen que la variable (caudal) aumenta a una tasa de $0.131 \text{ m}^3/\text{año}$.

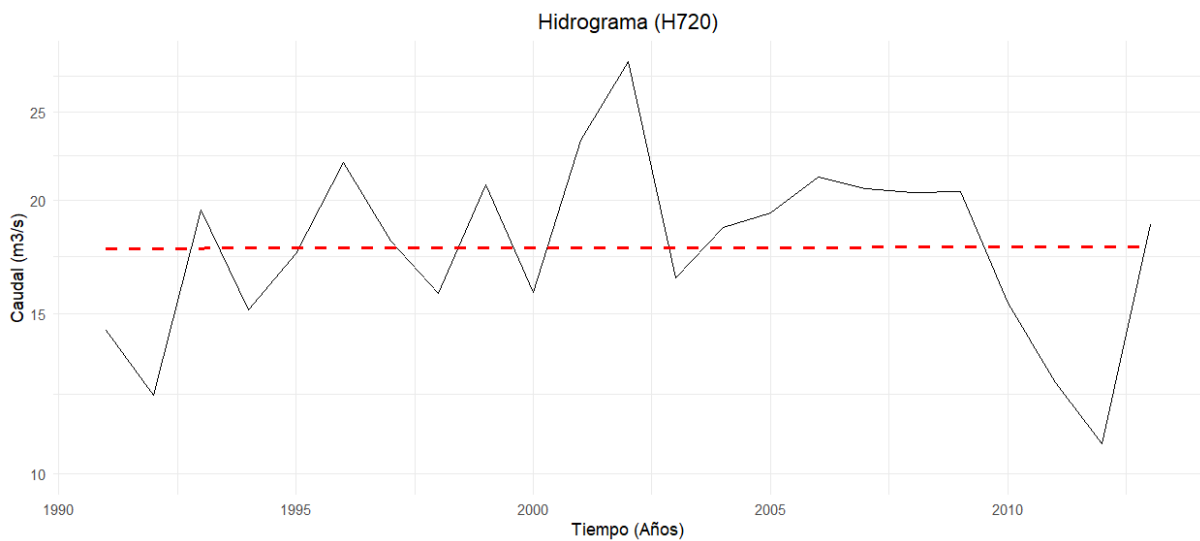


Figura 11. Hidrograma de la estación H720 datos anuales (Misahuallí en Cotundo)

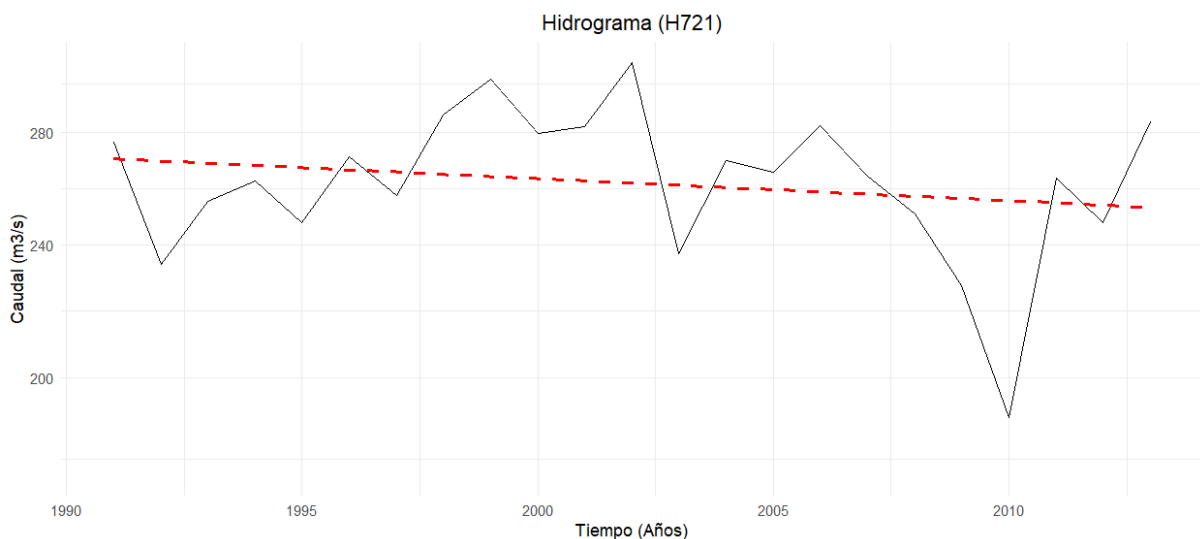


Figura 12. Hidrograma de la estación H721 datos anuales (Jatunyacu D.J. Iloculín)

En las figuras 11 y 12 también se muestra la evolución de los caudales, es este caso las estaciones Misahuallí en Cotundo (H720) y Jatunyacu D.J. Iloculín (H721) presentan

tendencias TNSC y TNSD, respectivamente. La estación H720 tuvo un 16% de datos faltantes, mientras que H721 presentó un 45%, lo que sugiere que la interpolación mediante PMM (Predictive Mean Matching) no ha alterado la variabilidad de los datos originales generando tendencias artificiales, Sin embargo, el caudal aumenta con una tasa de 0.059 m³/año en el punto de la estación H720, en cuanto a la estación H721 se ha registrado una disminución fuerte del afluente con una tasa de -0.508 m³/año, lo que sugiere una rápida disminución y posibles consecuencias en el sector.

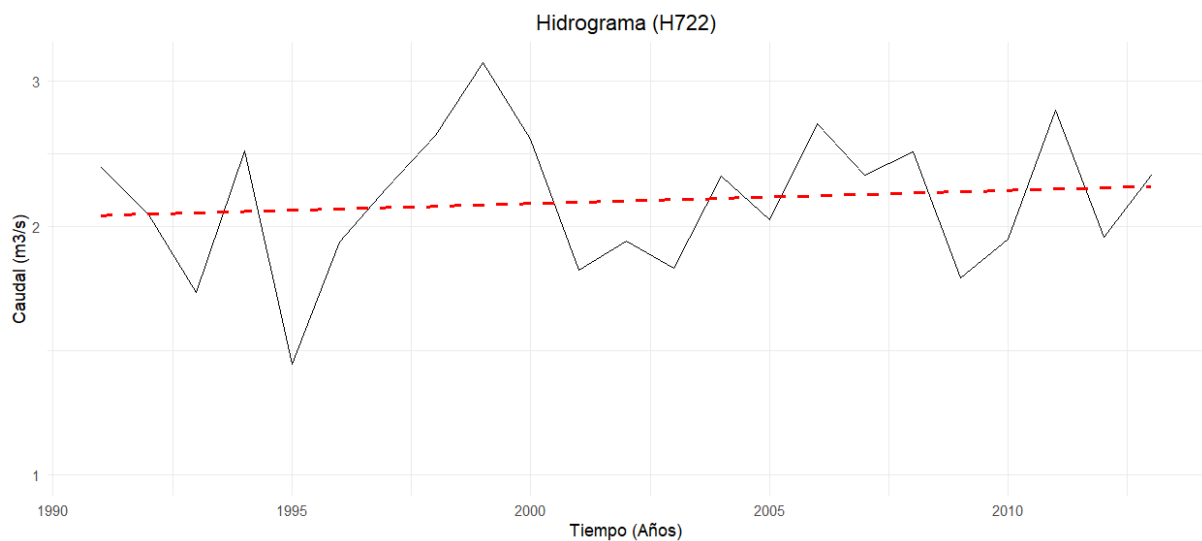


Figura 13. Hidrograma de la estación H722 datos anuales (Yanahurco D.J. Valle)

En el caso de la estación H722 (Yanahurco D.J. Valle) con el 1% de datos faltantes, presentó una tendencia no significativa creciente (TNSC), lo que significa que al aplicar el método de imputación no altera la estructura de la serie temporal ya que existe una baja falencia de datos, validando la precisión de este método al mostrar una tendencia no significativa en los datos registrados, se puede observar también que el incremento del caudal es muy leve; con un valor de 0.0079 m³/año.

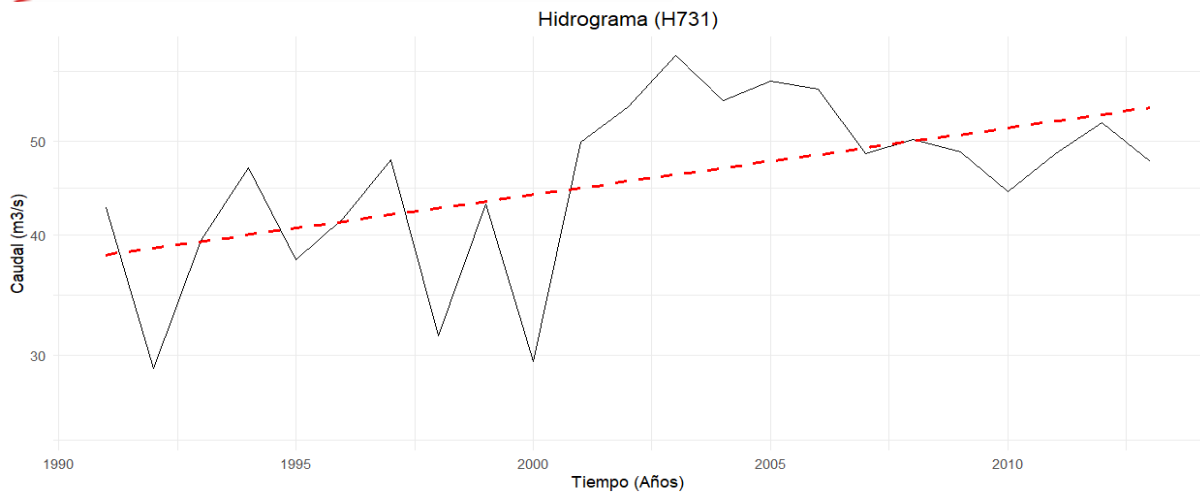


Figura 14. Hidrograma de la estación H731 datos anuales (Cosanga A.J. Quijos)

El resultado de la estación H731 es particularmente llamativo, ya que está ubicada a menos de 10 km de la estación H718 (Quijos en Baeza), la cual no muestra una tendencia significativa. Esto plantea una posible incertidumbre en los resultados, ya que ambas estaciones comparten un contexto hidrológico y climático similar, por otro lado, la pendiente con un valor de $0.589 \text{ m}^3/\text{año}$, en H731 sugiere un incremento rápido y mayor entre todas las estaciones analizadas en este proceso.

En este caso, la calidad de los datos parece ser un factor clave, ya que la estación H718 tenía un 77% de datos faltantes, lo que podría haber afectado la detección de tendencias reales en la región. Para corroborar estos hallazgos, se procederá con un análisis complementario en caudales medios mensuales.

5.4.2. Análisis de Tendencias en Caudales Medios Mensuales mediante el Test de Mann-Kendall

El análisis de tendencias en caudales medios mensuales se lo realizó con el fin de evaluar patrones de variabilidad a una escala temporal más detallada. Para ello, se aplicó el Test de Mann-Kendall a los registros hidrométricos de las estaciones ya mencionadas anteriormente, abarcando el mismo período (1991 y 2013).

Este análisis permitió identificar tendencias significativas o no significativas en los caudales a lo largo del tiempo, además, del incremento de la variable en el periodo lo que resulta clave para comprender los efectos de variaciones climáticas y eventos hidrológicos sobre el comportamiento de los ríos en la cuenca del río Napo.

A continuación, se presentan los resultados del test estadístico en caudales medios mensuales, junto con sus respectivas interpretaciones. En la Tabla 22, se muestran los valores del estadístico Z obtenidos para cada estación hidrométrica, junto con la clasificación de la tendencia detectada al nivel de significancia del 10% ($\alpha = 0.10$).

Tabla 22. Resultados del Test de Mann-Kendall en Caudales Medios Mensuales

| Código | Estación | S | Dev. | Z | Pendiente | Tendencia |
|--------|----------------------------|-------|----------|-------------|-----------|---------------|
| | | Total | Estándar | Estadístico | de Sen | $\alpha=10\%$ |
| H718 | QUIJOS EN BAEZA | 2195 | 1532.541 | 1.432 | 0.011 | TNSC |
| H720 | MISAHUALLI EN COTUNDO | 1170 | 1532.541 | 0.763 | 0.0041 | TNSC |
| H721 | JATUNYACU D.J. ILOCULIN | -1876 | 1532.541 | -1.223 | -0.0711 | TNSD |
| H722 | YANAHURCO D.J. VALLE | 2869 | 1532.541 | 1.871 | 0.0013 | TSC |
| H731 | COSANGA AJ QUIJOS | 5906 | 1532.541 | 3.853 | 0.0547 | TSC |

Las categorías de tendencia en la tabla se interpretan de la siguiente manera:

- **TNSC:** Tendencia No Significativa Creciente.
- **TNSD:** Tendencia No Significativa Decreciente.
- **TSC:** Tendencia Significativa Creciente.

Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de las estaciones presentan tendencias no significativas, con excepción de H722 (Yanahurco D.J. Valle) y H731 (Cosanga A.J. Quijos), las cuales registraron tendencias crecientes significativas (TSC).

A continuación, en las Figuras 17-21, se presentan los hidrogramas de las estaciones analizadas, que permiten visualizar la evolución temporal de los caudales y contrastar los resultados obtenidos en el análisis estadístico.

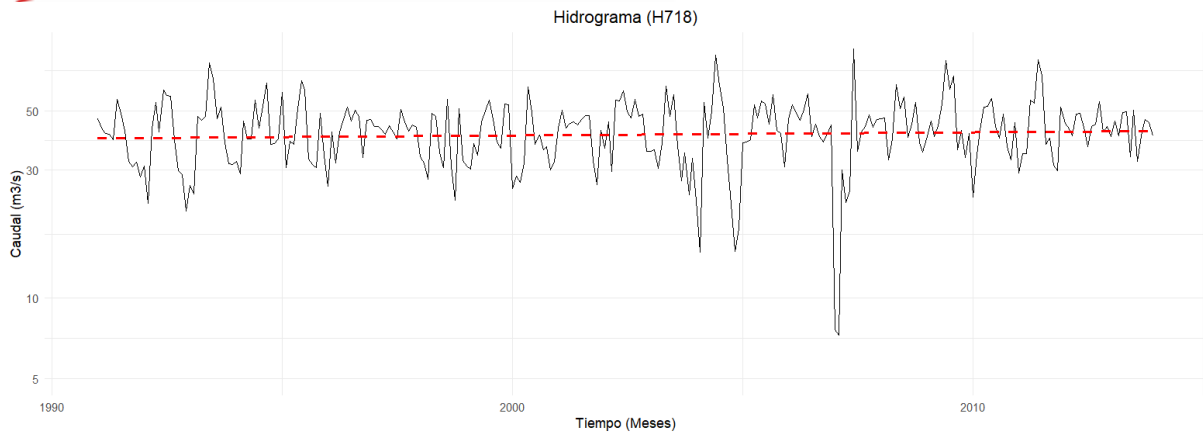


Figura 15. Hidrograma de la estación H718 datos mensuales (Quijos en Baeza)

En la estación H718 se observa una tendencia creciente no significativa (TNSC) con $Z = 1.432$ (Tabla 22), aunque la tendencia no es estadísticamente relevante, podría estar influenciada por cambios en los patrones de precipitación y variaciones en el uso del suelo. Sin embargo, la alta falencia de datos (77% de registros imputados) introduce incertidumbre en la interpretación de estos resultados, también se logra observar el incremento del caudal es poco significativo ($0.011\text{m}^3/\text{mes}$).

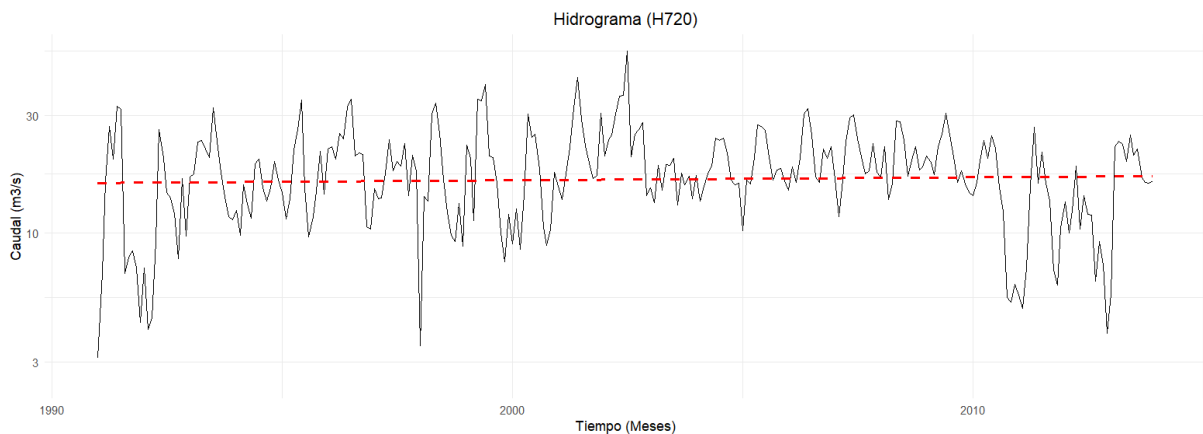


Figura 16. Hidrograma de la estación H720 datos mensuales (Misahuallí en Cotundo)

Las observaciones ayudan que en los resultados obtenidos la estación H720 presenta una tendencia no significativa creciente (TNSC) con $Z = 0.763$. La ligera tendencia ascendente podría estar relacionada con cambios locales en la cobertura vegetal y actividades humanas en la cuenca, aunque la falta de significancia estadística indica que los caudales medios mensuales

no han experimentado una variación drástica en el período analizado, además el incremento del caudal por cada mes ($0.0041\text{m}^3/\text{mes}$) es aún más leve que de la estación H718.

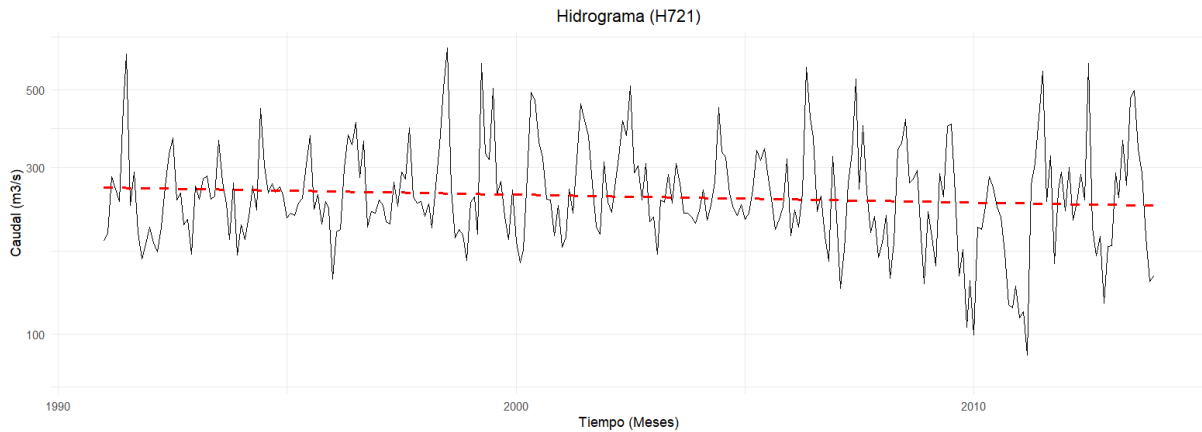


Figura 17. Hidrograma de la estación H721 datos mensuales (Jatunyacu D.J. Iloculín).

Para la estación H721 se detecta una tendencia decreciente no significativa (TNSD) con $Z = -1.223$, además el valor de Sen también sugiere que hay una disminución aproximada de $-0.0711\text{ m}^3/\text{mes}$, este comportamiento podría estar asociado con cambios en la morfología del río debido a procesos de erosión y sedimentación, así como con la variabilidad climática natural de la cuenca. Aunque la tendencia no es significativa, es importante realizar un monitoreo continuo, ya que una reducción sostenida en los caudales podría impactar los ecosistemas acuáticos y las poblaciones que dependen de este recurso aledañas al punto de muestreo de los datos.

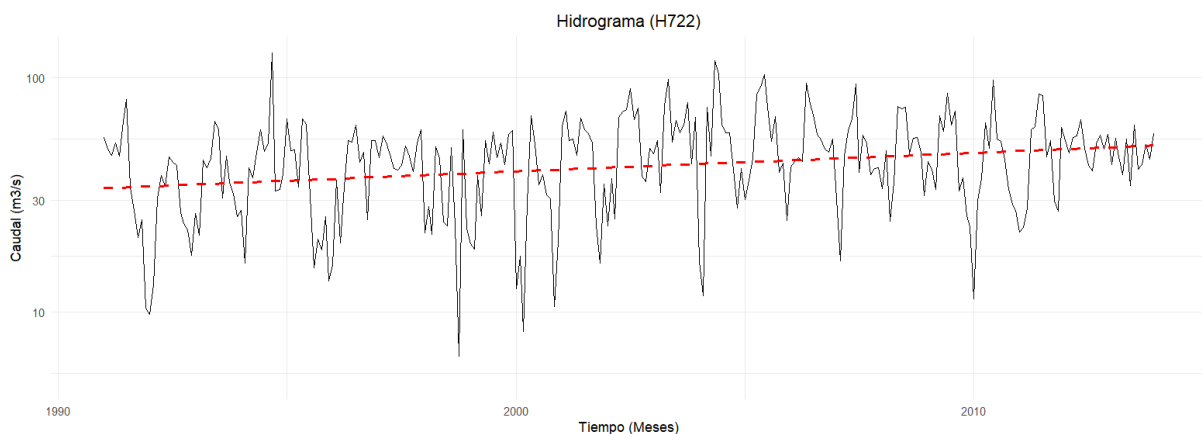


Figura 18. Hidrograma de la estación H721 datos mensuales (Jatunyacu D.J. Iloculín).

En cambio, en la estación H722 se observa una tendencia creciente significativa (TSC) con un $Z = 1.871$, este incremento en los caudales medios mensuales podría estar asociado a un aumento en las precipitaciones en la zona del río Saquilama, afluente del río Jatunyacu. Además, esta estación se encuentra en las faldas del volcán Cotopaxi, por lo que un posible deshielo en los glaciares de la región debido al incremento de la temperatura global podría estar contribuyendo al aumento ($0.0013\text{m}^3/\text{mes}$) del caudal en esta zona.

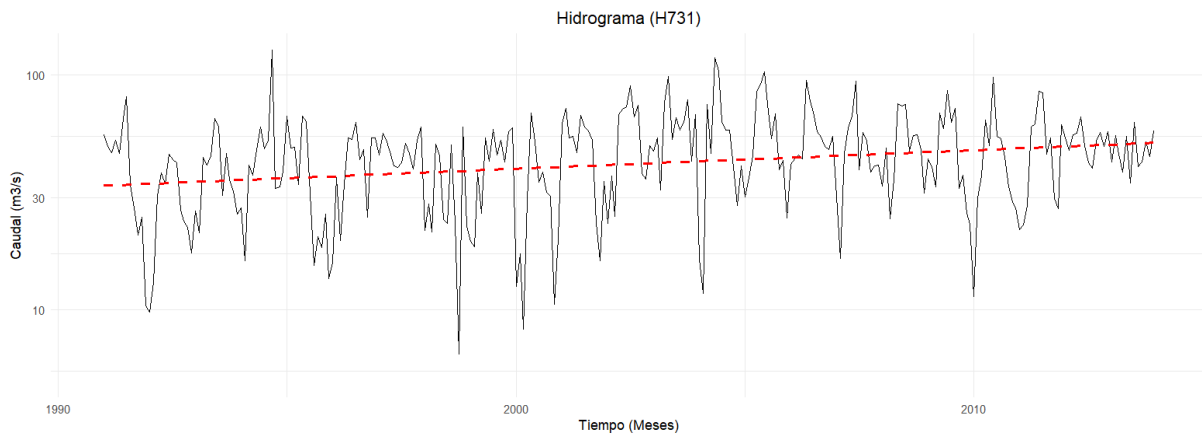


Figura 19. Hidrograma de la estación H731 datos mensuales (Cosanga A.J. Quijos)

Y finalmente en la estación H731 se registra una tendencia creciente significativa (TSC) con $Z = 3.853$, indicando un aumento estadísticamente relevante en los caudales medios mensuales. Este comportamiento podría estar influenciado por el cambio climático, que ha intensificado las precipitaciones en la región, o por factores antropogénicos como la deforestación, urbanización que altera los procesos de escorrentía en la cuenca.

El resultado obtenido en H731 es particularmente relevante, ya que contrasta con la estación H718 (Quijos en Baeza), ubicada a solo 5 km de distancia. Esta diferencia podría estar relacionada con variaciones locales en la hidrología de la cuenca, diferencias en la calidad de los datos, o impactos ambientales y humanos que afectan de manera diferenciada cada subcuenca, si comparamos el incremento mensual de los caudales H731 tiene un mayor incremento con un valor de $0.0547\text{m}^3/\text{mes}$.

En cuanto a la diferencia de datos faltantes entre las dos estaciones (H718 y H731), genera poca credibilidad por el lado de la estación H718, si bien el caudal aumenta, pero no tiene significancia, entonces el método de imputación no es eficiente, por el motivo de que de acuerdo a los ciclos hidrológicos existen temporadas secas y lluviosas, y en las estaciones con alta calidad de datos se evidencia, por ejemplo en la estación H722, Figura 8, existe un patrón que

diferencia una disminución y aumento del caudal posiblemente por cada año. Si bien el método PMM considera valores reales registrados, no puede predecir de forma concreta datos correctos, que tenga la consistencia del patrón que se ha registrado en estaciones con mejor calidad de datos.

5.5. Discusión de resultados

Considerando que la mayor limitación de este estudio fue los datos faltantes de las estaciones, aunque en un principio fueron las mejores estaciones por la cantidad disponible de datos en sus registros, esto conlleva a la búsqueda de métodos de imputación para complementar los datos faltantes. Sin embargo, los análisis indican que la mayoría de las estaciones tienen tendencias no significativas como se observa en las tablas 24 y 23. Según Londoño Toma, afirma que los métodos de imputación para la serie de tiempos de datos en caudales debe ser adecuado a las necesidades y características de los datos naturales registrados, además afirma que para series de datos con patrones más complejos, los métodos como Splines o MissForest podrían ser los más apropiados, dando a entender que para la selección de un método de imputación se debe considerar un equilibrio entre la distribución natural de la serie de datos, precisión, predicción y la capacidad de ajustar el método de acuerdo a las características y/o necesidades de datos faltantes [52].

La aplicación del test Mann Kendall permitió identificar tendencias en caudales medios como se muestra en las (Tablas 21 y 22), estos análisis identificaron tendencias no significativas, así como significativas, siendo el 80% de las estaciones los que demostraban tendencias crecientes, entre ellas el 60% indicando tendencia no significativa creciente en caudales medios anuales, el 20% mostrando tendencia significativa creciente, y finalmente el 20% afirma tendencia no significativa decreciente. Estos resultados coinciden con las afirmaciones de Posada-Gil & Poveda, quienes con la aplicación del mismo método de análisis de tendencias encontraron tendencias crecientes en los ríos Blanco y Negro, que se unen antes de llegar al río Amazonas [12].

Posada-Gil & Poveda identificaron tendencia en caudales mensuales en 48% del total de series abarcadas, determinaron estas tendencias en la estación Obidos ubicado sobre el río Amazonas, y otras estaciones pertenecientes a la región, además afirman que esta tendencia tiene un origen físico relacionada con el área de la cuenca, también sugieren que es necesario investigar tal hallazgo estadístico, donde no descartan actividades antrópicas y efectos del cambio climático en la cuenca amazónica [12]. Así mismo nuestros resultados mostrados en las (Tablas 21-22)

en caudales medios mensuales, muestran tendencias significativas en dos estaciones H722 y H731, apoyando las conclusiones de Posada-Gil & Poveda, este hallazgo estadístico es importante ya que sugiere incrementos en el caudal del río Napo lo que podría provocar crecidas extremas aguas abajo desde la ubicación de las estaciones, además el incremento en caudales medios anuales es de 0.589 m³/año, siendo el mayor incremento anual encontrado entre las estaciones.

6. CONCLUSIONES

- En definitiva, se puede mencionar que la adecuada organización de datos hidrológicos, nos permitió garantizar la representatividad temporal. Así mismo, podemos decir que la limpieza de datos que se realizó ayudó a tener un análisis preciso de los caudales del río Napo, estableciendo continuidad en las series temporales a través de la imputación de datos faltantes con el método PMM (Predictive Mean Matching). Aun que existieron algunos datos incompletos, estas técnicas aplicadas nos permitieron minimizar la pérdida de información en el análisis realizado.
- Además, se puede decir que una parte fundamental para poder identificar y corregir los valores atípicos fue el preprocesamiento de los datos hidrológicos. Con la ayuda del método de Water Resources Council y la interpolación de datos faltantes se logró mejorar la calidad del análisis, determinando una estacionalidad en los caudales y reflejando algunos patrones de variabilidad hidrológica.
- Finalmente se puede afirmar que en los caudales medios anuales y mensuales un 80% de las estaciones mostraron tendencias crecientes, un 20% mostró tendencias significativas crecientes y también un 20% de las estaciones presentó tendencias decrecientes no significativas. Mismas tendencias que concuerdan con algunos estudios realizados en la Amazonia ecuatoriana, por ende, hemos concluido que la variabilidad climática puede estar afectando a los caudales de la cuenca del río Napo.

7. Bibliografía

- [1] TemasAmbientales, «Cambios en el clima a través de la historia,» Temas Ambientales, 16 enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.temasambientales.com/2023/01/cambios-clima-historia.html>.
- [2] Naciones Unidas, «Cambio Climático,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>.
- [3] E. E. León Baque, «Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente,» 21 Abril 2021. [En línea]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78902021000400024.
- [4] . M. Salvador Tello y C. García Dávila, «Evaluación hidrobiológica en los ríos Cuenca del río Napo,» IIAP, 09 2019. [En línea]. Available: <https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/09/Evaluacion-Hidrobiologica-de-los-rios-Arabela-y-Curaray.pdf>.
- [5] UC, «Informe: modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del río Paute,» Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009. [En línea]. Available: https://cambioglobal.uc.cl/wp-content/uploads/2023/09/Documento_05_-Impactos-del-CC-adaptacin-en-una-cuenca-hidroelctrica-en-Ecuador.pdf.
- [6] Subsecretaría de Cambio Climático, «K006 MAE - Análisis de la vulnerabilidad de centrales hidroeléctricas emblemáticas ante los,» Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 2015. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/CHECC.pdf>.
- [7] G. Muñoz Meléndez, «Capacidad adaptativa ante variabilidad climática en tres comunidades rurales en Sierra De San Pedro Mártir,» Scielo, Febrero 2022. [En línea]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73722021000100119&script=sci_arttext&tlng=es.
- [8] X. E. Zapata Ríos, «ncidencia del cambio climático y de uso del suelo en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Napo,» Universidad Técnica del Norte, 29 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8067>.
- [9] K. M. Alencar da Silva Alves, «Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río moxotó - Pernambuco – Brasil,» Redalyc, 2017. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/4517/451750038021/451750038021.pdf>.
- [10] M. B. Benítez Carranco, «La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como herramienta para contribuir al proceso de adaptación del Cambio Climático en la

- Cuenca Transfronteriza Catamayo-Chira,» Universidad Andina Simón Bolívar, 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6438/1/T2746-MCCNA-Benitez-La%20gestion.pdf>.
- [11] INAMHI, «Proyecto “fortalecimiento e implementación de la red básica de estaciones meteorológicas e hidrológicas de la república del Ecuador”,» INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA, 2013. [En línea]. Available: <https://www.inamhi.gob.ec/wp-content/uploads/2013/04/FORTALECIMIENTO-RED-BASICA-INAMHI.pdf>.
- [12] D. Posada Gil y G. Poveda, «Tendencias de largo plazo en los caudales de la cuenca amazónica y su relación con el área de la cuenca,» Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2015. [En línea].
- [13] M. J. Villacís Erazo, «Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayllabamba bajo el efecto de escenarios de cambio climático,» ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25696/1/CD%2014293.pdf>.
- [14] J. Mejía, «Homogeneización de Datos Hidrometeorológicos con Climatol en la Cuenca del Río Portoviejo,» 31 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/download/2675/html>.
- [15] CISPDR, «Plan hidráulico regional de demarcación hidrográfica Napo,» Changjiang Institute of Survey Planning, Design and Research, 2016. [En línea]. Available: <https://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20DH%20NAPO.pdf>.
- [16] SPA, «Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Amazonía,» Science Panel for the Amazon, 2021. [En línea]. Available: <https://www.lamazoniaquequeremos.org/wp-content/uploads/2023/02/Chapter-26-ES-Bound-Feb-3.pdf>.
- [17] MAATE, «Acuerdo Ministerial Nro. MAATE-2022-096,» Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2022. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/01/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2022-096.pdf>.
- [18] IPCC, «Cambio climático 2021,» Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. [En línea]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf.
- [19] S. Suárez, «Justicia ambiental en el Ecuador: una mirada desde la cuenca del río Napo,» Universidad Hemisferios, 2021. [En línea]. Available: <https://www.uhemisferios.edu.ec/wp-content/uploads/2021/07/justicia-ambiental-rio-napo.pdf>.
- [20] A. Cifuentes Guerrero, «Influencia de la deforestación y el cambio climático en la formación de los “ríos voladores de la Amazonia” y su impacto en la disponibilidad

- hídrica de Bogotá y la región circundante,» Revista Colombia Amazónica, 2022. [En línea]. Available:
https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/13/Revista_Amazonia_13.pdf.
- [21] Ministerio del Ambiente, «El cambio climático afecta los recursos hídricos,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gov.ec/el-cambio-climatico-afecta-los-recursos-hidricos/#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20tiene%20una,lagos%2C%20humedales%20y%20ecosistemas%20costeros..>
- [22] UNESCO World Water Assessment Programme, «Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos,» 9 Junio 2020. [En línea]. Available:
https://www.google.com.ec/books/edition/Informe_Mundial_de_las_Naciones_Unidas_/vD3qDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=0.
- [23] R. Fuster Gómez, «Cambio climático y recursos hídricos,» Universidad de Chile, 03 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187549>.
- [24] J. Boé, «Cycle hydrologique et changements climatiques sur la France,» Dialnet, 2009. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3055692>.
- [25] Aguas Amazónicas, «NAPO,» 07 07 2022. [En línea]. Available:
<https://aguasamazonicas.org/cuencas/cuencas-principales/napo>.
- [26] A. Sol Flores, «Climate Change and Management of Freshwater for Human Consumption. Legal Status of the Provinces of Buenos Aires and Córdoba, Argentina,» 2024. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9653827.pdf>.
- [27] A. Varela, «Geografía y Clima del Ecuador,» 04 Octubre 2022. [En línea]. Available:
<https://bioweb.bio/fungiweb/GeografiaClima/>.
- [28] O. Sánchez, «Las competencias constitucionales ambientales del Gobierno Autónomo Provincial Naturaleza,» Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador, 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9372/1/T4117-MCCSD-Sanchez-El%20cambio.pdf>.
- [29] Instituto de Meteorología, «Mapa de excurrimiento,» INAMHI, 2015. [En línea]. Available:
https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DEL_MIRA.pdf.
- [30] MA, «Informe detallado,» Ministerio del Ambiente, 28 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gov.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/03/0.-UDAF-FASE-1-Informe-Preliminar.pdf>.
- [31] Y. C. Recalde Aza , «Incidencia del cambio climático y de uso del suelo en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Napo,» Universidad Técnica del Norte,

2018. [En línea]. Available:
<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8067/1/PG%20621%20TESIS.pdf>.
- [32] J. J. Odoñez Gálvez, «¿Qué es una cuenca Hidrológica?,» Sociedad Geográfica de Lima, 2011. [En línea]. Available: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf.
- [33] J. Bordino, «Cuencas hidrográficas: qué son, tipos e importancia,» Revista ecología verde, 8 Julio 2024. [En línea]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/cuencas-hidrograficas-que-son-tipos-e-importancia-3334.html>.
- [34] P. Pourrut, «Los regímenes hidrológicos ecuatorianos,» 2019. [En línea]. Available: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010014831.pdf.
- [35] P. Sarango, «Estudio del balance hídrico superficial de ls cuencas hidrográficas. Sector Jadán y Zhidmad en el área de interpretación con el bosque y vegetación protectora aguarongo,» Universidad Politécnica Saleciana, 2017. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14595/1/UPS-CT007172.pdf>.
- [36] M. Vásconez, «Cuencas Hidrográficas,» Universidad Politécnica Saleciana, Julio 2019. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>.
- [37] S. Gavilán, «Modelado del balance hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico,» Repositorio UNPL, 2019. [En línea]. Available: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/74374>.
- [38] J. Miró, «Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del segura y del Júcar,» Universidad de Alicante, 2009. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3235669.pdf>.
- [39] J. E. Andrades Grassi, «Análisis espacio temporal de la homogeneidad de estaciones de precipitación en una zona árida y semiárida del Centro Occidente de Venezuela,» Universidad de los Andes, 14 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567825009/html/>.
- [40] R. Montero Granados , «Modelos de regresión lineal múltiple,» Universidad de Granada. España, 2016. [En línea]. Available: https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf.
- [41] C. Miranda Chinlli , «Modelización de Series Temporales modelos clásicos y SARIMA,» Universidad de Granada, 2021. [En línea]. Available: https://masteres.ugr.es/estadistica-aplicada/sites/master/moea/public/inline-files/TFM_MIRANDA_CHINLLI_CARLOS.pdf.

- [42] K. F. Fuentes Romero, «Distribución de las precipitaciones máximas diarias en la región de los ríos,» Universidad del Bio-Bio, Enero 2016. [En línea]. Available: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2192/1/Fuentes_Romero_Karol_Fernanda.pdf.
- [43] J. E. MARULANDA LÓPEZ , «Consistencia, homogeneidad y validez de información hidrometeorológica en la cuenca alta del río Chicamocha (1987-2016),» 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/42a84958-3f40-489d-a488-f32d4cd790ac/content>.
- [44] C. Matovelle, «Imputation Efficiency of Missing Rainfall Data Using Computational Tools in a River Basin, Jubones-Ecuador,» Revista Politécnica, 2023. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.03>.
- [45] UNIR, «Código abierto, visualización de datos y múltiples herramientas y aplicaciones son las claves que convierten al lenguaje R en uno de los mayores aliados del big data,» La Universidad en Internet, 29 Nov 2019. [En línea]. Available: <https://www.unir.net/revista/ingenieria/lenguaje-r-big-data/>.
- [46] F. Boris, «Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural,» USAID, 2022. [En línea]. Available: <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/08/Guia-de-Modelacion-Hidrologica-2022.pdf>.
- [47] P. Roura, «TrendSoft: Software to analyze turning points and tendencies on climate variables,» Scielo, 01 Septiembre 2020. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802020000300003.
- [48] Microsoft, «Usar las Herramientas para análisis para realizar análisis de datos complejos,» Soporte Técnico, 2024. [En línea]. Available: <https://support.microsoft.com/es-es/office/usar-las-herramientas-para-an%C3%A1lisis-para-realizar-an%C3%A1lisis-de-datos-complejos-6c67ccf0-f4a9-487c-8dec-bdb5a2cefab6>.
- [49] C. Santos, «Física del caos en la predicción meteorológica,» Agencia Estatal de Meteorología, Junio 2018. [En línea]. Available: https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo_BAJAresolucion.pdf.
- [50] A. Yerovi, «Imputación de datos,» Rpubs, 5 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://rpubs.com/AdrianYerovi/635566>.
- [51] M. Velastegui, «Comparación de técnicas de relleno de datos faltantes de la variable velocidad de viento de los años 2014 al 2021,» Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2023. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/21724/1/226T0160.pdf>.

- [52] T. Londoño García , «Imputación de datos faltantes en caudales de fuentes hídricas del departamento de Antioquia: Un análisis de métodos tradicionales y basados en aprendizaje automático,» Universidad de Antioquia, 2024. [En línea]. Available: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/>.
- [53] B. R. Sigüenza González , «DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS ESPACIOTEMPORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA,» Universidad de San Carlos de Guatemala, Mayo 2023. [En línea]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/18619/1/Brandon%20Ren%C3%A9%20Sig%C3%B9enza%20Gonz%C3%A1lez.pdf>.
- [54] S. Saravia Matus, «Brechas, desafíos y oportunidades en materia de agua y género en América Latina y el Caribe.,» CPEAL, 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5d8e3c04-d7c2-4bba-bcb6-3a0c39778c08/content>.
- [55] D. Posada-Gil, «Consistencia de las tendencias de largo plazo y el balance hídrico en la Amazonia,» Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, 2018. [En línea]. Available: <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/13/2.%20Consistencia%20de%20las%20tendencias%20de%20largo%20plazo%20y%20el%20balance%20h%C3%ADdrico%20en%20la%20Amazonia.pdf>.