UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Dinámica temporal de los datos hidrológicos (Caudal), utilizando el análisis de Fourier y ondeletas (wavelets) en la cuenca del rio Toachi, Provincia de Cotopaxi.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN HIDRÁULICA.

AUTORES:

Cuzco Tocumbe Edwin Javier
Iza Quingatuña Kevin Stiwart

TUTOR:

Ing. Andy Miguel Giler Ormaza Msc.

LATACUNGA - AGOSTO 2024

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DECLARACIÓN DE AUDITORIA

Cuzco Tocumbe Edwin Javier, con cédula de ciudadanía No.050385071-1, Iza Quingatuña Kevin Stiwart, con cédula de ciudadanía No.175295542-5, declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: "DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"**, siendo el Ing. Andy Miguel Giler Ormaza Msc., tutor del presente trabajo; 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 investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad

Latacunga, agosto 16 del 2024

Cuzco Tocumbe Edwin Javier
C.C: 050385071-1

Iza Quingatuña Kevin Stiwart
C.C: 175295542-5

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 **CUZCO TOCUMBE EDWIN JAVIER,** identificado con cédula de ciudadanía No. 050385071-1 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. - EL CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de **INGENIERÍA HIDRÁULICA,** titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI",** 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: Mayo 2020 - Septiembre 2020

Finalización de la carrera: Abril 2024 – Agosto 2024

Aprobación en Consejo Directivo: 22 de agosto del 2024

Tutor: Ing. Andy Miguel Giler Ormaza Msc

Tema:**" DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"**

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 **EL 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 21 días del mes de agosto del 2024.

Cuzco Tocumbe Edwin Javier
EL 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 **IZA QUINGATUÑA KEVIN STIWART**, identificado con cédula de ciudadanía No. 175295542-5 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. - EL CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de **INGENIERÍA HIDRÁULICA**, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"**, 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: Mayo 2020 - Septiembre 2020

Finalización de la carrera: Abril 2024 – Agosto 2024

Aprobación en Consejo Directivo: 22 de agosto del 2024

Tutor: Ing. Andy Miguel Giler Ormaza Msc

Tema:**" DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"**

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 **EL 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 21 días del mes de agosto del 2024.

Iza Quingatuña Kevin Stiwart
EL CEDENTE

Ing. Idalia Pacheco Tigselema Ph.D.
LA CESIONARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de tutor del Proyecto de investigación sobre el título:

"DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI" de **Cuzco Tocumbe Edwin Javier; Iza Quingatuña Kevin Stiwart**, de la carrera de **INGENIERÍA HIDRÁULICA**, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa. .

Latacunga, 16 de Agosto del 2024

Ing. Andy Miguel Giler Ormaza MSc.
C.C: 131282032-5
TUTOR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias Ingeniería y Aplicadas; los postulantes: **Cuzco Tocumbe Edwin Javier; Iza Quingatuña Kevin Stiwart,** con el título del Proyecto de Investigación: **"DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Lector 1 (Presidente)
Nombre: Ing. Rudys Cusme. MSc
CC: 131377089-1

Lector 2
Nombre: Ing. Xiomara Zambrano MSc.
CC: 131305845-3

Lector 3
Nombre: Ing. Jorge Villarroel Msc.
CC: 050294349-1

AGRADECIMIENTO

Primero, agradezco a dios por darme salud y vida a continuación quiero expresar mi más sincero agradecimiento Ing. Andy Giler Msc mi Tutor de tesis, por su orientación, apoyo y paciencia durante todo el proceso. Mi gratitud también se extiende a la universidad técnica de Cotopaxi, por brindarme la oportunidad de cruzar mis estudios superiores. Deseo agradecer a mi compañero de investigación y amigos Kevin Iza, quienes me han brindado su apoyo y colaboración en el proceso de titulación. Finalmente, agradezco a Ing Edwin Casa y la Ing Xiomara Zambrano por su contribución y apoyo a lo largo de la carrera universitaria.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

Edwin Javier Cuzco Tocumbe

AGRADECIMIENTO

Mi eterno agradecimiento va dirigido a dios. También quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Andy Giler Msc mi Tutor de tesis, por su orientación, apoyo y paciencia durante todo el proceso. Mi gratitud también se extiende a la universidad técnica de Cotopaxi, por brindarme la oportunidad de cruzar mis estudios superiores. Deseo agradecer a mi compañero de investigación y amigo Edwin Cuzco, quien me han brindado su apoyo y colaboración en el proceso de titulación. Finalmente, agradezco a Ing Edwin Casa y la Ing Xiomara Zambrano por su contribución y apoyo a lo largo de la carrera universitaria.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

Kevin Stiwart Iza Quingatuña

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Cuzco Pillajo José Fernando y Tocumbe Paucar María Transito, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios. Su fe en mí y sus palabras de aliento han sido una fuente de fortaleza y motivación. A mis hermanos, Tipan Tocumbe Carlos Ruben y Cuzco Tocumbe Myriam Jeaneth, por su paciencia y comprensión a lo largo de este proceso. A mi cuñada Tigasi Blanca. A mis abuelos Tocumbe Salvador y Paucar Maria por su apoyo incondicional. A mis tia Paucar Josefina y a toda mi familia. Gracias por estar siempre a mi lado y por ser mi mayor inspiración.

Edwin Javier Cuzco Tocumbe

DEDICATORIA

Dedico esta titulación a mis padres, Blanca Quingatuña y Carlos Iza, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios. Su fe en mí y sus palabras de aliento han sido una fuente de fortaleza y motivación. A mis hermanos, Joselyn Iza y Bryan Iza, por sus enseñanzas, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este proceso de estudio. A mi tía y segunda madre por sus consejos y compreción. Gracias por estar siempre a mi lado y por ser mi mayor inspiración.

Kevin Stiwart Iza Quingatuña

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: "DINÁMICA TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS (CAUDAL), UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER Y ONDELETAS (WAVELETS) EN LA CUENCA DEL RIO TOACHI, PROVINCIA DE COTOPAXI"

Autores:

Cuzco Tocumbe Edwin Javier
Iza Quingatuña Kevin Stiwart

RESUMEN

La región se encuentra bajo constante amenaza por los fenómenos climatológicos del Niño y la Niña, afectando la disponibilidad de agua, provocando lluvias intensas, inundaciones y daños a la infraestructura agrícola y a las viviendas, el objetivo del estudio es determinar las frecuencias de los eventos hidrológicos (caudal), utilizando el método de Fourier y ondeletas para el entendimiento de la dinámica fluvial. Para el presente proyecto de investigación se recopiló la información de datos hidrológicos (caudal) de la plataforma del INAMHI para el periodo (1991-2013). Se realizó la transformada discreta de Fourier la cual transforma del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia identificar con mayor precisión las frecuencias dominantes de las señales para las estaciones H166, H167 y H188. Se encontró bastante similitud exactamente en dos picos. El primer pico y más pronunciado inicia en la frecuencia de 11 hasta 11.5(Eventos/12años) y el segundo pico inicia en la frecuencia de 22.6 hasta 23.0(Eventos/12 años) aproximadamente, cuanto más alto sea el pico, más fuerte es la componente de frecuencia. Por otro lado, el análisis de ondeletas permite identificar las frecuencias dominantes de los datos de series de tiempo siendo representados por medio del espectro de potencia los resultados más representativos fueron la curva de significancia para el periodo 1 año indicando 1 (evento/año) que significa regreso anual de las lluvias y los altos caudales y el periodo de 0.5 años o medio año indicando 2 (eventos/año) representando la existió de estacionalidad lluvias fuentes y temporadas secas. La combinación de ambos métodos proporciona una visión más completa de la evolución temporal de eventos climáticos y su relación con las frecuencias observadas en los datos de la estación hidrológica en la cuenca del rio Toachi.

Palabras clave: Eventos hidrológicos, frecuencia, transformada de Fourier (FDT), ondeletas (wavelets).

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: "TEMPORAL DYNAMICS OF HYDROLOGICAL (FLOW) DATA, USING FOURIER AND WAVELETS ANALYSIS IN THE TOACHI RIVER BASIN, COTOPAXI PROVINCE".

Authors:

Cuzco Tocumbe Edwin Javier
Iza Quingatuña Kevin Stiwar

ABSTRACT

The region is under constant threat from El Niño and La Niña weather phenomena, affecting water availability, causing heavy rains, flooding and damage to agricultural infrastructure and housing. The objective of the study is to determine the frequencies of hydrological events (flow), using the Fourier and wavelets method to understand river dynamics. For the present research project, hydrological data (flow) information was collected from the INAMHI platform for the period (1991-2013). The discrete Fourier transform was performed, which transforms from the time domain to the frequency domain to identify more precisely the dominant frequencies of the signals for stations H166, H167 and H188. A good similarity was found in exactly two peaks. The first and most pronounced peak starts at the frequency from 11 to 11.5(Events/12years) and the second peak starts at the frequency from 22.6 to 23.0(Events/12years) approximately, the higher the peak, the stronger the frequency component. On the other hand, the wavelets analysis allows identifying the dominant frequencies of the time series data being represented by means of the power spectrum, the most representative results were the significance curve for the 1-year period indicating 1 (event/year) which means annual return of rains and high flows and the 0.5 year or half year period indicating 2 (events/year) representing the existence of seasonal rainfall sources and dry seasons. The combination of both methods provides a more complete view of the temporal evolution of climatic events and their relationship with the frequencies observed in the hydrological station data in the Toachi river basin.

Keywords: Hydrological events, frequency, Fourier transform (FDT), wavelets.

TABLA DE CONTENIDO

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

2. INTRODUCCIÓN 2

2.1 Situación problemática 3

2.2 Formulación del problema 3

2.3 Objeto y campo de acción 4

2.3.1 Objetivo de investigación 4

2.3.2 Campo de acción 4

2.4 beneficiarios 4

2.5 Justificación 4

2.6 Hipótesis 5

2.7 Objetivos 5

2.7.1 General 5

2.7.2 Específicos 5

2.7.3 Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados 5

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 7

3.1 Antecedentes 7

3.2 Marco referencial 10

3.2.1 Precipitación 10

3.2.2 Temperatura 10

3.2.3 Humedad 10

3.2.4 Viento 11

3.2.5 Evaporación y Transpiración 11

3.2.6 Estaciones hidrológicas 11

3.2.7 Nivel 13
3.2.8 Caudal 13
3.2.9 Variabilidad climática 13
3.2.10 Fenómenos causados por la variabilidad climática 13
3.2.11 Dinámica temporal 14
3.2.12 Cuenca hidrográfica 14
3.2.13 Uso de herramientas SIG 16
3.2.14 Software QGIS 16
3.2.15 Estaciones hidrometeorológicas 17
3.2.16 Estimación de datos faltantes 18
3.2.17 Métodos para el relleno de datos 18
3.2.18 Software RStudio 20
3.2.19 Transformadas de Fourier y ondeletas (Wavelets) 21
3.2.20 Ondeletas (Wavelets) 23
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS 25
4.1 Variables 25
4.1.1 Variables independientes 25
4.1.2 Variables dependientes 25
4.2 Esquema metodológico 26
4.3 Descripción del área de estudio 26
4.3.1 Características de la cuenca 27
4.4 Ubicación geográfica 28
4.4.1 Limitaciones del Río Toachi 28
4.5 Estaciones hidrológicas 29

4.6 Esquema del análisis de la dinámica temporal en la cuenca del rio Toachi. 30
4.7 Recopilación de datos 30
4.8 Relleno de Datos (Caudales) 33
4.9 Método curva de descarga (Utiliza para el relleno de datos) 34
4.9.1 Ejemplo de aplicación de la estación H167 34
4.9.2 Aplicación de la curva de gasto o caudal 35
4.10 Método norm.predict (Utiliza para el relleno de datos) 38
4.10.1 Método de norm.predict (Linear regression, predicted values) 39
4.11 Transformada discreta de Fourier programación (RStudio). 40
4.12 Ondeletas (wavelets) programación (RStudio). 41
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 43
5.1 Relleno de datos 43
5.2 Transformada discreta de Fourier 45
5.2.1 H166 Toachi en las pampas 45
5.2.2 H167 Toachi en S.A. de los Colorados 47
5.2.3 H188 Pilatón Chitoa (ESPIRIE) 49
5.3 Ondeletas (wavelets) 50
5.3.1 H166 Toachi en las Pampas 50
5.3.2 H167 Toachi en S.A. de los Colorados 51
5.3.3 188 Pilatón Chitoa (Espirie) 52
5.4 Comparación de análisis de la transformada discreta de Fourier y Ondeletas (wavelets). 53
6. DISCUSIÓN 54
7. CONCLUSIONES DEL PROYECTO 55
7.1 Conclusiones 55

7.2 Recomendaciones 56

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 57

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Beneficiarios directos e indirectos de la cuenca del rio Toachi 4

Tabla 2: Sistema de tarea en relación con los objetivos 5

Tabla 3: Ecuaciones de periodo y frecuencia 22

Tabla 4: Características de la cuenca Toachi. 27

Tabla 5: Representación de las estaciones hidrológicas de la cuenca del río Toachi. 29

Tabla 6: Estaciones Hidrológicas. 31

Tabla 7: Datos obtenidos de las estaciones hidrológicas (Caudal y nivel) del año 2001 (Excel). 32

Tabla 8: Datos incompletos de la estación H167 34

Tabla 9: Datos incompletos de la estación H167 35

Tabla 10: Datos referenciales faltantes de la estación H167 (Excel) 36

Tabla 11: Estaciones hidrológicas (Rio Toachi). 38

Tabla 12: Datos referenciales faltantes de la estación H167 (Excel) 43

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1 Transformada discreta de Fourier 22

Ecuación 3.2 Periodo y frecuencia 22

Ecuación 4.1 Curva de descarga (Excel) 37

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1: Limnímetro [33] 12

Figura 2: Sensor digital [33] 12

Figura 3:Clasificación de la cuenca hidrográfica de acuerdo con su área [43]. 15

Figura 4:Clasificación de la cuenca hidrográfica de acuerdo con su altitud [43]. 16

Figura 5: Estructura jerárquica de cuenca hidrográfica [48]. 17

Figura 6: Curva de descarga (Caudal) [52]. 19

Figura 7: Esquema de la transformada de Fourier [57]. 21

Figura 8: Periodograma de frecuencia [61]. 23

Figura 9: Esquema metodológico de la dinámica temporal del río Toachi (Software Diagram). 26

Figura 10: Delimitación de la cuenca hidrográfica Toachi (Software Qgis). 27

Figura 11: Ubicación geográfica de la cuenca Toachi (Software Qgis). 28

Figura 12: Representación de las estaciones hidrológicas (Software Qgis). 29

Figura 13: Esquema metodológico de procedimiento del análisis de la dinámica temporal (Software Diagram). 30

Figura 14: Curva de Gasto o caudal (Excel). 37

Figura 15: Esquema metodológico de relleno de datos (Software Diagram). 38

Figura 16: Esquema metodológico de relleno de datos (Software Diagram). 39

Figura 17: Esquema metodológico TDF (Software Diagram). 40

Figura 18: Espectro de Frecuencia (RStudio)..... 41
Figura 19: Esquema metodológico Wavelets (Software Diagram). 41
Figura 20: Espectrograma de Potencia, H166 (RStudio). 42
Figura 21: Relleno de datos de caudal (Excel). 44
Figura 22: Espectro de frecuencia (1/12 años), H166 (RStudio). 45
Figura 23: Espectro de frecuencia (DFT) (Eventos/12 años), H166 (RStudio). 46
Figura 24: Espectro de frecuencia (DFT) (Eventos/12 años), H166 (RStudio). 46
Figura 25: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167(RStudio)..... 47
Figura 26: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167 (RStudio)..... 48
Figura 27: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167 (RStudio)..... 48
Figura 28: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H188 (RStudio)..... 49
Figura 29 : Espectrograma de potencia de wavelet, H166 (RStudio). 50
Figura 30 : Espectrograma de potencia de wavelet, H167 (RStudio). 51
Figura 31 : Espectrograma de potencia de wavelet, H188 (RStudio). 52

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:

"Dinámica temporal de los datos hidrológicos (Caudal), utilizando ondeletas (Wavelets) en la cuenca del rio Toachi, provincia de Cotopaxi"

Modalidad de Titulación:

Propuesta Tecnológica ☐

Proyecto de Investigación ☒

Carrera: Ingeniería Hidráulica

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Cuzco Tocumbe Edwin Javier

Iza Quingatuña Kevin Stiwart

Tutor: Ing. Andy Miguel Giler Ormaza MSc.

Área de Conocimiento:

Ingeniería, industria y construcción.

Línea de investigación:

Meteorología, Hidrología, Mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Gestión y manejo sostenible y/o sustentable de recurso hídricos.

Lugar de ejecución:

Provincia: Cotopaxi

Cantón : Pujilí, Sigchos y Santo Domingo

2. INTRODUCCIÓN

Los ríos son sistemas altamente complejos y dinámicos que trabajan como sistemas lineales y estructurados para trasladar sedimentos y fluidos vitales por las cuencas hidrográficas. En su recorrido, llevan a cabo complejas reacciones dinámicas, energéticas y bioquímicas, desempeñando un papel crucial en el sustento de la vida a lo largo de su trayectoria [1].La cuenca del rio Toachi, localizada en la provincia de Cotopaxi, es una zona de gran importancia hidrológico y económica. Sin embargo, esta región se encuentra bajo constantes amenazas por fenómenos climatológicas debido a la variabilidad ecológica y eventos extremos como el fenómeno del Niño y la Niña, afectando la disponibilidad de agua [2], que pueden resultar en pérdidas económicas significativas para la región [3].

El fenómeno del Niño, ocurre de manera irregular, típicamente cada cuatro a seis años [4],estos fenómenos se manifiestan por el calentamiento anormal de las aguas del Pacífico, alterando patrones climáticos globales. En cambio, el fenómeno de la Niña, que es la fase opuesta del fenómeno del niño, se manifiesta con el enfriamiento de las aguas del Pacífico [5].

Para abordar la gestión eficiente de los recursos hídricos en la cuenca, es crucial evaluar con precisión la calidad de los datos hidrológicos disponibles. En algunos estudios tales como (Almeida, 2010), Se aplica el método estadístico para lograr el relleno de datos [6]. En este estudio, se utilizó varias metodologías, seleccionando dos en respuesta al mejor relleno de datos visualizado en el histograma de relleno. El primer método aplicado es la técnica de curva de descarga, que representa la relación entre el caudal del río y el nivel de agua. El segundo método es linear regression, predicted values (norm.predict), utilizando el software RStudio, el cual tiene la capacidad de manipular grandes cantidades de datos, pero requiere una cuidadosa consideración y ajustes para lograr el relleno de datos no disponibles.

El objetivo del estudio es determinar las frecuencias de los eventos hidrológicos (caudal), utilizando el método de Fourier y ondeletas para el entendimiento de la dinámica fluvial. La aplicación de la transformada de Fourier permite la descomposición de series temporales en componentes de frecuencias y es útil para identificar ciclos y periodos [7]. Por otro lado, la técnica de ondeletas (wavelets), permiten una evaluación más detallada de la variabilidad a diferentes escalas temporales [8], pero la técnica presenta varios desafíos tanto teóricos y prácticos que se requiere un enfoque cuidadoso en la zona de estudio. Esta técnica permite el análisis de las altas

frecuencias de los eventos hidrológicos que afectan los caudales de río. Por ello se recomienda la implementación de las técnicas indicadas son bastante útiles para identificar los cambios bruscos de caudales en regiones donde los fenómenos climáticos, como el niño y la niña se presentan. Permitiendo una mejor comprensión y predicción de los eventos, facilitando la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la mitigación de desastres en la región [9].

2.1 Situación problemática

El uso creciente del recurso hídrico para satisfacer las diferentes demandas de un sistema, muchas veces por encima de su disponibilidad hídrica, ha generado una reducción en el nivel de satisfacción de dichas demandas, así como una reducción en los caudales medioambientales necesarios para alcanzar el buen estado ecológico [10]. A lo largo del tiempo el cambio climático posee efectos tanto directos como indirectos en el medio ambiente, esto se debe a regímenes de precipitaciones y temperaturas cambiantes e impredecibles, una mayor incidencia de fenómenos meteorológicos extremos y catastróficos [11]. Sin embargo, los datos hidrometereológicos se han convertido en un valioso recurso, pero en muchos países no existe registros suficientes y en caso de haberlos, muchas veces no son fiables. Esta carencia limita la capacidad de estudios en las proyecciones y la definición de estrategias que permitan adaptarse frente a la variabilidad de los elementos climáticos [12]. Por lo tanto, los fenómenos hidro climáticos en el ecosistema actualmente se encuentra complejos y varían significativamente en el tiempo, ya que se encuentran influenciados por factores climáticos y antropogénicos.

No obstante, en la cuenca del rio Toachi, provincia de Cotopaxi, los fenómenos hidrometeorológicos son determinantes para la gestión de recursos hídricos y planificación territorial, ya que la falta de datos afecta el estudio e investigación científica del cambio climático, dificultando la comprensión de fenómenos atmosféricos. Es por ello, que la aplicación de la técnica de la transformada discreta de Fourier en los datos hidrológicos (Caudal), en un periodo de estudio de 23 años permitirá la identificación de los patrones y tendencias a diferentes escalas temporales, proporcionando una visión más detallada y precisa de las dinámicas del caudal de la cuenca hidrográfica.

2.2 Formulación del problema

¿Cómo afecta la carencia de la información de datos de caudal de las estaciones hidrológicas a la población local y al entorno natural?

2.3 Objeto y campo de acción

2.3.1 Objetivo de investigación

Recopilación de datos hidrológicos (Caudal) y la aplicación de análisis de Fourier y ondeletas (wavelets)

2.3.2 Campo de acción

- 2508.99 Otras (Caudal)

2.4 beneficiarios

Los beneficiarios del proyecto de investigación es la población aledaña a la microcuenca del rio Toachi, Provincia de Cotopaxi. En la **Tabla** se especifica los beneficiarios directos e indirectos de la zona de estudiada.

Tabla 1: Beneficiarios directos e indirectos de la cuenca del rio Toachi

Directos	**Indirectos**
Población aledaña a la cuenca del rio Toachi	Gobierno y Políticas Púbicas
Administradores de Recursos hídricos.	Empresa del servicio Público
Comunidad Científica	Sector Turístico

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

2.5 Justificación

Los ríos son sistemas altamente complejos y dinámicos que trabajan como sistemas lineales y estructurados, para trasladar sedimentos y fluidos vitales por las cuencas hidrográficas. En su recorrido llevan a cabo complejas reacciones dinámicas, energéticas y bioquímicas desempeñando un papel crucial en el sustento de la vida a lo largo de su trayectoria[13].

Dado que, en la cuenca del rio Toachi enfrenta complejas dinámicas hidro climáticas influenciadas por factores climáticos globales. La técnica de la transformada de Fourier permite el análisis de datos hidrológicos (Caudal) entre el periodo de 1991 hasta 2013, esta técnica permite descomponer las series temporales en componentes de frecuencia y tiempo en diferentes escalas temporales.

Sin embargo, la aplicación de la transformada de Fourier en la cuenca del rio Toachi proporcionara una visión más detallada y precisa de las dinámicas del caudal y a su vez de los parámetros hidrológicos (Caudal). Por ende, esta investigación fortalecerá la capacidad de comprensión de la

dinámica temporal de la cuenca hidrográfica frente a distintos eventos extremos desarrollados en la zona de estudio, generando la compresión de los fenómenos atmosféricos en la región, a su vez contribuirá al desarrollo de modelos predictivos y a la implementación de estrategias de gestión de recursos hídricos más efectivas.

2.6 Hipótesis

La aplicación de ondeletas en el análisis de datos hidrológicos (Caudal) en la cuenca del río Toachi permitirá identificar patrones temporales y caracterizar la variabilidad de eventos a diferentes escalas temporales con mayor precisión.

2.7 Objetivos

2.7.1 General

Determinar las frecuencias de los eventos hidrológicos (Caudal) en la cuenca del río Toachi, utilizando método de Fourier y ondeletas (Wavelets) para el entendimiento de la dinámica fluvial.

2.7.2 Específicos

- Recopilar datos hidrológicos en particular de caudal para su depuración, corrección y relleno.
- Realizar la transformada discreta de Fourier (DFT) para analizar las principales frecuencias de eventos hidrológicos (Caudal).
- Realizar un análisis por el método de ondeletas (wavelets) para la comparación con los resultados del análisis de Fourier y la determinación de la localización en el tiempo de los eventos en conjunto con las frecuencias.

2.7.3 Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

Tabla 2: Sistema de tarea en relación con los objetivos

Objetivos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Recopilar datos hidrológicos en	• Recopilación de datos de caudal.	• Obtención de datos de caudal.	**Técnica:**

particular de caudal para su depuración, corrección y relleno.			Recopilación de información. **Instrumento:** Página oficial del Inamhi
Realizar la transformada discreta de Fourier (DFT) para analizar las principales frecuencias de eventos hidrológicos (Caudal).	• Transformación de los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.	• Identificación de eventos hidrológicos (Caudal). • Comprensión de las frecuencias de los eventos a lo largo del tiempo.	**Técnica:** Observación **Instrumento:** Software Excel Software Rstudios
Realizar un análisis por el método de ondeletas (wavelets) para la comparación con los resultados del análisis de Fourier y la determinación de la localización en el tiempo de los eventos en conjunto con las frecuencias.	• Comparación de resultados obtenidos, en base a los métodos de ondeletas (wavelets) y Fourier.	• Análisis de resultados de la investigación.	**Técnica:** Redacción de resultados **Instrumento:** Métodos de ondeletas (wavelets) y Fourier,

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Antecedentes

Los datos hidrometereológicos contribuyen en el desarrollo de la gestión de los recursos hídricos, los mismos que se enfocan en las mediciones de variables para el análisis de información en los patrones climáticos con el fin de lograr la compresión en el cambio hidrológico.

En ese sentido,[14] elaboro una investigación de Consistencia, homogeneidad y validez de información hidrometeorológica en la cuenca alta del río Chicamocha (1987-2017), con el objetivo de analizar la consistencia, homogeneidad y validez de la información meteorológica (precipitación y temperatura) e hidrológica de la Cuenca Alta del Rio Chicamocha para el período de tiempo comprendido entre 1987 y 2016. De este modo, la metodología fue de tipo descriptivo, puesto que comprende, interpreta y analízalos aspectos relacionados a información hidrometereológica, haciendo uso de métodos estadísticos. Entre los resultados que obtuvo se evaluó la homogeneidad de las series de datos mediante el empleo de análisis gráfico, cálculos estadísticos básicos y pruebas confirmatorias no paramétricas, lo cual las series obtenidas constituyen una herramienta útil para la formulación de planes de gestión de riesgo, proyectos de investigación, planes de ordenamiento territorial y otros proyectos para los municipios de la zona de estudio. En efecto, el trabajo realizado de información hidrometereológica constituye un punto de partida en la orientación de la elaboración de la investigación.

Por su parte, [15] realizan una investigación acerca del análisis de tendencia de temperatura y precipitación para el departamento Caltas (Colombia), mediante wavelets. El objetivo de este trabajo fue generar información de tendencias de las variables de temperatura y precipitación mediante la técnica de análisis de wavelets. A su vez, la metodología aplicada fue de enfoque cuantitativo a través de la selección de estaciones Ideam con periodos de 1971 – 2010 en precipitación, en cuanto la temperatura periodos de 1981 – 2010, desarrollando datos mensuales para el cálculo a través de la aplicación de análisis multirresolución (MRA), seleccionando la técnica Wavelets Daubechies (DB5). Entre los resultados que obtuvo se evidenció variaciones en el análisis de datos de precipitación, en el cual las tendencias son lentas crecientes en las 15 estaciones analizadas, en cuanto a los datos de temperatura mínima son lentas crecientes, mientras que en la temperatura máxima las tendencias son lentas decrecientes. Por lo tanto, este trabajo contribuye al desarrollo de la presente investigación por la importancia de la aplicación de técnicas

basadas en wavelets para el análisis de la variabilidad de tendencia en los datos temperatura y precipitación.

Así mismo, [16] realizo un trabajo sobre el nivel hídrico y precipitaciones del lago Titicaca en relación con las variables de macro escala del océano pacifico, cuyo objetivo fue analizar el nivel hídrico (1914 - 2016) y las precipitaciones (1981-2016) en el lago Titicaca para la determinación de patrones de variabilidad interanual, decenal y multidecenal. El diseño de la investigación fue cuantitativo basadas en análisis estadísticos aplicados a la técnica de ondeletas (Wavelets). Así se concluyó, que los patrones de variabilidad (data) fueron correlacionadas a través del Índice de Oscilación del Sur (IOS), la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP) y el Índice Multivariado ENSO (EMI), determinándose que la evolución tiempo-frecuencia de los datos de nivel hídrico del lago y la precipitación muestran asociación de fase alternada entre los patrones. Es decir, que los aportes referidos a los estudios de análisis de recursos hídricos contribuyen a la aplicación de métodos estratégicos para realizar la investigación.

Del mismo modo, [17] elaboro una investigación de predicción de caudales medios mensuales en ríos colombianos usando métodos no lineales: MARS ("Multivariate Adaptive Regression Splines"), Redes Neuronales (ANN), Regresión Lineal Múltiple (RLM) y PREBEO ("Predicción en Bandas Espectrales usando Onditas"), con el objetivo de evaluar diferentes métodos no lineales de predicción de caudales mensuales de 6 ríos importantes en la generación de energía eléctrica en Colombia. De este modo, la metodología empleada fue la transformada de onditas (Wavelets), puesto que descompone las señales en distintas bandas frecuenciales características de la variabilidad temporal de la hidro climatología de Colombia. Entre los resultados que obtuvo evidenció el desempeño de los modelos mediante medidas del error de pronóstico en el horizonte de validación (independiente del horizonte de calibración), lo cual indican ganancias muy importantes en la capacidad predictiva en comparación con métodos de predicción tradicionales del tipo lineal. Por lo tanto, este trabajo contribuye al desarrollo de la presente investigación por la importancia de la aplicación de métodos diferentes para el análisis de caudales en cuencas empleadas para la generación de energía eléctrica.

De igual forma, [18] plasmaron una investigación sobre la evaluación de métodos estadísticos y matemáticos para estimar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita , Pichincha,

Ecuador, proponiéndose como objetivo comparar varios métodos estadísticos y matemáticos para la generación de datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita. A su vez, la metodología aplicada fue cuantitativa con enfoques de métodos Paulhus y Kohler, la regresión lineal múltiple (RLM), la transformada de Wavelet y las redes neuronales artificiales, a través del uso de información de la red hidrometeorológica del Fondo para la Protección del Agua (FONAG) de Quito. Los resultados muestran que, las redes neuronales artificiales fueron altamente efectivas para generar datos pluviométricos en la zona de estudio, con coeficientes de determinación ($R2$) superiores a 0.64; y raíces del error cuadrático medio menores (RMSE) a 3.4. Además, la regresión lineal múltiple presentó buenas correlaciones entre los datos reales y los datos generados. Sin embargo, el método de Paulhus y Kohler, junto con la transformada de Wavelet, demostraron ser menos eficaces, mostrando una correlación deficiente y altos errores en los datos simulados. Estos hallazgos subrayan la importancia de elegir cuidadosamente los métodos de estimación de datos pluviométricos en zonas de páramo para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados en la gestión de recursos hídricos.

Por su parte, [19] realizo la comprensión de la dinámica de la serie de descargas del río ecuatoriano utilizando Análisis Wavelet y filtros de paso de banda, planteándose como objetivo proponer dos alternativas para una descripción útil de los patrones temporales de caudal en las tierras bajas ecuatorianas. Así mismo, el proceso de la investigación se llevó a cabo mediante patrones climáticos a pequeña escala y temporalmente durante períodos más largos, apoyado en coeficientes wavelets debido a fluctuaciones climáticas de períodos más prolongados. Entre los resultados obtenidos, demuestran que durante el período 2005-2012, la frecuencia de 2 años sugirió una diferencia mayor entre los picos más altos durante la temporada de lluvias (generalmente de diciembre a abril) y los valles más bajos del período seco (resto del año). En efecto, el trabajo realizado de implementación de wavelets constituye el análisis de brechas en diferentes Subcuenca que comparten características similares, lo cual desarrollan un punto de partida para la elaboración de la investigación.

Según, [20] ejecuto una investigación acerca de la simulación y pronóstico de caudales diarios del río Amazonas (Tamshiyacu) a través del modelo híbrido Wavelet redes neuronales, cuyo objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo de pronóstico de series de tiempo hidrológicos con la finalidad de cuantificar descargas futuras a corto plazo en los principales ríos de la Amazonía

peruana. La metodología aplicada fue, un modelo híbrido wavelet-red neuronal (WNN) mediante la combinación de dos técnicas, la transformada wavelet y redes neuronales artificiales (ANN) para para la predicción de caudales. El trabajo concluye que, las ANN han mostrado gran habilidad en modelamiento y pronóstico de series de tiempo no estacionario y no lineal, y la transformada wavelet provee descomposición útil sobre varios niveles de resolución, dado que en términos de raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R2) mostraron la eficacia y la mejora significativa del modelo híbrido WNN en comparación con la otra técnica de ANN estándar. Por lo tanto, la aplicación y comparación de métodos permiten establecer la estimación de estudio lo que conlleva a emplear el método más adaptable para realizar la investigación.

3.2 Marco referencial

3.2.1 Precipitación

La precipitación es el resultado de un conjunto de procesos naturales que actúan a escala global, regional o local sujeta a fluctuaciones temporales en cada una de esas escalas [21] .

Es decir, la precipitación se la deduce de todas las formas de agua que descienden de la atmósfera a la superficie de la Tierra, para el cual la medición del parámetro se realiza en milímetros (mm) a través de la implementación de pluviómetros.

3.2.2 Temperatura

Es una propiedad asociada a la energía interna de las moléculas de una sustancia [22]. Donde está íntimamente relacionado con el estado de equilibrio térmico entre dos sistemas. Así, dos sistemas en equilibrio térmico tienen la misma temperatura[23].

3.2.3 Humedad

Es la denominación que se utiliza en meteorología para designar la medida o cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera en un volumen de aire determinado. Esta cantidad de vapor de agua es muy variable, tanto a nivel local como temporal. Su valor depende esencialmente de la temperatura del aire [24].

3.2.4 Viento

Es el movimiento del aire en la superficie terrestre. Se produce por los gradientes de presión atmosférica originados por diferentes calentamientos en las superficies y por efecto de las fuerzas de fricción, de la gravedad y de Coriolis (fuerzas debida a la rotación terrestre) [25].

Según, [26] define que el viento como muchos fenómenos terrestres está relacionado a sus movimientos planetarios: rotación y traslación.

3.2.5 Evaporación y Transpiración

3.2.5.1 Evaporación

La evaporación es el paso continuo de una sustancia del estado líquido al de vapor, se efectúa en la superficie del líquido y ocurre a cualquier temperatura hasta que se satura de vapor el espacio inmediato al líquido[27]. El proceso de evaporación en un sistema abierto depende del tamaño de la superficie expuesta, del tipo de sustancia y del porcentaje de vapor en los alrededores [28].

A su vez, [29] determina que la evaporación es un proceso regido por el equilibrio líquido-vapor que permite concentrar una solución compuesta de un soluto no volátil y un disolvente volátil.

3.2.5.2 Transpiración

La transpiración es un proceso fisiológico que constituye un término importante del balance de energía del follaje y una medida significativa del rendimiento de un cultivo, donde utiliza casi toda el agua absorbida por las plantas [30].

3.2.5.3 Evapotranspiración

Es la suma de la evaporación y la transpiración, en el cual representa la pérdida total de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera [31].

3.2.6 Estaciones hidrológicas

Es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables Hidrológicas, como precipitación, evaporación, transpiración, evapotranspiración, escorrentía, caudal, humedad del suelo, entre otros [32].

3.2.6.1 Tipo de estaciones Hidrológicas

Actualmente, las estaciones hidrológicas se clasifican en:

Estaciones convencionales atendidas diariamente por observadores capacitados para realizar las lecturas de las reglas limnimétricas [33].

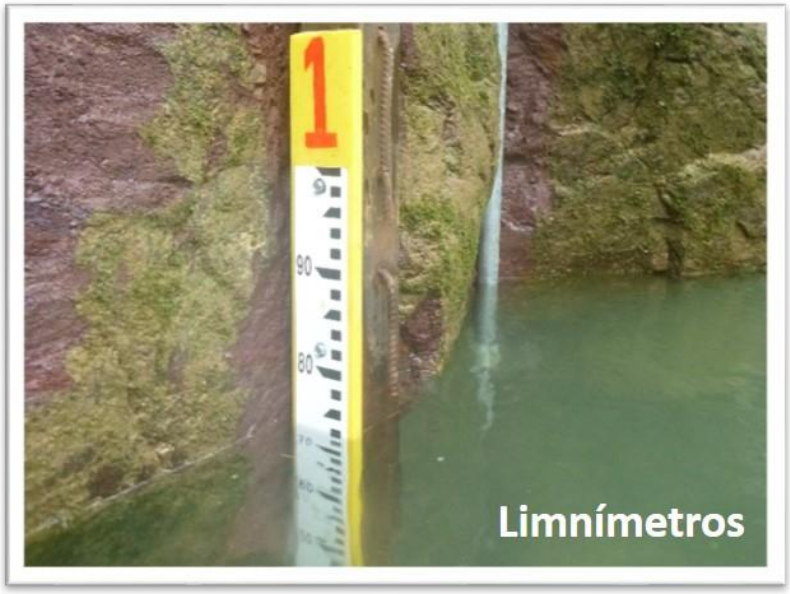

Figura 1: Limnímetro [33].

Estaciones automáticas almacenan los datos obtenidos mediante sensores digitales y requieren la búsqueda de información en sitio.

Figura 2: Sensor digital [33].

3.2.7 Nivel

Generalmente el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología desde el año 1972, utilizó métodos convencionales para medir los niveles de agua en ríos y otros cuerpos de agua [34], con el método convencional, se toma la medida de nivel desde la orilla del rio utilizando el instrumento limnímetro (**Ver figura 1**), pero a partir del año 1990 comenzaron a utilizar tecnologías modernas como los sensores automáticos hasta la actualidad, el sensor automático se encuentra ubicada en el centro del río para la obtención de datos de nivel (**Ver figura 2**).

3.2.8 Caudal

Se conoce como caudal, a la cantidad de fluido que circula a través de una sección de un ducto, ya sea tubería, cañería, oleoducto, río, canal, por unidad de tiempo [35]. Generalmente, el caudal se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo específica [36].

3.2.9 Variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a fluctuaciones en la temperatura, precipitación, patrones de vientos y otras variables climáticas en escalas de tiempo que van de años a millones de años. Las causas de la variabilidad climática se consideran naturales debido a factores internos del sistema climático; sin embargo, puede ser alterada debido a actividades humanas, como el uso de combustibles fósiles o la deforestación [37].

3.2.10 Fenómenos causados por la variabilidad climática

3.2.10.1 El fenómeno El Niño

Es un evento climático mundial que produce el calentamiento de las aguas del mar y provoca fuertes inundaciones, así como sequía en distintos países del mundo. Su presencia y sus impactos han sido estudiado por décadas, tanto en lo que corresponde a los aspectos eminentemente climáticos, así como sus repercusiones económicas y sociales [38].

3.2.10.2 El fenómeno El Niña

En contraposición La Niña, se produce por la intensificación de los vientos alisios, provocando mayor acumulación de masas de agua cálida en Oceanía y Asia, resultando en lluvias más intensas y tormentas; mientras que en Sudamérica, por la corriente de Hum-boldt, predominará un clima frío, causando sequías [39].

3.2.10.3 Consecuencias de los fenómenos climáticos

Las consecuencias ocasionadas por fenómenos climáticos generan interrupción en las actividades económicas, costos de recuperación, impacto en la salud pública y el bienestar de las comunidades y a su vez desarrollando daños profundos en la flora y fauna [39].

3.2.11 Dinámica temporal

La dinámica temporal de los recursos hídricos se refiere a cómo varían los niveles de agua, el caudal de ríos y la disponibilidad de agua a lo largo del tiempo debido a factores estacionales, climáticos y humanos [40].

3.2.11.1 Dinámica temporal de los datos Hidrológicos (Caudal)

La dinámica temporal de los datos de caudal se analiza mediante el uso de herramientas avanzadas, las cuales permiten descomponer las series temporales en diferentes escalas de tiempo, revelando patrones de variabilidad a distintas frecuencias [41].

3.2.12 Cuenca hidrográfica

Para, [42] define que la cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, que dispone de una salida simple para que todo el caudal efluente sea descargado.

3.2.12.1 Clasificación de las cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar por diferentes criterios. Los principales criterios son por área y por altitud [43].

Figura 3:Clasificación de la cuenca hidrográfica de acuerdo con su área [43].

En función de la dinámica hidrológica se pueden reconocer tres zonas funcionales distintas al interior de una cuenca por su altitud.

- **La zona de captación, de cabecera o cuenca alta**: Son áreas aledañas a la divisoria de aguas o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. En esta zona se forman los primeros escurrimientos (arroyos) luego que los suelos han absorbido y retenido toda el agua según su capacidad.
- **La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media:** Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales confluyen aportando diferentes caudales cuyas concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica diferirán en función de las actividades que se realizan en cada subcuenca; es un área de transporte y erosión.

- **La zona de descarga, de emisión o cuenca baja:** Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. Se caracteriza por ser una zona de importantes ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros además de muy productiva para el uso agrícola y donde se acumulan los impactos de toda la cuenca [44].

Figura 4:Clasificación de la cuenca hidrográfica de acuerdo con su altitud [43].

3.2.12.2 Variabilidad temporal en la cuenca hidrográfica

Se refiere a los cambios y fluctuaciones en características hidrológicas y climáticas de la cuenca a largo plazo. Estos cambios pueden ocurrir en diferentes escalas temporales, desde horas, días, años hasta décadas. Es decir, la variabilidad temporal afecta diversos aspectos de la cuenca, incluyendo caudales de los ríos, niveles de agua subterránea, precipitación, evapotranspiración y temperatura [45].

3.2.13 Uso de herramientas SIG

Los SIG son sistemas de información compuestos por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación. A su vez, los sistemas de información geográfica ofrecen un entorno capaz de analizar la información espacial, editar datos, mapas, presentar los resultados de todas estas operaciones y obtener información geográficamente referenciada [46].

3.2.14 Software QGIS

Es el software que se utiliza para construir un sistema de información geográfico (SIG), consta de un conjunto de aplicaciones con las cuales se pueden crear datos, mapas, modelos, aplicaciones y consultar datos geoespaciales, los datos geoespaciales se refieren a información geográfica de una entidad [47].

3.2.14.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de una cuenca hidrográfica parte de la identificación del parteaguas a partir de las curvas de nivel o mapa de altitudes del territorio. Al interior de cada subcuenca se ubican las microcuencas, cuyos límites pueden incluir o no límites administrativos, como los de un ejido o un municipio. Esta delimitación múltiple expresa el carácter jerárquico y anidado de las cuencas [44].

A continuación, se representa la estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica a tres escalas diferentes **(Ver figura 5).**

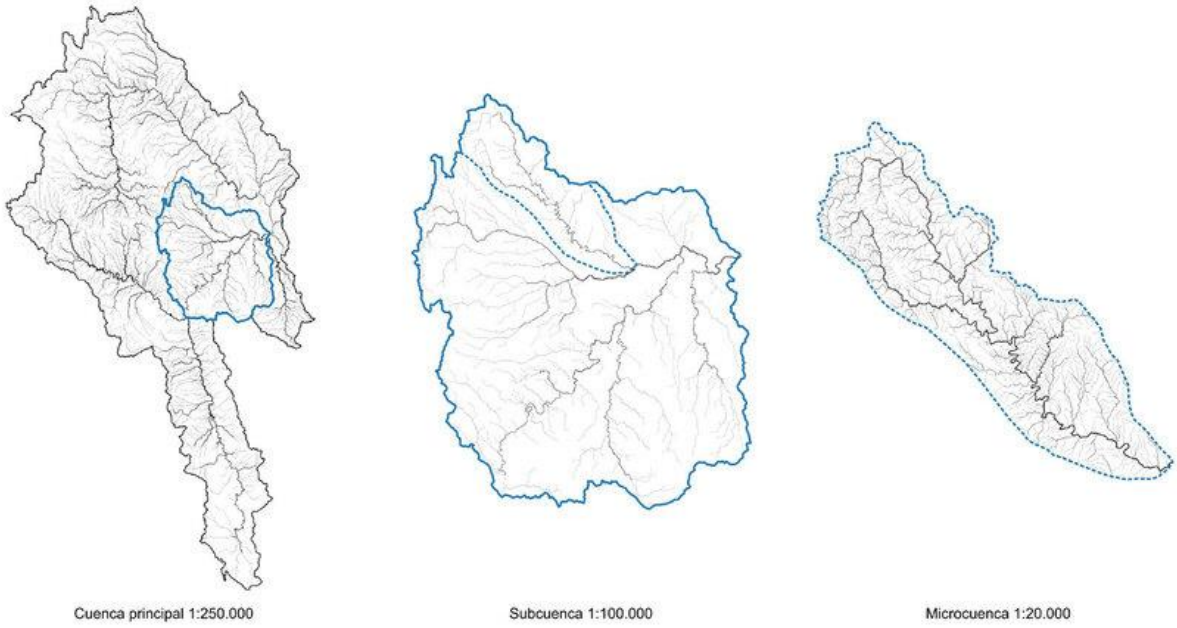

Figura 5: Estructura jerárquica de cuenca hidrográfica [48].

Cuenca: Sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas.

Subcuencas: Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.

Microcuencas: Una microcuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias microcuencas [49].

3.2.15 Estaciones hidrometeorológicas

Son instalaciones equipadas con instrumentos para la realización del análisis sinóptico, alertas sobre la ocurrencia de fenómenos severos, pronósticos hidrológicos (Caudal) y agrometeorológicos, así como para investigación en ciencias de la atmósfera. Por todos estos usos

es que las estaciones cumplen cierta representatividad en función del producto o información que se quiere obtener con los fines de la misma [50].

3.2.16 Estimación de datos faltantes

En un sentido amplio, el termino datos faltantes significa que falta algún tipo de información sobre los fenómenos en los que se está interesado. Existen situaciones inherentes que pueden afectar la calidad de los datos o registros de las variables de estudio, tal es el caso de la información de tipo climático, específicamente, las series históricas de precipitación, construidas a partir de las mediciones realizadas en distintas estaciones meteorológicas, las cuales pueden verse afectadas por el cambio de lugar o movimiento de instrumentos, el cambio del espacio físico del entorno donde se encuentra la estación, o no registrar el dato en el momento adecuado, lo que conlleva a la inconsistencia o ausencia de datos [51].

3.2.17 Métodos para el relleno de datos

A continuación, se describe los métodos utilizados para el relleno de datos faltantes:

3.2.17.1 Método de curva de descarga

Una curva de descarga, también conocida como curva de gasto o curva altura-gasto, es un elemento esencial en hidrometría que representa la relación entre el caudal de agua que fluye en un río o canal y la altura del agua en un punto de control específico. En otras palabras, muestra cuánta agua pasa por un punto determinado en función de la profundidad o altura del agua en ese punto. La construcción de estas curvas implica la recopilación de datos hidrométricos a lo largo del tiempo, que incluyen mediciones de caudal en diferentes niveles de flujo [52].

La gráfica de la curva de descarga se la representa por medio del plano cartesiano, siendo representados en eje (x) los niveles y en el eje (y) los caudales.

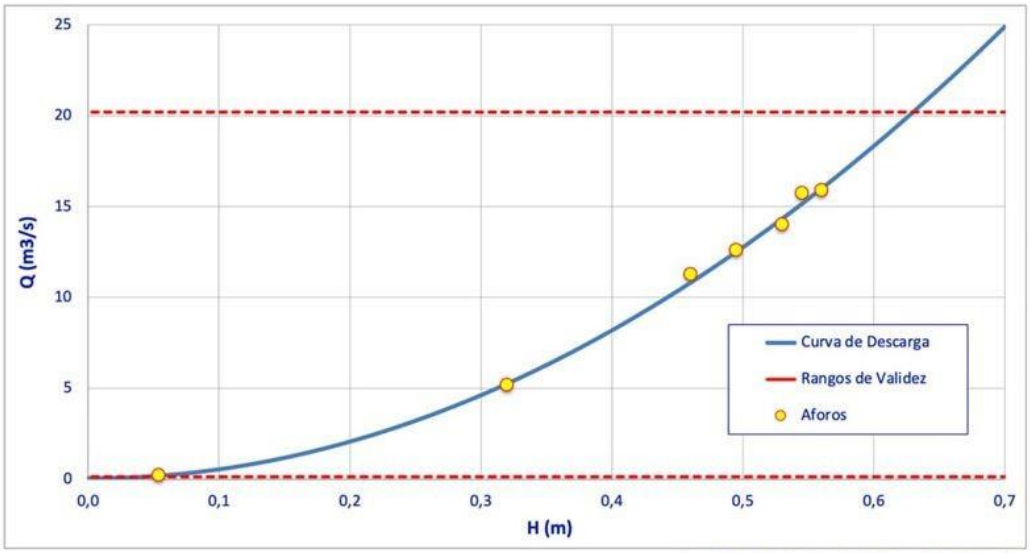

Figura 6: Curva de descarga (Caudal) [52].

3.2.17.2 Ventajas del método de curvas de descarga (Caudal)

El método de la curva de descarga posee un papel fundamental en la hidrología debido a su capacidad de proporcionar estimaciones confiables de caudal en diferentes condiciones hidrológicas, su aplicación y capacidad de adaptación de acuerdo a condiciones cambiantes hacen que el método sea de fácil estudio, por ende, se presentan las siguientes ventajas:

- **Precisión en la Estimación del Caudal**: La curva de descarga establece una relación empírica entre el nivel del agua y el caudal en una sección específica de un río, arroyo u otra corriente de agua. Esta relación permite estimar el caudal en cualquier momento dado basándose únicamente en la medición del nivel del agua.
- **Simplicidad de Aplicación**: Una vez que se ha construido y validado la curva de descarga, su aplicación es relativamente sencilla y directa. Simplemente se necesita medir el nivel del agua en la estación de medición y consultar la curva para obtener el caudal correspondiente.
- **Adaptabilidad a Condiciones Cambiantes**: Aunque las condiciones hidrológicas pueden variar con el tiempo, la curva de descarga puede ajustarse periódicamente para reflejar cambios en la morfología del río, sedimentación u otras variables que puedan influir en la relación entre el nivel del agua y el caudal.

- **Costo-efectividad**: Comparado con métodos que requieren equipos sofisticados o técnicas complejas, el método de la curva de descarga es generalmente más económico y accesible. Esto lo hace ideal para aplicaciones en áreas donde los recursos pueden ser limitados [53].

3.2.18 Software RStudio

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos. Incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo [54]. A continuación, enlisto los métodos encontrados en el paquete de (MICE) dentro del software RStudios.

- Curva de descarga
- Predictive mean matching (pmm),
- Weighted predictive mean matching (midastouch)
- Random sample from observed values (simple)
- Classification and regression trees (cart)
- Random forest imputations (rf)
- Unconditional mean imputation (mean)
- Bayesian linear regression (norm)
- Linear regression ignoring model error (norm.nob)
- Linear regression using bootstrap (norm.boot)
- Linear regression, predicted values (norm.predict)
- Lasso linear regression (lasso.norm)

- Lasso select + linear regression (lasso.select.logreg)
- Random indicator for nonignorable data (ri)[55]

3.2.19 Transformadas de Fourier y ondeletas (Wavelets)

3.2.19.1 Transformada de Fourier (TF)

La transformada de Fourier permite analizar una señal periódica (observemos que podemos considerar que una función tiene período infinito) en el dominio tiempo dado su contenido en frecuencia. Esto se debe a que los coeficientes de Fourier de la función transformada representan la contribución de cada función seno y coseno según cada frecuencia. Bajo ciertas condiciones, es posible, después de haber realizado el estudio en el dominio frecuencia, retornar al dominio tiempo aplicando para ello la anti transformada de Fourier [56].

Figura 7: Esquema de la transformada de Fourier [57].

3.2.19.2 Transformada discreta de Fourier (DFT)

Permite hallar la TF de una función a partir de un número infinito de puntos que representan a la señal. Es decir, se aplica cuando no se conoce una expresión analítica de la señal, sino que se tiene solamente información de la misma en un conjunto de puntos. La TDF y su anti transformada conservan las características de simetría que poseen en el caso anterior, lo que facilita sumamante los cálculos [56].

Formula de la Transformada Discreta de Fourier

La Transformada Discreta de Fourier de una secuencia (x(n)) de longitud (N) se define como:

$$X(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3.\ 1)$$

Ecuación 3.1 Transformada discreta de Fourier

Donde:

X(k) = es el valor de la transformada en el índice (k).

x(n) = es la secuencia de entrada.

N = es el número de puntos en la secuencia.

J = es la unidad imaginaria [58].

Periodo y frecuencia

Tabla 3: Ecuaciones de periodo y frecuencia

Formulas	
Periodo	**Frecuencia**
El periodo se denota con la letra T y se define como el tiempo que tarda en cumplirse un ciclo. [59].	La frecuencia se denota con la letra f, y se define como la cantidad de ciclos que se repiten por segundo. [59].
$\boldsymbol{T = \frac{1}{f}}$	$\boldsymbol{f = \frac{1}{T}}$
Donde	
T= periodo (Años)	
f= frecuencia (Eventos/año)	

Ecuación 3.2 Periodo y frecuencia (3. 2)

3.2.19.3 Periodograma de frecuencia

Es una representación gráfica que muestra cómo varían las frecuencias de una señal sonora a lo largo del tiempo. En este gráfico, el eje horizontal (x) representa el tiempo, mientras que el eje vertical (y) representa las diferentes frecuencias presentes. Las frecuencias más bajas se encuentran en la parte inferior y las más altas en la parte superior del periodograma [60].

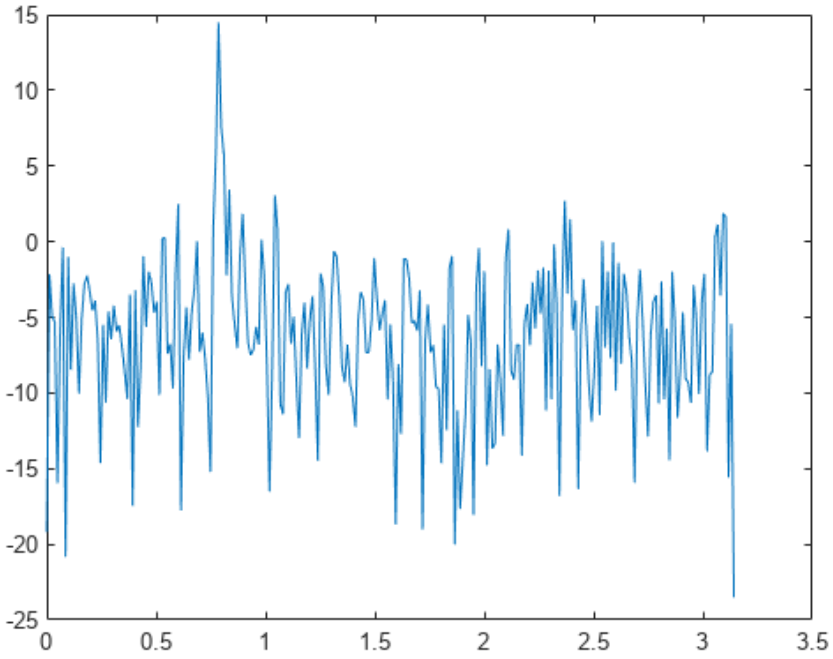

Figura 8: Periodograma de frecuencia [61].

3.2.19.4 Característica del periodograma

Dimensiones: Un periodograma visualiza tres dimensiones: el tiempo, la frecuencia y la amplitud. Esto permite un análisis detallado de la energía de las frecuencias a medida que cambian con el tiempo [62].

3.2.20 Ondeletas (Wavelets)

La transformada de ondeleta es similar a la transformada descrita de Fourier, porque ambos métodos satisfacen ciertos requerimientos matemáticos que se utilizan para representar datos o funciones. En la transformada de ondeleta, la escala juega un papel muy importante, dicho proceso analiza los datos en diferentes escalas o resoluciones. La transformada de ondeleta provee una representación en frecuencia-tiempo simultáneamente, corta la señal de interés en varias partes y

analiza cada una de ellas por separado. Las frecuencias altas o contraídas pueden ser mejor localizadas en el tiempo y las frecuencias bajas o dilatadas en la frecuencia [63].

La transformada de ondeleta, al igual que la transformada de Fourier, es una transformación reversible, que permite ir de la señal original a la transformada y viceversa, cuando se requiera. La transformada de ondeleta trabaja en el espacio fase, lo que significa que se usa un espacio conformado simultáneamente por coordenadas de tiempo y frecuencia [63].

3.2.20.1 Espectro de potencia

El espectro de potencia es una representación que muestra cómo se distribuye la potencia de una señal en función de la frecuencia [64]. Es una herramienta fundamental en el análisis de señales, ya que permite identificar las frecuencias que contienen la mayor parte de la energía de la señal [65].

3.2.20.2 El cono de influencia (COI)

El cono de influencia (COI) La estimación del poder espectral por medio de la transformada continua de wavelet de una serie temporal no periódica puede generar errores (falsas estructuras espectrales), al principio y al final del espectro wavelet [66].

3.2.20.3 Características de las Ondeletas

- Las ondeletas deben presentar oscilaciones que permitan identificar cambios a diversas escalas.
- Deben poseer un soporte compacto, es decir, que la cantidad de información o energía de entrada debe ser la misma de la transformada sin modificar a alguno de sus componentes.
- Las ondeletas permiten la transformación de información no estacionaria.
- El algoritmo de cálculo es igual o más eficiente que la transformada rápida de Fourier.
- El tratamiento de los datos a diversas escalas es más eficiente que la transformada rápida de Fourier la cual debe aplicarse cada vez que se ajusta el ancho de la ventana de transformación.
- Las ondeletas permiten reconstruir la información transformada sin modificar su contenido.
- Es posible obtener versiones reducidas por niveles de la información transformada.
- Con las ondeletas se pueden identificar cambios en la información dando la posibilidad de ubicarlos en el dominio temporal.

- Las ondeletas permiten realizar procesos de suavizado de información a diversas escalas, sin ocasionar perdidas de la información inicial.
- Las ondeletas permiten trabajar sobre información continua y discreta, de carácter real o complejo, en n-esimas dimensiones [67].

3.2.20.4 Aplicaciones de las ondeletas (Wavelets)

El espectro de potencia se utiliza en diversas áreas, incluyendo:

Procesamiento de señales: Para analizar y filtrar señales en sistemas de comunicación.

Ingeniería: En el diseño de sistemas de control y en la identificación de frecuencias resonantes.

Ciencias físicas: Para estudiar fenómenos como el ruido en sistemas eléctricos y en la caracterización de materiales [63].

3.2.20.4.1 Ejemplo de aplicación de ondeletas (Wavelets) en la ingeniería

- Análisis de la dinámica temporal de los datos hidrológicos (Caudal).
- Análisis de vibraciones estructurales.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se basó en el enfoque cuantitativo debido a que implica la recopilación de datos y análisis numérico sujetos a los datos hidrológicos (Caudal) de la cuenca del río Toachi. A su vez, el método empleado es experimental puesto que se enfocará en proporcionar un enfoque sistemático y detallado de la dinámica temporal de los datos de caudal en el área de estudio aplicando el uso de transformada de Fourier y ondeletas (wavelets).

4.1 Variables

4.1.1 Variables independientes

- Datos hidrológicos (caudal)

4.1.2 Variables dependientes

- Análisis de Ondeletas (Wavelets)
- Transformada Discreta de Fourier (FDT)

4.2 Esquema metodológico

Para el presente estudio se elaboró un esquema metodológico (**ver Figura 9**), donde se establece el proceso del desarrollo del proyecto de investigación partiendo de la obtención de los datos hidrológicos (caudal) del Instituto Nacional de Meteorología e hidrología (INAMHI), ya que a través de ello se efectuará la identificación de los patrones temporales y frecuencias utilizando la transformada de Fourier y la transformada de Ondeletas (wavelets), lo cual permitirá un análisis detallado y preciso del comportamiento de la cuenca del rio Toachi durante el periodo de estudio de (1991-2013).

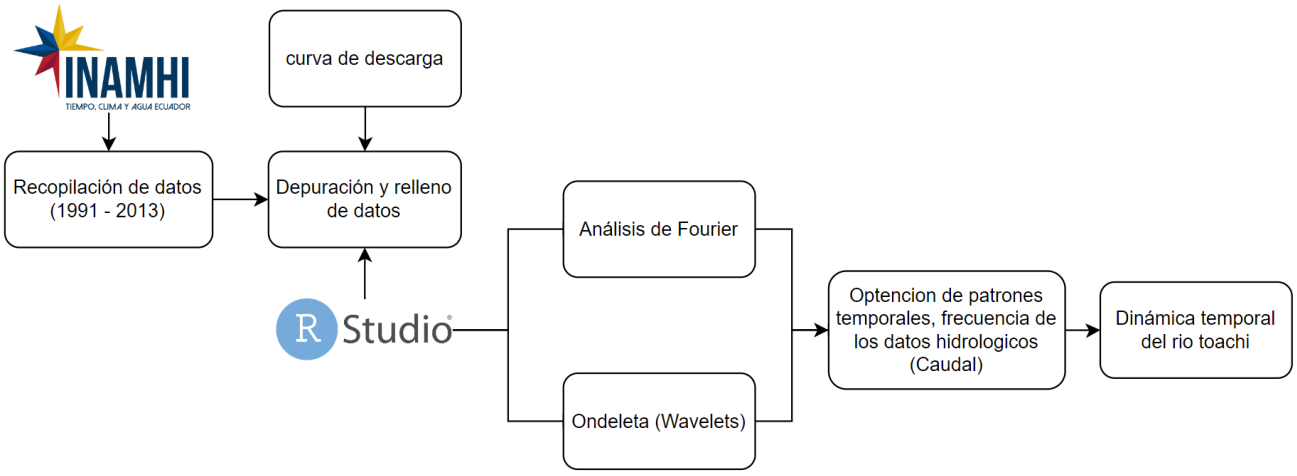

Figura 9: Esquema metodológico de la dinámica temporal del río Toachi (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.3 Descripción del área de estudio

La cuenca del rio Toachi nace en los alrededores del Quilotoa entre las cordilleras de Guangaje y Chugchilán, al norte de la provincia de Cotopaxi, bajando por el valle de Sigchos corre en dirección norte recibiendo en su recorrido las aguas de afluentes menores como el Alluriquín, el Leila, el Tasagua, el Tante y el Imbana, para unirse entonces con el río Pilatón, ya que la cuenca posee un área de 2651.732 km2 con un perímetro de 458 km, a su vez la longitud del cauce principal posee una extensión de 136.265 km, dado que su recurso hídrico abastece con sus aguas importantes zonas agrícolas de Santo Domingo de los Colorados, hasta desembocar en el río Blanco, al noreste de la provincia de Pichincha [68] (**ver Figura 10**).

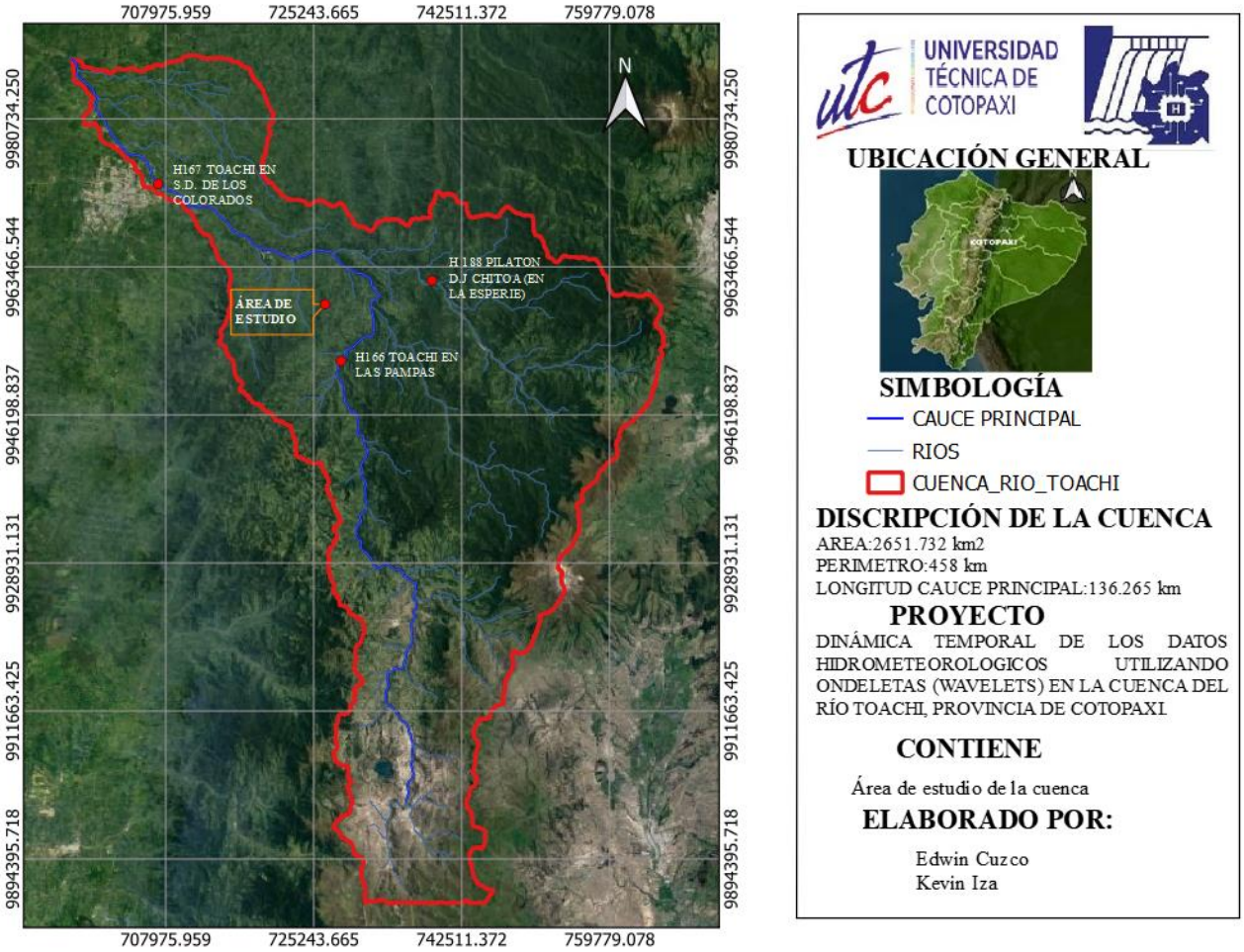

Figura 10: Delimitación de la cuenca hidrográfica Toachi (Software Qgis).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.3.1 Características de la cuenca

Tabla 4: Características de la cuenca Toachi.

Cuenca	Área (m2)	Área (km2)	Longitud del cauce principal (km)	Perímetro (km)	Pendiente (m/km)	Desnivel (msnm)
1	2.651.732.000	2651,732	136,265	458	35.78	4875.673

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.4 Ubicación geográfica

Ubicación Geográfica cuenca Río Toachi (**Ver Figura 11**).

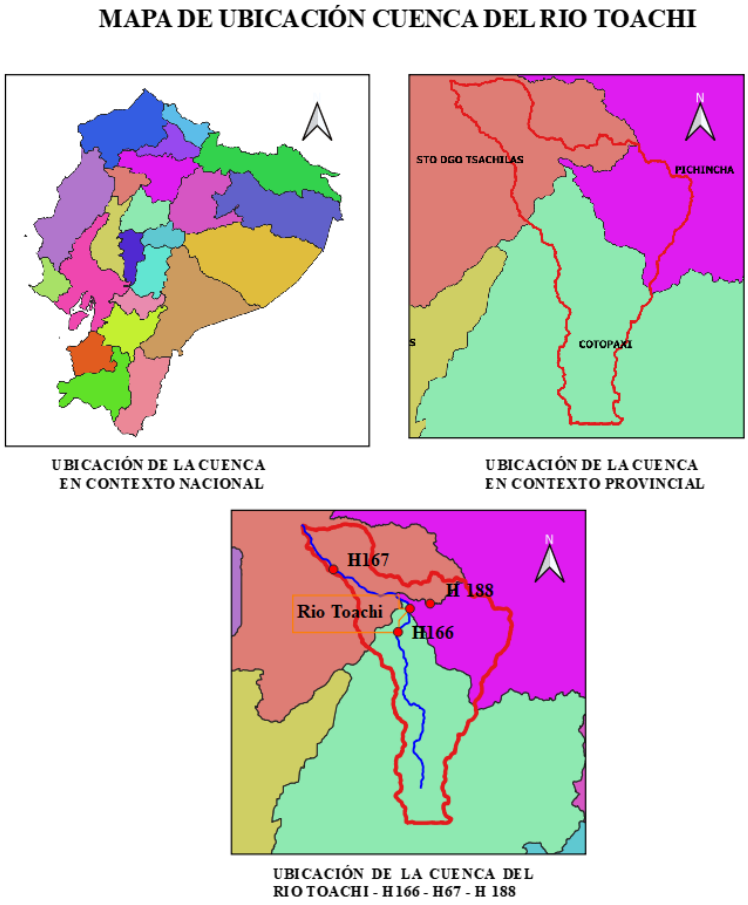

Figura 11: Ubicación geográfica de la cuenca Toachi (Software Qgis).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

La cuenca del Río Toachi, se encuentra ubicada entre las provincias de Cotopaxi, pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas, con latitud de (°9'34.58"Sur) y longitud de (79°16'55.03"Oeste), a una altura media de 347 (m.s.n.m).

4.4.1 Limitaciones del Río Toachi

- Norte: Provincia Pichincha
- Sur: Provincia Cotopaxi
- Este: Provincia Pichincha
- Oeste: Santo Domingo de los Tsáchilas

4.5 Estaciones hidrológicas

Para el proyecto de investigación se establecieron las estaciones hidrológicas más cercanas a la cuenca, como se detalla en la (**Ver tabla 5)** y en la (**Ver Figura 12**).

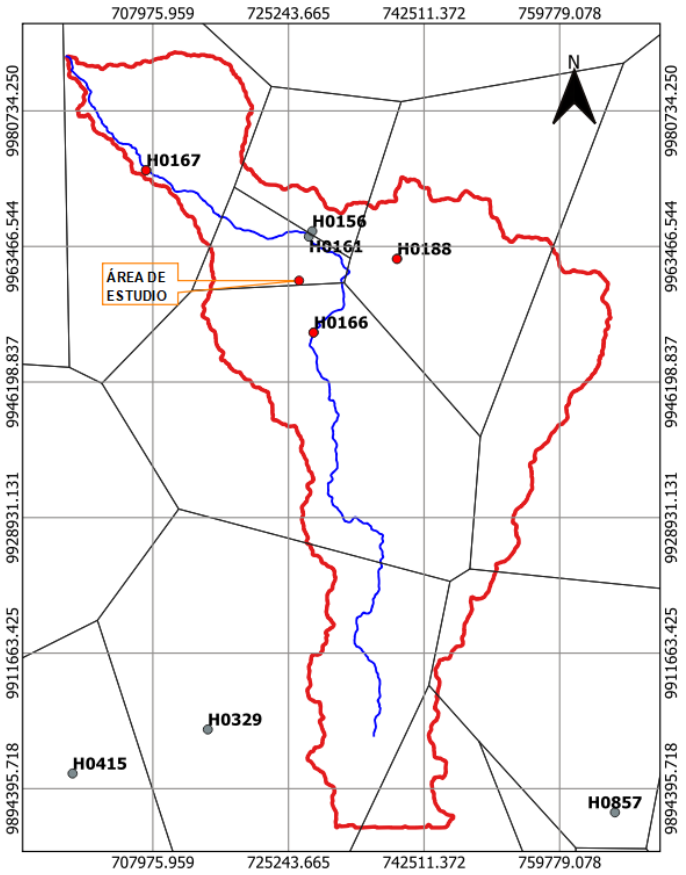

Figura 12: Representación de las estaciones hidrológicas (Software Qgis).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Tabla 5: Representación de las estaciones hidrológicas de la cuenca del río Toachi.

Cod.	Nombre
H166	TOACHI EN LAS PAMPAS
H167	TOACHI S.D DE LOS COLORADOS
H188	PILATON D.J CHITOA (EN LA ESPERIE)

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.6 Esquema del análisis de la dinámica temporal en la cuenca del rio Toachi.

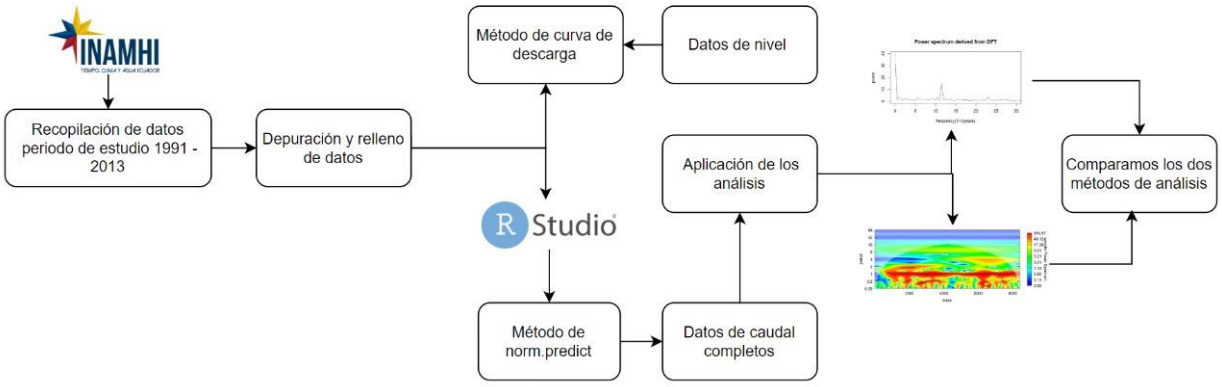

Figura 13: Esquema metodológico de procedimiento del análisis de la dinámica temporal (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.7 Recopilación de datos

Para realizar el estudio de la dinámica temporal de los datos hidrológicos (Caudal) de la cuenca del rio Toachi, se procedió a la recopilación de información de distintas instituciones que nos proporcionen datos con veracidad, para este caso la información se obtuvo por medio del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) Ecuador, que cuenta con una red extensa de estaciones hidrológicas, de las cuales 82 estaciones hidrológicas se encuentran operativas en el presente año.

El estudio se realiza para una estimación de 23 años, desde el año de 1991 hasta el año 2013, por ello se ha tomado en cuenta las estaciones que cuenten con la mayor información de datos de niveles (m) y caudales (m3/s), de las cuales hemos determinado 7 estaciones hidrológicas que se describe en la siguiente (**Ver Tabla** 6)**.**

Tabla 6: Estaciones Hidrológicas.

Cod.	Nombre
H166	TOACHI EN LAS PAMPAS
H167	TOACHI S.D DE LOS COLORADOS
H188	PILATON D.J CHITOA (EN LA ESPERIE)
H216	BAU QUININDE
H326	BABA JDJ TOACHI-DCP
H340	CHIMBO EN BUCAY
H731	COSANGA AJ QUIJOS

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

A continuación, se presenta un ejemplo de datos obtenidos para tres estaciones hidrológicas (Caudal) del año 2001. (**Ver Tabla 7)**

Tabla 7: Datos obtenidos de las estaciones hidrológicas (Caudal y nivel) del año 2001 (Excel).

DIA	Mes de enero del año 2001					
	H166		H167		H168	
	Caudal (m3/s)	Nivel (m)	Caudal (m3/s)	Nivel (m)	Caudal (m3/s)	Nivel (m)
1	7.094	0.6	64.011	0.48	19.542	0.8
2	7.094	0.6	60.365	0.45	19.053	0.79
3	7.094	0.6	57.92	0.43	16.712	0.74
4	7.094	0.6	60.348	0.45	17.167	0.75
5	7.094	0.6	68.235	0.51	18.582	0.78
6	7.346	0.61	73.619	0.56	21.604	0.84
7	7.737	0.63	88.426	0.64	21.116	0.83
8	8.14	0.64	98.773	0.69	23.813	0.88
9	8.418	0.65	110.813	0.74	53.723	1.23
10	8.418	0.65	108.346	0.73	37.294	1.08
11	9.141	0.68	87.675	0.63	33.557	1.03
12	9.29	0.68	69.437	0.52	27.496	0.94
13	9.443	0.69	63.404	0.47	24.975	0.9
14	9.595	0.69	57.306	0.42	23.832	0.88
15	10.395	0.72	54.848	0.4	22.69	0.86
16	11.748	0.76	52.995	0.39	25.462	0.9
17	14.067	0.82	71.816	0.54	39.555	1.08
18	17.502	0.9	85.967	0.63	35.119	1.05
19	18.952	0.93	154.123	0.9	31.382	1
20	20.222	0.95	164.033	0.94	40.51	1.12
21	21.554	0.98	147.267	0.88	34.985	1.05
22	21.826	0.98	128.501	0.81	38.855	1.1
23	21.826	0.98	118.278	0.77	37.271	1.08
24	22.379	0.99	105.942	0.72	33.776	1.03
25	22.379	0.99	94.138	0.67	31.382	1
26	21.826	0.98	83.967	0.62	30.018	0.98
27	21.826	0.98	88.285	0.64	21.604	0.84
28	21.282	0.97	98.795	0.69	24.975	0.9
29	21.282	0.97	83.693	0.62	24.394	0.89
30	21.282	0.97	75.411	0.57	23.251	0.87
31	20.747	0.96	70.038	0.53	22.147	0.85

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

De las estaciones hidrológicas enlistadas en la (**Tabla 6)**, se procedió a la obtención de los datos tanto de niveles (m) y de caudales (m3/s) a continuación, se realiza un análisis mesurado de cada una de las estaciones hidrológicos (Caudal), identificando los niveles y caudales faltantes.

4.8 Relleno de Datos (Caudales)

El relleno de datos de caudales es una técnica crucial en la hidrología, utilizada para completar series temporales incompletas de mediciones de flujo de agua en ríos y cuerpos de agua. Este proceso es esencial para asegurar la continuidad y precisión de los análisis hidrológicos, permitiendo una mejor comprensión de las tendencias y comportamientos hídricos a lo largo del tiempo [69]

Para este estudio se realiza el relleno de datos hidrológicos (caudal) faltantes. Se ha identificado un sin número de métodos que se enlisto a continuación.

- Curva de descarga
- Predictive mean matching (pmm),
- Weighted predictive mean matching (midastouch)
- Random sample from observed values (simple)
- Classification and regression trees (cart)
- Random forest imputations (rf)
- Unconditional mean imputation (mean)
- Bayesian linear regression (norm)
- Linear regression ignoring model error (norm.nob)
- Linear regression using bootstrap (norm.boot)
- Linear regression, predicted values (norm.predict)
- Lasso linear regression (lasso.norm)

- Random indicator for nonignorable data (ri) [55]

De los métodos enlistados, se aplica el método de la curva de descarga o también conocida como curva de gasto o caudal y el método de Linear regression, predicted values (norm.predict).

4.9 Método curva de descarga (Utiliza para el relleno de datos)

La técnica de curva de gasto nos permite obtener de manera más directa los caudales del río, ya que el método se basa en la correlación entre el nivel de agua y el caudal de agua descargada, la curva de la técnica es un componente clave en el proceso de la estimación de caudal. Para poder aplicar la técnica de curva de gasto debemos identificar todos los niveles y caudales existentes desde el año de 1991 hasta 2013, tomando en cuenta los niveles en unidades de metros (m) y los caudales en metro cúbicos sobre segundo (m3/s), para este caso. A continuación, identificamos la diferencia de datos faltantes por cada uno de los años, para un mejor entendimiento se facilita un ejemplo de aplicación (**Ver Tabla 9**).

4.9.1 Ejemplo de aplicación de la estación H167

Tabla 8: Datos incompletos de la estación H167

H167 (AÑO 1991 - 2013)		
Dia	**Enero - Diciembre**	
	Caudal (m3/s)	**Nivel (m)**
1	-	-
2	-	-
-	-	-
28	105.952	0.54
29	105.378	0.54
-	-	-
-	-	-
8556	26.453	0.31
Datos faltantes	3238	2701

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Continuando con la técnica de la curva de gasto se procede a obtener del porcentaje y su diferencia de caudales y niveles, se calculan con las siguientes formulas (**Ver tabla 10**).

Tabla 9: Datos incompletos de la estación H167

Formulas	
Porcentaje	**Diferencia**
$P = \frac{(100 * (365 - D))}{365}$	$Dif = Q - H$
Donde:	**Donde:**
P = Porcentaje (%) **365 =**días del año de cada estación **D =** Cantidad de datos faltantes (caudal o Niveles) **Nota:** Esta fórmula se aplica tanto para nivel como para Caudal.	Dif= Diferencia Q= Caudal (m3/s) H = nivel (m)

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.9.2 Aplicación de la curva de gasto o caudal

Para aplicar la técnica de la curva de gasto o caudal, desarrollamos la siguiente **tabla 11** en la cual identificamos caudales, niveles, porcentajes y sus diferencias.

Tabla 10: Datos referenciales faltantes de la estación H167 (Excel)

	AÑO	CAUDAL (%)	NIVELES (%)	diff	DATOS FALTANTES (Q)	DATOS FALTANTES (N)
	1991	0	0	0.0	365	365
Año Bisiesto	1992	0	0	0.0	366	366
	1993	83.0	83.0	0.0	62	62
	1994	0.0	0.0	0.0	365	365
	1995	75.6	75.6	0.0	89	89
Año Bisiesto	1996	60.9	60.9	0.0	143	143
	1997	100	100	0.0	0	0
	1998	99.2	99.2	0.0	3	3
	1999	99.5	99.5	0.0	2	2
Año Bisiesto	2000	98.9	98.9	0.0	4	4
	2001	99.5	99.5	0.0	2	2
	2002	89.3	89.3	0.0	39	39
	2003	89.0	89.0	0.0	40	40
Año Bisiesto	2004	71.6	71.6	0.0	104	104
	2005	98.4	98.4	0.0	6	6
Curva de Gasto	2006	98.6	98.6	0.0	5	5
	2007	0.0	0.0	0.0	365	365
Año Bisiesto	2008	0.0	0.0	0.0	366	366
	2009	0.0	58.4	-58.4	365	152
	2010	0.0	88.8	-88.8	365	41
	2011	86.3	86.3	0.0	50	50
Año Bisiesto	2012	81.7	81.7	0.0	67	67
	2013	82.2	82.2	0.0	65	65
				Suma:	3238	2701
				Datos Totales:	8401	

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Se identifica los años que cuentan con una diferencia de caudales con respecto a los niveles, para el presente ejemplo observamos que en el año 2009 y 2010 existe dicha diferencia, una vez identificada las discrepancias procedemos a buscar el año con mejores informaciones de datos hidrológicos (Caudal), en este caso el año que proporciona mejor información de datos es el año 2006 con un porcentaje de 98.6%. (**Ver tabla 10**).

Continuando con la técnica se procede a desarrollar 2 columnas, la primera columna ubicamos todos los datos de niveles (m) del año 2006 y la segunda columna de la misma manera todos los datos de caudal (m3/s). Seguidamente procedemos a graficar las columnas. los niveles en el eje (X) y los caudales en el eje (Y), posteriormente configuramos la gráfica añadiendo las opciones de la línea tendencia y polinómica de tercer grado por último seleccionamos la opción (representación) de la ecuación de la gráfica. (**Ver Figura 14**)

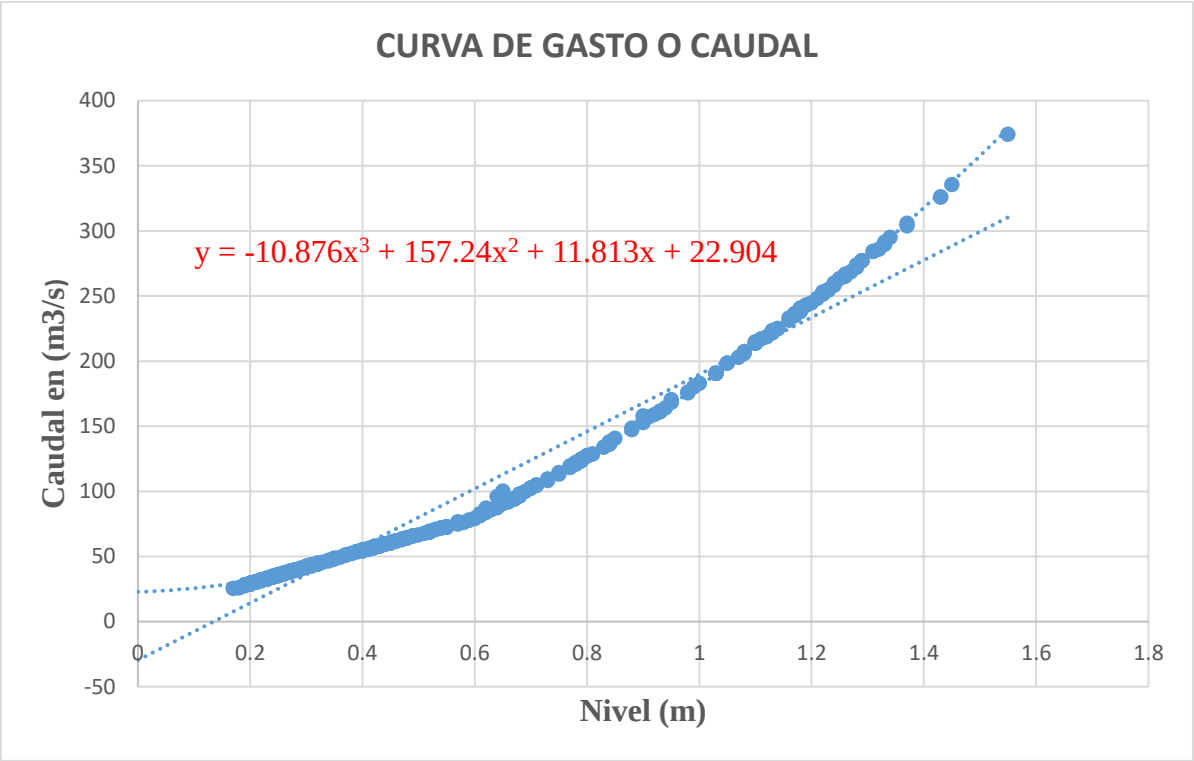

Figura 14: Curva de Gasto o caudal (Excel).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Ecuación obtenida de la curva de gasto o caudal

$$y = -10.876x^3 + 157.24x^2 + 11.813x + 22.904 \qquad (4.\ 1)$$

Ecuación 4.1 Curva de descarga (Excel)

Donde:

x = constante (nivel m)

Mediante esta ecuación obtenida se procede al reemplazo de la constante "x" en este caso la constante será reemplazada por los niveles de los años 2009 y 2010, obteniendo como resultado favorable los datos de caudal (m3/s). Tener presente que la aplicación de la técnica curva de gasto o caudal se la puede utilizar cuando exista diferencias de caudal con respecto a los niveles, caso contrario al no cumplir con este parámetro la técnica no se la puede ejecutar.

Dado que existe mucha escasez de niveles (m) en las 7 estaciones la aplicación de la curva de gasto no fue tan ventajoso, por ello se ha seleccionado las siguientes estaciones tomando en cuenta la información de niveles y su influencia en la cuenca de río Toachi (**ver Tabla 11**).

Tabla 11: Estaciones hidrológicas (Rio Toachi).

Cod.	Nombre
H166	TOACHI EN LAS PAMPAS
H167	TOACHI S.D DE LOS COLORADOS
H188	PILATON D.J CHITOA (EN LA ESPERIE)

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Como resultado de la aplicación del método de la curva de descarga tenemos un 6.39% de relleno de datos de caudales para las tres estaciones hidrológicas trabajadas H166, H167 y H188, viendo estos resultados obtenidos vemos la necesidad de la aplicación de más metodologías para el relleno de datos.

4.10 Método norm.predict (Utiliza para el relleno de datos)

Figura 15: Esquema metodológico de relleno de datos (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Se procede a completar los datos de caudales incompletos con la ayuda del software RStudio, se debe tomar en consideración que dentro del programa cuente con algunos liberarías y paquetes que nos facilite el relleno de datos hidrológicos (Caudal), en este caso se utilizó el paquete "MICE" que dentro del paquete poseen algunos métodos de llenado de datos. Se aplicó exactamente 11

métodos que describo a continuación los métodos aplicados pmm, midastouch, simple, cart, rf, mean, norm, norm.nob, norm.boot, norm.predict, lasso.norm, lasso.select.logreg y ri de todos los métodos mencionadas se aplicó el método Linear regression, predicted values (norm.predict) [55], en respuesta al mejor relleno de datos visualizando en el histograma de caudales por día (**Ver Figura 16**).

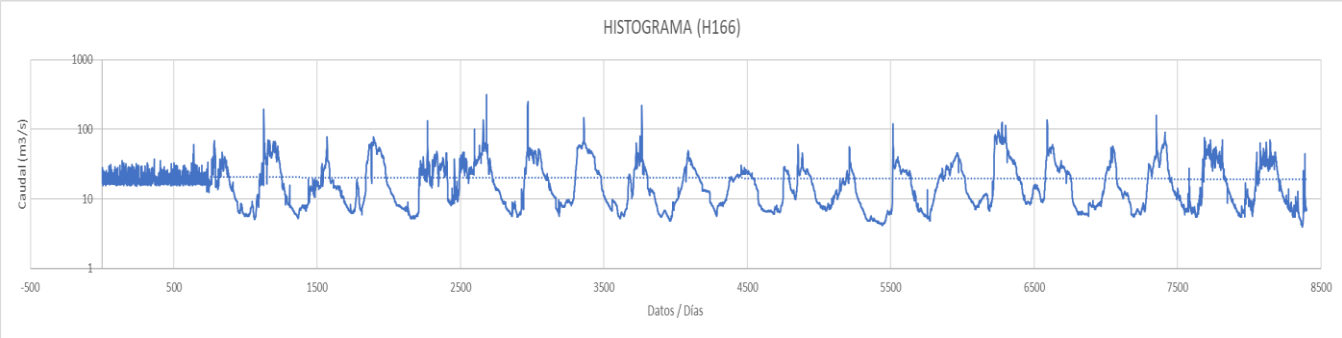

Figura 16: Esquema metodológico de relleno de datos (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.10.1 Método de norm.predict (Linear regression, predicted values)

El método de norm.predict proporciona una técnica de imputación más robusta y flexible basada en modelos avanzados, para columnas completas sin datos faltantes (mice) establecerá automáticamente el método vacío [55]. Por lo tanto, en donde no existen datos de caudal, pueden contener N/A, para que el paquete (mice), en conjunto con el método de norm.predict realizar su debida imputación para las celdas que contenga N/A, por otro lado, para el presente proyecto se realizaron 5 imputaciones con el método mencionado, de esa manera proporcionando una estimación de relleno de datos hidrológicos (Caudal) del periodo de estudio de 1991 hasta 2013.

4.11 Transformada discreta de Fourier programación (RStudio).

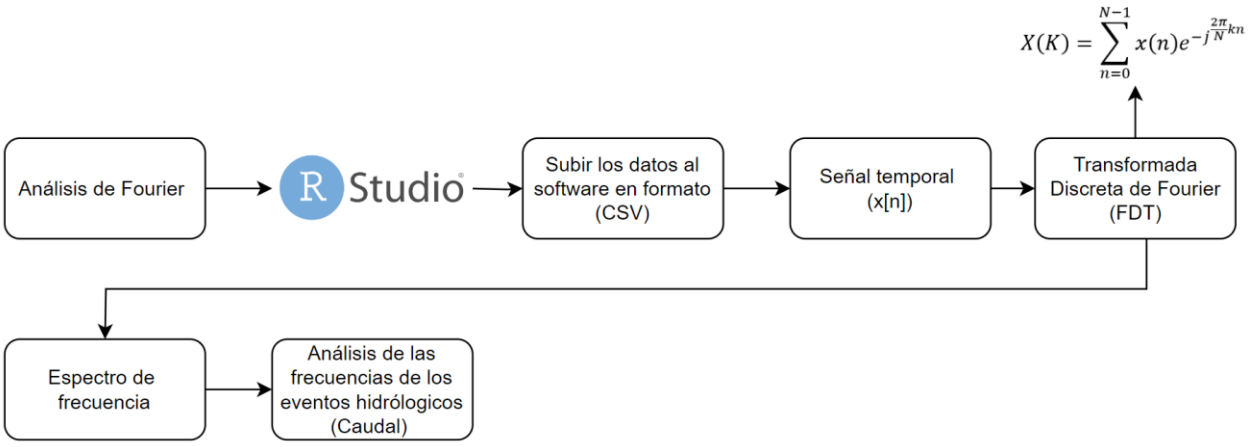

Figura 17: Esquema metodológico TDF (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

El código programado realiza un análisis de la Transformada discreta de Fourier, en la serie temporal de datos hidrológicos (Caudal) del periodo (1991-2013), Calculando los coeficientes de Fourier para cada frecuencia utilizando una función de senusoidal compleja. Los coeficientes se normalizan y se calcula el espectro de potencia. (ver Figura 18) permitiendo identificar las frecuencias con mayor influencia en los datos. Este análisis es crucial para comprender las variaciones y patrones en la serie temporal hidrológica [70].

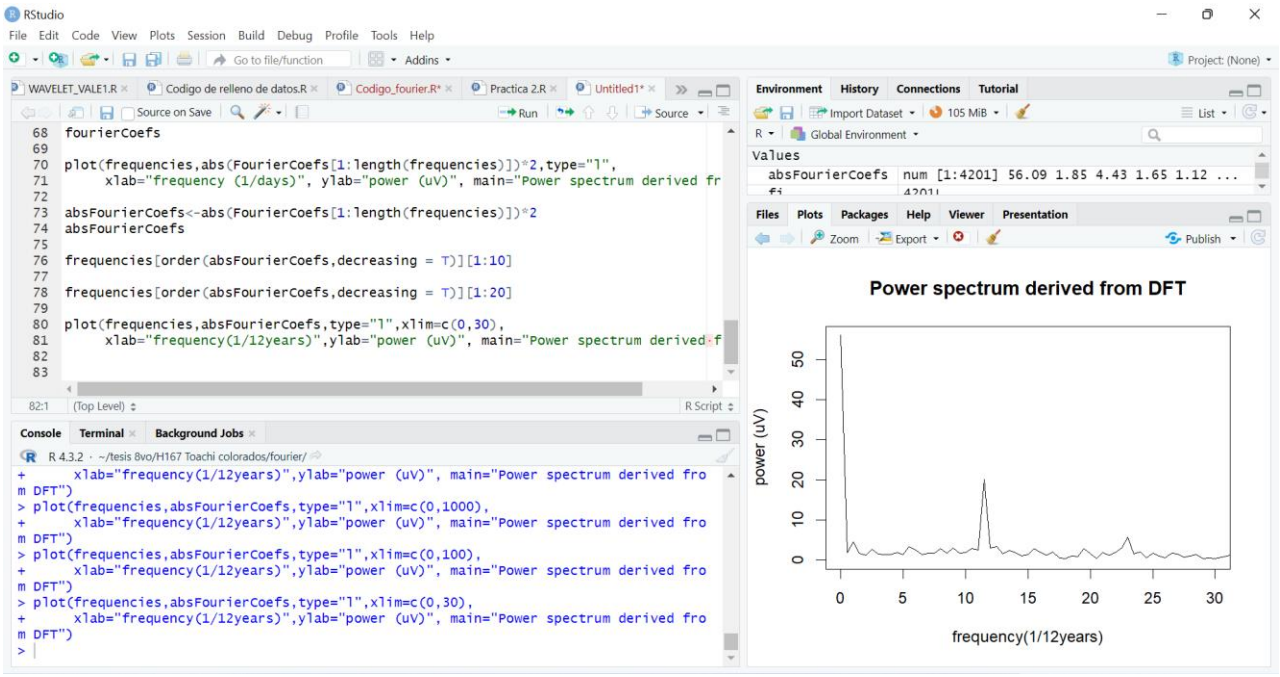

Figura 18: Espectro de Frecuencia (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

4.12 Ondeletas (wavelets) programación (RStudio).

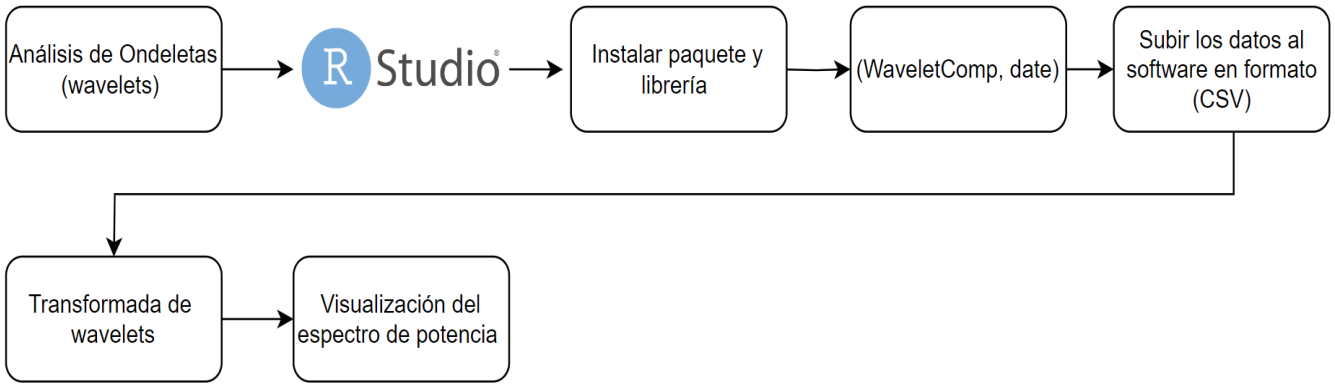

Figura 19: Esquema metodológico Wavelets (Software Diagram).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

El análisis de wavelets se desplaza y escalan a partir de una ondeleta madre, parte en la descomposición de una señal en versiones escaladas. Para aplicar el análisis de ondeleta en el software de RStudio, Se instalan las librerías y paquetes ("WaveletComp" y "date"), los cuales permiten la manipulación adecuada de fechas.

Para efectuar el análisis de ondas, se utiliza la función analyze.wavelet, que descompone la serie temporal en diversas escalas. Finalmente, con la función wt.image, se genera una visualización del espectro de potencia wavelet, (**ver Figura 20**).

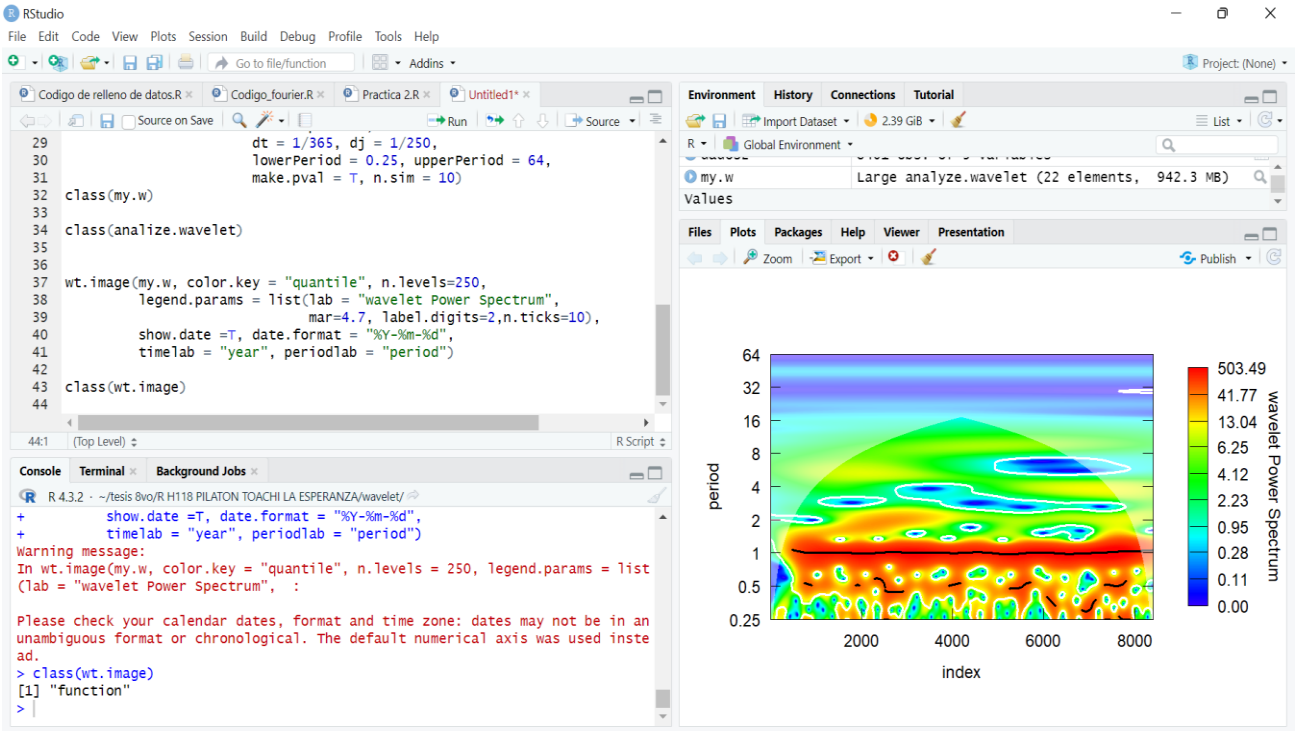

Figura 20: Espectrograma de Potencia, H166 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación, evaluaremos los resultados obtenidos de cada una de las estaciones hidrológicas antes mencionadas y describiremos los eventos más importantes que se presenten en las gráficas de wavelet y Fourier, por último, indicaremos de manera general el análisis de la dinámica temporal de los datos hidrológicos (Caudal) de la cuenca del río Toachi.

5.1 Relleno de datos

Para el presente estudio se ha realizado el relleno de datos para tres estaciones hidrológicas aplicando el método de la curva de descarga y norm.predict (**Ver Tabla 12)**

Tabla 12: Datos referenciales faltantes de la estación H167 (Excel)

Datos/Días	**H166**	**H167**	**H188**
	Caudal (m3/s)		
1	16.984	82.356	23.568
2	27.863	139.802	41.380
3	20.527	101.064	29.369
4	26.902	134.726	39.806
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
8395	7.670	25.776	13.023
8396	6.926	37.021	13.023
8397	6.746	27.871	14.008
8398	6.926	30.863	14.994
8399	6.926	32.382	14.994
8400	7.111	27.843	14.994
8401	6.926	26.453	14.994

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

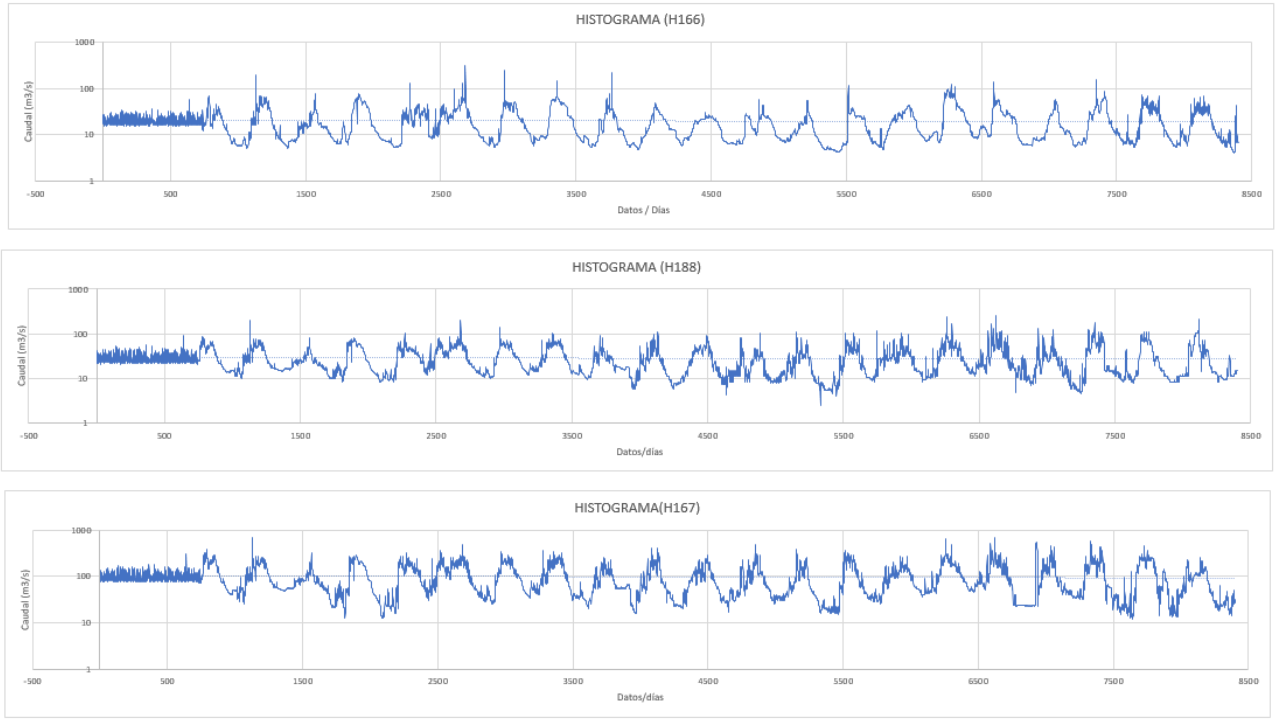

Figura 21: Relleno de datos de caudal (Excel).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

En respuesta al primer objetivo específico se realizó la depuración, corrección y relleno de datos de caudales para las estaciones hidrológica H166, H167 y H188, se utilizó dos métodos de relleno de datos el primero fue la técnica de la curva de descarga logrando rellenar un total de 6.39%, posteriormente se aplicó un segundo método con la ayuda del programa RStudios utilizando el paquete de "MICE", dentro de este paquete se utilizó el método Linear regression, predicted values (norm.predict), logrando completar los datos no disponibles satisfactoriamente para cada una de las estaciones. **(Ver Figura 21)**.

5.2 Transformada discreta de Fourier

5.2.1 H166 Toachi en las pampas

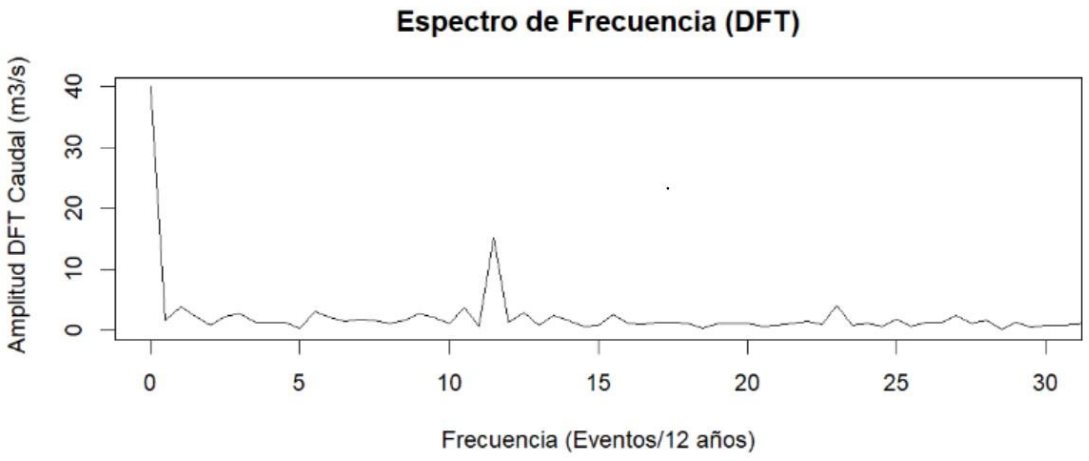

Figura 22: Espectro de frecuencia (1/12 años), H166 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

En respuesta al segundo objetivo específico se realizó el análisis de las frecuencias de los eventos hidrológicos de las estaciones H166, H167 y H188 en base a la trasformada discreta de Fourier consiguiendo como respuesta los eventos más importantes que tiene una señal a continuación describo el análisis de la estación H166 Toachi en las Pampas. En la **figura 22** se representa los resultados obtenidos, mediante el espectro de frecuencia se puede dar cuenca rápidamente que existe un pico muy significativo o elevado inicia en la frecuencia de 11 hasta 11.5(Eventos/12años) **(Figura 23**) cuanto más alto sea el pico, más fuerte es la componente de frecuencia

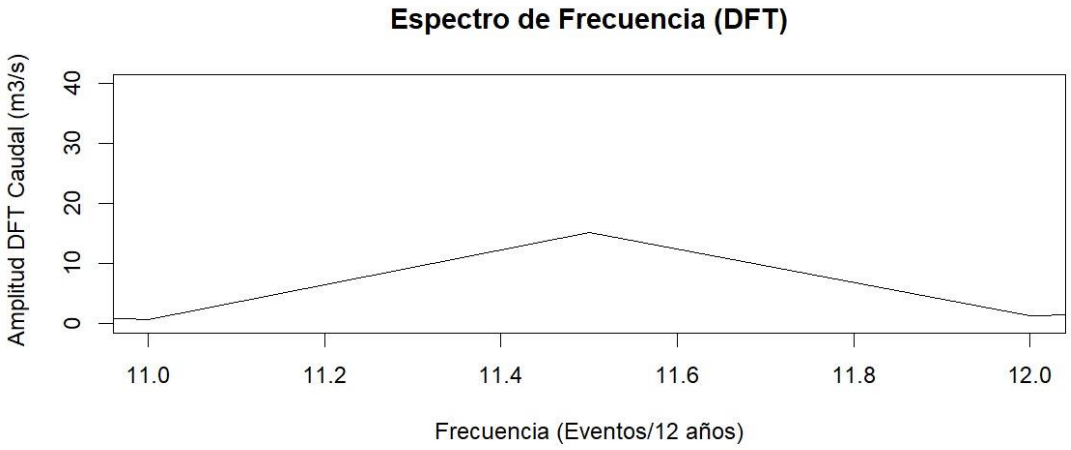

Figura 23: Espectro de frecuencia (DFT) (Eventos/12 años), H166 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

También se puede observar un segundo pico **(Figura 24)** que inicia en la frecuencia de 22.5 hasta 23.0(Eventos/12 años), este pico ya no es muy elevado. Aparte de estos dos picos analizados las otras frecuencias tienen picos relativamente bajos.

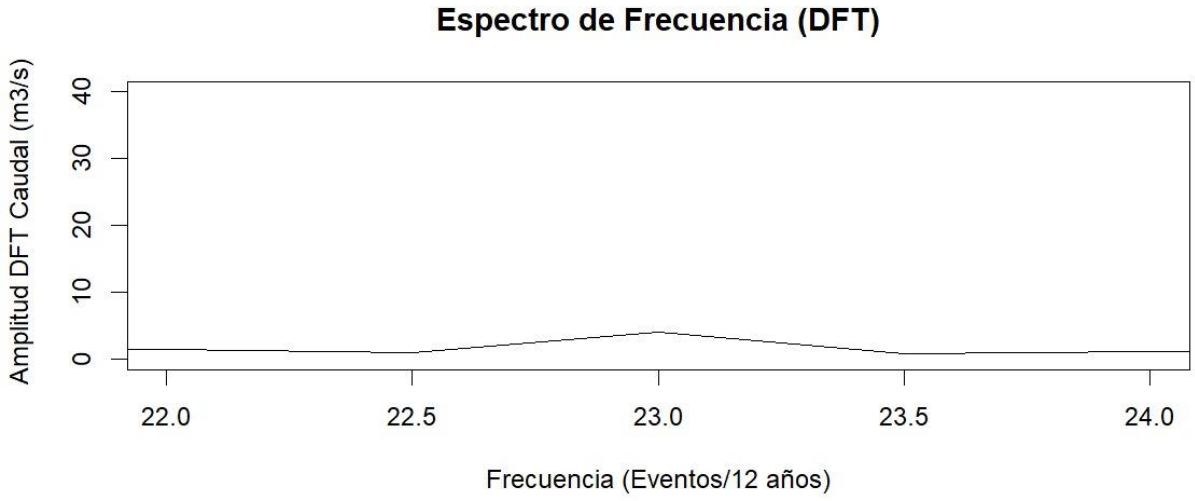

Figura 24: Espectro de frecuencia (DFT) (Eventos/12 años), H166 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

5.2.2 H167 Toachi en S.A. de los Colorados

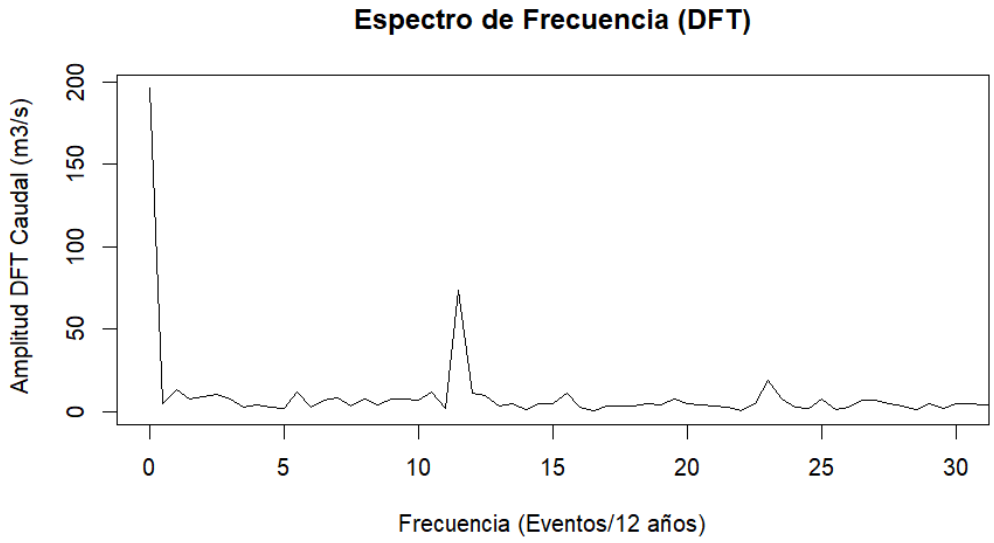

Figura 25: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167(RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Se analizó el análisis de la estación H167 Santo Domingo de los Colorados en la cual se concluyó que existe una gran similitud con la estación H166 estudiada este suceso se dan porque la estación H167 se encuentra ubicada en la misma cuenca de río Toachi limitada con la Provincia de Esmeraldas, en el espectro de frecuencia vemos un pico elévalo que inicia desde la frecuencia de 11(1/12) hasta 11.5(1/12) (**ver Figura 26**) lo que representa una señal con alta energía y a partir de la frecuencia 11.5 el pico de elevación decrece hasta la frecuencia 12(1/12).

5.2.2.1 Representación del pico más elevado de frecuencia

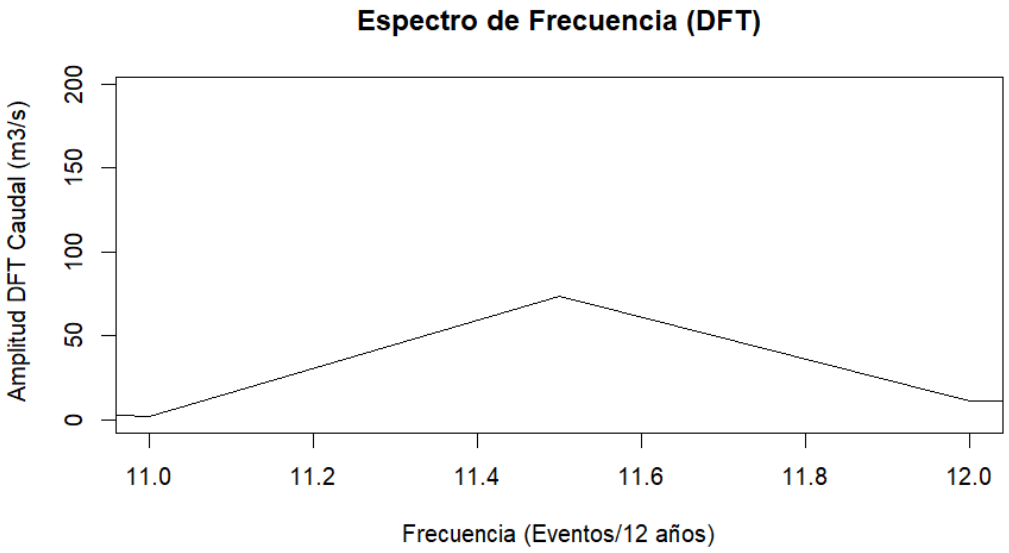

Figura 26: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

5.2.2.2 Representación de tercer pico más elevado de la frecuencia

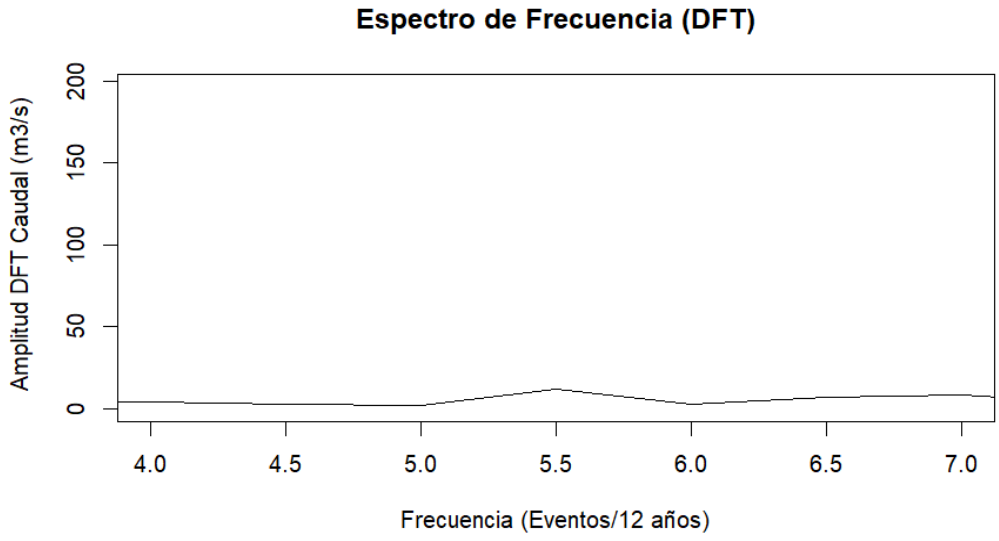

Figura 27: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H167 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

A parte del segundo pico en la frecuencia de 23(Eventos/años). Se Representa un tercer pico de elevación (**ver Figura 27**), con una frecuencia aproximada de inicio de 5(Eventos/12años) hasta 5.5(Eventos/12años) este pico es bastante similar a la estación H166.

5.2.3 H188 Pilatón Chitoa (ESPIRIE)

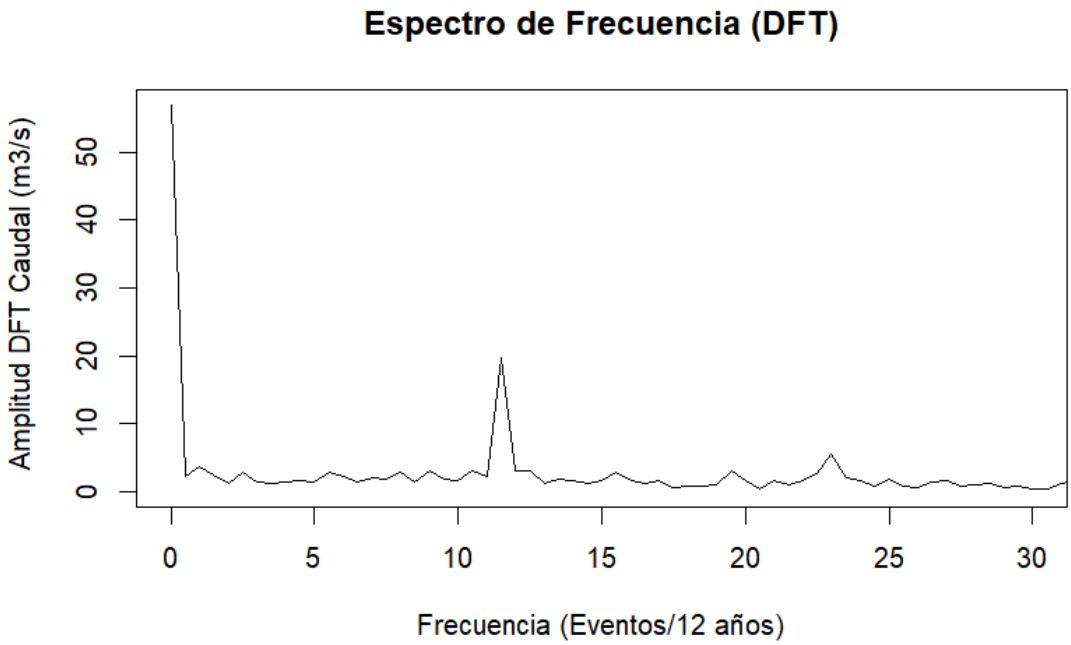

Figura 28: Espectro de frecuencia (Eventos/12 años), H188 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Finalmente se analizó la última estación hidrológica H188 que se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha (**ver Figura 28**) en la cual encontramos patrones bastantes similares a las anteriores estaciones. El pico más elevado inicia en la frecuencia de 11(Eventos/12años) hasta 11.5(Eventos/12años) y por último el según pico más pronunciado inicia en la frecuencia de 22.5(Eventos/12años) hasta 23(Eventos/12años), y a partir de la frecuencia más elevada de 23(1/12) tenemos un decrecimiento.

Para concluir con el análisis de la transformada discreta de Fourier aplicada para las tres estaciones hidrológicas H166, H167 y H188 se encontró bastante similitud exactamente para los dos picos más elevados. El primer pico y más pronunciado con una frecuencia de inicio de 11(Eventos/12años) hasta 11.5(Eventos/12años) que representa su frecuencia más elevada y el

segundo pico inicia en una frecuencia de 22.5(Eventos/12años) hasta 23.0(Eventos/12años) aproximadamente. Esto se puede explicar porque las estaciones analizadas pertenecen a la misma cuenca de río Toachi la diferencia es la localización H166 se encuentra ubicada en la provincia de Cotopaxi la estación H167 en la provincia de Santo domingo y la estación 188 en la provincia de pichincha la localización es un factor que afecta a la variabilidad de los datos de caudales.

5.3 Ondeletas (wavelets)

5.3.1 H166 Toachi en las Pampas

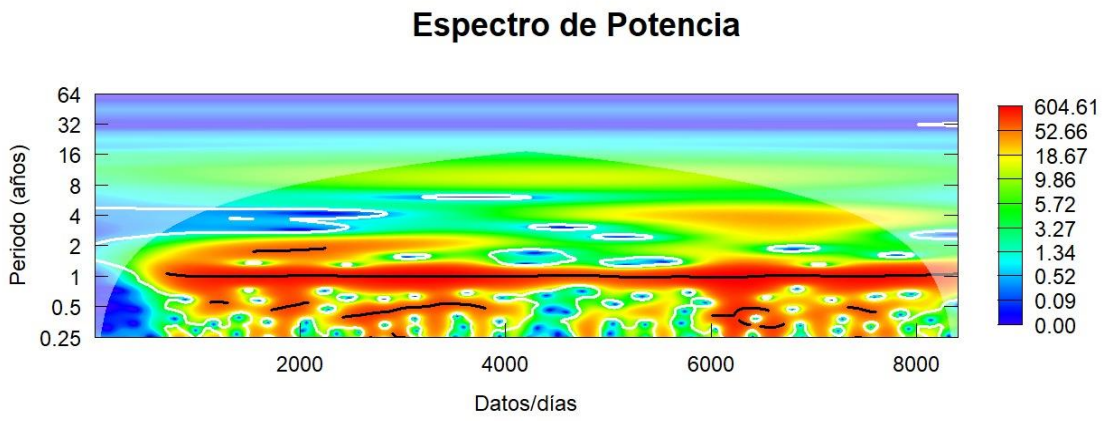

Figura 29 : Espectrograma de potencia de wavelet, H166 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

En respuesta al tercer objetivo específico se aplicó el análisis de las ondeletas (wavelets) para posteriormente realizar la comparación con los resultados del análisis de Fourier y su determinación de la localización en el tiempo de los eventos en conjunto con la frecuencia. A continuación, se describe el análisis de ondeletas. **La figura 29** representa el espectro de potencia de wavelet en la cual se puede apreciar en el periodo de 1 año se marca una curva de significancia de color negro esto representa que una vez al año vienen las lluvias, la estacionalidad de las lluvias es más marcada en los últimos años, lo que significa que el invierno viene más fuerte y el verano queda más seco y finalmente podemos apreciar un posible evento de fenómeno del niño en el periodo de 4 hasta 5 años se marca de colores amarillo y rojo lo que indican una mayor potencia de la señal de frecuencias y tiempo, pero no es muy significativo porque su marcación no es muy clara.

5.3.2 H167 Toachi en S.A. de los Colorados

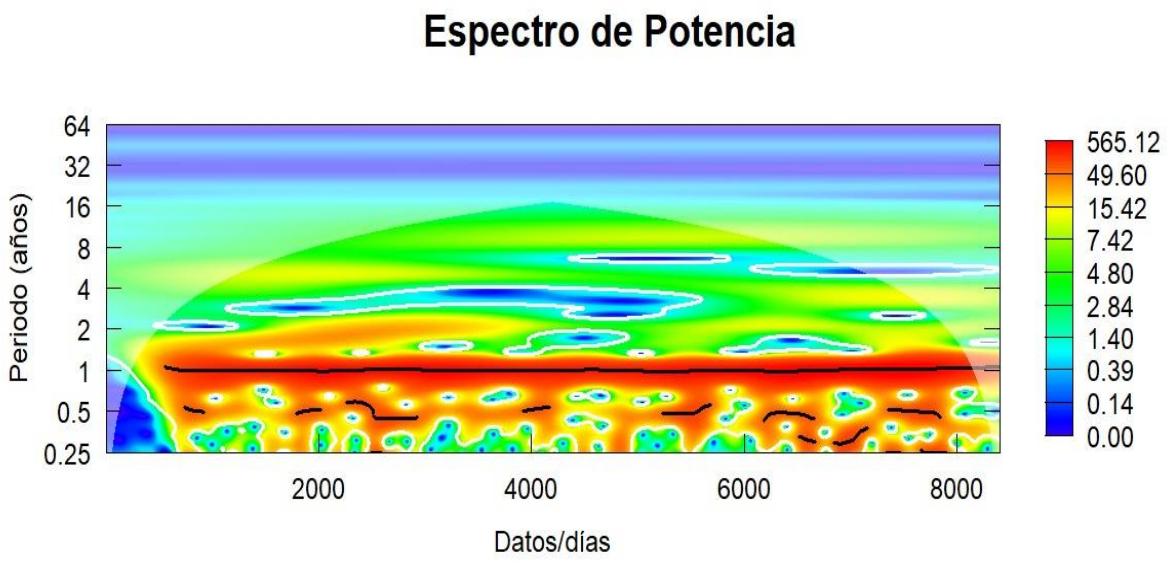

Figura 30 : Espectrograma de potencia de wavelet, H167 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

En la **figura 30** que representa el espectrograma de potencia de la estación H167, se aplicó el análisis de ondeletas en donde se evidencia eventos importantes en 0.5 y 1 año, marcada de color cálidos (roja y amarilla), además se puede corroborar por que cuentan con la curva de significancia que se encuentran representa con un contorno negro, lo que indica que existen regiones donde los datos hidrológicos (Caudal) presentan tendencias notables de eventos de precipitación y sequía. También se puede apreciar que en el periodo 2 aproximadamente en 2000 a 4000 y de 6000 a 8000 (datos/días), representados de color tomate y amarillo, existe bastante estacionalidad de precipitaciones concentradas en unos meses y posteriormente existe temporadas secas. En cambio, en el periodo 4 y 8, ilustrado de color amarillo existe algún evento o fenómeno de precipitación, pero no se los visualiza muy relevantes. Esto se puede dar porque la estación H167 se encuentra en una zona altamente húmeda.

5.3.3 188 Pilatón Chitoa (Espirie)

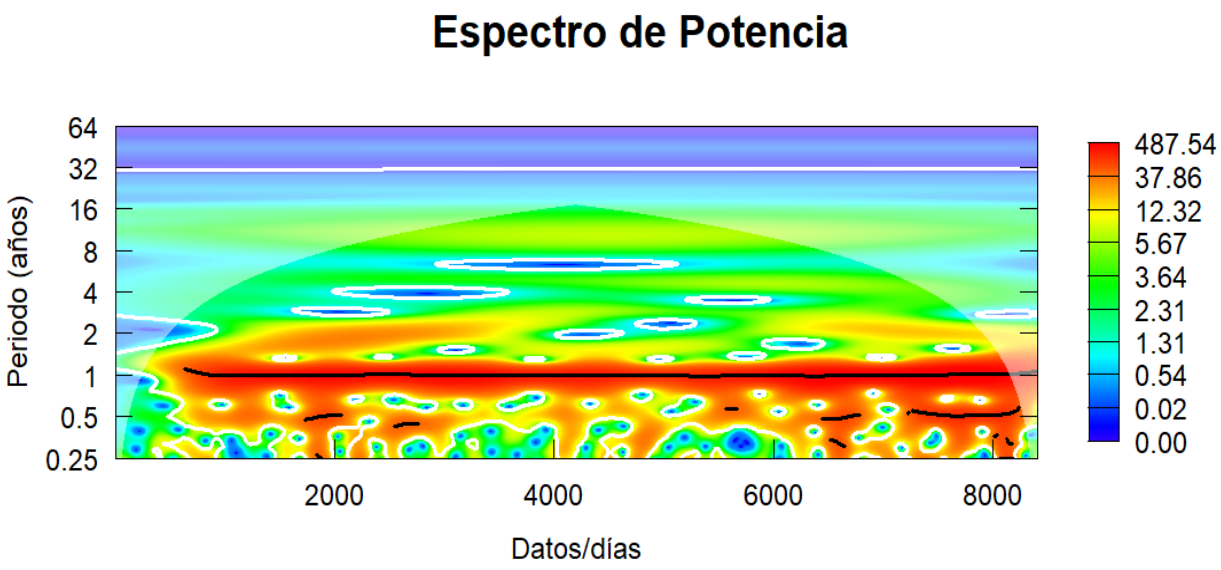

Figura 31 : Espectrograma de potencia de wavelet, H188 (RStudio).

Elaborado por: Cuzco Edwin, Iza Kevin

Para la **Figura** , se representó el espectro de potencia de la estación H188, la estación cuenta con una zona de gran humedad y con un clima húmedo y lluvioso. Por ello se dedujo que en el periodo 0,5 a 1 marcado de color naranja, existen secciones con altas estacionalidad y son significativas ya que contienen la curva de significancia (contorno negro), a diferencia que en el periodo 2, alrededor de 2000 a 4000 y 6000 a 8000 (datos/días), existe poca estacionalidad de lluvia concentrado en unos meses además se dedujo que existen épocas secas, pero no son significativas. Sim embargo, en el rango de 8 a 16 contamos con una potencia constante, pero son señales débiles a lo que significa señales de poca significancia.

5.4 Comparación de análisis de la transformada discreta de Fourier y Ondeletas (wavelets).

Fourier proporciona una visión clara de las frecuencias dominantes y su intensidad relativa en momentos específicos por ejemplo cada 12 años, en cambio Wavelets permite observar cómo las potencias de frecuencias cambian a lo largo del tiempo, de esa forma nos ayuda a identificar tendencias y posibles eventos, aunque debemos tener en cuenta que se requiere una curva de significancia clara para validar la importancia de estos eventos. Ambos métodos identifican frecuencias claves relacionadas con eventos climáticos, por ejemplo, eventos de lluvia intensa cada 12 años en Fourier y posibles fenómenos del niño en wavelets. La combinación de ambos métodos proporciona una visión más completa de la evolución temporal de eventos climáticos y su relación con las frecuencias observadas en los datos de la estación hidrológica H166 en la cuenca del rio toachi.

La comparación de los resultados del análisis de las frecuencias de los eventos hidrológicos (Caudal) de la transformada de Fourier (FDT) y Ondeletas (wavelets) para la estación H166 Toachi en la Pampas en la cual podemos describir que la frecuencia con el pico más significativo inicia en una frecuencia de alrededor de 11(1/12) que quieres decir 11 eventos para doce años, realizando la división tenemos un resultado de 0.9166 y una potencia aproximada de 16 lo que indica su magnitud y se refiere que para este periodo existió una gran afluencia de lluvias y posteriormente un decrecimiento fuerte de precipitaciones con forme al paso del tiempo hasta llegar 12(1/12)

(**Ver figura 23**) este es el evento más significativo e importante para la comparación con el análisis de ondeletas dicho evento se lo corrobora en la **figura 31** del espectrograma de potencia de wavelets en donde se observa una línea marcada de color negro para un periodo aproximado de 1 este rango de período indica que hay componentes significativos de la señal a lo largo del tiempo y finalmente podemos apreciar un posible evento de fenómeno del niño en el periodo de 2 a 4 años se marca de colores amarillo y rojo lo que indican una mayor potencia de la señal de frecuencias y tiempos, pero no es muy significativo porque su marcación no es muy clara y se disminuye conforme al tiempo con la combinación de estos dos métodos comprobamos que lo que se aplicó se ha realizado efectivamente porque los resultados de la frecuencia más importantes se observó en la gráfica del espectro de potencia de wavelets.

6. DISCUSIÓN

Los principales logros alcanzados en proyecto de investigación hasta el momento fueron:

El autor (Silva, 1995) recopilo datos directamente de la Agencia Nacional de Aguas (ANA) [71], para este proyecto la recopilación de datos hidrológicos (caudal), se hizo directamente de la plataforma de INAMHI, para las estaciones H166, H167 y H188. Se Analizó la calidad de datos existentes. Para datos faltantes de las estaciones mencionadas se realizó en relleno de datos con dos metodologías, el primer método denominada curva de descarga, logrando rellenar un porcentaje de 6.39 % de datos, en cambio con el segundo método norm.predic (Linear regression, predicted values), logrando completar los datos no disponibles satisfactoriamente para cada estación. Pero el autor (Almeida, 2010), realizan el mismo relleno de datos con el método estadístico [6]. En cambio, el autor (Alfaro, 2010), utiliza el programa SCILAB que desarrolla una herramienta para el rellenado de datos ausentes utilizando información de estaciones cercanas y otra para el rellenado de datos ausentes utilizando el registro histórico de la misma estación [72].

Para la dinámica temporal de los datos hidrológicos (caudal) se utilizando dos métodos ondeletas (wavelets) y la transformada discreta de Fourier. Aplicando la TDF para el presente estudio se encontró similitudes para tres estaciones mencionadas identificando dos picos representativos. El primer pico que comienza en la frecuencia de 11 hasta 11.5 (Eventos/12años) y el segundo pico inicia en la frecuencia de 22.6 hasta 23.0 (Eventos/12 años), cuanto más alto sea el pico, más fuerte es la componente de frecuencia. En cambio el estudio realizado por el autor (Ochoa, 2018), presenta el análisis de frecuencias con la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets tipo Morlet, sobre la señal unidimensional de morfología fluvial [73].

Por otro lado, el análisis de ondeletas empleado en el software RStudio, permite identificar las frecuencias dominantes de los datos de series de tiempo, para el presente estudio los resultados más representativos fueron la curva de significancia para el periodo 1 año indicando 1 (evento/año) que significa regreso anual de las lluvias y el periodo de 0.5 años o medio año indicando 2 (eventos/año) representando la estacionalidad de lluvias fuertes y temporadas secas. Al comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los hallazgos de estudios anteriores, como el realizado por (Cerano Paredes et al., 2020), se observa que la aplicación de ondeletas empleado en el software Matlab ha determinado que cuentan con un área de significancia ($p<0.05$) que corresponde para un y dos años para el periodo 1971 - 1974 y 1979 – 1982, permitido identificar los patrones más

significativos en la serie de datos [74]. La combinación de ambos métodos proporciona una visión más completa de la evolución temporal de eventos climáticos y su relación con las frecuencias observadas en los datos de la estación hidrológica en la cuenca.

7. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

7.1 Conclusiones

- Para el proceso de depuración, corrección y relleno de datos de caudales de las estaciones hidrológicas H166, H167 y H188, se implementó varías metodologías inicialmente, se aplicó la técnica de la curva de descarga, logrando un 6.39% de llenado de datos. Posteriormente, se aplicó una secuencia de métodos empleando el programa RStudio con el paquete "MICE" métodos (pmm), (midastouch), (simple), (cart), (rf), (mean), (norm), (norm.nob), (norm.predict), (lasso.norm), y (ri). llegando a la conclusión que el mejor método de relleno fue (norm.predict) visualizado en el histograma de rellenos de caudales por día.
- Se analizó las frecuencias de los eventos hidrológicos de las estaciones H166, H167 y H188 en base a la trasformada discreta de Fourier en donde se encontró bastante similitud exactamente para los dos picos más elevados. El primer pico y más pronunciado con una frecuencia de inicio de 11(Eventos/12años) hasta 11.5(Eventos/12años) y el segundo pico inicia en una frecuencia de 22.5(Eventos/12años) hasta 23.0(Eventos/12años. Esto se puede explicar porque las estaciones analizadas pertenecen a la misma cuenca de río Toachi la diferencia es la localización H166 se encuentra ubicada en la provincia de Cotopaxi la estación H167 en la provincia de Santo domingo y la estación 188 en la provincia de pichincha la localización es un factor que afecta a la variabilidad de los datos de caudales.
- Se realizó el análisis de ondeletas para la comparación con los resultados del análisis de Fourier complementando y enriqueció los hallazgos del análisis de Fourier al proporcionar una visión detallada de la variabilidad temporal de los eventos hidrológicos. Este método permitió no solo identificar las frecuencias de los eventos, sino también determinar su localización precisa en el tiempo. La combinación de ambos métodos facilitó una comprensión más integral de la dinámica fluvial del río Toachi, permitiendo identificar períodos críticos y eventos excepcionales con mayor precisión.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda obtener datos hidrológicos (Caudal) precisos de instituciones confiables como él (INAMHI), al menos de unos 50 años atrás, para tener un mejor análisis de los eventos que existen a lo largo del periodo.
- Se aconseja realizar el análisis de la transformada discreta de Fourier empleando diversas interfases de softwares (Python y Matlab), con el fin de realizar una comparación de las frecuencias predominantes de los eventos hidrológicos (Caudal) obtenidos.
- Se sugiere para próximos estudios se aplique la creación de graficas que superponga los resultados de ambos análisis (Fourier y Ondeletas) para una comparación visual directa.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. G. B. y L. C. Javier Carmona, Guillermina Alcaraz, “El gran desafío,” 2013, [Online]. Available: https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/107/pdf/107A05.pdf

[2] E. Z. y E. D. María Josefina Tito, “CUADERNOS del CURIHAM, Vol. 22, Año 2016,” vol. 22, no. 1, pp. 1–13, 2016.

[3] J. E. Marulanda López, “Consistencia, homogeneidad y validez de información hidrometeorológica en la cuenca alta del río Chicamocha (1987-2016),” *Angew. Chemie Int. Ed. 6(11), 951–952.*, vol. 3, no. 1, p. 150, 2019, [Online]. Available: https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/42a84958-3f40-489d-a488-f32d4cd790ac/content

[4] T. N. Krishnamurti, L. Stefanova, V. Misra, and A. Introduction, *Tropical meteorology: an introduction*, vol. 51, no. 06. 2014. doi: 10.5860/choice.51-3261.

[5] J. A. G. Toledo, “Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada , Baja California Doctorado en Ciencias en Ecología Marina,” *Diss. (Ciencias en Ecol. Mar. Cent. Investig. Científica y Educ. Super. Ensenada, Baja Calif.*, p. 89, 2019.

[6] M. de la P. A. Roman, “file:///C:/Users/DELL/Downloads/Ceranoetal.2020BAGE.pdf,” p. 167, 2010, [Online]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2527/1/CD-3221.pdf

[7] J. A. Cortés, H. B. Cano-Garzón, and J. A. Chaves, “Del análisis de Fourier a las Wavelets - Transformada continua wavelet (CWT),” *Sci. Tech.*, vol. XIII, no. 37, pp. 133–138, 2007, [Online]. Available: http://en.scientificcommons.org/45793047%5Cnhttp://www.doaj.org/doaj?func=abstract&id=409168%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:INTRODUCCION+A+LA+TEORIA+DE+WAVELETS#0

[8] V. Saavedra-Gastélum, T. Fernández-Harmony, T. Harmony-Baillet, and V. M. Castaño-Meneses, “Ondeletas en ingeniería. Principios y aplicaciones,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 7, no. 3, pp. 185–190, 2006, doi: 10.22201/fi.25940732e.2006.07n3.015.

[9] PNUD, “Progreso sobre Gestión Integrada de Recursos Hídricos,” *Un Water*, pp. 143–173, 2018, [Online]. Available: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/02/ES-Guide-ES_Final-webPDF.pdf

[10] A. Ch and D. Gonz, “El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático,” *RIBAGUA - Rev. Iberoam. del Agu*, vol. 2, no. 1, pp. 3–13, 2015, doi: 10.1016/j.riba.2015.04.001.

[11] A. I. Finca-, “Uso de datos meteorológicos,” pp. 1–10, 2023.

[12] ARANTEC, “La importancia de los datos climáticos.” 2022.

[13] I. Para and L. A. Gestión, “Reflexión sobre dinámica morfosedimentaria. implicaciones para la gestión fluvial en un contexto de cambio global,” pp. 9–12, 2021, doi: 10.7203/CGUV.107.21372.

[14] H. En, L. A. Cuenca, A. Del, R. Í. O. Chicamocha, J. Eduardo, and M. López, “CONSISTENCIA, HOMOGENEIDAD Y VALIDEZ DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA (1987-2017),” 2019.

[15] L. C. Correa Ortiz, O. L. Ocampo López, and M. F. Alba Castro, “Análisis de tendencia de temperatura y precipitación para el departamento de Caldas (Colombia), mediante wavelets,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 31, no. 1, pp. 37–52, 2021, doi: 10.18359/rcin.4900.

[16] A. Laya, P. Gómez Aparicio, F. M. E. Yacuzzi, and J. Manuel, “el nivel hídrico y precipitaciones del lago Titicaca en relación con las variables de macroescala del océano pacifico,” *CIRIEC - España. Revista de economía pública, social y cooperativa*, vol. XXII, no. 45. pp. 653–673, 2018.

[17] A. Frenkel, “predicción de caudales medios mensuales en ríos colombianos usando métodos no lineales.” p. 8, 2017.

[18] T. Alejandra and P. Cabrera, “Evaluación de métodos estadísticos y matemáticos para estimar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita , Pichincha , Ecuador

Evaluation of statistical and mathematical methods to estimate missing pluviometric data in the microbasin of," vol. 16, pp. 1–31, 2024.

[19] G. Yildiz and M. Serdaroglu, "Comprensión de la dinámica de la serie de descargas del río ecuatoriano utilizando Análisis Wavelet y filtros de paso de banda." 2016.

[20] L. Vergara Saturno and W. S. Lavado-Casimiro, "Simulación Y Pronóstico De Caudales Diarios Del Río Amazonas (Tamshiyacu) Usando Modelo Híbrido Wavelet Redes Neuronales," *Ciência e Tecnol. para o Desenvolv. Ambient. Cult. e Socioeconômico II*, pp. 19–37, 2023, doi: 10.37572/edart_2702237672.

[21] M. Quesada, "Análisis cronológico de la precipitación anual y estacional en las ciudades de Naranjo, Palmares y San Ramón, Costa Rica.," vol. 14, pp. 85–100, 2005.

[22] Rigel Gámez Leal, "Tempertura." 2020.

[23] A. Belendez, "Calor y temperatura," *Dep. Física, Ing. Sist. y Teoría la Señal*, pp. 1–21, 2017.

[24] Abelardo Castillo, "Humedad," p. 45, 2018.

[25] A. Jaramillo, "Viento." p. 196, 2017.

[26] Grupo Sisener Ingenieros, "Formacion del Viento y tipos de Vientos," *2023*, p. 20, 2023.

[27] J. R. V. & X. A. Z. Byron P. Corrales, Luis D. Jaya, "978-3-031-51982-6_7 @ link.springer.com." 2024. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-51982-6_7

[28] A. Manzur and J. Cardoso, "Velocidad de evaporación del agua," *Rev. Mex. Fis. E*, vol. 61, no. 1, pp. 31–34, 2015.

[29] C. O. D.-O. E. G.-Á. E. R.-O. F. Castillo-Borja, "METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE EVAPORADORES DE PELÍCULA DESCENDENTE," *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 4, 2013.

[30] R. Zamarripa *et al.*, "A Comparison of Three Transpiration Models in a Tomato Crop Grown Under Greenhouse Conditions," *Terra Latinoam.*, vol. 31, no. 1, pp. 9–21, 2013.

[31] R. S. Ortiz and M. Chile A., "Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco," *Siembra*, vol. 7, no. 1, pp. 070–079, 2020, doi:

10.29166/siembra.v7i1.1450.

[32] C. Campetella, B. Cerne, and P. Salio, “Introducción a la Meteorológia,” *Educar*, pp. 1–52, 2011.

[33] Instituto Metereología e Hidrología de Panamá, “Red de Estaciones.” 2021.

[34] L. O. F. & M. D. A. Wilson Guambo, Byron P. Corrales, “978-981-16-6482-3_55 @ link.springer.com.” 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6482-3_55

[35] L. O. F. & C. I. Quinatoa, “978-981-99-6774-2_32 @ link.springer.com.” 2023. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-6774-2_32

[36] C. Alkalah, “El caudal y sus tipos,” vol. 19, no. 5, pp. 1–23, 2016.

[37] Ontaneda & Núñez, “Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta,” p. 81, 2020.

[38] S. G. Álvarez, M. Jumbo, E. Cabezas, and F. Valverde-Alulema, “Fenómeno climático de El Niño . Posibles impactos en la economía ecuatoriana en,” no. 25, pp. 1–10, 2023.

[39] Vélez Paladines *et al.*, “Fenómeno Del Niño Historia Y Perspectivas,” *Rev. Fac. Cienc. Méd. Univ. Cuenca. Diciembre*, vol. 33, no. 3, pp. 110–115, 2015.

[40] J. L. Gallego Gómez, “Análisis de series temporales,” *LADE y LE*, vol. 1, no. Análisis temporal, pp. 111–128, 2008.

[41] A. D. E. Arcgis, T. De, and E. M. Mateos, “Representación Dinámica De Variables Espacio-Temporales Con Las Tracking Analyst Tools Y,” 2014.

[42] C. P. Michelle Vásconez, Andrea Mancheno, César Álvarez and C. C. y L. Ortiz, *Cuencas Hidrográficas*. 2019.

[43] A. D. P. Arias-muñoz, R. P. Jiménez-illapa, and J. Renato, “HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI-ECUADOR,” 2023.

[44] I. D. G. M. Helena Cotler Ávalos, Adalberto Galindo Alcántar and R. F. P. L. y E. R. Patrón, “Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.,” 2013.

[45] C. A. García Rengifo, “La variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi

Grande y su importancia para los sistemas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito," 2022.

[46] G. A. Pérez-guerra, I. Sosa-franco, N. Machado-garcía, and M. E. Ruiz-pérez, "Herramientas SIG , revisión de sus fundamentos , tipos y relación con las bases de datos espaciales GIS Tools , Review of their Foundations , Types and Relationship with Spatial Databases," vol. 32, no. 3, 2023.

[47] Universidad Veracruzana, "Manual operativo para la utilización del sistema de información geográfica Quantum GIS 1 . 8," pp. 1–45, 2013.

[48] J. Barrios, "Cartografía hidrico-urbana para el análisis de las cuencas hidrográficas.," *QRU Quad. Recer. en Urban.*, vol. 13, pp. 138–167, 2022.

[49] J. Ordóñez, "¿ Qué Es Cuenca Hidrólogica ?," *Soc. Geológica Lima*, vol. 1, pp. 1–44, 2011, [Online]. Available: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf

[50] Madeleine Renom, "ESTACIONES METEOROLOGICAS," *Fac. Ciencias-UdelaR*, vol. 4, no. 3, pp. 410–419, 2011.

[51] C. J. A. E. P. F. C. FREIRE, "COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE RELLENO DE DATOS FALTANTES DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO," 2023.

[52] A. / H. y Monitorización, "Curvas de descarga y sus factores condicionantes." 2024.

[53] J. R. A. L. Denisse Alexandra Marcillo Barahona, Paul Adrián Vivas Alcívar, "Evaluación de la fuente de incertidumbre en la curva de descarga de la microcuenca 'Las Flores', San Sebastián, Manabí, Ecuador.," no. 20, 2021.

[54] J. B. Hoffman, D. W, "Manual Rstudio," 2022.

[55] S. van Buuren and K. Groothuis-Oudshoorn, "mice: Multivariate imputation by chained equations in R," *J. Stat. Softw.*, vol. 45, no. 3, pp. 1–67, 2011, doi: 10.18637/jss.v045.i03.

[56] L. R. Castro and S. M. Castro, "Wavelets y sus Aplicaciones," *Congr. Argentino Ciencias la Comput.*, pp. 195–204, 2012.

[57] S. Kouro, R. Rodrigo, and A. A. De Fourier, “Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet,” 2004.

[58] W. Gómez, “Introducción al Análisis de Fourier Transformada de Fourier discreta,” 2022.

[59] F. Carlos, A. Jiménez, I. Tecnológico, and D. C. Rica, “MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (MAS),” 2018.

[60] D. Boersma, Paul & Weenink, “Espectrograma.” 2022.

[61] Patrick Flandrin, “periodogram.” 2024.

[62] M. E. Paz, G. Friedrich, and C. L. Galasso, “Procesamiento de señal visualizado sobre un espectrograma,” *Elektron*, vol. 4, no. 1, pp. 35–39, 2020, doi: 10.37537/rev.elektron.4.1.90.2020.

[63] T. H.-B. Saavedra-Gastélum, V. T. Fernández-Harmony and y V. M. Castaño-Meneses, “Ondeletas en ingeniería. Principios y aplicaciones,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. VII, no. 3, pp. 185–190, 2006.

[64] P. S. M. B. Bossoufi, *Digital Technologies and Applications*, vol. NA, no. Icdta 22. 2021.

[65] D. Clim, “Análisis Armónico en Matlab,” 2013.

[66] J. M. Polanco Martínez, “Análisis espectral de wavelet: una concisa revisión,” *Univ. Salamanca, Salamanca, España*, vol. 22, pp. 51–95, 2022.

[67] C. L. C. R. Oscar Daniel Beltrán Rodríguez, “APLICACIÓN DE ONDELETAS EN DATOS DE POSICIONAMIENTO CONTINUO PARA LA REGIÓN COLOMBIANA CON FINES GEODINÁMICOS.” 2011.

[68] R. Salazar, J; Tipán, “Río Toachi,” no. 1, pp. 1–14, 2022.

[69] T. García-Muñoz and A. Giler-Ormaza, “Análisis de estacionalidad del caudal y la dinámica del régimen fluvial: Aplicación al río Guayllabamba,” *Polo del Conoc.*, vol. 6, no. 6, pp. 24–39, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i6.2740.

[70] D. Mohama, “Transformada Discreta de Fourier (DFT).” 2016.

[71] R. Naturais and D. Ufpe, “USO DE ONDALETAS PARA ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO DO ALTO MUNDAÚ (PE) Djane Fonseca da Silva 1 e Mary Toshie Kayano 2 1,” pp. 180–

195, 1995.

[72] E. J. Alfaro and J. S. F, “El Tipo de Cambio Real,” *Integr. Vlsi J.*, vol. 16, no. 2007–01, p. 33, 2010, [Online]. Available: http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4_BxecUaZmg%3D%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/rium/v7n12/v7n12a07.pdf

[73] S. Ochoa, T. Reyna, M. García, H. Herrero, A. Heredia, and M. Díaz, “A f f s r a p p,” 2018.

[74] J. Cerano Paredes, G. Esquivel Arriaga, I. Sánchez Cohen, and J. R. Estrada Arrellano, “Análisis temporal de sequías meteorológicas en la cuenca del Río Yaqui (México) y su relación con ENSO,” *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles*, no. 86, 2020, doi: 10.21138/bage.2937.