



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Zonificación de áreas inundables utilizando datos
CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR

César José URIARTE CHAVESTA

ASESOR

Dr. Augusto Guillermo BRAVO MALCA

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Uriarte, C. (2024). *Zonificación de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	César José Uriarte Chavesta
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75574923
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1284-1099
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Augusto Guillermo Bravo Malca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06016801
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6314-9919
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Giuliana Patricia Becerra Celis
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40745335
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alex Segundino Armas Blancas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07568033
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Freddy Atuncar Yrribari
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25527597

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.3.1. Procesamiento de Imágenes de Satelitales y Modelado
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cajamarca Provincia: Chota Distrito: Lajas Latitud: -6.5590 Longitud: -78.7346
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2023 - marzo 2024
URL de disciplinas OCDE	Ciencias ambientales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#5.07.01 Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04 Estadísticas, Probabilidad https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.01.03



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; el día 03 de Julio del año 2024, siendo las 12:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

Dra. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS	(Presidenta del Jurado)
Mg. ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS	(Miembro del Jurado)
Mg. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI	(Miembro del Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación del Tesista Bachiller CÉSAR JOSÉ URIARTE CHAVESTA quien sustentara la Tesis Titulada:

“ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES UTILIZANDO DATOS CHIRPS, EN LA LOCALIDAD DE LAJAS, REGIÓN CAJAMARCA” para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A..... SATISFACCIÓN

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue: 17 (DIECISIETE)
..... APROBADO CON MENCIÓN HONROSA

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL al Bach. CÉSAR JOSÉ URIARTE CHAVESTA



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Siendo las 13:00 horas se dio por concluido el acto académico,
expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Dra. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS
PRESIDENTA DEL JURADO

Mg. ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS
MIEMBRO DE JURADO

Mg. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI
MIEMBRO DE JURADO

Mg. AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA
ASESOR



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú, Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Augusto Guillermo Bravo Malca en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000491-2024-D-FIGMMG/UNMSM de fecha 06 de Junio del 2024 de la tesis cuyo título es "Zonificación de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca", presentado por el bachiller **CÉSAR JOSÉ URIARTE CHAVESTA** para optar el título de Ingeniero Ambiental CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual.

Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 16 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Firma del Asesor: _____

DNI: 06116801

Nombres y apellidos del asesor: Augusto Guillermo Bravo Malca



RESUMEN

Este estudio tiene como propósito principal determinar las zonas de áreas inundables en la localidad de Lajas, ubicada en la provincia de Chota, Cajamarca, mediante la utilización de datos de la Red de Precipitación Climática de Alto Rendimiento (en adelante: «datos CHIRPS», por sus siglas en inglés). Se destaca la importancia de considerar eventos extremos y se resalta la escasez de datos hidrometeorológicos en la región. La metodología empleada implica el uso de datos satelitales CHIRPS a través de su interfaz de programación de aplicaciones (en adelante: «API», por sus siglas en inglés) para estimar caudales durante máximas avenidas, así como la generación de secciones transversales que indican la profundidad del caudal y el área probablemente inundable.

La implementación de este proceso incluyó la elaboración de hietogramas de diseño de tormenta mediante un algoritmo específico programado en el lenguaje de programación R. Posteriormente, se desarrolló un modelo hidrológico utilizando el método del Número de Curva, se procedió a su calibración y se obtuvieron los caudales máximos probables. La integración de estos datos, junto con parámetros de Muskingum y un levantamiento topográfico realizado mediante fotogrametría con el Dron DJI Mavic Mini 2, permitió la creación del modelo hidráulico, que a su vez generó las secciones transversales y delineó las áreas propensas a inundaciones. Se obtuvo 3.7, 4, 4.2, 4.8, 5.6 y 5.8 metros de profundidad máxima y 51.3, 71.5, 90.9, 155.1, 193.3 y 237.5 m³/s de caudal en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 150 años, respectivamente. Se pudo identificar que la zona crítica con mayor riesgo a inundaciones se encuentra en la zona inmediatamente anterior a la confluencia del Chotano con el río Jalqueño, que en la actualidad se encuentra el camal municipal. En el presente estudio se pudo determinar las áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca, empleando datos CHIRPS generando las secciones transversales y mapas de inundaciones para diferentes periodos de retorno.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ÍNDICE GENERAL.....	3
CAPÍTULO I	9
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Introducción	9
1.2. Planteamiento del problema	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Justificación y alcance de la investigación.....	15
CAPÍTULO II.....	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes de la investigación	17
2.2. Bases teóricas	21
2.3. Glosario	35
CAPÍTULO III.....	38
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES	38
3.1. Hipótesis.....	38
3.2. Las variables.....	38
3.3. Operacionalización de variables.....	39
3.4. Matriz de consistencia	40
CAPÍTULO IV	41
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
4.1. Área de estudio.....	41

4.2.	Diseño de la investigación.....	41
4.3.	Población y muestra	42
4.4.	Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información..	42
4.5.	Procesamiento de información	50
CAPÍTULO V		67
5.	RESULTADOS	67
5.1.	Caudales probables en máximas avenidas calibrados	67
5.2.	Simulación del caudal en HEC-RAS	67
5.3.	Zonificación de áreas inundables	68
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
7.1.	Conclusiones	75
7.2.	Recomendaciones.....	76
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
9.	ANEXOS.....	89
ANEXO 1.	Panel fotográfico.....	90
ANEXO 2.	Hietogramas de cada subcuenca	92
ANEXO 3.	Perfil de nivel de agua en secciones transversales.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de Kn para la prueba de datos dudosos.....	25
Tabla 2 Reclasificación de valores de Número de Curva del SCS.....	31
Tabla 3 Valores del coeficiente de Manning para cauces naturales comunes.....	34
Tabla 4 Valores de coeficiente de rugosidad para acueductos de tablón	34
Tabla 5 Operacionalización de variables.....	39
Tabla 6 Valores de Número de Curva (CN) y abstracción inicial determinados y calibrados.....	44
Tabla 7 Valores de rugosidad de Manning del área de estudio	49
Tabla 8 Precipitación máxima anual de 24 horas corregida en cada centroide	53
Tabla 9 Precipitación extrapolada por subcuenca y errores	58
Tabla 10 Hietogramas de la subcuenca W150	63
Tabla 11 Valores de tiempo de retardo y Muskingum	65
Tabla 12 Caudales máximos probables en el punto final de la cuenca y en el punto de calibración calculados por periodo de retorno	67
Tabla 13 Hietogramas de la subcuenca W170	92
Tabla 14 Hietogramas de la subcuenca W180	92
Tabla 15 Hietogramas de la subcuenca W190	93
Tabla 16 Hietogramas de la subcuenca W220	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años en la localidad de Chota	20
Figura 2. Nivel de Riesgo a Inundaciones por Desborde del Río Jalqueño	21
Figura 6 Mapa de ubicación del área de estudio	41
Figura 7 Cuencas y subcuencas.....	43
Figura 8 Mapa de valores de Número de Curva de la cuenca de estudio.....	44
Figura 9 Planificación de vuelo para levantamiento topográfico en Drone Harmony	45
Figura 10 Nube de puntos densa que captura el modelo tridimensional del área de estudio en Agisoft Metashape.....	46
Figura 11 Ortomosaico generado del área de estudio	46
Figura 12 Curvas de nivel del área de estudio a 0.5 metros obtenido por fotogrametría	47
Figura 13 Hidrograma de calibración estimado para el periodo de retorno de 100 años	48
Figura 14 Mapa de ubicación del punto de calibración.....	48
Figura 15 Secciones transversales del Río Chotano.....	49
Figura 16 Código para la generación de centroides	51
Figura 17 Código para hacer la prueba de datos dudosos	52
Figura 18 Código para determinar la precipitación máxima anual de 24 horas corregida.....	52
Figura 19 Código para extrapolar mediante la distribución normal.....	55
Figura 20 Código para extrapolar mediante la distribución Log-Normal	55
Figura 21 Código para extrapolar mediante la distribución Pearson tipo III	56
Figura 22 Código para extrapolar mediante la distribución Log-Pearson tipo III	56
Figura 23 Código para extrapolar mediante la distribución Gumbell	57
Figura 24 Código para obtener extrapolación	57
Figura 25 Código para obtener de la precipitación promedio de la subcuenca.....	59
Figura 26 Código para la generación de un hietograma.....	61
Figura 27 Código de la obtención de lista de hietogramas.	62

Figura 28 Aplicación e ingreso de los parámetros de las funciones.....	62
Figura 29 Código para la exportación de listas a formato .xlsx	63
Figura 30 Modelo hidrológico de la cuenca del río Chotano hasta Lajas	64
Figura 31 Diagrama de flujo	66
Figura 32 Perfil de nivel de agua en sección transversal 30.....	67
Figura 33 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 2 años.....	68
Figura 34 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 5 años.....	68
Figura 35 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 10 años.....	69
Figura 36 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 50 años.....	69
Figura 37 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 100 años.....	70
Figura 38 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 150 años.....	70
Figura 39 Zona de alto riesgo a inundaciones del río Chotano y Jalqueño	73
Figura 40 Limpieza de puntos de copas de árboles del cauce en el modelo tridimensional	74
Figura 41 Destrucción del muro de encausamiento en Lajas	90
Figura 42 Fotografías del cauce del río Chotano en la zona de estudio	90
Figura 43 Fotografía aérea de Lajas.....	91
Figura 44 Fotografía aérea de la zona de la confluencia del río Chotano	91
Figura 45 Perfil de nivel de agua en sección transversal 60.....	96
Figura 46 Perfil de nivel de agua en sección transversal 90.....	96
Figura 47 Perfil de nivel de agua en sección transversal 120.....	97
Figura 48 Perfil de nivel de agua en sección transversal 150.....	97
Figura 49 Perfil de nivel de agua en sección transversal 180.....	98
Figura 50 Perfil de nivel de agua en sección transversal 210.....	98
Figura 51 Perfil de nivel de agua en sección transversal 240.....	99
Figura 52 Perfil de nivel de agua en sección transversal 270.....	99
Figura 53 Perfil de nivel de agua en sección transversal 300.....	100

Figura 54 Perfil de nivel de agua en sección transversal 330.....	100
Figura 55 Perfil de nivel de agua en sección transversal 360.....	101
Figura 56 Perfil de nivel de agua en sección transversal 390.....	101
Figura 57 Perfil de nivel de agua en sección transversal 420.....	102
Figura 58 Perfil de nivel de agua en sección transversal 450.....	102
Figura 59 Perfil de nivel de agua en sección transversal 480.....	103
Figura 60 Perfil de nivel de agua en sección transversal 510.....	103
Figura 61 Perfil de nivel de agua en sección transversal 540.....	104
Figura 62 Perfil de nivel de agua en sección transversal 570.....	104
Figura 63 Perfil de nivel de agua en sección transversal 600.....	105
Figura 64 Perfil de nivel de agua en sección transversal 630.....	105
Figura 65 Perfil de nivel de agua en sección transversal 660.....	106
Figura 66 Perfil de nivel de agua en sección transversal 690.....	106
Figura 67 Perfil de nivel de agua en sección transversal 720.....	107

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El asentamiento de las ciudades en áreas cercanas a ríos tiene una razón estratégica económica debido a la necesidad del recurso hídrico para el desarrollo de las actividades humanas. No obstante, este hecho vuelve vulnerable a la población al desborde del río provocando inundaciones que pueden afectar la vida de los ciudadanos generando pérdidas económicas y posiblemente, pérdidas humanas (Orellana, 2021). Las fluctuaciones de los niveles de caudal de los ríos son impredecibles y pueden desencadenar eventos extremos con consecuencias desastrosas, lo que subraya la importancia de implementar medidas de mitigación y prevención (Serna, 2017). En el Perú, las inundaciones causadas por desbordos de ríos son un problema frecuente a causa de intensas lluvias asociadas al fenómeno del niño y al cambio climático (Ccorimanya, 2018).

Para llevar a cabo una de las alternativas de mitigación y prevención, se tiene que hacer estudios para estimar condiciones extremas previamente al diseño, para eso se necesita tener suficiente información histórica de monitorización del río. A pesar de que el Ministerio de Transportes y Comunicaciones nos muestra algunas sugerencias de diseño para la creación de estudios hidrológicos e hidráulicos que, bajo ciertas hipótesis, pueden indicar la probabilidad de ocurrencia de crecidas, usando la información meteorológica e hidrológica proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), no todos los lugares cuentan con los datos suficientes para llevar a cabo un estudio así. En la mayor parte del Perú aún no se cuenta con suficiente densidad de estaciones y datos meteorológicos históricos (Aybar, y otros, 2017). Además, existe una escasa cultura de prevención que limita la asignación de recursos para contar con una serie de proyectos y no permite una asistencia inmediata de las zonas vulnerables (Autoridad Administrativa del Agua, 2016).

En 2017, la provincia Chota en Cajamarca ha experimentado intensas lluvias ligadas al fenómeno del niño generando inundaciones por el desborde de ríos que afectaron al el 1.9% la población provincial que se tradujo en 407 viviendas dañadas, 22 instituciones educativas afectadas de las cuales 2 quedaron inhabilitadas, 3 establecimientos de salud afectados, daño en áreas de cultivo, carreteras y caminos (Ydrogo, 2021). Las repercusiones de esta situación han expuesto a la población a riesgos sanitarios, experimentando así las consecuencias de la emergencia.

Lajas, una localidad estratégicamente ubicada en las proximidades de la confluencia entre el río Chotano y el río Jalqueño en la provincia de Chota, alberga una población de 2,167 habitantes según el Censo Nacional de 2017 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, s.f.). Según el informe de emergencia de lluvias en el departamento de Cajamarca del 2023, se ha reportado lluvias intensas en la provincia de Chota produciendo aumentos del nivel de caudal de los ríos, derrumbes, activación de quebradas, etc. y en Lajas se han reportado 5 personas damnificadas, 31 afectadas, 3 viviendas destruidas, 23 viviendas afectadas y 2 aulas de infraestructura educativa afectadas. (Centro de Operaciones de Emergencia Nacional, 2023). Según Yrigoín & Vásquez (2023), el río Jalqueño, uno de los afluentes del río Chotano que confluye en Lajas, muestra un nivel de peligrosidad de alto a muy alto y recomiendan llevar a cabo un estudio sobre el peligro de desbordamiento del río Chotano, que atraviesa la comunidad de Lajas, con el objetivo de integrar los hallazgos al análisis global de gestión de riesgos por inundaciones en la ciudad de Lajas; sin embargo, la información meteorológica registrada es limitante.

El presente trabajo trata de abordar la situación de riesgo por inundaciones de la población de la localidad de Lajas en Cajamarca, pues estos eventos podrían generar pérdidas materiales, económicas y de vidas. Se pretende determinar las zonas de áreas inundables a lo

largo del curso del río Chotano y las zonas circundantes de la localidad de Lajas, extendiéndose hasta un punto inmediatamente anterior a la afluencia del río Jalqueño.

Este trabajo se llevó a cabo dado el interés de la población por los daños que han producido las inundaciones hasta la fecha en la localidad de Lajas. La determinación de caudales en máximas avenidas, sus secciones transversales y el área de inundación, proporcionaría información fundamental que puede emplearse como punto de partida en la planificación de proyectos dirigidos a la mitigación o prevención de eventos adversos en esta localidad.

Para conocer los caudales en las máximas avenidas se necesitó información de precipitación de toda la cuenca de captación; sin embargo, el lugar cuenta con limitada información registrada de datos hidrometeorológicos, por ello se recurrió a tecnologías satelitales como los datos CHIRPS que pueden obtener valores admisibles y fiables para el análisis de eventos extremos en periodos húmedos, además de presentar mayor facilidad en la obtención de datos de manera indirecta para el procesamiento. Para lograr ello, se obtuvo la información de precipitación mediante el API de CHIRPS para el lenguaje de programación R. En RStudio, se diseñó y ejecutó un algoritmo específico para generar los hietogramas de diseño de tormentas en diferentes periodos de retorno correspondientes a cada una de las subcuencas. Para calcular la precipitación efectiva durante las máximas avenidas, se empleó el método del Número de Curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Este proceso se llevó a cabo mediante el uso del software HEC-HMS para el modelado hidrológico, que requiere información clave como los hietogramas, la cuenca de captación, el mapa del número de curva y los parámetros de Muskingum. Es importante señalar que los parámetros de Muskingum son valores específicos utilizados en este método de enrutamiento hidrológico para caracterizar la forma y la velocidad de propagación de la onda de flujo en el

sistema. Posteriormente, el modelo fue calibrado para garantizar su precisión, y se obtuvieron los caudales correspondientes a las máximas avenidas en diversos períodos de retorno.

Para llevar a cabo la simulación hidráulica, se realizó un levantamiento topográfico mediante fotogrametría con la aplicación Agisoft Metashape. Esta etapa incluyó la planificación de vuelo a través de la plataforma web Drone Harmony, determinando que se necesitaban 399 fotografías con un 72% de superposición para abarcar la totalidad del área de estudio. La ejecución de esta fase fue eficiente, completándose en aproximadamente una hora. Posteriormente, se llevó a cabo el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, que demanda información topográfica, caudales en máximas avenidas y parámetros como los coeficientes de rugosidad de Manning. Este proceso permitió obtener secciones transversales y delimitar el área de inundación correspondiente.

Como resultado de la investigación, se logró determinar las cuencas y subcuencas dentro del área de captación del río Chotano hasta Lajas. Se calculó el promedio de la curva número para cada subcuenca, y utilizando los datos de CHIRPS, se estimaron los caudales probables durante las máximas avenidas calibradas. Los resultados del modelamiento hidrológico se expresan en metros cúbicos por segundo, siendo de 94.7, 121.6, 146.8, 225.8 y 271.0 para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 150 años, respectivamente. En cuanto al modelamiento hidráulico que, usando las curvas de nivel del levantamiento topográfico por fotogrametría, los caudales y parámetros de Muskingum se obtuvieron las secciones transversales y las áreas de posible inundación. Se ha observado que el lugar actualmente cuenta con muros de concreto que limitan la inundación por lo que existe la posibilidad de que ello limite las inundaciones en periodos húmedos.

La investigación realizada ha demostrado que los datos CHIRPS desempeñan un papel crucial en la determinación de la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca. Con los datos CHIRPS se pudo para calcular la precipitación efectiva durante

las máximas avenidas, y esta información fue fundamental para determinar las zonas de riesgo de inundación en la localidad de Lajas. Los resultados sugieren la presencia de una potencial área de inundación en las inmediaciones previas a la confluencia del río Chotano con el río Jalqueño, destacando la zona que alberga el camal Municipal, especialmente en periodos de retorno de 50, 100 y 150 años.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Situación problemática

Las fluctuaciones impredecibles de los niveles de caudal de los ríos, pueden desencadenar eventos extremos con graves consecuencias. La localidad de Lajas, ubicada estratégicamente en la confluencia de los ríos Chotano y Jalqueño, enfrenta un riesgo considerable de inundaciones (Yrigoín & Vásquez, 2023). A pesar de la canalización con estructuras de concreto en ciertas secciones de los ríos en Lajas, se evidencian áreas donde la fuerza erosiva ha ocasionado la destrucción de los muros de contención, afectando las zonas circundantes. En 2022, en el distrito de Lajas, la creciente intensidad de los ríos y la destrucción de dos canales de irrigación no solo resultaron en la inundación de áreas de cultivo, sino que también causaron daños a varias entidades gubernamentales (Machuca, 2022).

Se destaca la importancia de realizar estudios para identificar la zonificación de inundación por desbordamiento de los ríos, integrar estos hallazgos en la gestión de riesgos por inundaciones en la región e implementar medidas de mitigación y prevención. Para realizar este tipo de estudios se requiere realizar estudios hidrológicos e hidráulicos que estimen condiciones extremas con base en datos históricos de monitorización del río; sin embargo, la disponibilidad de información hidrológica y meteorológica en muchas áreas, como la provincia de Chota en Cajamarca, es limitada y las zonas cercanas a Lajas, se carece de una densidad adecuada de estaciones meteorológicas (Aybar, y otros, 2017).

Con lo mencionado anteriormente, la localidad de Lajas requiere una evaluación de eventos climáticos extremos para desarrollar estrategias de mitigación y prevención. En este marco, dado que la disponibilidad de información hidrológica y meteorológica de estaciones terrestres es limitada, se plantea la necesidad de explorar alternativas, como la utilización de datos CHIRPS, con el objetivo de determinar las áreas propensas a inundaciones en la localidad de Lajas, ubicada en la región de Cajamarca.

1.2.2. Formulación del problema

1.2.2.1.General

¿En qué medida los datos CHIRPS determinan la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca?

1.2.2.2.Específico

- ¿El cálculo de las máximas avenidas en diferentes periodos de retorno, permitirán a la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca?
- ¿La simulación del comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS permitirán la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca?
- ¿Con el cálculo de avenidas y simulación del río Chotano se podrá elaborar el mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas, en la región Cajamarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar las zonas de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca.

1.3.2. Específicos

- Calcular las máximas avenidas probables en diferentes periodos de retorno con las herramientas HEC-GeoHMS y HEC-HMS empleando datos CHIRPS.
- Simular el comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS.
- Elaborar un mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas.

1.4. Justificación y alcance de la investigación

1.4.1. Justificación teórica

La utilización de datos satelitales, en particular los datos CHIRPS, son importantes para estimar la precipitación efectiva durante las máximas avenidas representa un avance significativo pues en muchas regiones existe una escasez de información hidrometeorológica histórica, como se destaca en el caso de la localidad de Lajas, y resalta la necesidad de explorar y desarrollar metodologías que puedan utilizar datos satelitales para abordar problemas provocados por las inundaciones ampliando las posibilidades de investigación en regiones con datos limitados y contribuye al desarrollo de métodos que podrían aplicarse globalmente.

Además, la implementación de un algoritmo específico en R para la generación rápida de hietogramas de precipitación es una contribución para la comunidad académica y profesional. La automatización de este proceso facilita la obtención de datos necesarios para el modelamiento hidrológico y puede servir como una herramienta práctica para futuras investigaciones en áreas similares.

1.4.2. Justificación práctica

La determinación de las zonas propensas a inundaciones y la simulación hidráulica del tramo del río Chotano que atraviesa la localidad de Lajas proporcionan información para la toma de decisiones en términos de diseño de infraestructuras de mitigación, planificación

urbana y respuesta ante emergencias para anticipar y planificar medidas. Las secciones transversales pueden ser utilizada para diseñar estructuras de contención y evaluar la efectividad de las medidas existentes.

1.4.3. Justificación social

El proyecto contribuye al desarrollo de proyectos de mitigación y prevención de inundaciones para la seguridad y bienestar de la comunidad de Lajas y sienta las bases para el desarrollo de estrategias de gestión de riesgos en otras regiones con limitaciones similares de datos hidrometeorológicos.

Este trabajo de investigación se alinea con el tercer objetivo de desarrollo sostenible, el cual se centra en la salud y el bienestar de las comunidades, y también concuerda con el undécimo objetivo de desarrollo sostenible, que busca que las ciudades sean seguros y resilientes. En este contexto, el proyecto se centra en mejorar la calidad de vida y la seguridad de aquellas comunidades que son más vulnerables y están expuestas a riesgos relacionados con el aumento del caudal en los ríos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacionales

Duque-Sarango, Patiño, & López (2019), en su estudio titulado **«Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical»** se propusieron modelar la microcuenca Chaquilcay para el análisis de inundaciones y proponer medidas de minimización de daños, para ello buscaron simular el comportamiento hidrológico con HEC-HMS usando curvas IDF para la elaboración de hietogramas con datos pluviométricos, para el transito de avenidas se usó Muskingum Cunge, calcularon la abstracción inicial con el método SCS; los resultados indican que el 25% de la precipitación produce escorrentía directa, además concluyó que la metodología aplicada, a pesar de la limitada cantidad de información, puede obtener resultados aceptables.

Castillo (2019) es su trabajo: **«Validación y calibración del modelo HEC-HMS para la simulación del tránsito de avenidas en una cuenca hidrográfica con antecedentes asociados a fenómenos de inundación»**; buscó determinar la calidad y la relación con la realidad del uso de este programa para el modelamiento hidrológico; usó datos meteorológicos para el modelo, valores iniciales de Número de Curva, y datos de caudales observados para la calibración del modelo; los resultados fueron la simulación de diversos escenarios de los que concluyó que los modelos calibrados y validados obtienen valores admisibles para la simulación de futuros escenarios.

Mora & Ochoa (2016) en su trabajo denominado: **«Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz del Río a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá»**, tiene por objetivo modelar el río Chicamocha para mapear las

zonas de inundación; calcularon los caudales con el método racional usando datos de precipitación histórica de 45 años, la distribución de probabilidad de Gumbel para hallar la precipitación probable en distintos periodos de retorno y las curvas IDF para hallar las máximas intensidades; procesaron los datos en ARCGIS, HEC-GeoRAS y HEC-RAS, obteniéndose el mapa y las huellas de inundación, y el porcentaje inundable de cada municipio; en conclusión, se pudo anticipar la probabilidad de una inminente amenaza que atenta contra la población pudiendo inundarse el 80% en un periodo de retorno de 5 años y complementemente, en 100 años.

2.1.2. Nacionales

Ccorimanya (2018), en su trabajo titulado: **«Diseño de defensas ribereñas en el río Chili, para el tramo comprendido entre el poblado de Chusicani y Arancota, distrito de Sachaca, en una longitud de 1.3km»** tuvo como objetivo diseñar defensas ribereñas contra desbordes, para ello realiza modelamiento con HEC-HMS para la obtención de caudales mediante el uso de datos de precipitación de estaciones meteorológicas, con ello evalúa las secciones transversales modelando con HEC-RAS para obtener información para el diseño de las defensas en CIVIL 3D; los resultados fueron que a un periodo de retorno de 100 años el caudal alcanzaría 3 metros de altura como máximo siendo la profundidad mínima de 0.3m y máxima de 1.2m, concluyendo que la zona es vulnerable al desborde y necesita un dique de 3.5m de altura.

Orellana (2021), su trabajo titulado: **«Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS »** tiene por objetivo desarrollar el modelamiento para analizar las inundaciones en la cuenca del río Piura para proponer medidas de mitigación; se realizó mediante la recolección pluviométrica, completado de datos faltantes con datos grillados PISCOp, procesamiento en HEC-GEORAS, modelamiento hidrológico en HEC-HMS, procesamiento en HEC-GEORAS para su modelar las inundaciones e identificar el área inundable. Se tuvo que calibrar con datos observados

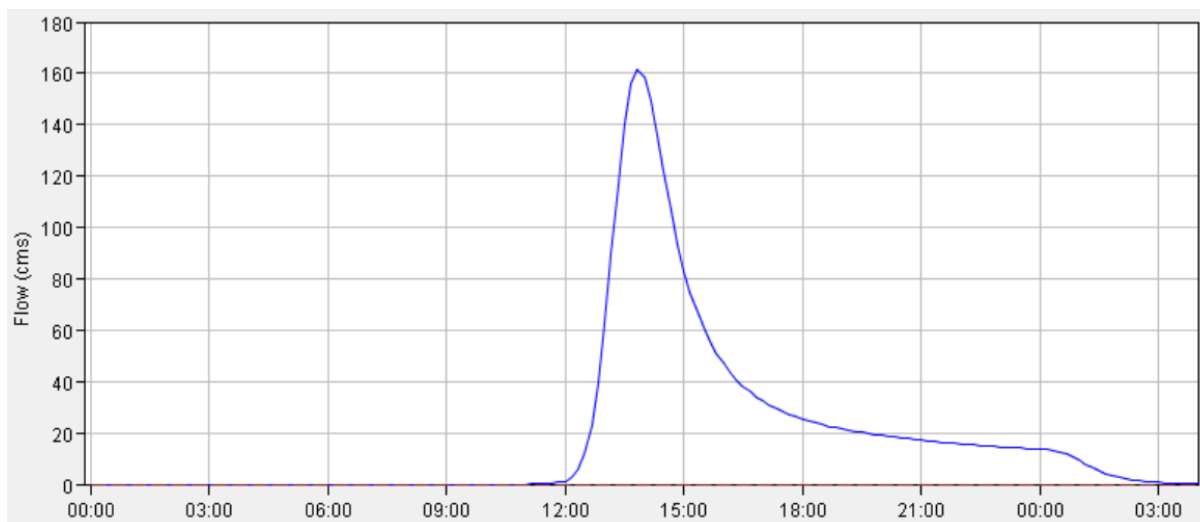
modificando el Número de Curva y los parámetros de Muskingum; determinó el caudal máximo en cada periodo de retorno mostrando 5,477 m³/s en 100 años y 1,900 m³/s en 50 años en donde se empiezan a generar pequeños desbordes.

Espinoza & Neyra, 2019, en su tesis titulada: «**Modelar el comportamiento hidráulico a partir de regímenes hidrológicos de la Quebrada Bomboca, del C.P-Chunchuquillo, para obtener la máxima avenida**», tiene por objetivo modelar el comportamiento hidráulico de la Quebrada Bomboca, ubicada en el centro poblado de Chunchuquillo, usando los regímenes hidrológicos; para ello recopila información de precipitación de 24 horas en distintas estaciones y extrapola mediante las funciones de distribución Normal, Log Normal 2 parámetros, Log Normal 3 parámetros, Gamma 2 parámetros, Gamma 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel y Log Gumbel, además aplica el método de bloque alterno para generación de hietogramas; aplica el método DEL hidrograma sintético triangular del SCS con el Número de Curva, se modela el comportamiento del río en HEC-RAS; por ultimo de calcula la socavación por el método de Lischtván –Levedlev; los resultados obtenidos fueron los caudales máximos de 24.624 m³/s para 2 años, 38.528 m³/s para 5 años, 50.863 m³/s para 10 años, 70.842 m³/s para 25 años, 96.712 m³/s para 100 años, 119.642 m³/s y 149.293 m³/s para 500 años, concluyendo que las áreas altamente vulnerables a inundaciones están ubicadas en el margen derecho de la quebrada donde hay zonas pobladas.

En Chota, Ydrogo (2021) realizó un trabajo titulado: «**Estudio de inundabilidad del río chotano en las comunidades de Aygasbamba, Toril, Pingobamba, Chororco y la Iraca aplicando modelos matemáticos en el distrito y provincia de Chota, Cajamarca 2020**» con el objetivo de analizar posibles inundaciones de un tramo de 7.5km por donde se asientan 5 comunidades. Este trabajo se realizó con simulaciones hidráulicas e hidrológicas con los programas IBER y HEC-HMS, respectivamente, usando el método SCS. Como resultados se obtuvo los caudales máximos para distintos periodos de retorno: 99.6 m³/s para 20 años, 132.1

m³/s para 50 años, 161.5 m³/s para 100 años, 195.5 m³/s para 200 años y 248.6 m³/s para 500 años. Para un periodo de retorno se obtuvo el siguiente hidrograma:

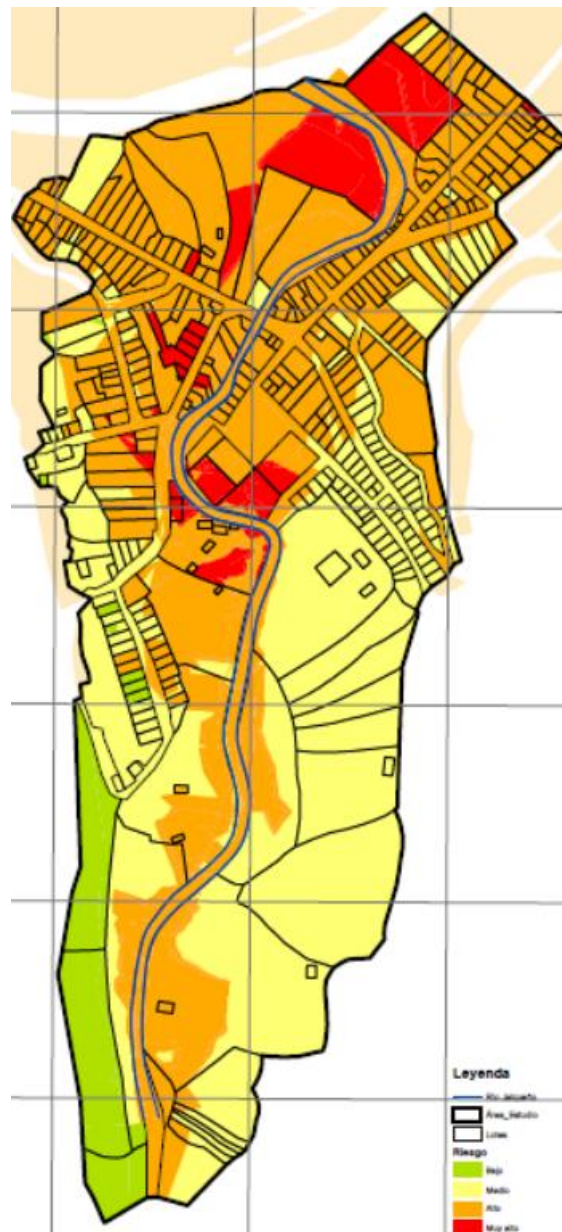
Figura 1 Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años en la localidad de Chota



Fuente: Ydrogo (2021)

En Lajas, Yrigoín & Vásquez (2023) realizaron el trabajo titulado: *«Evaluación del nivel de riesgo a inundación por desborde del río Jalqueño en la ciudad de Lajas, Chota, 2022»* con el objetivo de determinar en la ciudad de Lajas el nivel de riesgo a inundación por desborde del río Jalqueño. Este trabajo realizó un levantamiento topográfico y el modelamiento con HEC-RAS usando caudales máximos por el Método Racional Modificado que a su vez éste utilizó solamente las precipitaciones registradas de la estación «Chotano Lajas» transferidos a la microcuenca del río Jalqueño utilizando su altitud media. Una de sus limitaciones fue la reducida información registrada de datos meteorológicos de la estación, pero se tenía la información del año 1998 que tiene las precipitaciones máximas provocadas por el fenómeno del niño. Se obtuvo que el nivel de peligrosidad va de alto (23.1%) a muy alto (32.4%) y una vulnerabilidad alta (49.7%) y que de ocurrir inundaciones solo afectarían a tierras agrícolas. Recomiendan realizar un estudio en el río Chotano a fin de integrarlo para la gestión de riesgo de inundaciones en la localidad.

Figura 2. Nivel de Riesgo a Inundaciones por Desborde del Río Jalqueño



Fuente: Yrigoin & Vásquez (2023)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Ciclo hidrológico

También denominado ciclo del agua, pues la tierra representa una sistema cerrado en el que el agua está en continuo movimiento y no cambia su cantidad, solo está en diferentes formas y estados; el agua que está en el océano se puede evaporar para posteriormente condensarse y precipitar sobre la superficie terrestre, esta puede ser interceptada por las plantas, infiltrarse o

escurrir superficialmente, que de alguna manera u otra retornan al océano y la atmósfera (Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología, 2015).

Precipitación. Es toda forma de agua atmosférica que cae sobre la tierra siendo la única entrada al ciclo hidrológico; pudiendo ser líquida en forma de llovizna, lluvia, garúa, etc. o sólida como granizo o nieve; se producen cuando hay un cambio de presión y temperatura, que causan la condensación del vapor en la atmósfera produciendo una condición de saturación (Ordoñez, 2011).

Abstracciones hidrológicas. Es todo proceso por el cual reduce la precipitación total a precipitación neta o efectiva; entre ellos se encuentran, la interceptación por plantas, evaporación, infiltración, etc. (Reconco, 2020)

- a. *Infiltración.* Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019), la infiltración es el flujo hídrico que entra en el suelo, que es igual a la diferencia entre la precipitación total y las pérdidas por la escorrentía superficial, la interceptación, evapotranspiración y retención superficial.
- b. *Evapotranspiración.* Es la vaporización de agua desde la superficie cubierta por vegetación o la misma transpiración del suelo (Sistema de información Agroclimática para el regadío, s.f.).

Escorrentía directa. Es el escurrimiento superficial, una fracción de la precipitación que no se infiltra ni se evapora, sino que fluye por sobre la superficie terrestre (Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2019).

Caudal. Es el volumen de agua que transcurre en una sección transversal de un flujo hídrico, por unidad de tiempo (Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2019).

Inundaciones. Es la ocupación o cubrimiento por agua de un espacio que normalmente es seco y puede ser provocado por desbordes, lluvias torrenciales, acequias, deshielos, etc. (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2018)

Cuenca hidrológica. Es un área en donde la precipitación cae y escurre por un sistema de corrientes hacia un mismo punto en común (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

2.2.2. Diseño de estudios de hidrología

El MTC (2011) implementó su «*Manual de Hidrología y Drenaje*» la cual tiene por objetivo ser la guía conceptual y metodológica del procedimiento para el diseño de proyectos de drenaje superficial y subterráneo relacionados con la infraestructura vial y otras aplicaciones; se realiza mediante un estudio de hidrología, para la determinación de caudales de diseño; también hidráulica, para la determinación, en las obras de drenaje, de secciones hidráulicas.

2.2.3. Datos satelitales de precipitación

En el Perú se cuenta con los datos PISCOp¹ orientado al modelamiento hidrológico, aunque la escasa concentración de pluviómetros en Perú reduce las posibilidades de las aplicaciones pues en zonas más apartadas de las estaciones dependerá solamente de su covariable CHIRPM (Aybar, y otros, 2017). Está disponible en formato grilla para descargar desde su página.

Por otra parte, están los datos CHIRPS, que es un conjunto de datos de precipitaciones de casi todo el mundo registrados desde 1981, las cuales son estimaciones de lluvia a partir de pluviómetros y observaciones satelitales de la NASA y NOAA de precipitación CHPCLim² (Centro de Peligros Climáticos, s.f.). Es una base de datos elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos y la Universidad de California en Santa Bárbara (Aybar, y otros, 2017). Los

¹ Siglas en inglés de Peruvian Interpolated data of the Senamhi's Climatological and hydrological Observations of Precipitation

² Climatología de lluvia mensual de alta calidad.

datos CHIRPS son fiables para detectar eventos extremos en días húmedos, siendo aceptables en estas circunstancias pero no son recomendables para determinar y medir días con escasa o nula precipitación de épocas secas. (Senamhi, 2017).

Su utilización es mucho más sencilla que PISCOp debido a que se puede disponer de esta información a través de Google Earth Engine o a través de un cliente de interfaz de programación de aplicaciones con conexión directa al servidor (*API Client*).

2.2.4. Prueba de datos dudosos

Son valores que significativamente se alejan del resto de la información y al incluirlos en el análisis pueden afectar considerablemente los valores estadísticos calculados (Fuentes, 2016). Según Beard et. al. (1974), los datos dudosos se pueden detectar mediante los umbrales de valores atípicos, los pasos a seguir dependen del coeficiente de sesgo de los valores logarítmicos de los datos; esos umbrales se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$x_H = \bar{X} \pm K_N * S \quad (1)$$

Donde:

x_H = umbral atípico en unidades de registro.

$\bar{X}$ = media de los logaritmos de X.

K_n = Valor K proporcionado por el Consejo de Recursos Hídricos de los Estados Unidos. Depende de la cantidad de datos.

S = Desviación estándar de los logaritmos de X

Tabla 1 Valores de K_n para la prueba de datos dudosos

TABLA 12.5.3
Valores K_n para la prueba de datos dudosos

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Fuente: U. S. Water Resources Council, 1981. Esta tabla contiene valores de K_n de un lado con un nivel de significancia del 10% para la distribución normal.

Fuente: Consejo de Recursos Hídricos de los Estados Unidos (1981), como se citó en Te Chow, R.

Maidment, & W. Mays (1994)

2.2.5. Periodo o tiempo de retorno (TR).

Es una de las variables hidrológicas y estadísticas más importantes en el análisis de eventos extremos pues se usa datos del periodo de retorno para referirnos a la probabilidad de que algo ocurra o que sea excedido, está del lado de la seguridad; es decir, a mayor periodo de retorno la probabilidad es menor ocurrencia y las obras son más caras porque son de mayor dimensión (Fundamento de Hidrología, 2020). Según Bello y Velázquez (2012), el periodo de retorno se relaciona inversamente a la probabilidad de excedencia.

$$TR = \frac{1}{P} \quad (2)$$

Donde:

TR = periodo de retorno.

P = probabilidad de excedencia.

El MTC (2011) muestra la forma de seleccionar el periodo de retorno de acuerdo a la vida útil de una obra y al riesgo de falla admisible; para la construcción de muros de contención

destinados a prevenir desbordamientos e inundaciones, se considera un riesgo de falla admisible del 25% y una vida útil de 40 años..

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n \quad (3)$$

Donde:

TR = periodo de retorno.

R = riesgo de falla admisible.

n = vida útil de la obra.

2.2.6. Histogramas

El histograma es una representación gráfica utilizada para resumir, observar y analizar la frecuencia de una variable en un conjunto de datos (Domenech, s.f.)

2.2.7. Distribuciones de probabilidad

Una distribución de probabilidad, como modelo teórico, busca elucidar el comportamiento de un fenómeno real, actuando como una función que asigna la probabilidad correspondiente a cada suceso cuantificado por una variable aleatoria (Martínez, 2018).

2.2.7.1. Distribución Normal

Según el MTC (2011), la función de distribución de probabilidad Normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2} \quad (4)$$

Donde:

$f(x)$ = función de la densidad normal de la variable x.

X = variable independiente.

μ = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x.

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x.

2.2.7.2.Distribución Log Normal

En el trabajo de Orellana (2021) se muestra la función de densidad de probabilidad de una distribución Log Normal que se define como:

$$F(X < x) = \left(\frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} \right) * \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] * dx \quad (5)$$

Donde

$$y = \ln(x)$$

σ_y = la desviación estándar de y

$$\mu_y = \text{promedio aritmético, se calcula con: } \mu_y = \frac{\sum \ln(x)}{N}$$

2.2.7.3.Distribución Pearson tipo III

Según McPhee (s.f), mediante la distribución de probabilidad Pearson tipo III, para una muestra de datos el valor de una variable dado un valor de periodo de retorno se puede aproximar por:

$$x_T = \bar{x} + \left[\frac{2}{G} \left(\left[\left(K_T^N - \frac{G}{6} \right) \frac{G}{6} + 1 \right]^3 - 1 \right) \right] S_x \quad (6)$$

Donde:

x_T = valor de x dado el periodo de retorno T.

G = sesgo o asimetría

K_T^N = K de variable normal estandarizada, se calcula obteniendo el valor de x en el periodo de retorno T con una distribución normal de desviación estándar equivalente a 1 y promedio 0.

S_x = desviación estándar

2.2.7.4.Distribución Log Pearson tipo III

Según González & Rincón (2011), el cálculo mediante distribución Log-Pearson tipo III se desarrolla de la misma forma que a la distribución Pearson tipo III, sin embargo, se trabaja con los valores logarítmicos de la variable analizada ($y = \log(x)$).

2.2.7.5.Distribución Gumbel

La distribución de Gumbel o también llamado distribución doble exponencial o de Valores Tipo I puede usar el método de momentos por ser más conveniente para estimar los valores del el parámetro de localización y el de concentración necesarios para el cálculo de los valores dado un periodo de retorno (Mildred Estadística, 2019). Los valores se pueden obtener mediante:

$$y(F) = \beta - \alpha * \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

α = es el parámetro de concentración y se calcula como: $\alpha = 0.7797S_x$, donde S_x es la desviación estándar.

β = es el parámetro de localización y se calcula como: $\beta = X - 0.45S_x$ donde S_x es la desviación estándar y X es el promedio.

2.2.8. Ajuste de distribuciones de probabilidad.

Para seleccionar la distribución de probabilidad que más se acerca a los datos hay algunos criterios estadísticos, entre ellos está el análisis gráfico, el método del error cuadrático medio y las pruebas de bondad de ajuste (González & Rincón, 2011). Jiménez (2015) en el programa «Ax_2015» para la secretaría de gobernación se usa el error cuadrático medio para hallar el mínimo error estándar para distintas distribuciones de probabilidad. Según Montgomery y Runger (2008) como se citó en González & Rincón (2011) el error cuadrático medio se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_{e_i} - X_{o_i})^2}{n}} \quad (8)$$

Donde:

C = es el error cuadrático medio

X_{e_i} = i-ésimo dato estimado

X_{0_i} = i-ésimo dato calculado con la función de distribución bajo análisis.

Las series extrapoladas son precipitaciones de 24 horas máximas anuales, que ocurra lluvias intensas enteramente en esos intervalos establecidos entre observaciones es poco probable y se genera una subestimación de las verdaderas cantidades por lo que debería incrementarse en un 13% (Kohler, Linsley, & Paulus, 1977, pág. 309).

2.2.9. Ponderación de distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés)

Es un método determinístico para interpolaciones espaciales que utiliza un algoritmo basado en distancias, sitúa más peso a los valores cercanos a un punto proporcionado; a diferencia de otros métodos como *Kriging*, posee una menor complejidad de cálculo, por ello, un menor tiempo de procesamiento, es menos preciso y eficiente, aunque la diferencia no es amplia. (Villatoro, Henríquez, & Sancho, 2008)

2.2.10. Hietogramas de diseño de tormenta

Es la representación gráfica de las intensidades de la lluvia acumuladas en intervalos con respecto al tiempo; se puede obtener mediante la información de los pluviogramas. (Departamento de Tecnología de la Construcción, 2018)

2.2.10.1. Curvas IDF.

Son las curvas generadas son una correlación gráfica entre la intensidad de precipitación y la duración en cada frecuencia o periodo de retorno (Témez, 1978).

Si no se tiene información pluviográfica se puede usar el modelo de Dick Peschke para estimar las precipitaciones en intervalos menores de una hora, en función de la duración de la precipitación y la precipitación máxima de 24 horas (Paredes, 2015). Se calcula para cada periodo de retorno mediante la ecuación:

$$I = \frac{1}{D} \left[P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \right] \quad (9)$$

Donde:

I = intensidad de precipitación, mm/min

P24h = precipitación máxima de 24 horas, en mm

D = duración de la precipitación, en minutos

La ecuación de la intensidad máxima se puede elaborar a partir de una regresión lineal múltiple de las curvas IDF y está dada por:

$$I_{max} = \frac{K \times T^m}{D^n} \quad (10)$$

Donde:

I_{max} = intensidad máxima de lluvia, en mm/h.

T = periodo de retorno, en años.

D = duración, en minutos.

K, m, n = son constantes.

2.2.10.2. Método de bloque alterno.

Es una forma sencilla para generar los hietogramas usando curvas IDF (ecuación N°9); se usa la ecuación de intensidad máxima evaluando para el periodo de retorno deseado (ecuación N°10); se calcula la profundidad acumulada, se determina la profundidad incremental y con estos valores se alternan para elaborar los hietogramas de diseño (MTC, 2011).

2.2.11. Método SCS para abstracciones

Es la metodología más usada que estima el escurrimiento medio mediante la retención potencial y la precipitación, usando un valor denominado Número de Curva (Francisco, Turrent, Flores, Martínez, & Enríquez, 2010).

2.2.11.1. Número de curva.

Es un número adimensional de curva que depende de las características de la cuenca: el grupo hidrológico del suelo, el uso del suelo o cobertura y la pendiente; permite transformar la precipitación total en precipitación neta; depende de las condiciones de humedad (normales, secas o húmedas) (Portuguez & Verano, 2016). Agua y SIG (2017) adapta la metodología de SCS, dando una equivalencia en la clasificación al suelo y a la cobertura vegetal:

Tabla 2 Reclasificación de valores de Número de Curva del SCS

	Franco arenoso	Franco arcillo-arenoso	Franco limoso	Franco arcillo-arenoso
Agua	100	100	100	100
Residencial media	57	72	81	86
Bosque	30	58	71	78
Agricultura	67	77	83	87

Fuente: Villegas, P. (2017)

Para calcular el valor del Número de Curva en diferentes condiciones se tienen las siguientes ecuaciones:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} \quad (11)$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)} \quad (12)$$

Donde:

$CN(I)$ = Número de curva en condiciones secas.

$CN(II)$ = Número de curva en condiciones normales.

$CN(III)$ = Número de curva en condiciones húmedas.

2.2.11.2. Abstracción inicial.

También conocido como "umbral de escorrentía" y se refiere a la cantidad de precipitación inicial que no da lugar a la formación inmediata de escorrentía (Sánchez, 2022).

Existe una relación inmediata del valor de la abstracción inicial y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50.8 \quad (13)$$

Donde:

P_0 = Abstracción inicial

CN = Número de curva

2.2.11.3. Tiempo de concentración.

Es el tiempo que dura en viajar el agua desde la parte más alta hasta la salida de la cuenca, es decir que cuando ese tiempo haya transcurrido toda el agua habrá salido de la cuenca; además existen diversas fórmulas para calcular este valor (MTC, 2011). La relación que existe entre el tiempo de concentración y el tiempo de retardo es la ecuación:

$$Tr = 0.6 * Tc \quad (14)$$

Donde:

Tr = tiempo de retardo.

Tc = tiempo de concentración.

2.2.12. Tránsito de Avenidas

“Es un procedimiento matemático para predecir el cambio de magnitud, velocidad y forma de onda y flujo en función del tiempo en uno o varios puntos en un cauce o canal” (UNSCH - INGENIERÍA CIVIL Hemerson L.A., 2015).

2.2.12.1. Muskingum.

Es un método para el tránsito de avenidas que sirve para aproximar el cálculo de la propagación elaborado con en la ecuación de continuidad y una ecuación de almacenamiento que depende de forma lineal del volumen de agua con respecto a los caudales de entrada y salida en el tramo (Organización Meteorológica Mundial, 2012). Según Ponce (2021), este método es versátil y adecuado para cualquier evento en el tramo en consideración. Según el Departamento

de Ingeniería de Hidráulica Marítima Ambiental (2012), este método presenta 2 valores: el valor K que se calcula al multiplicar el valor del tiempo de concentración por 0.6, y el valor de x varía entre 0.1 y 0.5, generalmente en España se usa 0.2 para pendientes bajas y 0.35 para pendientes altas.

2.2.13. Flujo hidráulico

2.2.13.1. Coeficiente de rugosidad de Manning.

Es un numero adimensional que establece la resistencia del flujo de agua en un cauce (Araya, González, & Jiménez , 2018). Bruner (2008) explica que la selección del valor apropiado de este coeficiente es muy importante para la precisión de la simulación en HEC-RAS, depende de diversos factores como la rugosidad, cobertura vegetal, irregularidades, alineación, tamaño y forma del canal, etapa y descarga, cambios estacionales, la temperatura, etc. y propuso valores comunes de rugosidad para cauces naturales:

Tabla 3 Valores del coeficiente de Manning para cauces naturales comunes

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
Canales principales			
a. Limpio, recto, lleno, sin fisuras, fondo profundo	0.025	0.03	0.033
b. Igual que el anterior, pero con algo de fisuras	0.03	0.035	0.04
c. Limpio, sinuoso, poco profundo y bancos	0.033	0.04	0.045
d. Igual que al anterior, pero con algo de hierbas y piedras	0.035	0.045	0.05
e. Igual que al anterior, niveles inferiores, más pendientes y secciones menos efectivas	0.04	0.048	0.055
f. Como el "d" pero más piedras	0.045	0.05	0.06
g. Tramo lento, hierbas, fondo profundo	0.05	0.07	0.08
h. Tramo con mayor maleza, fondo profundo, o recorrido de crecidas con soporte de madera y arbustos	0.07	0.1	0.15
Llanura de inundación			
a. Pastura sin arbustos			
Pasto corto	0.025	0.03	0.035
Pasto Alto	0.03	0.035	0.05
b. Áreas cultivadas			
Sin cultivo	0.02	0.03	0.04
Cultivo maduro alineado	0.025	0.035	0.045
Campo de cultivo maduro	0.03	0.04	0.05
c. Arbustos			
Arbustos escasos, mucha maleza	0.035	0.05	0.07
Pequeños arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
Pequeños arbustos y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
Arbustos mediano denso, en invierno	0.045	0.07	0.11
Arbustos mediano denso, en verano	0.07	0.1	0.16
d. Árboles			
Terreno despejado con tocones de árboles, sin brotes	0.03	0.04	0.05
Igual que el anterior, pero con muchos brotes	0.05	0.06	0.08
Soporte de madera, algunos árboles caídos, pequeño crecimiento inferior, flujo por debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
Igual que el anterior, pero con flujos por debajo de las ramas			
Sauces densos, en verano, rectos	0.1	0.12	0.16
Cauces de montaña, sin vegetación en el canal, márgenes usualmente empinados, con árboles y arbustos sobre márgenes sumergidos			
a. Fondo: grava, guijarros, y algo de canto rodado	0.03	0.04	0.05
b. Fondo: guijarros con mucho canto rodado	0.04	0.05	0.07

Fuente: Brunner (2008)

Además, Villón Béjar (2014) describe otros valores del coeficiente de rugosidad dependiendo de las condiciones de las paredes y en acueductos de tablón se tienen los siguientes valores:

Tabla 4 Valores de coeficiente de rugosidad para acueductos de tablón

Superficie	Condiciones de las paredes			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
Labrado	0.010	0.012*	0.013	0.014
Sin labrar	0.011	0.013*	0.014	0.015
Con astillas	0.012	0.015*	0.016	
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
Superficie de mampostería con cemento	0.017	0.020	0.025	0.030
Superficie de mampostería en seco	0.025	0.030	0.033	0.035
Acueducto semicirculares metálicos, lisos	0.011	0.012	0.013	0.015
Acueducto semicirculares metálicos corrugados	0.0225	0.025	0.0275	0.030

Fuente: Villón Béjar (2014). () Valores de uso común en proyectos*

2.2.13.2. Coeficiente de contracción y expansión.

Es una de las causas de pérdida de energía en un tramo debido a cambios en la sección transversal, tiene un valor adimensional dependiendo de las transiciones; para situaciones de cambio gradual en HEC-RAS se tiene los valores de 0.1 y 0.3 (Brunner, 2023).

2.2.13.3. Régimen de flujo.

En HEC-RAS se considera 3 regímenes: flujo subcrítico que requieren información de condiciones de contorno en los extremos, aguas arriba y aguas abajo, pues el flujo se propaga en ambas direcciones; flujo supercrítico que solo se requiere aguas arriba; sin embargo, podría ocurrir un cambio de régimen al que denomina flujo mixto (Brunner, 2023). Un flujo supercrítico presenta una velocidad muy alta haciendo que disminuya su profundidad, la energía se encuentra principalmente en forma de energía cinética implicando un gran poder erosivo; mientras que un flujo subcrítico se caracteriza por tener profundidades altas y velocidades bajas por lo tanto se encuentra principalmente en forma de energía potencial (Calderón, 2014).

2.2.13.4. Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno son esenciales para definir las elevaciones iniciales del agua en los extremos del sistema fluvial, lo que se necesita para iniciar los cálculos, éstas condiciones dependen del régimen de flujo; en HEC-RAS existen cuatro condiciones de contorno disponibles: elevaciones conocidas de la superficie del agua, profundidad crítica, profundidad normal y curva de clasificación (Brunner, 2023).

2.3. Glosario

API. Es el conjunto de reglas para usar e interactuar con un programa como un módulo en la programación permitiendo una comunicación entre ambas aplicaciones (Fernández, 2019).

Avenidas. “Es una onda que tiene un máximo. [...] Es una variación del caudal de agua o flujo de agua que circula por el cauce a lo largo del tiempo” (Bateman, 2007).

Calibración. Es el proceso por el cual se regula un instrumento para determinar y reducir su error de cálculo o análisis con respecto a una referencia o patrón (Vidal, 2022).

Cauce. El espacio físico por donde transcurre el agua de un río (Pérez & Gardey, 2016).

Eventos extremos. Se define como “el producto de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o tecnológicas y las condiciones de vulnerabilidad” (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Fotogrametría. Es un método de medición que obtiene datos al intersecar dos o más imágenes, con la finalidad de lograr una captura precisa de las formas, ubicaciones y tamaños de objetos en un entorno tridimensional (ESRI, s.f.).

R. “Es un lenguaje y entorno de libre acceso para computación estadística y gráficos que proporciona una amplia variedad de técnicas estadísticas y gráficas: modelado lineal y no lineal, pruebas estadísticas, análisis de series temporales, clasificación, agrupación, etc.” (R Development Core Team, s.f.)

RStudio. RStudio se identifica como un entorno integrado para el desarrollo, siendo una aplicación concebida para la administración de R y su utilización de manera más conveniente en varios contextos (Gonzales, 2019).

CRAN. Se trata de una red global de servidores que utilizan el Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP) que guarda versiones actualizadas y exactas de código y documentación relacionados con R. (R Development Core Team, s.f.)

Interpolación espacial. “es una parte de la geoestadística que se basa en el cálculo de los valores desconocidos de una variable espacial a partir de otros valores cuyo valor es conocido” (GeoInnova, 2019).

Modelo. Es una representación o imitación computacional de sistemas complejos, con numerosas variables, usando la física, las matemáticas y la informática (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, s.f.).

Simulación. Es el uso de modelos para experimentar, predecir o conocer la efectividad de un proceso (Rodríguez, 2021).

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. General

La utilización de datos CHIRPS permite determinar las zonas de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca.

3.1.2. Específico

- El cálculo de las máximas avenidas probables en diferentes periodos de retorno permite determinar las áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca.
- La simulación del comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS permite la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca.
- Con el cálculo de avenidas y simulación del río Chotano se determina el mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas, en la región Cajamarca.

3.2. Las variables

3.2.1. Variables independientes

- Datos CHIRPS

3.2.2. Variables dependientes

- Zonificación de áreas inundables

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 5 Operacionalización de variables

Tipo	Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Instrumentos	Indicadores
Independiente	Datos CHIRPS	Los datos CHIRPS es un conjunto de datos de precipitaciones de casi todo el mundo registrados desde 1981, las cuales son estimaciones de lluvia a partir de pluviómetros y observaciones satelitales de la NASA y NOAA de precipitación CHPClim (Centro de Peligros Climáticos, s.f.)	Intensidad de precipitación	Método de bloque alternativo	Hietogramas de precipitación
			Distribución espacial	Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada	Promedio de precipitación máximo por subcuenca
Dependiente	Zonificación de áreas inundables	Es la clasificación del terreno en sectores según el riesgo de inundación que presentan, con el fin de facilitar la planificación y gestión de riesgos.	Caudal máximo de avenida	Modelo para determinar caudales	Caudal máximo de avenida por periodo de retorno
			Nivel de inundación	Secciones transversales del nivel del río	Altura de nivel del río
			Área inundada	Modelo para determinar la extensión del área inundada	Mapa de inundaciones

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología y diseño	Técnicas e instrumentos
Problema General	Objetivo General	Hipótesis general	Independiente	Tipo de investigación	
Determinar las zonas de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca.	Determinar las zonas de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca.	La utilización datos CHIRPS permite determinar las zonas de áreas inundables utilizando datos CHIRPS, en la localidad de Lajas, región Cajamarca.	Datos CHIRPS	Descriptiva cuantitativa	• Programación estadística de algoritmos en R. • Uso de API Cliente CHIRPS • Fotogrametría con dron. • Recopilación de mapas en bases de datos. • Procesamiento de datos espaciales en ARCGIS. • Modelamiento en HEC-HMS. • Modelamiento en HEC-RAS.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Dependiente	Diseño de investigación	
¿El cálculo de las máximas avenidas en diferentes periodos de retorno, permitirán a la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca?	Calcular las máximas avenidas probables en diferentes periodos de retorno con las herramientas HEC-GeoHMS y HEC-HMS empleando datos CHIRPS.	El cálculo de las máximas avenidas probables en diferentes de retorno ayuda a determinar las áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca.	Áreas inundables	Pre-experimental	
¿La simulación del comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS permitirán la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca?	Simular el comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS.	La simulación del comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS permite la zonificación de áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca.		Población La cuenca del río Chotano hasta la localidad de Lajas, en el departamento de Cajamarca	
¿Con el cálculo de avenidas y simulación del río Chotano se podrá elaborar el mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas, en la región Cajamarca?	Elaborar un mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas.	Con el cálculo de avenidas y simulación del río Chotano se elabora el mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas, en la región Cajamarca		Muestra Áreas cercanas al tramo del río Chotano que atraviesa la localidad de Lajas hasta la confluencia con el río Jalqueño. Este tramo tiene una longitud de 730 metros	

Fuente: Elaboración Propia

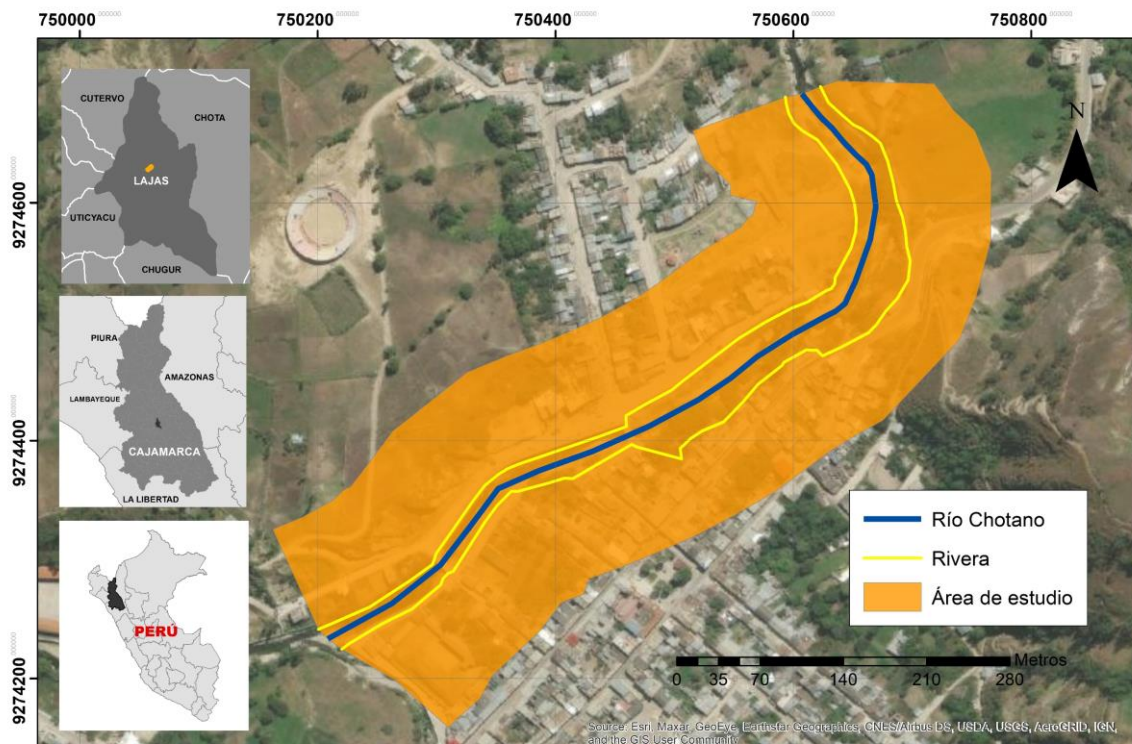
CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El área de estudio abarca la sección a lo largo del curso del río Chotano y las zonas circundantes de la localidad de Lajas en Cajamarca, extendiéndose hasta un punto inmediatamente anterior a la afluencia del río Jalqueño. Esta zona abarca una extensión aproximada de 14.02 hectáreas y se sitúa a una altitud de 2137 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas UTM 750507.56E y 9274435.80N en la zona 17 Sur.

Figura 3 Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

4.2. Diseño de la investigación

La investigación es de tipo descriptiva cuantitativa al no modificar la variable independiente, observando el río Chotano en su estado natural y empleando modelos matemáticos computacionales para analizar y representar su comportamiento hidráulico a través de datos numéricos. Además, tiene un diseño preexperimental pues son estudios de

análisis para para identificar las zonas vulnerables previos a realizar un proyecto de mitigación o prevención de impactos sobre la población.

4.3. Población y muestra

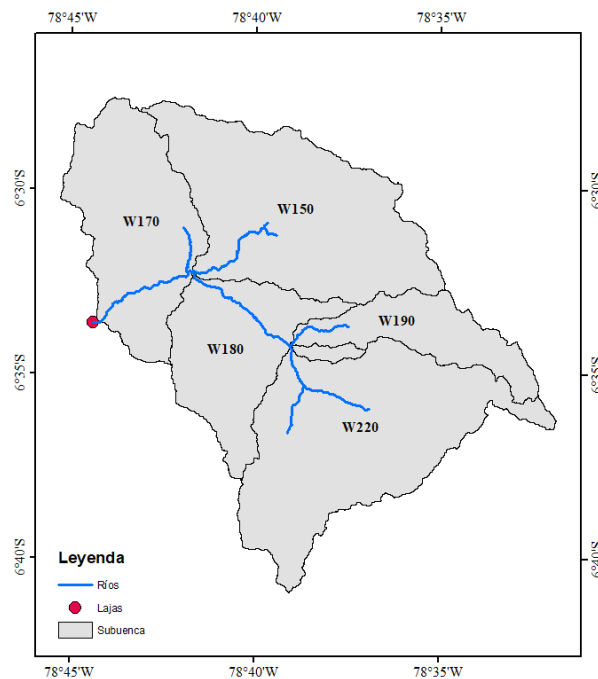
La población está delimitada a la cuenca del río Chotano hasta la localidad de Lajas, en el departamento de Cajamarca, el cual abarca aproximadamente 300 km². La muestra abarca el segmento del río Chotano que cruza la localidad de Lajas, con una extensión aproximada de 730 metros y un ancho promedio de alrededor de 200 metros, incluyendo las áreas inmediatamente contiguas a este tramo.

4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1. Obtención de la cuenca y subcuencas

Se descargó el modelo de elevación digital de «*ASF Data Search*», abarcando la cuenca del río Chotano hasta la localidad de Lajas. Posteriormente, se llevó a cabo el preprocesamiento en ARCGIS, donde se realizaron operaciones de unión, corrección y relleno de espacios en blanco. Mediante HEC-GEOHMS, usando el modelo de elevación digital descargado se generaron las capas necesarias para delimitar la cuenca del río Chotano hasta la localidad de Lajas, junto con las subcuencas que la componen.

Figura 4 Cuencas y subcuencas

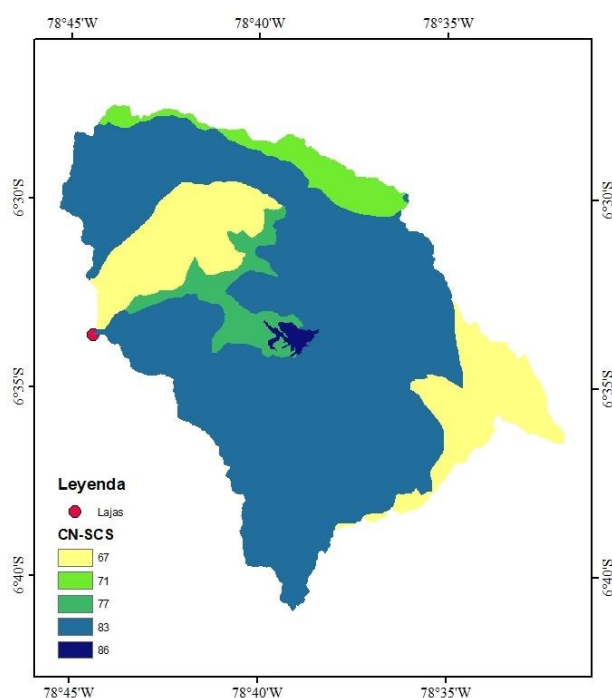


Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. Obtención Número de Curva promedio de cada subcuenca

Se descargó el mapa de suelos de la zonificación ecológica y económica del departamento de Cajamarca en el geo servidor del Ministerio del Ambiente, y el mapa de cobertura vegetal de la página GEO GPS PERÚ, ambos disponibles en formato *shapefile*. Los mapas recortaron al área de la cuenca del río Chotano obtenida de los modelos de elevación digital. Estas capas obtenidas se reclasificaron con la metodología de Villegas, P. para obtener la capa de Número de Curva en condiciones húmedas de la cuenca usando a la ecuación N° 12. Y posteriormente se obtuvo el Número de Curva promedio por cada subcuenca. Estos valores se calibraron en HEC-HMS con el hidrograma de calibración.

Figura 5 Mapa de valores de Número de Curva de la cuenca de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6 Valores de Número de Curva (CN) y abstracción inicial determinados y calibrados

Subcuenca	Abstracción inicial	Abstracción calibrada	CN	CN Calibrados
W150	15.458	25.27	76.67	51.67
W170	17.388	26.49	74.5	50.50
W180	12.361	23.33	80.43	55.43
W190	14.120	21.37	78.25	53.25
W220	19.434	25.85	72.33	50.33

Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. Obtención de datos históricos precipitación

Los datos de precipitación se obtuvieron directamente del servidor mediante el API Client de CHIRPS en el programa RStudio, disponible como una librería para descargar desde CRAN.

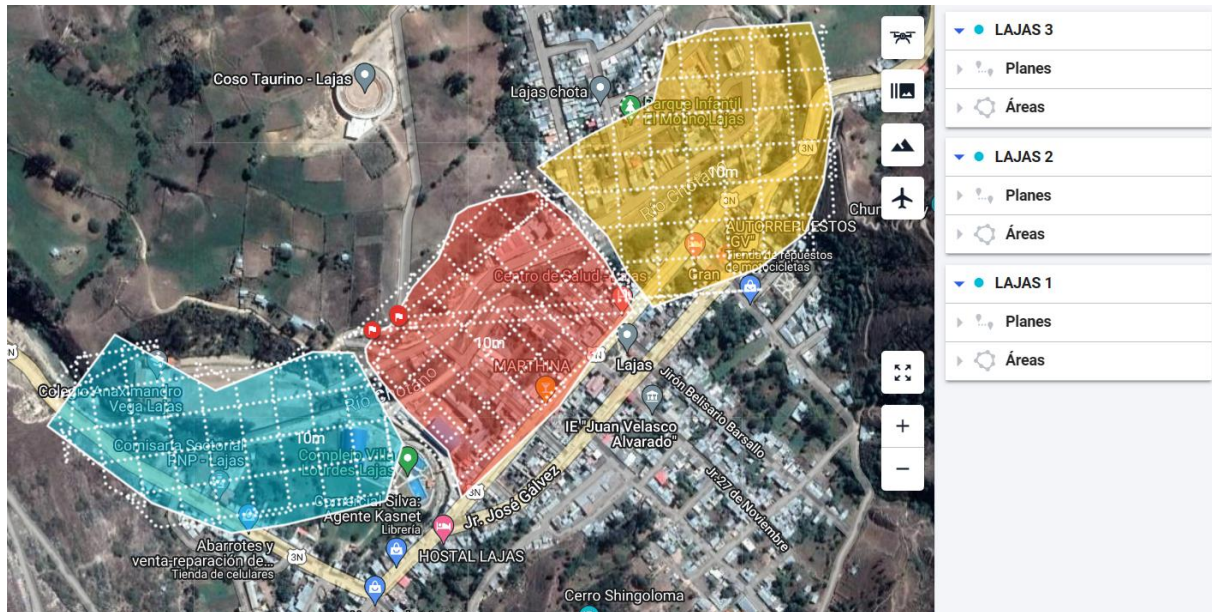
4.4.4. Obtención de información topográfica del área de estudio

Se realizó un levantamiento topográfico del área de estudio mediante el empleo de la fotogrametría, haciendo uso de un dron DJI Mavic Mini 2 y el software Agisoft Metashape.

La planificación del vuelo se llevó a cabo con la ayuda de aplicación web Drone Harmony, con el objetivo de capturar imágenes en una disposición de doble cuadrícula a una

altitud de 110 metros y un 72% de superposición. Este proceso generó un total de 399 fotografías, distribuidas en tres planes distintos que abarcaron la totalidad del área de estudio.

Figura 6 Planificación de vuelo para levantamiento topográfico en Drone Harmony



Fuente: Elaboración Propia

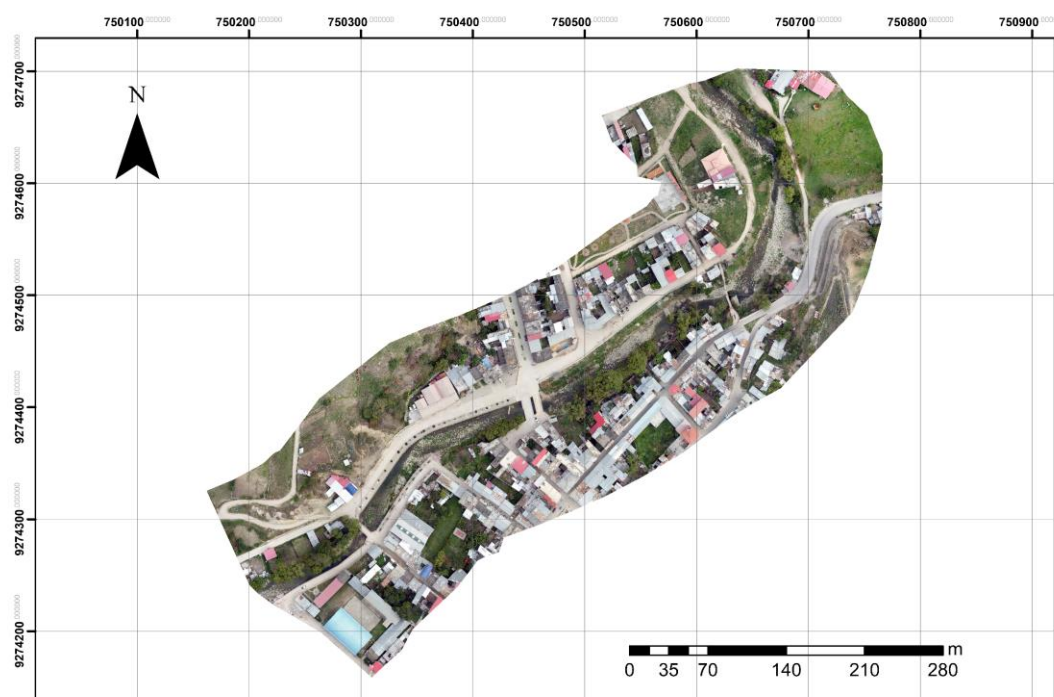
Las imágenes adquiridas fueron sometidas a un proceso de análisis en Agisoft Metashape, culminando en la creación de una nube de puntos densa que representaba con precisión el modelo tridimensional del área de estudio. A través de este software, se realizó una cuidadosa eliminación de elementos no deseados, como árboles, y reconstruida la superficie AutoCAD con el objetivo de obtener las curvas de nivel de la superficie subyacente. Además, se pudo obtener el ortomosaico de la superficie actual.

Figura 7 Nube de puntos densa que captura el modelo tridimensional del área de estudio en Agisoft Metashape



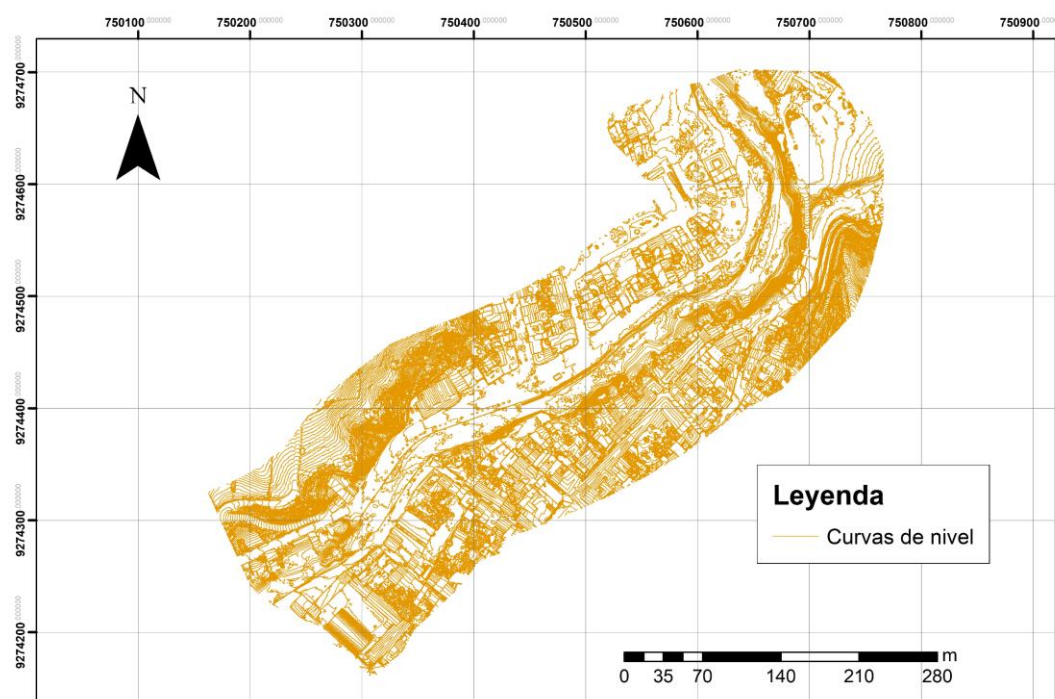
Fuente: Elaboración Propia

Figura 8 Ortomosaico generado del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9 Curvas de nivel del área de estudio a 0.5 metros obtenido por fotogrametría

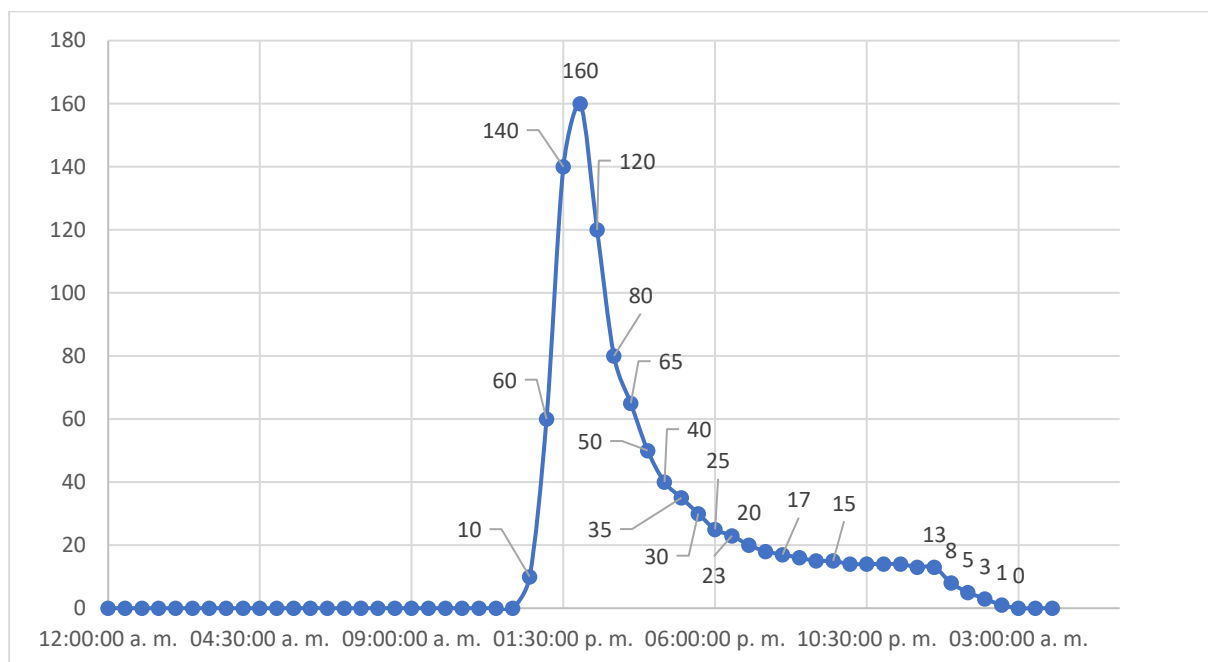


Fuente: Elaboración Propia

4.4.5. Obtención de hidrograma de calibración

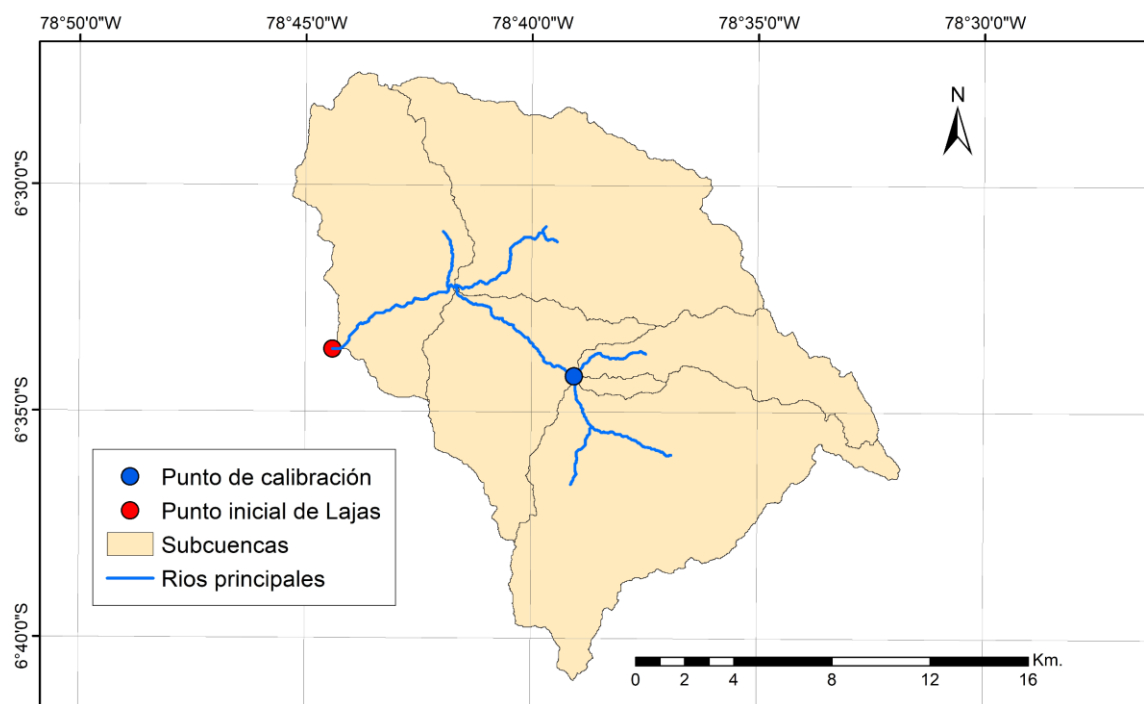
Se materializó una tabla de doble entrada que establece una relación entre las variaciones horarias y el caudal del gráfico obtenido del trabajo de Ydrogo (2021) para el periodo de retorno de 100 años. Es relevante destacar que, a pesar de la carencia de valores numéricos directos en cada punto de la curva, se procedió a estimar el caudal a intervalos horarios, logrando este cometido mediante un análisis visual del gráfico.

Figura 10 Hidrograma de calibración estimado para el periodo de retorno de 100 años



Fuente: Adaptado de Ydrogo (2021)

Figura 11 Mapa de ubicación del punto de calibración

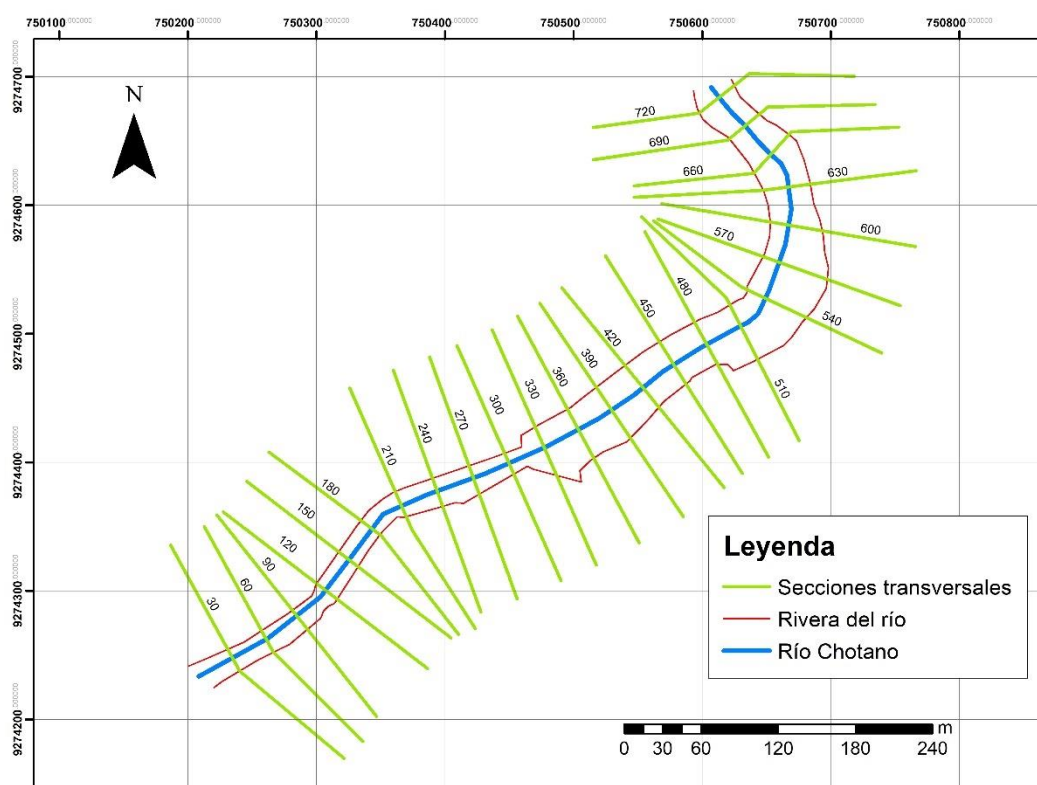


Fuente: Elaboración Propia

4.4.6. Obtención de coeficientes de rugosidad de Manning

Se crearon secciones transversales dentro del área de estudio. En cada una de estas secciones, se realizó una descripción tanto en el canal como las posibles áreas de inundación. Esta descripción se comparó con los valores de rugosidad propuestos por Brunner (2008), seleccionando aquellos que mejor se ajustaban al tipo de canal o área de inundación presente en nuestra zona de investigación. Además, para el muro de concreto, de acuerdo con la Tabla N°04, se eligió el valor correspondiente a los canales revestidos con concreto en buenas condiciones debido a su similitud, teniendo un valor de 0.014.

Figura 12 Secciones transversales del Río Chotano



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7 Valores de rugosidad de Manning del área de estudio

Sección	Canal principal		Lado derecho		Lado izquierdo	
	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor
30	Cauce de montaña sin vegetación en el	0.040	Árboles rectos	0.040	Muro de concreto	0.014

Fuente: *Elaboración Propia*

Obtención de los centroides: Se creó una función en la que se ingresó como parámetro el archivo de las subcuencas y se devolvió los centroides de cada una de ellas. En este trabajo, no se encontraron datos dudosos en ninguno de los puntos evaluados respecto a los listados de precipitaciones máximas.

Figura 13 Código para la generación de centroides

```
getLayerCentroids<- function(subbasin){  
  centroids<- SpatialPoints(coords=coordinates(as_Spatial(subbasin)),  
                             proj4string=CRS(proj4string(as_Spatial(subbasin))))  
  centroids$DrainID <- subbasin$DrainID  
  centroidsWGS84 <- spTransform(centroids, CRS("+init=epsg:4326"))  
  
  return(list(UTM = centroids, WGS84 = centroidsWGS84 ))  
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de datos dudosos: Se implementó una función que utilizó la metodología del Consejo de Recursos Hídricos de los Estados Unidos, en la cual se ingresaron los datos de precipitación histórica y se devolvieron los mismos datos, pero corregidos usando la ecuación N°1.

Figura 14 Código para hacer la prueba de datos dudosos

```
outlier<- function(maxAnnualPPoint){
  kn = 2.682

  maxAnnualPPointLog<- log10(maxAnnualPPoint)

  meanMaxAnnualPPointLog<- mean(maxAnnualPPointLog)
  sdMaxAnnualPPointLog<- sd(maxAnnualPPointLog)
  xhs <- meanMaxAnnualPPointLog+ kn*sdMaxAnnualPPointLog
  xhi <- meanMaxAnnualPPointLog- kn*sdMaxAnnualPPointLog
  top_pp <- 10^xhs
  down_pp <- 10^xhi

  for(item in maxAnnualPPoint){
    if (top_pp < item){
      item <- 10^meanMaxAnnualPPointLog
    }
    if(item < down_pp){
      item <- 10^meanMaxAnnualPPointLog
    }
  }
  return(maxAnnualPPoint)
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Precipitación máxima anual de 24 horas corregida: Se creó una función en la que se ingresan las coordenadas de los centroides. Para cada punto, se obtiene la precipitación diaria a partir del servidor CHIRPS y se determina la precipitación diaria máxima de todo el año. Luego, se llama a otra función para calcular los datos dudosos y, finalmente, la función devuelve una tabla con la precipitación corregida de cada centroide en sus respectivas columnas.

Figura 15 Código para determinar la precipitación máxima anual de 24 horas corregida

```

maxAnnualPrecipByPoints<- function(layerPoints, initialYear, finalYear, chirpsServerName){

  coordCentroids<- coordinates(layerPoints)
  coordCentroids<- as.data.frame(coordCentroids)
  coordCentroids <- bind(subbasin = paste("W",coordCentroids$DrainID,"0", sep = ""), coordCentroids)

  lonlat <- data.frame(lon = coordCentroids$coords.x1, lat = coordCentroids$coords.x2)
  dates <- c(paste(initialYear,"01-01",sep = "-"), paste(finalYear,"12-31",sep = "-"))
  dat <- get_chirps(lonlat, dates, server = serverName)

  dataP24<- data.frame(anio = c(initialYear:finalYear))

  for( i in c(1:nrow(lonlat))){
    dataPerPoint <- dataP24 %>%
      filter(id == i)
    maxAnnualPPoint<- numeric()
    for(year in c(initialYear:finalYear)){
      maxPYear<- dataPerPoint %>%
        filter(as.numeric(format(date,'%Y')) == year) %>%
        summarise(max_chirps = max(chirps)) %>%
        pull(max_chirps)

      maxAnnualPPoint <- outlier(maxAnnualPPoint)
      maxAnnualPPoint<- c(maxAnnualPPoint, maxPYear)
    }
    maxAnnualPPoint<- dudoso(maxAnnualPPoint)
    dataP24= cbind(dataP24, i = maxAnnualPPoint)
  }
  colnames(dataP24) <- c('anio', coordCentroids$subbasin )
  return(dataP24)
}

```

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8 Precipitación máxima anual de 24 horas corregida en cada centroide

Años	W150	W170	W180	W190	W220
1982	38.90815	40.3395	73.35478	37.07228	38.39867
1983	52.59571	32.81565	53.70538	54.4175	56.45885
1984	59.89333	53.3514	38.69541	46.73876	46.51822
1985	46.74151	35.54493	49.72842	37.50966	38.47829
1986	36.27789	67.47329	48.88639	49.31872	51.89006
1987	65.13419	52.8026	35.80389	43.53793	44.06623
1988	43.29282	47.23839	46.686	59.12411	60.16389
1989	49.85998	37.42854	53.25793	44.85654	43.68882
1990	57.2064	47.21503	46.47718	37.66296	37.52084
1991	58.74916	33.55111	36.244	83.68567	85.85036
1992	67.52374	69.77116	44.51634	47.62364	49.78762
1993	54.11512	37.32888	45.40354	39.14293	40.51862
1994	55.59938	45.93124	53.81549	66.98608	68.1123
1995	78.8973	51.11141	80.33847	85.42945	87.52361
1996	47.12205	34.10222	45.99404	47.79548	49.51196
1997	43.06783	75.5141	51.02512	49.27108	50.4295

1998	65.564	60.53627	54.83674	52.18089	53.56212
1999	60.46117	53.69852	61.02392	61.86059	62.18171
2000	55.41987	50.0896	56.69704	61.02448	62.2806
2001	58.31015	60.84423	72.32104	87.62193	127.23776
2002	56.3617	48.82855	46.07034	64.06617	61.0761
2003	64.83839	45.87424	54.88207	58.69231	61.32685
2004	59.14342	46.56322	72.86331	59.00124	56.54859
2005	60.96321	68.59105	69.36942	60.16487	60.76132
2006	71.72756	63.57605	76.28429	79.03397	62.39968
2007	76.03097	61.15342	63.36519	58.2135	56.72342
2008	54.92553	44.93645	48.35585	45.36731	47.82953
2009	43.6614	37.10395	35.2386	86.25847	86.31152
2010	62.28835	55.53055	71.27147	68.43103	59.76463
2011	46.98026	40.76556	34.5842	35.06419	44.80355
2012	33.84156	24.84309	31.95364	28.16735	31.40843
2013	54.20153	26.20764	32.92297	46.78453	43.35402
2014	53.48207	56.00626	46.77073	45.69539	46.41755
2015	44.68339	43.63746	46.09702	84.51871	62.91394
2016	75.88903	44.01315	53.81521	68.17307	55.64835
2017	75.99519	66.81964	78.62083	83.79098	107.61352
2018	73.6767	68.75968	80.71448	87.0275	91.23518
2019	55.91795	39.33928	57.17684	59.81257	58.87822
2020	54.10716	61.73962	55.28677	51.39299	50.01773
2021	51.37019	56.75399	64.41444	59.57769	32.77806

Fuente: Elaboración Propia

Distribuciones de probabilidad: Se desarrolló funciones separadas para cada una de las distribuciones (Normal, Log normal, Pearson tipo III, Log Pearson tipo III y Gumbel) en las cuales se ingresó la precipitación histórica corregida. Estas funciones devolvieron las extrapolaciones correspondientes para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años), junto con su error cuadrático medio.

Figura 16 Código para extrapolar mediante la distribución normal

```
distNormal <- function(listaData){
  meanData <- mean(listaData)
  sdData<- sd(listaData)

  tr = c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)

  #Extrapolación de datos en cada periodo de retorno
  normalizedData<- c()
  for (tr_i in tr) {
    datoNormal <- qnorm((1-(1/(tr_i))), prom, desv)
    normalizedData<- c(normalizedData, datoNormal )
  }

  #Periodo de retorno real de los datos
  listaData<- sort(listaData, decreasing = FALSE)

  trlistaData<- c()
  for (i in c(1:length(listaData))) {
    probabilidad <- i/(length(listaData)+1)
    trDat <- 1/(1-probabilidad )
    trlistaData<- c(trlistaData, trDat )
  }
  tr_cadena <- qnorm((1-(1/(trlistaData))), prom, desv)
  err <- (sum((cadena - trlistaData )^2)/length(cadena))^0.5
  return(list(data = prep_normal, error = err))
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 17 Código para extrapolar mediante la distribución Log-Normal

```
distLogNormal <- function(listaData){

  listaData<- sort(listaData, decreasing = FALSE)
  logListaData<- log(listaData)
  meanListaData<- mean(logListaData)
  sdListaData <- sd(logListaData)

  tr = c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)

  #Extrapolación de datos en cada periodo de retorno
  logNormalizedData<-c()
  for (tr_i in tr) {
    datoLogNormal <- qlnorm((1-(1/tr_i)),meanListaData,sdListaData , lower.tail = TRUE)
    logNormalizedData<- c(logNormalizedData, datoLogNormal )
  }

  #Periodo de retorno real de los datos
  trlistaData <- c()
  for (i in c(1:length(listaData))) {
    probabilidad <- i/(length(listaData)+1)
    trDat <- 1/(1-probabilidad )
    trlistaData <- c(trlistaData , trDat)
  }
  trlistaData <- qlnorm((1-(1/(trlistaData ))), meanListaData, sdListaData )
  err <- (sum((listaData- trlistaData )^2)/length(listaData))^0.5

  return(list(data = logNormalizedData, error = err))
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 18 Código para extrapolar mediante la distribución Pearson tipo III

```
pearsonIII <- function(listaData) {  
  g <- asimetria(listaData)  
  meanData <- mean(listaData)  
  sdData <- sd(listaData)  
  
  tr <- c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)  
  
  # Extrapolación de datos en cada periodo de retorno  
  pearsonData <- c()  
  for (tr_i in tr) {  
    kt <- 2/g * ((g/6 * (qnorm(1 - 1/tr_i) - g/6) + 1)^3 - 1)  
    pearsonData <- c(pearsonData, (meanData + sdData * kt))  
  }  
  
  # Periodo de retorno real de los datos  
  listaData <- sort(listaData, decreasing = FALSE)  
  trlistaData <- c()  
  for (i in c(1:length(listaData))) {  
    probabilidad <- i / (length(listaData) + 1)  
    trDat <- 1 / (1 - probabilidad)  
    trlistaData <- c(trlistaData, trDat)  
  }  
  tr_cadena <- (meanData + sdData * (2/g * ((g/6 * (qnorm(1 - 1/trlistaData) - g/6) + 1)^3 - 1)))  
  
  # Calculo Error  
  err <- (sum((listaData - trlistaData)^2) / length(listaData))^0.5  
  
  return(list(data = pearsonData, error = err))  
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 19 Código para extrapolar mediante la distribución Log-Pearson tipo III

```
log_pearsonIII <- function(listaData) {  
  listaData_log <- log(listaData)  
  meanData <- mean(listaData_log)  
  sdData <- sd(listaData_log)  
  g <- asimetria(listaData_log)  
  
  tr <- c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)  
  
  # Extrapolación  
  log_pearsonData <- c()  
  for (tr_i in tr) {  
    kt <- 2/g * ((g/6 * (qnorm(1 - 1/tr_i) - g/6) + 1)^3 - 1)  
    log_pearsonData <- c(log_pearsonData, exp(meanData + sdData * kt))  
  }  
  
  # Error  
  trlistaData <- c()  
  for (i in c(1:length(listaData))) {  
    probabilidad <- i / (length(listaData) + 1)  
    trDat <- 1 / (1 - probabilidad)  
    trlistaData <- c(trlistaData, trDat)  
  }  
  tr_cadena <- exp(meanData + sdData * (2/g * ((g/6 * (qnorm(1 - 1/trlistaData) - g/6) + 1)^3 - 1)))  
  
  # Calculo Error  
  err <- (sum((listaData - trlistaData)^2) / length(listaData))^0.5  
  
  return(list(data = log_pearsonData, error = err))  
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20 Código para extrapolar mediante la distribución Gumbell

```
gumbell <- function(listaData) {  
  # Parametros necesarios  
  meanData <- mean(listaData)  
  sdData <- sd(listaData)  
  g <- asimetria(listaData)  
  alfa <- 0.7797 * sdData  
  beta <- meanData - 0.45 * sdData  
  
  tr <- c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)  
  
  # Extrapolation  
  gumbell_tr <- c()  
  for (tr_i in tr) {  
    y <- beta - alfa * log(-log(1 - 1/tr_i))  
    gumbell_tr <- c(gumbell_tr, y)  
  }  
  
  # Error  
  listaData <- sort(listaData, decreasing = FALSE)  
  trlistaData <- c()  
  for (i in c(1:length(listaData))) {  
    probabilidad <- i / (length(listaData) + 1)  
    trDat <- 1 / (1 - probabilidad)  
    trlistaData <- c(trlistaData, trDat)  
  }  
  trlistaData <- beta - alfa * log(-log(1 - 1/trlistaData))  
  err <- (sum((listaData - tr_cadena)^2) / length(listaData))^0.5  
  
  return(list(data = gumbell_tr, error = err))  
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Obtención de extrapolación: Se desarrolló una función en la que se ingresa la tabla de datos de precipitación de 24 horas máxima anual. Esta función calcula la extrapolación utilizando distintas distribuciones de probabilidad y evalúa cuál de todas ellas tiene el menor error cuadrático. Luego, devuelve la extrapolación con el menor error cuadrático multiplicada por un factor de 1.13 para aproximarse a los valores reales.

Figura 21 Código para obtener extrapolación

```
get_extrapolation <- function(dataframe) {  
  extrapolation <- data.frame(retorno = tr)  
  err_punt <- c()  
  
  for (item in c(2:ncol(dataframe))) {  
    temp <- dataframe[item]  
    colnames(temp) <- "A"  
    temp <- temp$A
```

```

n <- normal(temp)
ln <- log_normal(temp)
p <- pearsonIII(temp)
lp <- log_personIII(temp)
gum <- gumbell(temp)

errors <- c(n$error, ln$error, p$error, lp$error, gum$error)
min_error <- min(errors)

if (min_error == errors[1]) {
  datos <- n$data
} else if (min_error == errors[2]) {
  datos <- ln$data
} else if (min_error == errors[3]) {
  datos <- p$data
} else if (min_error == errors[4]) {
  datos <- lp$data
} else if (min_error == errors[5]) {
  datos <- gum$data
}

extrapolation <- cbind(extrapolation, i = datos * 1.13)
err_punt <- c(err_punt, min_error)
}

colnames(extrapolation) <- c('T', colnames(p24)[-c(1)])
return(list(data = extrapolation, list_errores = err_punt))
}

```

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9 Precipitación extrapolada por subcuena y errores

Periodo de retorno	W150	W170	W180	W190	W220
1	63.51979	55.42148	59.58511	64.29507	60.84061
5	74.64707	68.3734	73.8559	80.7245	79.91351
10	80.67389	75.46023	82.42634	90.08457	93.95609
20	85.72742	81.41322	90.13584	98.2287	108.53517
50	91.4705	88.16808	99.54456	107.85511	129.19055
100	95.31753	92.67556	106.2729	114.5495	146.15021
200	98.8421	96.78616	112.76654	120.87396	164.46697
500	103.10788	101.72908	121.08509	128.79576	191.0626
1000	106.09032	105.1594	127.22573	134.52347	213.21179
Error estándar mínimo	1.521748	1.426318	2.440102	3.351097	4.463141

Fuente: Elaboración Propia

Obtención de la precipitación promedio de la subcuena: Se creó una función en la que se ingresan la subcuena y la precipitación extrapolada. Para cada periodo de retorno, se realiza una interpolación utilizando el método de ponderación de distancia inversa (IDW por

sus siglas en inglés) para calcular el promedio de precipitación en cada una de las subcuencas. Luego, la función devuelve una tabla que muestra la precipitación promedio de cada subcuenca en todos los periodos de retorno, organizados en columnas.

Figura 22 Código para obtener de la precipitación promedio de la subcuenca

```
get_mean_pp_basin <- function(subbasin, centroids, extrapolation) {
  # Grills
  basin <- as_Spatial(st_union(subbasin))
  ext <- extent(basin)
  x_values <- seq(from = ext[1], to = ext[2], by = 100)
  y_values <- seq(from = ext[3], to = ext[4], by = 100)
  grd <- expand.grid(x = x_values, y = y_values)
  coordinates(grd) <- ~x + y
  gridded(grd) <- TRUE
  crs(grd) <- crs(basin)

  # ASIGNAR LOCALIZACION A TRZ
  extp_trans <- data.frame(t(extrapolation$data))
  colnames(extp_trans) <- paste("TR", tr, sep = "")
  extp_trans <- cbind(extp_trans, as.data.frame(coordinates(centroids)))
  coordinates(extp_trans) <- ~coords.x1 + coords.x2
  crs(extp_trans) <- crs(grd)

  mean_pp_basin <- data.frame(Subcuenca = paste("W", centroids$DrainID, "0", sep = ""))
  for (returnTime in c(1:9)) {
    # IDW DE POR TIEMPO DE RETORNO
    temp <- extp_trans[, c(paste("TR", returnTime, sep = ""), "coords.x1", "coords.x2")]
    colnames(temp) <- c("TR", "x", "y")
    idw.p <- gstat::idw(temp$TR ~ 1, temp, grd)
    idw.p <- raster(idw.p)
    idw.p <- raster::mask(idw.p, basin)

    subbasin <- cbind(subbasin, id = c(1:nrow(subbasin)))

    # PROMEDIO POR CADA SUBCUENCA
    caden <- c()
    for (item in c(1:nrow(subbasin))) {
      sdx <- as_Spatial(st_union(filter(subbasin, id == item)))
      mean_prep <- extract(idw.p, sdx, fun = mean, na.rm = TRUE)
      caden <- c(caden, mean_prep)
    }
    mean_pp_basin <- cbind(mean_pp_basin, TR = caden)
  }
  colnames(mean_pp_basin) <- c("Subcuenca", paste("TR", tr, sep = ""))
  mean_pp_basin <- data.frame(t(mean_pp_basin[-1]))
  colnames(mean_pp_basin) <- colnames(extrapolation$data)[-1]
  return(mean_pp_basin)
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Obtener hietograma: Se desarrolló una función en la que se ingresa una serie de precipitación en distintos periodos de retorno. Esta función determina las intensidades por cada intervalo y cada frecuencia utilizando el método de Dick Peschke. Luego, se utiliza una

regresión lineal múltiple para llevar a cabo el método de bloque alterno y obtener las intensidades máximas. Finalmente, la función devuelve una tabla con los hietogramas en cada periodo de retorno. Aplicando la Ecuación N° 3 y utilizando los datos suministrados por el MTC (2011), se calculó que la infraestructura de contención, con un riesgo aceptable del 25% y una vida útil proyectada de 40 años, tiene un periodo de retorno mínimo estimado en 139.54 años. Por esta razón, en este trabajo se ha decidido emplear un periodo de retorno de 150 años. De esta manera, los periodos de retorno que se analizarán incluirán intervalos de 2, 5, 10, 50, 100 y hasta 150 años.

Figura 23 Código para la generación de un hietograma

```
get_hietogramas <- function(cadena) {
  duracion <- c(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60,
               120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660,
               720, 780, 840, 900, 960, 1020, 1080, 1140, 1200,
               1260, 1320, 1380, 1440)

  # Intensidad y curvas IDF --- Modelo de Dick y Peschke
  duracion_min <- duracion / 60

  x3 <- c()
  x2 <- c()
  y <- c()
  for (pp in seq_along(cadena)) {
    pp_dp <- c()
    for (item in seq_along(duracion)) {
      n <- cadena[pp] * (duracion[item] / 1440)^0.25 / duracion_min[item]
      pp_dp <- c(pp_dp, n)
      x2 <- c(x2, tr[pp])
    }
    y <- c(y, pp_dp)
    x3 <- c(x3, log10(duracion))
  }
  x2 <- log10(x2)
  y <- log10(y)

  ec_int <- data.frame(x3 = x3, x2 = x2, y = y)

  # Regresion lineal multiple
  reg <- lm(ec_int$y ~ ec_int$x3 + ec_int$x2)
  k <- as.numeric(10^reg$coefficients[1])
  n <- as.numeric(-reg$coefficients[2])
  m <- as.numeric(reg$coefficients[3])

  # Elaboracion de hietogramas
  tr_hieto <- c(2, 5, 10, 50, 100, 150)
  hietograma <- data.frame(matrix(nrow = 24))
  colnames(hietograma) <- "Duration"
  for (tr_i in tr_hieto) {
    dur_hieto <- c()
    intensidad <- c()
    for (i in 1:24) {
      dur_hieto <- c(dur_hieto, i * 60)
      intensidad <- c(intensidad, k * tr_i^m / (i * 60)^n)
    }
    hietograma$Duration <- dur_hieto
    prof_ac <- intensidad * dur_hieto / 60
    prof_inc <- c()
    for (i in 1:24) {
      if (i == 1) {
        prof_inc <- prof_ac[i]
      } else {
        prof_inc <- c(prof_inc, prof_ac[i] - prof_ac[i - 1])
      }
    }

    pp_bAlterno <- c()
    for (i in sort((1:12) * 2, decreasing = TRUE)) {
      pp_bAlterno <- c(pp_bAlterno, prof_inc[i])
    }
    for (i in ((1:12) * 2 - 1)) {
      pp_bAlterno <- c(pp_bAlterno, prof_inc[i])
    }

    hietograma <- cbind(hietograma, i = pp_bAlterno)
  }
  colnames(hietograma) <- c("Duration", paste("TR", tr_hieto, sep = ""))
  return(hietograma)
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Obtención de lista de hietogramas: Se ha implementado una función en la que se ingresa como parámetro la tabla de precipitación promedio, en la cual cada columna representa una subcuenca. La función obtiene los hietogramas para cada subcuenca en los diferentes periodos de retorno. Luego, devuelve una lista de tablas, donde cada tabla contiene los hietogramas correspondientes a una subcuenca específica en los distintos periodos de retorno.

Figura 24 Código de la obtención de lista de hietogramas.

```
get_list_hietogramas <- function(data_mean) {
  data_pp <- list()
  for (item in seq_along(data_mean)) {
    temp <- data_mean[[item]]
    colnames(temp) <- "A"
    temp <- temp$A

    n_pp <- get_hietogramas(temp)
    data_pp[[names(data_mean)[item]]] <- n_pp
  }
  return(data_pp)
}
```

Fuente: Elaboración Propia

Se insertó la cuenca y las subcuencas obtenidas en el procesamiento del modelo de elevación digital en ArcGIS con el complemento HEC-GeoHMS, y se llamó a las distintas funciones creadas ingresando los parámetros requeridos, y se ejecutó el programa en la que se obtuvo diferentes estructuras de datos.

Figura 25 Aplicación e ingreso de los parámetros de las funciones

```
# IMPORTACIÓN DE SUBCUENCAS
subcuencas <- st_read("C:\\Lajas\\SubcuencasLajas.shp")
# APLICACION
centroides <- getLayerCentroids(subcuencas)
p24 <- maxAnnualPrecipByPoints(centroides$WGS84, 1982, 2021, "ClimateServer")
p24_extrapolation <- get_extrapolation(p24)$data
errores <- get_extrapolation(p24)$list_errores
mean_pp_basin <- get_mean_pp_basin(subcuencas, centroides$UTM, p24_extrapolation)
hietogramas_24 <- get_list_hietogramas(mean_pp_basin)
```

Fuente: Elaboración Propia

Exportar lista: Se desarrolló una función de la librería para exportar listas de de tablas a formato propio de Excel.

Figura 26 Código para la exportación de listas a formato .xlsx

```
# EXPORT_XLSX
openxlsx::write.xlsx(hietogramas_24, file = "Hietogramas.xlsx")
```

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 7 se muestra los hietogramas correspondientes a la subcuenca W150 en diferentes periodos de retorno, las demás subcuencas se muestran en el Anexo 1.

Tabla 10 Hietogramas de la subcuenca W150

Duración	TR2	TR5	TR10	TR50	TR100	TR150
60	0.7167088	0.783113	0.8374034	0.9784232	1.0462538	1.088091631
120	0.7661665	0.837153	0.8951899	1.045941	1.1184523	1.163177248
180	0.8243984	0.9007802	0.9632281	1.1254369	1.2034594	1.251583619
240	0.8941279	0.9769703	1.0447001	1.220629	1.3052508	1.357445474
300	0.9793789	1.0701199	1.1443075	1.3370103	1.4297004	1.486871639
360	1.0863772	1.1870319	1.2693245	1.4830804	1.585897	1.64931427
420	1.2253409	1.3388708	1.4316899	1.6727883	1.7887567	1.860285914
480	1.4143971	1.5454433	1.6525833	1.9308804	2.0647415	2.147306843
540	1.6893811	1.8459051	1.9738751	2.3062781	2.4661641	2.564781661
600	2.1336165	2.3312996	2.4929202	2.9127311	3.1146603	3.239210144
660	3.0026496	3.2808499	3.5082995	4.0991015	4.3832776	4.558557143
720	5.7889267	6.3252802	6.7637892	7.9028198	8.450694	8.788622433
780	30.595714	33.430456	35.74807	41.76809	44.663722	46.449746
840	3.8815833	4.2412183	4.5352468	5.298988	5.6663479	5.892935186
900	2.4823899	2.7123874	2.9004275	3.3888631	3.6238009	3.768710307
960	1.8813911	2.055705	2.1982197	2.5684026	2.7464608	2.856286927
1020	1.5376787	1.6801471	1.7966257	2.0991797	2.2447083	2.334470269
1080	1.311971	1.4335273	1.5329086	1.7910523	1.9152196	1.991805836
1140	1.1509864	1.2576272	1.3448139	1.5712823	1.6802137	1.747402466
1200	1.0296452	1.1250435	1.2030388	1.405632	1.5030794	1.563184961
1260	0.9344905	1.0210726	1.0918599	1.2757305	1.3641723	1.418723179
1320	0.8576127	0.9370719	1.0020358	1.1707799	1.2519458	1.302008956
1380	0.7940388	0.8676078	0.9277559	1.0839912	1.1591404	1.205492423
1440	0.7404754	0.8090816	0.8651724	1.0108685	1.0809484	1.124173614

Fuente: Elaboración Propia

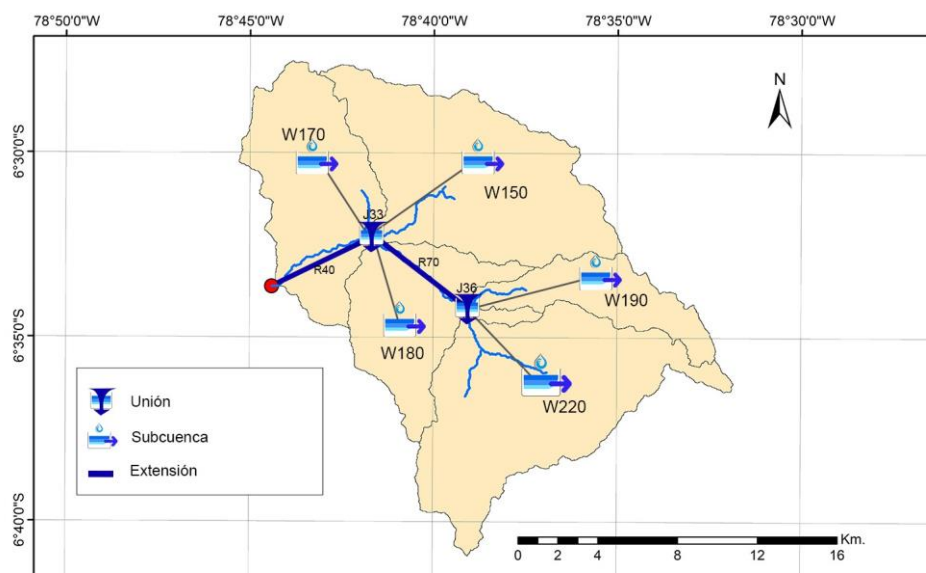
4.5.2. Modelamiento en HEC-HMS

Antes de proceder con el modelado, se realizó la preparación del proyecto utilizando la herramienta complementaria para ArcGIS, HEC-GeoHMS. Esta herramienta requiere de la capa de Número de Curva y el modelo de elevación digital de la cuenca. Posteriormente, el

proyecto fue exportado a HEC-HMS, donde se configuraron los métodos de pérdida y transformación SCS, así como el método de tránsito de avenidas Muskingum.

En HEC-HMS, a partir los valores de tiempo de retardo calculado en HEC-GeoHMS se obtuvo el tiempo de concentración con la ecuación N° 14 y se determinó los valores K y x de Muskingum de acuerdo con lo descrito por el Departamento de Ingeniería de Hidráulica Marítima Ambiental para pendientes altas. La abstracción inicial se calculó con la ecuación N° 13. Estos valores de Muskingum, de la abstracción inicial y de los hietogramas correspondientes a cada cuenca para un solo periodo de retorno. Además, se incluyeron los datos de caudales para calibración en una estación de aforo definida, lo que permitiría calibrar los valores del Número de Curva y la abstracción inicial del modelo. El modelo se ejecutó inicialmente para el periodo de retorno seleccionado, obteniendo así el caudal máximo en el punto inicial de la sección del río Chotano del área de estudio y el caudal en la estación de calibración. Posteriormente, se procedió a ejecutar nuevamente el modelo para los hietogramas de los otros periodos de retorno, uno a la vez.

Figura 27 Modelo hidrológico de la cuenca del río Chotano hasta Lajas



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11 Valores de tiempo de retardo y Muskingum

Extensión	Subcuenca	Tiempo de retardo	K(H)	X
R40	W170	88.354	1.473	0.35
R70	W180	72.722	1.212	0.35

Fuente: Elaboración Propia

4.5.3. Modelamiento en HEC-RAS

Antes de realizar el modelamiento hidráulico se preprocesó la información la información en ArcGIS con el complemento HEC-GEORAS, donde se insertó las secciones transversales y las curvas de nivel, se creó las capas necesarias de línea central y bordes, y se calculó los valores de sus atributos para luego exportar el proyecto a HEC-RAS.

En HEC-RAS, se importó el proyecto creado y se añadieron los coeficientes de rugosidad de Manning para cada sección transversal. Se establecieron los flujos de caudal en cinco perfiles, cada uno correspondiente a un período de retorno, empleando condiciones de contorno de profundidad crítica en la ubicación aguas arriba permitieron el cálculo de la profundidad en cada perfil. La simulación se llevó a cabo siguiendo un plan de ejecución con un régimen de flujo supercrítico debido a los cambios de pendiente y a que debido a que el periodo lluvioso es mayor al periodo de estiaje. Una vez completada, se obtuvieron representaciones visuales de las secciones transversales, así como mapas de la profundidad y la velocidad del flujo para cada perfil.

Figura 28 Diagrama de flujo



CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

Objetivo 1. Calcular las máximas avenidas probables en diferentes periodos de retorno con las herramientas HEC-GeoHMS y HEC-HMS empleando datos CHIRPS.

5.1. Caudales probables en máximas avenidas calibrados

Tabla 12 Caudales máximos probables en el punto final de la cuenca y en el punto de calibración calculados por periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	Caudal máximo en el punto de calibración (m3/s)	Caudal máximo en el punto de final de la cuenca (m3/s)
2	51.3	94.7
5	71.5	121.6
10	90.9	146.8
50	155.1	225.8
100	193.3	271.0
150	237.5	312.1

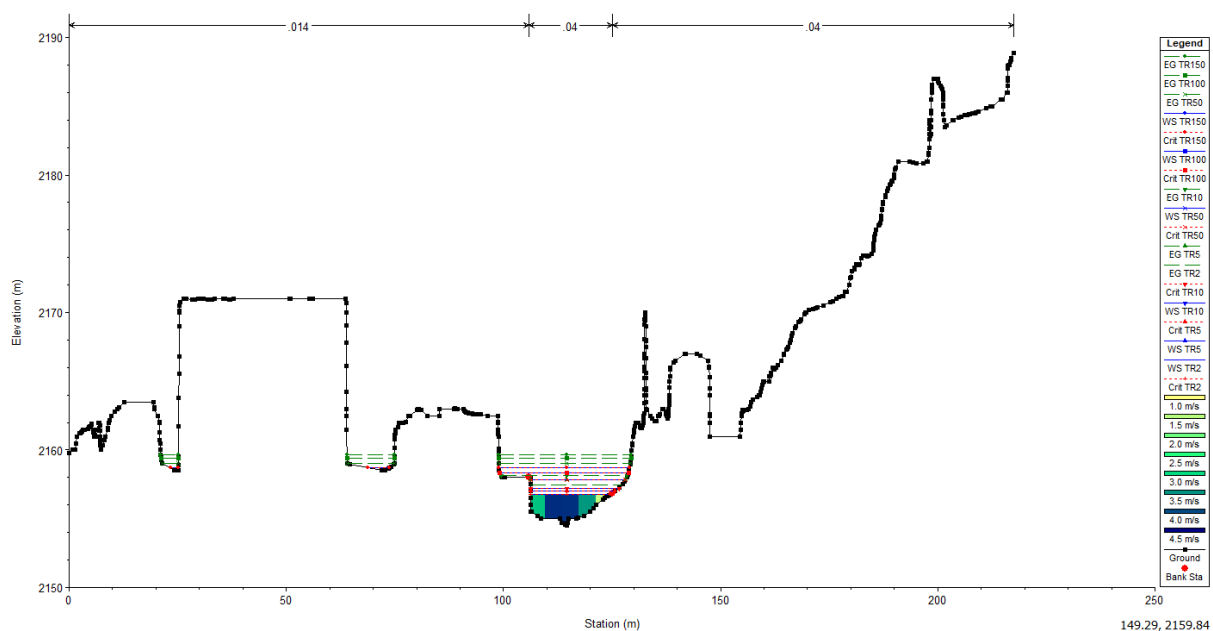
Fuente: Elaboración Propia

Objetivo 2: Simular el comportamiento del río Chotano con las herramientas HEC-GeoRAS y HEC-RAS.

5.2. Simulación del caudal en HEC-RAS

En la Figura 30 se muestran los niveles de agua correspondientes a la sección transversal 30 en diferentes periodos de retorno, las demás secciones se muestran en el Anexo 2.

Figura 29 Perfil de nivel de agua en sección transversal 30

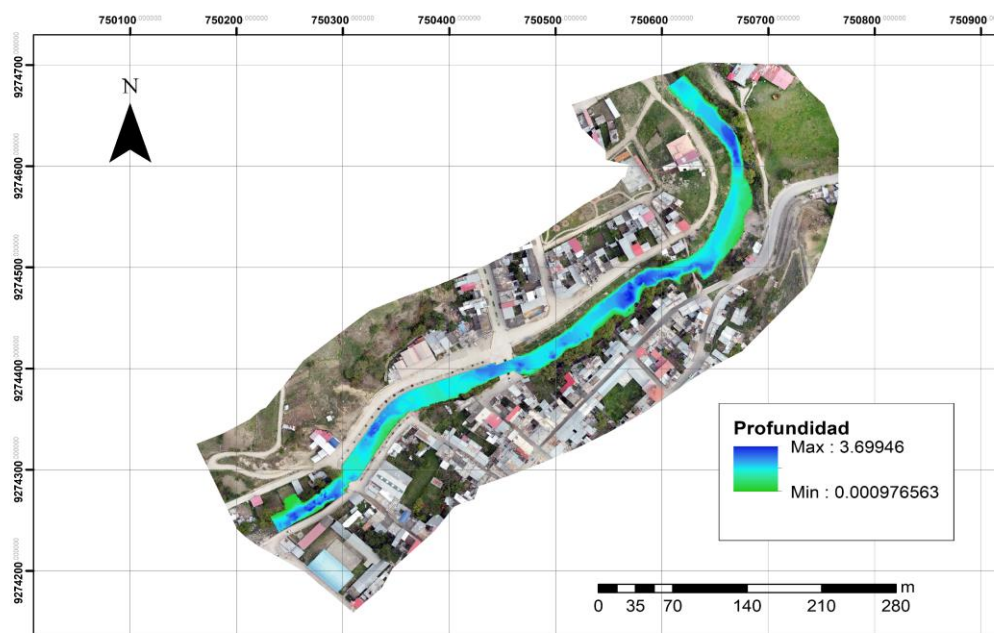


Fuente: Elaboración Propia

Objetivo 3: Elaborar un mapa de inundaciones en diferentes periodos de retorno la localidad de Lajas.

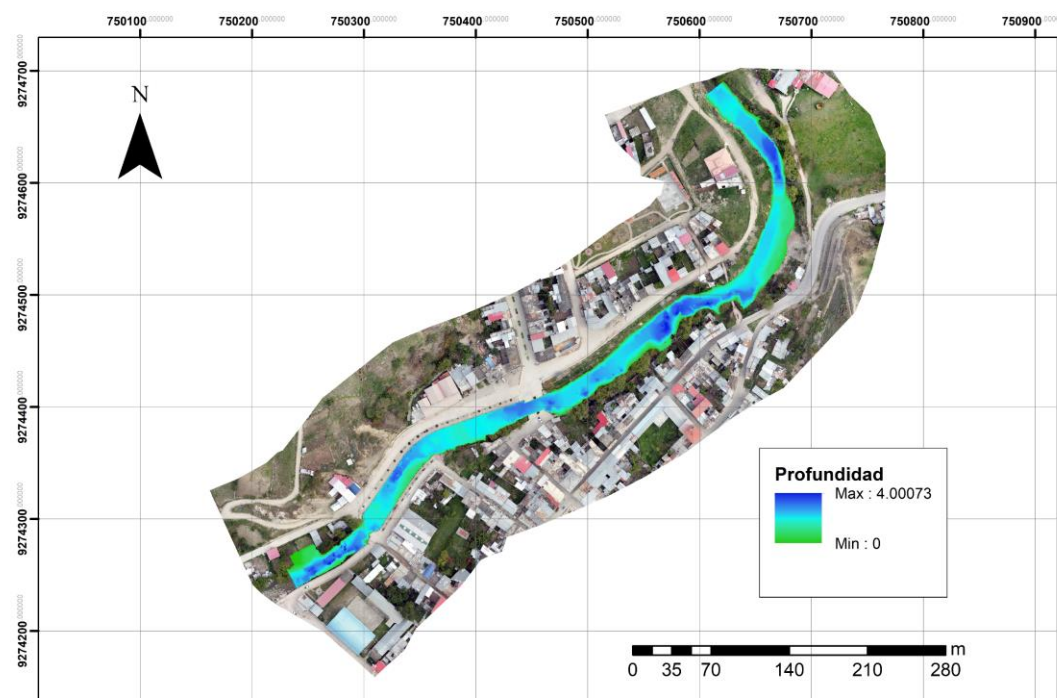
5.3. Zonificación de áreas inundables

Figura 30 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 2 años



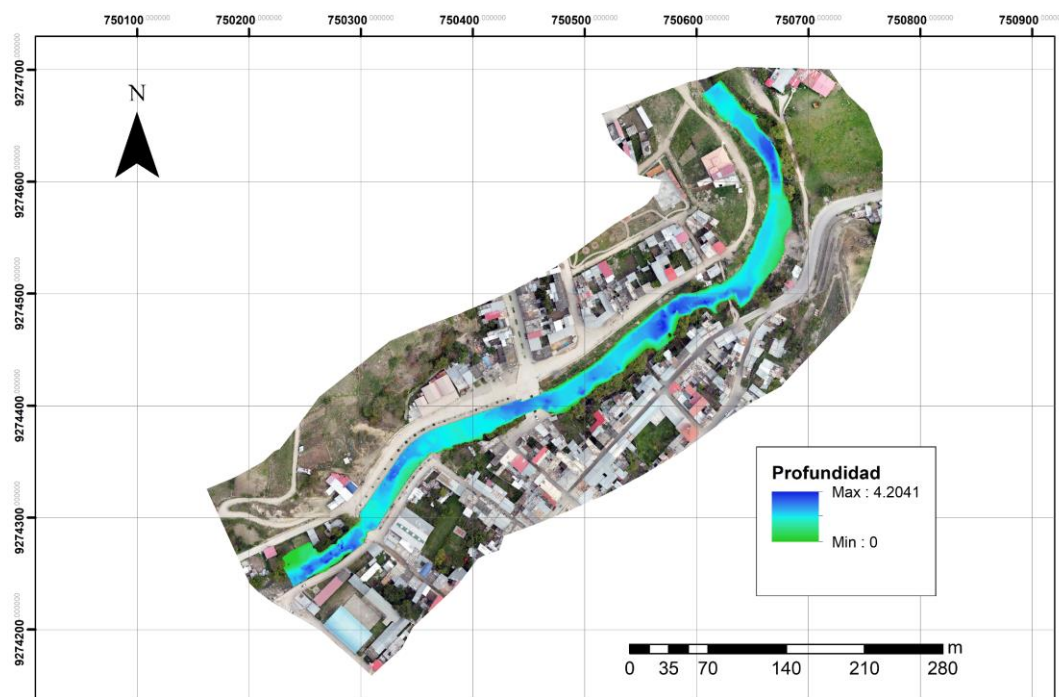
Fuente: Elaboración Propia

Figura 31 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 5 años



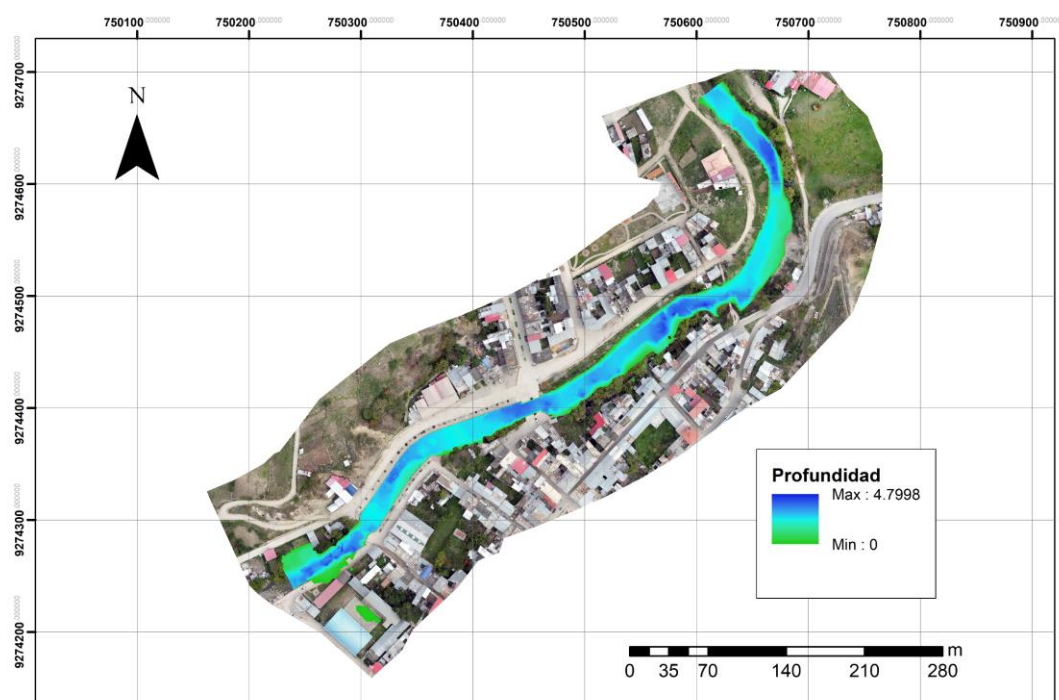
Fuente: Elaboración Propia

Figura 32 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 10 años



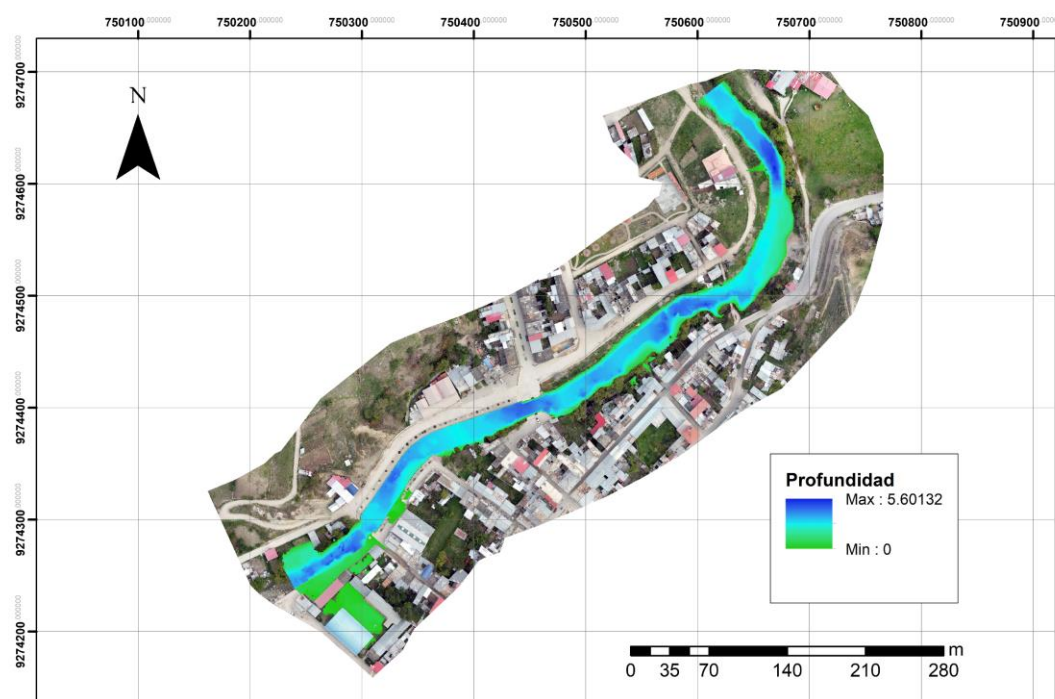
Fuente: Elaboración Propia

Figura 33 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 50 años



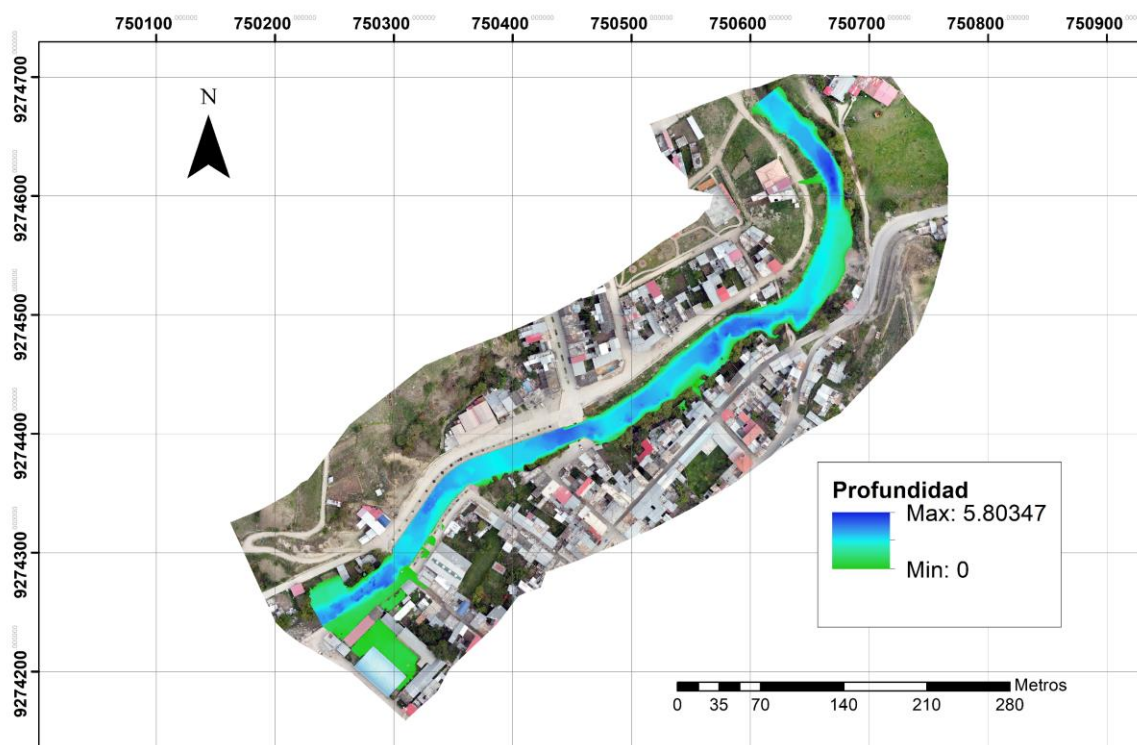
Fuente: Elaboración Propia

Figura 34 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración Propia

Figura 35 Áreas de inundación en el área de estudio, para un periodo de retorno de 150 años



Fuente: Elaboración Propia

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Desde el punto de vista metodológico, la obtención de los resultados se ejecutó a través de un enfoque integral que abarcó la identificación de cuencas y subcuencas, la determinación de los caudales máximos para distintos periodos de retorno mediante la aplicación de un modelo hidrológico, así como la determinación de áreas inundables mediante un modelo hidráulico ofreciendo una visión detallada de la dinámica hidrológica en la zona de estudio.

La identificación de la cuenca y las subcuencas del área de captación del río Chotano hasta Lajas es muy importante porque proporciona una delimitación de las áreas que contribuyen al flujo de agua fundamental para el análisis de inundaciones. Se estableció que la cuenca estaría conformada por 5 subcuencas denominadas W150, W170, W180, W190 y W220, para cada una de ellas el valor de Número de Curva calculado fue de 76.67, 74.5, 80.43, 78.25 y 72.33; sin embargo, con la calibración se modificaron estos valores obteniéndose 51.67, 49.5, 55.43, 53.25 y 47.33. Según Ydrogo, J. (2021), el valor promedio de numero de curva de la cuenca alta del río Chotano es de 70.11. Es importante señalar que este valor supera los valores calibrados obtenidos en la presente investigación, esto podría deberse a el uso de datos CHIRPS, debido a que estos valores fueron incrementados en un 1.13% en la extrapolacion y a la propia naturaleza de este tipo de datos. Aunque se observa cierta variabilidad, de acuerdo con la información proporcionada por Senamhi (2017), el empleo de CHIRPS resulta aceptable para la identificación y cuantificación de precipitaciones superiores a 10 y 20 mm (consideradas como días húmedos); este sistema demuestra ser eficaz al cuantificar de manera precisa tanto la cantidad anual de lluvia como el número de días húmedos a lo largo del año, consolidándose como una alternativa confiable para la evaluación de eventos de lluvia extrema.

En el punto de calibración se registraron caudales de 51.3, 71.5, 90.9, 155.1, 193.3 y 237.5 m³/s para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 150 años, respectivamente. Este es el mismo punto designado como el sitio de análisis en el estudio de Ydrogo que obvtuvo en

los periodos de retorno de 20, 50, 100, 200 y 500, 99.60 m³/s, 132.1 m³/s, 161.50 m³/s, 195.5 m³/s y 248.60 m³/s respectivamente. Para comparar se buscó usar la linea de tendencia potencial de la relacion entre el periodo de retorno y los caudales obtenidos en este estudio pues es la que más se ajusta con un coeficiente de determinación (R²) de 0.9962 (la ecuación obtenida fue $Q = 40.63 * TR^{0.3457}$, donde Q es el caudal y TR es el periodo de retorno) resultando que para los periodos de retorno en este estudio 20, 50, 100, 200 y 500 años los caudales serían 114.45, 157.1, 199.64, 253.7 y 348.24 m³/s. De esta comparación se puede observar que existe una variación entre los diferentes caudales indicando cierta sobreestimación en la capacidad predictiva del modelo de este estudio, especialmente cuando se proyectan caudales para periodos de retorno más largos.

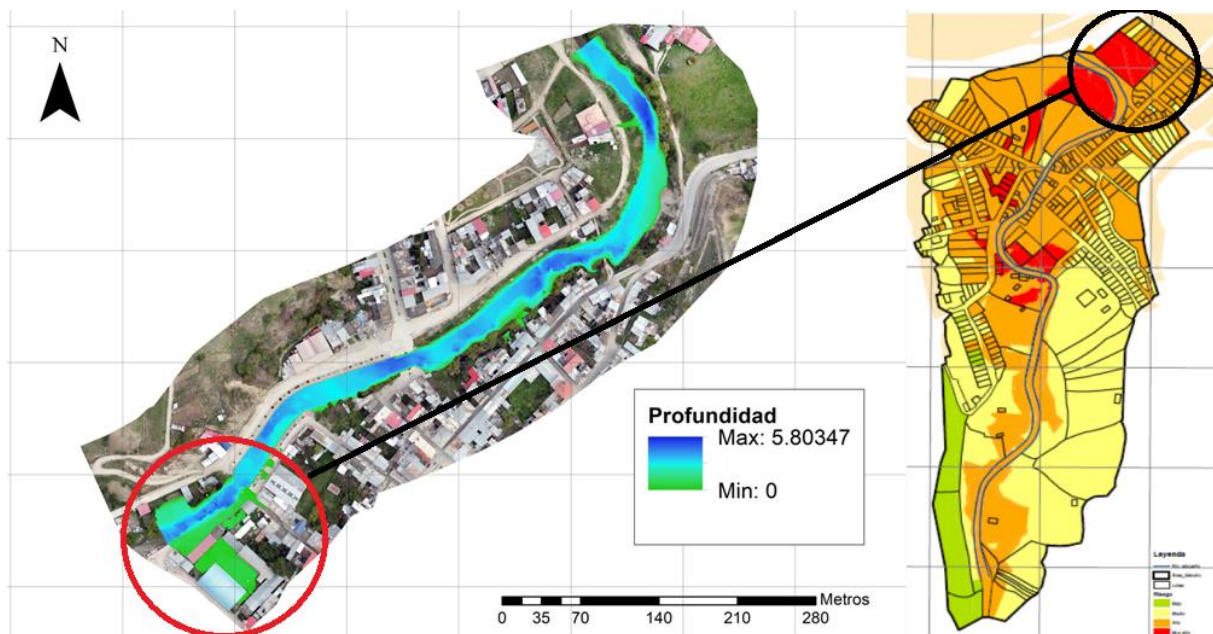
El río Chotano presenta parcialmente a lo largo del área de estudio muros de concreto en los bordes con más de 3 metros de altura según el levantamiento topográfico resultante que indica un intento de controlar el flujo del río y mitigar los riesgos de inundación. Esto explica que no solo hubo una inversión en infraestructura hidráulica, sino que también se tuvo en al momento acciones de mejora en la capacidad de contención de agua y la protección de áreas adyacentes por parte de autoridades.

Los resultados del caudal máximo en el punto final de la cuenca para diferentes periodos de retorno son fundamentales para evaluar la capacidad hidráulica de la cuenca y diseñar infraestructuras de mitigación adecuadas. En periodos de retorno bajos como 2, 5 y 10 se muestra un incremento gradual significativo pero manejable pues según los mapas obtenidos de áreas inundables no se muestra desbordes con afectaciones a la población. La presencia de muros de concreto a lo largo del cauce, a pesar de que existe una subestimación de los caudales resultantes, se muestra como una estrategia efectiva para contener el caudal del río, demostrando su eficacia por debajo un periodo de retorno de 50 años. Sin embargo, en periodos de retorno superiores como 50, 100 y 150 resalta la importancia de considerar escenarios

extremadamente raros, pero potencialmente impactantes pues se observa un desbordamiento en una sección particularmente crítica, justo antes de la confluencia con el río Jalqueño.

Al zonificar las posibles áreas inundables que representan un peligro para la población se puede observar en los mapas resultantes que la zona crítica del área de estudio sería la zona previa a la confluencia del río Chotano, en donde actualmente se encuentre el Camal Municipal. Esta zona coincide con los resultados de Yrigoin & Vásquez (2023) que catalogan a esa zona con un nivel de riesgo muy alto a inundaciones por desborde del Río Jalqueño. En consecuencia, es preciso señalar que la región se vería afectada tanto por el río Chotano como por el río Jalqueño, lo que aumenta significativamente el riesgo afectaciones por inundaciones subrayando la imperativa necesidad de implementar medidas preventivas para mitigar los posibles impactos en esta área

Figura 36 Zona de alto riesgo a inundaciones del río Chotano y Jalqueño

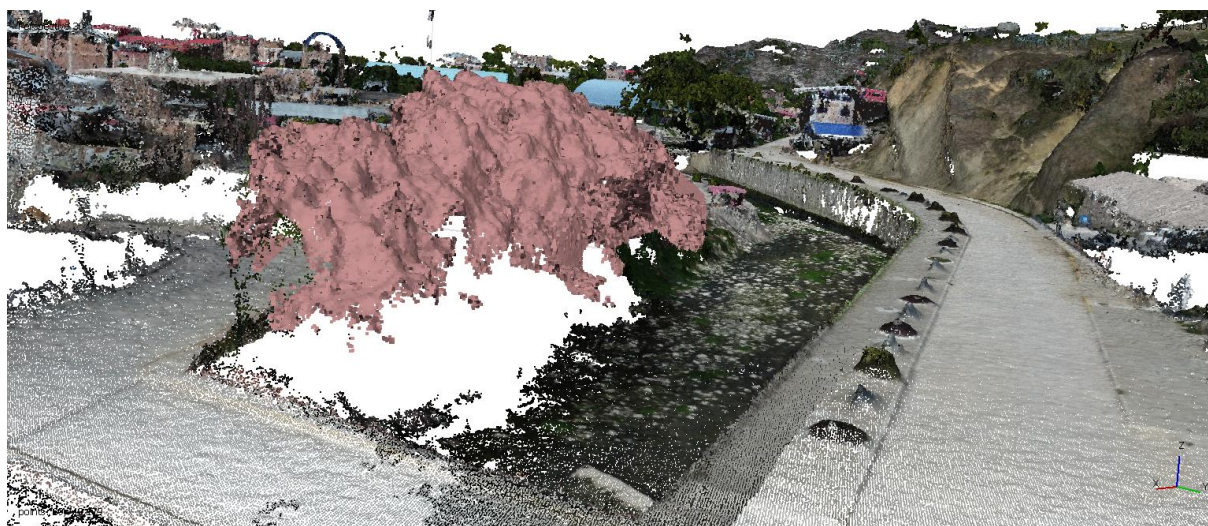


Fuente: Elaboración Propia Nota. Para mayor detalle esta zona se encuentra en la Figura N°38.

La obtención de curvas de nivel mediante fotogrametría con dron se presenta como una alternativa eficaz y avanzada para cartografiar el terreno y se destaca por su versatilidad y bajo costo. Este método utiliza imágenes aéreas capturadas por un dron y se necesita condiciones óptimas de visibilidad para que la cámara pueda captar correctamente las imágenes y generar

el modelo digital de superficie, pero no proporciona información de los terrenos cubiertos de follaje debido a la oscuridad y las sombras que crean las masas arbóreas (Torres, 2023). De acuerdo con Avella (2022), en su investigación destaca que la fotogrametría puede ocasionar una considerable pérdida de información en la nube de puntos fotogramétrica, especialmente en áreas con densa cobertura forestal o vegetación arbustiva; en estos casos, prevalece la información de la superficie del píxel. En este estudio, las zonas con presencia de árboles en el cauce representaron un problema porque se interpretaba como una superficie sólida, por eso se tuvo que hacer una «limpieza» del modelo digital de superficie para obtener el modelo digital de elevación de terreno eliminando los puntos de correspondientes a la copa de los árboles y reconstruyendo la superficie en AutoCAD.

Figura 37 Limpieza de puntos de copas de árboles del cauce en el modelo tridimensional



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la precisión de los resultados de este estudio podría beneficiarse de una mayor cantidad de datos locales y mediciones directas para la calibración de parámetros específicos, la inclusión de datos climáticos de estaciones meteorológicas locales podría mejorar la precisión de las estimaciones de precipitación y, por ende, los resultados del modelo hidrológico e hidráulico. Sin embargo, a pesar de la limitante los datos CHIRPS puedes suponer información valiosa en estos casos pues según Duque-Sarango, Patiño, & López (2019), a pesar

de la limitada información los modelos pueden obtener valores aceptables. En consecuencia, se puede afirmar que los resultados derivados del modelo hidrológico e hidráulico utilizando datos CHIRPS son adecuados para cumplir con los objetivos de esta investigación.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

1. En el presente estudio se pudo determinar las áreas inundables en la localidad de Lajas, región Cajamarca, empleando datos CHIRPS generando las secciones transversales y mapas de inundaciones para diferentes periodos de retorno. Los resultados obtenidos proporcionan una visión detallada de la dinámica hidrológica y los riesgos de inundación en la zona, lo cual contribuye significativamente a la comprensión y gestión de eventos extremos.
2. El cálculo de las máximas avenidas probables en distintos periodos de retorno mediante la aplicación de herramientas como HEC-GeoHMS y HEC-HMS y RStudio, junto con datos CHIRPS obtenidos a través del API en un algoritmo específico, permitieron conocer la magnitud y frecuencia de eventos hidrológicos extremos. Los caudales obtenidos fueron de 51.3, 71.5, 90.9, 155.1, 193.3 y 237.5 m³/s para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 150 años, respectivamente; estos datos pueden considerarse sobreestimaciones pero útiles para el análisis de este tipo de eventos.
3. El modelo hidráulico mediante HEC-GeoRAS y HEC-RAS permitió conocer el comportamiento del río Chotano mediante la representación de las secciones transversales del río en el área de estudio, de esta manera cuales conocer son las profundidades de los caudales en diferentes periodos de retorno. Se obtuvo 3.7, 4, 4.2, 4.8, 5.6 y 5.8 metros de profundidad máxima en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 150 años, respectivamente. Esto sirve de punto de partida para la

elaboración de medidas de mitigación como incrementar la altura de los muros de concreto y limitar los desbordes.

4. La elaboración de mapas de inundaciones para diferentes periodos de retorno en la localidad de Lajas proporciona información espacialmente explícita sobre las zonas vulnerables. Se pudo identificar que la zona crítica con mayor riesgo a inundaciones se encuentra en la confluencia del Chotano con el río Jalqueño, que en la actualidad se encuentra el Camal Municipal. Estos mapas son herramientas esenciales para la toma de decisiones en la gestión del riesgo, permitiendo una planificación adecuada y la implementación de medidas preventivas.

7.2. Recomendaciones

1. Se sugiere llevar a cabo un estudio más detallado en la zona de la confluencia del río Chotano con el río Jalqueño y posterior a ella. Este análisis adicional permitiría evaluar la integridad del muro de contención existente, especialmente considerando la observación de daños como la destrucción parcial del muro de concreto (Figura N° 38) y destacar la importancia de fortalecer la infraestructura hidráulica en esta ubicación crítica.
2. Es aconsejable continuar actualizando y mejorando los modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en la tesis. Incorporar datos locales adicionales, mediciones directas y, en la medida de lo posible, información climática específica de estaciones meteorológicas locales, contribuiría a aumentar la precisión de las estimaciones y a fortalecer la validez de los resultados.
3. Considerando la información obtenida sobre las profundidades máximas de los caudales en diferentes periodos de retorno, se recomienda tomar estos datos en consideración durante la planificación y construcción de defensas ribereñas, puentes y otras estructuras que puedan resultar afectados eventos extremos que

resultan en inundaciones. ante posibles inundaciones y protegiendo la infraestructura crítica de la zona.

4. Además de la infraestructura de contención existente, se sugiere evaluar la efectividad de mejorar la infraestructura actual o plantear otras medidas de mitigación. Una evaluación integral de estas estrategias podría proporcionar una perspectiva más completa sobre la gestión de inundaciones en la zona, se plantea la implementación de una o varias de las siguientes medidas:

Medidas Estructurales:

Construcción de Diques y Barreras: Se propone la construcción y/o mejora de estructuras defensivas para controlar el caudal y proteger áreas propensas a inundaciones. Es prioritario enfocarse en la confluencia del río Chotano con el río Jalqueño, una zona caracterizada por su alta erosividad fluvial. Previamente, existían barreras que han sido deterioradas; por tanto, la reconstrucción debe contemplar el uso de materiales con alta resistencia erosiva. Además, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo para preservar la integridad y funcionalidad de estas infraestructuras a largo plazo.

Sistemas de Almacenamiento de Agua: Implementar embalses y tanques de retención para regular el exceso de agua durante eventos de inundación.

Medidas No Estructurales

Planes de Ordenamiento Territorial: Se ha identificado la presencia de construcciones cercanas al cauce del río, lo cual eleva significativamente el riesgo de inundaciones. En respuesta a esta situación, se puede desarrollar e implementar de políticas de ordenamiento territorial que limiten las edificaciones en áreas con alto riesgo de sufrir este tipo de eventos naturales.

Sistemas de Alerta Temprana: Establecer mecanismos de monitoreo y alerta para informar a la población sobre posibles eventos de inundación.

Educación y Concienciación Comunitaria: Realizar campañas para educar a la población sobre los riesgos de inundación y cómo prepararse para ellos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araya, A., González, V., & Jiménez, M. (2018). Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro. *INGENIERÍA UC*, 25(1). Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/707/70757668006/html/>
- Autoridad Administrativa del Agua. (2016). *Plan de contingencia por temporada de lluvias 2016 - 2017: Identificación de zonas vulnerables ante inundaciones e identificación de poblaciones vulnerables por activación de quebradas. (Ámbito del AAA Titicaca y Madre de Dios)*. Perú: Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3822>
- Avella, M. P. (2022). *Análisis comparativo de modelos digitales de terreno obtenidos por tecnología LiDAR con aeronave no tripulada y por fotogrametría con UAV en zona de montaña*. Bogotá: Universidad Antonio Nariño. Obtenido de https://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5967/1/2022_MiryamPaolaAvellaRodr%C3%ADguez.pdf
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Sabino, E., Felipe, O., Vega, F., & Fernández, C. (2017). *Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Lima: Servicio de Meteorología e Hidrología del Perú. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Bateman, A. (2007). *HIDROLOGÍA BÁSICA Y APLICADA*. Cartagena: Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Obtenido de <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Beard, L. R., Water Resources Council (U.S.), United States. Office of Water Research and Technology., University of Texas at Austin. Center for Research in Water Resources.

- (1974). *Flood flow frequency techniques: a report*. Austin: Center for Research in Water Resources. Obtenido de https://water.usgs.gov/osw/bulletin17b/dl_flow.pdf
- Bello, L., & Velázquez, S. (2012). Cálculo del periodo de retorno. En L. Gómez, & M. Medina, *Guía de métodos estadísticos en climatología* (págs. 53-58). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Brunner, G. W. (2023). *Sistema de análisis de ríos Hec-RAS. Manual de referencia hidráulica*. US Army Corps of Engineers. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20Hydraulic%20Reference%20Manual-v6.4.1.pdf>
- Calderón, J. A. (2014). *Comportamiento hidráulico de sistemas de tuberías bajo flujo supercrítico: diseño tradicional vs. diseño futuro [Proyecto de grado]*. Bogotá: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/6907978d-df30-456e-96e1-296d66cee5fe/content#:~:text=Flujo%20supercr%C3%ADtico%20Este%20tipo%20de,en%20forma%20de%20energ%C3%ADa%20cin%C3%A9tica>.
- Castillo, H. F. (2019). VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HEC – HMS PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSITO DE AVENIDAS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA CON ANTECEDENTES ASOCIADOS A FENOMENOS DE INUNDACIÓN. *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA*, 48. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/35736/CastilloSarmientoHenryFabi%C3%A1n2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ccorimanya, M. (2018). *Diseño de defensas ribereñas en el río chili, para el tramo comprendido entre el poblado de Chusicani y Arancota, distrito de Sachaca, en una longitud de 1.3km [Tesis para optar el Título de Ingeniera Civil]*. Perú: Universidad

- Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7250>
- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional. (2023). *INFORME DE EMERGENCIA N° 1088 – 12/4/2023 / COEN - INDECI / 19:00 HORAS*. Cajamarca: INDECI. Obtenido de <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2023/04/INFORME-DE-EMERGENCIA-N%C2%BA-1088-12ABR2023-LLUVIAS-INTENSAS-EN-EL-DEPARTAMENTO-DE-CAJAMARCA-8.pdf>
- Centro de Peligros Climáticos. (s.f.). *CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations [CHIRPS: Estimaciones de lluvia a partir de pluviómetros y observaciones satelitales]*. California: UC Santa Barbara. Obtenido de <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Departamento de Tecnología de la Construcción. (2018). *LA PRECIPITACIÓN. Hidrología superficial y Subterránea*. La Coruña, España: Universidade da Coruña.
- Domenech, J. (s.f.). *HISTOGRAMA. Curso de estadística MARS*. México: Universidad Tecnológica de Queretaro. Obtenido de https://www.uteq.edu.mx/files/docs/Curso_Estadistica_MARS/Histograma.pdf
- Duque-Sarango, P., Patiño, D. M., & López, X. E. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información tecnológica*, 30(6), 351-362. Obtenido de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351>
- Espinoza, R. A., & Neyra, R. (2019). *MODELAMIENTO HIDRAÚLICO E HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA BOMBOCA, ZONA URBANA DEL CENTRO POBLADO CHUNCHUQUILLO, PARA CONDICIONES EXTREMAS,USANDO HEC-RAS. [TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL]*.

- UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN, Jaén. Obtenido de <https://core.ac.uk/reader/287369510>
- ESRI. (s.f.). *ArcGIS Pro*. Obtenido de ¿Qué es la fotogrametría?: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/introduction-to-ortho-mapping.htm>
- Fernández, Y. (23 de Agosto de 2019). *API: qué es y para qué sirve*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/basics/api-que-sirve>
- Francisco, N., Turrent, A., Flores, H., Martínez, M., & Enríquez, J. F. (2010). Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71-78.
- Fuentes, K. F. (2016). *DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS*. Concepción: Universidad del Bío - Bío. Obtenido de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2192/1/Fuentes_Romero_Karol_Fernanda.pdf
- Fundamento de Hidrología. (1 de Mayo de 2020). 07 Proceso de cálculo del período de retorno [video]. Youtube. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=Swm6SBM_WkQ&ab_channel=FundamentosdeHidrolog%C3%ADa
- GeoInnova. (18 de Julio de 2019). *Geo Innova*. Obtenido de Geo Innova: <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-la-interpolacion-espacial-de-datos/#:~:text=La%20interpolaci%C3%B3n%20espacial%20de%20datos%20es%20una%20parte%20de%20la,valores%20cuyo%20valor%20es%20conocido.>
- Gonzales, R. (22 de Marzo de 2019). *Qué es R y RStudio?* Obtenido de Gonzalezgouveia: <https://gonzalezgouveia.com/que-es-r-y-rstudio/>
- González, S., & Rincón, H. (2011). Metodología para el ajuste de modelos de valor extremo tipo I (gumbel) y log pearson tipo III, para series de valores máximos. *Ingenio Magno*,

- 2(1). Obtenido de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/41/41>
- Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales. (2019). Glosario meteorológico. *IDEAM*, 1ra. ed.(227, 276). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorol%C3%B3gico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8e>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1 de Agosto de 2019). *Portal del Gobierno de México*. Obtenido de ¿Qué es una cuenca?: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2018). *INUNDACIÓN*. Obtenido de <https://www.indecivil.gob.pe/wp-content/uploads/2018/09/Inundaciones.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (s.f.). *Sistema de Información Distrital para la Gestión Pública*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática. Obtenido de <https://estadist.inei.gob.pe/map>
- Jiménez, M. (2015). Ax_2015 (Nº de versión 2.0.0.1). *Windows*. Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Kohler, M. A., Linsley, R. K., & Paulus, J. L. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Cali: McGraw-Hill Latinoamericana.
- Machuca, Y. (06 de Marzo de 2022). Elaboran plan de acción ante desastres ocasionados por las lluvias en Cajamarca. *La República*. Obtenido de <https://larepublica.pe/sociedad/2022/03/06/elaboran-plan-de-accion-ante-desastres-ocasionados-por-las-lluvias-en-cajamarca-lrnd>
- Martínez, J. (2018). Tema 13. Distribuciones de probabilidad. *Matemáticas II*, 291. Obtenido de <https://maticasiesoja.files.wordpress.com/2018/12/Funciones-de-probabilidad-2%C2%BABachillato.pdf>

- McPhee, J. (s.f.). Factores de Frecuencia e Intervalos de Confianza. *Recursos Hídricos y Medio Ambiente*. Chile, Chile: Universidad de Chile. Obtenido de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2013/2/CI5101/1/material_docente/bajar?bajar=1&id=828471
- Mildred Estadística. (1 de Abril de 2019). Distribución Gumbel Máxima (Excel - Fácil) [video]. Youtube. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=FjygsSbkURE&ab_channel=MildredEstadistica
- Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. (2015). *EL CICLO DEL AGUA*. Argentina: EXPLORA LAS CIENCIAS EN EL MUNDO CONTEMPORÁNEO. doi:<http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002315.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Perú: Aprobado mediante Resolución Directoral N°20-2011-MTC/14. Obtenido de <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/8248>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *EVENTOS EXTREMOS Y DESASTRES*. Chile: Sistema Nacional de Información Ambiental. Obtenido de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/17-eventos-extremos-y-desastres.pdf>
- Mora, W., & Ochoa, R. G. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz del Río a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá. *[Trabajo de grado para optar al título de ingenieros geólogos]*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. Obtenido de <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1677>
- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (s.f.). *U.S. Department of Health & Human Services*. Obtenido de Modelado Computacional: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/modelado-computacional>

- Ordoñez, J. (2011). *CARTILLA TÉCNICA: Ciclo Hidrológico*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Orellana, R. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS. [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil]*. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18304>
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Glosario hidrológico internacional* (Vol. 385). UNESCO. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862/PDF/221862qaa.pdf.multi>
- Paredes, R. (2015). *GENERACIÓN DE INTENSIDADES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN ESTACIONES SIN INFORMACIÓN PLUVIOGRÁFICA (CUENCA DEL RIO ILLPA – PUNO)* [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero agrícola]. Puno: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO. Obtenido de <https://1library.co/document/y8gnovrz-generacion-intensidades-precipitacion-maxima-estaciones-informacion-pluviografica-cuenca.html>
- Pérez, J., & Gardey, A. (2016). *Definición*. Obtenido de Definición de cauce: <https://definicion.de/cauce/>
- Ponce, V. M. (17 de Febrero de 2021). *El Método Muskingum-Cunge*. Obtenido de Prof. Victor Miguel Ponce's website: [http://ponce.sdsu.edu/el_metodo_muskingum_cunge.html#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20Muskingum%2DCunge%20es%20un%20m%C3%A9todo%20de%20enrutamiento%20del,establecidos%20por%20Cunge%20\(1969\).](http://ponce.sdsu.edu/el_metodo_muskingum_cunge.html#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20Muskingum%2DCunge%20es%20un%20m%C3%A9todo%20de%20enrutamiento%20del,establecidos%20por%20Cunge%20(1969).)

- Portuguez, M., & Verano, C. (2016). Generación de mapa de número de curva con sistema de información geográfica. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 6(1). doi:<http://dx.doi.org/10.18259/acs.2016029>
- R Development Core Team. (s.f.). *La red integral de archivos R*. Obtenido de R Project: <https://cran.r-project.org/>
- Reconco, D. (2020). *ABSTRACCIONES HIDROLÓGICAS*. Honduras: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS. Obtenido de <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-autonoma-de-honduras/hidrologia-1/abstraccion-hidrologica/8975579>
- Rodríguez, D. (30 de Agosto de 2021). *Definición de Simulación* . Obtenido de Concepto Definición: <https://conceptodefinicion.de/simulacion/>
- Sánchez, F. J. (Marzo de 2022). *Calculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S*. España: Universidad de Salamanca. Obtenido de Hidrología Superficial y Subterránea: https://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_2.pdf
- Serna, N. (2017). *Reducción de riesgos de desbordes utilizando defensas ribereñas. Caso: margen izquierda del rio HUAYCOLORO, del distrito de Lurigancho [Tesis para optar el título profesional de ingeniería civil]*. Lima: Universidad Alas Peruanas. Obtenido de <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/8248>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *Validación de datos CHIRPS de precipitación para monitoreo de periodos secos y húmedos en el Perú*. Perú: SENAMHI. Obtenido de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/949/Validacion-de-datos-CHIRPS-de-precipitacion-para-monitoreo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sistema de información Agroclimática para el regadío. (s.f.). *EVAPOTRANSPIRACIÓN*. España: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Obtenido de

- https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiraci%C3%B3n_tcm30-82951.pdf
- Témez, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid: Dirección General de Carreteras. Obtenido de <http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/otros/pdfs/tellez.pdf>
- Torres, G. (21 de Febrero de 2023). *WINGTRA*. Obtenido de Fotogrametría vs. LIDAR: qué sensor elegir para una aplicación determinada: <https://wingtra.com/es/dron-fotogrametria-vs-lidar/>
- UNSCH - INGENIERÍA CIVIL Hemerson L.A. (25 de Diciembre de 2015). *TRÁNSITO DE AVENIDAS - MÉTODO MUSKINGUM - MATLAB*. Youtube. Obtenido de <https://youtu.be/FI33d7vUkHY>
- Vidal, J. (16 de Mayo de 2022). *¿Qué es la calibración?* Obtenido de GEOMETRICS: <https://www.gometrics.net/que-es-la-calibracion/>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). *COMPARACIÓN DE LOS INTERPOLADORES IDW Y KRIGING EN LA VARIACIÓN ESPACIAL DE pH, Ca, CICE y P DEL SUELO*. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. Obtenido de https://www.mag.go.cr/rev_agr/v32n01-095.pdf
- Villón Béjar, M. (2014). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Hidrográficas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Biblioteca Colegio de Ingenieros Civiles del Municipio de Solidaridad. Obtenido de <https://ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/files/original/453c8797672ec90701a2c39e6c9c9ca6.pdf>
- Ydrogo, J. (2021). *Estudio de inundabilidad del río chotano en las comunidades de Aygasbamba, Toril, Pingobamba, Chororco y la Iraca aplicando modelos matemáticos en el distrito y provincia de Chota, Cajamarca 2020 [Tesis para optar el título de*

ingeniería ambiental]. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Obtenido de

https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/4294/3/TL_YdrogoGonzalezJhonathan.pdf

Yrigoín, K. D., & Vásquez, R. C. (2023). *Evaluación del nivel de riesgo a inundación por desborde del río Jalqueño en la ciudad de Lajas, Chota, 2022 [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil]*. Chota: Universidad Autónoma de Chota. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14142/441>

9. ANEXOS

ANEXO 1. Panel fotográfico

Figura 38 Destrucción del muro de encausamiento en Lajas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 39 Fotografías del cauce del río Chotano en la zona de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 40 Fotografía aérea de Lajas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 41 Fotografía aérea de la zona de la confluencia del río Chotano



Fuente: Elaboración Propia

Nota. La zona en esta imagen se muestra el área susceptible a inundaciones

ANEXO 2. Hietogramas de cada subcuenca

Tabla 13 Hietogramas de la subcuenca W170

Duración	TR2	TR5	TR10	TR50	TR100	TR150
60	0.6721831	0.7372706	0.7906625	0.9300252	0.9973761	1.039012803
120	0.7185682	0.7881472	0.8452235	0.9942032	1.0662017	1.110711651
180	0.7731824	0.8480497	0.9094641	1.0697668	1.1472376	1.195130416
240	0.83858	0.9197797	0.9863887	1.1602502	1.2442736	1.296217328
300	0.9185347	1.0074765	1.0804363	1.2708747	1.3629093	1.419805672
360	1.0188858	1.1175446	1.1984753	1.4097194	1.5118089	1.57492126
420	1.1492164	1.260495	1.351778	1.5900433	1.7051916	1.77637694
480	1.3265273	1.454975	1.5603419	1.8353689	1.9682833	2.050451669
540	1.584428	1.7378482	1.8637003	2.1921974	2.3509527	2.449096111
600	2.0010651	2.1948284	2.3537742	2.768652	2.9691532	3.093104215
660	2.8161093	3.0887933	3.3124786	3.8963383	4.1785047	4.352941516
720	5.4292883	5.9550066	6.3862583	7.5119045	8.0559043	8.392207941
780	28.694948	31.473481	33.752739	39.702019	42.577174	44.35461077
840	3.640439	3.9929429	4.2821053	5.036872	5.401634	5.627131878
900	2.3281709	2.5536078	2.7385358	3.221232	3.4545083	3.598721052
960	1.7645092	1.9353667	2.0755228	2.4413558	2.6181548	2.72745291
1020	1.44215	1.5817935	1.6963444	1.9953432	2.1398426	2.229173011
1080	1.2304645	1.3496105	1.447347	1.7024574	1.8257466	1.9019646
1140	1.0794811	1.1840073	1.2697512	1.4935584	1.6017194	1.668585147
1200	0.9656783	1.059185	1.1358894	1.336102	1.4328603	1.492676849
1260	0.8764351	0.9613004	1.0309161	1.2126261	1.3004425	1.354731076
1320	0.8043333	0.882217	0.9461057	1.1128669	1.1934589	1.243281297
1380	0.744709	0.8168192	0.8759719	1.0303713	1.104989	1.151118183
1440	0.6944732	0.7617191	0.8168815	0.9608656	1.0304499	1.073467293

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14 Hietogramas de la subcuenca W180

Duración	TR2	TR5	TR10	TR50	TR100	TR150
60	0.6998294	0.7811633	0.8489126	1.0297547	1.1190641	1.174855677
120	0.7481223	0.8350688	0.9074933	1.1008147	1.1962871	1.255928595

180	0.8049828	0.8985375	0.9764666	1.1844813	1.2872099	1.351384459
240	0.8730701	0.9745379	1.0590584	1.2846674	1.3960851	1.465687701
300	0.9563133	1.0674556	1.1600348	1.4071546	1.5291954	1.605434263
360	1.0607918	1.1840765	1.28677	1.560888	1.696262	1.780830013
420	1.1964827	1.3355373	1.4513669	1.7605486	1.9132389	2.008624462
480	1.3810864	1.5415955	1.6752963	2.0321812	2.2084299	2.318532339
540	1.6495942	1.8413093	2.0010039	2.4272735	2.6377881	2.769296453
600	2.0833673	2.3254953	2.5271828	3.0655432	3.3314142	3.497503627
660	2.9319336	3.2726815	3.5565173	4.3141548	4.6883164	4.922054894
720	5.6525906	6.309532	6.8567503	8.3174295	9.0387904	9.489424109
780	29.875148	33.347224	36.239389	43.959391	47.771937	50.15363249
840	3.7901674	4.2306588	4.5975789	5.5769916	6.0606775	6.362835774
900	2.4239267	2.7056343	2.9402908	3.5666548	3.8759866	4.069225948
960	1.8370821	2.0505869	2.2284319	2.7031501	2.9375911	3.084046247
1020	1.5014645	1.675964	1.8213184	2.2093101	2.4009209	2.520620111
1080	1.2810726	1.4299582	1.5539768	1.8850172	2.0485026	2.150631736
1140	1.1238793	1.254496	1.363297	1.6537173	1.7971423	1.886739727
1200	1.0053959	1.1222425	1.2195733	1.4793764	1.607681	1.687832782
1260	0.9124822	1.0185304	1.1068664	1.3426598	1.4591071	1.531851669
1320	0.8374149	0.9347389	1.0158077	1.2322031	1.3390706	1.405830694
1380	0.7753383	0.8654477	0.940507	1.1408612	1.2398067	1.301617967
1440	0.7230363	0.8070673	0.8770632	1.0639022	1.1561732	1.213814824

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15 Hietogramas de la subcuenca W190

Duración	TR2	TR5	TR10	TR50	TR100	TR150
60	0.7428226	0.8289536	0.9006838	1.0920929	1.1865928	1.245618391
120	0.7940824	0.886157	0.962837	1.1674546	1.2684757	1.331574409
180	0.854436	0.9535086	1.0360167	1.2561861	1.3648852	1.432779675
240	0.9267062	1.0341586	1.1236454	1.3624373	1.4803303	1.553967514
300	1.0150633	1.1327609	1.2307798	1.4923394	1.621473	1.702131148
360	1.1259603	1.2565165	1.3652441	1.6553794	1.798621	1.888091156
420	1.2699872	1.4172435	1.539879	1.8671268	2.0286912	2.129605889

480	1.4659318	1.635908	1.7774648	2.1552032	2.3416951	2.458179822
540	1.7509352	1.9539577	2.1230357	2.5742132	2.7969625	2.936093903
600	2.2113566	2.4677655	2.6813037	3.2511218	3.5324447	3.708161711
660	3.1120536	3.4728991	3.7734126	4.5753205	4.9712277	5.218515103
720	5.9998511	6.6955394	7.2749112	8.8209412	9.5842262	10.06098146
780	31.710494	35.387355	38.449459	46.620558	50.654682	53.17443511
840	4.023012	4.489484	4.8779636	5.9146055	6.4264024	6.746075633
900	2.5728379	2.8711608	3.1196053	3.7825691	4.1098787	4.31431943
960	1.9499411	2.1760386	2.3643334	2.8667905	3.1148568	3.269801387
1020	1.5937053	1.7784969	1.932392	2.3430549	2.5458018	2.67243954
1080	1.3597738	1.5174408	1.6487465	1.9991304	2.1721172	2.280166401
1140	1.1929235	1.3312441	1.446438	1.7538283	1.9055888	2.000379917
1200	1.0671612	1.1908996	1.2939493	1.5689333	1.7046947	1.789492612
1260	0.9685395	1.0808425	1.1743689	1.4239403	1.5471553	1.624116602
1320	0.8888606	0.9919248	1.077757	1.3067969	1.4198754	1.49050526
1380	0.8229703	0.9183944	0.9978641	1.2099254	1.3146215	1.380015698
1440	0.7674552	0.8564424	0.9305512	1.1283076	1.2259412	1.286924085

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16 Hietogramas de la subcuenca W220

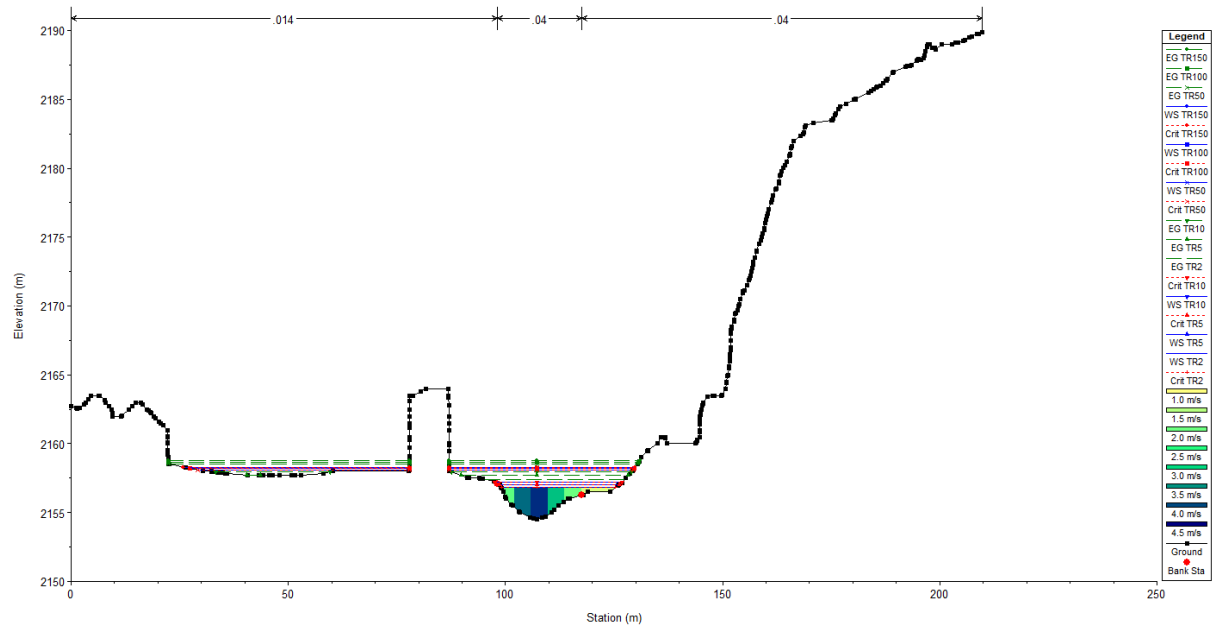
Duración	TR2	TR5	TR10	TR50	TR100	TR150
60	0.7109444	0.8228223	0.9190086	1.1879646	1.3268353	1.415477999
120	0.7600043	0.8796026	0.9824264	1.2699421	1.4183958	1.513155469
180	0.8177679	0.9464561	1.0570949	1.3664631	1.5261999	1.62816166
240	0.8869366	1.0265095	1.1465064	1.4820417	1.6552894	1.765875362
300	0.9715019	1.1243825	1.2558205	1.6233476	1.8131136	1.934243432
360	1.0776397	1.2472227	1.3930205	1.8007004	2.0111986	2.145562005
420	1.2154858	1.4067609	1.5712084	2.0310365	2.2684606	2.42001106
480	1.4030214	1.6238081	1.813628	2.3444023	2.6184583	2.793391204
540	1.6757938	1.9395054	2.1662297	2.800196	3.1275333	3.336476366
600	2.1164563	2.4495128	2.735856	3.5365285	3.9499416	4.213827732
660	2.9784998	3.447212	3.8501842	4.9769747	5.5587731	5.930141502
720	5.7423675	6.6460162	7.4229223	9.5953062	10.716978	11.43295411

780	30.349638	35.125615	39.231729	50.713242	56.641519	60.42560351
840	3.8503645	4.4562778	4.9772078	6.4338317	7.1859338	7.666008874
900	2.4624246	2.8499244	3.1830749	4.11463	4.595622	4.902644565
960	1.8662594	2.1599437	2.4124368	3.1184578	3.4829992	3.715690101
1020	1.5253114	1.7653423	1.9717073	2.548745	2.8466882	3.036868595
1080	1.3014191	1.5062172	1.6822909	2.1746283	2.428838	2.59110286
1140	1.1417292	1.3213977	1.4758664	1.9077918	2.1308089	2.2731631
1200	1.021364	1.1820911	1.3202752	1.7066655	1.9061713	2.033518002
1260	0.9269746	1.0728481	1.198262	1.5489439	1.7300124	1.845590379
1320	0.8507151	0.9845881	1.0996844	1.4215168	1.5876893	1.693759035
1380	0.7876525	0.9116016	1.018166	1.3161413	1.4699956	1.568202487
1440	0.7345199	0.8501078	0.9494837	1.2273585	1.3708342	1.462416373

Fuente: Elaboración Propia

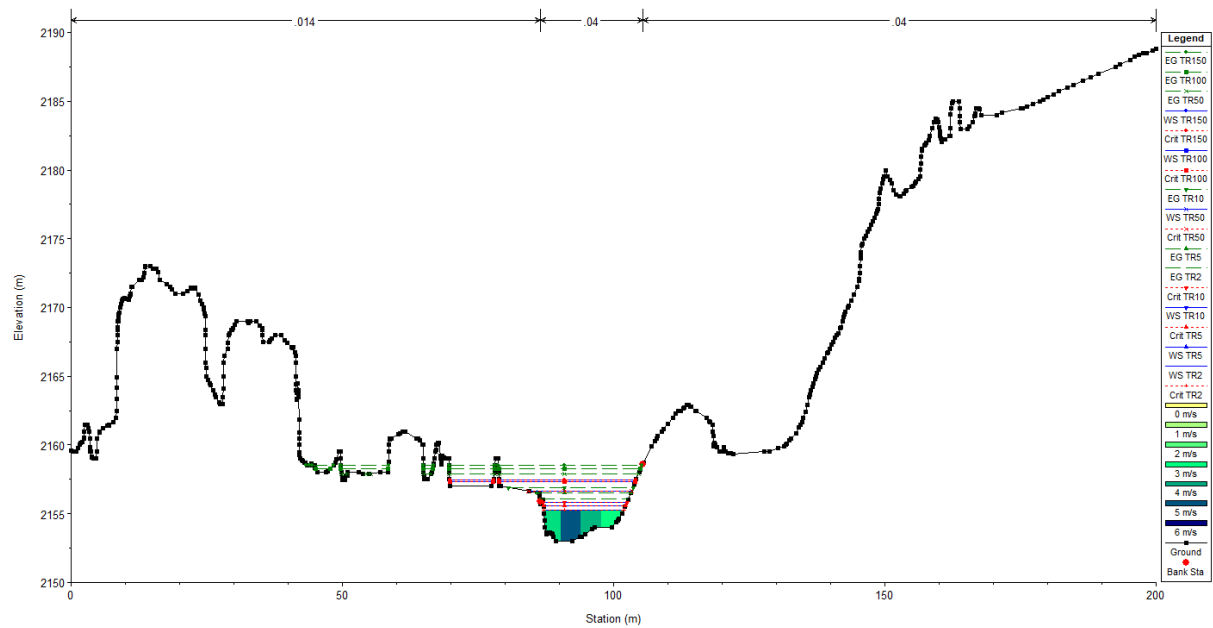
ANEXO 3. Perfil de nivel de agua en secciones transversales

Figura 42 Perfil de nivel de agua en sección transversal 60



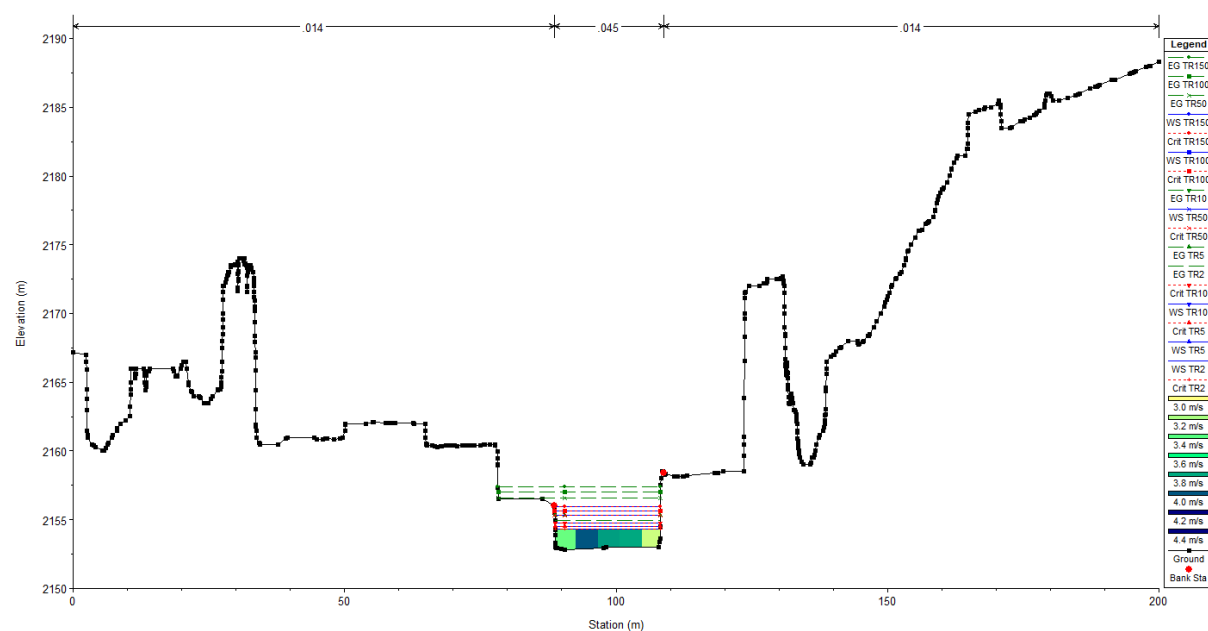
Fuente: Elaboración Propia

Figura 43 Perfil de nivel de agua en sección transversal 90



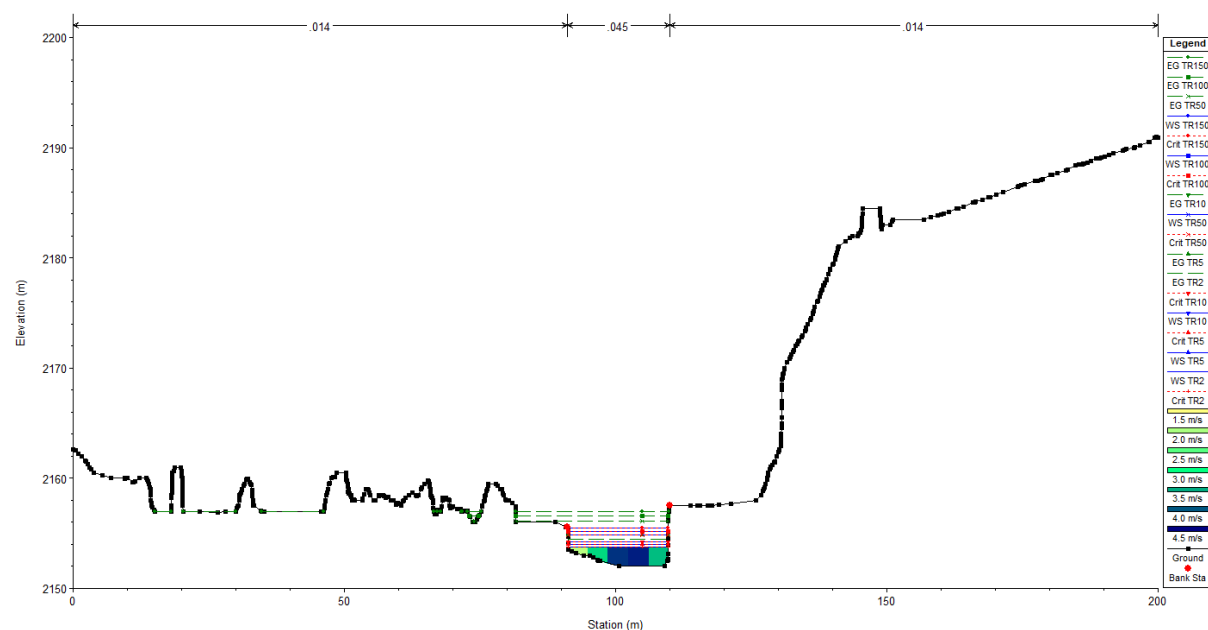
Fuente: Elaboración Propia

Figura 44 Perfil de nivel de agua en sección transversal 120



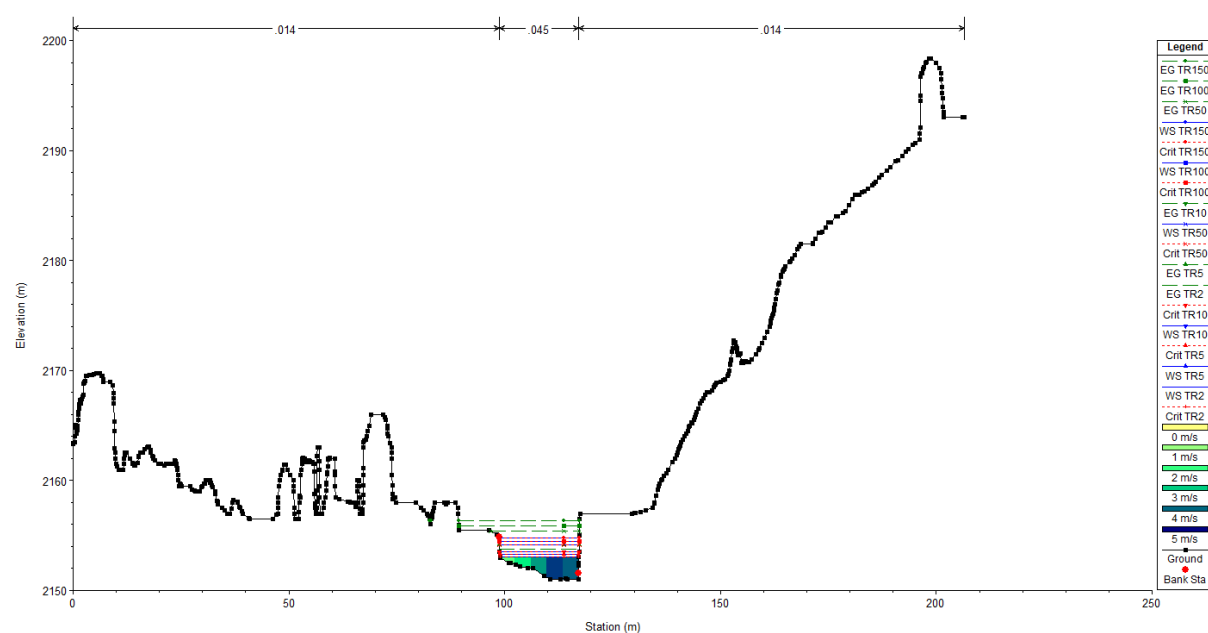
Fuente: Elaboración Propia

Figura 45 Perfil de nivel de agua en sección transversal 150



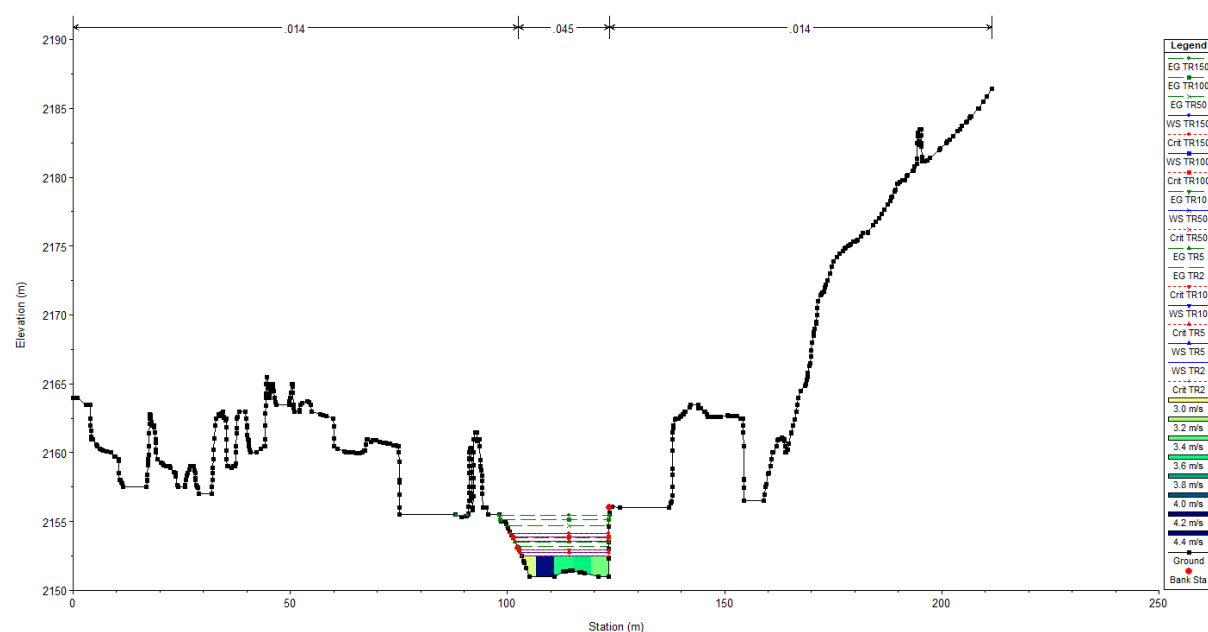
Fuente: Elaboración Propia

Figura 46 Perfil de nivel de agua en sección transversal 180



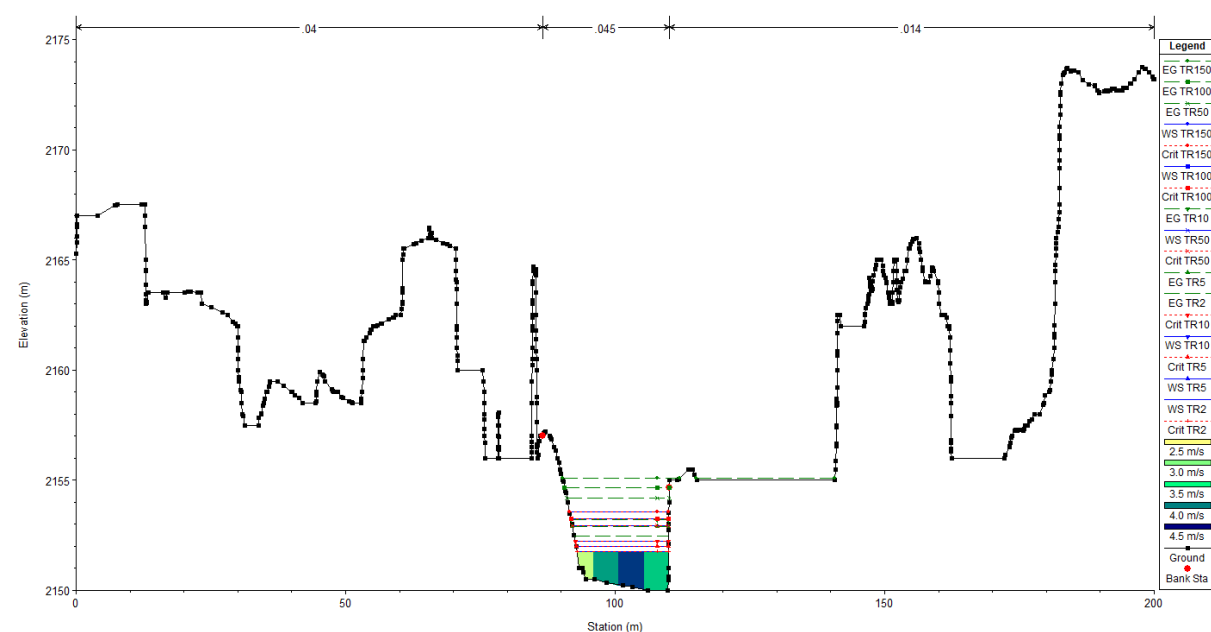
Fuente: Elaboración Propia

Figura 47 Perfil de nivel de agua en sección transversal 210



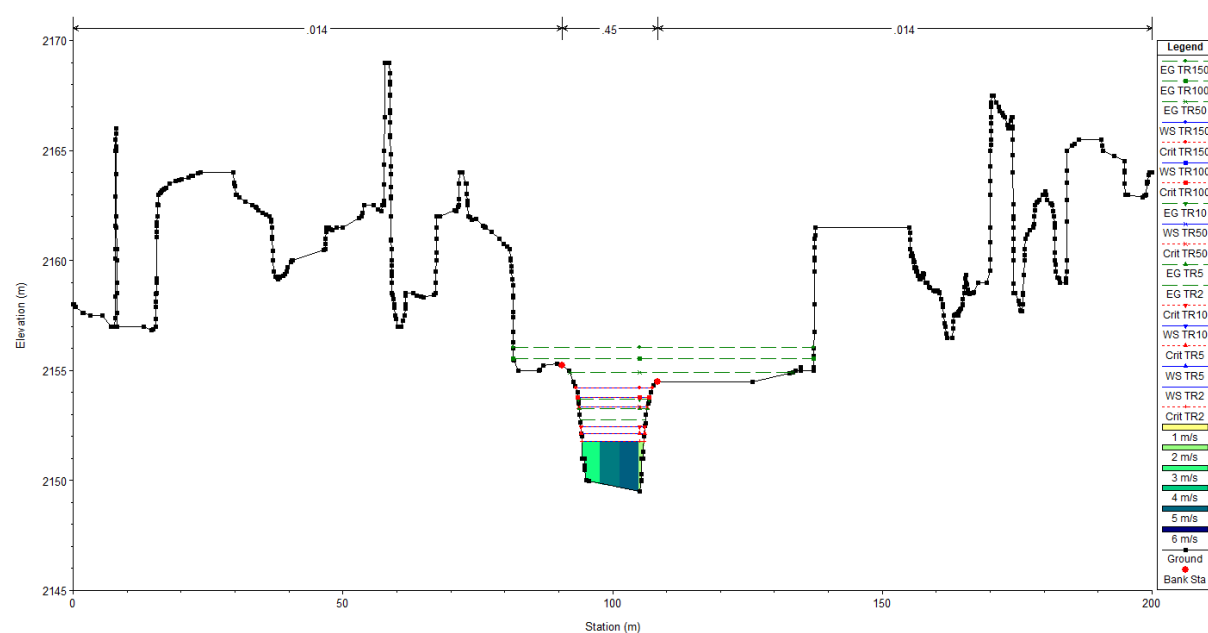
Fuente: Elaboración Propia

Figura 49 Perfil de nivel de agua en sección transversal 270



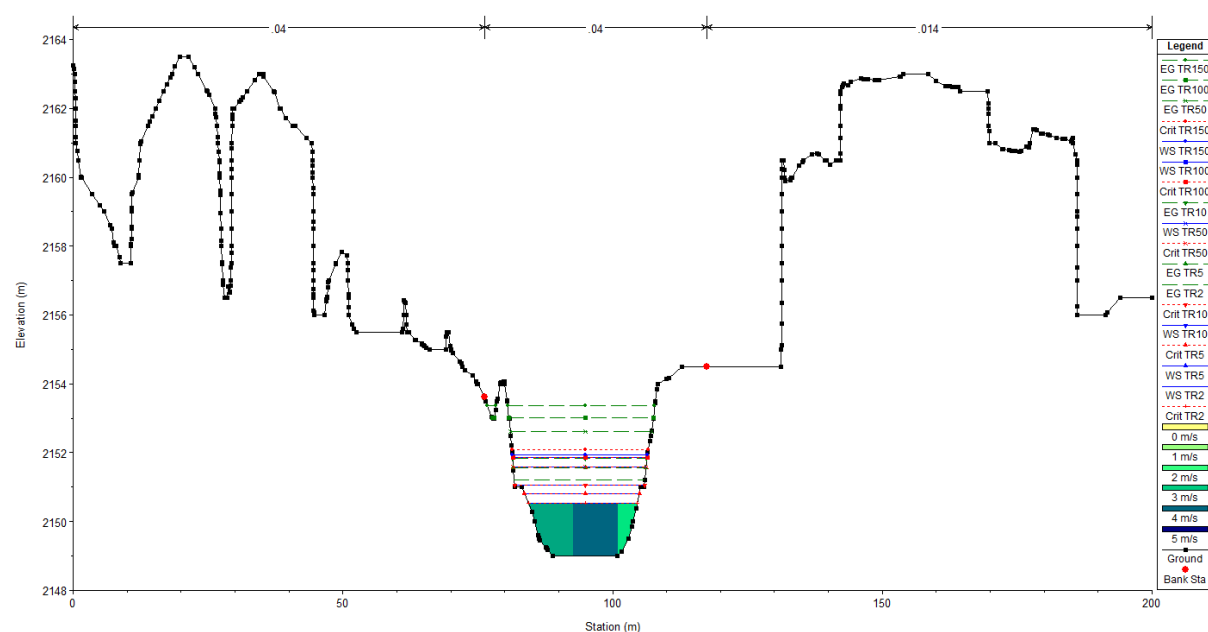
99

Figura 50 Perfil de nivel de agua en sección transversal 300



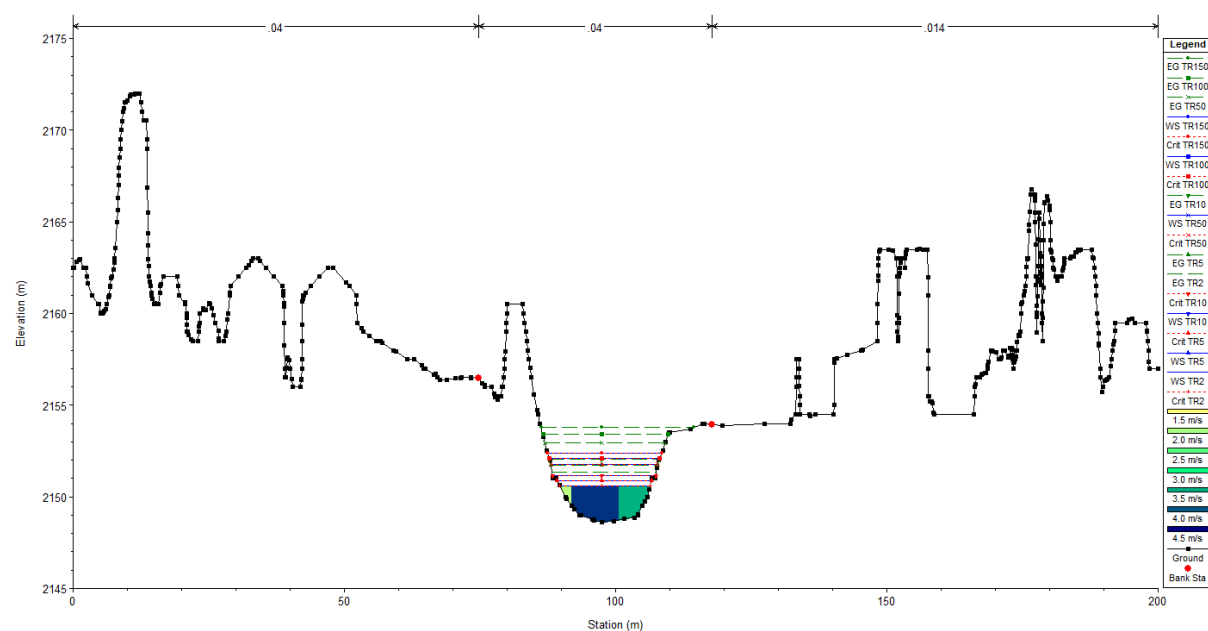
Fuente: Elaboración Propia

Figura 51 Perfil de nivel de agua en sección transversal 330



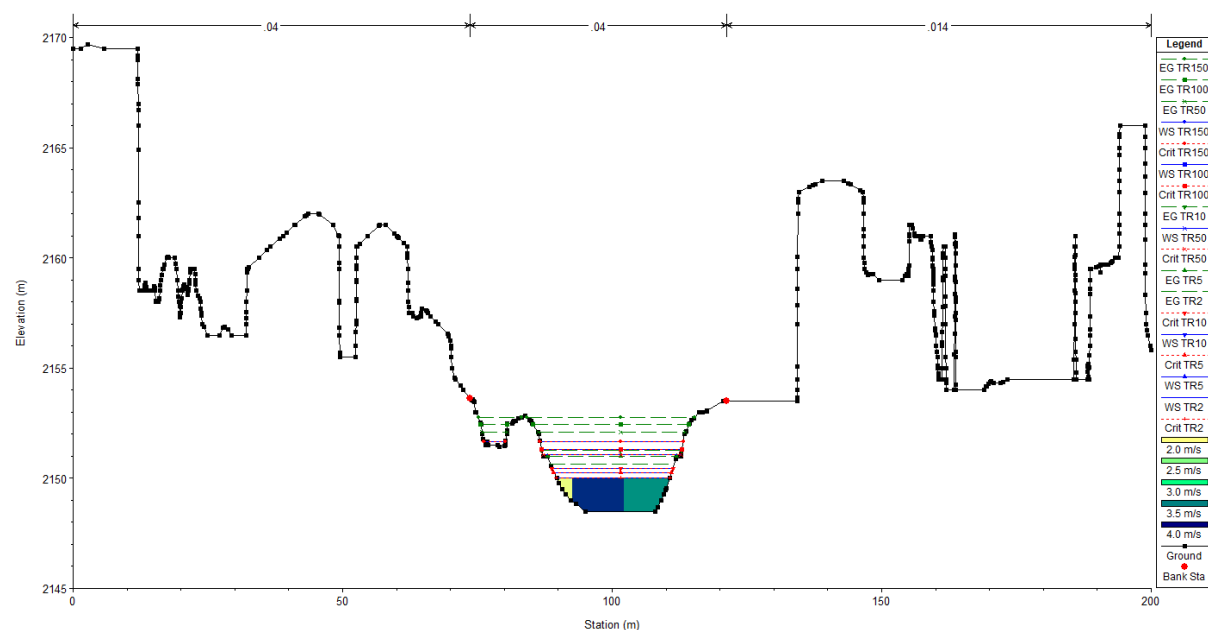
Fuente: Elaboración Propia

Figura 52 Perfil de nivel de agua en sección transversal 360



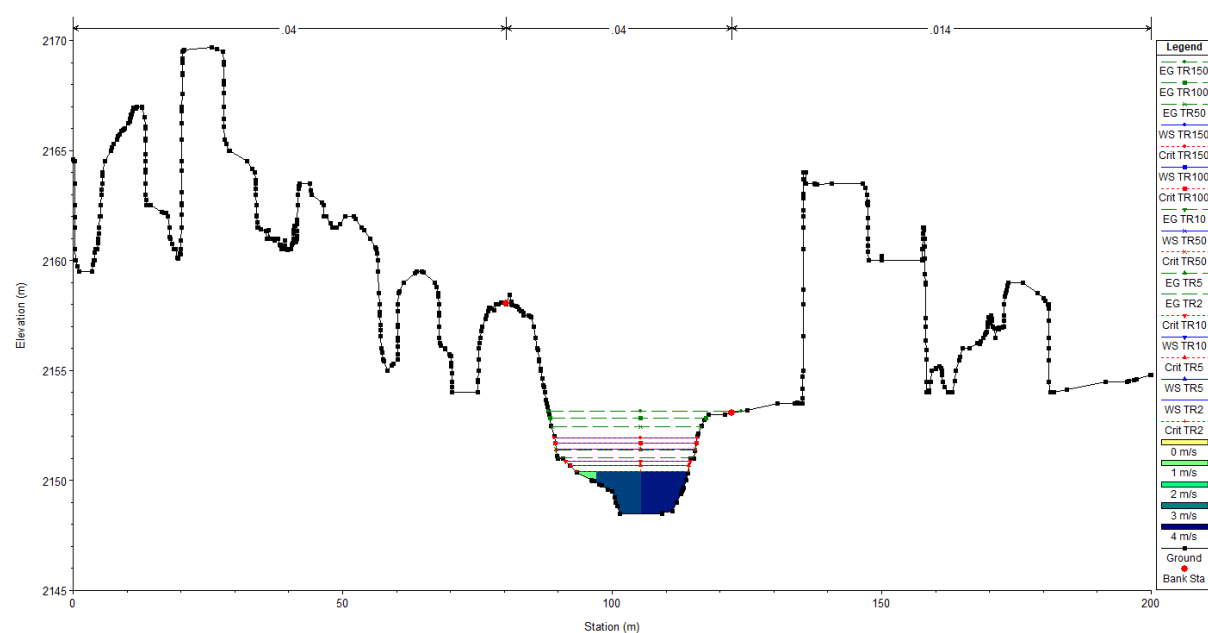
Fuente: Elaboración Propia

Figura 53 Perfil de nivel de agua en sección transversal 390



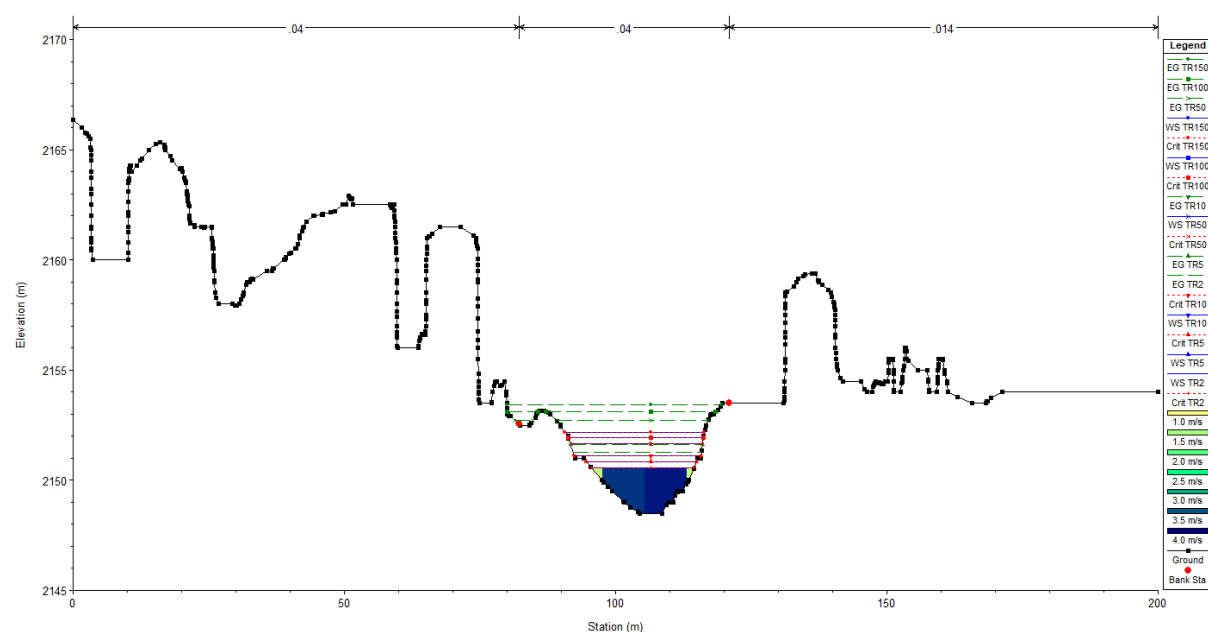
Fuente: Elaboración Propia

Figura 54 Perfil de nivel de agua en sección transversal 420



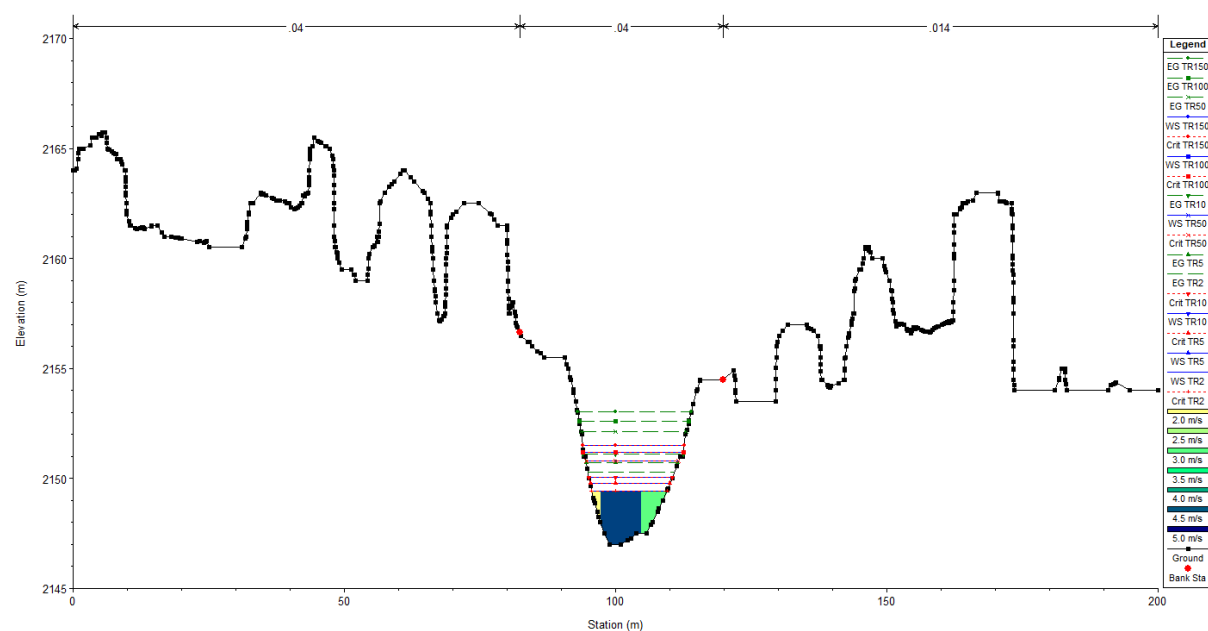
Fuente: Elaboración Propia

Figura 55 Perfil de nivel de agua en sección transversal 450



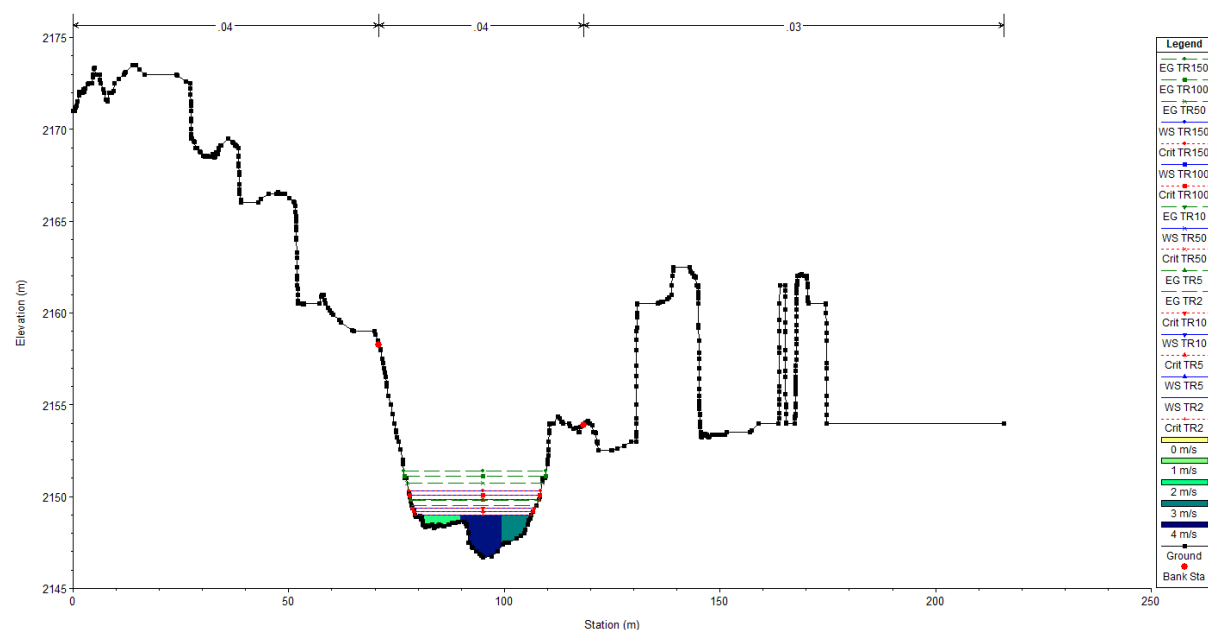
Fuente: Elaboración Propia

Figura 56 Perfil de nivel de agua en sección transversal 480



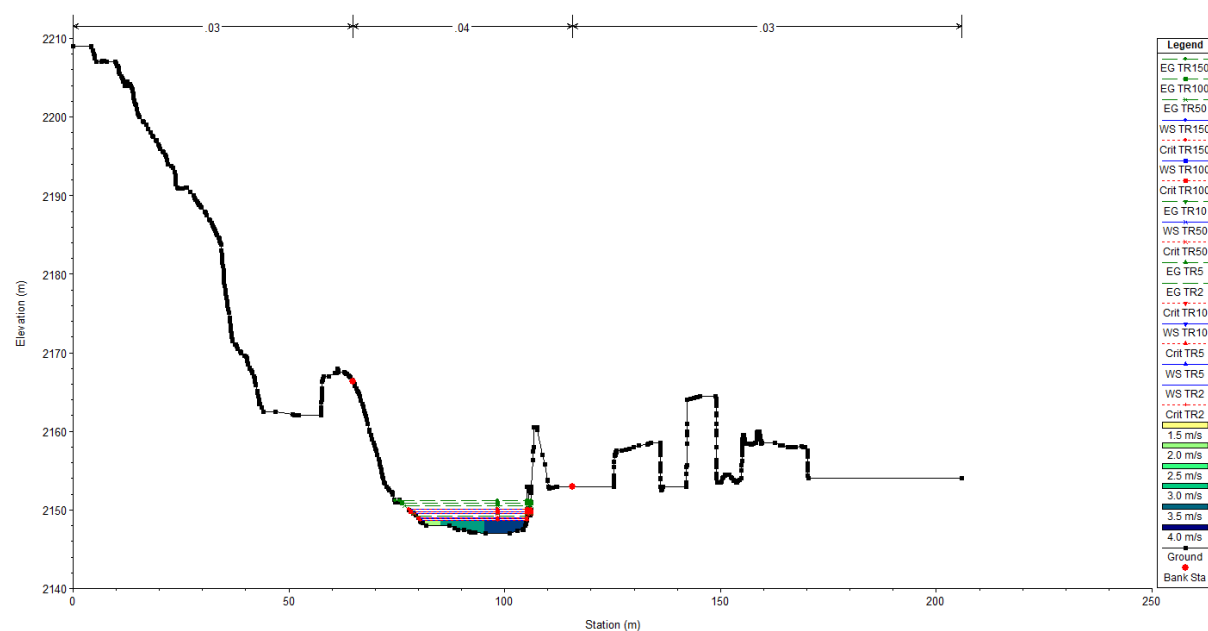
Fuente: Elaboración Propia

Figura 57 Perfil de nivel de agua en sección transversal 510



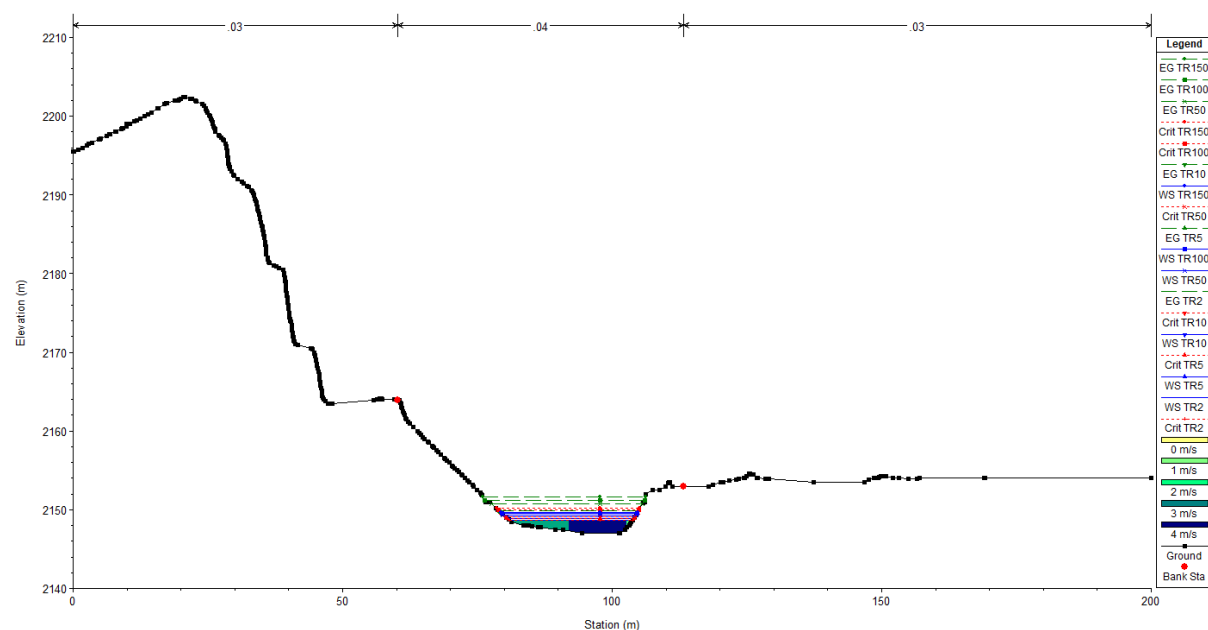
Fuente: Elaboración Propia

Figura 58 Perfil de nivel de agua en sección transversal 540



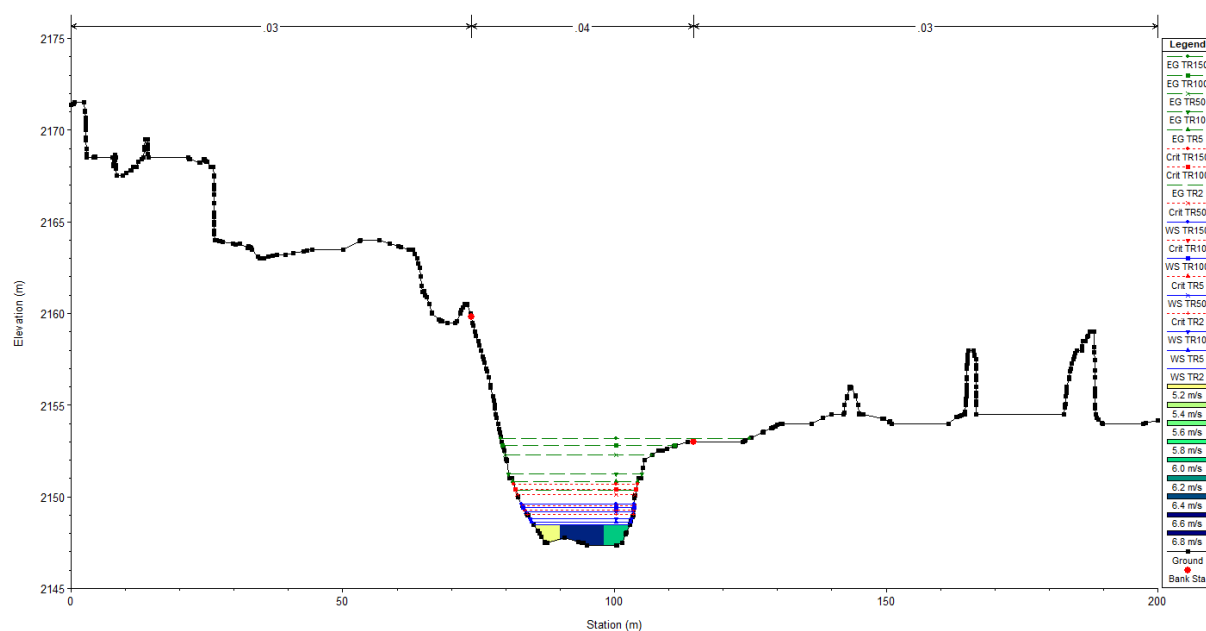
Fuente: Elaboración Propia

Figura 59 Perfil de nivel de agua en sección transversal 570



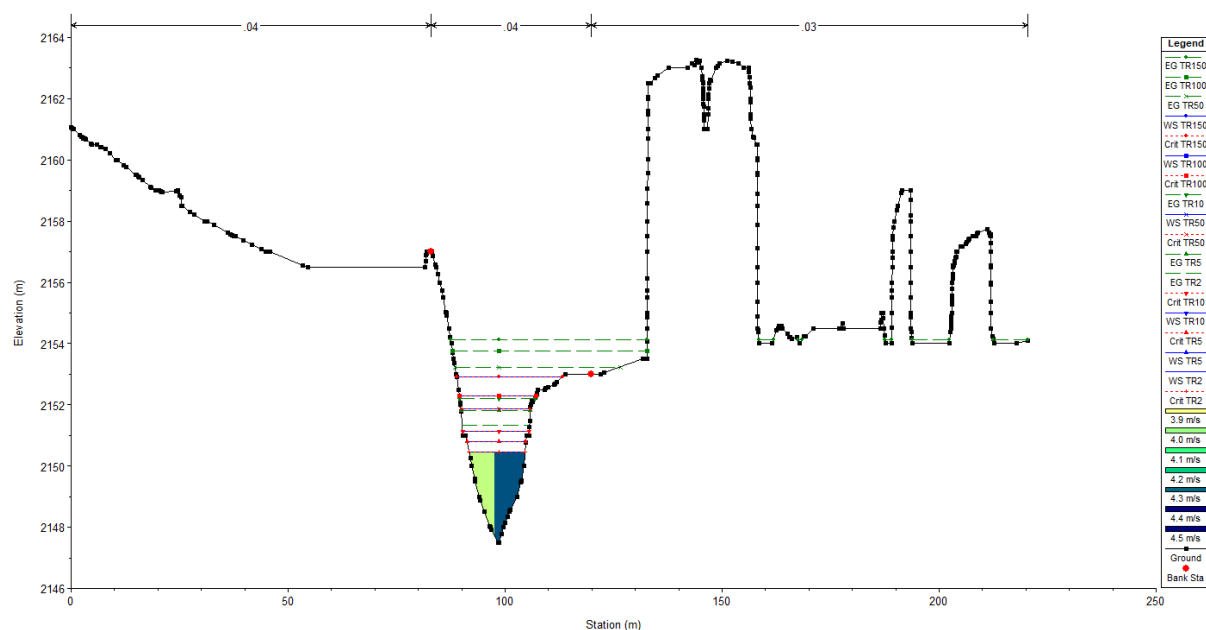
Fuente: Elaboración Propia

Figura 60 Perfil de nivel de agua en sección transversal 600



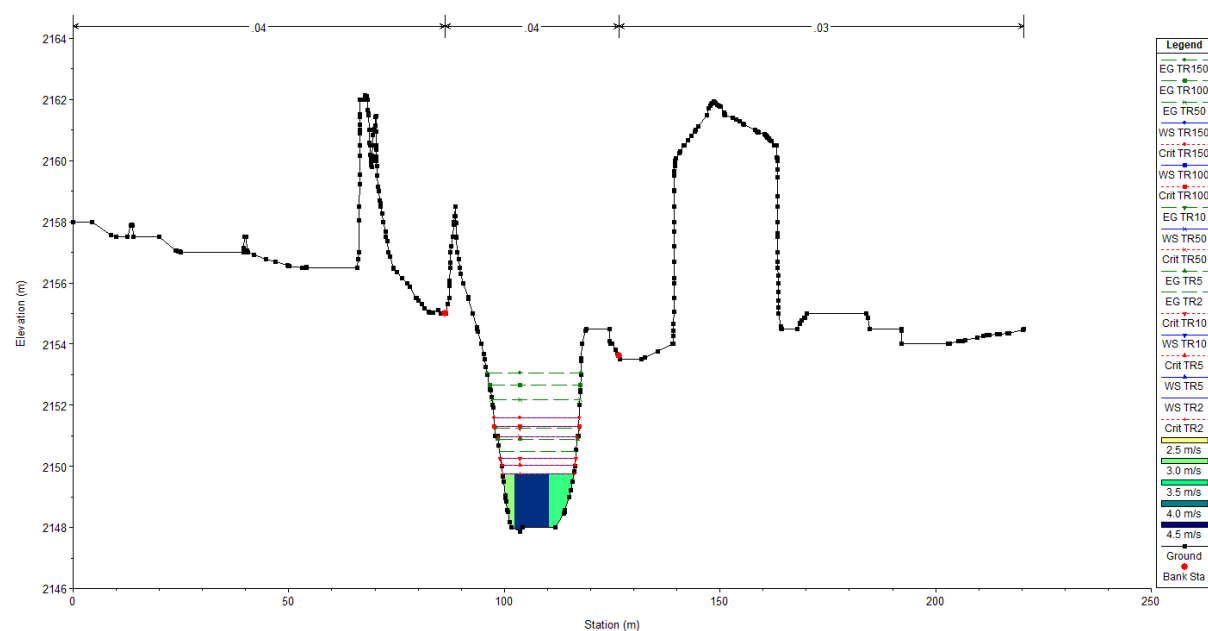
Fuente: Elaboración Propia

Figura 61 Perfil de nivel de agua en sección transversal 630



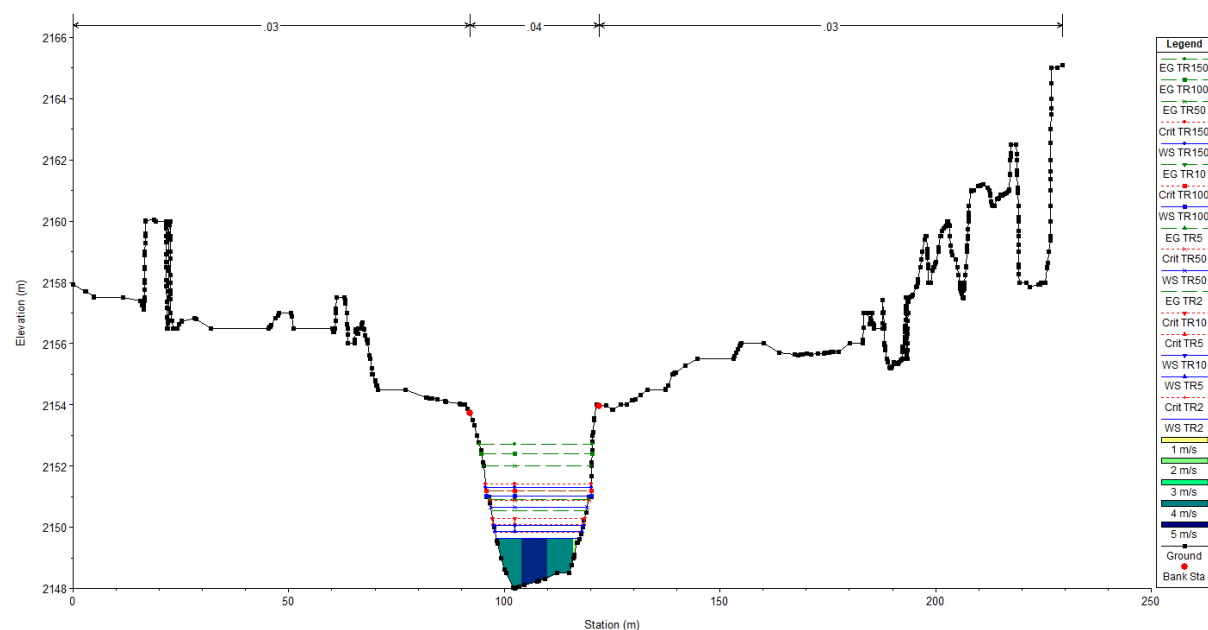
Fuente: Elaboración Propia

Figura 62 Perfil de nivel de agua en sección transversal 660



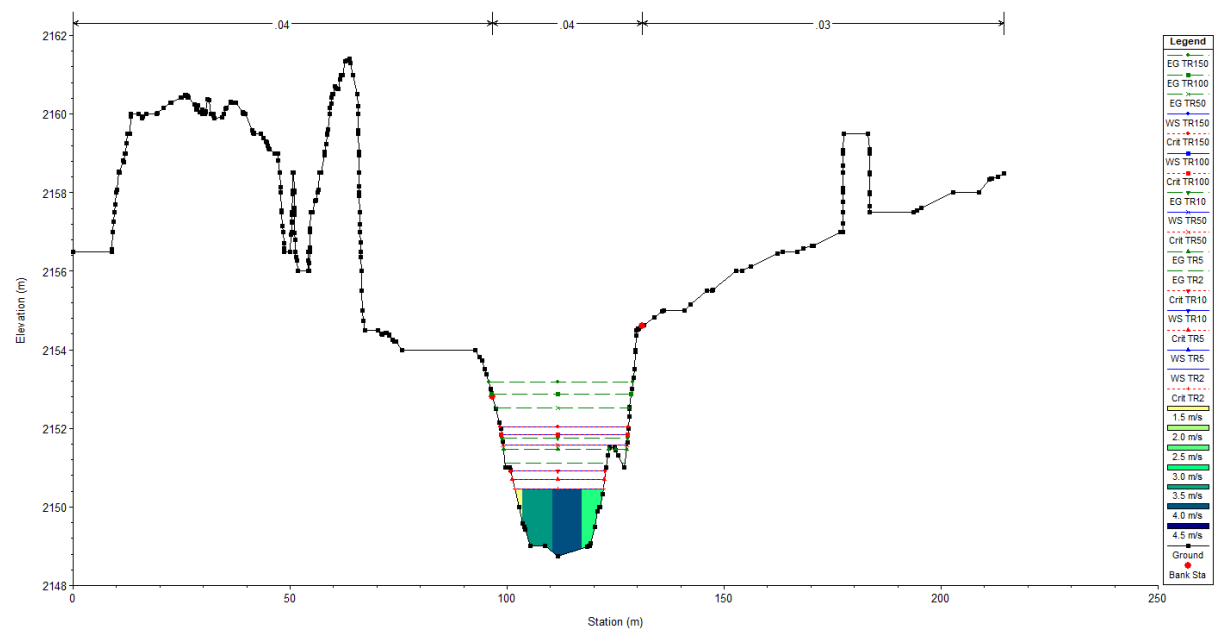
Fuente: Elaboración Propia

Figura 63 Perfil de nivel de agua en sección transversal 690



Fuente: Elaboración Propia

Figura 64 Perfil de nivel de agua en sección transversal 720



Fuente: Elaboración Propia