

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



**Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para
identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva
Cajamarca – San Martín**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES

José Esaú Medina Corrales

Fran Kevin Blas Sinarahua

ASESORES

Claudia Daniela Ramos Delgado

Santiago Alberto Casas Luna

Rioja, Perú

2021

ACTA DE SUSTENTACIÓN

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 021 - 2021/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a. m. del día 10 de julio de 2021 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. José Luis Rodríguez Núñez | presidente |
| 2. Roger Manuel Mestas Valero | primer Miembro |
| 3. Maximiliana Irene Castro Medina | segundo Miembro |
| 4. Claudia Daniela Ramos Delgado | asesora |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín** que presentan los bachilleres en Ciencias Ambientales, **José Esaú Medina Corrales y Fran Kevin Blas Sinarahua** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación: la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

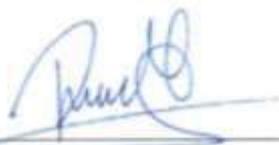
DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirles el **TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 10 de julio de 2021.



José Luis Rodríguez Núñez
PRESIDENTE



Roger Manuel Mestas Valero
1° MIEMBRO



Maximiliana Irene Castro Medina
2° MIEMBRO



Claudia Daniela Ramos Delgado
ASESORA

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

Mis padres Eleodoro Medina Tapia y Ángela Corrales Vega por ser los pilares principales en mi formación profesional, quienes dieron todo para formarme bajo principios, valores y perseverancia.

Mis hermanos (Blanca, Mesías, Sarai, Eliseo y Esdras), por su incondicional apoyo en todo momento.

A mi sobrinita Darleith que por medio de su alegría me motivó seguir adelante.

Al Ing. Percy Troya Palomino, autor del título de esta investigación.

A toda mi familia y amigos que son lo mejor y lo más valioso que Dios me ha dado.

José Esaú Medina Corrales

Este trabajo va dedicado para mi padre Demetrio Blas López y a mi madre María Rosa Sinarahua Fasabi, que desde los pocos conocimientos adquiridos y enseñanzas de la vida velan siempre por mis deseos profesionales y por la fuerza necesaria que me brindan para culminar esta etapa de mi vida.

A mi hermano Jair Peter Blas Sinarahua por los consejos brindados.

A Froy Torres Delgado por la constante motivación y apoyo brindado para continuar a culminar mis metas propuestas.

Fran Kevin Blas Sinarahua

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a Dios por darnos la sabiduría para llevar a cabo una de las etapas muy importantes de nuestras vidas y guiarnos por el camino correcto.

A los asesores Ing. Claudia Daniela Ramos Delgado y al Ing. Mg. Sc. Santiago Alberto Casas Luna por la orientación y guía durante el desarrollo de la tesis y compartir sus grandes conocimientos para alcanzar la meta propuesta.

Al Ing. Percy Troya Palomino por el apoyo incondicional que nos dio para que esta investigación se haga realidad, a quién enviamos un abrazo hasta el cielo.

Al Ing. Carlos Egoávil de la Cruz por el seguimiento constante y apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación.

A nuestros familiares por estar apoyándonos de principio a fin, reflejamos los más sinceros agradecimientos a cada uno de ellos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE APÉNDICE	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.1.1. Nivel internacional.....	4
1.1.2. Nivel nacional.....	8
1.1.3. Nivel regional	13
1.2. Bases teóricas especializadas	14
1.2.1. Marco conceptual hidrología.....	14
1.2.2. Parámetros geomorfológicos.....	15
1.2.3. Análisis de precipitación máxima 24 horas	30
1.2.4. Estudio máximas avenidas	32
1.2.5. Caudales máximos instantáneos	38
1.2.6. Coberturas de uso de suelo.....	40

1.2.7.	Curva Número (CN)	41
1.2.8.	Cálculo del Número de Curva (CN) por el método del Soil Conservation Service (SCS)	41
1.2.9.	Modelamiento hidrológico	46
1.2.10.	Modelamiento hidráulico	47
1.2.11.	Método de curva IILA-SENAMHI-UNI.....	51
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS		67
2.1.	Diseño de la Investigación	67
2.1.1.	Lugar y Fecha	67
2.1.2.	Materiales	70
2.1.3.	Población y Muestra.....	70
2.1.4.	Técnicas e Instrumentos	71
2.1.5.	Descripción de la investigación	71
2.2.	Identificación de Variables y su mensuración.....	108
2.2.1.	Análisis estadístico de Datos	111
CAPÍTULO III: RESULTADOS		115
3.1.	Parámetros geomorfológicos.....	115
3.2.	Coberturas de uso de suelo y Curva Número.....	117
3.3.	Caudales Máximos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años	120
3.4.	Perfiles hidráulicos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.	129
3.4.1.	Parámetros hidráulicos.....	129
3.4.2.	Calado de flujo	131
3.4.3.	Velocidad del flujo	139
3.4.4.	Parámetro hidráulico de calado del flujo	147
3.4.5.	Parámetro hidráulico de velocidades del flujo	151
3.4.6.	Afectación de viviendas.....	155
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES		156

4.1. Parámetros geomorfológicos.....	156
4.1.1. Forma.....	156
4.1.2. Relieve.....	156
4.1.3. Drenaje.....	158
4.2. Coberturas de uso de suelo y Curva Número.....	159
4.3. Caudales máximos para los los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años	163
4.4. Perfiles hidráulicos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años	169
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	172
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES.....	174
REFERENCIAS	176
TERMINOLOGÍA.....	185
APÉNDICES	188

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Caracterización de la cuenca en función al índice de Gravelius</i>	17
Tabla 2 <i>Caracterización de la cuenca en función al factor de forma de Horton</i>	18
Tabla 3 <i>Clasificación de pendiente de terreno</i>	24
Tabla 4 <i>Valores de interpretación de la densidad de drenaje</i>	28
Tabla 5 <i>Valores de Kn para datos dudosos</i>	31
Tabla 6 <i>Parámetros para el cálculo de las avenidas</i>	38
Tabla 7 <i>Valores de Número de Curva</i>	44
Tabla 8 <i>Textura del suelo para los diferentes tipos de suelo</i>	46
Tabla 9 <i>Valores de Rugosidad de Manning “n”</i>	48
Tabla 10 <i>Valores de las variables a y n en unión con K’</i>	53
Tabla 11 <i>Coordenadas del área de estudio</i>	67
Tabla 12 <i>Proceso de obtención de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes</i>	74
Tabla 13 <i>Obtención de la altitud media</i>	76
Tabla 14 <i>Índice de pendiente de la unidad hidrográfica de río Yuracyacu</i>	77
Tabla 15 <i>Obtención de la Pendiente media (criterio topográfico)</i>	78
Tabla 16 <i>Pendiente media (criterio de Alvord)</i>	79
Tabla 17 <i>Pendiente media con la ecuación de Taylor y Schwarz</i>	80
Tabla 18 <i>Tipos de suelo Vs Grupo hidrológico de la Subcuenca Yuracyacu</i>	88
Tabla 19 <i>Reclasificación de los usos del suelo</i>	88
Tabla 20 <i>Parámetros del modelo de las unidades hidrográficas</i>	100
Tabla 21 <i>Tiempos de concentración y tiempo de retardo</i>	101
Tabla 22 <i>Operacionalización de las variables de estudio</i>	109
Tabla 23 <i>Modelos de Distribución</i>	111
Tabla 24 <i>Valores Críticos “d” para la prueba de Smirnov-Kolmogorov</i>	114
Tabla 25 <i>Parámetros Geomorfológicos de la Subcuenca Río Yuracyacu</i>	115
Tabla 26 <i>Valores de Curva Número para cada Unidad Hidrográfica</i> <i>subcuenca río Yuracyacu</i>	117
Tabla 27 <i>Caudales máximos en el tramo de estudio</i>	129
Tabla 28 <i>Parámetros de calado de Flujo</i>	147
Tabla 29 <i>Parámetros de velocidades de flujo</i>	151
Tabla 30 <i>Afectación de viviendas y áreas inundadas</i>	155

Tabla 31 <i>Clasificación de coberturas de la Subcuenca del río Yuracyacu</i>	160
Tabla 32 <i>Caudales Máximos diarios Vs. Caudales Máximos instantáneos</i>	167
Tabla 33 <i>Comparación de Caudales Máximos del modelamiento hidrológico y caudales máximos instantáneos método Greager</i>	168

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Representación gráfica del ciclo hidrológico.....	14
<i>Figura 2.</i> Características de una unidad hidrográfica.	15
<i>Figura 3.</i> Forma de la cuenca de drenaje y su relación con hidrogramas de crecientes.....	19
<i>Figura 4.</i> Representación gráfica de la curva hipsométrica.	20
<i>Figura 5.</i> Representación gráfica de la pendiente de terreno.....	23
<i>Figura 6.</i> Esquema del orden de las corrientes - sistema de Strahler.....	27
<i>Figura 7.</i> Obtención del hietograma de diseño A y B.	35
<i>Figura 8.</i> Componentes de un Hidrograma.....	36
<i>Figura 9.</i> Mapa de regionalización de las avenidas del Perú.....	39
<i>Figura 10.</i> Comportamiento espectral del agua, suelo y vegetación.....	41
<i>Figura 11.</i> Método de la SCS a partir de la conservación de la masa.	42
<i>Figura 12.</i> Gráfico del método Soil Conservation.	44
<i>Figura 13.</i> Valores del número de curva.....	44
<i>Figura 14.</i> Mapa de Perú, Regiones hidrológicas.	52
<i>Figura 15.</i> Mapa de límite territorial político de la subcuenca del río Yuracyacu.....	68
<i>Figura 16.</i> Mapa de ubicación del tramo de estudio.	69
<i>Figura 17.</i> Proceso de calibración radiométrica (a, b y c).	83
<i>Figura 18.</i> Configuración para la corrección atmosférica de la imagen en radiancia.	84
<i>Figura 19.</i> Aplicación de la fórmula matemática en Band Math.	85
<i>Figura 20.</i> Creación de valores estándar de CN.....	89
<i>Figura 21.</i> Tabla de valores estándar de CN.....	90
<i>Figura 22.</i> Herramienta CN Grid para cálculo del CN.....	90
<i>Figura 23.</i> Aplicación de las correcciones de las depresiones del DEM.....	96
<i>Figura 24.</i> Herramienta Preprocess Drainage.	96
<i>Figura 25.</i> Identificación de corrientes.....	97
<i>Figura 26.</i> Creación de puntos de ruptura.....	98
<i>Figura 27.</i> Herramienta Delineate Elements.....	98
<i>Figura 28.</i> Herramienta Merge Elements.	99
<i>Figura 29.</i> Presentación del proyecto en HEC-HMS.	100
<i>Figura 30.</i> Ingreso de hietogramas de diseño.	103
<i>Figura 31.</i> Especificaciones de control.....	103

<i>Figura 32.</i> DEM del tramo en estudio.	104
<i>Figura 33.</i> Agregar un DEM en RAS Mapper.	105
<i>Figura 34.</i> Mallado 2D y condiciones de contorno.	105
<i>Figura 35.</i> Condicion de flujo aguas arriba Flow Hydrograph.	106
<i>Figura 36.</i> Condicion de flujo aguas abajo Normal Depth.	106
<i>Figura 37.</i> Plan de cálculo.	107
<i>Figura 38.</i> Mapa de clasificación de coberturas de la subcuenca río Yuracyacu.	118
<i>Figura 39.</i> Mapa de curva número de la subcuenca del río Yuracyacu.	119
<i>Figura 40.</i> Unidades de drenaje en la cuenca río Yuracyacu.	120
<i>Figura 41.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 2 años.	121
<i>Figura 42.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 5 años.	122
<i>Figura 43.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 10 años.	123
<i>Figura 44.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 25 años.	124
<i>Figura 45.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 50 años.	125
<i>Figura 46.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 100 años.	126
<i>Figura 47.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 200 años.	127
<i>Figura 48.</i> Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 500 años.	128
<i>Figura 49.</i> Perfil hidráulico del tramo de estudio por cada periodo de retorno.	130
<i>Figura 50.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 2 años.	131
<i>Figura 51.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 5 años.	132
<i>Figura 52.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 10 años.	133
<i>Figura 53.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 25 años.	134
<i>Figura 54.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 50 años.	135
<i>Figura 55.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 100 años.	136
<i>Figura 56.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 200 años.	137
<i>Figura 57.</i> Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 500 años.	138
<i>Figura 58.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 2 años.	139
<i>Figura 59.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 5 años.	140
<i>Figura 60.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 10 años.	141
<i>Figura 61.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 25 años.	142
<i>Figura 62.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 50 años.	143
<i>Figura 63.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 100 años.	144
<i>Figura 64.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 200 años.	145
<i>Figura 65.</i> Mapa de lámina de velocidades, Tr 500 años.	146

<i>Figura 66.</i> Variación del calado de flujo río Yuracyacu.	150
<i>Figura 67.</i> Variación de velocidades del flujo río Yuracyacu.	154
<i>Figura 68.</i> ^(a) Valores de CN determinado por el ANA y ^(b) Valores de CN calculados subcuenca río Yuracyacu.	162
<i>Figura 69.</i> Q _{máx} río Yuracyacu para diferentes Tr.	168

ÍNDICE DE APÉNDICE

	Pág.
Apéndice 1. Grafica de curva hipsométrica y altitud media	188
Apéndice 2. Grafica de frecuencia de altitudes	188
Apéndice 3. Perfil longitudinal del cauce principal del río Yuracyacu	189
Apéndice 4. Librería “Tree” de RStudio.....	189
Apéndice 5. Muestreo de coberturas de uso de suelo	190
Apéndice 6. ^(a) Coberturas de uso de suelo y ^(b) aplicación del scrip en ENVI.....	190
Apéndice 7. Esquema de árbol de decisión.....	191
Apéndice 8. Clasificación supervisada del área de estudio.....	191
Apéndice 9. Corrección de coberturas de uso de suelo.....	192
Apéndice 10. Herramienta Basin Model Manager	192
Apéndice 11. Registro histórico de precipitación máxima en 24 horas Estación Rioja	193
Apéndice 12. Datos de precipitación máxima en 24 horas Estación Rioja.....	197
Apéndice 13. Resumen de prueba de bondad de ajuste - Estación Rioja	200
Apéndice 14. Gráficas de prueba de Smirnov-Kolmogorov para diversas distribuciones teóricas - Estación Rioja.	201
Apéndice 15. Precipitación máxima anual corregida para diversos periodos de retorno - Estación Rioja	203
Apéndice 16. Precipitación de diseño para duraciones menores a 24 horas IILA - SENAMHI – UNI Estación Rioja	204
Apéndice 17. Intensidades de diseño para duraciones menores a 24 horas estación Rioja.....	205
Apéndice 18. Gráfico de la Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) - Estación Rioja.	206
Apéndice 19. Hietogramas de precipitación - Estación Rioja.....	207
Apéndice 20. Registro histórico de precipitación máxima 24 horas – Estación Naranjillo	209
Apéndice 21. Datos de precipitación máxima en 24 horas Estación Naranjillo	212
Apéndice 22. Resumen de prueba de bondad de ajuste - Estación Naranjillo	214
Apéndice 23. Gráficas de prueba de Smirnov-Kolmogorov para diversas distribuciones teóricas - Estación Naranjillo.	215

Apéndice 24. Precipitación máxima anual corregida para diversos periodos de retorno - Estación Naranjillo.	217
Apéndice 25. Precipitación de diseño para duraciones menores a 24 horas IILA - SENAMHI – UNI Estación Naranjillo.....	218
Apéndice 26. Intensidades de diseño para duraciones menores a 24 horas estación Naranjillo.....	219
Apéndice 27. Gráfico de la Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) - Estación Naranjillo.	220
Apéndice 28. Hietogramas de precipitación de diseño - Estación Naranjillo.....	221
Apéndice 29. Secciones Transversales del tramo en estudio.	223
Apéndice 30. (A) Inicio de tramo sujeto a estudio progresiva 0+000 km y (B) fin de tramo del área de estudio progresiva 2+400 km.....	247
Apéndice 31. (A) Progresiva 0+000 que presenta secciones de vegetación, (B) acumulación de bancos de arena y material pedregoso en el cauce del río Yuracyacu y (C) erosión y socavación del suelo ubicado en el tramo de estudio.....	248
Apéndice 32. Zonas vulnerables del tramo de estudio margen derecha – sector Monterrey (A y B) y margen izquierda – La Parada (C).....	248
Apéndice 33. Identificación y codificación de banco de nivel de precisión (BM) para el levantamiento topográfico del área de estudio.	249
Apéndice 34. (A) Instalación de la base del GNSS Diferencial y (B) levantamiento topográfico del área de estudio con GNSS Diferencial GRX2.	249
Apéndice 35. Levantamiento fotogramétrico con Drone PHANTOM 4 PRO para la obtención de la ortofoto del área de estudio.	250
Apéndice 36. Mapa de tipos de suelos de la subcuenca del río Yuracyacu.	251
Apéndice 37. Mapa de topografía y delimitación de la sub cuenca del río Yuracyacu.	251
Apéndice 38. Mapa de Clasificación de Pendiente de la Subcuenca del río Yuracyacu. ...	253
Apéndice 39. Certificado de Calibración del equipo topográfico GNSS Diferencial GRX2 Serie 1169-10240.	254
Apéndice 40. Certificado de Calibración del equipo topográfico GNSS Diferencial GRX2 Serie 1169-10249.	255
Apéndice 41. Certificado de Georreferenciación del Punto Geodésico	256

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue identificar zonas vulnerables en el área urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca por máximas avenidas del río Yuracyacu, desde la bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento mediante el modelamiento hidrológico e hidráulico.

Para ello, se recopiló información pluviométrica y geoespacial. Esta última fue útil en el preprocesamiento y mediante la herramienta GIS en HEC-HMS permitió la delimitación de unidades hidrográficas. Los parámetros hidrológicos fueron obtenidos mediante la extensión HEC-GeoHMS y el cálculo de los parámetros geomorfológicos se determinaron en QGIS. La modelación hidrológica se realizó mediante el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), transformando la precipitación en escorrentía. Los parámetros de entrada fueron los hietogramas de diseño obtenidos a partir del análisis pluviométrico, la Curva Número (CN) y el tiempo de concentración. Como resultado de la modelación hidrológica se obtuvieron los caudales máximos 58.4, 128.9, 180.2, 245.5, 293.5, 340.4, 386.4 y 445.7 m³/s; para los Tiempo de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 años. La modelación hidráulica consistió en un tramo de 2.4 km, para lo cual se realizó un levantamiento topográfico y fotogramétrico que permitió obtener la geometría del río. Con el software HEC-RAS se realizó el modelamiento hidráulico cuyos datos de entrada fueron: la geometría del río, caudales máximos, condiciones de contorno tanto aguas arriba como aguas abajo y los coeficientes de rugosidad “n” de Manning para cada zona y sección transversal.

Como resultado de la modelación hidráulica se identificaron zonas vulnerables cuyas áreas fueron 0.137, 0.431, 0.753, 2.195, 4.002, 6.295, 12.637 y 17.229 hectáreas; ante 58.4, 128.9, 180.2, 245.5, 293.5, 340.4, 386.4 y 445.7 m³/s; para Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, respectivamente. Así mismo, se identificaron 1, 20, 50, 102, 178 y 249 viviendas que se verían afectadas ante las máximas avenidas para Tr de 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

Palabras claves: modelamiento hidrológico, modelamiento hidráulico, zonas vulnerables.

ABSTRACT

The purpose of this research was to identify vulnerable areas in the urban area of the city of Nueva Cajamarca by maximum floods of the Yuracyacu river, from the bocatoma Canal Michuco to the bridge of the way of avoidance through hydrological and hydraulic modeling.

For this, rainfall and geospatial information was collected. The latter was useful in preprocessing with the GIS tool in HEC-GeoHMS allowed the delimitation of hydrographic units. Thus, exporting it to HEC-HMS extension and the calculation of the geomorphological parameters they were determined in QGIS. The hydrological modeling was performed using the soil conservation service (SCS) method, which transforms precipitation into runoff. The input parameters were the design hietograms obtained from rainfall analysis, the number curve (NC), and the concentration time. As a result of hydrological modeling the maximum flows were obtained 58.4, 128.9, 180.2, 245.5, 293.5, 340.4, 386.4 and 445.7 m³/s; For return periods (Tr) of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 years. The hydraulic modeling consisted of a section of 2.4 km, for it was performed a topographic and photogrammetric survey what allowed to obtain the geometry of the river. With the HEC-RAS software was performed the hydraulic modeling whose input data were: the geometry of the river, maximum flows, upstream and downstream boundary conditions and manning's roughness coefficients "n" for each cross section.

As a result of hydraulic modeling, vulnerable zones were identified whose areas were 0.137, 0.431, 0.753, 2,195, 4,002, 6,295, 12,637 and 17,229 hectares; Before 58.4, 128.9, 180.2, 245.5, 293.5, 340.4, 386.4 and 445.7 m³/s; For Tr of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 and 500 years, respectively. In addition, 1, 20, 50, 102, 178 and 249 houses were identified that would be affected by the main avenues for Tr of 10, 25, 50, 100, 200 and 500 years.

Keywords: hydrological modeling, hydraulic modeling, vulnerable zones

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desequilibrio y la variación climática han dado lugar a múltiples efectos ambientales; entre ellos, el exceso e intensas precipitaciones hace que los caudales de los ríos se incrementen ocasionando inundaciones, deslizamientos, desbordes de las riberas, daños a infraestructuras urbanas, colapso de infraestructura hidráulicas y redes viales (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2010). Estos acontecimientos han despertado gran interés por realizar investigaciones que aporten y ayuden a una mejora continua para la gestión integral de los recursos hídricos, mediante modelamientos hidrológicos e hidráulicos.

El Perú no ha sido ajeno a los efectos hidrometeorológicos extremos, siendo el tercer país más vulnerable al cambio climático, convirtiéndose en la nación con mayor número de amenazas naturales, dentro de las cuales la inundación es el fenómeno más recurrente (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP], 2014). En la región San Martín se registraron 503 eventos de inundación ocurridos desde el 2003 al 2016 (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2017). Por su parte, la Autoridad Nacional del Agua [ANA], (2018) ha identificado nueve puntos críticos con riesgo a inundación del cual un punto susceptible se encuentra en la provincia de Rioja, ciudad de Nueva Cajamarca, sector Los Olivos. En ese sentido, se ha visto de gran interés realizar estudios bajo modelamientos hidrológicos e hidráulicos, los cuales permiten estudiar el comportamiento de las fuentes hídricas aún con mayor relevancia en ciudades o zonas urbanas (Berbesi *et al.*, 2018). El propósito de la presente investigación es apoyar en la creación de herramientas de gestión hídrica y sistemas de alerta temprana para reducir y evitar los impactos que pueda generar a la población cercana a cauces hídricos.

El objetivo general de la presente tesis fue **identificar zonas vulnerables en el área urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca por máximas avenidas del río Yuracyacu, desde la bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento mediante el modelamiento hidrológico e hidráulico**. Esto debido a que los eventos meteorológicos extremos se dan con mayor frecuencia, ocasionando problemas ambientales, económicos y

sociales; los cuales se ven favorecidos frente al cambio climático, por lo que, ante un incremento de las precipitaciones, la capacidad regulatoria de los ecosistemas no es suficiente para minimizar la intensidad y magnitud de la misma.

Por lo tanto, con el fin de prevenir los impactos ambientales por efectos de los recursos hídricos es indispensable identificar las zonas urbanas vulnerables a inundaciones para la correcta gestión territorial urbana. Así mismo, la investigación permitió contar con datos e información válida, que servirá para el desarrollo de proyectos e investigaciones relacionadas a los recursos hídricos. Desde el punto de vista, es indispensable tener en cuenta la variabilidad de las intensidades de precipitación, usos de suelo y las características geomorfológicas de la subcuenca del río Yuracyacu, ya que esto permite proponer acciones enmarcadas en la planificación y adecuada gestión del recurso hídrico ante las máximas avenidas.

Esta investigación está estructurada en seis capítulos que comprende desde el marco teórico hasta la metodología utilizada. Donde, en el capítulo I se presenta las definiciones de las bases teóricas necesarias para el desarrollo de la investigación. En el capítulo II se menciona los materiales y métodos utilizados que abarcan desde los trabajos realizados en campo (equipos topográficos) y gabinete (softwares tales como ArcGIS, Civil 3D, RStudio, QGIS, HEC-HMS, HEC-RAS); como también las técnicas y análisis estadísticas de datos que sirvió para realizar los cálculos hidrológicos. El capítulo III comprende los resultados obtenidos relacionados a los parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, valores de curva número, hidrograma de salida, láminas de inundación, tirantes y velocidades para cada periodo de retorno; estos resultados se obtuvieron a partir de registros históricos de precipitación, coberturas, usos, tipos de suelos y topografía del área de estudio. Así mismo, en este capítulo se detalla la cantidad de viviendas y el área urbana susceptible a sufrir inundación por las máximas avenidas del río Yuracyacu. Finalmente, en los capítulos IV, V, VI, se presentan las discusiones, conclusiones y recomendaciones; respectivamente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar zonas vulnerables en el área urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca por máximas avenidas del río Yuracyacu, desde la bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento mediante el modelamiento hidrológico e hidráulico.

Objetivos específicos

- Calcular parámetros geomorfológicos indispensables para simular modelos hidrológicos e hidráulicos del área en estudio.
- Delimitar las coberturas de usos de suelo de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, mediante una clasificación supervisada para obtener la Curva Número.
- Determinar los caudales máximos del río Yuracyacu para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años mediante el modelamiento hidrológico de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu.
- Calcular los perfiles hidráulicos para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años del río Yuracyacu, en el tramo bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Nivel internacional

Aris (2020) en el trabajo de investigación “La avenida del 7 de diciembre del 2000 en la cuenca del arroyo Respina. Comparación de los datos geomorfológicos y los modelos hidrológico-hidráulicos”, tuvo como objetivo determinar la capacidad del modelo hidrológico e hidráulico y demostrar los efectos erosivos y sedimentarios, con evidencias geomorfológicas tomadas en campo tras ocurrido el evento hidrológico extremo en la cuenca Respina, España. La cuenca de estudio pertenece a la unidad hidrográfica arroyo Respina ubicada en la comunidad de Castilla y León. Para este estudio el autor ha recopilado información referente a suelos, topografía, geomorfología, imágenes satelitales, ortofotos y fotografías de áreas vulnerables; así como también datos de precipitación e hidrométricos. La cuenca fue delimitada empleando herramientas del software ArcGis 10.3 a partir de un Modelo Digital de Terreno (MDTs) con tamaño de pixel de 5 m de resolución espacial. El autor utilizó el software IBER para realizar la modelación hidrológica y determinar el caudal máximo, también realizó una modelación hidráulica para determinar los diferentes calados y velocidades de flujo del tramo de estudio. Para la determinación de la precipitación efectiva, es decir, la lluvia que no se infiltra se convierte en escorrentía, utilizó el método de la curva número (CN) propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), donde el parámetro de CN fue determinado bajo procesamiento GIS a partir de variables como la pendiente y las prácticas de cultivo del terreno. Además, consideró la textura, usos, y las condiciones de humedad del suelo. Para una mejor asignación del parámetro hidrológico (CN) y distribución de la lluvia delimitó en 7 subcuencas el área en estudio, discretizando los tributarios más importantes del cauce principal. Los resultados obtenidos de la investigación fueron los parámetros morfométricos del área sujeta a estudio; en la que obtuvo un área de 32.6 km², 14.10 km de longitud de cauce principal, 1.44 de índice de Gravelius y el factor de forma determinado es de 0.16; este último indica que el riesgo para avenidas es bajo. En relación

al modelamiento hidrológico, el investigador ejecutó el modelo en 4 escenarios: 1 y 4 el tiempo de simulación ha sido 20 horas y para el escenario 2 y 3 el periodo de simulación fue de 30 horas. El modelo hidrológico fue simulado para una duración de lluvia de 24 horas obteniendo caudales de 53.90 m³/s, 119 m³/s, 168 m³/s y 91 m³/s, para los escenarios 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Según los resultados de caudales obtenidos por el investigador en el escenario 1 y 4, menciona que la precipitación se distribuyó de forma heterogénea en la cuenca concentrándose mayor la precipitación en las vertientes con evidencias geomorfológicas activas. Para el escenario 2 y 3 incorpora volúmenes de agua considerables, pero no tiene el mismo comportamiento que los escenarios 1 y 4 donde evidenció que el hidrograma a la salida de cada confluencia resultando un caudal pico ante la máxima avenida. El modelamiento hidráulico fue simulado con los datos de caudales máximos del escenario 2 y 3 que corresponden a periodos de retorno de 25 y 100 años, donde el autor concluyó que el tramo en estudio corresponde a una zona de peligrosidad alta con un calado máximo de 1.25 m. En las demás zonas la peligrosidad del flujo se sitúa en el mismo cauce del tramo en estudio, por presentar caudales bajos. En conclusión, la investigación que realizó Aris (2020) pone en manifiesto la afectación a poblaciones y bienes materiales.

Valle (2019), realizó un trabajo de investigación denominado “Estudio Hidrológico e Hidráulico del Río Corbones a su paso por la zona urbana de La Puebla de Cazalla (Sevilla)”, en el cual el objetivo fue delimitar las zonas a inundación afectadas por las avenidas máximas del río Corbones principalmente en el entorno de la localidad Puebla de Cazalla, España. La cuenca en estudio corresponde al río Corbones, donde el tramo en estudio comprende desde el embalse de agua construida hasta el desagadero del mismo río. La cartografía utilizada por la investigadora fue un Modelo Digital de Terreno de 5x5 m de resolución espacial y una ortofoto de 25 a 50 cm/píxel. Para el modelamiento hidrológico utilizó la extensión HEC-HMS, la duración de la simulación fue 96 horas para periodos de retorno de 100 y 500 años. La cuenca sujeta a estudio presenta una longitud de cauce de 177 km y un área de 1.826 km². Los caudales picos obtenidos sin embalse fueron 682.2 m³/s y 1040.1 m³/s, para los tiempos de retorno de 100 y 500 años respectivamente; sin embargo, para el escenario con embalse obtuvo caudales máximos de 396 m³/s y 588 m³/s para los Tr de 100 y 500 años. El modelamiento hidráulico realizado por la autora fue mediante la herramienta Iber simulando las zonas de turbulencia, transporte de sedimentos y un módulo hidrodinámico, utilizando un modelo bidimensional (Saint Venant 2D). Para ello, la investigadora generó

un modelo digital de elevación y utilizó valores de rugosidad “n” de *manning*, tomando en cuenta la sinuosidad y la irregularidad del cauce en estudio. Los resultados obtenidos referente al modelo hidráulico fueron que el tiempo de retorno de 500 años presenta un calado máximo de 6.5 m y una velocidad de 6 m/s. El calado máximo estuvo situado en tramos aguas arriba de las obras de paso como parques laminadores de la avenida, y las máximas velocidades fueron encontradas principalmente en el eje de todo el cauce en estudio y a la salida de las obras de paso (puentes). Para el Tr de 100 años presenta un calado máximo de 5.7 m y una velocidad máxima de 5 m/s. Finalmente, el autor realizó una comparación entre sus resultados obtenidos con los resultados del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), concluyendo que dentro del tramo de estudio existe mucha más peligrosidad, afectando suelos urbanos que pertenecen a la localidad de Puebla de Cazalla. Además, concluyó que la inundabilidad abarca edificaciones construidas y áreas de futuro crecimiento para los periodos de retorno de 100 y 500 años.

Calderón y Montoya (2016) realizaron una investigación en “Integración de Herramientas SIG con modelos hidrológicos para la generación de mapas de áreas susceptibles de Inundación. Caso de Estudio la Cuenca del río Acacías – Municipio de Acacías, Meta”, con el objetivo de aplicar softwares SIG para el estudio de modelos hidrológicos e hidráulicos, y así obtener información cartográfica de las zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en un tramo de 7+900 km comprendido en la parte alta y media del río Acacías, Colombia. El trabajo consistió en recopilar información cartográfica digital, información pluviométrica (precipitaciones máximas 24 horas), topografía de las secciones transversales de la zona de estudio, mapa de pendientes, mapas de cobertura de uso de suelo y edafológico, entre otros. Los parámetros geomorfológicos (área, longitud de la red hídrica y pendientes) los obtuvieron de un preprocesamiento, con la extensión HEC-GeoHMS en ArcGIS a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), resultando un área de 931.157 km² para la cuenca del río Acacías. La información pluviométrica (precipitación máxima en 24 horas) recibió un tratamiento estadístico (distribuciones teóricas, pruebas de bondad de ajuste), con el cual calcularon las intensidades para un periodo de retorno (Tr) y permitió la elaboración de las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF), donde obtuvieron un Hietograma de diseño con Tr de 100 años. En cuanto a las pérdidas por infiltración tomaron en cuenta los grupos hidrológicos del suelo, método que aplica el Soil Conservation Service (SCS). En el software HEC-HMS realizaron la simulación hidrológica, obteniendo un hidrograma cuyo caudal

máximo instantáneo fue de 432 m³/s para el Tr considerado. En tanto, para el modelamiento hidráulico abordaron un preprocesamiento de la información topográfica en la extensión HEC-GeoRAS en ArcGIS para luego exportar la geometría de las secciones transversales al software HEC-RAS. Importada en HEC-RAS la geometría del río Acacías más el caudal máximo generado en HEC-GeoHMS, ejecutaron el modelo hidráulico obteniendo el calado máximo de la lámina de agua. El resultado de la modelación hidráulica les permitió delimitar las llanuras de inundación, presentando mayor susceptibilidad en la parte baja de la cuenca, moderado para la parte media y bajo para la parte alta. Además, obtuvieron mapas a escala de 1:125 000 de las áreas más vulnerables. En conclusión, la modelación hidrológica e hidráulica sirvió como una herramienta para la gestión de ordenamiento territorial de los municipios establecidos en el área de influencia directa de la cuenca del río Acacías.

Carpio (2018) realizó un trabajo de investigación “Generación del modelo de áreas de inundación del río Catarama provincia de Los Ríos - Ecuador mediante el uso de los softwares HEC-RAS y ArcGIS”, donde el objetivo del estudio fue determinar las zonas más vulnerables a inundación mediante la aplicación de un modelo hidráulico a partir de hidrogramas, considerando para diversos periodos de retorno en el río Catarama provincia de Los Ríos Ecuador. Para ello, utilizó la extensión HEC-GeoHMS en ArcGIS y delimitó la cuenca del río Zapotal (formado por 08 subcuencas hidrográficas correspondientes a los ríos Angamarca, Calabi, Lechugal, Oncebi, Sibimbe, Catarama, Aguacatal y Yuyumbi), obteniendo un área de 3729 km². En esta área, realizó el estudio hidrológico para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, y 100 años a partir de datos hidrometeorológicos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador. Así mismo, generó hietogramas de diseño a partir de las curvas Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) tomando en cuenta las pérdidas por infiltración del Número de Curva (CN), método que aplica el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos; logró calcular los caudales máximos en el HEC-HMS para los periodos de retorno indicados. Cabe mencionar, que antes de la aplicación del modelo matemático HEC-RAS, preparó la geometría del río en estudio en la extensión HEC-GeoRAS en ArcGIS para luego ser exportado a HEC-RAS. Por lo tanto, una vez obtenida la geometría y los caudales máximos, asignó las condiciones de contorno tomando en cuenta los coeficientes de rugosidad de Manning e hizo la corrida del modelo, logrando finalmente la obtención de las llanuras de inundación en la extensión HEC-GeoRAS resultando un total de 221 ha afectadas. Además, la modelación hidráulica

permitió calcular el tirante máximo de lámina de agua que sobrepasa el borde de las secciones del río, resultando un total de 2 m en ambos márgenes y en el eje de la sección del río el tirante máximo fue de 13 m, para un Tr de 100 años. En conclusión, la modelación de las zonas de inundación presentó una gran utilidad para la toma de decisiones y medidas correctivas y preventivas, con el fin de minimizar y evitar los daños materiales y pérdidas humanas. Así mismo, el ancho de las zonas más vulnerables de afectación a viviendas por inundación es de 200 m medido a partir de la ribera del río.

1.1.2. Nivel nacional

Frisancho (2015) realizó un trabajo de investigación en “Análisis de la vulnerabilidad mediante modelamiento hidrodinámico del cauce del río Seco del Cono Sur de la ciudad de Tacna”. El objetivo de la investigación fue identificar las zonas vulnerables con riesgo a inundaciones por eventos de máximas avenidas y eventos extraordinarios mediante la aplicación de un modelo hidrodinámico. Utilizó las herramientas de SIG para delimitar la cuenca del río Seco, resultando un área de 1106.49 km². Así mismo, realizó un estudio hidrológico de la cuenca del río Seco para estimar los caudales máximos y las intensidades de precipitaciones para determinados tiempos de retorno. Los datos hidrométricos recopilados de campo recibieron un tratamiento estadístico basado en el análisis de consistencia, frecuencias probabilísticas, distribuciones teóricas, modelos que determinen la escorrentía, con los cuales obtuvo los caudales máximos para los periodos de retorno de (Tr) de 5, 10, 50, 75, 100, 200, 500 y 1 000 años. Al respecto, el software que facilitó la simulación hidrológica fue el HidroEsta 2 más la aplicación de los SIG. Con el software Arc View GIS 9.3 procesó los datos obtenidos en el levantamiento topográfico de la zona en estudio en una longitud de 1+855 km, el cual fue importado en el software HEC-RAS para la modelación. La determinación de las zonas vulnerables fue obtenida a partir de la iteración entre los caudales máximos para diferentes Tr, la geometría y los coeficientes de rugosidad de Manning (n). Finalmente, los resultados de los caudales máximos obtenidos del modelamiento fueron de 29, 51, 77, 98, 117, 179, 316 y 489 m³/s para los Tr de 5, 10, 50, 75, 100, 200, 500 y 1 000 años, respectivamente. En conclusión, la modelación permitió identificar zonas urbanas comprendidas desde el cuartel Tarapacá hasta el puente Arunta en el distrito de Gregorio Albarracín Lanchipa, los cuales presentaron vulnerabilidad a sufrir inundación y desbordes por el río Seco. Además, con el análisis del Tr de 100 años permitió delimitar el ancho de la faja marginal del río Seco en el tramo de estudio.

Quispe y Sullca (2015) realizaron un estudio de investigación en la “Aplicación del modelo matemático HEC-RAS para el cálculo del perfil hidráulico del río Ramis”. Este trabajo consistió en evaluar las áreas potenciales por riesgo a inundación para Tr de 2, 10, 50, 100, 200 y 500 años; en los distritos de Huacané, Taraco y Samán Puno, en un tramo de 10 km del puente Ramis aguas arriba mediante la aplicación de softwares de modelos hidráulicos integrados a SIG (HEC-RAS y ArcGIS). Para ello, delimitaron la unidad hidrográfica del río Ramis con la extensión HEC-GeoHMS en ArcGIS para el cálculo de los parámetros geomorfológicos (área, longitud de la red hídrica y pendientes) a partir de un DEM, resultando un área de 15 138.15 km². Los datos hidrométricos obtenidos por los ejecutores fueron de la estación hidrométrica Puente Ramis, los registros hidrométricos lo analizaron en el software HidroEsta 2 para determinar la prueba de bondad de ajuste y las diferentes distribuciones teóricas, generando los caudales máximos para los Tr mencionados. Como resultado de los cálculos hidrológicos obtuvieron caudales máximos de 350.71, 501.4, 633.52, 689.37, 745.02 y 818.44 m³/s para los Tr de 2, 10, 50, 100, 200 y 500 años. El perfil hidráulico lo obtuvieron del modelo HEC-RAS simulando los caudales máximos obtenidos del estudio hidrológico más las secciones transversales del río Ramis, previo a un preprocesamiento en la extensión HEC-GeoRAS en ARCGIS a partir del levantamiento topográfico de la zona de estudio. Como resultado de la aplicación del modelamiento matemático HEC-RAS obtuvieron las áreas de inundación de 2180.83; 2343.603, 2437.332, 2471.696, 2482.393 y 2514.73 ha, correspondientes a los Tr de 2, 10, 50, 100, 200 y 500 años, respectivamente. En conclusión, los perfiles hidráulicos fueron calculados para los diferentes Tr y determinó las llanuras de inundación, para Tr de 2 años la frecuencia de inundación fue muy alta, en Tr de 10 años fue alta, Tr de 50 años fue media y para los Tr de 100, 200 y 500 años la frecuencia de inundación, baja. A su vez, la zona identificada con mayor vulnerabilidad a inundación estaba entre la progresiva 0+800 km y la 2+500 km, donde amerita elevar la altura a 1.90 m de la defensa existente para evitar daños.

Cardich (2017) realizó un trabajo de investigación denominado “Modelación de máximas avenidas en la cuenca del río Lurín utilizando modelos hidrológico e hidráulico”. El objetivo fue realizar un modelo hidrológico e hidráulico en la cuenca del río Lurín en un tramo de 5.6 km, principalmente en el tramo con mayor vulnerabilidad a peligros y riesgos de inundación en las provincias de Lima y Huarochirí. Para ello, con las herramientas de los SIG delimitó la cuenca del río Lurín obteniendo un área de 1670 km², en tanto el tramo en estudio fue de

5+600 km representando a la zona altamente vulnerable a inundaciones ante las máximas avenidas. Para ambos modelos consideró el Tr de 100, 200 y 500 años, cuyos datos de entrada fueron registros pluviométricos e información cartográfica. Dado que, no dispuso de información hidrométrica trabajó con datos pluviométricos de 10 estaciones meteorológicas, seis de ellas ubicado dentro de la cuenca y cuatro fuera de ella. Es así como la información pluviométrica (precipitación máxima en 24 horas) fue indispensable para la elaboración de los hietogramas de diseño y la información cartográfica para la delimitación del área de estudio. Además, el registro de datos de la precipitación máxima en 24 horas fue analizada mediante distribuciones teóricas con las que proyectó las precipitaciones para diversos periodos de retorno. Para la integración del modelo hidrológico, realizó un preprocesamiento de datos cartográficos en HEC-GeoHMS, delimitando así nueve subcuencas que luego fue importado en el HEC-HMS siendo la base principal para la generación de los caudales máximos. Cabe mencionar que, para efectuar la modelación a cada subcuenca hidrológica, ingresó los valores de CN, abstracciones iniciales, tiempo de concentración (T_c) y los hietogramas de diseño para los Tr en estudio, resultando $97.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $127.3 \text{ m}^3/\text{s}$ y $152.6 \text{ m}^3/\text{s}$, para los Tr de 100, 200 y 500 años, respectivamente. Así mismo, para el modelamiento hidráulico adquirió un levantamiento topográfico de 5+600 km, levantado en épocas de caudales mínimos del río Lurín; la misma que recibió un preprocesamiento en HEC-GeoRAS para la obtención de la geometría de las secciones transversales las cuales fueron exportadas al HEC-RAS para la modelación bidimensional 2D en un flujo de régimen no estacionario. Finalmente, el autor realizó la modelación hidráulica con los caudales generados más la geometría del río Lurín, resultando la identificación de las zonas de inundación correspondiente a 149 ha, 174 ha y 189 ha, para 100, 200 y 500 años respectivamente. En conclusión, la modelación hidrológica e hidráulica permitió la determinación de las áreas de inundación identificando un total de 119, 134 y 139 predios para los Tr de 100, 200 y 500 años expuestos a inundación. Así mismo, ubicándose las zonas más vulnerables a inundación entre las progresivas 11+100 km y 13+900 km, representando el 70 % del total de área inundable. A su vez, 2.6 km del tramo del río presentó alta intensidad de erosión, más del 50 % de la longitud del cauce en estudio.

Olivares (2018), realizó un trabajo de investigación denominado “Determinación de zonas inundables mediante simulación hidráulica bidimensional aplicando HEC–RAS 5.0 en un tramo del río Huancabamba, desde la quebrada Chula (km 2.42) hasta la quebrada Lungulo

(km 5.51), provincia de Huancabamba, departamento de Piura”. El objetivo de la investigación fue determinar áreas inundables a partir de la aplicación de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS y a su vez evaluar el comportamiento de los niveles y velocidades de máximas avenidas. Para lograr el objetivo de la investigación delimitó la cuenca hidrográfica del río Huancabamba, también utilizó softwares de ArcGIS e información hidrológica de la cuenca en mención. Así mismo, determinó los parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del tramo en estudio. Posterior a ello, el autor realizó el análisis de las distribuciones estadísticas y pruebas de bondad de ajuste en HydroEst 2, para determinar los caudales máximos de diseño a partir de precipitaciones máximas en 24 horas. Para la transformación de lluvia a escorrentía y cálculo de abstracciones iniciales lo realizó mediante la Curva Número, método que aplica el Soil Conservation Service (SCS), teniendo en cuenta coberturas existentes y el grupo hidrológico del suelo, de modo que; para calcular los hidrogramas aplicó la simulación hidrológica en el software HEC-HMS. Para la modelación hidráulica bidimensional y determinar la zona inundable el investigador utilizó datos de topografía, valores de Manning y los hietogramas de diseño generados en el modelo hidrológico. Las características geomorfológicas que obtuvo el autor están en relación al área obteniendo así 384.9 km², una longitud de 30.76 km del río Huancabamba y un factor de forma de 0.225. Posterior el investigador ejecutó el modelo hidrológico en el software HEC-HMS, con escenarios a desbordes de 25, 50 y 100 años cuyos caudales picos generados fueron 325, 348.8 y 370.6 m³/s, respectivamente. El resultado de la simulación hidráulica alcanzó una velocidad máxima de 5.70 m/s correspondiente a tramos estrechos del río Huancabamba para un periodo de retorno de 100 años, representando una velocidad alta. Asimismo, la modelación generó un tirante de agua máximo de 3.58 m específicamente en la sección más angosta del cauce, generando erosión en las riberas del tramo en estudio. En conclusión, la modelación hidráulica determinó las áreas de inundación correspondiente a 1.01 ha, 1.51 ha, 4.41 ha para los tiempos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente. Estas llanuras inundadas corresponden a 6 tramos, 2 en la margen izquierda y 4 en la margen derecha y la zona con mayores velocidades se encuentra en la progresiva 0+100 – 1+100 km.

Sierra (2018) realizó un trabajo de investigación en “Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente”. El objetivo de la investigación fue realizar un modelamiento hidráulico para la generación de mapas de riesgo

y vulnerabilidad ante inundaciones, desde el centro poblado Simón Bolívar km 0+000 hasta el sector Estación km 10+000 provincia de Barranca, departamento de Lima. El trabajo consistió en la recopilación de información cartográfica digital, registros pluviométricos, hidrométricos y data topográfica. Mediante geoprocесamientos de herramientas SIG en ArcGIS delimitó la cuenca del río Pativilca, y en cuanto a la información pluviométrica (precipitación máxima en 24 horas) e hidrométrica (caudal anual m^3/s) fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). A partir de la data histórica de precipitación máxima en 24 horas, con ayuda del software HidroEsta determinó las precipitaciones de diseño para diferentes Tr, previo a un análisis de prueba de bondad de ajuste con diversas distribuciones teóricas. La modelación hidrológica lo realizó en el modelo HEC-HMS cuyos datos de entrada fue las tormentas de diseño obtenido mediante el método del Soil Service Conservation (SCS) Tipo I para duración de seis horas. Además, para la transformación de lluvia a escorrentía y cálculo de abstracciones iniciales del modelo fue desarrollado en base a la Curva Número (CN), procedimiento que aplica el SCS. Para la modelación hidráulica recopiló información de topográfica de la ANA. Sin embargo, con la finalidad de completar la data topográfica realizó un vuelo fotográfico a escala 1/8000, donde levantó toda la zona y área de extensión del proyecto. El modelo hidráulico fue realizado en el software HEC-RAS cuyos datos de entrada fueron el Modelo Digital de Terreno (MDT), condiciones de contorno aguas arriba (hidrograma para Tr 100 años), aguas abajo (tirante normal) y usos de suelo. Los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Pativilca con un área de 4,837 km^2 , longitud de cauce principal de 174 km y una pendiente promedio de cauce de 2.8 % desde la altitud máxima, hasta la descarga en el océano pacífico. Para validar los caudales simulados, el autor calculó los caudales instantáneos cuyo valor fue determinado a partir de los caudales máximos medios diarios multiplicado por el coeficiente de Fuller que fue 1.17, cuyo valor relaciona al área de la cuenca. Los resultados de los caudales máximos instantáneos fueron de 221, 325.14, 401.77, 506.24, 589.51, 677.28, 769.68 m^3/s ; en cambio, el resultado de la simulación hidrológica o de máximas avenidas fue de 206.1, 324.8, 400.9, 505.5, 589, 678 y 765.8 m^3/s para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años respectivamente, existiendo entre sí un margen de error cuya variación oscila de 0.5 a 3.9. El resultado de la modelación hidráulica bidimensional ha sido simulado en 24 horas, cuyo pico de caudal máximo del hidrograma es de 670.7 m^3/s para un Tr de 100 años, generándose a los 26 100 segundos iniciado el evento. En conclusión, la modelación hidráulica bidimensional para el caso del río Pativilca representó mejor las llanuras de inundación (tirantes y velocidades) ante las

máximas avenidas, a diferencia del modelo unidimensional que no llega a modelar el flujo en las márgenes. Además, los centros poblados afectados fueron Simón Bolívar y Nueva Esperanza incluido las áreas agrícolas representando un total de 93.84 has para una avenida de Tr de 100 años.

1.1.3. Nivel regional

Guevara (2018) realizó un estudio sobre “Modelación hidrológica e hidráulica para determinar las crecidas en el Río Gera en la Provincia de Moyobamba, 2015”. El objetivo de la investigación fue conocer el comportamiento hidrológico para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años de la cuenca del río Gera para generar información cartográfica de las zonas vulnerables a inundaciones o desbordamientos a partir de la aplicación de un modelo hidrológico e hidráulico. El ámbito de estudio fue la unidad hidrográfica del río Gera, cuya área total es de 215.09 km² ubicado al suroeste del río Mayo en el distrito de Jepelacio, departamento de San Martín. El área de investigación consistió en 152.92 ha y una longitud de eje de río de 2+213 km. La metodología se basó en delimitar la cuenca del río Gera y luego determinó los parámetros geomorfológicos de la cuenca delimitada. Así mismo, determinó los valores de CN con el método del SCS para determinar las pérdidas por infiltración. Luego, realizó un análisis estadístico de la data pluviométrica para determinar la mejor prueba de bondad de ajuste mediante la prueba de Smirnov-Kolmogorov con diversas distribuciones teóricas. Posteriormente, aplicando el método IILA-SENAMHI-UNI a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas determinó las precipitaciones y las intensidades de diseño con duración menores a 24 horas, con las que calculó las curvas IDF. A partir de las curvas IDF generó los hietogramas de diseño para cada Tr, que, finalmente fueron ingresados al software HEC-HMS dando como resultado los caudales máximos de 17.21, 30.73, 44.87, 65.28, 106.43, 150.20, 206.78 y 304.55 m³/s para los Tr de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años, respectivamente. Utilizó el software CivilCAD para procesar el levantamiento topográfico del tramo del río en estudio. En tanto, con la aplicación del software HEC-RAS fue posible la modelación hidráulica, cuyos datos de entrada fueron los caudales máximos obtenidos en el HEC-HMS, la geometría de las secciones transversales y los coeficientes de rugosidad de Manning (n). En los resultados obtenidos para el Tr 200 y 500 años generó inundación en ciertos tramos. En conclusión, logró realizar la modelación hidrológica a partir de los hietogramas de diseño para los Tr en estudio, partiendo de los registros de precipitaciones máximas en 24 horas; además, la

modelación hidráulica permitió la elaboración de mapas de inundación identificándose un área de 23.51 ha a un caudal máximo de 213.76 m³/s para un periodo de retorno de 200 años y 35.10 ha a un caudal máximo de 304.55 m³/s para un periodo de retorno de 500 años.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Marco conceptual hidrología

Hidrología

La hidrología como ciencia estudia los fenómenos naturales involucrando todos los procesos del ciclo hidrológico. Ante eso, su estudio abarca diseños que interpreta y cuantifica los fenómenos climatológicos, proporcionando soporte a trabajos de investigación, obras de ingeniería hídrica, de infraestructura y medio ambiente (Fattorelli y Fernández, 2011).

Ciclo hidrológico

Es el ciclo base de la hidrología que no tiene inicio ni término. El agua se evapora de los mares, océanos y parte terrestre; luego el vapor de agua se transporta a la atmósfera donde se condensa y precipita sobre la superficie terrestre. Posterior, el agua se percola profundamente hasta recargar las aguas subterráneas y finalmente emerge a través de manantiales o discurre por los ríos formando cauces más grandes (Figura 1) (Chow *et al.* 1994).

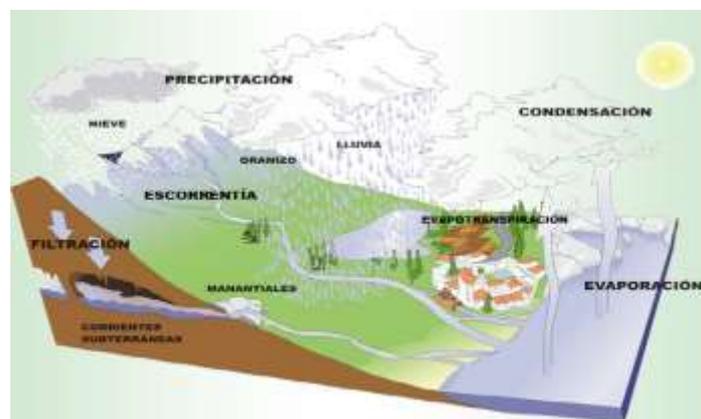


Figura 1. Representación gráfica del ciclo hidrológico. Fuente: Chow *et al.* (1994).

Unidad hidrográfica

El término de Unidad Hidrográfica fue acuñado en el año 1989 por el ingeniero-Otto Pfafstetter. La Unidad Hidrográfica son aquellos espacios que de acuerdo con la geografía y topografía del terreno presentan superficies con mayor elevación permitiendo la delimitación mediante líneas divisorias o parte aguas por donde discurre la red de drenaje en un área específica (Figura 2) (Administración Local del Agua Barranca, 2015).



Figura 2. Características de una unidad hidrográfica. Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] (2011).

1.2.2. Parámetros geomorfológicos

Los parámetros geomorfológicos de una unidad hidrográfica dependen de la morfología, la cobertura boscosa, el tipo de suelo, las prácticas de agricultura, la ciencia de la geología, ya que proporcionan información para conocer el comportamiento de todos los elementos que conforman una cuenca (Monsalve, 1999). Estos parámetros involucran a la forma, el relieve y el drenaje de la cuenca que a continuación se detalla (Viramontes *et al.*, 2007).

a) Parámetros generales

Área

Es la superficie plana de la unidad hidrográfica en proyección horizontal entre sus divisorias topográficas (Monsalve, 1995). El área se obtiene a partir de la delimitación por las líneas imaginarias parte aguas o Divortium Aquarum, por lo general la forma es siempre irregular (Villón, 2002).

Perímetro

Está definido por la longitud de la línea divisoria o Divortium aquarum, separando de otras cuencas limitantes a partir de los puntos de mayor nivel topográfico (Aparicio, 1989).

b) Forma

La forma de una unidad hidrográfica representa cierta característica de gran importancia porque relaciona al tiempo necesario que tarda en discurrir el agua desde la parte más alta de cuenca hasta el punto de aforo, parámetro denominado tiempo de concentración (Monsalve, 1995).

- Ancho medio (A_m)

Es la relación que existe entre el área de la unidad hidrográfica y la longitud del cauce principal (Villón, 2002). El ancho medio se determina con la siguiente fórmula:

$$A_m = \frac{A}{L};$$

Donde:

A_m = ancho medio de la cuenca, en km, A = área de la cuenca, en km^2 y L = longitud del cauce principal, en km.

- Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K_c)

El coeficiente de compacidad es un parámetro adimensional que tiene influencia entre el perímetro de la unidad hidrográfica y el perímetro de un círculo cuya área es igual al de la cuenca. Además, este parámetro está muy relacionado con el tiempo de concentración. El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (k_c) se determina mediante la siguiente relación:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K_c = coeficiente de compacidad o índice de Gravelius,
 P = perímetro de la cuenca, en km, A = área de la cuenca, en km^2 .

Por tanto, el coeficiente de compacidad tiene relación entre el perímetro y el área de la unidad hidrográfica, independientemente de cómo sea el comportamiento del hidrograma en la escorrentía. Para $K_c = 1$ la forma de la unidad hidrográfica tiende ser circular y el tiempo de concentración es menor y mayor susceptibilidad a crecientes. Mientras que, para $K_c > 1$, la forma de la cuenca será alargada cuyo tiempo de concentración será mayor y con menor probabilidad de ocurrencia de crecientes ante una tormenta (Villón, 2002). En la Tabla 1 se muestra la categorización de la cuenca según el coeficiente de compacidad.

Tabla 1

Caracterización de la cuenca en función al índice de Gravelius

Valores de K_c	Forma	Características
1.00 - 1.25	Compacta o redonda a oval redonda	Presentan peligros torrenciales altos
1.25 - 1.50	Oval redonda a oval oblonga	Presentan peligros torrenciales moderados
1.50 - 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Presentan peligros torrenciales bajos
> 1.75	Casi rectangular (alargada)	Presentan peligros torrenciales muy bajos

Fuente: Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1985), citado por ANA, 2010.

- Factor de forma de Horton (F_f)

El factor de forma es un parámetro adimensional y relaciona el ancho medio de la unidad hidrográfica entre la longitud del cauce principal, partiendo desde parte más alta de la cuenca hasta el punto de cierre o aforo (Monsalve, 1995). El factor de forma se calcula con la siguiente relación:

$$F_f = \frac{A_m}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

F_f = factor de forma, A_m = ancho medio de la cuenca, en km, A = área de la cuenca, en km^2 y L = longitud del cauce principal en km.

Si el factor de forma de una unidad hidrográfica es alto, tiende a presentar tormentas muy intensas cubriendo en su totalidad la extensión de la superficie y de manera simultánea. Sin embargo, ante un bajo valor del factor de forma, la posibilidad de concentrar las intensidades de las lluvias se reduce, ante cuencas de igual superficie y lámina de precipitación (Villón, 2002). Por otra parte, con la finalidad de representar numéricamente de como la forma de la cuenca influye en los hidrogramas de caudales máximos, Horton propuso un parámetro adimensional de índice de forma de la cuenca. La forma tiene cierta influencia significativa en el escurrimiento y recorrido del hidrograma (Figura 3). En las cuencas con forma oval a circular redonda (cuenca B y C de la Figura 3), mantienen características similares en cuanto a la cantidad de tributarios y longitud de cauce principal corto, por ende, el tiempo de recorrido es aproximadamente igual y el hidrograma de máximas crecientes son más elevados, pero el tiempo de duración es menor a intensidades iguales. Sin embargo, en una cuenca alargada el ascenso del hidrograma es más rápido pero el caudal pico es menor y el retorno al flujo base es mucho más lento que en una cuenca circular (Busnelli, 2009 citado por Tapia, 2012). Además, el parámetro de forma relaciona al tiempo de concentración desde el extremo más alto de la cuenca hasta el punto aforo (ANA, 2010). En la Tabla 2 se presenta la caracterización de la unidad hidrográfica de acuerdo con el factor de forma, tipo de la cuenca y la intensidad de las crecidas.

Tabla 2

Caracterización de la cuenca en función al factor de forma de Horton

Factor de forma	Tipo de cuenca	Crecida
< 0.30	Rectangular alargada	Lentas
0.30 - 0.40	Oval	Sostenidas
0.40 - 0.50	Cuadrado con salida lateral	Rápidas
0.50 - 0.79	Circular o redonda	Intensas
0.79 - 1.00	Cuadrado con salida central	Muy Intensas

Fuente: Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico (ANA, 2010).

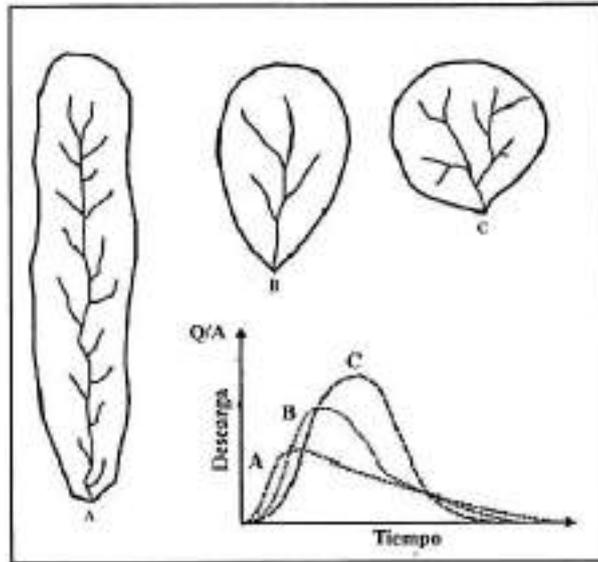


Figura 3. Forma de la cuenca de drenaje y su relación con hidrogramas de crecientes. Fuente: Villón (2002).

- Rectángulo equivalente

A partir del rectángulo equivalente se puede representar la unidad hidrográfica en forma geométrica, heterogénea con característica similar al de un rectángulo, es decir de área y perímetro semejantes, mismo coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, igual rango de elevación por ende igual curva hipsométrica e igual distribución de superficie en cuanto a condiciones de cubierta. Al ser un rectángulo se compone de dos lados uno mayor y otro menor, donde las curvas de nivel se convierten en rectas perpendiculares al lado mayor o paralelas al lado menor, constituyendo a estos lados ambos extremos las curvas de nivel inicial y final (Villón, 2002). Para el cálculo del L (lado mayor), toma el signo positivo y cuando se trate del cálculo del l (lado menor), toma el signo negativo:

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right)$$

Donde: L = longitud del lado mayor del rectángulo en km, l = longitud del lado menor del rectángulo en km, K = coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, A = área de la cuenca, en km^2 .

c) Relieve

- Curva hipsométrica

Es la representación gráfica de como varía la característica del relieve de toda la superficie de la unidad hidrográfica (ANA, 2010). Por otra parte, la característica de la curva hipsométrica está asociado a la edad de la cuenca (Figura 4). La curva A representa a una cuenca joven formado con ríos de montaña, pendientes muy empinadas y con alto poder erosivo. La curva B es un indicador de una cuenca madura con amplias extensiones de valles, pendientes suaves y con erosión principalmente en las márgenes de los ríos. La curva C es representa a una cuenca en fase de vejes con presencia de valles muy amplios, pendientes planas, donde la extensión de planicies es mucho mayor al ancho de los meandros. Así mismo, otro indicador de edad de la cuenca es el valor de la integral hipsométrica cuyo parámetro está en función al área que está por debajo de la curva, si este es superior al 60 % es una cuenca joven, valores alrededor de 47 % indica una cuenca en equilibrio (madura), si está por debajo de 30 % referencia a una cuenca en fase de vejez (Racca, 2007).

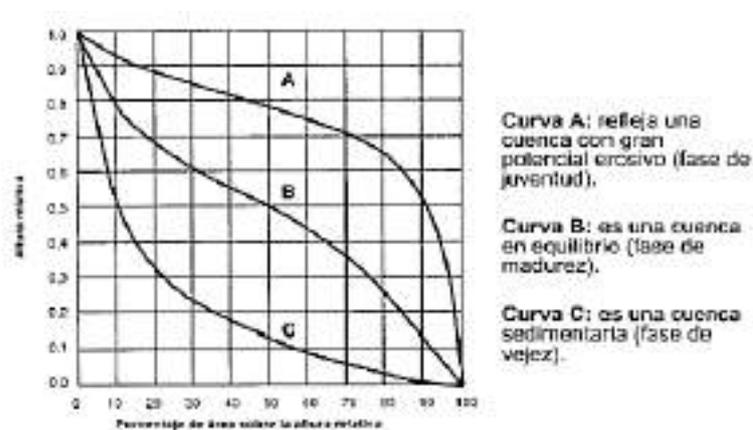


Figura 4. Representación Gráfica de la curva hipsométrica. Fuente: Brieva (2018).

- Frecuencia de altitudes

La frecuencia de altitudes es un complemento de la curva hipsométrica, representa gráficamente de cómo está distribuido el porcentaje de áreas que yacen entre diversos rangos de altitud (Villón 2002). Además, en esta gráfica se determina la moda de área en cada intervalo de clase de altitud con respecto al área total (Monsalve, 1995).

Altitudes características

- Altitud media de la cuenca

Comprende al punto medio de la ordenada de curva hipsométrica, cuyo cálculo tiende a una ponderación promedio de la altitud y el área de la unidad hidrográfica (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2016). La altitud o elevación media es un parámetro de gran importancia en la cuenca, dado que influye en la escorrentía y factores que inciden en el régimen hidrológico (Monsalve, 1995). Por tanto, la altitud media proporciona una idea general sobre el comportamiento del patrón climático de la cuenca (ANA, 2010). La altitud media de la cuenca se calcula con la siguiente expresión:

$$H_m = \frac{\sum(c_i * a_i)}{A}$$

Donde: H_m = altitud media, c_i = elevación media entre dos curvas de nivel, a_i = área entre dos curvas de nivel y A = área de la cuenca en km^2 .

- Altitud de frecuencia media

Este parámetro corresponde a la altitud en el punto de la abscisa media de la gráfica de frecuencia de altitudes, donde el 50 % de áreas de la unidad hidrográfica yace por sobre esta altitud, y el 50 % se sitúa por debajo de ella (Villón, 2002).

- Altitud más frecuente

Representa a la elevación predominante del máximo valor de porcentaje de área de la gráfica de frecuencia de altitudes (SENAMHI, 2016).

- Desnivel de altitud

Es la diferencia de cotas existente entre el punto topográfico de mayor altitud y el punto más bajo de la unidad hidrográfica (Garay y Agüero, 2018).

- Pendiente

Es uno de los elementos que tiene control en el tiempo, sobre el paso del escurrimiento y concentración de la precipitación en la red hídrica. Además, tiene relación importante y directa sobre el comportamiento de las máximas avenidas (Villón, 2002). Mientras el valor de pendiente se incrementa, existe mayor posibilidad de la ocurrencia de crecidas, y ante eventos extremos la velocidad del flujo aumenta, y por el contrario a valores bajos las descargas máximas serán menos ofensivas (SENAMHI, 2016).

Índice de pendiente

Este parámetro, es una ponderación que se instituye tanto en las pendientes y la distancia recorrida por el curso principal. Asimismo, es un valor muy importante ya que permite conocer de cierta forma el relieve de la unidad hidrográfica y el material granulométrico que se sitúa en el lecho del río (Villón, 2002). El índice de pendiente de la cuenca se calcula con la siguiente expresión:

$$I_p = \sum_{i=1}^n \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})} \frac{1}{\sqrt{L}}$$

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T}$$

Donde: I_p = índice de pendiente, n = número de curvas de nivel incluidos ambos extremos del rectángulo equivalente, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ = cotas de las n curvas de nivel en km, β = fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas $a_i - a_{i-1}$. L = longitud del lado mayor del rectángulo equivalente, en km

Pendiente media de la cuenca (Criterio rectángulo equivalente)

Para el cálculo de la pendiente de la unidad hidrográfica se considera la pendiente media del rectángulo equivalente. Se calcula con la siguiente expresión (Villón, 2002):

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

Donde:

S = pendiente media de la cuenca, en m/m

H = desnivel total (cota máxima – cota del punto de aforo), en m

L = longitud del lado mayor del rectángulo equivalente, en m

Pendiente media de la cuenca (Criterio topográfico)

La pendiente es la relación que existe entre la diferencias de cotas o altitud en la vertical entre dos puntos dados A y B y su la distancia horizontal o reducida que los separa (Figura 5). Por lo general, en planimetría la pendiente se expresa en porcentaje, cuyo valor equivale a la pendiente multiplicación por 100 (Garzón, 2017). Mediante este criterio se puede clasificar la pendiente de acuerdo al grado o porcentaje de inclinación del terreno, a mayor inclinación de superficie, mayor será el valor de pendiente (Tabla 3). La pendiente se puede expresar principalmente de dos formas, en porcentajes (a) y en grados sexagesimales (b). Para el cálculo de estas, se realizan de mediante las siguientes expresiones matemáticas.

a) Cálculo de la pendiente en porcentaje

$$\text{Pendiente (\%)} = \frac{\text{Diferencia de cotas(m)}}{\text{Distancia reducida (m)}} * 100$$

b) Cálculo de la pendiente en grados sexagesimales

$$\text{Tana} \frac{h}{Dr} \rightarrow \alpha = \text{arctg} \left(\frac{h}{Dr} \right)$$

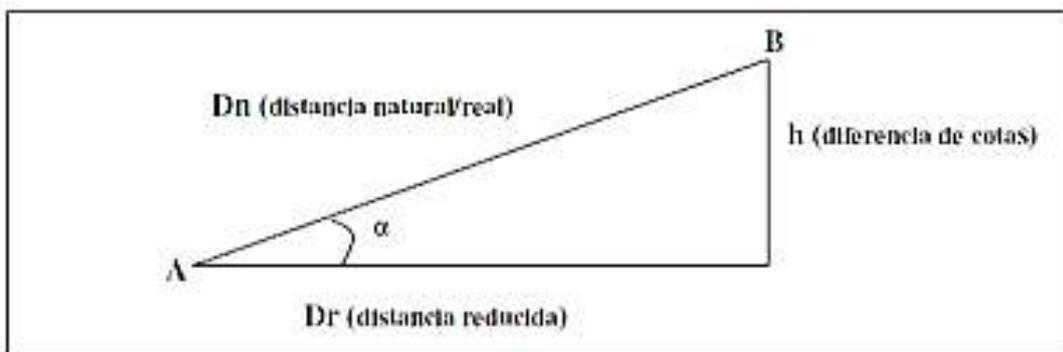


Figura 5. Representación gráfica de la pendiente de terreno. Fuente: Ibáñez et al. (2011).

Tabla 3

Clasificación de pendiente de terreno

Rango de pendiente (%)		Término descriptivo
0	2	Plano o casi plano
2	4	Ligeramente inclinado
4	8	Moderadamente inclinado
8	15	Fuertemente inclinado
15	25	Moderadamente empinado
25	50	Empinado
50	75	Muy empinado
> 75		Extremadamente empinado

Fuente: Decreto Supremo 017-2009-AG.

Pendiente media de la cuenca (Criterio Alvord)

Consiste en el cálculo de las pendientes existentes entre los intervalos de curvas de nivel, discretizando el área de la unidad hidrográfica en áreas parciales definido por las líneas topográficas de igual altitud, y la faja media que pasa entre dichos contornos de elevación (Villón, 2002). La altitud media de la cuenca se calcula con la siguiente expresión:

$$S_i = \frac{D}{W_i}$$

Donde:

S_i = pendiente media de la faja

D = desnivel entre líneas medias. Siendo líneas intermedias entre curvas de nivel, aceptando el desnivel entre tales curvas

$$W_i = \frac{a_i}{L_i},$$

Donde:

a_i = área de la faja ($a_i = W_i \times L_i$)

L_i = longitud de la curva de nivel.

d) Drenaje

El análisis del drenaje dentro de una unidad hidrográfica es importante porque permite conocer la eficiencia de sistema de la red drenaje en el escurrimiento y con qué rapidez es evacuada la cantidad de agua que recibe la cuenca (Villón 2002). Es decir, el drenaje constituye la manera de cómo es desalojada el agua caída dentro del área de influencia de una cuenca (Reyes, 1992). Además, la red de drenaje se clasifica en tres tipos de corrientes: en las corrientes efímeras existe escurrimiento luego de una precipitación, en cuanto a una corriente intermitente transportan agua principalmente en épocas lluviosas; su aporte cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce, mientras que en las corrientes perennes mantiene la esorrentía todo el tiempo (SENAMHI, 2011).

Longitud del cauce más largo

Es la distancia de mayor recorrido que efectúa el curso del río, partiendo desde el punto topográfico más alto aguas arriba de la cuenca, siguiendo todos los cambios de trayectoria o sinuosidades hasta cierto punto en específico (aforo o desembocadura) aguas abajo, determinado en unidad de longitud (ANA, 2018).

Perfil longitudinal

El perfil longitudinal del cauce principal representa el comportamiento de variación de las pendientes de cada cierto tramo a lo largo de su recorrido de curso del agua. Esta información es relevante para el desarrollo de estudios y proyectos relacionados a puntos de captación, posibles centrales hidroeléctricas y control del recurso hídrico (Villón, 2002).

Pendiente media del cauce principal

- Pendiente uniforme

La pendiente media uniforme del cauce principal, se puede decir que es el cociente del desnivel de entre los extremos (cota máxima menos la cota mínima) y la longitud del cauce principal (Reyes, 1992). El cálculo de la pendiente uniforme está dado por:

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

Donde:

S = pendiente media de la cuenca, m/m

H = diferencia entre cota máxima y cota mínima del cauce principal, m

L = longitud total del cauce principal, m

- Ecuación de Taylor y Schwarz

Para el cálculo de pendiente por el método de Taylor y Schwarz consideran que el cauce del río está estructurado por una serie de tramos de canales, con pendiente y sección transversal uniforme. Además, tengan igual longitud y el lapso que dure en su recorrido sea la misma al curso del río (SENAMHI, 2011). La pendiente media del cauce principal por el método de Taylor y Schwarz es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

Donde: S = pendiente media del cauce principal, n = número de tramos iguales subdivididos en el perfil longitudinal y $S_1 + S_2 + \dots + S_n$ = pendiente de cada tramo, según $S = H/L$.

Red de drenaje

- Orden de corrientes

Es importante conocer el orden de la red hídrica ya que proporciona un panorama amplio sobre la estructuración del sistema de drenaje dentro de la cuenca, cuyo parámetro relaciona al caudal relativo en una corriente de un cauce (SENAMHI, 2011). En la Figura 6 se puede analizar que, las corrientes de primer orden no reciben aporte de ningún tributario, los de segundo orden se forman a partir de la confluencia de dos corrientes de primer orden de los cuales recibe aportes, los de tercer orden se forman por el aporte y confluencia de corrientes de segundo orden, y así sucesivamente se incrementa la jerarquización de la red hídrica (Villón, 2002). Por tanto, el orden que indique la corriente principal a la salida de la cuenca representará a la red de drenaje en el interior de esta (Reyes, 1992).

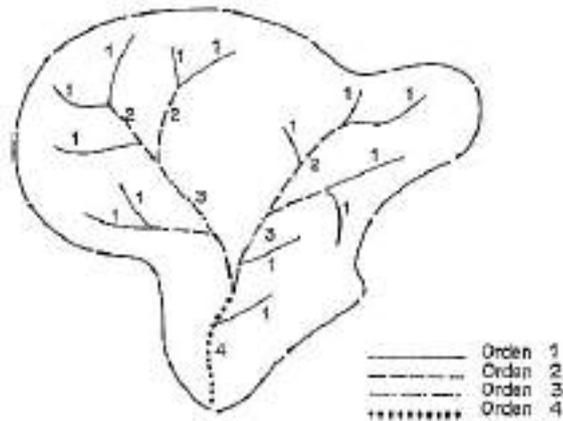


Figura 6. Esquema del orden de las corrientes - sistema de Strahler. Fuente: Reyes (1992)

- Longitud de corrientes

La longitud de corrientes se refiere a la suma de la distancia del recorrido que realizan los diversos cursos del agua, formando así la red hídrica de la cuenca, cuya medida constituye desde la naciente hasta la confluencia con otro cauce o desembocadura (SENAMHI, 2011). Por otra parte, el incremento de la longitud de corrientes está relacionado con orden que se atribuye y puede aumentar progresivamente; pero, esta relación no aplica para el caso de ser una sola corriente (Villón, 2002).

- Densidad de drenaje (D_d)

Este parámetro define la longitud de cursos de la red hídrica (perennes o intermitentes) por unidad de área (Reyes, 1992). Además, la densidad de drenaje expresa el comportamiento y dinámica de la red hídrica en la cuenca; es decir, el tipo de escorrentía superficial y la respuesta de la unidad hidrográfica frente a una intensidad de lluvia (SENAMHI, 2011). En la Tabla 4 se muestran los valores interpretativos de la densidad de drenaje, valores inferiores indica baja estructuración de la red hídrica y por ende elevada resistencia a la erosión, generalmente son zonas con desarrollada cobertura vegetal, bajo relieve y suelos con alta permeabilidad (ANA, 2010). La densidad de drenaje se calcula con la siguiente expresión:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde: D_d = densidad de drenaje (km/km^2), L = longitud total de las corrientes perennes e intermitentes, en km, A = área de la cuenca, en km^2 .

Tabla 4

Valores de interpretación de la densidad de drenaje.

Densidad de drenaje (km/km ²)	Categoría
< 1	Baja
1 - 2	Moderada
2 - 3	Alta
> 3	Muy alta

Fuente: Delgadillo y Páez (2008).

- Frecuencia de ríos (F_r)

Este parámetro se define como el número de corrientes independientemente del orden que tengan sobre la superficie de la unidad hidrográfica. Por tanto, la frecuencia de ríos determina el número de corrientes por área, estableciendo la máxima o mínima posibilidad de que cualquier flujo de agua encuentre un curso a corto o mayor tiempo posible (SENAMHI, 2011). Para el cálculo de la frecuencia de ríos, se utiliza la siguiente expresión:

$$F_r = \frac{N_c}{A}$$

Donde: F_r = frecuencia de río, N_c = número de corrientes perennes e intermitentes, en km; A = área de la cuenca, en km².

Para la determinación del número de corrientes solo se consideran las corrientes perennes e intermitentes, el cauce principal se cuenta como un solo segmento de drenaje desde su origen hasta la estación de aforo o desembocadura. Posteriormente, los tributarios orden uno desde su nacimiento hasta la confluencia con otras corrientes de mayor orden y así sucesivamente hasta llegar al cauce principal (Villón, 2002).

- Extensión media de escurrimiento superficial (E_s)

Este parámetro relaciona al área de la cuenca y la longitud de las corrientes, a su vez indica la distancia en promedio que recorre el agua producida en una precipitación, hasta llegar a

un cauce más cercano (SENAMHI, 2016). Para el cálculo de la extensión media de escurrimiento superficial, se utiliza la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{A}{4L_i}$$

Donde: E_s = escurrimiento superficial (km), A = área de la cuenca, en km^2 , L_i = longitud total de las corrientes, en km.

- Relación de bifurcación (R_b)

Para un mejor ordenamiento de la red de drenaje dentro de una cuenca se optó por un modelo de relación de bifurcación, siendo este parámetro el resultado de la división del total de corrientes de un orden dado, entre la cantidad total de cauces con un orden inmediatamente superior (ANA, 2010). Mientras más ríos tenga la cuenca el índice de bifurcación será mayor, y la respuesta ante las precipitaciones será más rápida (Aparicio, 1989). Para el cálculo de la relación de bifurcación, se utiliza la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}}, \text{ donde: } R_b = \text{relación de bifurcación y } N_i = \text{número de cauces de un orden.}$$

- Coeficiente de torrencialidad (C_t)

Este parámetro presenta cierta relación entre el número total de corrientes de primer orden (N_1) y la superficie de la cuenca (A) en km^2 . El coeficiente de torrencialidad indica que a mayor número de cauces de orden uno y a menor superficie hidrográfica el índice de torrencialidad será mayor (Romero y López, 1987). Además, genera una aproximación del comportamiento de la capacidad de descarga y la erodabilidad lineal de la cuenca. Esto principalmente, se debe a que los cauces de primer orden son el origen del proceso erosivo y a altos valores de torrencialidad la probabilidad a la erosión se incrementa y el tiempo de llegada al caudal máximo se reduce. Por tanto, se dice que las corrientes de primer orden son los más relevantes en la generación de descargas torrenciales y de inundaciones aluvionales muy rápidas (Busnelli y Horta, 2014). Para el cálculo del coeficiente de torrencialidad, se utiliza la siguiente expresión:

$C_t = \frac{N_1}{A}$, donde: C_t = coeficiente de torrencialidad, N_1 = número total de corrientes de primer orden y A = área de la cuenca en km^2 .

1.2.3. Análisis de precipitación máxima 24 horas

Identificación de datos dudosos

Para Buckland (1957) y Grubbs (1959) citado en Organización Meteorológica Mundial [OMM], (2011) los “outliers” son datos muy alejados de la tendencia de información muestral cuya procedencia es cuestionada ya que pueden pertenecer a otra población. Fattorelli y Fernandez (2011), indica que los datos podrían ser bajos, altos o simplemente ambos casos, lo cual puede ocasionar una curva de frecuencias deformada en relación con los datos muestrales indicados. La siguiente ecuación se utiliza para detectar datos dudosos altos:

$$yH = \hat{y} + KnSy$$

Donde: yH = umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas media del registro, \hat{y} = promedio del registro de datos, K_n = constante que varía según el número de datos, S_y = desviación estándar del registro. Sin embargo, para identificar datos dudosos bajos se resta al promedio la constante de prueba de datos dudosos multiplicada la desviación estándar. La ecuación para determinar datos dudosos bajos es la siguiente:

$$yL = \hat{y} - KnSy$$

Donde: yL = umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas media del registro.

Los datos son dudosos si el logaritmo del valor obtenido en una muestra supera el umbral de logaritmos del total de la muestra, o a su vez puede estar por debajo del umbral de logaritmos de esta. El valor de K_n se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Valores de K_n para 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	2.04	24	2.47	38	2.66	60	2.83
11	2.08	25	2.48	39	2.67	65	2.86
12	2.13	26	2.5	40	2.68	70	2.89
13	2.17	27	2.52	41	2.69	75	2.91
14	2.21	28	2.53	42	2.7	80	2.94
15	2.24	29	2.55	43	2.71	85	2.96
16	2.28	30	2.56	44	2.72	90	2.98
17	2.31	31	2.57	45	2.72	95	3
18	2.33	32	2.59	46	2.73	100	3.01
19	2.36	33	2.6	47	2.74	110	3.05
20	2.38	34	2.61	48	2.75	120	3.08
21	2.41	35	2.63	49	2.76	130	3.1
22	2.43	36	2.64	50	2.77	140	3.13
23	2.45	37	2.65	55	2.8		

Fuente: Chow et al. (1994).

Distribuciones teóricas

Existen muchas funciones para el análisis de las distribuciones de probabilidades teóricas, cuyos modelos probabilísticos permiten representar el comportamiento de una variable. A partir del cálculo de parámetros que abordan estos modelos, ayudan a realizar la prueba de bondad de ajuste. Por tanto, si el ajuste resulta satisfactorio para una distribución, esta se puede utilizar para la predicción de cierta probabilidad de ocurrencia de una determinada magnitud de un fenómeno hidrometeorológico, y que además podría estar asociado a un periodo de retorno (Villón, 2016). Entre las distribuciones más comunes y utilizadas en las ciencias hidrológicas y expuestas por Villón (2016, p. 197), son: “distribución normal,

distribución log – normal de 2 o 3 parámetros, distribución gamma de 2 o 3 parámetros, distribución log – Pearson tipo III, distribución Gumbel, distribución log – Gumbel”.

Prueba de bondad de ajuste

La prueba de bondad de ajuste consiste en probar; tanto, gráfica y estadísticamente si existe un ajuste entre valores muestrales y teóricos. Comparando si la frecuencia empírica en función de una distribución teórica es similar se dice que el ajuste es aceptable (Chow *et al.*, 1994). Las pruebas más utilizadas son la de χ^2 y Kolmogorov-Smirnov (Aparicio, 1989). La prueba χ^2 es la más conocida y fue propuesta por Pearson en el año de 1900. Sin embargo, hay que tener cuidado al emplear este tipo de prueba, ya que trabajan con datos agrupados y muestras de regular tamaño. Mientras que la prueba de Kolmogorov-Smirnov trabaja con datos no agrupados y consiste en comparar la diferencia que existe entre el valor absoluto más alto de la probabilidad empírica de todo el registro de la muestra frente a la teórica (Aparicio, 1989).

Prueba Kolmogorov-Smirnov

Compara la diferencia entre el delta tabular y el delta teórico; si, el delta tabular es mayor que el delta teórico entonces los datos se ajustan a la distribución con un cierto nivel de significancia. La probabilidad que se requiere es que delta calculado sea menor que delta tabulado ($D < D\alpha$). Por lo general, para estudios hidrológicos se recomienda trabajar con un nivel de confianza del 95 % (Aparicio, 1989).

1.2.4. Estudio máximas avenidas

Máximas avenidas

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], (2011) señala que la importancia de conocer la dinámica y el comportamiento temporal de las máximas avenidas es que proporcionan información valiosa frente a la magnitud que pueden darse y a su vez pronosticar la probabilidad de que puedan ocurrir los fenómenos. Por otra parte, Cardich (2017) afirma que, el análisis de las máximas avenidas proporciona un cierto grado de confiabilidad para que los ingenieros y diseñadores de estructuras hidráulicas no

sobredimensionen las obras, ni tampoco consideren un caudal de diseño al azar, ya que por el contrario las estructuras se verían expuestas a colapsar ante descargas máximas de los ríos. Es así como, estudiar la dinámica de las máximas avenidas no solo permite conocer el caudal de diseño sino también la prevención de inundaciones y a su vez evitar pérdidas de cualquier índole por los daños que podrían generarse.

Precipitación máxima en 24 horas

Chow *et al.* (1994) definen a la precipitación como el agua que desciende desde la atmósfera hasta la tierra mediante la gravedad, ya sea en forma de granizo, llovizna, nieve o lluvia. Es así, que la precipitación es la fuente esencial que genera la escorrentía superficial y subsuperficial (Rocha, 1993). Por su parte, considerando desde la ingeniería hidrológica se dice que la precipitación es toda el agua que cae a la superficie terrestre, convirtiéndose en la principal fuente hídrica, y es allí donde facilita el registro y control de lo precipitado. Proporciona información valiosa para los diversos estudios, proyectos y usos referente a este recurso (Aparicio, 1989). Las precipitaciones máximas en 24 horas corresponden a los valores más altos registrados en una estación meteorológica durante un día de cualquier mes. Por lo tanto, en un registro anual se tendría 12 datos máximos de precipitación diaria; lo cual el valor máximo de cualquier mes representará a la precipitación máxima del año en un intervalo de tiempo de 24 horas.

Periodo de retorno (Tr)

El periodo de retorno es el intervalo de tiempo estimado de que un cierto evento se dé a una magnitud determinada o se aproxime a la igualdad, o tal vez sea superado para T años (MTC, 2011). Así mismo, Chow *et al.* (1994) define al Tr como la ocurrencia de una eventualidad extrema cuando un valor X exceda o iguale a un cierto valor X_T , donde la recurrencia τ es el intervalo de tiempo entre $X \geq X_T$ como la posibilidad de ocurrencia. Por otra parte, el Tr es indispensable tomarse en cuenta al momento del diseño de estructuras hidráulicas entre la vida útil y la ocurrencia de que se dé un evento extremo; asociado a esto, las fallas admisibles por los riesgos que se presenten (MTC, 2011).

$$Tr = \frac{1}{p}, \text{ donde:}$$

Tr = Periodo de retorno

P = Probabilidad de excedencia

Estadísticamente, el Tr es la inversa de la probabilidad de que un evento pueda ocurrir.

$$P(X \geq x_T = \frac{1}{T}, \text{ donde:}$$

$P(X \geq x_T)$ = Probabilidad de ocurrencia

T = Es la duración

Curvas Intensidad Duración y Frecuencia (IDF)

La curva IDF es un componente que tiene una cierta relación entre intensidad de la lluvia (mm/hr) versus el tiempo en minutos mientras precipita; pero a su vez tiene en cuenta la frecuencia con que se pueda dar un evento, considerando el periodo de retorno con el cual se esté realizando el diseño (MTC, 2011). Para la elaboración de las curvas IDF, se tiene que analizar las tormentas de las precipitaciones y calcular la intensidad máxima de acuerdo con las duraciones de tiempo considerandos para cada tormenta (Villón, 2002). Por lo tanto, los datos de entrada para generar las curvas IDF requieren de registros pluviográficos de la zona de donde se esté realizando el estudio; pero, estos deben ser los registros más altos de una serie de tiempo en años, lo cual permitirá analizar la frecuencia para cada serie considerada. Al respecto, solo se deben considerar los hietogramas con tormentas más intensas de acuerdo con la primera, segunda y tercera hora respectivamente y así continuamente con los demás intervalos de tiempo. Sin embargo, debido a la falta de datos pluviográficos en nuestro país, se procede a calcular las curvas IDF a partir las precipitaciones máximas en 24 horas. Las curvas IDF presentan gran importancia en el pronóstico de caudales máximos de diseño de una unidad hidrográfica facilitando la construcción de estructuras que eliminen o reduzcan los efectos ante las crecidas de los ríos (Bateman, 2007). A continuación, se detalla la ecuación que representa estadísticamente las curvas IDF propuesta por Aparicio (1989):

$$I = \frac{k \cdot T^m}{D^n}$$

Donde: k, m, n = Son constantes, obtenidas mediante un cálculo de correlación lineal múltiple.

Hietograma de precipitación de diseño utilizando las relaciones IDF

Villón (2002) define al hietograma como una gráfica en forma de escalones en la cual se muestran las intensidades de una tormenta dada en milímetros, y el tiempo ya sea en horas o minutos que tarda desde el inicio de la tormenta hasta que termina, lo que facilita conocer la máxima intensidad y el tiempo en que ocurre.

Método del bloque alterno

Según el método de bloque alterno para generar los hietogramas de diseño, se requiere la información que presenta las curvas IDF. En consecuencia, los hietogramas de diseño generados mediante este método precisan la precipitación caída entre ciertos rangos, pero relacionado al tiempo que dura la intensidad y al tiempo total de duración de la tormenta (Figura 7). No obstante, es necesario elegir el periodo de retorno, la intensidad y la duración para conocer el comportamiento de un evento a una duración específica y tiempo requerido para el diseño. Para tal efecto, se realiza un ajuste entre la intensidad y sucesión temporal, a fin de que la máxima intensidad se dé en el centro de toda la duración y que los otros bloques se ordenen de manera descendente tanto al lado derecho como izquierdo, permitiendo la construcción del hietograma de diseño (Chow *et al.* 1994).

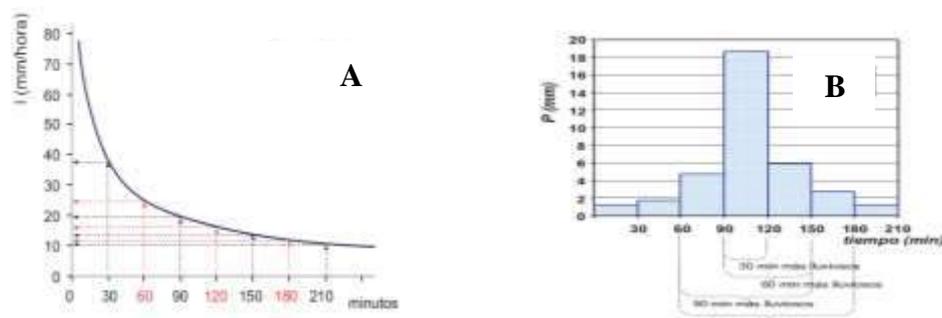


Figura 7. Obtención del hietograma de diseño A y B. Fuente: Sánchez (2008), citado por Esquen y Rodríguez (2016).

Hidrograma unitario

Un hidrograma es una gráfica donde se muestra una curva indicando el pico más alto de la escorrentía superficial o el máximo caudal instantáneo producido en una intensidad máxima

de tormenta, tal como se muestra en la Figura 8 (Chow *et al.* 1994). Por su parte, la Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2011) define al hidrograma unitario como el caudal máximo que discurre dentro de una unidad hidrográfica producto de la precipitación efectiva en un intervalo de tiempo específico.

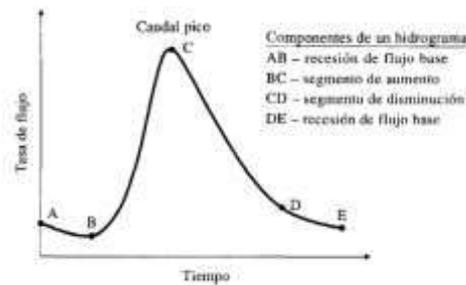


Figura 8. Componentes de un Hidrograma. Fuente: Chow *et al.* (1994).

Tiempo de concentración (t_c)

Según Villón (2012) el tiempo de concentración es el tiempo que tarda durante el recorrido de una gota de agua que desciende desde el punto más distante de una unidad hidrográfica hasta el punto de salida o aforo. Además, t_c puede variar de acuerdo a la cobertura, pendientes, topografía y geografía que presente la unidad hidrográfica. En cambio, Campos (2016) define al tiempo de concentración como el tiempo que demora una gota de agua durante el desplazamiento desde el punto más lejano de la unidad hidrográfica hasta llegar al punto donde se está realizando el análisis. Sin embargo, existen diversas fórmulas para calcular el t_c de una unidad hidrográfica, entre ellas se tienen ecuaciones empíricas, propuestas en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (MTC, 2011).

Fórmula de Kirpich 1940. Para calcular el t_c es la siguiente:

$$t_c = 0.01947 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385}, \text{ donde:}$$

t_c = Tiempo de concentración, en minutos
 L = Longitud del cauce principal, en metros
 S = Pendiente promedio de la cuenca, en m/m

Fórmula de California Culverts Practice 1942. Para calcular el tc es la siguiente:

$$tc = 0.195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385},$$

donde:

tc = Tiempo de concentración, en horas

L = Longitud máxima de recorrido, en metros

H = Diferencia entre cota más elevada del cauce principal y cota del punto de análisis, en metros

Inundación

Es un fenómeno natural producido por el exceso de las precipitaciones, típico de los meses de mayor intensidad de lluvias. El cual ocasiona desbordamiento de los ríos debido al incremento de caudales; provocando un aumento del nivel de agua en superficies donde habitualmente no hay presencia de agua, causando grandes, daños pérdidas económicas y materiales. Las causas de las inundaciones también se dan por las mismas actividades humanas (deforestación, impermeabilidad del suelo, modificación y obstrucción de cauces, entre otros), o falla de alguna estructura hidráulica (Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED], 2009).

Un estudio realizado por Gómez (2018), determinó que la deforestación influye en la peligrosidad de las inundaciones en un intervalo de tiempo determinado, de manera estadísticamente significativa y directamente proporcional. Asimismo, existen factores que condicionan las inundaciones tales como la topografía, cubierta vegetal y condiciones del suelo (Equipo de Respuesta ante Emergencias Informáticas [CERT], 2011).

- Topografía: Cuando la cuenca presenta un drenaje de empinado a muy empinado tienen un elevado potencial para la ocurrencia de inundaciones (Bryant, 2005).
- Condiciones de suelo: Se refiere principalmente a las características de textura, humedad y densidad (CERT, 2011).
- Cubierta Vegetal: Un suelo con presencia de cobertura vegetal acumula en su estructura mayor contenido de agua, en cambio, los suelos modificados o desnudos podrían generar escorrentías y erosión del suelo (CERT, 2011).

1.2.5. Caudales máximos instantáneos

Ante la falta de registros de caudales instantáneos, se opta por utilizar métodos empíricos ampliamente aceptados. Por lo tanto, el método de regionalización de máximas avenidas de los ríos del Perú permite determinar de una envolvente de las máximas avenidas, aplicando la ecuación de Creager el cual está en función de área de la cuenca y del periodo de retorno (Trau y Gutiérrez, 1979). Ecuación de Creager y Junstin (1950).

$$Q_{m\acute{a}x} = (C_1 + C_2) * \text{Log}(T) * A^{mA^{-n}}$$

Donde: $Q_{m\acute{a}x}$ = Caudal máximo medio diario para cada periodo de retorno, m^3/s , C_1 y C_2 = Coeficiente de escala, adimensional, T = Periodo de retorno, en años, A = Área de la cuenca, en km^2 , m y n = Exponente, adimensional.

Para el análisis regional de las avenidas de los ríos en el Perú, mediante la relación de caudal y área, subdividieron al territorio peruano en siete regiones (Figura 9). Por tanto para el cálculo de las descargas maximas determinaron coeficientes y exponentes adimensionales propios para cada región (Tabla 6).

Tabla 6

Parámetros para el cálculo de las avenidas

Región	C_1	C_2	m	n
1	1.01	4.37	1.02	0.04
2	0.100	1.280	1.020	0.04
3	0.270	1.480	1.020	0.04
4	0.090	0.360	1.240	0.04
5	0.110	0.260	1.240	0.04
6	0.180	0.310	1.240	0.04
7	0.220	0.370	1.240	0.04

Fuente: Trau y Gutiérrez (1979).

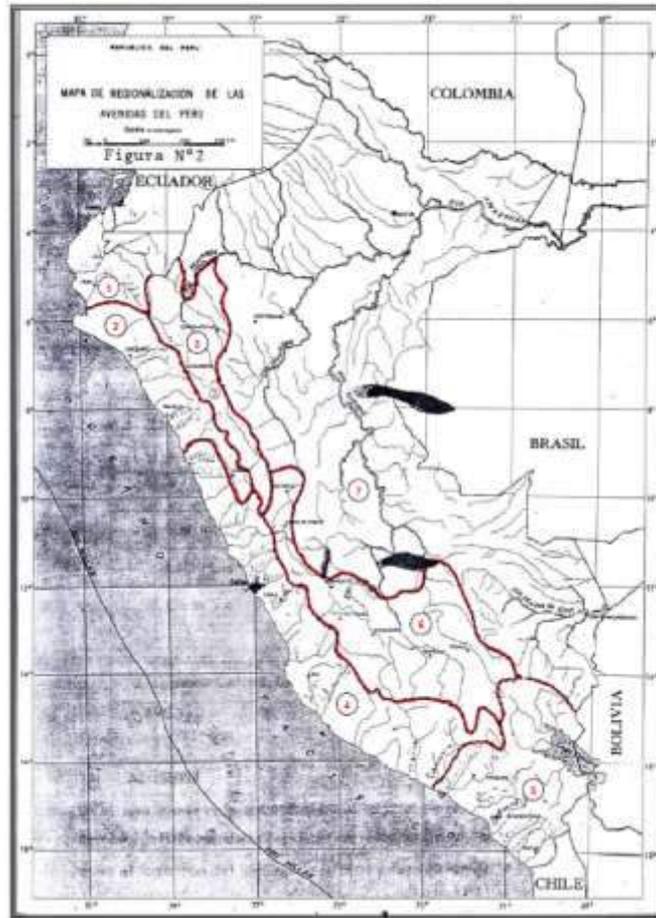


Figura 9. Mapa de regionalización de las avenidas del Perú. Fuente: Trau y Gutiérrez (1979).

Por tanto, los caudales máximos instantáneos se obtienen a partir de la transformación de los caudales máximos medios diarios mediante la ecuación de Fuller (Sierra, 2018). Esta fórmula matemática es muy utilizada para estos casos, cuya ecuación es la siguiente:

Ecuación de Fuller

$$Q_i = \left(1 + \frac{a}{A^b}\right) Q_{m\acute{a}x}$$

Donde: Q_i = caudal máximo instantáneo, en m^3/s ,
 A = área de la unidad hidrográfica, en km^2 , a y b
 = parámetros la ecuación matemática de Fuller,
 adimensional.

$$Q_i = \left(1 + \frac{2.66}{171.031^{0.33}}\right) Q_{m\acute{a}x}$$

Según las investigaciones realizados por Fuller, el parámetro a puede tener cierta variación cuyo rango oscila entre 2.5 hasta 6. Sin embargo, la fórmula simplificada de Fuller considera a igual 2.7, y b igual 0.3 (Jiménez, 2015).

1.2.6. Coberturas de uso de suelo

Las coberturas de uso de suelo son aquellos elementos que ocupan la superficie del suelo tales como pastos, cultivos, centros urbanos, bosques y zonas deforestadas; y para poder determinar estos tipos de cambios se debe realizar un análisis multitemporal, deduciendo de esa manera las afectaciones del hombre o del medio natural (Chuvieco, 1995). Por tanto, es necesario realizar un análisis de las coberturas y usos de los suelos mediante una clasificación supervisada utilizando softwares SIG y Teledetección. A continuación, se detalla el comportamiento espectral de las principales coberturas.

Comportamiento espectral de la vegetación. Para caracterizar las masas vegetales se tiene en cuenta tres principales características como la reflectividad de la hoja (pigmento, estructura celular, humedad), características geométricas de la planta (forma de hojas, área foliar) y criterios geográficos (pendiente, condiciones ambientales, orientación). Además, la forma espectral de la vegetación tiene baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano y con máximos relativos en el infrarrojo de onda corta – SWIR (Chuvieco, 2008).

Comportamiento espectral del suelo. Para la determinación de suelos se tiene en cuenta criterios como la textura, contenido de humedad, composición química y estructura. Los suelos arcillosos son reflejados en la banda roja, los suelos de origen calcáreo se reflejan en todas las bandas visibles. Un suelo arcilloso retiene mejor la humedad que un suelo arenoso presentando una baja reflectividad, en cambio los suelos arenosos presentan una baja humedad por lo que su reflectividad es alta. El componente materia orgánica presente en un suelo hace que la reflectividad sea aún menor (Chuvieco, 2008).

Comportamiento espectral del agua: El agua clara se refleja en la banda azul y los criterios utilizables para su identificación son la presencia de sedimentos, nutrientes, la profundidad y rugosidad de la superficie de fondo. En caso de que el agua aumenta su turbidez la reflectividad es mayor en las bandas visibles. Si el agua presenta una alta concentración de clorofila, la reflectividad aumenta en la banda verde y disminuye en la banda azul tal como se aprecia en la Figura 10 (Chuvieco, 2008).

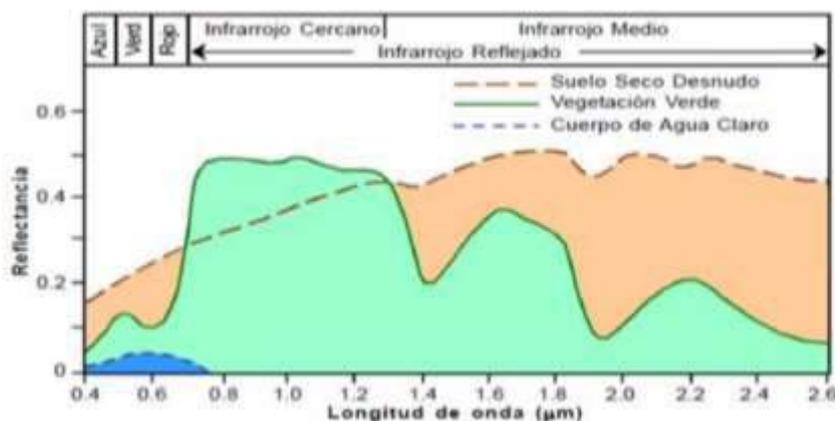


Figura 10. Comportamiento espectral del agua, suelo y vegetación. Fuente: Chuvieco (2008).

1.2.7. Curva Número (CN)

La Curva Número es un parámetro adimensional cuyo valor oscila entre 0 y 100; donde, las superficies totalmente impermeables, el valor de CN es igual a 100, para superficies naturales CN es mayor o igual que 0, pero menor o igual que 100 y para las superficies donde el escurrimiento es nulo CN es 0. Este parámetro, trata de explicar el movimiento del agua ya que no toda la precipitación se convierte en escorrentía, cierta parte de esta se infiltra incrementando la humedad del suelo; uno de los métodos más utilizados y experimentados de los modelos empíricos de precipitación – escorrentía, es el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Por tanto, siendo CN un parámetro muy importante dentro de los modelos hidrológicos, el Sistema Nacional de Información de los Recursos Hídricos (SNIRH), determinó los valores de CN para todo el territorio peruano, tanto para condiciones secas, antecedente de humedad normal y húmedas. Este parámetro fue determinado a partir de mapas de cobertura vegetal, uso de suelos y DEM (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015).

1.2.8. Cálculo del Número de Curva (CN) por el método del Soil Conservation Service (SCS)

El Soil Conservation Service [SCS] (1973) crea una metodología para la determinación del parámetro CN, el cual caracteriza las condiciones físicas del suelo dentro de una unidad hidrográfica. Conocer el valor del CN dentro de una unidad hidrográfica permite determinar las abstracciones de las precipitaciones durante una tormenta. La finalidad de CN es determinar la escorrentía que genera la precipitación en función de la cubierta y las

características físicas del suelo. Además, el método del SCS para el cálculo de CN está basado en el principio de conservación de la masa y en la capacidad de infiltración del suelo (Cahuana y Yugar, 2009).

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Donde: P = precipitación total que cae en la superficie, P_e = precipitación convertida en escorrentía directa, I_a = abstracción inicial de la lluvia, antes que se produzca la escorrentía (infiltración, recarga de acuíferos) y a F_a = total de lluvia infiltrada (Bateman, 2007).

La Figura 11 muestra la representación gráfica de distribución de la precipitación, donde el tiempo está en función al incremento de precipitación.

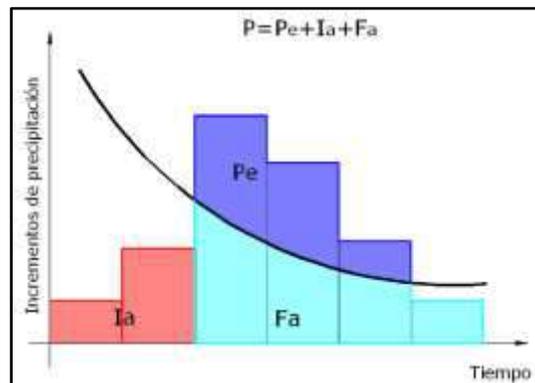


Figura 11. Método de la SCS a partir de la conservación de la masa. Fuente: SCS (1973).

Ante esto se crea la proporcionalidad:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Donde F_a es proporcional a la capacidad potencial de infiltración del suelo (S), frente a la capacidad de producir escorrentía. Combinando las ecuaciones resulta:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Mediante constantes pruebas y mediciones en campo sobre el método del SCS, determina que la potencialidad de capacidad de infiltración del suelo en promedio asciende a un 20%; es decir, del total de lluvia caída solo un 80 % se convierte en escorrentía. Denominándolo

$$a = 0.2S$$

Por lo tanto, para el cálculo y obtención del valor del CN es indispensable conocer los usos, coberturas y texturas de los suelos de toda el área en estudio. Es así que, el SCS (1973) creó una ecuación de escorrentía para determinar el valor del CN la cual se muestra a continuación:

$$Q = \frac{(P-0.2)^2}{P+0.8S}, \text{ donde:}$$

Q = Escorrentía, en mm

P = Precipitación

S = Diferencia máxima probable, entre lo precipitado y lo discurrido

El S y el CN interactúan por:

$$CN = \frac{1000}{10+S}, \text{ donde } S \text{ está expresado en pulgadas.}$$

La Figura 12 detalla el esquema típico del método Soil Conservation Service que se utiliza para evaluar avenidas en cuencas medianas, la Figura 13 muestra los valores de la curva número propuesta por Aparicio y en la Tabla 7 y 8 se detallan los valores de la Curva Número para los diferentes grupos hidrológicos del suelo.

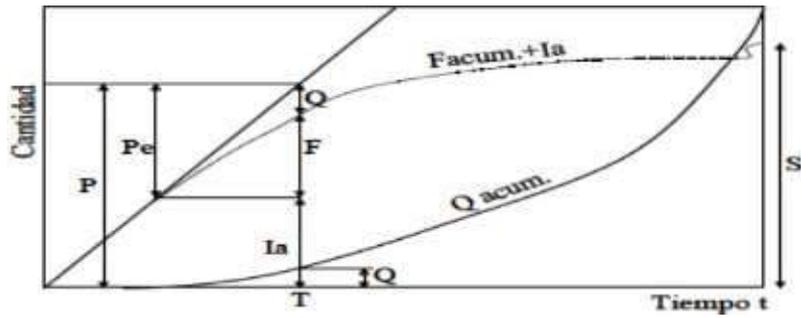


Figura 12. Gráfico del método Soil Conservation. Fuente: SCS (1973).

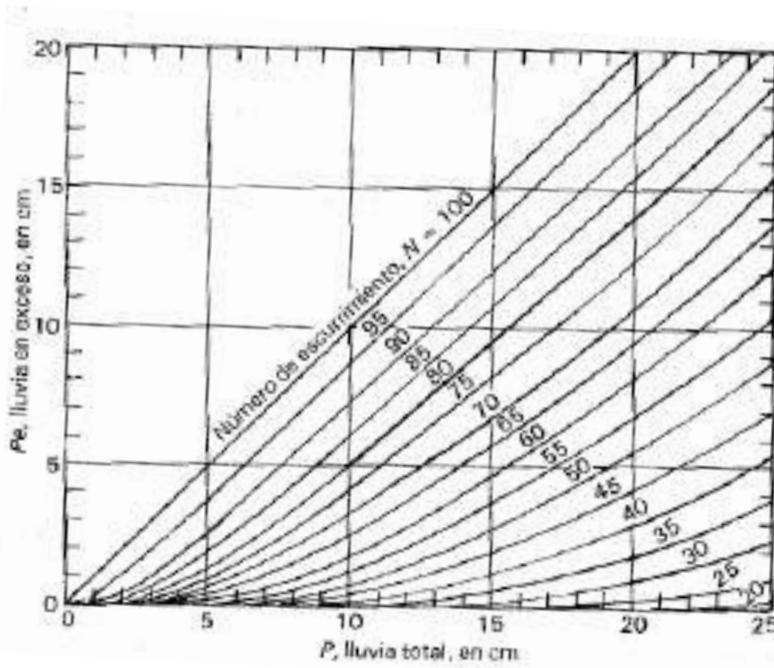


Figura 13. Valores del número de curva. Fuente: Aparicio (1989).

Tabla 7

Valores de Número de Curva

Uso del suelo y cubierta	Tratamiento o método	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivo en hileras	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88

Donde Sr= Hileras rectas, C= Por líneas de nivel, T= Terrazas, C y T= Terrazas a nivel. Fuente: SCS (1973).

(Continuación)

Uso del suelo y cubierta	Tratamiento o método	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo				
			A	B	C	D	
Granos pequeños	C	Buena	65	75	82	86	
	C y T	Mala	66	74	80	82	
	C y T	Buena	62	71	78	81	
	SR	Mala	65	76	84	88	
	SR	Buena	63	75	83	87	
	C	Mala	63	74	82	85	
	C	Buena	61	73	81	84	
	C y T	Mala	61	72	79	82	
	C y T	Buena	59	70	78	81	
Legumbres tupidas o rotación de pradera	SR	Mala	66	77	85	89	
	SR	Buena	58	72	81	85	
	C	Mala	64	75	83	85	
	C	Buena	55	69	78	83	
	C y T	Mala	63	73	80	83	
	C y T	Buena	51	67	76	80	
	Pradera o pastizal		Mala	68	79	86	89
			Regular	49	69	79	84
			Buena	39	61	74	80
C		Mala	47	67	81	88	
C		Regular	25	59	75	83	
C		Buena	6	35	70	79	
Pradera permeable				30	58	71	78
		Bosques (Lotes de bosque)	Mala	45	66	77	83
			Regular	36	60	73	79
Buena	25		55	70	77		
Cascos ranchos			59	74	82	86	
Caminos revestidos			72	82	87	89	
Pavimentos			74	84	90	92	

Donde Sr= Hileras rectas, C= Por líneas de nivel, T= Terrazas, C y T= Terrazas a nivel. Fuente: SCS (1973).

Tabla 8

Textura del suelo para los diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo	Textura del Suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla: suelos profundos con bajo potencial de escorrentía y muy permeables
B	Arenas finas y limos: suelos permeables poco profundos cuyo nivel de escorrentía es bajo moderado
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla: suelos impermeables muy profundos
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub-horizontes de roca sana: suelos muy impermeables.

Fuente: Chow et al. (1994).

1.2.9. Modelamiento hidrológico

En la actualidad, los avances y tendencias en cuanto al desarrollo softwares y sistemas aplicados a la modelación hidrológica, han permitido simular el comportamiento de la escorrentía superficial y subsuperficial resultando factible obtener los caudales en cualquier punto de la red hídrica dentro de una unidad hidrográfica y no únicamente en el punto de descarga u aforo. Sin embargo, la consistencia de la información que genere los modelamientos hidrológicos dependerá siempre de la disponibilidad de los parámetros de entrada al modelo (Ramos, 2013). Es así como, los modelos hidrológicos fueron diseñados con el objetivo de simular la transformación de las precipitaciones a caudales dentro de una unidad hidrográfica ya sea en condiciones naturales o intervenidas (Pascual y Díaz, 2016).

Modelación hidrológica con HEC-HMS

El modelo HEC-HMS es un programa diseñado para procesar información espacial e información meteorológica para convertirlos a escorrentía, simulando el comportamiento hidrológico de una unidad hidrográfica y teniendo en cuenta las características fisiográficas y geomorfológicas (Nanía, 2007). Por tanto, para ejecutar un modelamiento hidrológico es indispensable contar con ciertos parámetros primordiales, tales como: superficie, longitud

de máximo recorrido del cauce, pendientes, tiempo de retardo, y datos meteorológicos (hietogramas de diseño) (Pascual y Díaz, 2016).

1.2.10. Modelamiento hidráulico

Un modelo hidráulico es la representación matemática del análisis de comprensión entre el volumen de agua, velocidades, transporte de sedimentos y la topografía del cauce de un río; además de la interacción del movimiento y nivel del agua con infraestructuras hidráulicas situadas dentro de su cauce. Ello lo convierte en un componente esencial para responder y dar soluciones a los diversos casos relaciones al recurso hídrico, así como simular las avenidas máximas que se produce en un cauce de un río ayudando a prevenir riesgos por inundaciones en zonas urbanas y rurales (López, 2017).

Modelación hidráulica con HEC-RAS

La aplicación de modelación hidráulica ha resultado ser exitosa por la presencia de software de uso libre tal como es HEC-RAS, el cual es utilizado ampliamente en modelamientos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales, flujos de régimen permanente y no permanente, flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto para el estudio de tránsitos de avenidas, transportes de sedimentos y calidad de aguas (Segura y Casasola, 2011). Los parámetros principales para la modelación hidráulica son: geometría de las secciones transversales, datos hidrométricos, pendientes y coeficientes de rugosidad.

Modelación hidráulica en 1D/2D

En la mayoría de los trabajos de investigación de mapeo de inundaciones se han desarrollado usando plataformas hidrodinámicas unidimensional y bidimensional lo que se conoce como 1D y 2D. Los modelos hidráulicos bidimensionales son las tecnologías más requeridas e indispensables para la simulación de inundaciones. Sin embargo, estos modelos presentan la desventaja que para su utilización requiere de datos históricos, sistemas y procesadores (software) muy potentes. En cambio, los modelos unidimensionales son los más utilizados, puesto que generan resultados precisos de cálculo del flujo en los cauces, pero no ayudan en simular desbordamientos de los ríos (Timbe y Willems, 2011).

La aplicación de los modelos en el software HEC-RAS dependerán del objeto de estudio, ya que la iteración de los datos ingresados genera información valiosa para la toma de decisiones (predicción del flujo, minimización de daños producidos por las máximas avenidas (MTC, 2011). Las ecuaciones con que trabaja HEC-RAS dependen del tipo de modelación, una de las ecuaciones con el cual calcula el tirante hidráulico y velocidad del flujo es la ecuación de *Manning* en modelos 1D. A continuación, se presenta la ecuación de *Manning*, extraída del libro Hidráulica de Canales de Villón (2007).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

Q = caudal (m³/s), A = área de la sección (m²), R = radio hidráulico (m²/m), S = pendiente de la línea de energía (m/m), n = coeficiente de rugosidad.

En la Tabla 9 se muestran los coeficientes de rugosidad “n” de Manning.

Tabla 9

Valores de Rugosidad de Manning “n”

Tipo de cauce y descripción	Valor de "n"		
	Mínimo	Normal	Máximo
D. cauces naturales menores (ancho superior, a nivel de crecida, menor que 30 m)			
D1) Cauces en planicie			
1) Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2) Igual que arriba pero más piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
3) Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
4) Igual que arriba, pero algunos pastos y piedras	0.035	0.045	0.050
5) Igual que arriba, niveles más bajos, pendiente y secciones más efectivas	0.040	0.048	0.055

Fuente: Chow *et al.* (1983).

(Continuación)

Tipo de cauce y descripción	Valor de "n"		
	Mínimo	Normal	Máximo
6) Igual que 4, pero más piedras	0.045	0.050	0.060
7) Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8) Tramos con muchos pastos, pozos profundos o recorrido de la crecida con mucha madera o arbustos bajos	0.075	0.100	0.150
D2) Cauces de montaña, sin vegetación en el canal, laderas con pendientes usualmente pronunciadas, árboles y arbustos a lo largo de las laderas y sumergidos para niveles altos			
1) Fondo: Gravas cantos rodado y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2) Cantos rodado y algunas rocas	0.040	0.050	0.070
E) Cauces con planicie de crecidas			
1) Pastos sin arbustos			
* Pastos cortos	0.025	0.030	0.035
* Pastos altos	0.030	0.035	0.050
2) Áreas cultivadas			
* Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
Cultivos maduros alineados	0.025	0.035	0.045
Campo de cultivos maduros	0.030	0.040	0.050
3) Arbustos			
* Arbustos escasos. Muchos pastos	0.035	0.050	0.070
*Pequeños arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
*Pequeños arbustos y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
*Arbustos medianos a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
*Arbustos medianos a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
4) Árboles			
*Sauces densos, en verano y rectos	0.110	0.150	0.200

Fuente: Chow et al. (1983)

(Continuación)

Tipo de cauce y descripción	Valor de "n"		
	Mínimo	Normal	Máximo
*Tierra clara con ramas, sin brotes	0.030	0.040	0.050
* Igual que arriba, pero con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
* Grupos grandes de madera, algunos árboles caídos, poco crecimiento inferior y nivel de la inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
* Igual que arriba, pero con el nivel de inundación alcanzando las ramas	0.100	0.120	0.160
F) Cursos de agua importantes (ancho superior, nivel de inundación, mayor que 30m). Los valores de n son menores que los de los cursos menores de descripción similar, ya que los bancos ofrecen menor resistencia efectiva			
1) Sección regular sin rocas y arbustos	0.025	-	0.060
2) Sección irregular y áspera	0.035	-	0.100

Fuente: Chow et al. (1983)

Otra de las ecuaciones que utiliza HEC-RAS para desarrollar modelos 1D y 2D son las ecuaciones de Saint-Venant (Salas y Govindaraju, 2014). En modelos bidimensionales HEC-RAS generalmente trabaja con las ecuaciones de Onda Difusa 2D, permitiendo el rápido procesamiento de los datos. Asimismo, el esquema numérico que desarrolla HEC-RAS 2D son los Volúmenes Finitos, lo que permite incrementar la estabilización del modelo. Además, los modelos 2D representan mejor las llanuras de inundación en superficies muy extensas y planas donde el flujo toma diferentes direcciones, adopta diversos tirantes y velocidades en distintas direcciones (Cardich, 2017).

- Ecuaciones de Saint-Venant 1D

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \frac{\partial}{\partial x} F = H, \text{ donde } U = \left(\frac{A}{Q} \right); F = \left(\frac{Q}{\frac{Q^2}{A} + gI_1} \right); H = \left(\frac{0}{gI_2 + gA(S_0 - s_f)} \right)$$

- Ecuaciones de Saint-Venant 2D

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = ghS_{0x} - ghS_{fx} + \frac{\tau_{\omega x}}{\rho} + h\zeta v$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2h + \frac{gh^2}{2} \right) = ghS_{0y} - ghS_{fy} + \frac{\tau_{\omega y}}{\rho} + h\zeta u$$

Donde: h , es el nivel del agua (profundidad), u y v , velocidades promediadas en profundidad en dirección a “ x ” y “ y ”, ρ , es la densidad del agua, $\tau_{\omega x}$ y $\tau_{\omega y}$, son los esfuerzos cortantes superficiales por efectos de viento, S_{0x} y S_{0y} , son pendientes de profundidad en direcciones a “ x ” y “ y ” y S_{fx} y S_{fy} , son las pendientes de fricción.

1.2.11. Método de curva IILA-SENAMHI-UNI

Este método fue realizado por la Cooperación Técnica entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el Instituto Italo-Latinoamericano (IILA) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en el año 1983. Quienes realizaron una investigación denominada “Estudio de la hidrología en el Perú”, el cual consistió en desarrollar ecuaciones que permiten calcular la precipitación y las intensidades de lluvia para todas las regiones del Perú. Para lo cual, dividió al país en 7 zonas y 38 subzonas pluviométricas (Figura 14) teniendo en base a la variable del estudio “Climatología”, la altura de precipitación anual, así como las alturas de precipitación máxima diaria. Además, en base al estudio se realizó un conjunto de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) que abarcaron las distintas regiones del Perú (Rendón, 2013). Para estudios hidrológico donde es necesario el cálculo de precipitaciones e intensidades de diseño con duración menores a 24 horas; tanto la Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano y el MTC mediante el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje recomiendan el uso de la metodología del IILA

– SENAMHI – UNI. Puesto que ha dado buenos resultados y se ajusta muy bien en las zonas con mayor presencia de estaciones meteorológicas.

Determinación de los coeficientes regionales de precipitación

$$\frac{P_t}{P_{24h}} = \left(\frac{(t + b)}{24} \right)^n, \text{ Para } t \leq 3 \text{ horas de duración de lluvia}$$

$$\frac{P_t}{P_{24h}} = \left(\frac{(t)}{24} \right)^n, \text{ Para } 3 \leq t \leq 24 \text{ horas de duración de lluvia}$$

Determinación de los coeficientes regionales de intensidad de precipitación

$$\frac{I_t}{I_{24h}} = \left(\frac{(t + b)}{24} \right)^{n-1}, \text{ Para } t \leq 3 \text{ horas de duración de lluvia}$$

$$\frac{I_t}{I_{24h}} = \left(\frac{(t)}{24} \right)^{n-1}, \text{ Para } 3 \leq t \leq 24 \text{ horas de duración de lluvia}$$

En donde: P_t / P_{24h} = coeficiente regional de precipitación, t = duración (hora), b = parámetro (hora), n = parámetro de duración (adimensional), I_t / I_{24h} = coeficiente regional de intensidad.

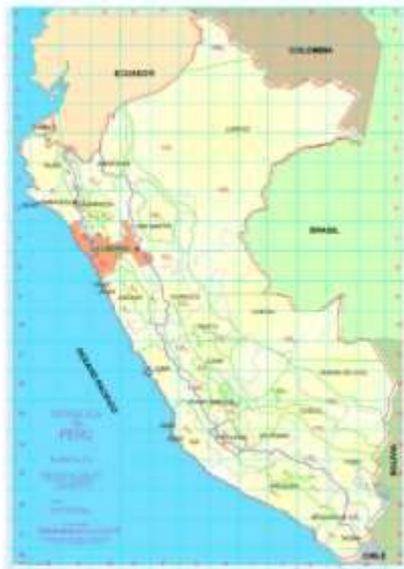


Figura 14. Mapa de Perú, Regiones hidrológicas. Fuente: IILA-SENAMHI-UNI (1983).

En la tabla 10 se muestran los valores de los parámetros a y n para cada punto de las subzonas. Mientras que el parámetro b se define en función a cada región, donde para la región selva la duración es de 0.2 horas.

Tabla 10

Valores de las variables a y n en unión con K'

Sub zona	Estación	N° total de estaciones	Valor de n	Valor de a
123 ₁	321-385	2	0.357	32.2
123 ₃	384-787-805	3	0.405	a = 37.85 - 0.0083Y
123 ₁₃	244-193	2	0.432	
123 ₅	850-903	2	0.353	9.2
123 ₆	840-913-918-958	4	0.38	11.0
123 ₈	654-674-679-709-713- 714-732-745-752	9	0.232	14.0
123 ₉	769	1	0.242	12.1
123 ₁₀	446-557-594-653-672- 696-708-711-712-715- 717-724-757-773	14	0.254	a = 3.01 + 0.0025Y
123 ₁₁	508-667-719-750-771	5	0.286	a = 0.46 + 0.0023Y
5a ₂	935-968	2	0.301	a = 14.1 - 0.078 DC
5a ₅	559	1	0.303	a = -2.6 + 0.0031Y
5a ₁₀	248	1	0.434	a = 5.80 + 0.0009Y

Fuente: IILA-SENAMHI-UNI (1983).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la Investigación

Esta investigación es de tipo aplicada con un nivel de investigación estadística descriptiva. Presenta un enfoque cuantitativo, el diseño de la investigación es transeccional tipo correlacional, porque hace relevancia sobre las relaciones de variables y la intervención utilizada es indirecta (Hernández *et al.*, 2010). Es decir, está basada en información pluviométrica de registros históricos, los cuales fueron analizados mediante cálculos hidrológicos y estadísticos aplicados a la hidrología, herramienta SIG y softwares de modelación hidrológica e hidráulica con periodos de retornos diferentes.

2.1.1. Lugar y Fecha

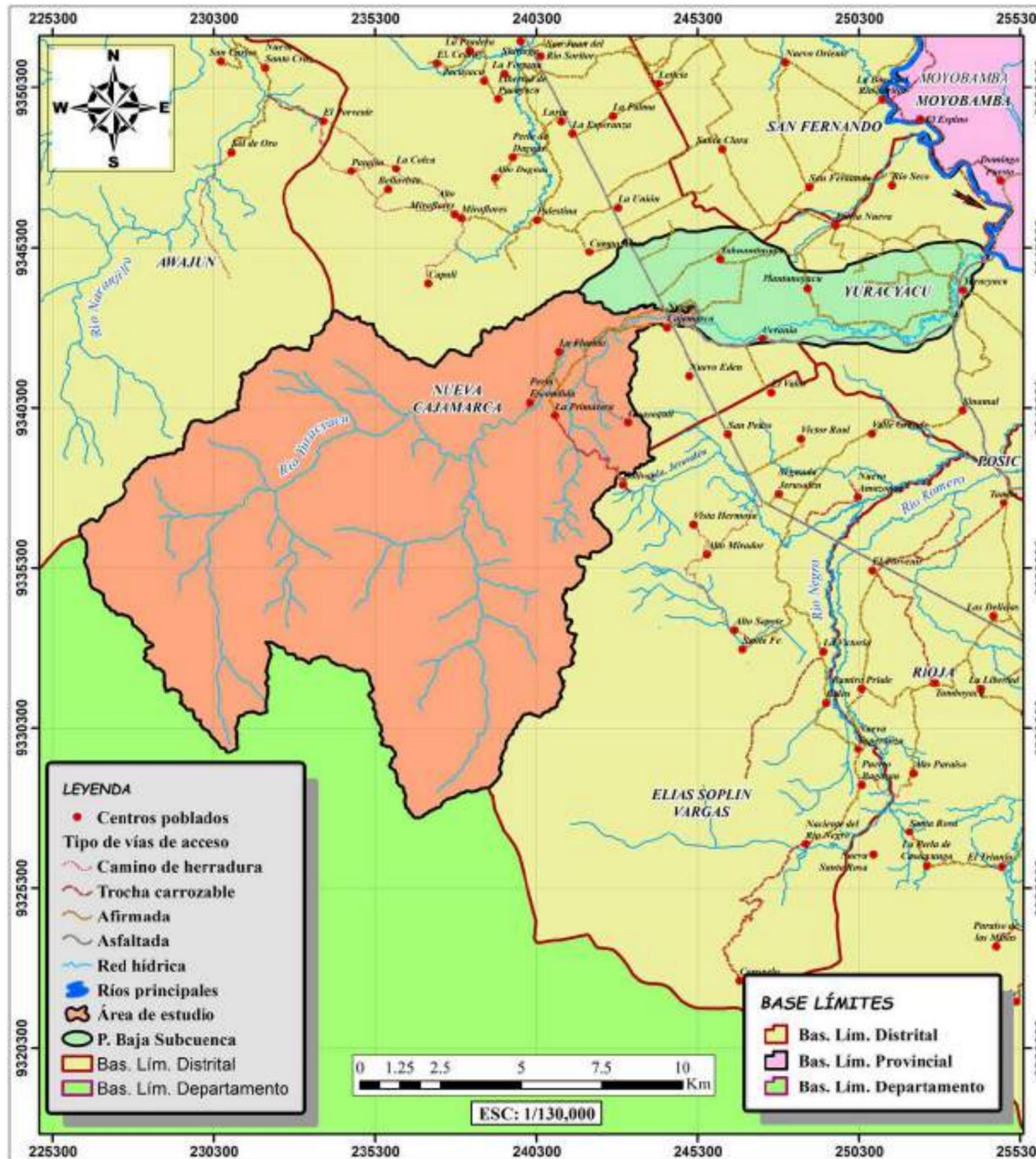
La unidad hidrográfica del río Yuracyacu se encuentra ubicado políticamente en el distrito de Nueva Cajamarca, departamento de San Martín (Figura 15). El ámbito de estudio se ubica en la parte media de la subcuenca río Yuracyacu, cuya ubicación se presenta en la Tabla 11, que inicia en la bocatoma canal Michuco (Figura 16) y culmina en el puente vía de evitamiento e hidrográficamente se encuentra en la cuenca del río Mayo (Apéndice 30). El tiempo de ejecución de la investigación fue entre los meses de enero a julio del 2020. Cabe mencionar, que el trabajo de campo se realizó entre los meses de enero y febrero.

Tabla 11

Coordenadas del área de estudio

Ubicación del Proyecto			
Lugar	Coordenadas UTM		Progresiva (km)
	Este (m)	Norte (m)	
Bocatoma canal Michuco	243329.820	9342984.080	0+000
Puente vía de evitamiento	245316.150	9343052.270	2+400

Fuente: Elaboración propia.



LÍMITES DE UBICACIÓN POLÍTICA SUBCUENCA YURACYACU

LÍMITE	DISTRITO	PROVINCIA	REGIÓN
NORTE	NUEVA CAJAMARCA	RIOJA	SAN MARTÍN
	SAN FERNANDO		
NOR-ESTE	YURACYACU	RIOJA	SAN MARTÍN
ESTE	MOYOBAMBA		
SUB-ESTE	YURACYACU	RIOJA	SAN MARTÍN
SUR	ELIAS SOPLÍN VARGAS		
SUB-OESTE	VISTA ALICRE	RODRÍGUEZ DE MENDOZA	AMAZONAS
	VISTA ALICRE		
OESTE	AWAJUN	RIOJA	SAN MARTÍN
NOR-OESTE	AWAJUN		



UCSS UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
 FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA
 Programa de Estudio de Ingeniería Ambiental

TESIS: "Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín"

MAPA: **LÍMITE TERRITORIAL POLÍTICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO YURACYACU**

AUTORES: Bach. José Esaú Medina Corrales Bach. Fran Kevin Blas Sinarahua	DEPARTAMENTO : SAN MARTÍN PROVINCIA : RIOJA DISTRITO : NUEVA CAJAMARCA	LÁMINA 01 Nº 01 de 23
DATUM: WGS84	ZONA: 18 - SUR	FECHA: MAY-2020
ESCALA: INDICADA		

Figura 15. Mapa de límite territorial político de la subcuenca del río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

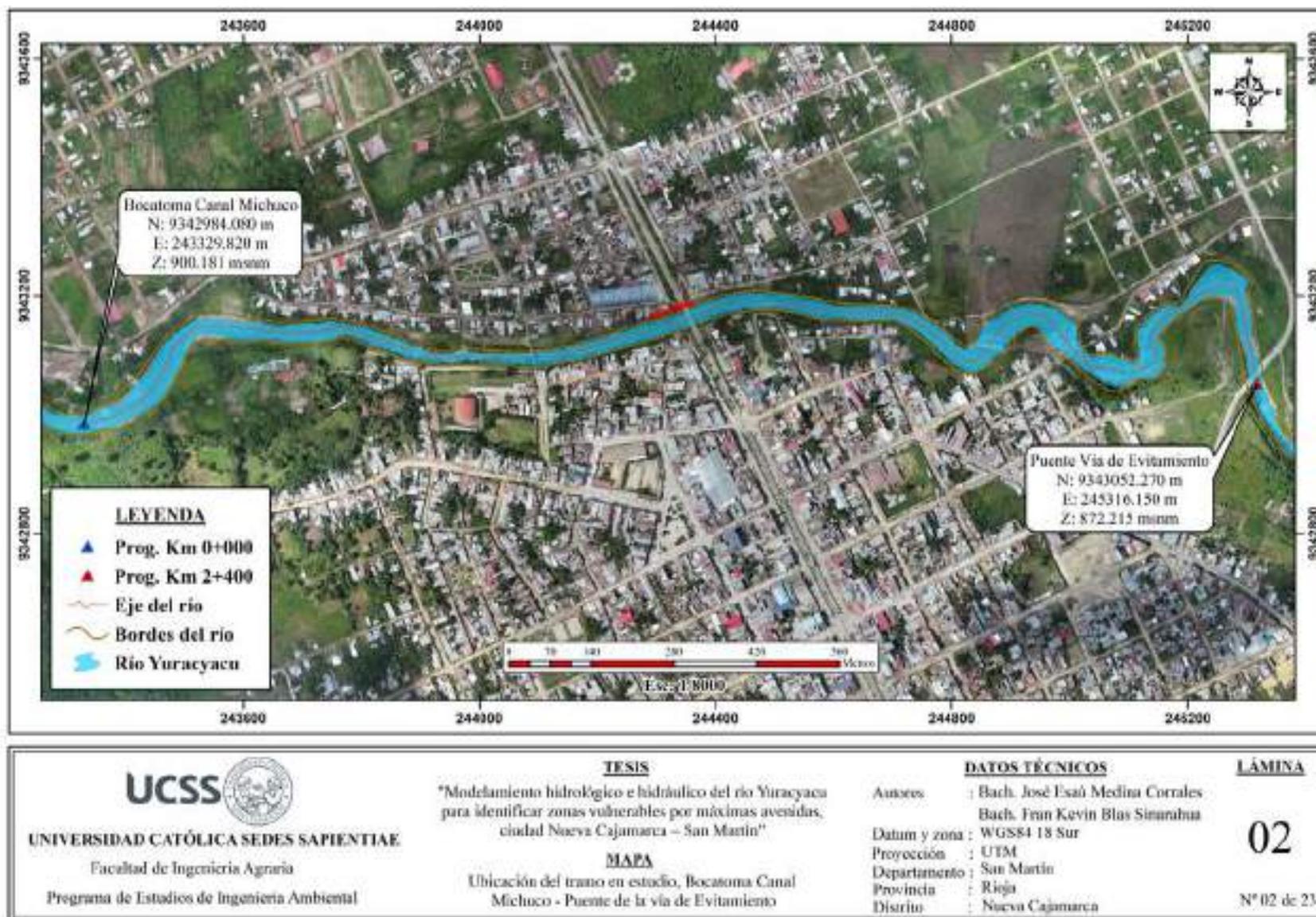


Figura 16. Mapa de ubicación del tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Materiales

Los equipos y softwares utilizados para la ejecución de esta investigación fueron:

Equipos topográficos

- Drone PHANTOM 4 PRO
- GNSS Diferencial modelo GPS GRX2

Equipos de cómputo

- Laptop Toshiba Core i5 procesador 64 bits
- Disco duro de 1 TB

Softwares

- AutoCAD Civil 3D 2020
- HEC-HMS 4.4
- HEC-RAS 5.0.7
- ArcGIS 10.5
- QGIS 3.10
- HidroEsta 2
- GRASS 7.8.2
- ENVI 5.3
- ERDAS IMAGINE 2014
- RStudio 3.6.2
- Google Earth Pro, SASPlanet
- Extensión HEC-GeoHMS
- Microsoft Word y Microsoft Excel 2016

2.1.3. Población y Muestra

Población: La población corresponde a la parte alta y media de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu. El área de toda la cuenca es de 21 563.38 ha y una longitud de cauce

principal de 35 km (Presidencia de Consejo de Ministros [PCM] y Gobierno Regional de San Martín [GORESAM], 2016).

Muestra: La muestra es toda la zona urbana de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu de la ciudad de Nueva Cajamarca, concerniente entre la Bocatoma canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento, en un tramo de 2+400 km de longitud.

2.1.4. Técnicas e Instrumentos

La técnica utilizada para recolección de información fue observacional (observación de campo) (Ñaupas *et al.*, 2014). Los instrumentos de investigación fueron:

- Imágenes satelitales sensor Landsat 8
- Modelo Digital de Elevación (DEM)
- Modelo Digital de Superficie (DSM)
- Data de Suelos Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) San Martín
- Equipos de topografía
- Equipos de fotogrametría
- Cartografía Digital del Instituto Geográfico Nacional del Perú
- Data histórica de precipitación máxima 24 horas de la estación Rioja Naranjillo del SENAMHI.

2.1.5. Descripción de la investigación

Recopilación de información

Se descargó información geoespacial del área de estudio la cual se detalla a continuación:

- Dos imágenes satelitales del sensor Landsat 8 desde el portal Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS. La imagen 1 descargada estuvo comprendida entre el Path 9 y el Row 64 y la imagen 2 entre el Path 8 y el Row 64, ambas imágenes con la siguiente resolución: Espacial 30 m, temporal 16 días, radiométrica 8 bits/píxel, espectral de 8 bandas y con un ancho de barrido de 173 km.

- El Modelo Digital de Elevación fue obtenido del portal web Earthdata NASA de Alaska Satellite Facility de la Universidad de Alaska Fairbanks (UAF) con una resolución espacial de 12.5 m.

- Un Modelo Digital de Superficie (MDS) de 30 m de resolución espacial, del satélite “DAICHI” (ALOS) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA).

- La información de cartografía digital tales como shapefiles de los límites departamentales, provinciales y distritales se descargaron de la web del Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN).

- Se recopiló información cartográfica digital de suelos de la Zonificación Ecológica y Económica del Alto Mayo – San Martín.

Se adquirió información meteorológica la cual se detalla a continuación:

- La información meteorológica corresponde a los registros históricos de la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones de Rioja y Naranjillo. Los datos pluviométricos se obtuvieron de la oficina central del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Búsqueda de información científica lo cual se detalla a continuación:

- Se revisó información documentada de forma física y virtual de antecedentes y estudios en relación con el estudio de investigación. La fuente de la información fueron las siguientes plataformas: Repositorios de Universidades, entidades del estado (MINAM, ANA, INDECI), revistas científicas y libros en físico.

Levantamiento topográfico y fotogramétrico

- Se realizó un levantamiento topográfico desde la Bocatoma canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento con una longitud de 2.4 km. El levantamiento topográfico se realizó mediante un GPS Diferencial GNSS Diferencial GRX2 (Apéndice 33 y 34). Además, la topografía se georreferenció al punto geodésico del ANA, ubicado en el centro de la plaza de la cultura de Nueva Cajamarca en las coordenadas N: 9 342 825.297 m, E: 244 334.186 m, Z: 884.796 m (Apéndice 41).
- También se realizó el levantamiento fotogramétrico comprendida en el área de estudio de la zona urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca. La ortofoto obtenida del levantamiento fotogramétrico fue mediante de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) Drone PHANTOM 4 PRO (ver Apéndice 35).

En cuanto al levantamiento topográfico y fotogramétrico se contó con los servicios de la empresa TROYA INGENIEROS E.I.R.L, con equipos de alta precisión y calibración certificada (ver Apéndice 39 y 40).

Trabajo en gabinete y procesamiento de datos

El proceso de delimitación y obtención de parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu se basó en la información de Villón (2002), Aparicio (1899), y Reyes (1992).

Delimitación de la unidad hidrográfica

La delimitación de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu se realizó mediante geoprocesamiento con las herramientas de GRASS 7.8.2 en el software QGIS 3.10. Para la delimitación se utilizó un Modelo Digital de Elevación de 12.5 m de resolución espacial del Satélite Alos Palsar. Fue indispensable realizar la corrección de picos, depresiones, valores atípicos o eliminar áreas problemáticas del DEM. Sin embargo, para una mejor representación y delimitación de las corrientes de drenaje, se corrigió sobre una imagen

satelital de alta resolución utilizando el Plugins > QuickMapServices en QGIS con cartografía IGN. En el Apéndice 37 se muestra la delimitación de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu.

Cálculo de parámetros de forma

Los parámetros de forma de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, se determinaron con las fórmulas descritas en el marco teórico a partir del área, perímetro y longitud del cauce principal.

Cálculo de parámetros de relieve

Curva hipsométrica

Para construir la curva hipsométrica se extrajeron áreas parciales de cada rango de altitud, a partir de un DEM con la herramienta de GRASS. Para este caso los intervalos se definieron de cada 200 m, sin embargo, en los extremos este valor es diferente. En la Tabla 12 se muestran los valores de áreas situados en los intervalos de elevación.

Tabla 12

Proceso de obtención de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

Altitud (msnm) (1)	Áreas parciales (km²) (2)	Áreas acumuladas (km²) (3)	Áreas de sobre las altitudes (km²) (4)	% Del total (5)	% Del total que queda sobre la altitud (6)
866	0.000	0	171.032	0.00	100
1000	9.772	9.772	161.260	5.714	94.286
1200	10.261	20.033	150.999	5.999	88.287
1400	15.817	35.849	135.182	9.248	79.039
1600	18.439	54.288	116.744	10.781	68.259
1800	22.300	76.588	94.444	13.039	55.220
2000	26.012	102.600	68.431	15.209	40.011

Fuente: Elaboración Propia

(Continuación)

Altitud (m s.n.m.) (1)	Áreas parciales (km²) (2)	Áreas acumuladas (km²) (3)	Áreas de sobre las altitudes (km²) (4)	% Del total (5)	% Del total que queda sobre la altitud (6)
2200	20.482	123.083	47.949	11.976	28.035
2400	14.103	137.185	33.846	8.246	19.790
2600	9.329	146.514	24.517	5.455	14.335
2800	7.264	153.779	17.253	4.247	10.088
3000	7.279	161.058	9.974	4.256	5.832
3200	4.829	165.887	5.145	2.824	3.008
3400	4.892	170.779	0.252	2.860	0.148
3600	0.239	171.019	0.013	0.140	0.008
3644	0.013	171.032	0.000	0.008	0.000
Total	171.032			100.00	

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las áreas parciales se generó la curva hipsométrica con la finalidad de conocer la evolución de la subcuenca del río Yuracyacu. Además, se realizó una medida cuantitativa del área que yace bajo la curva. El valor del área se determinó a partir de la integral hipsométrica, cuyo parámetro está asociado con la edad característica de la subcuenca (Apéndice 1).

Frecuencia de altitudes

Las frecuencias de altitudes se grafican a partir de los rangos de altitud y el área parcial en % de la tabla 14. En el Apéndice 2 se muestra la gráfica de frecuencia de altitudes.

Altitudes características

- **Altitud media:** El procedimiento para la obtención de altitud media de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu se presenta en la Tabla 13. Por tanto, la altitud media es

el cociente de la suma total de multiplicar el área de cada rango de elevación, por la cota promedio dividido entre el área total de drenaje.

Tabla 13

Obtención de la altitud media

Cota (m s.n.m.)			Área (km ²)	Área * Cota promedio
Mínima	Máxima	Promedio		
866	1000	933	9.772	9117.451
1000	1200	1100	10.261	11286.688
1200	1400	1300	15.817	20561.531
1400	1600	1500	18.439	27657.891
1600	1800	1700	22.300	37910.266
1800	2000	1900	26.012	49423.427
2000	2200	2100	20.482	43012.922
2200	2400	2300	14.103	32435.750
2400	2600	2500	9.329	23322.656
2600	2800	2700	7.264	19613.391
2800	3000	2900	7.279	21109.734
3000	3200	3100	4.829	14970.578
3200	3400	3300	4.892	16144.219
3400	3600	3500	0.239	837.813
3600	3644	3622	0.013	47.539
Total			171.032	327451.854

Fuente: Elaboración propia.

- **Altitud de frecuencia media:** Para determinar la altitud de frecuencia media se realiza un pronóstico del 50 %, correspondiente al punto de la abscisa media de la frecuencia de altitudes.

- **Altitud más frecuente:** La altitud más frecuente se determinó a partir del valor máximo de % de área representado en la gráfica de frecuencia de altitudes.

- **Desnivel de altitud (ΔH):** Se obtuvo a partir de la diferencia de la cota máxima y mínima de la subcuenca del río Yuracyacu.

Índice de pendiente

Este parámetro se obtuvo a partir de las áreas parciales, rangos de altitud máxima, mínima y diferencia de las mismas (Tabla 14).

Tabla 14

Índice de pendiente de la unidad hidrográfica de río Yuracyacu

Cota (m s.n.m)		Dif. Altura (km) (1)	Área (km ²)	Cálculos	
Mínima	Máxima			(1) * bi	$\sqrt{(1) * bi}$
866	1000	0.13	9.772	0.0077	0.0875
1000	1200	0.20	10.261	0.0120	0.1095
1200	1400	0.20	15.817	0.0185	0.1360
1400	1600	0.20	18.439	0.0216	0.1468
1600	1800	0.20	22.300	0.0261	0.1615
1800	2000	0.20	26.012	0.0304	0.1744
2000	2200	0.20	20.482	0.0240	0.1548
2200	2400	0.20	14.103	0.0165	0.1284
2400	2600	0.20	9.329	0.0109	0.1044
2600	2800	0.20	7.264	0.0085	0.0922
2800	3000	0.20	7.279	0.0085	0.0923
3000	3200	0.20	4.829	0.0056	0.0751
3200	3400	0.20	4.892	0.0057	0.0756
3400	3600	0.20	0.239	0.0003	0.0167
3600	3644	0.04	0.013	0.0000	0.0018
Total			171.032		1.5572

Fuente: Elaboración Propia.

Pendiente

- **Pendiente media de la cuenca (Criterio rectángulo equivalente):** Este parámetro se obtuvo a partir de la diferencia de altitud de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu entre la longitud del lado mayor del rectángulo equivalente “L”.

- **Pendiente media de la cuenca (Criterio topográfico):** Para determinar la pendiente media por el criterio topográfico, fue necesario generar un mapa de pendiente en % (Apéndice 38), lo que se logró en el software QGIS a partir de un DEM del Alos Palsar de 12.5 m de resolución espacial. Posteriormente, se realizó una reclasificación de pendientes (Tabla 15) según el D.S. N° 017-2009-AG. Por tanto, la pendiente media se determinó a partir de suma de total de área parcial, multiplicado al rango de pendiente promedio y dividido del área total de la unidad hidrográfica del río Yurcyacu.

Tabla 15

Obtención de la Pendiente media (criterio topográfico)

Rango de pendiente	Pendiente	Área (km²)	Producto
(%)	Promedio (%)	(2)	(1) *(2)
	(1)		
0	2	1.0	4.75
2	4	3.0	4.43
4	8	6.0	26.64
8	15	11.5	87.38
15	25	20.0	293.96
25	50	37.5	2200.15
50	75	62.5	2912.59
> 75	87.5	32.80	2870.05
Total		171.03	8399.95

Fuente: Elaboración Propia.

- **Pendiente media de la cuenca (Criterio Alvord)**

Para determinar la pendiente media por el criterio de Alvord se generó curvas de nivel equidistantes de cada 200 m, siendo este valor diferente en los extremos (Apéndice 37).

Asimismo, se calculó la longitud de las curvas de nivel de acuerdo con los rangos de elevación considerado “*li*” y el área parcial situada entre dichos intervalos de altitud “*ai*” (Tabla 16).

Tabla 16

Pendiente media (criterio de Alvord)

Cotas (m.s.n.m.)		Cálculos				
Mínima	Máxima	ai (km ²)	li (km)	Wi	Si	Si*ai
866	1000	9.772	17.149	0.570	0.235	2.298
1000	1200	10.261	26.634	0.385	0.519	5.327
1200	1400	15.817	41.057	0.385	0.519	8.211
1400	1600	18.439	48.683	0.379	0.528	9.737
1600	1800	22.300	66.190	0.337	0.594	13.238
1800	2000	26.012	60.231	0.432	0.463	12.046
2000	2200	20.482	51.745	0.396	0.505	10.349
2200	2400	14.103	41.424	0.340	0.587	8.285
2400	2600	9.329	29.394	0.317	0.630	5.879
2600	2800	7.264	29.287	0.248	0.806	5.857
2800	3000	7.279	20.400	0.357	0.561	4.080
3000	3200	4.829	12.227	0.395	0.506	2.445
3200	3400	4.892	3.399	1.439	0.139	0.680
3400	3600	0.239	0.546	0.438	0.456	0.109
3600	3644	0.013	0.030	0.442	0.100	0.001
Total	171.032	448.396			88.543	

Fuente: Elaboración Propia.

Drenaje

Longitud del cauce más largo: Realizando un análisis previo de la red hídrica se eligió el cauce con mayor recorrido, desde la cota máxima hasta el punto de interés o salida de la unidad Hidrográfica del río Yuracyacu. En el Apéndice 3 se muestra el perfil longitudinal del cauce principal del río Yuracyacu.

Pendiente media del cauce principal

Pendiente uniforme. La pendiente media del cauce principal se calculó dividiendo el desnivel de unidad hidrográfica entre la longitud del cauce más largo.

Ecuación de Taylor y Schwarz. Para la obtención de la pendiente media fue indispensable dividir la corriente más larga en tramos de acuerdo con los intervalos de cada curva de nivel, donde la suma de todos los tramos es la longitud total del cauce principal. La Tabla 17 muestra los datos respectivos para el cálculo de la pendiente media por el método de Taylor y Schwarz.

Tabla 17

Pendiente media con la ecuación de Taylor y Schwarz

Cota (m s.n.m.)		Cálculos			
Mínima (1)	Máxima (2)	Dif. Altura (km) (3)	Longitud (km) (4)	S (%) (5)	$1/\sqrt{S}$ (6)
866	1000	0.13	7.09	1.89	0.7272
1000	1200	0.20	6.39	3.13	0.5655
1200	1400	0.20	3.89	5.15	0.4408
1400	1600	0.20	2.71	7.39	0.3680
1600	1800	0.20	3.08	6.50	0.3922
1800	2000	0.20	1.16	17.18	0.2413
2000	2200	0.20	1.78	11.22	0.2986
2200	2400	0.20	0.94	21.35	0.2164
2400	2600	0.20	0.45	44.58	0.1498
2600	2800	0.20	0.93	21.48	0.2158
2800	3000	0.20	0.68	29.53	0.1840
3000	3200	0.20	0.38	52.21	0.1384
3200	3340	0.14	0.36	39.15	0.1598
	Total		29.83		4.0976

Fuente: Elaboración propia.

Red de drenaje

- Orden de corrientes

El orden de las corrientes se hubiese obtenido fácilmente con las herramientas de SAGA en QGIS. Sin embargo, como ya se había digitalizado y ya se tenía la capa de vectorial de la red hídrica, se procedió a jerarquizar las corrientes según el sistema de Strahler.

- Longitud de corrientes

El cálculo de la longitud de las corrientes se obtuvo en QGIS, a partir de un proceso en la tabla de atributos, creando un campo numérico en mismo archivo vector de la red hídrica. Posteriormente, se solicitó un reporte de la suma de longitud de cursos de agua, pero categorizado al orden que pertenecían cada uno de ellos.

- Densidad de drenaje (D_d)

La densidad de drenaje se determinó a partir de la división de la longitud total de corrientes naturales (perennes e intermitentes), entre el área total de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu en km^2 .

- Frecuencia de ríos (F_r)

El parámetro de frecuencia de ríos o drenaje se obtuvo dividiendo el número total de corrientes tanto perennes o intermitentes, entre el área total de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu en km^2 . El número total de cursos de agua se determinó a partir de la clasificación por orden de corrientes, realizada en un anterior proceso.

- Extensión media de escurrimiento superficial (E_s)

Para calcular la extensión media de escurrimiento superficial, se dividió el área total de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu en km^2 , entre el producto de cuatro veces la longitud total de la red hídrica en km.

- Relación de bifurcación (R_b)

Este parámetro de bifurcación corresponde al cociente del número de tributarios de un orden dado, entre la cantidad de corriente de orden inmediatamente superior.

- Coeficiente de torrencialidad (C_t)

Para determinar el coeficiente de torrencialidad, se realizó una división del número total de corrientes de primer orden, entre el área total de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu en (km²).

Curva número

La metodología aplicada para la obtención de los valores de Curva Número se consideró como referencia al Manual Técnico Procesamiento para Clasificación de Coberturas a partir de Imágenes Satelitales (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2017) y al documento Generación del Mapa Temático de Curva Número (CN) (ANA, 2015). La determinación de la curva número se realizó a través de la interpolación entre los grupos hidrológicos del suelo y la clasificación de las coberturas que compone el área de estudio.

Preprocesamiento de imágenes satelitales

El cálculo del área de los diferentes tipos de coberturas de la superficie en estudio se realizó mediante aplicaciones de softwares SIG y teledetección. Por lo tanto, el análisis e identificación de las coberturas se realizó mediante una clasificación supervisada por lo que fue indispensable contar con información de imágenes satelitales.

- Calibración radiométrica (Radiometric Calibration). Para extraer información de las imágenes satelitales obtenidas mediante el servidor de la USGS, se tienen que realizar ciertos ajustes de corrección ya que la información descargada son datos crudos. Por lo tanto, para identificar los índices espectrales se tienen que convertir los Niveles Digitales (ND) a valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre. La transformación de ND a radiancia toma el nombre de corrección radiométrica y esto se realiza mediante las

herramientas de ENVI. En la Figura 17 se muestra el proceso de calibración radiométrica en el software ENVI.



Figura 17. Proceso de calibración radiométrica (a, b y c). Fuente: Elaboración propia.

- Corrección atmosférica (FLAASH Correction Atmospheric)

La corrección atmosférica consiste en eliminar las interferencias que presente la imagen por el efecto de presencia de brumas, vapor de agua, aerosoles, entre otros, lo que impide la estimación verdadera de la reflectancia de superficie. El análisis atmosférico rápido de hipercubos espectrales de línea de visión (FLAASH), recupera la reflectancia espectral de radiación en imágenes multiespectral e hiperespectral. Para determinar la configuración de la corrección atmosférica FLAASH, el archivo de entrada es la imagen en radiancia, luego se define: el factor de escala para todas las bandas, la ubicación del centro de la escena, el tipo de sensor, la altitud del sensor, la elevación del suelo, la resolución espacial de la imagen, fecha y hora de la toma de la imagen, el modelo atmosférico y de aerosol y la visibilidad inicial de la superficie. En la Figura 18 se muestra la configuración para la corrección atmosférica de la imagen en radiancia.

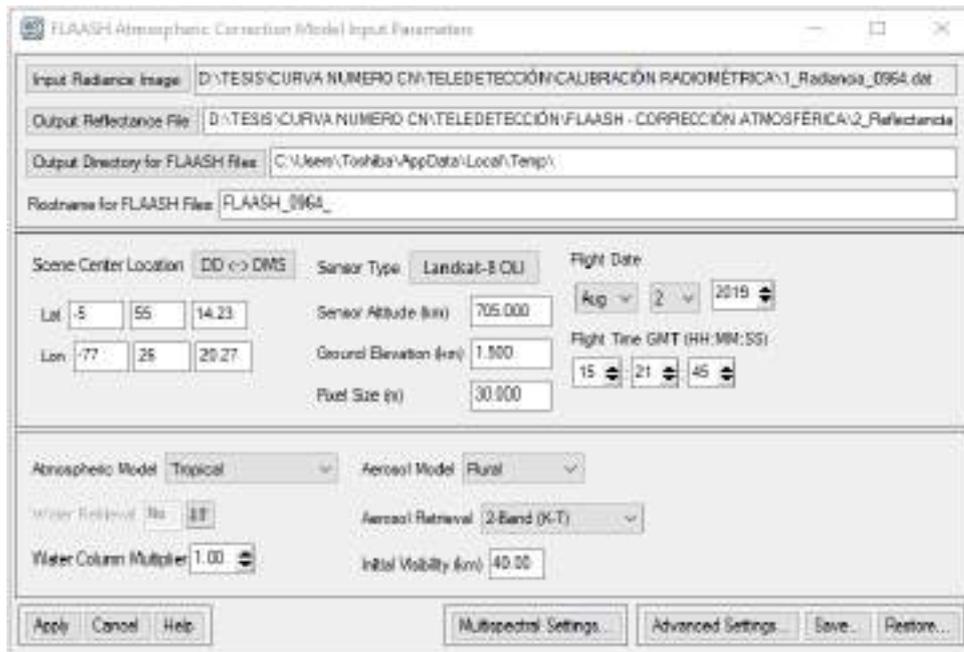


Figura 18. Configuración para la corrección atmosférica de la imagen en radiancia.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber obtenido la imagen en reflectancia, resultado del proceso de corrección atmosférica, es necesario reescalonar los valores de reflectancia entre 0 y 1 ya que, los valores de reflectividad se obtuvieron en un rango de 0 y 10000. El reescalonamiento de los valores de reflectancia se realizó aplicando la siguiente fórmula matemática:

$$(b1 \text{ le } 0) * 0 + (b1 \text{ ge } 10000) * 1 + (b1 \text{ gt } 0 \text{ and } b1 \text{ lt } 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

Donde se especifica que los valores de reflectancia menores a 0 asumen un valor de 0; para los valores superiores a 10000 el valor será 1 y para los valores entre el rango de 0 y 10000 los valores se ajustan entre 0 y 1. La aplicación de la fórmula obedece a expresiones representadas por sus iniciales en inglés, donde: número de banda (*bI*), menor o igual (*le*), mayor o igual (*ge*), mayor que (*gt*), menor que (*lt*). El resultado de proceso de corrección atmosférica es una imagen corregida y representada con valores de reflectancia de diferentes coberturas de la superficie terrestre. En la Figura 19 se muestra la aplicación de la herramienta Band Math en el software ENVI Clasic 5.3.

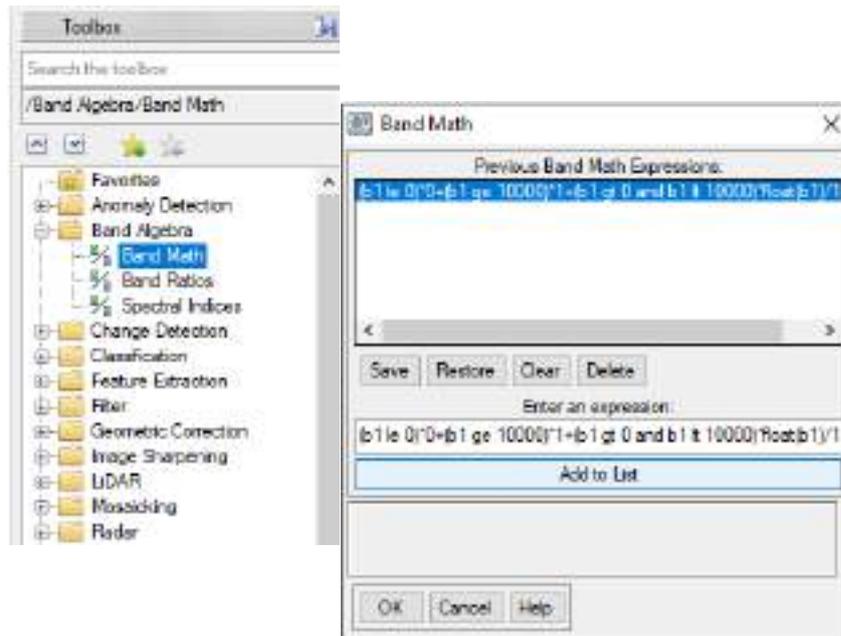


Figura 19. Aplicación de la fórmula matemática en Band Math. Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de imágenes satelitales

- Muestreo para la clasificación supervisada

La identificación de las diversas coberturas se realizó mediante firmas espectrales, que de acuerdo con el valor del perfil espectral y en función de la conjugación de bandas de la imagen, permite el reconocimiento de las coberturas.

Las clases del tipo de coberturas están en función al interés del estudio. Por lo tanto, para el proyecto de la imagen corregida se ha extraído muestras de bosque, pastos, cultivos, suelos sin vegetación, agua y zonas urbanas. En el Apéndice 5 se muestra la imagen en el entorno de ENVI 5.3 con la superposición de muestras en cada cobertura.

Los valores de reflectancia de las muestras se extraen mediante un script con el software ENVI Clasic 5.3 + IDL 8.5, el cual agrupa las clases en un formato con extensión (.dat) con los valores de reflectancia, de acuerdo con el número de bandas de la imagen, para tal proceso se ingresó la imagen de reflectancia. En el Apéndice 6 (a) se muestra la

selección de las muestras de coberturas y en la imagen (b) se presenta aplicación del scrip en ENVI Clasic 5.3 + IDL 8.5, para la extracción del valor de reflectancia de las muestras.

Una vez que los valores de reflectancia han sido extraídos de las muestras, mediante un código de la librería de RStudio se lee el archivo generado con el script en ENVI Clasic 5.3 + IDL 8.5. Iniciado un nuevo proyecto en RStudio y activada la librería “Tree” se procede a abrir el archivo que contiene los valores de las muestras. En el Apéndice 4 se presenta la librería “Tree” de RStudio.

La librería “Tree” clasifica a las muestras en un árbol de decisión compuesto por nodos, donde cada nodo decide la banda y el valor de reflectancia de la imagen. El árbol de decisión creado con el código Tree, genera valores de reflectancia y elige las bandas según las coberturas en análisis. El árbol de decisión se lleva al software ENVI Clasic 5.3 + IDL 8.5 y se construye el mismo árbol con los mismos valores, creado en el lenguaje de programación de RStudio. En el Apéndice 7 se muestra el árbol de decisión creado en ENVI Clasic 5.3 + IDL 8.5.

Al completar la creación del árbol de decisión, se debe indicar las variables de entrada para la clasificación. Para este caso se selecciona las bandas consideradas en el árbol de decisión. Terminada la configuración, se ejecuta la corrida del modelo y como resultado se obtiene la clasificación de las coberturas consideradas en el modelo. En el Apéndice 8 se muestra la clasificación supervisada del área de estudio en el software ENVI Clasic 5.3.

Para mejorar el resultado obtenido de la clasificación supervisada, se realizó una corrección de ciertos pixeles que se han clasificado como coberturas propias donde no corresponden. Para la corrección se utilizó herramientas ERDAS IMAGINE, permitiendo el remplazó de pixeles por superficie de coberturas verdaderas. Este proceso se realizó superponiéndose una imagen de alta resolución obtenida con el Software SAS Planet. En el Apéndice 9 se visualiza la aplicación de las herramientas de ERDAS IMAGINE.

Este último proceso, completa el módulo de procesamiento de la imagen satelital, cuyo resultado final es la clasificación supervisada de las clases de coberturas. Además, es un parámetro indispensable para el cálculo de la Curva Número. En la Figura 38 se presenta el mapa de las clases de coberturas, producto de la clasificación supervisada.

- Grupos hidrológicos del suelo

De acuerdo con el Servicio de Conservación de Suelos de los EE. UU, la estimación de la escorrentía a partir de la precipitación, se determina mediante un parámetro denominado Curva Número, el cual depende de las coberturas y el tipo de suelos. En cuanto al tipo de suelos, para el proyecto se ha tomado el estudio de la Zonificación Ecológica y Económica del Alto Mayo (ZEE, 2007), permitiendo elaborar un mapa de tipo de suelo tal como se muestra en el Apéndice 36.

Por tanto, el SCS aplica cierta metodología para la clasificación de los grupos hidrológicos del suelo, realizada en función de la textura (arena, arcilla, limo), y a su vez, con relación al nivel de escorrentía que presenten.

Para ello, el SCS elaboró una tabla donde incluye: usos y cubiertas del suelo, prácticas y/o métodos de cultivos, condiciones hidrológicas y su respectivo valor de CN de acuerdo con el grupo hidrológico al que pertenecen.

Para la asignación, a que grupo hidrológico pertenece el tipo de suelos de la ZEE para la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, se consultó con el especialista en suelos, Ingeniero Carlos Hugo Egoávil de la Cruz del Proyecto Especial Alto Mayo PEAM.

En la Tabla 18 se muestra el tipo de suelos para la subcuenca del río Yuracyacu y el grupo hidrológico al que pertenecen.

Tabla 18

Tipos de suelo Vs Grupo hidrológico de la Subcuenca Yuracyacu

TIPOS DE SUELOS SUBCUENCA YURACYACU	
Descripción	Grupo Hidrológico
Calera I	B
Cerro Amarillo	B
Gravilla - La Florida (60 - 40 %)	B
Nuevo Tambo - Gravilla (60 - 40 %)	B
Valle Grande - Nuevo Tambo (60 - 40 %)	B

Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de facilitar el procedimiento, el SCS reclasificó todos los datos de la Tabla 10 que componen todos los elementos del CN, en cuatro grandes grupos, donde, las clases y usos del suelo de similar característica se asigna a una sola entidad de cobertura. En la Tabla 19 se muestra la reclasificación de los usos de la cubierta.

Tabla 19

Reclasificación de los usos del suelo

Clasificación original de los usos del suelo		Clasificación revisada (reclasificación)	
<i>CN</i>	Descripción	Grupo	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados en espacios abiertos	2	Residencial media
22	Poblados de baja intensidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		

Fuente: SCS (1973)

(Continuación)

Clasificación original de los usos del suelo		Clasificación revisada (reclasificación)	
CN	Descripción	Grupo	Descripción
43	Bosques mixtos	4	Agricultura
31	Tierra infértil		
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Fuente: SCS (1973).

- Determinación de la Curva Número

Para la determinación de los valores de CN, es necesario crear una base de datos con los valores estándar de CN el cual fue establecida por el SCS. Para ello, fue necesario crear una tabla en ArcGIS conteniendo los códigos y la descripción de los usos y coberturas del suelo. Además, en la misma tabla se ingresa los grupos hidrológicos con los valores estándar de CN (Figura 20).



Rowid	OBJECTID	FIELD	LIVALUE	DESCRIP	A	B	C	D
1	1	1	1	Agua	100	100	100	100
2	2	2	2	Residencial Media	57	72	81	86
3	3	3	3	Bosque	38	58	71	75
4	4	4	4	Agricultura	67	77	85	89

Figura 20. Creación de valores estándar de CN. Fuente: Elaboración propia.

Para que se genere el grid de CN es importante dar el formato adecuado para que se reconozcan las variables. Por tanto, el shape obtenido mediante la clasificación supervisada ha disgregado en polígonos específicos de acuerdo con las coberturas y usos del suelo, el cual se interceptó con los tipos de suelos para la asignación del valor de usos

del suelo en función de los cuatro grandes grupos definidos por el SCS. Además, es indispensable determinar al grupo hidrológico al que pertenecen los diversos elementos de coberturas, es decir al grupo que pertenezcan toma el valor de 100 y los demás grupos toman cero. En la figura 21 se muestra la tabla con la adecuada estructura para el cálculo de CN.

ID	Shape	Cobertura	TIPO (SUELO)	LULUSE	PCN	PUN	PNC	PCD	Landuse	LULUSE
0	Polygon	Pastos	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
1	Polygon	Arboles	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
2	Polygon	Río Yareyapico	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
3	Polygon	Río Yareyapico	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
4	Polygon	Río Yareyapico	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
5	Polygon	Río Yareyapico	Cerro Amarillo	4	0	100	0	0	4	0
6	Polygon	Río Yareyapico	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
7	Polygon	Cultivos	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
8	Polygon	Cultivos	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
9	Polygon	Arboles	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
10	Polygon	Agricultura diversa	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
11	Polygon	Agricultura diversa	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
12	Polygon	Agricultura diversa	Gravel - La Florida (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
13	Polygon	Agricultura diversa	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
14	Polygon	Agricultura diversa	Cerro Amarillo	4	0	100	0	0	4	0
15	Polygon	Área urbana	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0
16	Polygon	Área urbana	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
17	Polygon	Área urbana	Gravel - La Florida (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
18	Polygon	Área urbana	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
19	Polygon	Área urbana	Cerro Amarillo	4	0	100	0	0	4	0
20	Polygon	Área urbana	Nuevo Tanco - Gravel (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
21	Polygon	Área urbana	Gravel - La Florida (50 - 40 %)	4	0	100	0	0	4	0
22	Polygon	Pastos	Cubeta	4	0	100	0	0	4	0

Figura 21. Tabla de valores estándar de CN. Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de CN se realizó mediante la extensión HEC-GeoHMS en ArcGIS, donde los parámetros de entrada son: el DEM corregido, los usos del suelo y la tabla con la base de datos, como se muestra en la Figura 22. Finalizado el cálculo, genera un grid con valores de CN y además en el shape de coberturas y usos de suelo crea una columna denominada CN el cual contiene todos los valores de curva número para las diferentes clases de cubierta y usos del suelo.

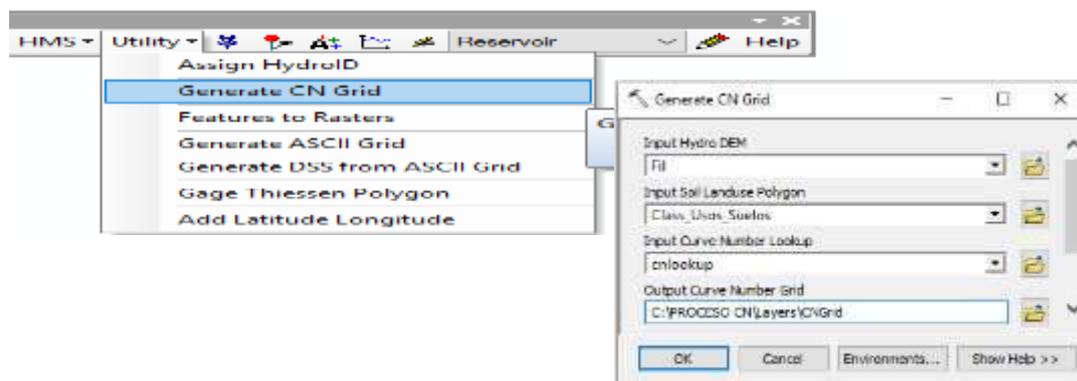


Figura 22. Herramienta CN Grid para cálculo del CN. Fuente: Elaboración propia.

Modelamiento hidrológico de la unidad hidrográfica

El modelamiento hidrológico consistió en el tratamiento de información pluviométrica; conforme a Chow *et al.* (1994), Villón (2012) y Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2011). La ejecución del modelo hidrológico en el HEC-HMS, se basó en el Manual Básico de Nania (2007) y HMS (2020)

La metodología y el procedimiento que se ha seguido para la determinación de los caudales máximos de río Yuracyacu, se detalla a continuación:

- Recopilación de los registros históricos de las precipitaciones máximas en 24 horas, de las estaciones cercanas a la unidad hidrográfica del río Yuracyacu.

- Identificación de los umbrales altos y bajos, para la determinación de la precipitación máxima y mínima aceptada. Análisis de la data de precipitaciones para determinación de la mejor prueba de bondad de ajuste para cada estación meteorológica.

- Cálculo de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años de cada estación, mediante distribuciones teóricas con el mejor ajuste en la prueba de bondad.

- Determinación de las precipitaciones de diseño menores a 24 horas, para las estaciones meteorológicas consideradas.

- Determinación de las intensidades de diseño menores a 24 horas, para las estaciones meteorológicas.

- Determinación de los hietogramas de diseño para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, para cada estación meteorológica.

- Preprocesamiento con las herramientas de sistemas de información geográfica QGIS, HEC-HMS y la extensión HEC-GeoHMS para ArcGIS, obteniendo las características y parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la unidad hidrográfica. El cálculo de los caudales máximos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, se realizó con el software HEC-HMS mediante el modelo de precipitación – escorrentía, método del SCS.

Registro histórico de precipitaciones máximas en 24 horas

Para el modelamiento hidrológico se cuenta con el registro histórico de las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones de Rioja (Apéndice 11) y Naranjillo (Apéndice 20).

Prueba de datos dudosos

La prueba de datos dudosos realizó mediante el Método Water Resources Council. La prueba de datos dudosos descarta los valores de precipitación que estén fuera del umbral aceptado. El método se aplicó para el registro de precipitación de ambas estaciones.

- **Prueba de datos dudosos de la estación de Rioja.** Los datos de precipitación máxima en 24 horas de la estación Rioja utilizados en el modelamiento se detallan en el Apéndice 12.

- **Prueba de datos dudosos de la estación de Naranjillo** Los datos de precipitación máx. en 24 horas de la estación Rioja utilizados en el modelamiento se detallan en el Apéndice 21.

Análisis de la prueba de bondad de ajuste

- Prueba de bondad de ajuste para la estación de Rioja

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: la prueba se aplicó mediante el software HidroEsta 2 para las distribuciones de Normal, Log Normal 2P, Log Normal 3P, Gamma 2P, Gamma 3P, Log Pearson Tipo III, Gumbel y Log Gumbel. La prueba de Kolmogorov-Smirnov, realiza el ajuste tanto en parámetros ordinarios como en momentos lineales comparando la diferencia entre el delta teórico y el delta tabular. En el Apéndice 13 se muestra la prueba de bondad de ajuste de la estación Rioja y en el Apéndice 14 se muestran las gráficas correspondientes.

- Prueba de bondad de ajuste para la estación de Naranjillo

Grafica de probabilidades: el proceso y metodología son los mismos que los realizados para la estación de Rioja. En la Prueba de Kolmogorov-Smirnov el proceso y metodología son los mismos que los aplicados para la estación de Rioja (Apéndice 23). En el Apéndice 22 se muestra la prueba de bondad de ajuste de la estación Naranjillo.

Precipitación máxima anual en 24 horas

A partir de las distribuciones teóricas cuya prueba de bondad de ajuste resultó ser la más adecuada y en función de los periodos de retorno, se calculó la precipitación máxima anual en 24 horas para la estación de Rioja y Naranjillo.

- Precipitación máxima anual en 24 horas para la estación de Rioja: La precipitación máxima anual para la estación de Rioja se calculó para los T_r de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda multiplicar a la precipitación máxima por el factor de corrección de 1.13 para determinar la precipitación máxima anual corregida (Apéndice 15).

- **Precipitación máxima anual en 24 horas para la estación de Naranjillo:** El procedimiento de cálculo fue el mismo que se realizó para la estación de Rioja (Apéndice 24).

Precipitaciones de diseño menores a 24 horas

La obtención de las precipitaciones de diseño menores a 24 horas, de la estación de Rioja y Naranjillo fue mediante el método del IILA - SENAMHI – UNI. La determinación de las precipitaciones de diseño se calculó en base a los Tr considerados en el proyecto.

- Precipitaciones de diseño menores a 24 horas para la estación de Rioja (Apéndice 16).
- Precipitaciones de diseño menores a 24 horas para la estación de Naranjillo (Apéndice 25).

Intensidades de diseño menores a 24 horas

Los valores de las intensidades de diseño menores a 24 horas para ambas estaciones se obtuvieron mediante la metodología del IILA - SENAMHI – UNI. Las intensidades se determinaron para cada Tr en función a cierto intervalo de tiempo.

- Intensidades de diseño menores a 24 horas para la estación de Rioja (Apéndice 17). Además, en el Apéndice 18 se muestra el gráfico de las curvas IDF para cada tiempo de retorno, elaborado a partir de los datos del Apéndice 17.
- Intensidades de diseño menores a 24 horas para la estación de Naranjillo (Apéndice 26). Además, en el Apéndice 27 se muestra el gráfico de las curvas IDF para cada tiempo de retorno, elaborado a partir de los datos del Apéndice 26.

Hietogramas de precipitación de diseño

Los hietogramas de precipitación de diseño se crearon a partir de la ecuación de Intensidad, Duración y Frecuencia, cuyos valores se obtuvieron bajo un análisis de regresión lineal múltiple de los valores de la tabla de intensidades de diseño menores a 24 horas. El método de creación de los hietogramas de precipitación de diseño se da a

partir del método de bloques alternos, para una duración de un día a intervalos de cada 60 minutos de duración. Los hietogramas se crearon para cada Tr de las estaciones de Rioja y Naranjillo.

- Hietogramas de precipitación de diseño para la estación de Rioja: En el Apéndice 19 se muestran los gráficos de los hietogramas de precipitación de diseño para Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

- Hietogramas de precipitación de diseño para la estación de Naranjillo: En el Apéndice 28 se muestran los gráficos de los hietogramas de precipitación de diseño para Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

Pre procesamiento con HEC-HMS

Todo el proceso de delimitación y calculo de áreas de las superficies de las unidades hidrográficas del río Yuracyacu se se realizó en el módulo GIS del software HEC-HMS. Siendo necesario determinar otros parámetros geomorfológicos se utilizó la extensión HEC-GeoHMS en ArcGIS. A continuación, se presenta el proceso de delimitación de la unidad hidrográfica.

- Sistema de coordenadas (Coordinate System)

Antes de realizar algún procesamiento de datos geoespaciales es indispensable fijar el sistema de coordenadas. Para el presente estudio, se obvió este proceso dado que el DEM cargado en HEC-HMS ya estaba en el sistema de referencia WGS 1984, proyección UTM y en la Zona 18 M.

- Corrección de las depresiones del DEM (Preprocess Sinks)

La herramienta Sinks permite la corrección del raster de elevación, ya que en muchos casos los DEM presentan pixeles que superan en altitud a celdas de su alrededor, como

también huecos o sumideros. En la Figura 23 muestra la aplicación de la herramienta Preprocess Sinks

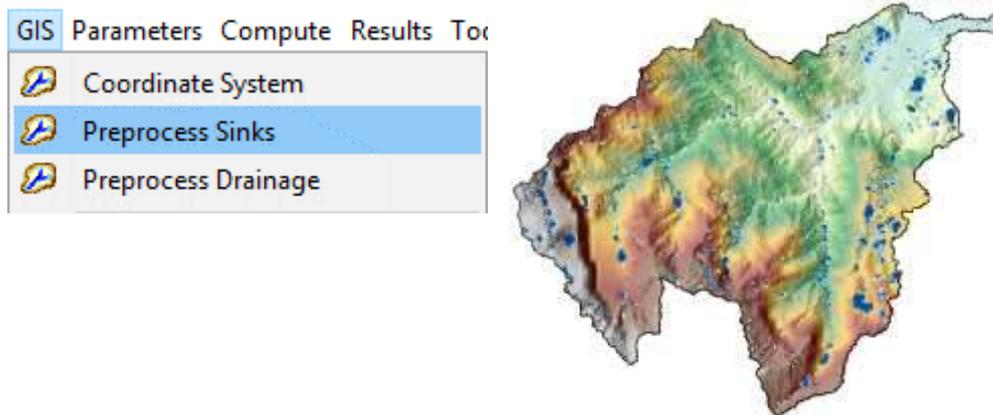


Figura 23. Aplicación de las correcciones de las depresiones del DEM. Fuente: Elaboración propia.

- Obtención de la red de drenaje (Preprocess Drainage)

La herramienta Preprocess Drainage, determina la dirección y la acululación del flujo de un raster previo de la corrección del mismo. La aplicación del algoritmo hace que la dirección del flujo se ordene de manera descendente a partir del valor de elevación de cada celda, es decir los valores máximos se direccionarán hacia las celdas de menor elevación (Figura 24). En cuanto a la acumulación del flujo las celdas aguas arriba discurren a las celdas continuas aguas bajo en todo el grid generando una red de drenaje.

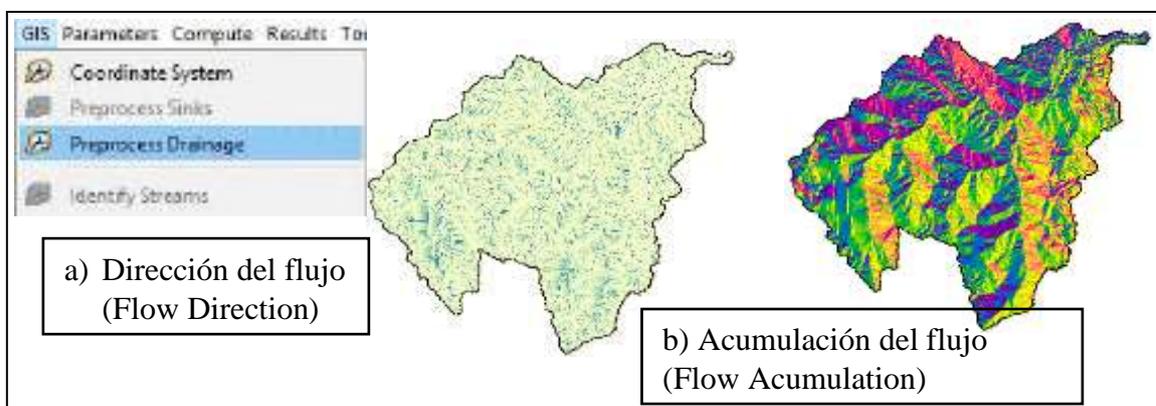


Figura 24. Herramienta Preprocess Drainage. Fuente: Elaboración propia.
Nota: Dirección de Flujo (a) y Acumulación de flujo (b)

- **Identificación de corrientes (Identify Streams)**

La herramienta Identify Streams determina la densidad de la red hídrica bajo un valor de umbral de escorrentía, que depende del valor de área para que se genere un arroyo. El valor del área o umbral de escorrentía esta en función de la resolución espacial del DEM; si, el valor de área ingresado es muy bajo calcula una red hídrica muy densa y por el contrario si el valor de área es mayor, la delineación de la red hídrica será menos ramificada. En la Figura 25 se muestra la aplicación de la herramienta Identify Streams.



Figura 25. Identificación de corrientes. Fuente: Elaboración propia.

- **Herramienta de creación de puntos de ruptura (Break Points Creation Tool)**

La herramienta Break Points Creation Tool permite la asignación de un punto específico desde donde se desea delimitar la unidad hidrográfica. Por defecto, las unidades hidrográficas no tienen un punto de ruptura que defina la salida para la delimitación de las mismas. Por lo tanto, es necesario conocer la ubicación exacta hasta donde abarca la extensión del proyecto. Para el estudio, el punto de ruptura para la delimitación de la unidad hidrográfica se ubica en las coordenadas UTM N: 9343071.433 m E: 245336.145 m. En la Figura 26 se muestra la aplicación de la herramienta Break Points Creation Tool.

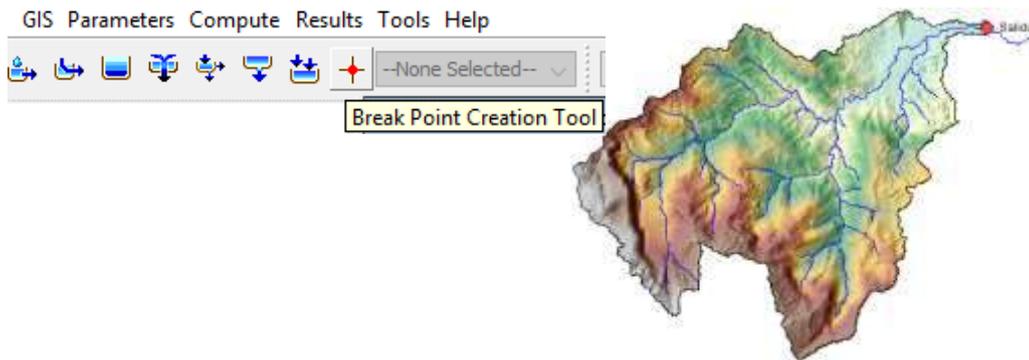


Figura 26. Creación de puntos de ruptura. Fuente: Elaboración propia.

- Delineación de elementos (Delineate Elements)

La herramienta Delineate Elements delimita las unidades hidrográficas. Por lo tanto, el número o cantidad de subcuencas generadas dependerá del umbral de escurrimiento y los segmentos de las corrientes que discurren dentro de su ámbito de influencia. Así mismo, crea una representación gráfica de un modelo hidrológico, asignando elementos indispensables dentro del modelo tales como: nodos, uniones y enlaces; además de estar conectados entre sí. En la Figura 27 se muestra la aplicación de la herramienta Delineate Elements.

Los elementos que componen el modelo hidrológico creados a partir del algoritmo son los siguientes: Subbasin ubicandolo en el centroide de cada unidad hidrográfica, Junction asignandolo en cada confluencia o unión entre dos ríos y el Sink lo ubica a la salida o en el punto de ruptura de delimitación creado en un anterior proceso.

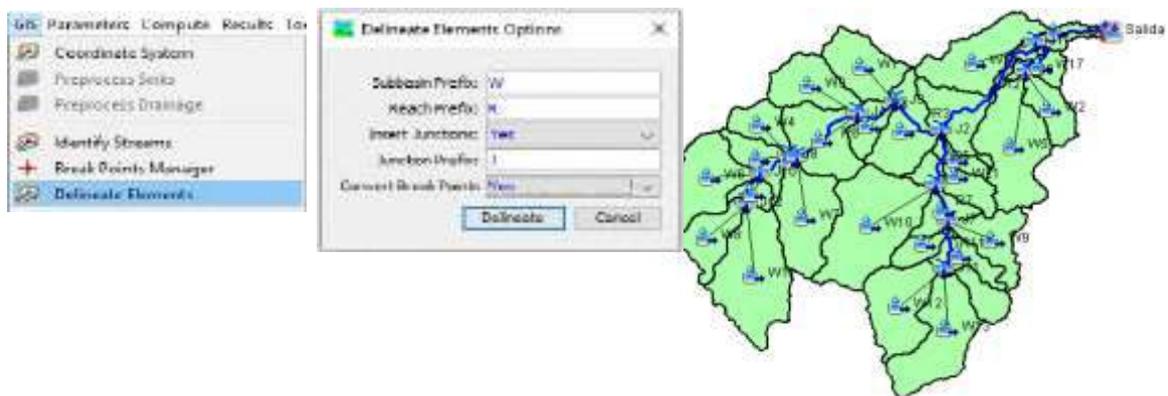


Figura 27. Herramienta Delineate Elements. Fuente: Elaboración propia.

- Combinación de elementos (Merge Elements)

La herramienta Merge Elements, permite la combinación de dos o más unidades hidrográficas. Para este efecto, se selecciona las unidades hidrográficas adyacentes y se ejecuta Merge Elements, y como resultado de la acción genera una sola subcuenca. Cabe mencionar que se debe tener cuidado al fusionar dos o más unidades hidrográficas, esto debe tener algún sentido hidrológico. En la Figura 28 se muestra la aplicación de la herramienta Merge Elements.

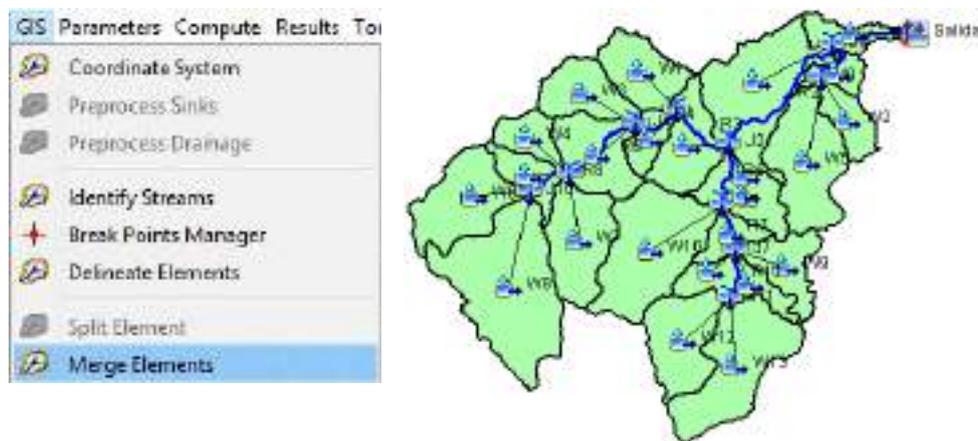


Figura 28. Herramienta Merge Elements. Fuente: Elaboración propia.

Proceso HEC-HMS

- Proyecto HMS

Terminado el preprocesamiento de delimitación de unidades hidrográficas y obtención de elementos del modelo en el software HEC-HMS, se le asigna el nombre “Modelo_Yuracyacu”. En la Figura 29 se muestra todo el esquema de los elementos que componen al modelo hidrológico.

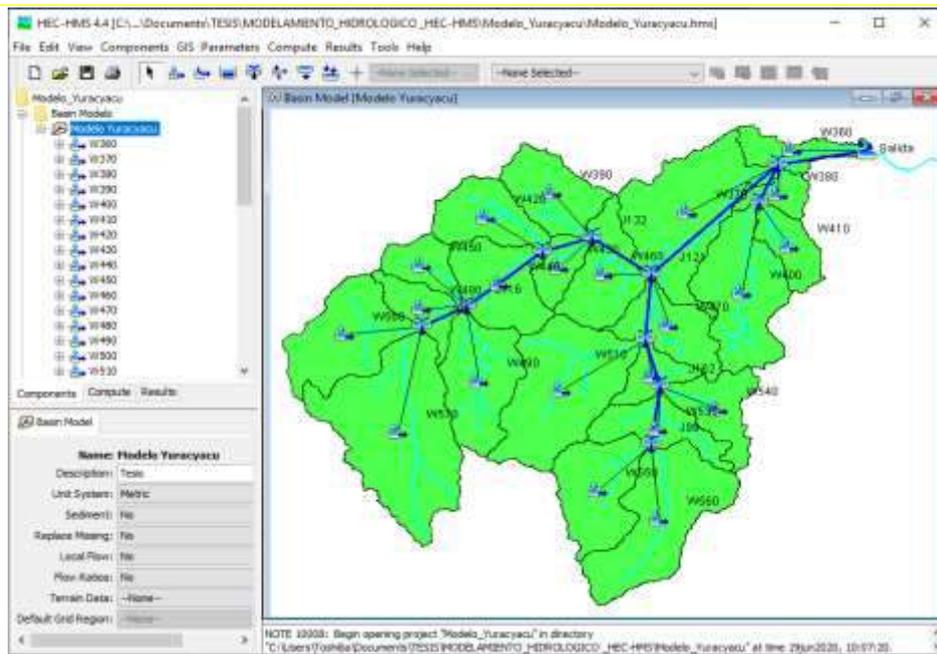


Figura 29. Presentación del proyecto en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.

- Modelo de la cuenca

Una vez configurado todo el proyecto, dentro las herramientas de HEC-HMS > Parameters, se ingresaron los parámetros hidrológicos de cada unidad hidrográfica (Apéndice 10).

En la Tabla 20 se muestran los parámetros de Subcuencas (Subbasin), Pérdidas (Loss) y Transformación (Transform) y los métodos que se utilizaron para el modelo de cada subcuenca dentro de la simulación hidrológica.

Tabla 20

Parámetros del modelo de las unidades hidrográficas

Parámetro	Método	Descripción
Subbasin	SCS Curve Number	Determinación de la escorrentía efectiva mediante la Curva Número
	SCS	Calcula el caudal a partir de la precipitación teniendo en cuenta los grupos hidrológicos del suelo
Loss	Inicial Abstraction	Capacidad del suelo que permite la infiltración del agua en (mm)
	Curve Number	Determina las pérdidas de cada subcuenca mediante el CN

	Impervious	Impermeabilidad en (%) del total de área de las subcuencas
Transform	Time of Concentration	El tiempo que tarda en recorrer el agua desde la parte más alta y alejada de la subcuenca, hasta el punto de aforo
	Lag	Es el tiempo donde el todo el sistema (subcuenca) está en equilibrio

Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario realizar el cálculo de algunas variables de acuerdo con el método elegido para cada parámetro. Por lo tanto, para el proyecto se realizó el cálculo del Tiempo de Concentración (Tc) para cada unidad hidrográfica mediante la fórmula de Kirpich. Así mismo, a partir del Tc se calculó el Tiempo de Retardo (TLag), para ello se multiplica 0.62 al Tc (Tabla 21).

Tabla 21

Tiempos de concentración y tiempo de retardo

Unidades Hidrográficas	Longitud (L)	Desnivel (H)	Pendiente (S)	Tiempo de Concentración (Tc)	Tiempo de Retardo (Lag)
Código	km	m	m/m	min	min
W360	5.969	430.00	0.0720	43.381	26.029
W370	10.117	1036.00	0.1024	56.881	34.129
W380	2.639	85.00	0.0322	31.545	18.927
W390	4.577	757.00	0.1654	25.675	15.405
W400	7.452	1156.00	0.1551	38.304	22.982
W410	4.574	455.00	0.0995	31.214	18.728
W420	4.855	1150.00	0.2369	23.399	14.039
W430	3.523	710.00	0.2015	19.452	11.671
W440	4.869	1021.00	0.2097	24.581	14.749
W450	3.862	1084.00	0.2807	18.377	11.026
W460	4.821	847.00	0.1757	26.114	15.668
W470	5.332	933.00	0.1750	28.262	16.957
W480	4.526	1060.00	0.2342	22.265	13.359

Fuente: Elaboración Propia.

(Continuación)

Unidades Hidrográficas	Longitud (L)	Desnivel (H)	Pendiente (S)	Tiempo de Concentración (Tc)	Tiempo de Retardo (Lag)
Código	km	m	m/m	min	min
W490	6.041	1541.00	0.2551	26.908	16.145
W500	5.174	1701.00	0.3288	21.659	12.995
W510	8.752	1824.00	0.2084	38.695	23.217
W520	3.565	1012.00	0.2839	17.207	10.324
W530	4.643	951.00	0.2048	23.910	14.346
W540	5.165	972.00	0.1882	26.813	16.088
W550	5.429	1462.00	0.2693	24.272	14.563
W560	7.709	1466.00	0.1902	36.354	21.812
W570	8.379	1712.00	0.2043	37.705	22.623

Fuente: Elaboración Propia.

Otro parámetro ingresado fue la Curva Número cuyo parámetro determina la escorrentía efectiva para cada unidad hidrográfica. Para determinar los valores de cada subcuenca se realizó una interpolación del grid CN con la capa vectorial de subcuencas, cuyo resultado fue el valor promedio de Curva Número de cada unidad hidrográfica.

- El modelo meteorológico

El modelo meteorológico consta de dos etapas: En la primera parte se ingresaron todos los hietogramas de diseño para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. La segunda parte consiste en asignar los hietogramas a cada unidad hidrológica en función a los tiempos de retorno. La Figura 30 muestra cómo se ingresó los hietogramas asignados a cada unidad hidrológica.

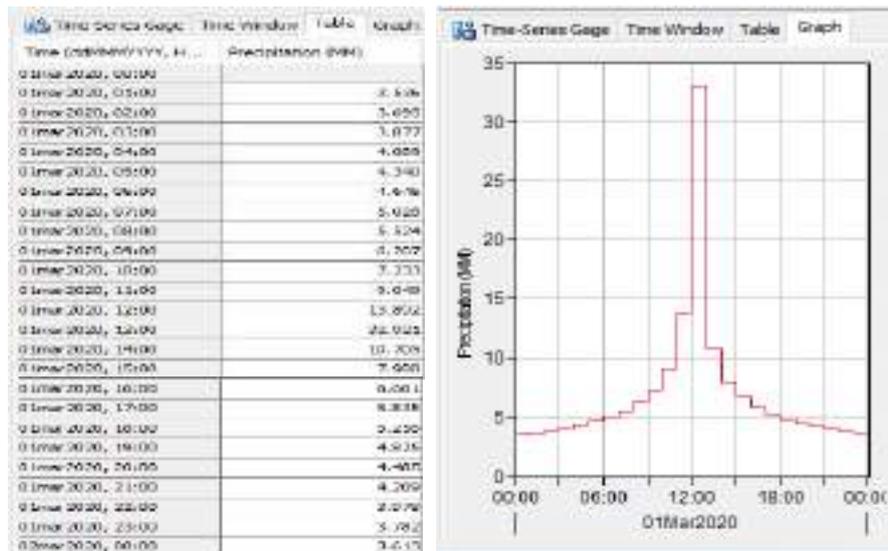


Figura 30. Ingreso de hietogramas de diseño. Fuente: Elaboración Propia.

- Especificaciones de control

El ingreso de las especificaciones de control representa la configuración final antes de correr la simulación hidrológica; es decir, se define el tiempo de inicio y final de la simulación. Además, se precisa el intervalo de tiempo (Time Interval), para que el modelo realice los cálculos respectivos. Para el proyecto, la fecha de inicio fue el 01 de marzo de 2020 a las 00:00 horas hasta las 12:00 horas del siguiente día (02 de marzo) y el intervalo de tiempo se estableció en 5 minutos (Figura 31).



Figura 31. Especificaciones de control. Fuente: Elaboración Propia.

Modelamiento hidráulico bidimensional (2D)

La ejecución del modelamiento hidráulico se basa en Nanía (2007), Brunner (2014), RAS (2016) y HEC-RAS (2020).

- Obtención del Modelo Digital de Elevación (DEM)

El modelo digital de elevación (Figura 32) se obtuvo a partir del levantamiento topográfico y fotogramétrico de la zona de estudio, previo a un preprocesamiento en AutoCAD Civil 3D.



Figura 32. DEM del tramo en estudio. Fuente: Elaboración Propia.

- Interfaz RAS Mapper

Dentro de las últimas versiones de HEC-RAS se ha incorporado la interfaz RAS Mapper; que permite la creación e importación de geometrías y visualización de los resultados en 2D. Esta herramienta permite incorporar dentro de su entorno Modelos Digitales de Elevación, ortofotos existentes, imágenes de la web y agregar archivos vectoriales. Al intentar cargar un DEM en RAS Mapper solicita un sistema de referencia para añadir el raster; además, el formato admitido en HEC-RAS fue en extensión GeoTIFF (*.tif), con la finalidad de mejorar la velocidad y rapidez de cómputo al momento de presentar los resultados en láminas de inundación y ocupar un menor espacio de almacenamiento de los archivos generados.

Para el proyecto se ha cargado el DEM desde las herramientas de GIS Tools en HEC-RAS. En la Figura 33 se muestra la herramienta RAS Mapper para agregar un DEM.

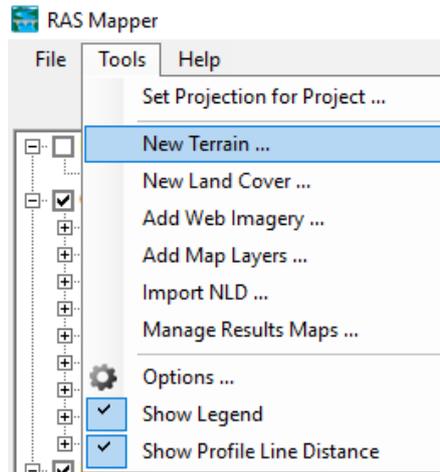


Figura 33. Agregar un DEM en RAS Mapper. Fuente: Elaboración Propia.

- Generación de malla y condiciones de contorno

HEC-RAS 5.0.7 permite crear una geometría de mallado en 2D, para la cración de la malla es indispensable dibujar un polígono de todo el área de interés; pero, este no debe sobresalir de la extensión o borde del DEM. La creación del pólígono se realiza mediante la herramienta de Edit Geometric Data > 2D Flow Area y mediante la función de Edit 2D Flow Area se crea el mallado. Para el proyecto el tamaño de malla fue de 2 x 2 metros, con la finalidad de obtener una mejor representatividad de la superficie y mejores resultados. Además, dentro del mismo entorno se asigna los coeficientes de rugosidad para el mallado considerando los valores n de Manning asignados para el cauce del río y llanuras de inundación (Apéndice 31). Para completar la configuración se define las condiciones de contorno tanto para aguas arriba como aguas abajo. En la Figura 34 se muestra el mallado 2D y las respectivas condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo.

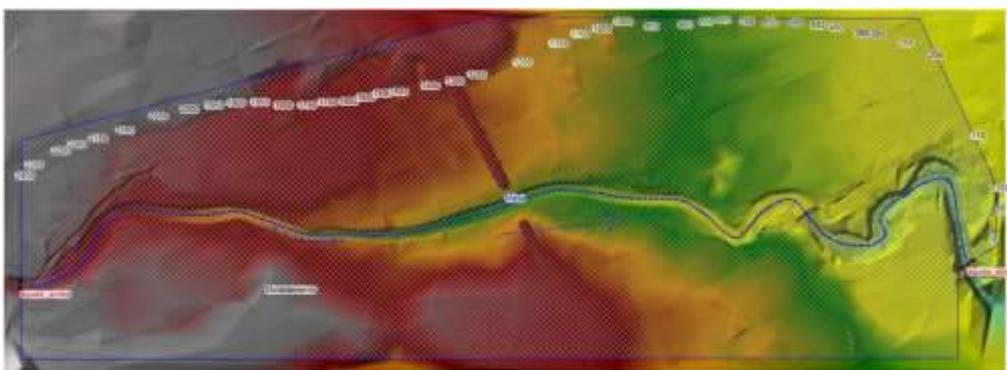


Figura 34. Mallado 2D y condiciones de contorno. Fuente: Elaboración Propia.

- Dinámica del flujo

Para el modelo 2D las condiciones de contorno consideradas fueron el Flow Hydrograph y el Normal Depth. Donde, para las condiciones aguas arriba se ingresa el hidrograma de salida para cada Tr resultado del modelamiento hidrológico. Y para las condiciones aguas abajo se ingresa la pendiente de la línea de energía. En la Figura 35 se muestra la configuración de las condiciones tanto para aguas arriba y en la Figura 36 las condiciones de aguas abajo.



Figura 35. Condicion de flujo aguas arriba Flow Hydrograph. Fuente: Elaboración Propia.

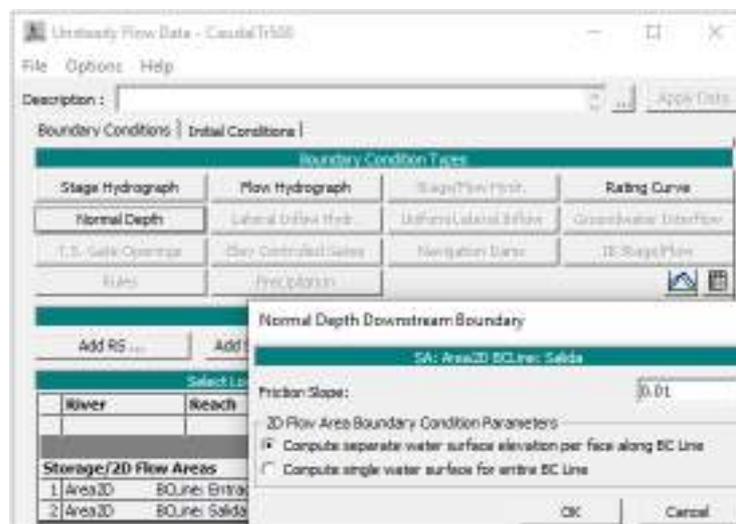


Figura 36. Condicion de flujo aguas abajo Normal Depth. Fuente: Elaboración Propia.

- Simulación de flujo en régimen no permanente

En esta fase final, luego de haber ingresado todos los parámetros de flujo, condiciones de contorno y la geometría del río, se configura el plan de simulación; que se realiza mediante la herramienta de HEC-RAS > Run > Unsteady Flow Analysis. Para un adecuado resultado del modelo hidráulico se tiene que realizar ciertas configuraciones partiendo desde el tamaño de malla y el paso de tiempo de simulación. Por lo tanto, para definir del tiempo de cálculo de procesamiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 1 \text{ (Con máx } C = 3)$$

Donde C es el número de Courant, V es la velocidad promedio del flujo, T es el paso de tiempo computacional y X es el tamaño de la malla 2D. Para el caso en estudio, estimando la velocidad promedio del curso del agua de hasta 5 m/s, tamaño de malla de 2 m y el tiempo de cálculo de 0.5 s, resolviendo la ecuación de Courant se tiene que C es igual a 1.25. Sin embargo, con las pruebas respectivas y fijando un tiempo de cálculo coherente para que el flujo recorra toda la longitud del tamaño de celda, se consideró un tiempo de cálculo de 0.4 s obteniéndose un C igual a 1, cuyo valor si cumple con la ecuación de Courant. En la Figura 37 se muestra el plan de simulación en un flujo combinado 1D Y 2D del modelamiento hidráulico.

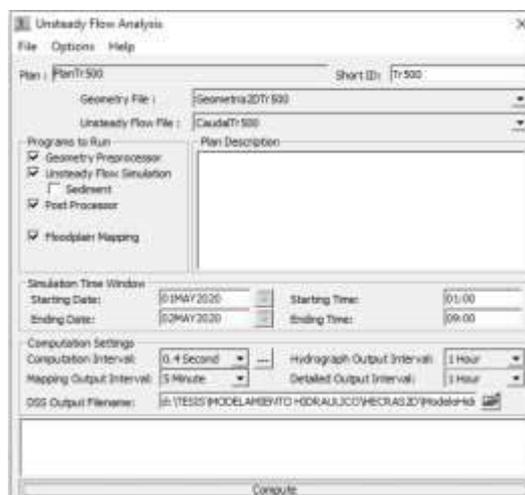


Figura 37. Plan de cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

Trabajo en campo

- Se realizó una visita *in situ* del área de estudio con el fin de evaluar la efectividad del modelo, identificando tramos críticos en el sector Monterrey y la Parada reafirmando la representación de fuertes velocidades y tirantes muy altos ante el paso del flujo; evidenciando la vulnerabilidad a las que están expuestas las viviendas situadas en la faja marginal del río Yuracyacu. En el Apéndice 32 se muestran las zonas vulnerables del tramo de estudio.

2.2. Identificación de Variables y su mensuración

Variable dependiente: Buendía *et al.* (1998), define la variable dependiente como aquel elemento que se observa o mide para comprobar el efecto de la variable independiente o variable causa. Es decir, es el elemento que el investigador evalúa para determinar las consecuencias de la variable causal. En esta investigación la variable dependiente es la zona vulnerable, población aledaña e infraestructura dañada (Tabla 22).

Variable independiente: Buendía *et al.* (1998) mencionan que se refiere a la variable que el investigador mide, maneja o elige para determinar su proporción con el fenómeno que se observa y distinguir las consecuencias que produce en otra variable. En esta investigación la variable independiente son las Máximas Avenidas: fenómenos hidrometereológicos (Tabla 22).

Tabla 22

Operacionalización de las variables de estudio

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	NATURALEZA	UNIDAD DE MEDIDA	
V.D.: Zona Vulnerable: Población que habita en la zona y la infraestructura urbana	Área vulnerable	Para identificar y calcular el área de las zonas vulnerables ante máximas avenidas se usó y aplicó herramientas SIG y CAD (ArcGIS y AutoCAD), a partir de una superposición de la capa vectorial de inundación sobre una ortofoto satelital de alta resolución espacial georreferenciadas en las zonas de estudio.	Cuantitativa	Hectáreas (has)
	Número de viviendas	Conteo de viviendas en las zonas vulnerables luego de la modelación hidráulica cuya capa de inundación fue superpuesta sobre una ortofoto satelital de alta resolución espacial georreferenciadas en las zonas de estudio.	Cuantitativa	Número de viviendas
	Áreas recreativas y educativas	La identificación y delimitación de las áreas recreativas y educativas se llevó a cabo mediante una ortofoto satelital de alta resolución espacial georreferenciadas en las zonas de estudio, mediante herramientas de software SIG y CAD.	Cuantitativa	Hectáreas (has)
	Los caudales máximos se obtuvieron a partir del modelamiento hidrológico para los Tr: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años, a partir de los hietogramas de diseño ingresados en el software HEC-HMS, considerando los			

V.I.: Máximas Avenidas: Fenómenos hidrometereológicos	Caudal máximo	parámetros geomorfológicos y el CN correspondientes a la unidad hidrográfica.	Cuantitativa	m ³ /s
	Velocidad del flujo	La velocidad se obtuvo luego de haber realizado el modelamiento hidráulico, y a su vez fue variable de la geometría y características topográficas que presenta el tramo del río en estudio. Este parámetro fue determinado en el software HEC-RAS.	Cuantitativa	m/s
	Tirante del flujo	Para el cálculo del Tirante del flujo fue obtenido a partir de la corrida del modelo hidráulico en el HEC-RAS	Cuantitativa	Metros (m)
	Parámetros geomorfológicos	Los parámetros geomorfológicos se determinaron a partir de información cartográfica y modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución espacial, procesadas en QGIS, extensión HEC-GeoHMS para ArcGIS y Microsoft Office Excel.	Cuantitativa	Parámetros generales (km ² , km), parámetros de forma (km y adimensional), relieve (m y %) y red de drenaje (adimensionales, km, km/km ² , ríos/km ² y %).

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.1. Análisis estadístico de Datos

El análisis de datos de esta investigación consistió en identificar los datos dudosos (altos y bajos), que se alejan de la tendencia muestral mediante el método de Water Resources Council Buckland (1957) y Grubbs (1959) citado por OMM (2011). A continuación, se presenta las ecuaciones que fueron utilizadas para determinar datos dudosos altos y bajos propuestos por Chow *et al.* (1994):

$$yH = \bar{y} + k_n s_y ; \text{ donde}$$

$$yL = \bar{y} - k_n s_y$$

yH , es el umbral dudoso alto
 k_n , constante según número de datos
 s_y , desviación estándar del registro
 yL , es el umbral dudoso bajo

Para representar el mejor ajuste del comportamiento de la variable (precipitación máxima en 24 horas) se utilizó modelos probabilísticos. La utilización de estos modelos requiere determinar los parámetros que abordan las diferentes ecuaciones matemáticas y posteriormente realizar la prueba de bondad de ajuste (Villón, 2016). A continuación, en la Tabla 23 se muestran las diversas ecuaciones de las distribuciones teóricas.

Tabla 23

Modelos de Distribución

Modelos de Distribución	Fórmula
	$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2}$
	Donde:
Distribución Normal	$f(x)$ = Función 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 .
Distribución Log Normal 2 Parámetros	$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{-(x-X)^2/2S^2} dx$
	Donde: Donde X y S son los parámetros de la distribución.

Fuente: Elaboración Propia a partir de Villón (2016).

(Continuación)

Modelos de Distribución	Fórmula
	$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sqrt{(2\pi)S_y}} e^{-1/2\left(\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{S_y}\right)^2}$
	Para: $x > x_0$
Distribución Log Normal 3 Parámetros	Donde: x_0 = Parámetro de posición μ_y = Parámetro de escala media S_y^2 = Parámetro de forma o de varianza
	$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$
Distribución Gamma 2 Parámetros	Válido para: $0 \leq x < \infty, 0 < \gamma < \infty, 0 < \beta < \infty$ Donde: γ = Parámetro de forma β = Parámetro de escala
	$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$
Distribución Gamma 3 Parámetros	Válido para: $x_0 \leq x < \infty$ $-\infty < x_0 < \infty$ $0 < \beta < \infty$ $0 < \gamma < \infty$ Donde: x_0 = Origen de la variable x, parámetro de posición γ = Parámetro de forma β = Parámetro de escala

Fuente: Elaboración Propia a partir de Villón (2016).

(Continuación)

Modelos de Distribución	Fórmula
Distribución Log Pearson Tipo III	$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x \beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$ <p>Válido para: Donde: x_0 = Origen de la variable x, parámetro de posición. γ = Parámetro de forma. β = Parámetro de escala.</p> $F(X) = e^{-e^{-a(x-\beta)}}$ <p>Utilizando el método de momentos, se obtienen las siguientes relaciones:</p>
Distribución Gumbel	$a = \frac{1.2825}{\sigma}$ $\beta = \mu - 0.45\sigma$ <p>Donde: a = Parámetro de concentración β = Parámetro de localización</p>
Distribución Log Gumbel	$y = \frac{\ln x - \mu}{\alpha}$ <p>Con lo cual, la función acumulada reducida log Gumbel es:</p> $G(y) = e^{-e^{-y}}$

Fuente: Elaboración Propia a partir de Villón (2016).

Prueba de Bondad de Ajuste

El análisis de la prueba de bondad de ajuste se realizó mediante el Test de Smirnov-Kolmogorov a partir de los diversos modelos de distribuciones teóricas. La importancia de calcular la mejor prueba de bondad de ajuste permite determinar la magnitud de un fenómeno hidrometeorológico (máximas avenidas) para diversos periodos de retornos. A continuación, se muestra la ecuación del Test de Smirnov- Kolmogorov citado por Villón (2016).

$D = \max F_o(x_m) - F(x_m)$, donde

D, Máximo Valor absoluto

$F_o(x_m)$, Probabilidad observada

$F(x_m)$, Probabilidad estimada

En la Tabla 24 se presentan los valores críticos del Test de Smirnov- Kolmogorov, representativos para diferentes tamaños de muestra.

Tabla 24

Valores Críticos “d” para la prueba de Smirnov-Kolmogorov

Tamaño de muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.3	0.34	0.4
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
35	0.2	0.22	0.27
40	0.19	0.21	0.25

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC] (2011).

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Parámetros geomorfológicos

El resultado de los parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu se presentan en la Tabla 25, en el cual se muestran los valores y unidades del grupo de parámetros generales, entre ellos el área con un total de 171.03 km², el perímetro con un total de 78.17 km, y otros parámetros como siguen.

Tabla 25

Parámetros Geomorfológicos de la Subcuenca Río Yuracyacu

Grupo	Parámetros geomorfológicos	Unidad	Valor	
General	Área	km ²	171.03	
	Perímetro	km	78.17	
Centro de gravedad	Coordenada UTM - Centroide X	m	235683.91	
	Coordenada UTM - Centroide Y	m	9336476.95	
	Centroide Z	m.s.n.m.	2232.54	
Relaciones de forma	Ancho promedio	km	5.72	
	Factor forma		0.19	
	Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius		1.69	
	Rectángulo equivalente	Lado mayor	km	34.06
		Lado menor	km	5.02
		Cota mínima	m.s.n.m.	866.00
Relieve	Cota máxima	m.s.n.m.	3644.00	
	Desnivel total de la subcuenca	m.s.n.m.	2778.00	
	Altitud media de la subcuenca	m.s.n.m.	1914.57	
	Altitud de frecuencia media	m.s.n.m.	2074.72	
	Altitud más frecuente	m.s.n.m.	1800 - 2000	

Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

Grupo	Parámetros geomorfológicos		Unidad	Valor
	Integral hipsométrica		%	39.97
	Índice de pendiente		%	26.68
	Pendiente	Criterio rectángulo	%	8.16
	media	equivalente		
	cuenca	Criterio topográfico	%	49.11
		Criterio de Alvord	%	51.77
	Orden de la red hídrica			4
		Orden 1	km	63.10
	Longitud	Orden 2	km	29.10
	total de ríos	Orden 3	km	17.73
		Orden 4	km	10.84
		Orden 1		45
	Número de	Orden 2		12
	ríos	Orden 3		7
		Orden 4		3
Drenaje	Longitud de cauce principal		km	29.89
	Longitud de corrientes		km	120.77
	Densidad de drenaje		km/km ²	0.71
	Densidad de corrientes		ríos/km ²	0.36
	Extensión media de escurrimiento		km	0.35
	Relación de bifurcación			2.45
	Coeficiente de torrencialidad		ríos/km ²	0.26
	Pendiente	Pendiente uniforme	%	9.296
	media	-		
	cauce	Ecuación Taylor y Schwarz	%	10.07

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Coberturas de uso de suelo y Curva Número

En la Figura 38 se presentan el resultado de las coberturas de uso de suelo, donde se identificó un total de 124.039 km² de bosques, 35.176 km² de cultivos, 9.189 km² de pastos, 1.373 km² suelos sin vegetación y 0.948 km² de área urbana. Mientras que, en la Figura 39 se muestra el resultado final del mapa de Curva Número de toda la unidad hidrográfica del río Yuracyacu y la Tabla 26 presenta el resultado de los valores de CN, cuyo rango fluctúan entre 58 y 74.159 perteneciente a cada unidad hidrográfica.

Tabla 26

Valores de Curva Número para cada Unidad Hidrográfica subcuenca río Yuracyacu

U. Hidrográfica	Área (km²)	CN
W360	3.431	74.159
W370	14.913	72.006
W380	2.301	70.229
W390	6.690	62.912
W400	11.580	72.274
W410	3.780	72.869
W420	6.256	59.117
W430	2.889	68.155
W440	7.931	60.001
W450	3.481	58.000
W460	7.231	68.861
W470	6.148	70.375
W480	3.703	59.686
W490	9.260	58.033
W500	10.018	59.423
W510	15.169	61.145
W520	2.942	67.634
W530	5.468	60.014
W540	5.265	62.507
W550	8.764	58.000
W560	13.408	58.000
W570	20.405	58.522

Fuente: Elaboración propia.

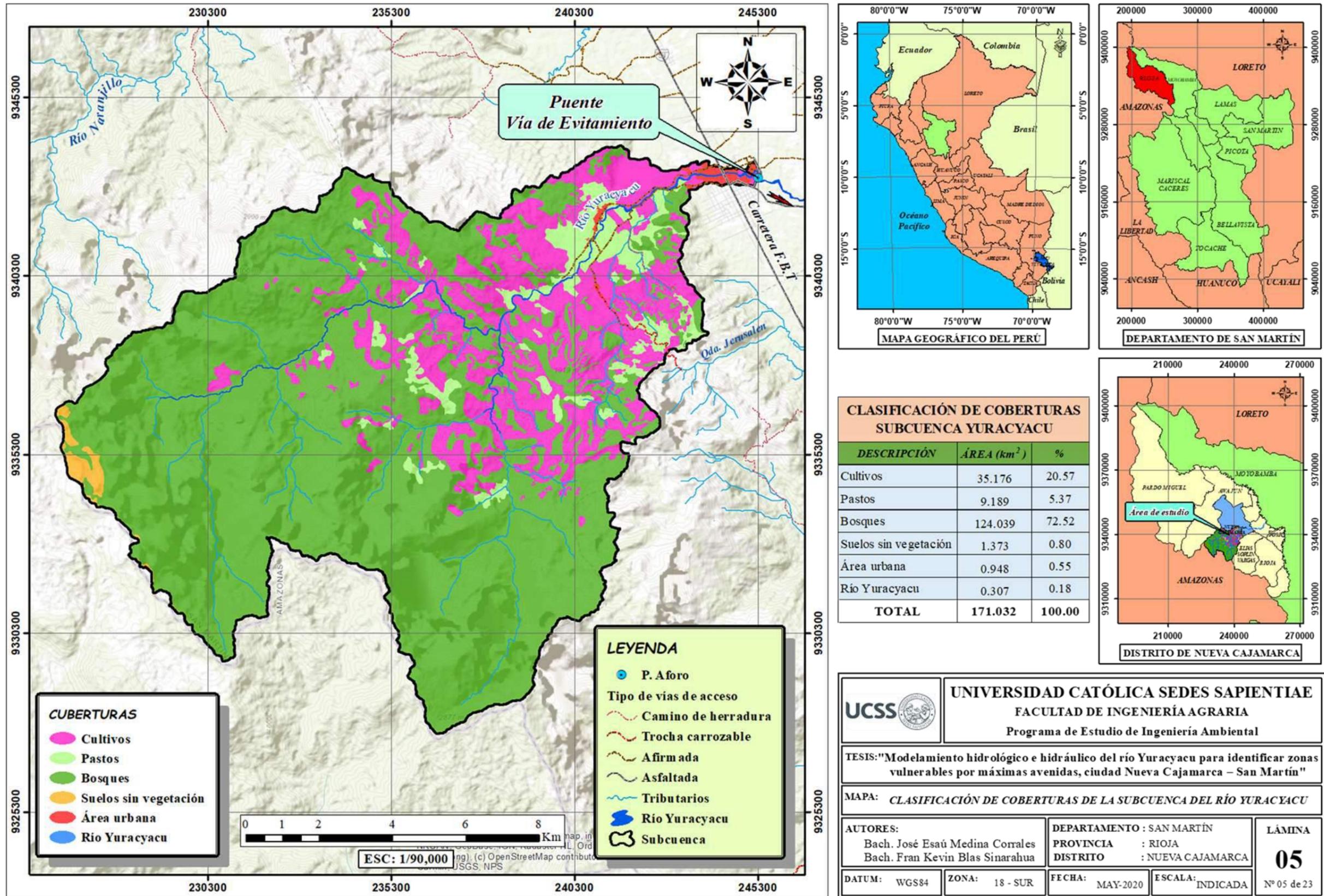


Figura 38. Mapa de clasificación de coberturas de la subcuenca río Yuracyacu. Fuente: Elaboración Propia.

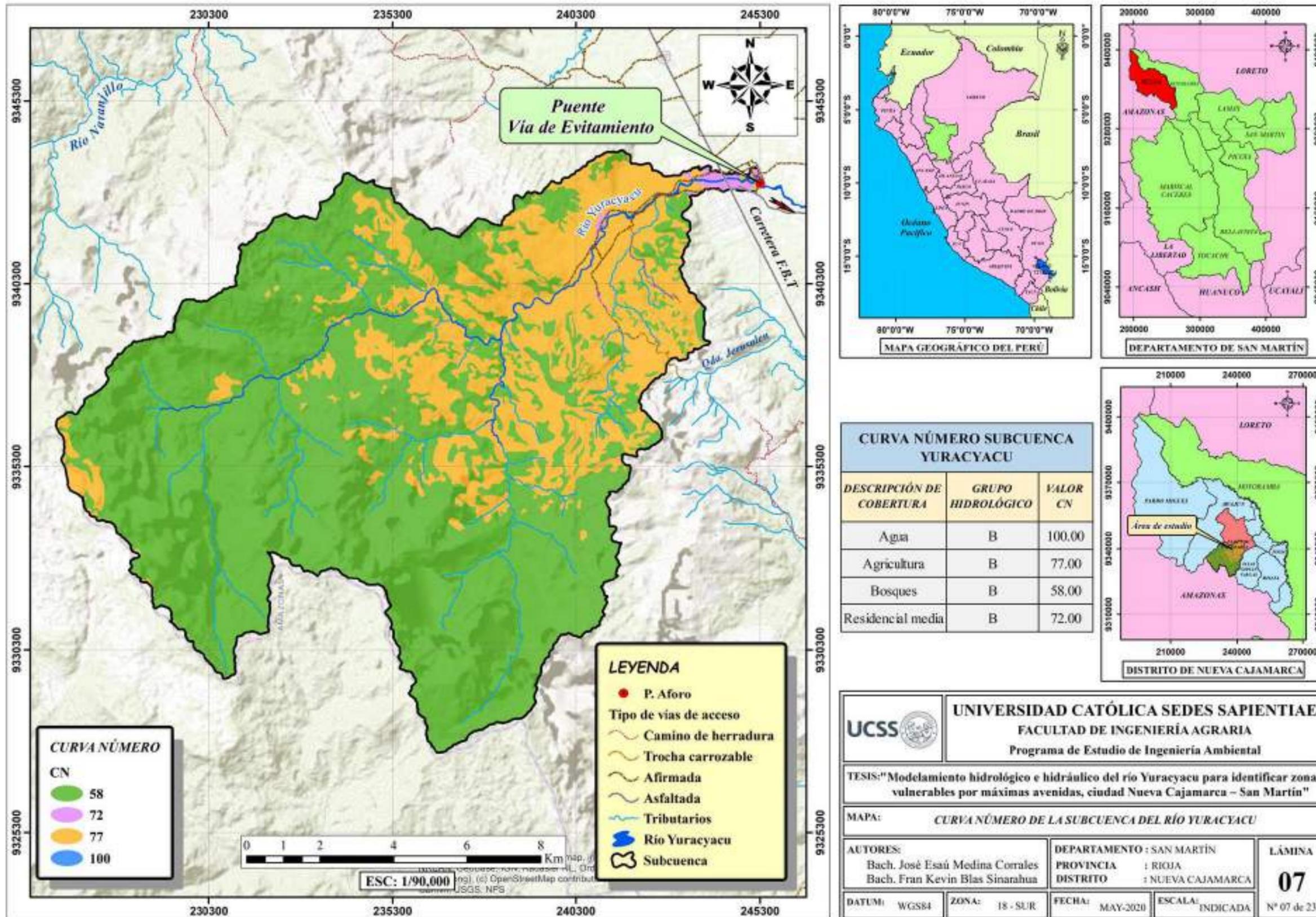


Figura 39. Mapa de curva número de la subcuenca del río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Caudales Máximos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años

El resultado del modelamiento hidrológico se obtuvo en el software HEC-HMS, mostrando el caudal máximo en los hidrogramas de salida para cada periodo de retorno. La Figura 40 muestra el esquema del modelo de las unidades hidrológicas que contribuyen al cauce principal, cuyo caudal de salida es la sumatoria de caudales generados en cada unidad hidrográfica.

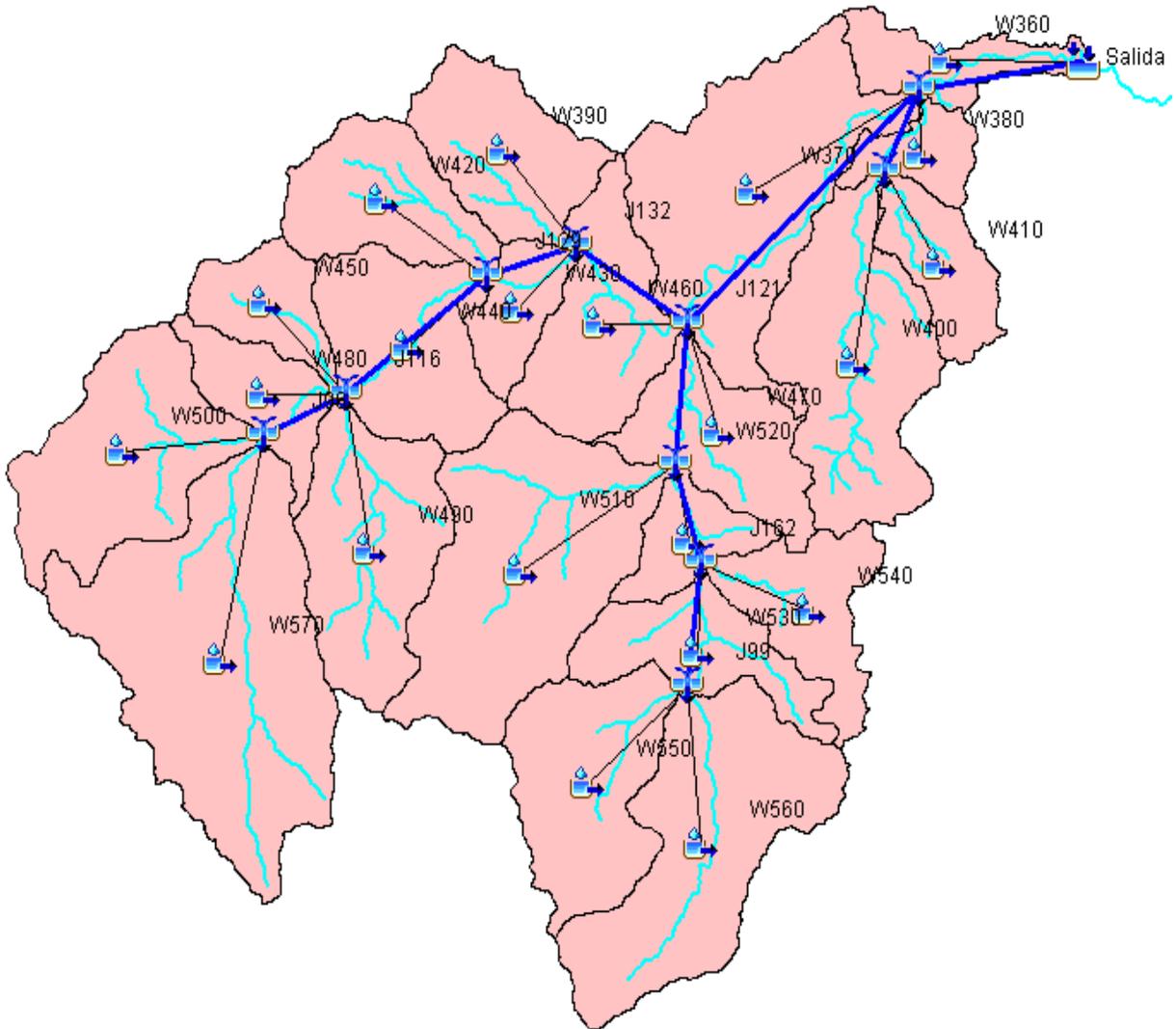


Figura 40. Unidades de drenaje en la cuenca río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41 se muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 2 años, donde el valor máximo del caudal es de 58.4 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

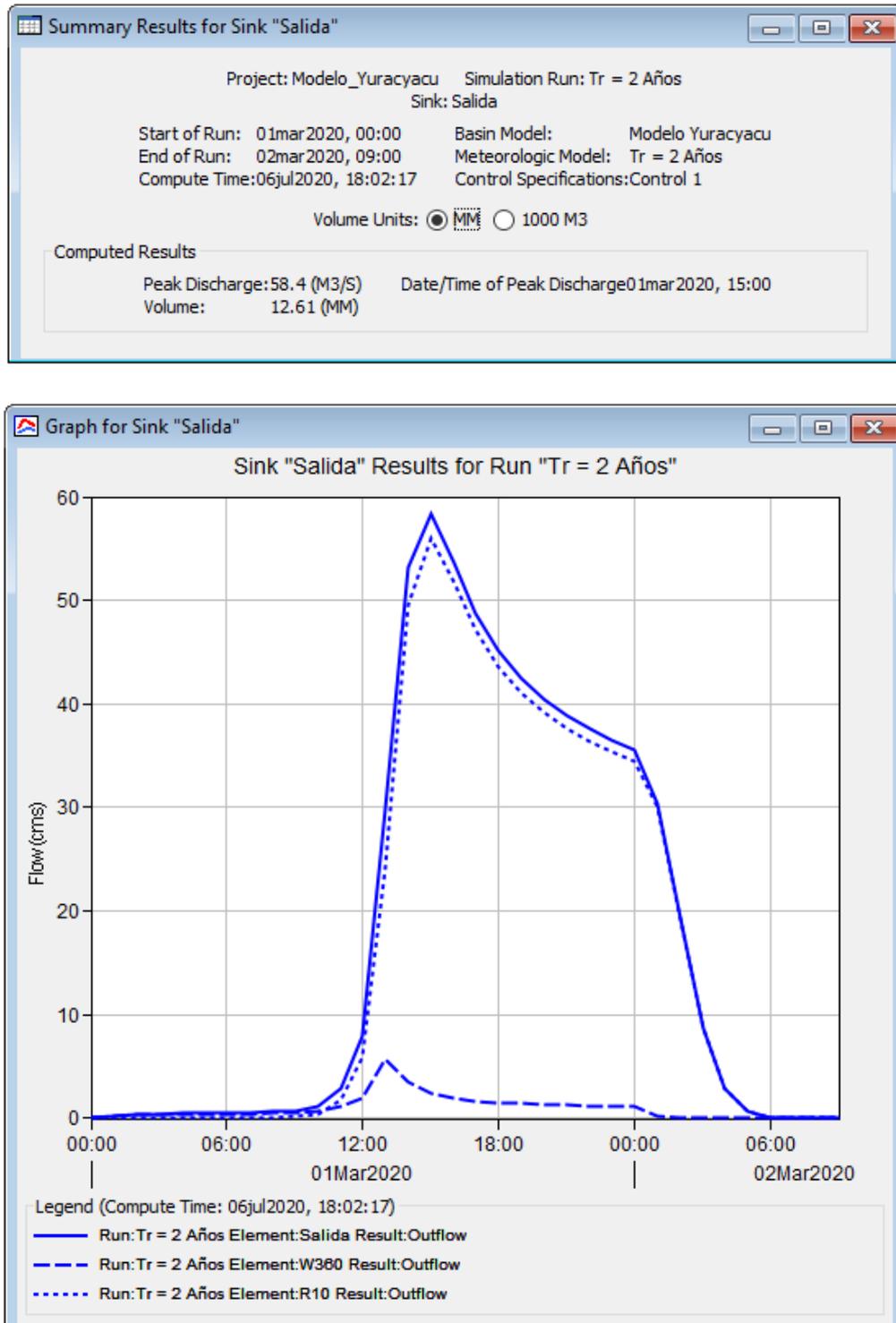


Figura 41. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 2 años. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 5 años, donde el valor máximo del caudal es de 128.9 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

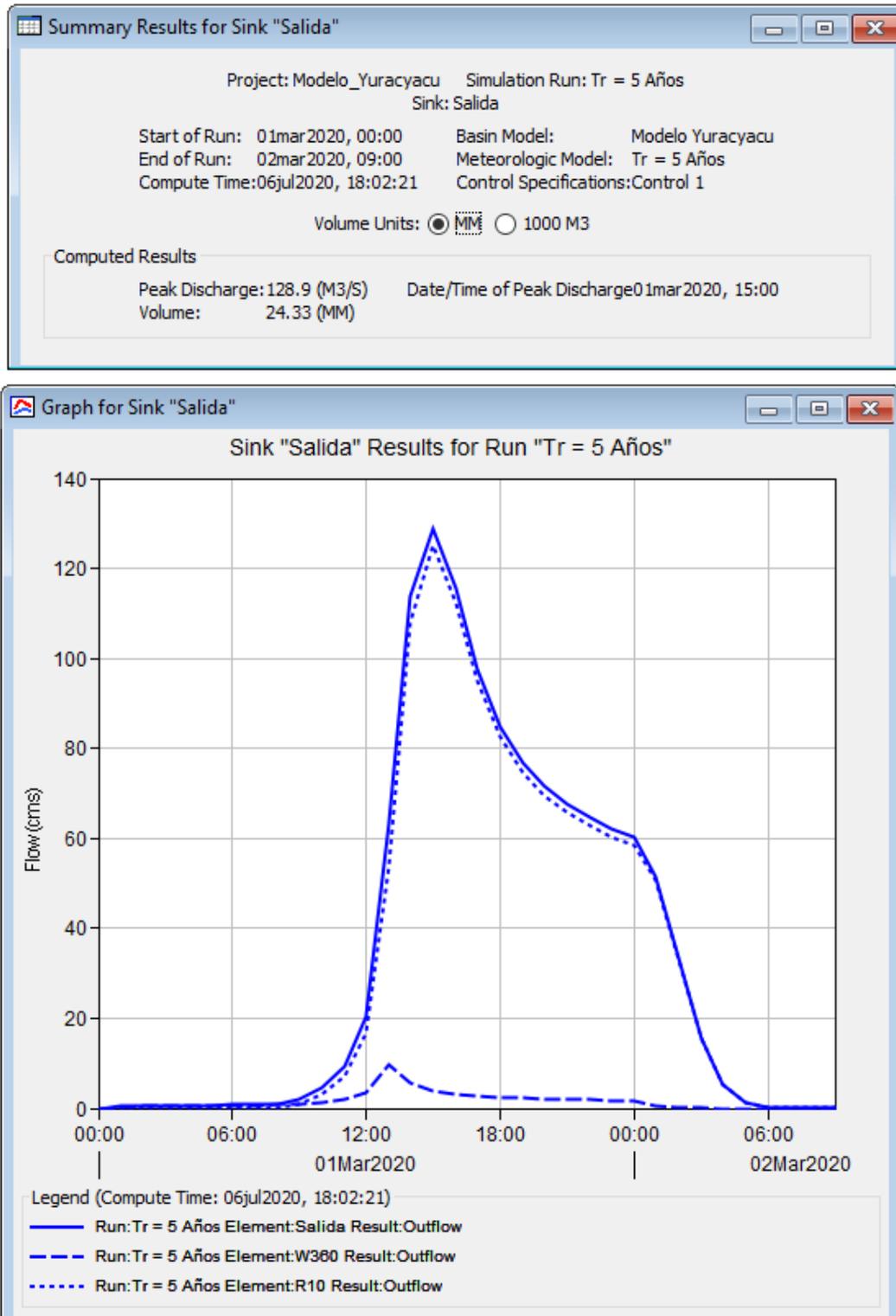


Figura 42. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 5 años. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 43 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 10 años, donde el valor máximo del caudal es de 180.2 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

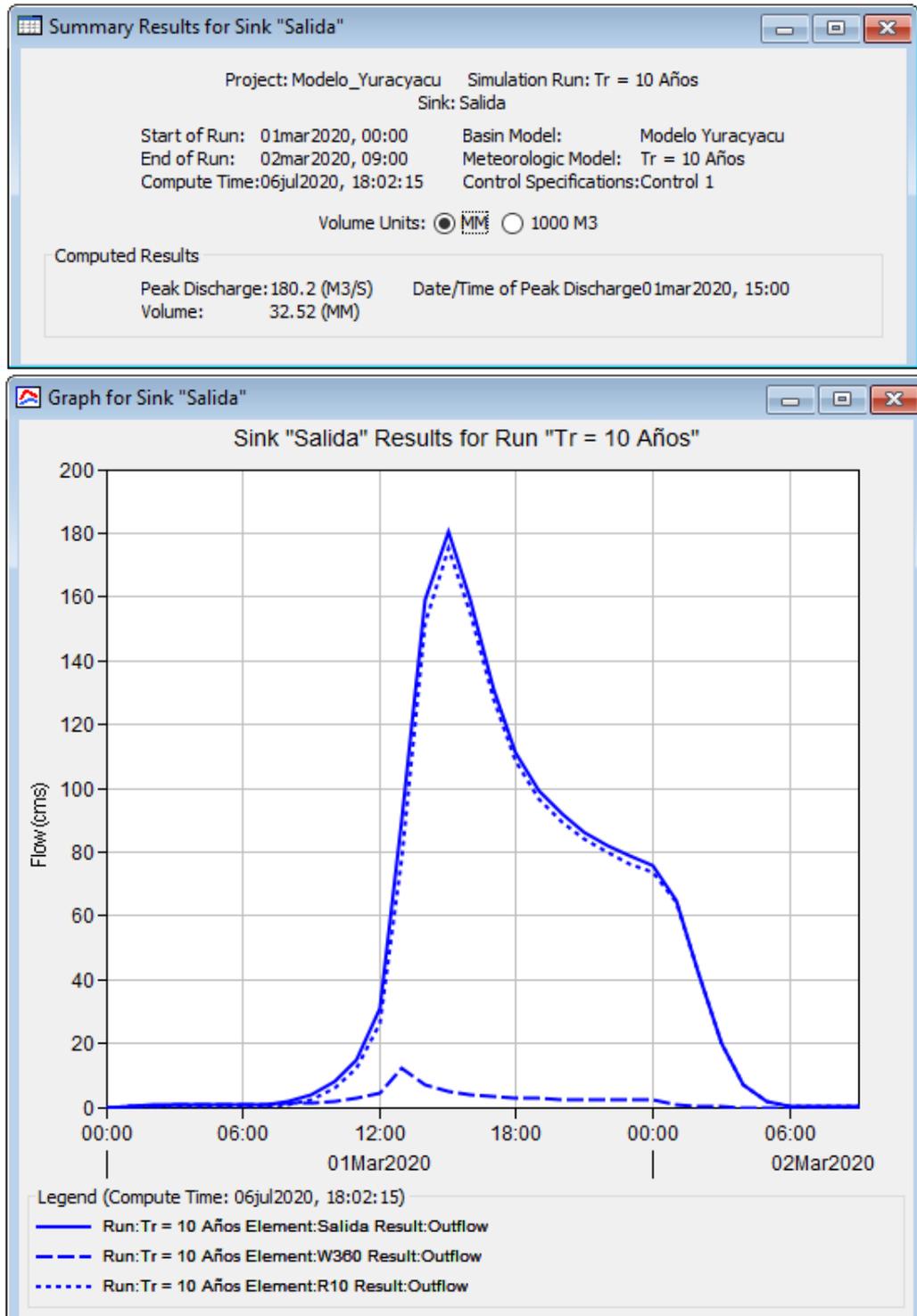


Figura 43. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 10 años. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 44 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 25 años, donde el valor máximo del caudal es de 245.5 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

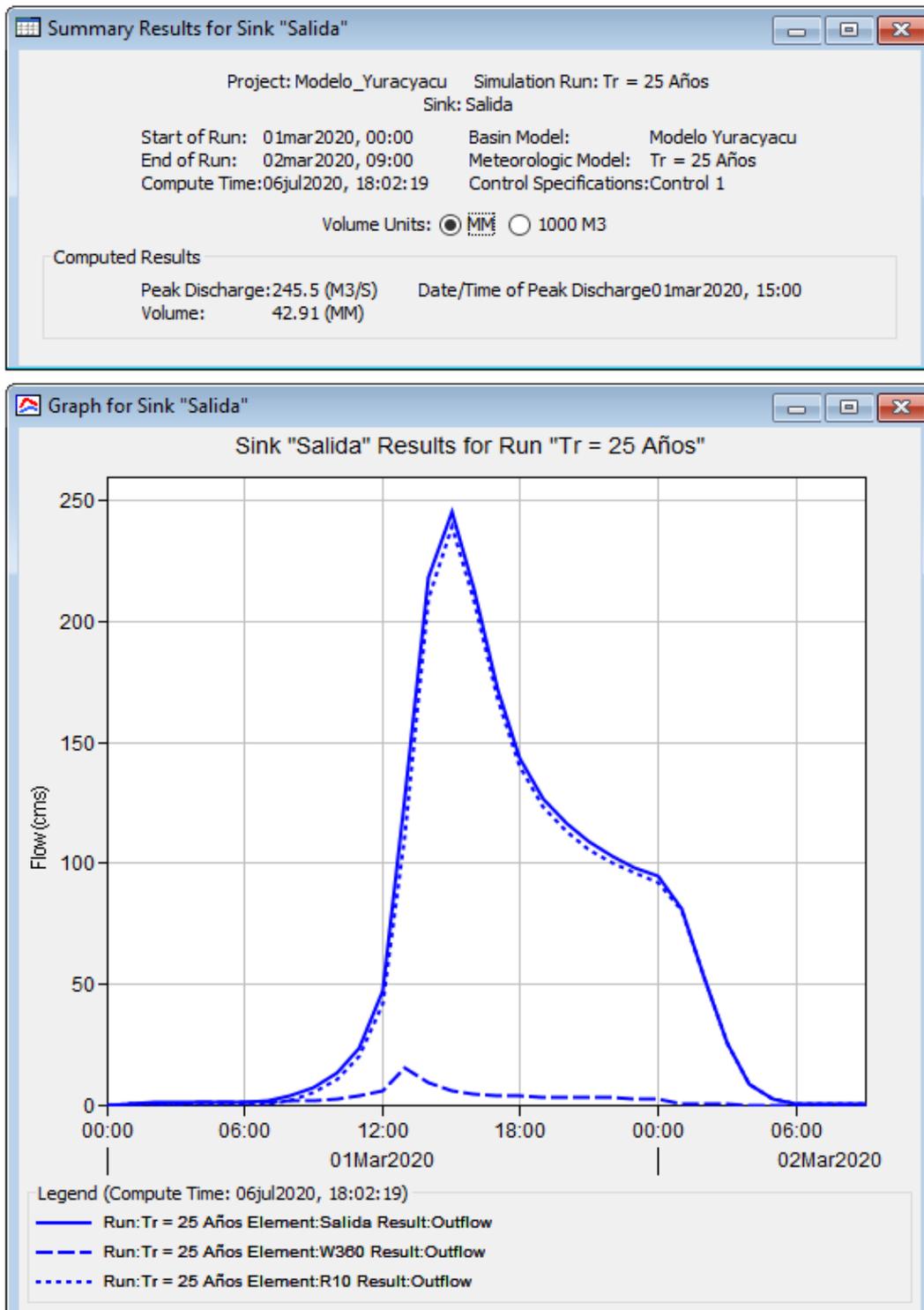


Figura 44. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 25 años. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 45 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 50 años, donde el valor máximo del caudal es de 293.5 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

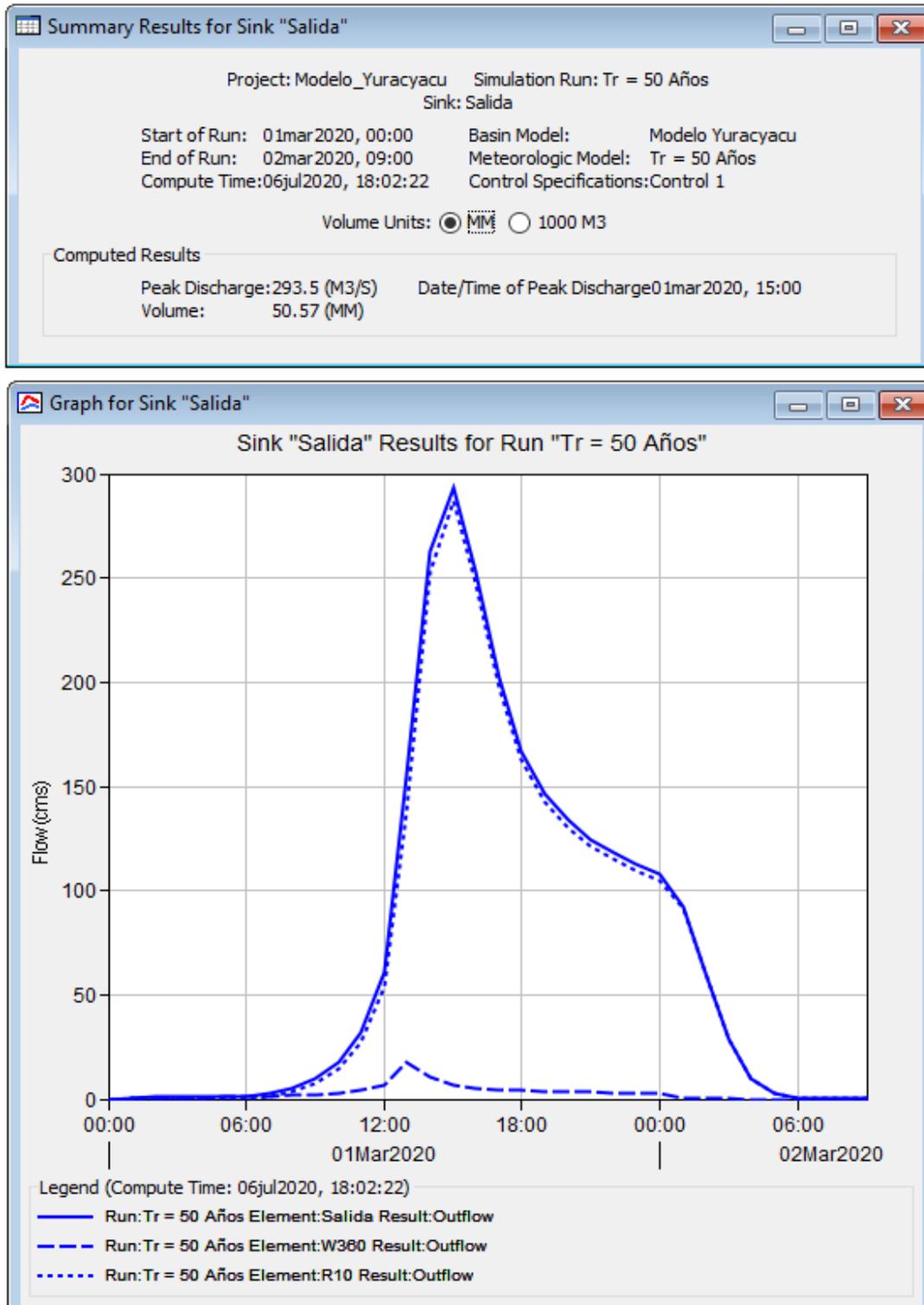


Figura 45. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 50 años. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 46 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 100 años, donde el valor máximo del caudal es de 340.4 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

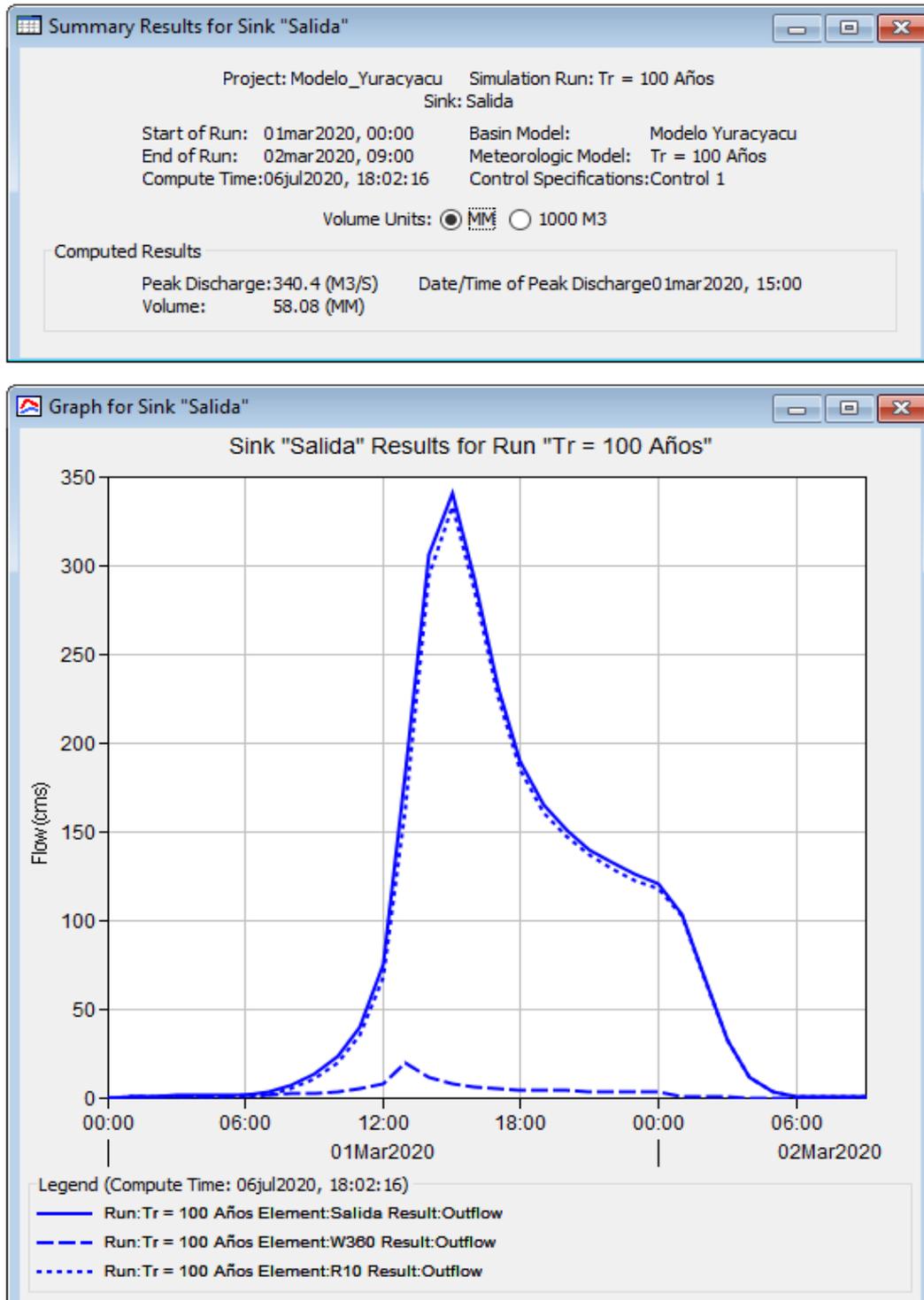


Figura 46. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 100 años. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 47 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 200 años, donde el valor máximo del caudal es de 386.4 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

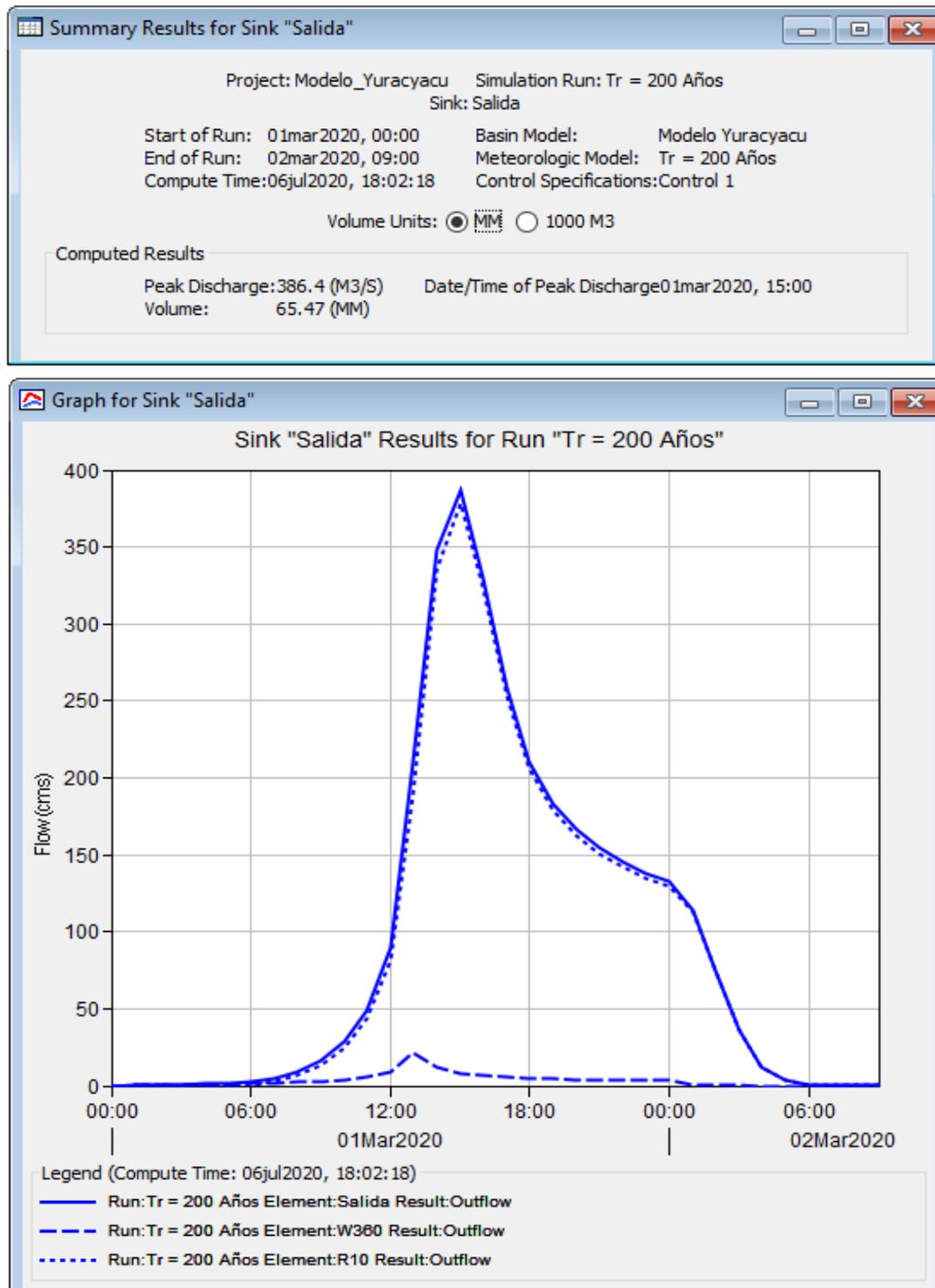


Figura 47. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 200 años. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 48 muestra el hidrograma de salida para el periodo de retorno de 500 años, donde el valor máximo del caudal es de 445.7 m³/s y ocurre a las 15:00 horas de iniciada la simulación.

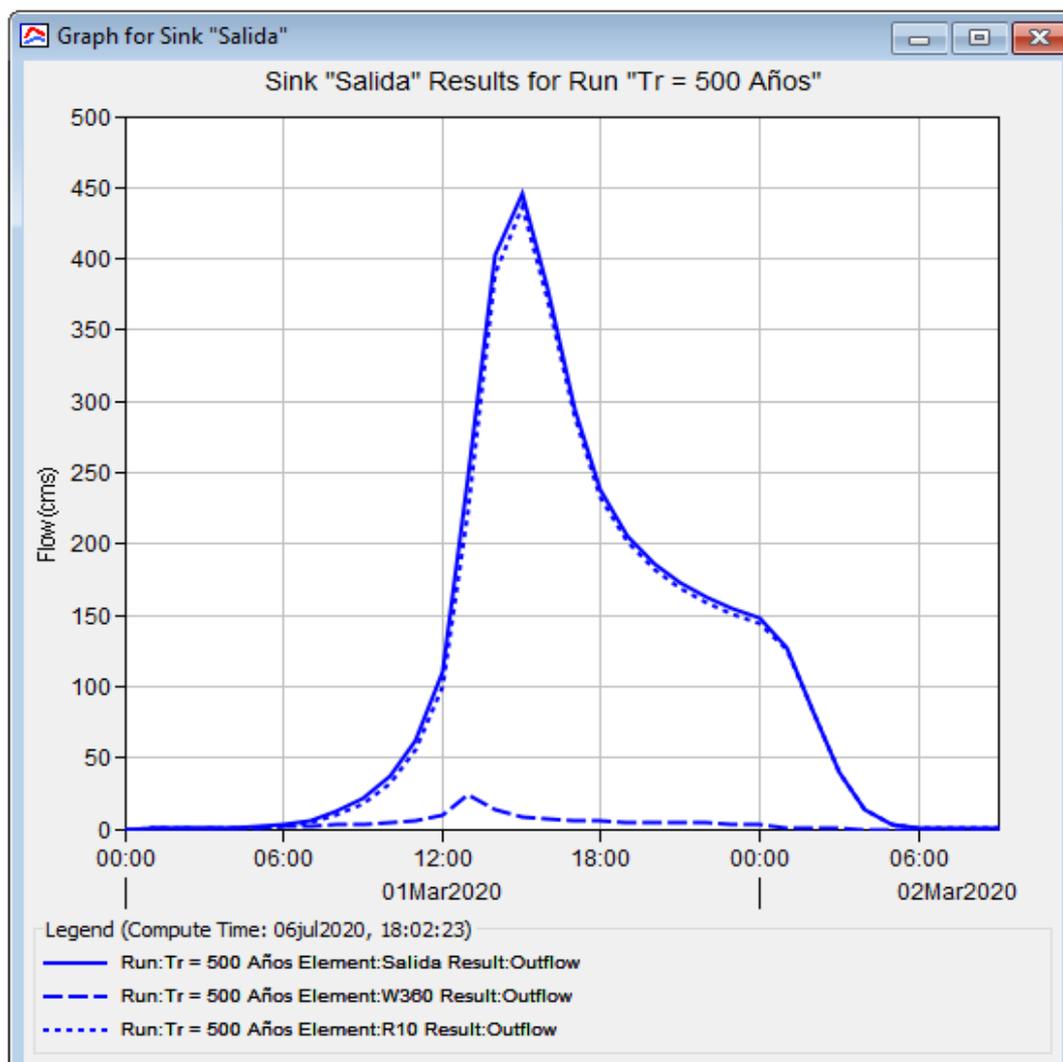
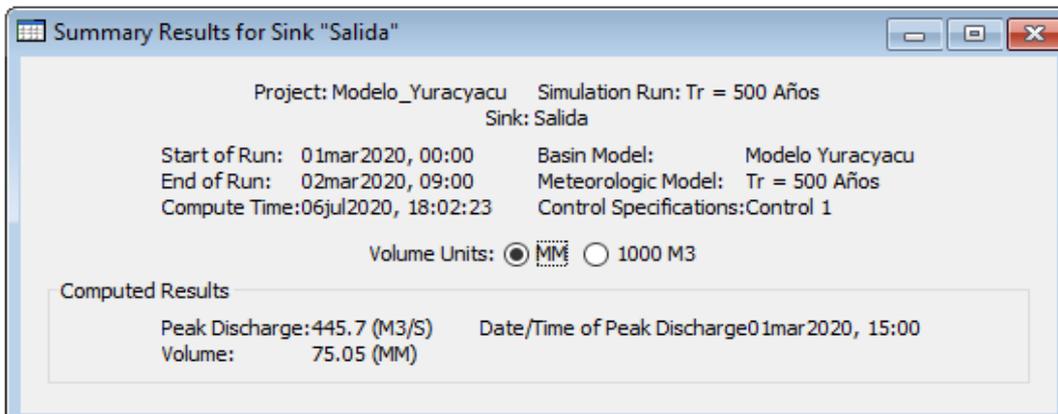


Figura 48. Gráfico y Tabla resumen del Hidrograma Tr 500 años. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 27 se detalla el resumen de los hidrogramas por cada periodo de retorno.

Tabla 27

Caudales máximos en el tramo de estudio

Hidrograma de Crecida	
Tiempo de Retorno	Caudal Máximo
(años)	(m³/s)
2	58.4
5	128.9
10	180.2
25	245.5
50	293.5
100	340.4
200	386.4
500	445.7

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Perfiles hidráulicos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

3.4.1. Parámetros hidráulicos

En la Figura 49 se presenta la superficie y la cota máxima del nivel de agua para cada Tr del tramo en estudio, donde se muestra el perfil longitudinal del lecho del río y sobre esta superficie están los perfiles hidráulicos simulados para cada Tr. El nivel más bajo corresponde al perfil de Tr de 2 años, superior a este el de 5 años y así sucesivamente hasta alcanzar el máximo perfil correspondiente al Tr de 500 años. Además, en el Apéndice 29 se muestra las secciones transversales a progresivas de 50 m, identificándose los niveles de elevación de agua para cada Tr.

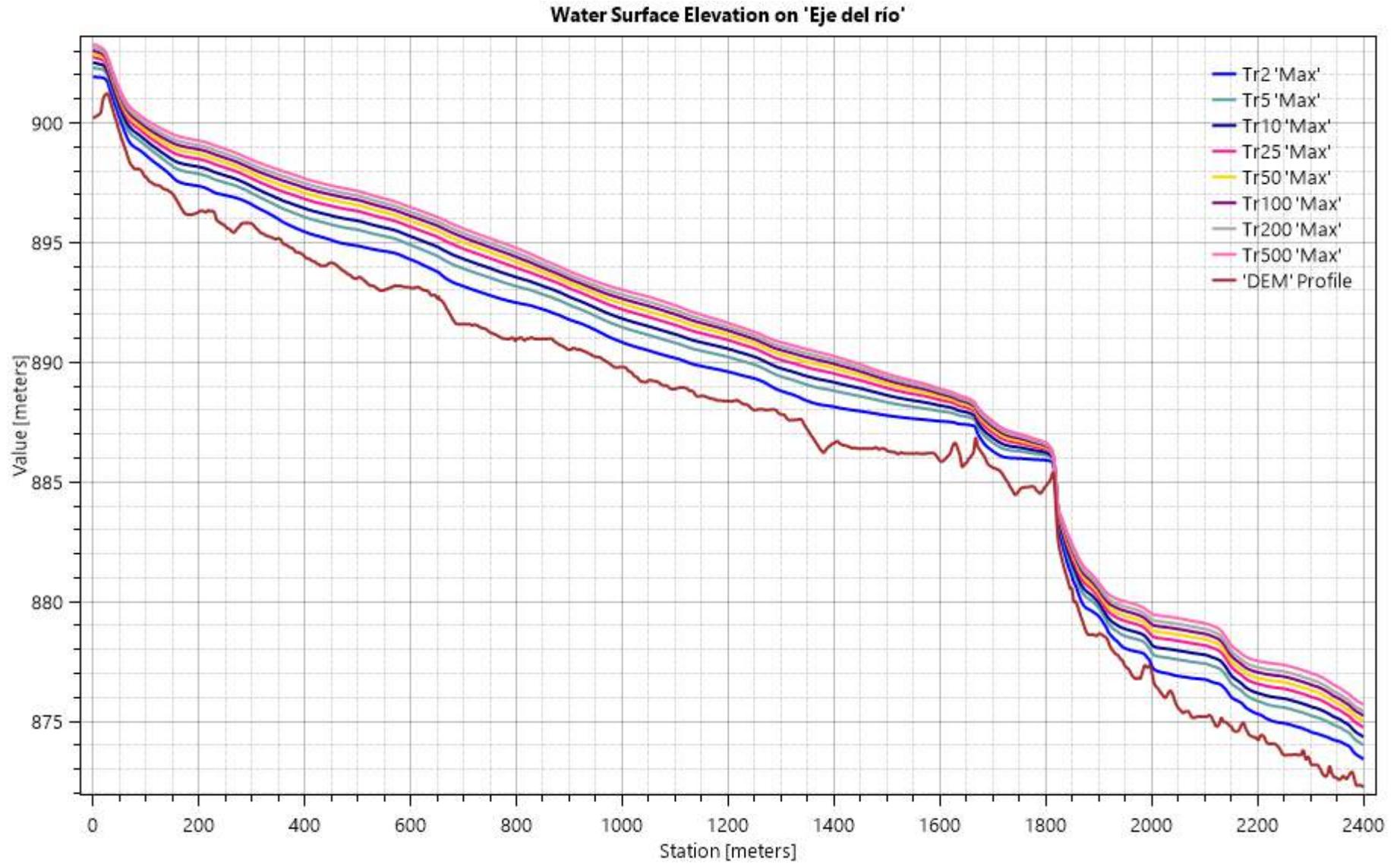


Figura 49. Perfil hidráulico del tramo de estudio por cada periodo de retorno. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Calado de flujo

En la Figura 50 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 2 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 2.308 m.



Figura 50. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 2 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 5 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 2.986 m.



Figura 51. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 5 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 52 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 10 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 3.358 m.



Figura 52. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 10 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 53 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 25 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 3.748 m.



Figura 53. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 25 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 54 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 50 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 3.988 m.



Figura 54. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 50 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 55 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 100 años, cuyo rango de calado varía entre 0 - 4.193 m.

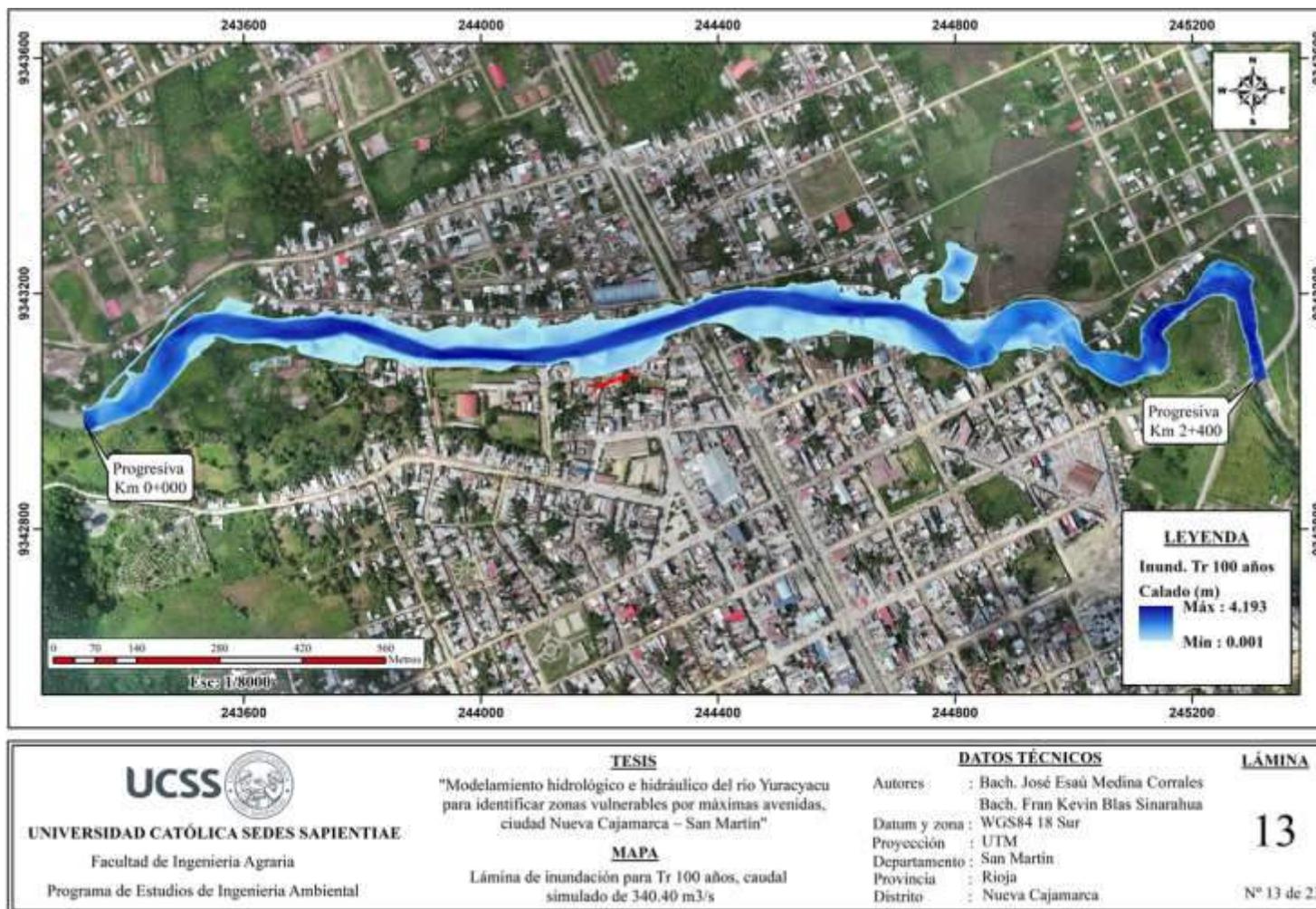


Figura 55. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 100 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 56 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 200 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 4.370 m.

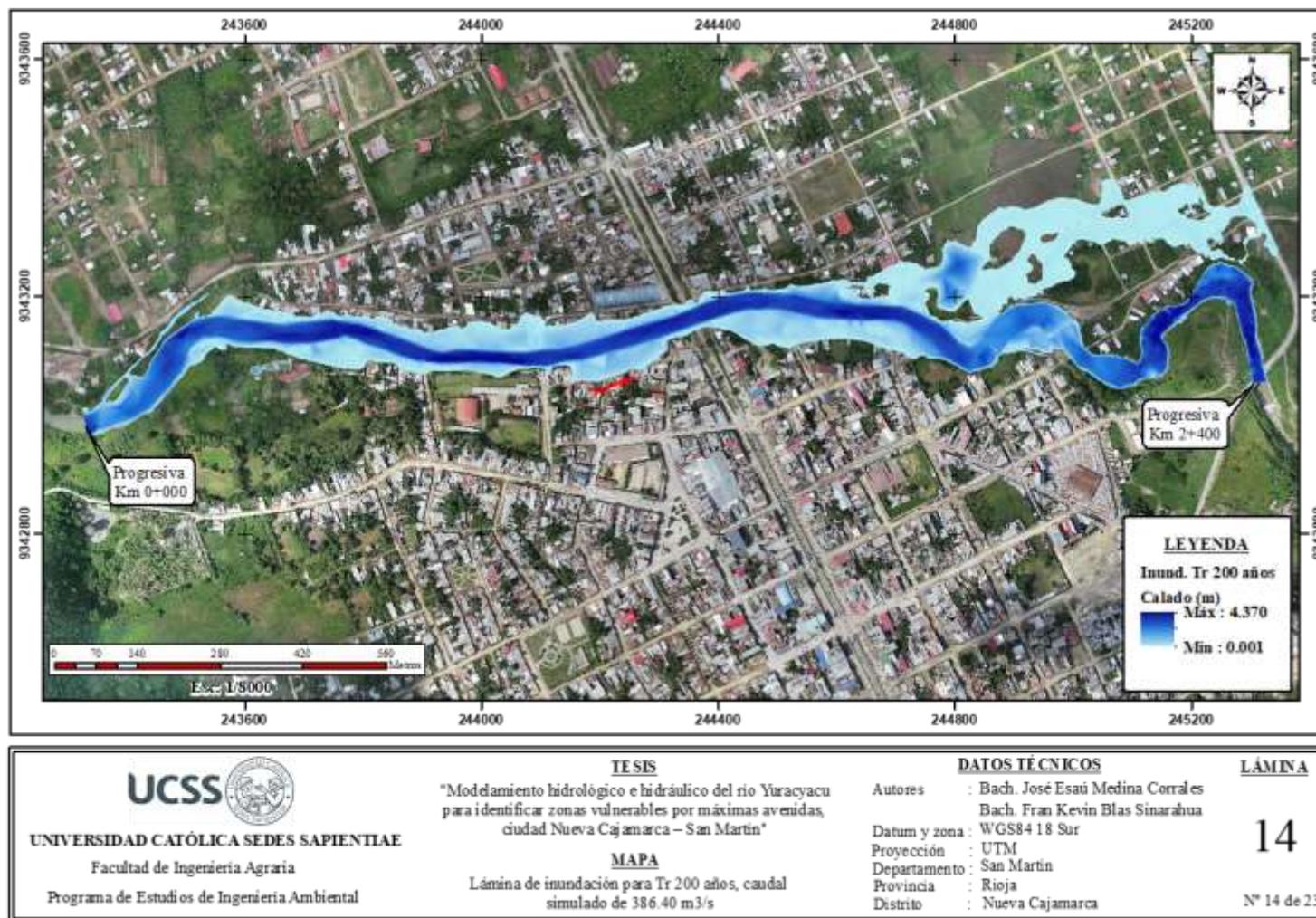


Figura 56. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 200 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 57 se presenta la lámina de inundación para el perfil hidráulico Tr 500 años, cuyo rango de calado varía entre 0 – 4.567 m.

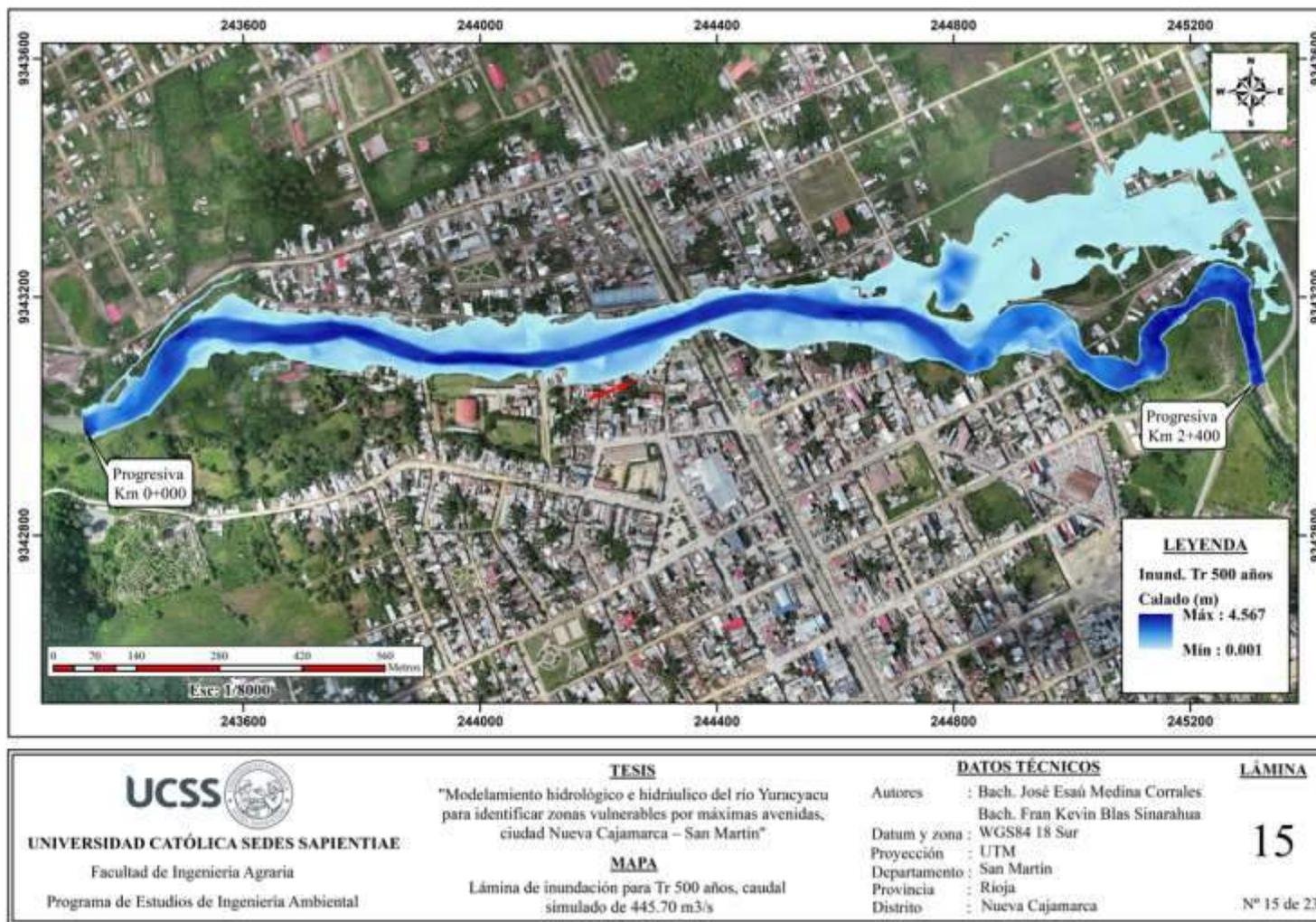


Figura 57. Mapa de profundidades de nivel de agua, Tr 500 años. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Velocidad del flujo

En la Figura 58 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 2 años, cuyo rango varía de 0 a 5.121 m/s.



Figura 58. Mapa de lámina de velocidades, Tr 2 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 59 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 5 años, cuyo rango varía de 0 – 6.849 m/s.

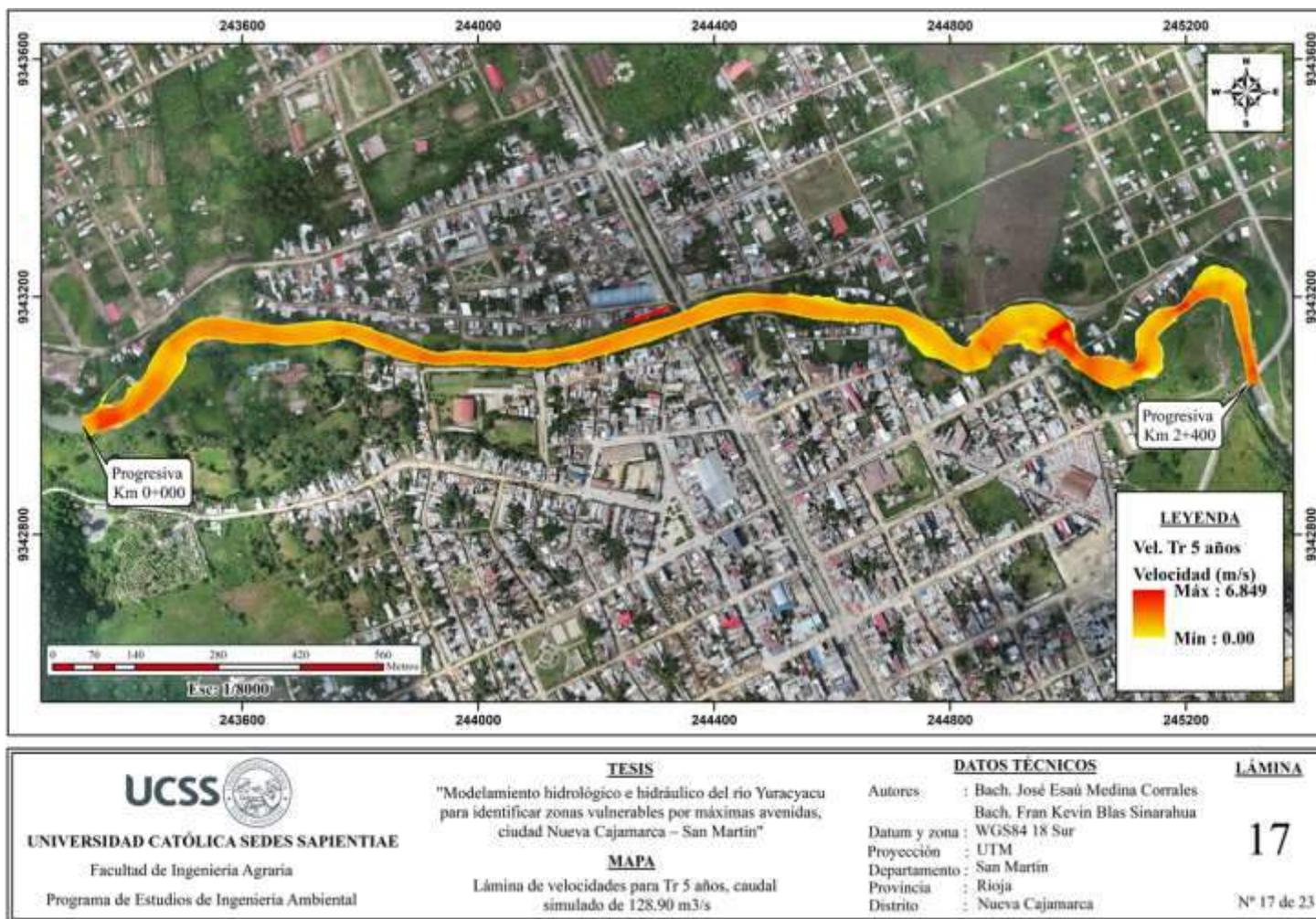


Figura 59. Mapa de lámina de velocidades, Tr 5 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 60 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 10 años, cuyo rango varía de 0 – 7.579 m/s.



Figura 60. Mapa de lámina de velocidades, Tr 10 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 61 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 25 años, cuyo rango varía de 0 – 8.250 m/s.



Figura 61. Mapa de lámina de velocidades, Tr 25 años. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 62 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 50 años, cuyo rango varía entre 0 – 8.648 m/s.

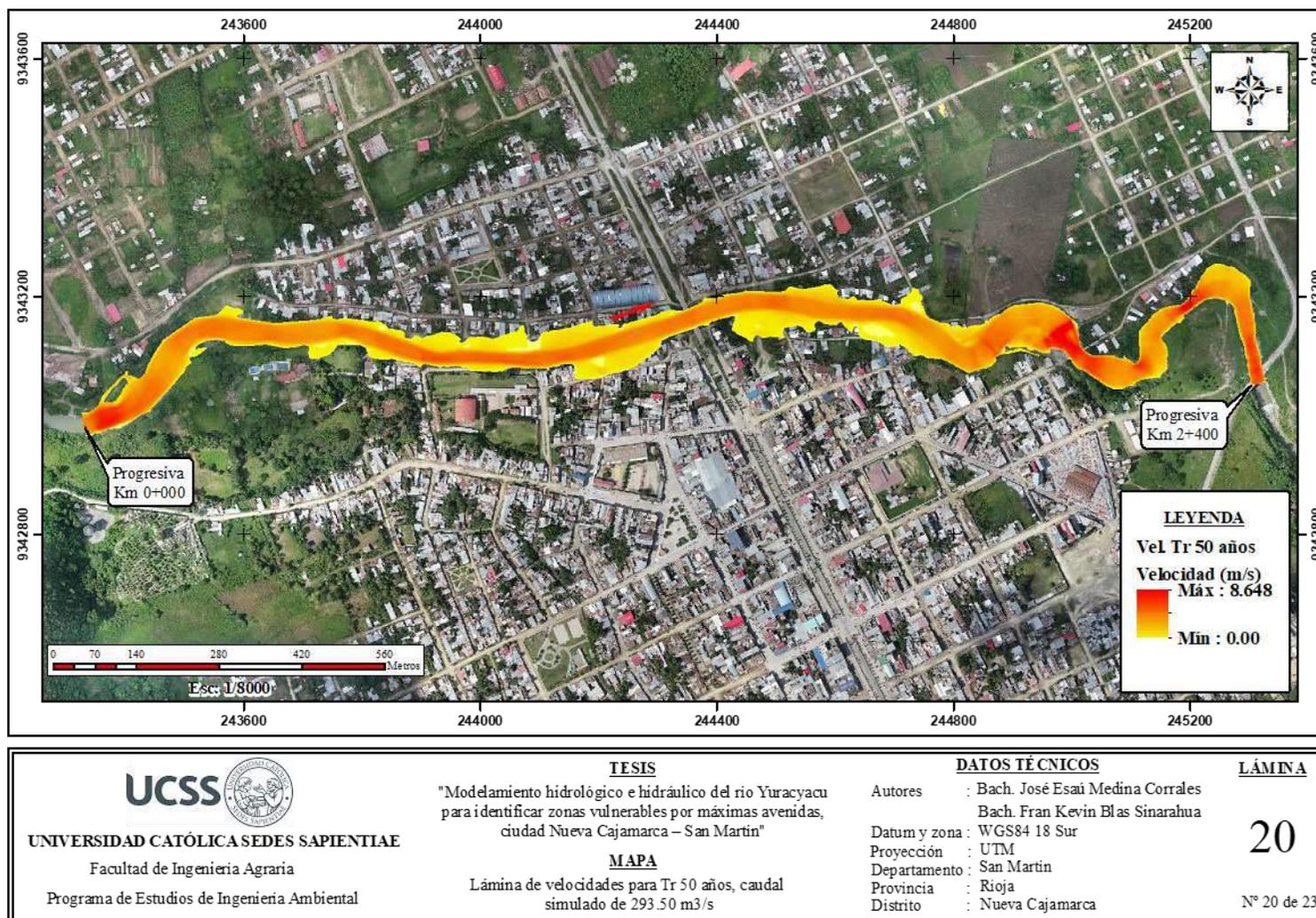


Figura 62. Mapa de lámina de velocidades, Tr 50 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 63 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 100 años, cuyo rango varía de 0 – 9.009 m/s.

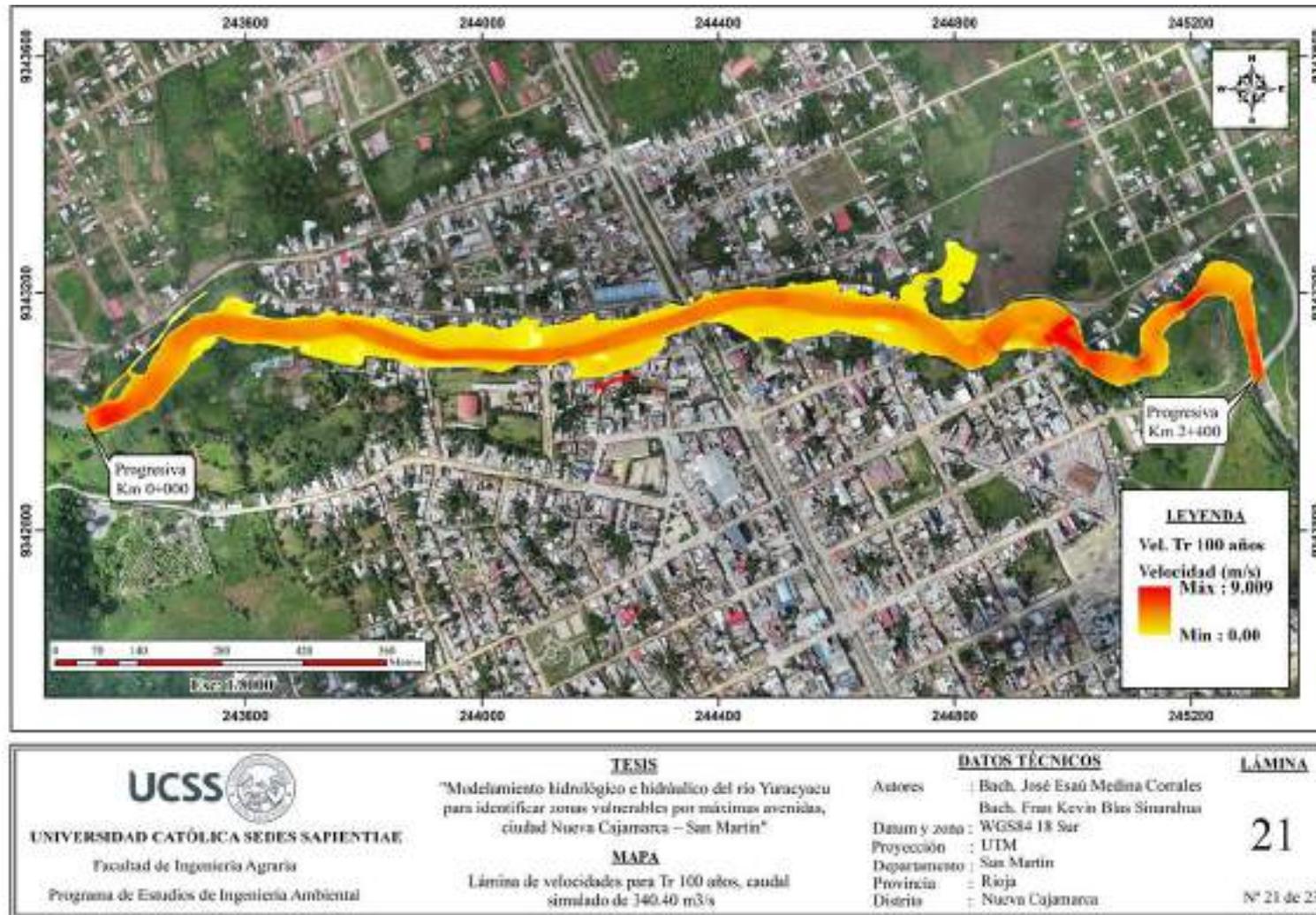


Figura 63. Mapa de lámina de velocidades, Tr 100 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 64 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 200 años, cuyo rango varía de 0 – 9.243 m/s.

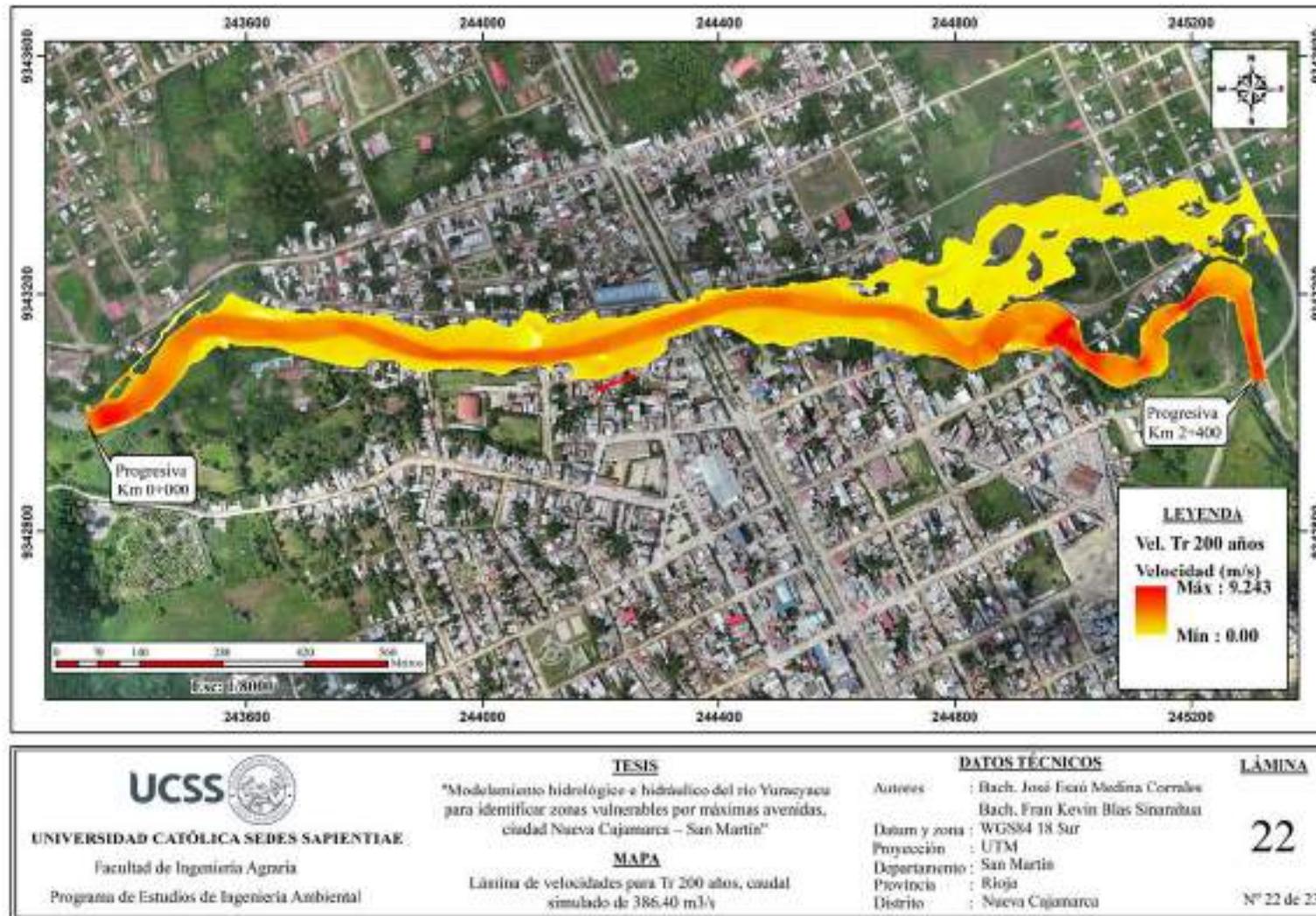


Figura 64. Mapa de lámina de velocidades, Tr 200 años. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 65 se presenta la lámina de velocidad para el perfil hidráulico Tr de 500 años, cuyo rango varía de 0 – 9.590 m.

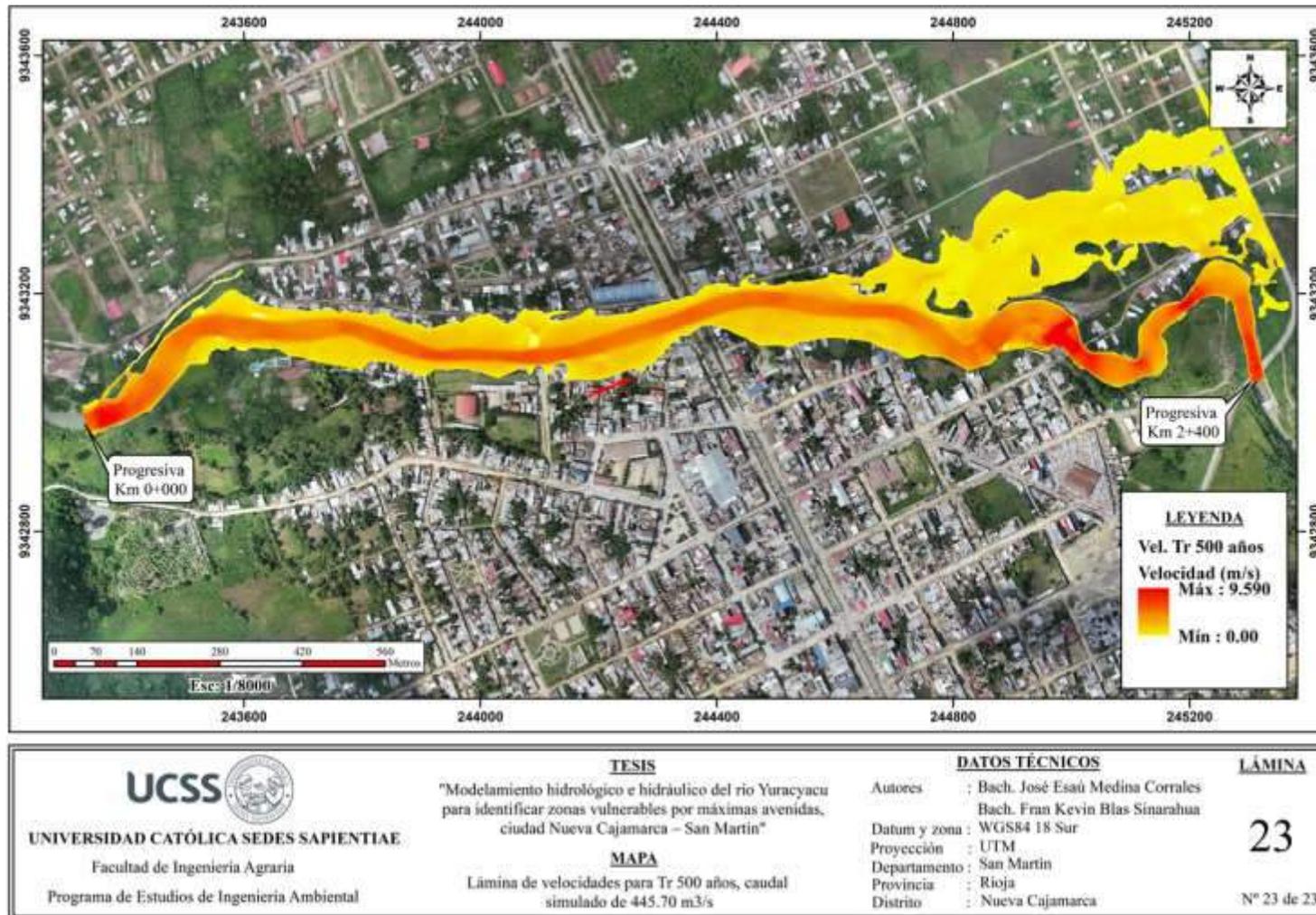


Figura 65. Mapa de lámina de velocidades, Tr 500 años. Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Parámetro hidráulico de calado del flujo

En la Tabla 28 se presenta los parámetros de tirante del flujo para cada progresiva en función a los tiempos de retorno. La Figura 66 muestra el comportamiento de la variación del calado del flujo.

Tabla 28

Parámetros de calado de Flujo

Progresiva km	CALADO DEL FLUJO (m)							
	Tiempo de retorno (años)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0+000	1.732	2.113	2.327	2.558	2.708	2.841	2.965	3.105
0+050	0.595	0.893	1.073	1.286	1.419	1.540	1.654	1.788
0+100	0.918	1.313	1.533	1.775	1.938	2.090	2.232	2.403
0+150	0.706	1.157	1.431	1.741	1.948	2.134	2.302	2.498
0+200	1.066	1.578	1.877	2.196	2.410	2.608	2.771	2.972
0+250	1.296	1.824	2.120	2.448	2.663	2.856	3.029	3.225
0+300	0.803	1.274	1.561	1.888	2.105	2.299	2.469	2.666
0+350	0.807	1.338	1.665	2.032	2.273	2.485	2.666	2.876
0+400	1.053	1.671	2.029	2.423	2.676	2.892	3.078	3.278
0+450	0.940	1.589	1.960	2.364	2.621	2.836	3.014	3.215
0+500	1.339	2.007	2.382	2.792	3.048	3.262	3.437	3.635
0+550	1.632	2.258	2.615	3.010	3.258	3.464	3.632	3.828

Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

Progresiva km	CALADO DEL FLUJO (m)							
	Tiempo de retorno (años)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0+600	1.193	1.798	2.157	2.552	2.802	3.007	3.182	3.371
0+650	1.113	1.770	2.155	2.569	2.825	3.033	3.033	3.396
0+700	1.586	2.326	2.730	3.156	3.417	3.631	3.802	3.998
0+750	1.545	2.280	2.678	3.093	3.345	3.553	3.731	3.919
0+800	1.518	2.207	2.584	2.987	3.229	3.426	3.603	3.802
0+850	1.231	1.854	2.203	2.569	2.786	2.969	3.127	3.309
0+900	1.255	1.864	2.208	2.574	2.779	2.953	3.101	3.274
0+950	1.112	1.703	2.043	2.407	2.626	2.811	2.969	3.152
1+000	1.030	1.660	2.018	2.408	2.645	2.847	3.024	3.223
1+050	1.238	1.885	2.248	2.644	2.885	3.096	3.274	3.481
1+100	1.282	1.919	2.278	2.666	2.909	3.113	3.286	3.485
1+150	1.239	1.878	2.234	2.612	2.847	3.041	3.199	3.381
1+200	1.227	1.838	2.181	2.548	2.772	2.950	3.096	3.261
1+250	1.309	1.884	2.214	2.565	2.778	2.951	3.093	3.254
1+300	0.978	1.584	1.924	2.281	2.503	2.689	2.841	3.013
1+350	1.209	1.877	2.235	2.608	2.838	3.031	3.192	3.360
1+400	1.513	2.184	2.539	2.902	3.125	3.315	3.465	3.627
1+450	1.554	2.178	2.507	2.842	3.046	3.216	3.355	3.503
1+500	1.469	2.020	2.313	2.611	2.792	2.942	3.072	3.209
1+550	1.458	1.948	2.216	2.489	2.650	2.789	2.905	3.031

Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

CALADO DEL FLUJO (m)								
Progresiva	Tiempo de retorno (años)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
1+600	1.647	2.075	2.307	2.534	2.681	2.793	2.900	3.009
1+650	1.596	1.923	2.109	2.308	2.428	2.529	2.624	2.721
1+700	0.692	1.046	1.242	1.458	1.594	1.712	1.819	1.929
1+750	1.317	1.616	1.778	1.960	2.062	2.161	2.247	2.349
1+800	1.072	1.294	1.407	1.530	1.608	1.678	1.724	1.794
1+850	0.577	0.960	1.149	1.375	1.553	1.692	1.824	1.958
1+900	0.748	1.096	1.296	1.521	1.680	1.830	1.986	2.149
1+950	0.751	1.267	1.563	1.882	2.113	2.312	2.495	2.710
2+000	0.253	0.791	1.126	1.495	1.761	1.984	2.189	2.421
2+050	1.335	2.021	2.399	2.789	3.068	3.301	3.509	3.751
2+100	1.549	2.214	2.580	2.974	3.230	3.456	3.661	3.898
2+150	1.238	1.816	2.142	2.504	2.745	2.964	3.161	3.402
2+200	1.081	1.611	1.951	2.335	2.591	2.811	3.017	3.286
2+250	1.325	1.984	2.359	2.769	3.037	3.275	3.486	3.762
2+300	1.312	1.977	2.373	2.780	3.047	3.269	3.494	3.771
2+350	1.563	2.168	2.511	2.892	3.143	3.368	3.562	3.827
2+400	1.176	1.765	2.107	2.507	2.765	2.993	3.165	3.454

Fuente: Elaboración propia.

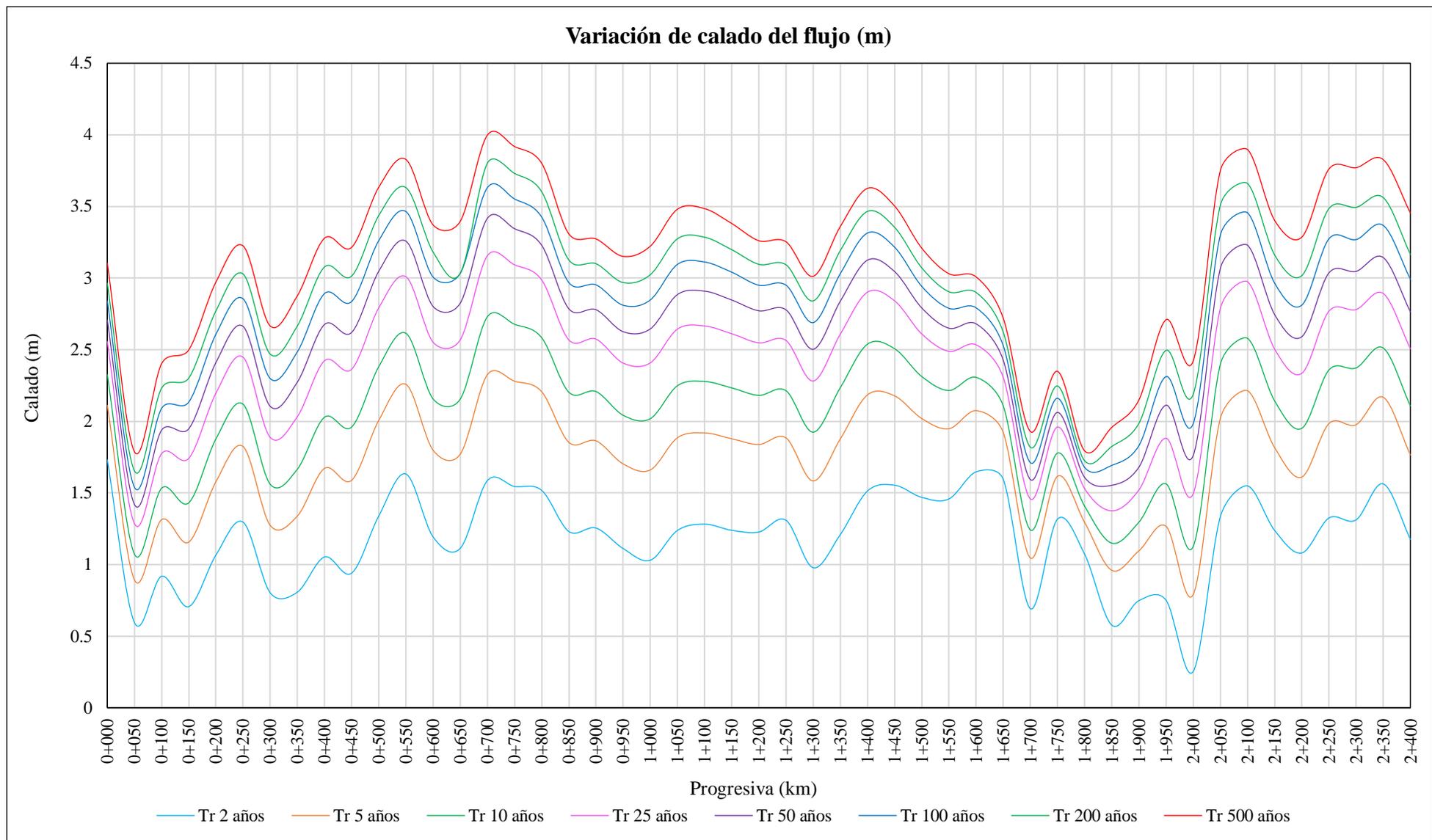


Figura 66. Variación del calado de flujo río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

3.4.5. Parámetro hidráulico de velocidades del flujo

En la Tabla 29 se presenta los parámetros de velocidades del flujo para cada progresiva en función a los tiempos de retorno. La Figura 67 muestra el comportamiento de la variación de velocidades del flujo.

Tabla 29

Parámetros de velocidades de flujo

VELOCIDADES DEL FLUJO (m/s)								
Progresiva km	Tiempo de retorno (años)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0+000	1.060	2.275	2.820	3.416	3.803	4.148	4.464	4.790
0+050	4.097	5.857	6.473	7.071	7.428	7.732	8.002	8.269
0+100	2.991	4.108	4.508	4.876	5.076	5.234	5.371	5.506
0+150	2.729	3.471	3.699	3.940	4.092	4.231	4.370	4.529
0+200	1.530	2.235	2.511	2.815	2.999	3.158	3.302	3.447
0+250	1.951	3.057	3.483	3.916	4.181	4.411	4.605	4.785
0+300	2.199	3.270	3.647	4.012	4.231	4.423	4.595	4.763
0+350	2.424	3.220	3.487	3.756	3.927	4.091	4.255	4.426
0+400	2.036	3.052	3.419	3.797	4.030	4.244	4.451	4.661
0+450	1.958	2.648	2.927	3.222	3.421	3.611	3.784	3.947
0+500	1.639	2.587	2.986	3.356	3.605	3.818	3.994	4.158
0+550	1.699	2.846	3.277	3.708	3.972	4.213	4.409	4.586
0+600	2.270	3.366	3.747	4.129	4.363	4.553	4.725	4.897

Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

Progresiva	VELOCIDADES DEL FLUJO (m/s)							
	km	Tiempo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	200	500
0+650	2.655	3.704	4.116	4.517	4.761	4.963	5.140	5.299
0+700	2.742	4.007	4.488	4.985	5.301	5.538	5.725	5.912
0+750	2.528	3.762	4.246	4.751	5.036	5.224	5.368	5.496
0+800	1.969	3.404	3.977	4.587	4.983	5.302	5.510	5.669
0+850	2.146	3.295	3.741	4.245	4.596	4.922	5.201	5.494
0+900	2.326	3.681	4.180	4.610	4.828	5.035	5.215	5.406
0+950	2.454	3.582	3.988	4.391	4.579	4.697	4.781	4.846
1+000	2.106	3.086	3.458	3.825	4.007	4.132	4.223	4.317
1+050	2.206	3.155	3.522	3.894	4.113	4.293	4.452	4.604
1+100	1.949	3.077	3.509	3.961	4.249	4.512	4.753	4.991
1+150	1.742	2.726	3.119	3.535	3.810	4.074	4.323	4.571
1+200	1.832	2.889	3.302	3.741	4.036	4.288	4.476	4.663
1+250	2.077	3.335	3.811	4.282	4.588	4.782	4.927	5.067
1+300	1.877	2.852	3.196	3.527	3.715	3.849	3.960	4.066
1+350	2.316	3.014	3.277	3.545	3.711	3.857	4.003	4.142
1+400	1.816	2.891	3.325	3.795	4.094	4.343	4.535	4.736
1+450	1.545	2.821	3.334	3.879	4.231	4.522	4.766	4.981
1+500	1.498	2.726	3.201	3.695	4.002	4.238	4.407	4.542
1+550	1.177	2.182	2.536	2.911	3.161	3.385	3.578	3.756

Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

VELOCIDADES DEL FLUJO (m/s)								
Progresiva	Tiempo de retorno (años)							
	km	2	5	10	25	50	100	200
1+600	1.084	2.287	2.785	3.294	3.588	3.842	4.028	4.207
1+650	1.286	2.633	3.142	3.617	3.867	4.050	4.220	4.335
1+700	2.177	3.214	3.642	4.098	4.388	4.640	4.862	5.048
1+750	0.827	1.806	2.194	2.603	2.863	3.092	3.299	3.492
1+800	1.193	2.575	3.023	3.478	3.792	4.089	4.235	4.480
1+850	5.121	6.849	7.579	8.250	8.648	9.009	9.243	9.590
1+900	2.763	4.656	5.344	6.021	6.417	6.742	7.017	7.244
1+950	1.777	2.499	2.783	3.081	3.266	3.425	3.577	3.673
2+000	1.401	3.684	4.109	4.427	4.567	4.658	4.740	4.798
2+050	1.601	2.369	2.673	2.980	3.186	3.368	3.530	3.697
2+100	1.729	2.716	3.088	3.444	3.700	3.926	4.134	4.350
2+150	3.535	5.763	6.573	7.367	7.853	8.326	8.712	8.952
2+200	1.861	2.840	3.048	3.244	3.375	3.517	3.630	3.679
2+250	1.561	2.419	2.744	3.083	3.297	3.482	3.656	3.826
2+300	2.487	3.445	3.828	4.264	4.543	4.778	5.031	5.240
2+350	2.113	3.912	4.573	5.242	5.658	6.013	6.361	6.660
2+400	2.877	4.241	4.762	5.214	5.522	5.795	6.132	6.321

Fuente: Elaboración propia.

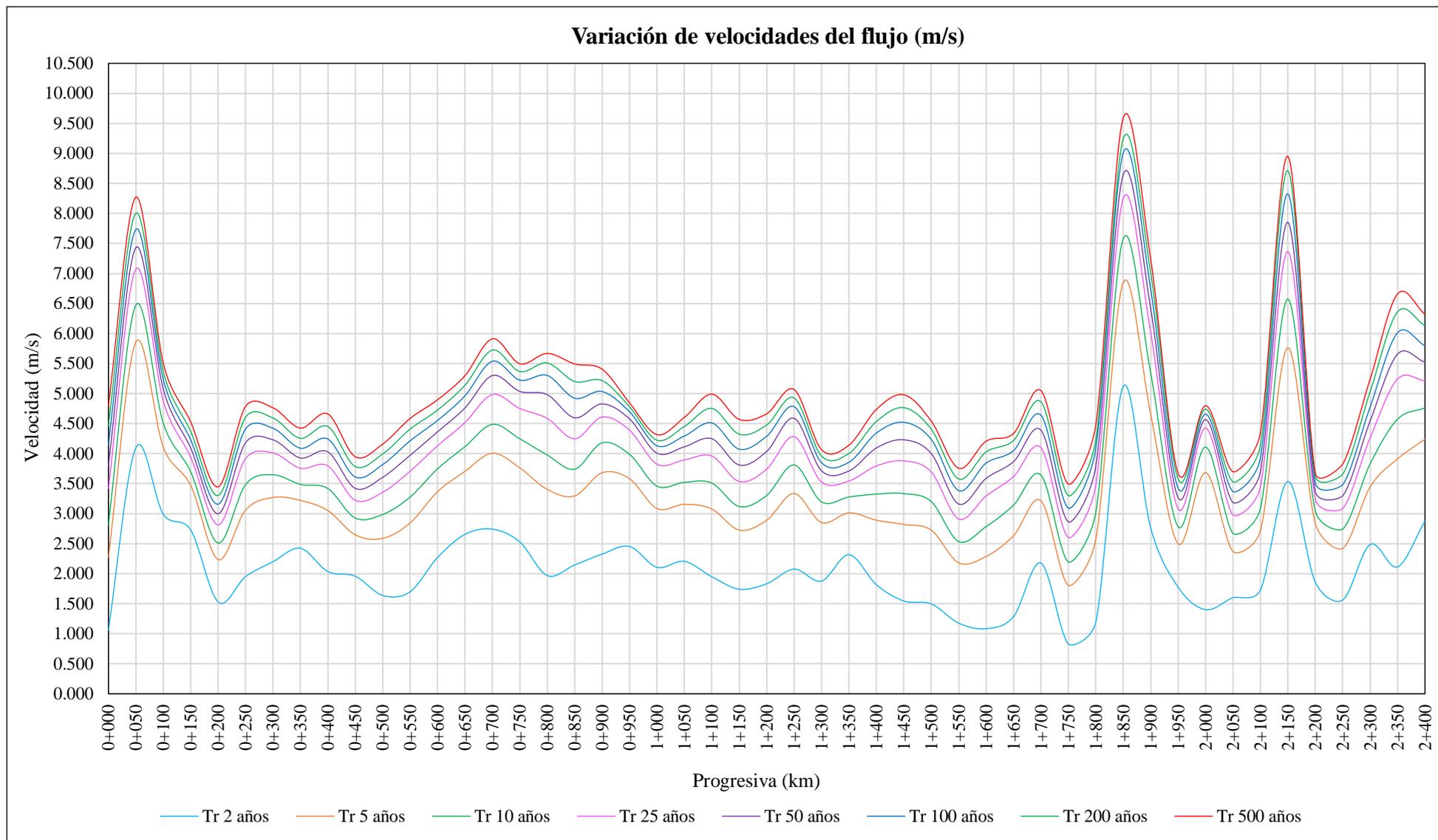


Figura 67. Variación de velocidades del flujo río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

3.4.6. Afectación de viviendas

En la Tabla 30 se muestra la cantidad de viviendas afectadas y áreas inundadas para cada periodo de retorno y por margen del río Yuracyacu. Donde, ante descargas de caudales máximos para Tr de 100, 200 y 500 años las áreas inundadas fueron 6.295 ha, 12.638 ha, 17.228 ha y un total de 102, 178 y 249 viviendas, respectivamente. No obstante, para Tr menores a 50 años existen afectaciones significativas de acuerdo con la magnitud del evento extremo.

Tabla 30

Afectación de viviendas y áreas inundadas

AFECTACIÓN DE VIVIENDAS Y ÁREAS INUNDADAS							
Tiempo de retorno	Caudal máximo calculado	Área inundada		Total	Viviendas afectadas		Total
		ha	ha	ha	N°	N°	N°
Años	m ³ /s	Margen Izq.	Margen Der.	Ambas márgenes	Margen Izq.	Margen Der.	Ambas márgenes
2	58.4	0.006	0.13	0.136	0	0	0
5	128.9	0.127	0.304	0.431	0	0	0
10	180.2	0.304	0.448	0.752	1	0	1
25	245.5	0.837	1.358	2.195	2	18	20
50	293.5	1.808	2.194	4.002	6	44	50
100	340.4	3.094	3.201	6.295	29	73	102
200	386.4	8.93	3.708	12.638	89	89	178
500	445.7	12.952	4.276	17.228	149	100	249

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Parámetros geomorfológicos

4.1.1. Forma

Analizar los parámetros de forma de la unidad hidrográfica, otorga información valiosa sobre el tiempo de concentración; es decir, el tiempo que tarda en recorrer el agua desde la parte de mayor punto topográfico hasta la estación de aforo o punto de interés (Monsalve, 1995). El factor de forma de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu es 0.19, siendo este un valor bajo; lo que indica que se trata de una cuenca rectangular alargada; como consecuencia, las crecidas ante una tormenta son lentas (ANA, 2010) dado a que las intensidades son reducidas en cuencas de igual superficie y alturas de precipitación (Villón, 2002). Sin embargo, para estos casos el ascenso del hidrograma es más rápido, alcanzando un caudal pico menor y con lento retorno al flujo base (Busnelli, 2009 citado por Tapia, 2012). Por otra parte, el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es 1.69, lo que indica que la subcuenca del río Yuracyacu presenta una forma rectangular oblonga, esta característica aumenta relativamente el tiempo de concentración, presentando peligros torrenciales bajos (FAO, 1985, citado por ANA, 2010).

4.1.2. Relieve

Debido a la característica de la curva hipsométrica para la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, se encuentra entre una cuenca en equilibrio (fase de madurez) con tendencia inicial a una cuenca sedimentaria (fase de vejez) (Brieva, 2018). Asimismo, esta edad de la cuenca se puede contrastar de acuerdo con el área que se encuentra por debajo de la curva hipsométrica, cuyo valor se calculó a partir de la integral hipsométrica. El valor del área por debajo de la curva hipsométrica fue 39.97 %, donde Racca (2017) afirma que a valores alrededor de 47 % se trata de una cuenca en fase de equilibrio y a valores por debajo del 30 % a cuencas en fase de vejez. También, a este grupo de parámetros

comprende las altitudes características, incluyendo la altitud media, cuyo valor fue de 1914.57 m s.n.m. Este parámetro incide en el régimen hidrológico influyendo en la precipitación, temperatura y escorrentía (Monsalve, 1995). Además, dentro de estos parámetros está la altitud de frecuencia media, cuyo valor es de 2074.72 m s.n.m que indica que el 50 % del área de la unidad hidrográfica, está situada por sobre esta altitud y el 50 % restante se sitúa por debajo de ella (Villón, 2002). Por otra parte, también a estos parámetros de relieve se suma la altitud más frecuente, estando entre 1800 a 2000 m.s.n.m. que representa el 15.21 % del área total; es decir, en este rango de altitud se sitúa el mayor porcentaje de área de la unidad hidrográfica (SENAMHI, 2016).

Asimismo, dentro de estos parámetros se encuentra el cálculo de pendiente media de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu. Estos resultados varían de acuerdo con la metodología utilizada. Según, el método del índice de pendiente el resultado fue 26.68 %, este valor indica de cierta forma el relieve de la subcuenca y el material granulométrico que se encuentra en el lecho del río y da lugar al estudio de infiltración y la recarga de acuíferos (Villón, 2002). Por otra parte, está la pendiente media por el criterio del rectángulo equivalente cuyo resultado fue 8.16 %, este parámetro relaciona al desnivel de altitud entre el lado mayor del mismo rectángulo equivalente. Mientras que, la pendiente media por el criterio topográfico fue 49.11 %, cuyo método relaciona la diferencia de cotas de cada punto topográfico entre la distancia horizontal entre dos puntos (Garzón, 2017). Por último, se determinó la pendiente media por el criterio de Alvord resultando un valor de 51.77 %. Este método considera los intervalos de altitud dadas por las curvas de nivel, el área parcial situada entre dichos rangos de elevación y la faja media que pasa por las curvas de nivel (Villón, 2002). Cabe mencionar que, el valor de pendiente tanto por el criterio topográfico y de Alvord tienen cierta similitud, y según el D.S. 017-2009-AG la unidad hidrográfica del río Yuracyacu se clasifica como una subcuenca empinada, cuyo rango de pendiente oscila alrededor del 50 %. Este parámetro de pendiente relaciona al tiempo de concentración, mientras mayor sea el valor de pendiente, menor será el tiempo de concentración del escurrimiento de la red hídrica sobre el curso principal del río (SENAMHI, 2016).

4.1.3. Drenaje

La determinación de los parámetros de la red de drenaje permite establecer la eficiencia y la rapidez para evacuar el agua de la cuenca (Villón, 2002). El análisis de la red de drenaje de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu obedece a los siguientes cálculos:

El cálculo de la pendiente media para el curso principal del río que se realizó mediante dos metodologías. Obteniendo 9.926 % por el método de pendiente uniforme, el cual se determinó entre el cociente del desnivel de altitud de la subcuenca en estudio y la longitud total del cauce principal del río (Reyes, 1992). El siguiente método utilizado fue con la ecuación de Taylor y Schwarz, obteniendo un valor de pendiente de 10.07 %, este cálculo de pendiente considera al curso del río formado por una serie de tramos de canales de igual pendiente, sección transversal, longitud e igual tiempo de recorrido (SENAMHI, 2011).

El orden de la corriente a la salida de la unidad hidrográfica en estudio, según el sistema de Strahler es de orden cuatro; es decir, este curso principal aguas arriba recibe aporte de corrientes de orden tres, estas a su vez reciben aporte de cursos de orden dos y este último recibe aportes de afluentes de orden uno (Villón, 2002). Por tanto, el orden a la salida de la cuenca define al orden de toda la red de drenaje (Reyes, 1992).

La longitud de las corrientes de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu fue 120.77 km. Esta longitud, representa a la distancia de recorrido de los cursos de agua desde que nacen hasta la confluencia con otro cauce (SENAMHIM, 2011). Además, la longitud de corrientes está relacionado con la pendiente y el drenaje de la cuenca (Villón, 2002).

La densidad de drenaje para la subcuenca en estudio fue 0.71 km/km^2 , de acuerdo con Delgadillo y Páez (2008), este valor representa una categoría baja. Por tanto, ante un menor valor de densidad, las características de la zona indican una baja estructuración de la red de drenaje, alta resistencia a procesos erosivos, cubierta vegetal bien desarrollado, bajo relieve y suelos muy permeables (ANA, 2010).

El parámetro de frecuencia de ríos fue de 0.36 ríos/km², el cual indica el número de corrientes tanto perennes e intermitentes (Villón, 2002). Además, de este valor depende la máxima o mínima posibilidad de que cualquier flujo de agua encuentre un curso a corto o mayor tiempo posible (SENAMHI, 2011).

La extensión media de escurrimiento fue de 0.35 km, este valor indica la distancia promedio que recorre una corriente de agua hasta llegar a un curso más cercano, luego de haberse producido una precipitación (SENAMHI, 2016). La relación de bifurcación para la red de drenaje en estudio fue 2.45, es decir; que en promedio existe 2.45 veces tantos cursos de un orden como del orden inmediato superior. Por tanto, mientras más denso sea el drenaje de la cuenca, mayor será el índice de bifurcación y, por ende, la respuesta ante las precipitaciones será más rápida (Aparicio, 1989).

El coeficiente de torrencialidad fue 0.26 ríos/km². Los ríos hacen referencia a las corrientes de primer orden; mientras más cursos de primer orden se tenga y el área de drenaje sea pequeña, el coeficiente de torrencialidad será mayor (Romero y López, 1987). Por tanto, un bajo valor de torrencialidad indica baja susceptibilidad de procesos erosivos.

4.2. Coberturas de uso de suelo y Curva Número

Los modelos hidrológicos tratan de representar el comportamiento y la distribución de las precipitaciones y como estas influyen en la generación de caudales dentro de una unidad hidrográfica. Con el fin de explicar el movimiento del agua que llega a la superficie terrestre mediante precipitación, para el presente estudio se optó por aplicar uno de los métodos más utilizados y experimentados de los modelos empíricos de precipitación – escorrentía, siendo el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Este método determina la precipitación efectiva, es decir, la cantidad de agua que genera escurrimiento, dado que no toda la precipitación se convierte en escorrentía directa, parte de esta se infiltra (Aris, 2020), incrementando así la humedad del suelo (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015). El modelo precipitación – escorrentía permite estimar los caudales máximos considerando las pérdidas por infiltración (Carpio, 2018), las abstracciones iniciales del suelo (Sierra, 2018); bajo un parámetro

adimensional denominado Curva Número (CN), cuyo rango de valor está entre 0 y 100; donde el valor de CN igual a 100 se le atribuye a las superficies totalmente impermeables, para superficies naturales CN es mayor o igual que 0, pero menor o igual que 100 y para las superficies donde el escurrimiento es nulo se atribuye un valor de CN igual a 0 (ANA, 2015).

El cálculo de los valores de CN se realizó mediante interpolación, superposición y reclasificación de información tales como: pendientes, cobertura vegetal, usos y tipos del suelo; además, los valores representativos en función a los grupos hidrológicos del suelo. Aris (2020) consideró para la determinación de la Curva Número, la metodología bajo procesamiento GIS a partir de variables como la pendiente, prácticas de cultivo del terreno, la textura de los suelos, usos de los suelos y las condiciones de humedad del suelo. Dado que, el valor de CN se determina en función de la cobertura vegetal, usos y tipos de los suelos (ANA, 2015) y siendo parámetros fundamentales para la transformación de la precipitación total en precipitación efectiva (Aris, 2020); se realizó una clasificación de coberturas (Tabla 31), mediante usos de herramientas de SIG y Teledetección (Chuvienco, 1995). Donde, el mayor porcentaje del total del área con 72.52 % representa a los bosques, 20.57 % a los cultivos (principalmente cafetalero) y 5.37 % a los pastos.

Tabla 31

Clasificación de coberturas de la Subcuenca del río Yuracyacu

Clasificación de Coberturas Subcuenca Yuracyacu		
Descripción	Área (km²)	%
Cultivos	35.176	20.57
Pastos	9.189	5.37
Bosques	124.039	72.52
Suelos sin vegetación	1.373	0.80
Área urbana	0.948	0.55
Río Yuracyacu	0.307	0.18
Total	171.032	100.00

Fuente: Elaboración Propia.

Los usos y la cubierta del suelo de acuerdo con el tratamiento de los cultivos influyen en las condiciones de infiltración, lo que permite identificar los valores de CN de acuerdo al grupo hidrológico del suelo (SCS, 1973).

Como ya se mencionó anteriormente, para la determinación del valor de CN el modelo lluvia – escorrentía incorpora la pendiente de la superficie del área en estudio. Este parámetro muestra una correlación representativa y compleja sobre el comportamiento del flujo que se infiltra, la humedad del suelo y la escorrentía superficial (Villón, 2002).

Ante los resultados del geoprocesamiento, se obtuvieron los valores de CN para cada unidad hidrológica discretizada de la subcuenca del río Yuracyacu. Siendo los valores máximos de CN en los usos de suelo para cultivos y pastos con un valor de 77 y los valores mínimos de CN corresponde a las coberturas boscosas con 58. Por tanto, del total de precipitación que cae sobre las superficies de cultivos y pastos el 77 % se convierte en escorrentía y 23 % se infiltra, y en cuanto a la precipitación caída sobre las cubiertas boscosas 58 % se convierte en precipitación efectiva y el 42 % en infiltración, concordando con el estudio realizado por la ANA (2015), que a valores de CN mayor o igual a 0 y menor de 100 se trata de superficies naturales.

Con la finalidad de estimar la escorrentía que genera la precipitación bajo modelos hidrológicos, el Sistema Nacional de Información de los Recursos Hídricos (SNIRH) de la Autoridad Nacional del Agua en el año 2015 determinó los valores de CN para todo el territorio peruano. Por tanto, en una ponderación de área entre los valores promedios de CN calculados frente a los valores medios generados por el SNIRH para condiciones normales de antecedentes de humedad, existe cierta diferencia. El valor promedio de CN calculado para toda la subcuenca del río Yuracyacu fue de 64.178 y el valor generado por el SNIRH fue de 71.383, existiendo una diferencia de 7.2. En la Figura 68 se muestra la comparación entre los valores de CN determinados por el ANA y los valores calculados para la presente de investigación.

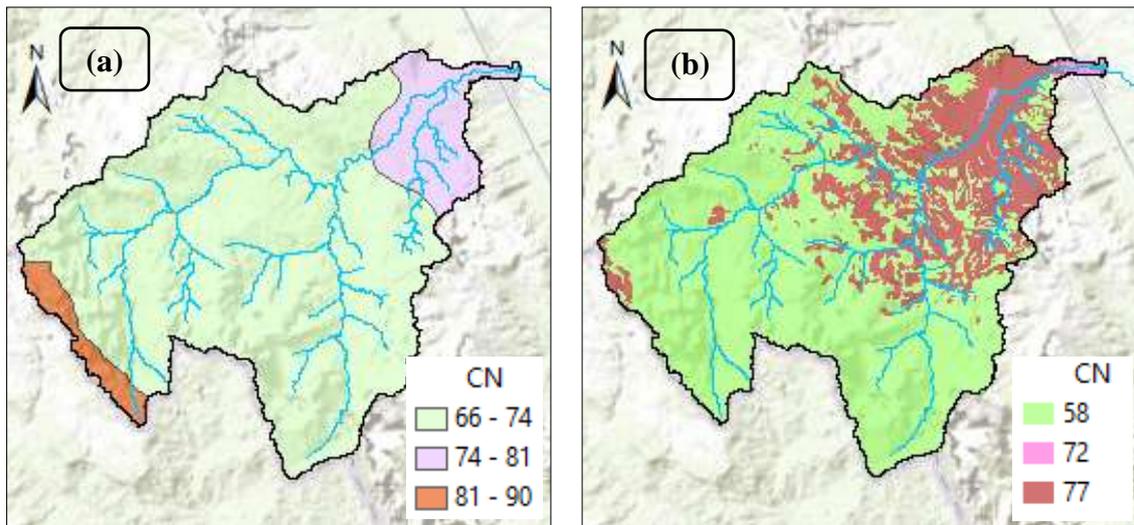


Figura 68. ^(a) Valores de CN determinado por el ANA y ^(b) Valores de CN calculados subcuenca río Yuracyacu. Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta, que el Número de Curva es muy sensible a la calibración de los modelos hidrológicos. Por tanto, para una mejor respuesta hidrológica, es mejor determinar los valores de CN para cada unidad hidrográfica (Aris, 2020), en función a sus características propias tanto de coberturas, usos y componentes edafológicos que represente a la zona (Córdova *et al.*, 2017). Por este motivo, Aris (2020) en su investigación discretizó en siete subcuencas a la cuenca total en estudio. Para este estudio, se discretizó en 22 unidades hidrográficas determinándose el valor de CN para cada una de estas.

Por otra parte, es importante mencionar que los valores de Curva Número pueden cambiar con el paso del tiempo, y pueden alterarse ante ciertos cambios en las cubiertas vegetales y usos de los suelos, disminuyendo así continuamente la retención hídrica. Estos cambios se dan principalmente por las actividades agrícolas y ganaderas. Estos factores no solo alteran, sino que también modifican la composición estructural y disminuyen la macroporosidad del suelo, impidiendo la profundización radicular de las plantas lo que impide la recarga acuíferos; como resultado, la escorrentía es mayor ante las precipitaciones (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015). Además, los procesos de deforestación alteran considerablemente las propiedades hidrológicas del suelo, perdiendo así importantes beneficios que otorgan los bosques antes de ser talados (Lal R, 1996).

4.3. Caudales máximos para los los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años

El modelamiento hidrológico se realizó en base a series de registros históricos de precipitaciones máximas en 24 horas; dado que, no se dispuso de registros de caudales ni estaciones hidrométricas en el río Yuracyacu. Esta metodología guarda relación con investigaciones realizados por Calderón y Montoya (2016), Cardich (2017), Olivares (2018), Sierra (2018) y Guevara (2018); dado que utilizan la precipitación máxima en 24 horas para la generación de caudales máximos y simular eventos extremos.

En la investigación que realizó Cardich (2018), para el modelo hidrológico utilizó 10 estaciones meteorológicas, de las cuales seis de estas se ubicaron dentro de la cuenca del río Lurín y cuatro estaciones cercanas al ámbito de estudio. Para esta investigación, no se dispuso de ninguna estación meteorológica dentro del área de estudio, por lo que se utilizó información pluviométrica de dos estaciones meteorológicas cercanas a la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, siendo estas Rioja y Naranjillo.

Con el fin de valorar la confiabilidad de los registros históricos de precipitación máxima en 24 horas y eliminar cualquier dato dudoso “outliers” (Chow *et al.*, 1994); es decir, datos alejados de la tendencia muestral se utilizó el método Water Resources Council (Buckland, 1957 y Grubbs, 1959 citado por OMM, 2011). Con este método se analizaron los valores de precipitación máxima y mínima de las estaciones meteorológicas de Rioja y Naranjillo; donde, todos los registros históricos de los datos se encontraron dentro del umbral aceptado; por ende, no existen datos dudosos.

Para determinar la prueba de bondad de ajuste y proyectar a diversos periodos de retorno las variables hidrológicas, Frisancho (2015), Quispe y Sullca (2015), Calderón y Montoya (2016), Cardich (2017), Olivares (2018), Sierra (2018), y Guevara (2018), utilizaron modelos probabilísticos que a partir del cálculo de una serie de parámetros que componen estos modelos, permiten determinar la prueba de bondad de ajuste; es decir, comparar si existe cierta similitud entre la función de una distribución teórica y la frecuencia empírica (Chow *et al.*, 1994). De acuerdo con la metodología aplicada por estos autores, y

comparada a este estudio se aplicó el test de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, siendo la función de distribución Gamma 2 parámetros con el mejor ajuste para la estación meteorológica de Rioja. Para la estación de Naranjillo la mejor prueba de bondad de ajuste es la función de distribución Gamma 3 parámetros. Cabe indicar que, los datos de precipitación se ajustaron a todas las distribuciones teóricas; sin embargo, con la mejor prueba de bondad de ajuste se proyectaron las precipitaciones para los diversos T_r , considerados en la presente investigación.

La metodología aplicada para determinar las precipitaciones y las intensidades de diseño menores a 24 horas, fueron determinadas a partir de los registros de precipitaciones máximas en 24 horas, utilizando el método IILA-SENAMHI-UNI. Este método se aplica en zonas donde no se dispone de información pluviométrica, lo cual puede ser generada a partir de relaciones, ecuaciones e información propia del modelo. Sin embargo, también puede ser utilizado en zonas donde sí se dispone de información meteorológica; dado que, permite determinar las intensidades de diseño menores a 24 horas, tal y como lo realizó Guevara (2018). Además, es recomendado por el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento mediante la Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano (2010) y el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2011).

Para ejecutar el modelo hidrológico en el software HEC-HMS, es indispensable ingresar los hietogramas de precipitación de diseño para cada periodo de retorno. Estos hietogramas de diseño se construyen a partir de las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia; las cuales, se pueden corroborar en las investigaciones de Cardich (2017), Carpio (2018), Olivares (2018), y Guevara (2018). El MTC (2011), menciona que las curvas IDF deben ser construidas utilizando datos pluviográficos de las tormentas más intensas registrados en una serie de tiempo. Sin embargo, debido a la falta de datos pluviográficos en el país; las curvas IDF se calcularon a partir las precipitaciones máximas en 24 horas. Además, se consideró, al igual que Guevara (2018), el uso de los hietogramas de diseño generados a partir de las curvas IDF utilizando el método IILA-SENAMHI-UNI.

Considerando que se trabajó con dos estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca del río Yuracyacu se disgregó en 22 unidades hidrográficas al área total en estudio; concordando con el trabajo que realizó Aris (2020), quien delimitó en siete subcuencas el área de la cuenca Respina discretizando los tributarios más importantes. Por tanto, para la presente investigación la asignación de la precipitación en cada unidad hidrográfica fue de manera semidistribuida, considerando la cercanía adyacente entre las unidades hidrográficas y las estaciones meteorológicas.

Para la transformar la precipitación en escurrimiento y determinar las pérdidas por infiltración, se utilizó la metodología del SCS en la presente investigación; método también utilizado en otras investigaciones por Calderón y Montoya (2016), Cardich (2017), Olivares (2018), Sierra (2018), Carpio (2018), Guevara (2018) y Aris (2020). Este método es ampliamente utilizado en cuencas donde no se dispone de estaciones hidrométricas y no se tiene registros de medición de caudal.

Los resultados de los hidrogramas obtenidos con el software HEC-HMS (Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69) muestran ciertas características; donde, las seis primeras horas de iniciada la precipitación no presenta escurrimiento, seis horas después presenta una curva de ascenso lento. Sin embargo, después de 12 horas de iniciada la precipitación se muestra el ascenso de la curva gradualmente rápida hasta alcanzar el caudal pico, es decir, a ese tiempo se da la intensidad máxima de precipitación. El descenso de la curva del hidrograma, el escurrimiento, es gradualmente lento en comparación al ascenso.

Estas características en los hidrogramas de salida están fuertemente relacionados con los parámetros geomorfológicos; entre ellos, el factor de forma de la subcuenca en estudio es de tipo alargada por ende ascenso del hidrograma es más rápido, pero, el caudal pico es menor y el retorno al flujo base es mucho más lento (Busnelli, 2009, citado por Tapia, 2012). Así mismo, se relaciona al relieve de la subcuenca condicionando a la pendiente con el tiempo de concentración (SENAMHI, 2016). Además, el tiempo que tarda en evacuar el flujo relaciona al sistema de la red de drenaje teniendo en cuenta la cubierta

vegetal, la pendiente de la red hídrica y las características edafológicas del suelo (Reyes, 1992).

Dado que no se ha tenido antecedentes de datos oficiales de caudales máximos del río Yuracyacu para ser comparados con los caudales máximos obtenidos mediante el modelamiento hidrológico, se determinó las descargas máximas de río Yuracyacu con el método de regionalización de máximas avenidas de los ríos del Perú, mediante la envolvente de la ecuación de Creager.

Según el mapa de regionalización de avenidas del Perú (Trau y Gutiérrez, 1979), la subcuenca del río Yuracyacu se encuentra dentro de la Región 7 (Figura 13), cuya zonificación permitió identificar los coeficientes de la tabla 8, con los cuales se determinó los caudales máximos diarios para cada periodo de retorno. Sin embargo, estos caudales deben ser transformados en caudales máximos instantáneos, ello se logra aplicando la ecuación de Fuller (Sierra, 2018).

Aplicando la ecuación matemática de Fuller, se obtuvo la siguiente expresión:

$$Q_i = 1.599Q_{máx}$$

Donde, el caudal instantáneo (Q_i) está en función del caudal máximo diario ($Q_{máx}$) y el valor de 1.599 es el coeficiente obtenido luego de operar la ecuación de Fuller. Concordando con la investigación que realizó Sierra (2018), con el fin de validar los caudales simulados, determinó los caudales máximos instantáneos a partir de los caudales máximos medios diarios, donde el coeficiente de Fuller fue 1.77. Esta ecuación está en función al área de la cuenca; por tanto, al cambiar la superficie varía el valor del coeficiente. En la Tabla 32 se muestran los caudales máximos instantáneos para cada Tr.

Tabla 32

Caudales Máximos diarios vs. Caudales Máximos instantáneos

T	Qmáx	Qi
años	m³/s	m³/s
2	31.89	50.99
5	74.06	118.40
10	105.95	169.39
25	148.11	236.79
50	180.01	287.78
100	211.90	338.77
200	243.80	389.76
500	285.96	457.17

Fuente: Elaboración Propia.

El método para determinar los caudales máximos instantáneos es el mismo que utilizó Sierra (2018). Sin embargo, los resultados obtenidos por Sierra y esta investigación presentan gran diferencia. Estas desigualdades se deben principalmente al valor del coeficiente de Fuller que está en función al área de la cuenca.

La Tabla 33 muestra la comparación de los caudales máximos obtenidos del modelamiento hidrológico para los Tr de 5, 10, 25, 50 100, 200 y 500 años, y los caudales máximos instantáneos obtenidos mediante el método de regionalización de avenidas del Perú (ecuación de Creager) y la ecuación de Fuller.

En la Figura 69 se muestra la comparación de los caudales máximos obtenidos del modelamiento hidrológico y el caudal máximo instantáneo – método de Creager.

Tabla 33

Comparación de Caudales Máximos del modelamiento hidrológico y caudales máximos instantáneos método Creager

Tr	Q _{máx} Calculado Mod. Hidrológico	Q _{inst} Calculado Método de Creager	Error
Años	m ³ /s	m ³ /s	%
2	58.40	50.31	13.86
5	128.90	116.81	9.38
10	180.20	167.12	7.26
25	245.50	233.63	4.84
50	293.50	283.93	3.26
100	340.40	334.24	1.81
200	386.40	384.55	0.48
500	445.70	451.06	1.19

Fuente: Elaboración Propia.

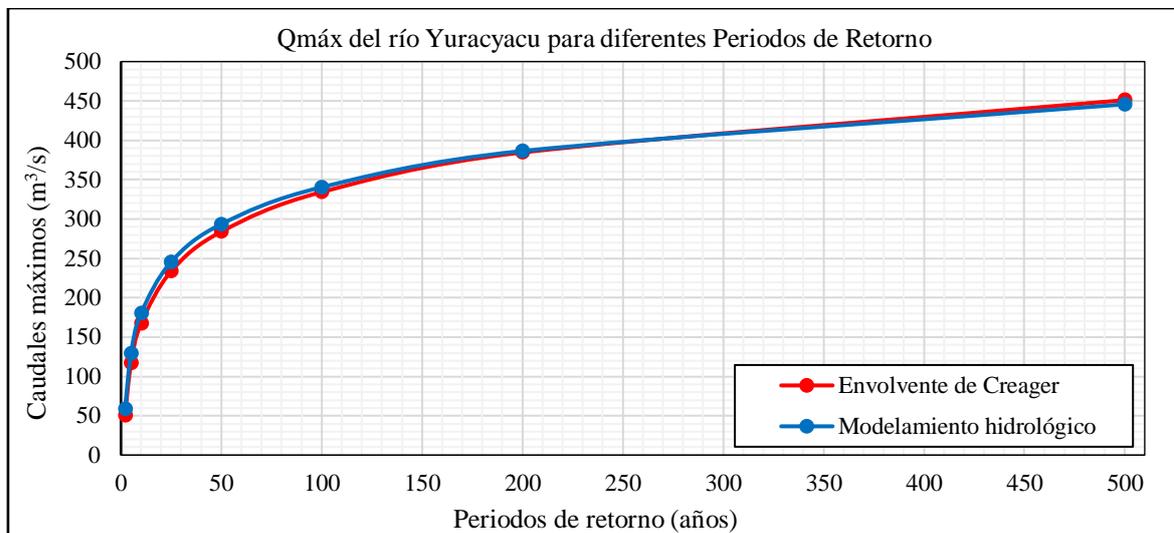


Figura 69. Q_{máx} río Yuracyacu para diferentes Tr. Fuente: Elaboración propia

El resultado de los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno obtenido con el modelamiento hidrológico es similar a los caudales obtenidos mediante la envolvente de Creager. Por lo tanto, los caudales máximos del modelamiento hidrológico se introdujeron en el modelamiento hidráulico y así dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

4.4. Perfiles hidráulicos para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años

HEC RAS 2D brinda resultados óptimos referentes a las llanuras de inundación y donde el flujo presenta diferentes direcciones, así como diferentes calados y velocidades, en relación con el tiempo de retorno asignado. La simulación se realiza en un tiempo total de 24 horas. Además, para Sierra (2018), el modelo 2D representa mejor las condiciones de cobertura cercanas al lecho del cauce, que a diferencia del modelo 1D no representa los flujos laterales en llanuras de inundación.

Los modelos hidráulicos 2D son la tecnología más requerida en la identificación de las llanuras de inundación (Timbe y Willems, 2011), donde el flujo presenta diferentes direcciones, calados y distintas velocidades (Cardich, 2017) en relación con el tiempo de retorno asignado.

Coincidiendo con la investigación que realizó Cardich (2017), el análisis de la inundación fue bidimensional de flujo en régimen no estacionario; en este caso, se realizó utilizando el software HEC-RAS 2D, para un flujo no permanente donde las condiciones de bordes tanto para aguas arriba fueron los hidrogramas para cada Tr y aguas abajo fue el tirante normal. Este modelo permitió simular el comportamiento del cauce ante una avenida máxima, obteniendo los niveles de agua alcanzados por cada periodo de retorno, en un tramo de 2+400 km del río Yuracyacu, principalmente en toda la zona urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca. Para los Tr de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, el modelo presentó calados máximos de 2.308 m, 2.986 m, 3.358 m, 3.748 m, 3.988 m, 4.193 m, 4.370 m y 4.567 m, ante hidrogramas cuyos caudales picos fueron 58.4 m³/s, 128.9 m³/s, 180.2 m³/s, 245.5 m³/s, 293.5 m³/s, 340.4 m³/s, 386.4 m³/s y 445.7 m³/s, respectivamente. Los datos de velocidad son más erosivos en la zona media del tramo de estudio que comprende la progresiva 1+850 km y la progresiva 2+150 km. Las velocidades máximas para los tiempos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años alcanza a 5.121 m/s, 6.849 m/s, 7.579 m/s, 8.250 m/s, 8.648 m/s, 9.009 m/s, 9.243 m/s, 9.590 m/s, respectivamente. Debido a las características topografías, el cauce presenta un barraje móvil donde el régimen del flujo subcrítico pasa a un flujo supercrítico, luego aguas abajo retoman a un régimen de flujo subcrítico ocasionando un resalto hidráulico. Una fuerte

pendiente y un cambio brusco de velocidades en la progresiva 1+850 km hace que se genere un resalto hidráulico aguas abajo (Figura 49 y Apéndice 29).

La integración del calado y la velocidad generan zonas con mayor peligrosidad y si agregamos la duración de la inundación puede ocasionar impactos negativos en las viviendas cercanas a la ribera del río situadas en ambas márgenes del cauce. Las viviendas construidas en la ribera y faja marginal del río alteran las condiciones del cauce, y ante un evento de avenida máxima con un $Q_{\text{máx}} = 445.7 \text{ m}^3/\text{s}$ para un tiempo de retorno de 500 años, podrían ser destruidas por el efecto del incremento del flujo.

Para avenidas máximas con Tr 2 y 5 años existe un peligro mínimo de desbordes o inundación a lo largo del tramo de estudio. Sin embargo, a partir de un tiempo de retorno de 10 años se identificó una vivienda inundada situada en la margen izquierda. Para un Tr de 25 años se evidenció 20 viviendas inundadas: 2 margen izquierda y 18 margen derecha. Para un Tr de 50 años se evidencio 50 viviendas inundadas: 6 margen izquierda y 44 margen derecha. Para un Tr de 100 años se evidencio 102 viviendas inundadas: 29 margen izquierda y 73 margen derecha. Para un Tr de 200 años se evidenció 178 viviendas inundadas: 89 margen izquierda y 89 margen derecha. Para un Tr de 500 años se evidenció 249 viviendas inundadas: 149 en la margen izquierda y 100 en la margen derecha.

Las zonas vulnerables a inundación se encuentran expuestas en base a cada probabilidad de ocurrencia de un evento meteorológico. Por tanto, para un Tr de 2 años el área afectada es de 0.136 ha, para un Tr de 5 años es de 0.431 ha, para un Tr de 10 años es de 0.752 ha, para un Tr de 25 años es de 2.195 ha, para un Tr de 50 es de 4.002 ha, para un Tr de 100 años es de 6.295 ha, para un Tr de 200 años es de 12.638 ha y para un Tr de 500 es de 17.228 ha.

En el estudio de Identificación de Puntos Críticos realizado por la Autoridad Nacional del Agua a través de la Administración Local del Agua Alto Mayo, identificó un punto crítico

a inundación en las coordenadas en Universal Transverse Mercator (UTM) E: 243490 m, N: 9343148 m, sector Los Olivos de la ciudad de Nueva Cajamarca. Por tanto, contrastando los resultados obtenidos en la presente investigación con el estudio realizado por el ANA se verifica riesgo a inundación a Tr de 50 años; sin embargo, para Tr superiores a 50 años el riesgo es muy alto a inundación. Además, se evidenciaron potenciales sectores afectados como: Monterrey, San Nicolas, Nueva Cajamarca I y II etapa.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Los parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu correspondientes a parámetros de forma, relieve y drenaje; obtenidos fueron: un área de 1.71.03 km², un perímetro de 78.17 km, un factor de forma de 0.19, un índice de Gravelius de 1.69, una pendiente referente al método criterio de Alvord de 51.77 % y corresponde a un orden de corriente nivel 4.

2. Las coberturas de usos de suelo de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, determinadas mediante una clasificación supervisada con geoprocesos de integración de softwares SIG y Teledetección, permitió identificar un total de 124.039 km² de bosques, 35.176 km² de cultivos, 9.189 km² de pastos, 1.373 km² suelos sin vegetación, 0.948 km² de área urbana y 0.307 km² del río Yuracyacu, logrando obtener los valores de curva número para cada unidad hidrográfica discretizada de la subcuenca del río Yuracyacu que fluctúan entre 58 y 77.

3. Los caudales máximos obtenidos mediante el modelamiento hidrológico son 58.4 m³/s, 128.9 m³/s, 180.2 m³/s, 245.5 m³/s, 293.5 m³/s, 340.4 m³/s, 386.4 m³/s, 445.7 m³/s para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, respectivamente, estos se determinaron a partir de registros históricos de precipitación de las estaciones meteorológicas de Rioja y Naranjillo previo a un análisis estadístico hidrológico, parámetros geomorfológicos y curva número.

4. Los perfiles hidráulicos del río Yuracyacu en el tramo bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento se calcularon a partir de la topografía y caudales máximos determinados en el modelamiento hidrológico. El calado máximo obtenido fue de 2.308 m, 2.986 m, 3.358 m, 3.748 m, 3.988 m, 4.193 m, 4.370 m y 4.567 m y la velocidad

máxima de 5.121 m/s, 6.849 m/s, 7.579 m/s, 8.250 m/s, 8.648 m/s, 9.009 m/s, 9.243 m/s, 9.590 m/s, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años respectivamente.

5. El área vulnerable a inundación para los tiempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años fue de 0.136 ha, 0.431 ha, 0.752 ha, 2.195 ha, 4.002 ha, 6.295 ha, 12.638 ha y 17.228 ha, afectando 0 viviendas para los Tr de 2 y 5 años, 1 vivienda para el Tr de 10 años, 20 viviendas para el Tr de 25, 50 viviendas para el Tr de 50 años, 102 viviendas para el Tr de 100 años, 178 viviendas para el Tr de 200 años y 249 viviendas para el Tr de 500 años. Además, las zonas vulnerables identificadas son: Los Olivos, Monterrey, San Nicolas, Nueva Cajamarca I y II etapa.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Es necesaria, la instalación de una estación pluviométrica para el registro de precipitaciones y una estación hidrometereológica para la lectura de caudales máximos diarios instantáneos, que aporten con datos hidrometereológicos para futuros proyectos vinculados a modelamientos hidrológicos e hidráulicos dentro del área de influencia de la unidad hidrográfica del río Yuracyacu.

- Realizar un adecuado análisis de las características edafológicas, coberturas y usos de los suelos; aportando al estudio de la dinámica y el comportamiento hidrológico de una cuenca, bajo la representación lluvia – escorrentía.

- Construir estructuras de encauzamiento para la prevención ante máximas avenidas en los tramos de las riberas que supera el tirante normal del agua, con el fin de reducir daños ocasionados por las inundaciones. Optando medidas intensivas que apresuren la continuidad del escurrimiento del cauce y eviten el desbordamiento del río Yuracyacu principalmente en la zona urbana.

- Realizar estudios de modelación hidrológica e hidráulica en cuencas regionales y nacionales, principalmente en aquellas que presentan un alto riesgo en la población o vulnerabilidad a inundación.

- En caso de no contar con información hidrometereológica dentro de la subcuenca, se recomienda utilizar métodos que permitan el cálculo de las precipitaciones e intensidades de diseño. Para el caso del Perú se puede utilizar el método del IILA-SENAMHI-UNI.

- Que esta investigación sea de conocimiento público, principalmente a las autoridades competentes en la gestión de los recursos hídricos, quiénes deberán asumir medidas de prevención de los posibles daños que ocasiona a la población situadas en la ribera y faja marginal del río Yuracyacu.

REFERENCIAS

- Aparicio, M. F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 18 - 300. Grupo Noriega Editores.
- Aprueban Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor. Decreto Supremo N° 017-2009-AG. Diario Oficial El Peruano. Lima, Perú, 02 de setiembre de 2009, pp. 1-18.
- Aris, H. I. (2020). *La avenida del 7 de diciembre del 2000 en la cuenca del arroyo Respina. Comparación de los datos geomorfológicos y los modelos hidrológico - hidráulicos*. (Tesis de grado). Universidad de Salamanca, España.
- Administración Local de Agua – ALA Barranca. (2018). *Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación Integral de cursos de agua superficial en ámbitos de Administraciones Locales de Agua: Administración Local de Agua Barranca*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). *Identificación de puntos críticos con riesgo a inundaciones en ríos y quebradas 2017*. Lima, Perú. http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4519_identificacion-de-puntos-criticos-con-riesgo-a-inundaciones-en-rios-y-quebradas-del-departamento-de-san-martin.pdf
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Generacion del Mapa Temático de Curva Número (CN)*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Plan de Prevención ante la presencia de Fenómenos Naturales por Inundaciones, Deslizamientos, Huaycos y Sequias*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vestiente del Pacífico*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Reglamento para la delimitación y mantenimiento de Fajas Marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua naturales y artificiales*. Lima, Perú.

- Aliaga, A. I. J. (2017). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. 35 – 56. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Berbesi, J. A. F., Rivera, M., y Maldonado, M. J. (2018). Zonas de Inundación quebrada Zipacha, Pamplona mediante Software HEC RAS. *Semilleros de Investigación*, 1-6.
- Brieva, C. (2018). *Caracterización y Análisis multidisciplinario de la información hidrológicas en Cuencas*. Programa Nacional Agua – PNAGUA. Mendoza, Argentina.
- Brunner, G. W. (2014). *Combined 1D and 2D Modeling with HEC – RAS*. http://kiw.ur.krakow.pl/~loczek/konspekty/9-korytarze/Combined_1D_and_2D_Modeling_with_HEC-RAS.pdf
- Bryant, E. (2005). *Flooding as a Hazard*. En E. Bryant, *Natural Hazards* (Segunda ed.). 120 – 137. Cambridge University Press. <http://www.dgt.uns.ac.rs/wp-content/uploads/2020/04/Prirodne-katastrofe-i-geografija-Knjiga-Natural-hazards.pdf>
- Buendía, L., Colás, P., y Hernández, F. (1998). Métodos en Investigación en Psicopedagogía . (Primera ed.) 66 – 70. McGraw-Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U. https://www.icmujeres.gob.mx/wp-content/uploads/2020/05/LEONOR-Metodos-de-investigacion-en-psicopedagogia-medilibros.com_.pdf
- Busnelli, J. y Horta, L. R. (2014). Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial, Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 71(1), 11-20. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v71n1/v71n1a02.pdf>
- Calderón, D. D. y Montoya G. J. (2016). *Integración de Herramientas SIG con modelos hidrológicos para la generación de mapas de áreas susceptibles de Inundación. Caso de Estudio la Cuenca del río Acacías – Municipio de Acacías, meta*. (Tesis de grado). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia.

- Cahuana, A. y Yugar W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233*. Comisión nacional del agua, Trabajo Dirigido por Adscripción, presentado para optar el Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Cochabamba, Bolivia.
- Campos, C. A. (2016). *Hidráulica e Hidrología para Ingeniería*. Moscú: Universidad de la Amistad de los pueblos de Rusia.
- Cardich, M. K. A. (2017). *Modelación de máximas avenidas en la cuenca del río Lurín utilizando modelos hidrológico e hidráulico*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima Perú.
- Cardona, O. (1991). *Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo*. “Taller regional de capacitación para la administración de desastres. 1 – 21. Bogotá: NAD/PNUD/ OPS/UNDRO. La RED.
- Carpio, R. A. (2018). *Generación del modelo de áreas de inundación del río Catarama provincia de Los Ríos - Ecuador mediante el uso de los softwares HEC-RAS y ArcGIS*. (Tesis de grado). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres – CENAPRED. (2009). *Inundaciones*. México.
- Chow, V., Saldarriaga, J. G., y Zuluaga, A. A. (1983). *Hidráulica de Canales Abiertos*. 108 – 111. Colombia, Santafé de Bogotá: Nomos S. A.
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. 2 – 531. Colombia, Santafé de Bogotá.
- Chuvieco, S. E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (2ª ed.). 81 – 87. Madrid: RIAL, S.A.
- Chuvieco, S. E. (2008). *Teledetección Ambiental: La Observación de la tierra desde el espacio* (3ª ed.). España, Alcalá de Henares: Editorial Ariel S.A.
- Córdova, G. D., Paredes Méndez, D., y Alulema del Santo, R. A. (2017). Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. *Investigación y desarrollo*, 2, 29-39.

- Delgadillo, A. y Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. *Revista Geográfica Venezolana*. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008).
- Delgadillo, S. A., y Moreno, B. A. (2011). *Morfometría de cuencas - Hidrología*. Colombia.<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>
- Drenaje Pluvial Urbano. Norma OS.060. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 23 de mayo de 2006, pp. 54-77.
- Equipo de Respuesta ante Emergencias Informáticas - CERT. (2011). *Capacitación básica Manual del Participante*. (C. E. Team). Los Angeles. http://www.certla.com/manuals/Spanish/Hazard3_Floods_PM_Jan2011_spa.pdf
- Esquen, L. C. R. y Rodríguez, V. H. K. (2016). *Determinación de la confiabilidad del método Italo Latino Americano para el Cálculo de Hietogramas de Diseño en las estaciones Pluviométricas de Salpo, Quiruvilca y Julcan – Cuenca Moche*. (Tesis de grado). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- FAO (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo.
- Fattorelli, S., y Fernandez, P. (2011). *Diseño Hidrológico*. (2ª ed.). 19 – 185. Water Assessment & Advisory Global Network. <https://marianiztli.files.wordpress.com/2016/06/disenio-hidrologico.pdf>
- Frisancho, C. F. (2015). *Análisis de la vulnerabilidad mediante modelamiento hidrodinámico del cauce del Río Seco del Cono Sur de la ciudad de Tacna*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.
- Garay, D. D. y Agüero, G. J. N. (2018). *Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrica de la cuenca del río Anzulón*. España, La Rioja: Inta Ediciones. https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta-_delimitacion_y_caracterizacion_de_la_cuenca_del_rio_anzulon_1.pdf

- Garzón, P. D. A. (2017). *Análisis preliminar de las propiedades del suelo al establecer barreras vivas en la Vereda Santa Teresa de San Juan de Río seco*. (Tesis de grado). Universidad Libre, Bogotá.
- Gómez, G. M. (2018). *Variación de la Peligrosidad a inundaciones entre los años 1980 al 2015 por efectos de la deforestación en la Microcuenca Sonomoro*. (Tesis de Maestría en Ciencias con Mención en Gestión de Riesgos desastres y responsabilidad social). Universidad Continental, Junín, Perú.
- Guevara, S. A. (2018). *Modelación hidrológica e hidráulica para determinar las crecidas en el Río Gera en la Provincia de Moyobamba, 2015*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de San Martín, Moyobamba, Perú.
- Hydrologic Engineering Center's - HEC y Hydrologic Modeling System - HMS. (2020). *HEC – HMS User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/plugins/servlet/scrollpdf/api/artifacts/36783576-5494-4cc7-b816-e7>
- Hydrologic Engineering Center's - HEC y River Analysis System - RAS. (2020). *2D Modeling User's Manual*. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0%202DModelingUsersManual.pdf
- Hydrologic Engineering Center's - HEC y River Analysis System - RAS. (2020). *HEC – RAS Mapper User's Manual*. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_MapperUsersManual.pdf
- Hydrologic Engineering Center's - HEC y River Analysis System - RAS. (2016). *HEC – RAS River Analysis System*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Hernández, S. R., Baptista, L. P., y Fernández C., Carlos. (2010). *Metodología de la Investigación*. (6th ed.). 126 – 168. McGraw Hill. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hernán, P. M. (2005). *Clasificación supervisada*. 45 – 62. Universidad CAECE – Técnicas Espaciales de Análisis.

Ibáñez, A. S., Gisbert, B, J. y Moreno , H. (2011). *La Pendiente del Terreno*. pp. 3. Universidad Politecnica de valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10776/La%20pendiente%20del%20terreno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2017). *Compendio Estadístico del INDECI 2017 Gestión Reactiva*. (1ra ed.) Lima, Perú: ASVI BIENES & SERVICIOS E.I.R.L.

IILA-SENAMHI-UNI (1983), “*Estudio de la hidrología del Perú - Volumen III*”, Convenio de Cooperación Técnica del Instituto Ítalo-Latino Americano, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, y Universidad Nacional de Ingeniería, marzo 1983. Roma, Italia. p. III:39

Jiménez, A. A. (2015). *Desarrollo de metodologías para mejorar la estimación de los hidrogramas de diseño para el cálculo de los órganos de desagüe de las presas*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Lal, R. (1996). *Deforestación y efectos del uso de la tierra sobre la degradación y rehabilitación del suelo en el oeste de Nigeria. I. Propiedades físicas e hidrológicas del suelo*. Land Degrad. Dev., 7: 19-45. DOI: 10.1002 / (SICI) 1099-145X (199603) 7: 1 <19 :: AID-LDR212> 3.0.CO; 2-M

López, R. L. (2017). *Procedimiento para la simulación hidráulica a partir de los software ARCGIS y HEC-RAS para eventos extremos Máximos*. (Tesis de Grado). Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). *Manual Técnico Procesamiento para Clasificación de Coberturas a Partir de Imágenes Satelitales*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Perú, Lima: Editorial Macro.

Monsalve S. G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería* (1a. ed.). 37 – 55. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Monsalve S. G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (2a. ed.). 21 – 126. Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca. (2013). *Diagnostico Ambiental Local del Distrito de Nueva Cajamarca*. Nueva Cajamarca.
- Nanía, E. L. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada: Leonardo S. Nanía.
- Ñaupas, P. H., Mejia M. E., Novoa R. E., y Villagomez P. A. (2014). *Metodología de la Investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis* (4a. ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U. <https://corladancash.com/wp-content/uploads/2020/01/Metodologia-de-la-inv-cuanti-y-cuali-Humberto-Naupas-Paitan.pdf>
- Olivares, C. G. M. G. (2018). *Determinación de Zonas Inundables mediante simulación Hidráulica Bidimensional aplicando HEC-RAS 5.0 en un tramo del Río Huancabamba, desde la quebrada Chula (km 2.42) hasta la quebrada Lungulo (km 5.51), Provincia de Huancabamba, Departamento de Piura*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Piura, Piura.
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas* (Sexta Edición ed.). Ginebra, Suiza.
- Pascual, A. J., y Díaz M. M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Madrid: Instituto IMDEA Agua. https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos%20de%20Geoma%CC%81tica%204_b.pdf
- Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP (2014). *Perú es tercer país más vulnerable del mundo al cambio climático*. Lima, Perú.
- Quispe, T. J., y Sullca, O. R. (2015). *Aplicación del modelo matemático HEC-RAS para el cálculo del perfil hidráulico del río Ramis*. (Tesis de Grado). Universidad Andina "Nestor Cáceres Velásquez", Puno, Perú.
- Racca, J.M.G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*. 77(1-2): 31-38.
- Ramos, F. L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estima de satélite en la modelación hidrológica distribuida*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España.

- Rendón, D. y Víctor, O. (2013). *Drenaje pluvial de la ciudad de Juliaca (sector los virreyes) - Puno, Perú*. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- Reyes, C. L. V. (1992). *Hidrología Básica*. (1ra ed.). 5 – 45. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONCYTEC.
- Romero, D. A. y López B. F. (1987). Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía*. Núm. 12, 47-62.
<http://revistas.um.es/geografia/article/view/42391/40741>
- Rocha, F. A. (1993). *Recursos Hidráulicos*. 40 - 46. Perú, Lima: Marconi. Consejo Departamental de Lima, Colegio de Ingenieros del Perú.
- Salas, J. y Govindaraju, R. (2014). *Modern water resources engineering* (1.a ed.). Handbook of Environmental Engineering 15. Humana Press.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2011). *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Lima, Perú.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2016). *Caracterización hidrológica de los distritos de Pampas y Santiago de Tucuma*. Lima, Perú.
- Segura, L., y Casasola, R. (2011). *Modelación hidráulica para el análisis y propuesta de obras de mitigación de inundaciones en finca valle la estrella*. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Cartago, Costa Rica.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5706/MODELACION_HIDRAULICA_MITIGACION_VALLE_ESTRELLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sierra, L. W. H. (2018). *Modelamiento Hidráulico Bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Tapia, J. C. (2012). *Modelización Hidrológica de un área experimental en la cuenca del río Guayas en la producción de caudales y sedimentos*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/23364>

- Timbe, C. L., y Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *Researchgate*, 91 - 98.
- Trau, W., Gutierrez, R. (1979). *Análisis regional de las avenidas del Perú*. Perú, Lima: INRENA.
- U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service. (1973). *A method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds*. New York.
- Valle, G. A. (2019). *Estudio Hidrológico e Hidráulico del río Corbones a su paso por la zona urbana de la Puebla de Cazalla (Sevilla)*. (Tesis de grado). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Villón, B. M. (2002). *Hidrología*. 14 – 303. Lima, Perú: Villón.
<https://es.slideshare.net/erickmainar/hidrologa-ingmximo-villn-53473898>
- Villón, B. M., (2007). *Hidráulica de Canales* (2ª ed.). 63 – 65. Perú, Lima: Villón.
<https://es.slideshare.net/simonmelgarejo/libro-de-hidraulica-de-canales-maximo-villon>
- Villón, B. M. (2012). *Hidroesta 2 Cálculos Hidrológicos*. (1ª ed.). 106 - 293. Perú, Lima: Villón.
- Villón, B. M. (2016). *Hidrología Estadística* (5th ed.). 21 – 261. Perú, Lima: Villón.
- Viramontes, O. O., Escoboza, G. L., Pinedo, A. C., Pinedo, A. A., Reyes, G. V., Román, C. J., y Pérez, M. A. (2007). *Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua*. Medio Ambiente y Desarrollo sostenible, 21-31.

TERMINOLOGÍA

A continuación, se describen conceptos que dan idea acerca de los diversos términos empleados con frecuencia en el desarrollo de la investigación.

Precipitación

Es uno de los procesos del ciclo hidrológico y es el origen primario del agua de la superficie terrestre, el cual comienza con la evaporación del agua hasta llegar a las nubes y cayendo sobre la superficie del suelo en diferentes estados (sólido y líquido) tales como lluvia, granizo, hielo, garúas (Villón, 2002).

Cauce principal

Aparicio (1989), menciona que se refiere a la corriente principal desembocando en un punto de aforo. Además, esta definición solo es para las unidades hidrográficas tipo exorreicas, mientras que las otras corrientes de agua son denominados tributarios. El cauce principal es único, no pueden existir dos o tres y las unidades hidrográficas salientes de los tributarios son llamadas subcuencas.

Riberas

La Autoridad Nacional de Agua [ANA], 2011, la define como aquellas zonas de los ríos, arroyos, torrentes, lagos, lagunas, que se encuentran en los niveles mínimos del caudal del río entre las avenidas máximas o crecientes. Para su delimitación se tiene en cuenta los parámetros geomorfológicos y ecológicos de la unidad hidrográfica.

Faja Marginal

Zonas superiores al cauce o flujo hídrico de la unidad hidrográfica en su máxima creciente, sin considerar los niveles de las crecientes por eventos extraordinarios (ANA, 2011).

Máximas avenidas

Se refiere al nivel de agua durante su máxima crecida y en una determinada sección del cauce, arroyo, laguna, lago, que se obtiene mediante métodos directos e indirectos en función a los parámetros existentes de la unidad hidrográfica (ANA,2011).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se refiere al factor del riesgo interno de un conjunto o grupo de conjuntos arriesgados a una amenaza, oportuna a su predisposición intrínseca o susceptibilidad social, económica, política que tiene una población de ser afectada o de sufrir efectos contrarios en caso de que se presente un fenómeno peligroso de origen natural (Cardona,1991).

Modelación de Cuencas

Conlleva a entender el ciclo hidrológico de la cuenca y su respuesta continua frente al tiempo y espacio, ello reafirma que el eje principal del modelamiento hidrológico es la modelación de cuencas (Aliaga, 2017)

Infiltración

Se refiere a la dirección del flujo del agua principalmente en la superficie y por dentro del suelo, ocasionado por fuerzas capilares y gravitacionales (Aparicio, 1989). Además, es el proceso por el cual el agua se introduce por la superficie el suelo, produciendo un proceso secundario llamado percolación (Monsalve, 1999). La infiltración depende de las condiciones o características morfológicas de la superficie del suelo y puede ocurrir de manera saturada o no saturada (Bateman, 2007).

Escorrentía

Es un fenómeno que ocurre en la superficie del suelo trasportando el agua que precipita, es decir; cuando el agua cae en el suelo fracción de ella es retenida, parte de esto se infiltra y parte escurre por la superficie lo que se denomina escorrentía (Monsalve, 1999). Según

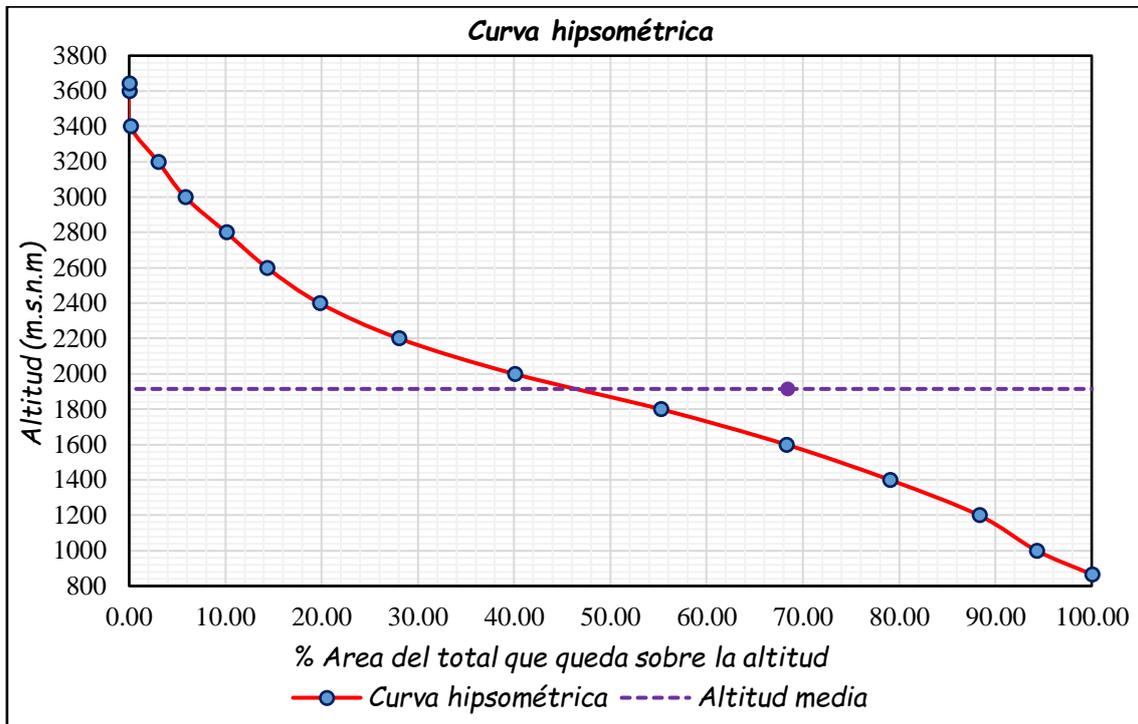
Bateman (2007), el proceso de escorrentía sucede la lluvia precipita y la superficie terrestre se empapa comenzando el proceso de infiltración, cuando el terreno presenta acumulación excesiva de agua se produce dificultades para infiltrar es ahí donde comienza el escurrimiento en cauces pequeños o medianos por la superficie del suelo.

Clasificación supervisada

Hernán (2005) menciona que para su realización primero se debe obtener información en campo haciendo un estudio previo de la zona para identificar las áreas o categorías existentes en el ámbito de estudio, para luego procesarlas por medio de un software calculando las estadísticas elementales de cada categoría para asignarlos a cada pixel en relación de sus niveles digitales (ND).

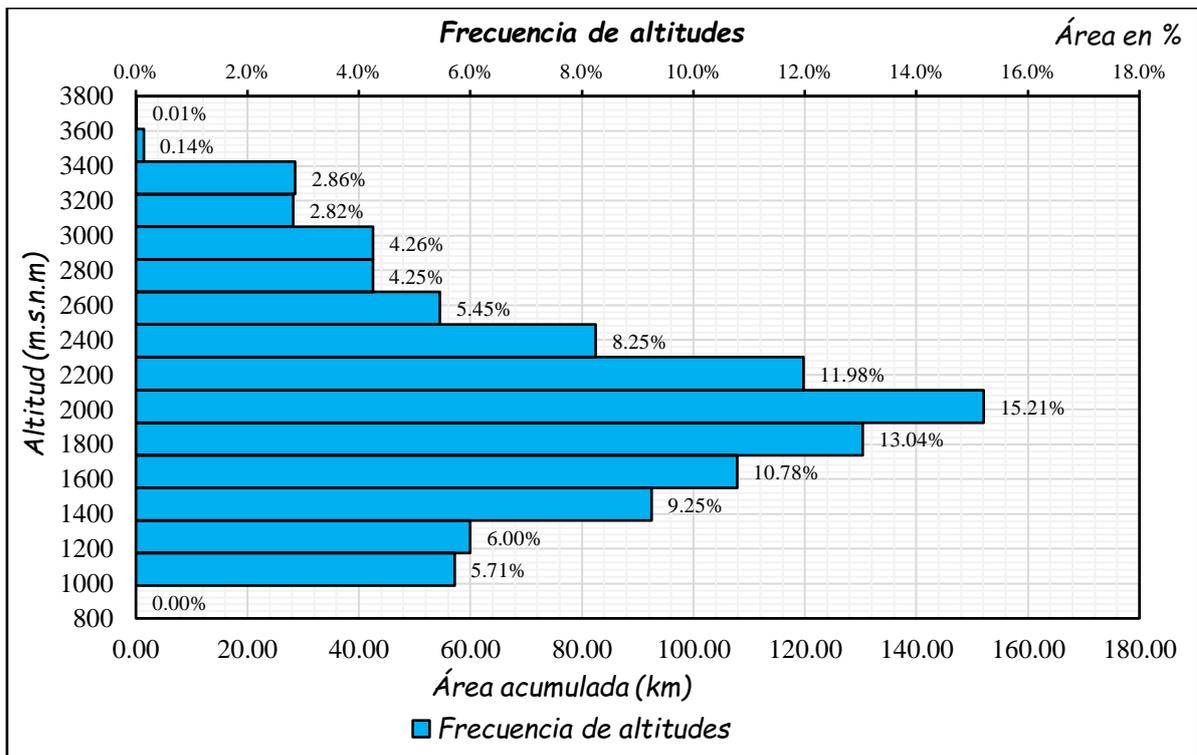
APÉNDICES

Apéndice 1. Grafica de curva hipsométrica y altitud media



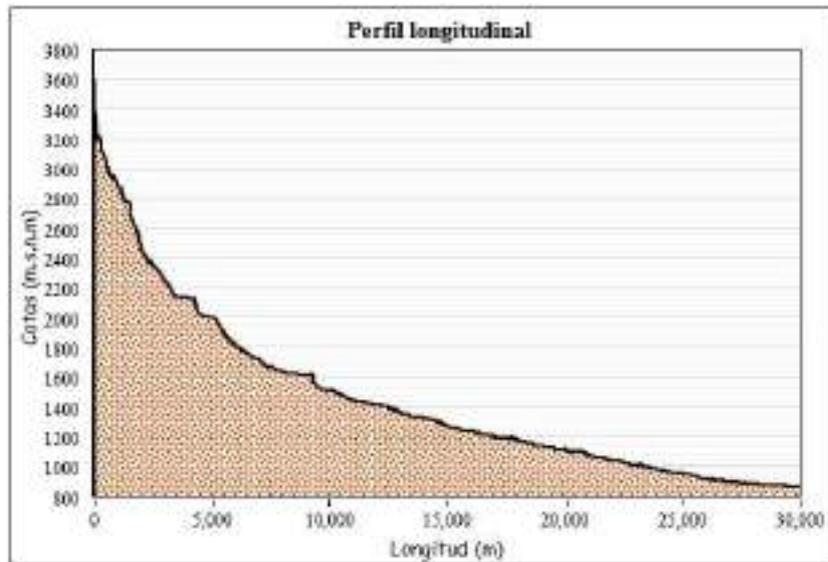
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 2. Grafica de frecuencia de altitudes



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 3. Perfil longitudinal del cauce principal del río Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4. Librería “Tree” de RStudio

```
1  
2 setwd("D:/TESIS/TELEDETECCIÓN/ENVI_IDL")  
3 data <- read.table(file("data.dat"))  
4 library(tree)  
5 dataTree <- tree(data)  
6 summary(dataTree)  
7 plot(dataTree)  
8 text(dataTree)  
9
```

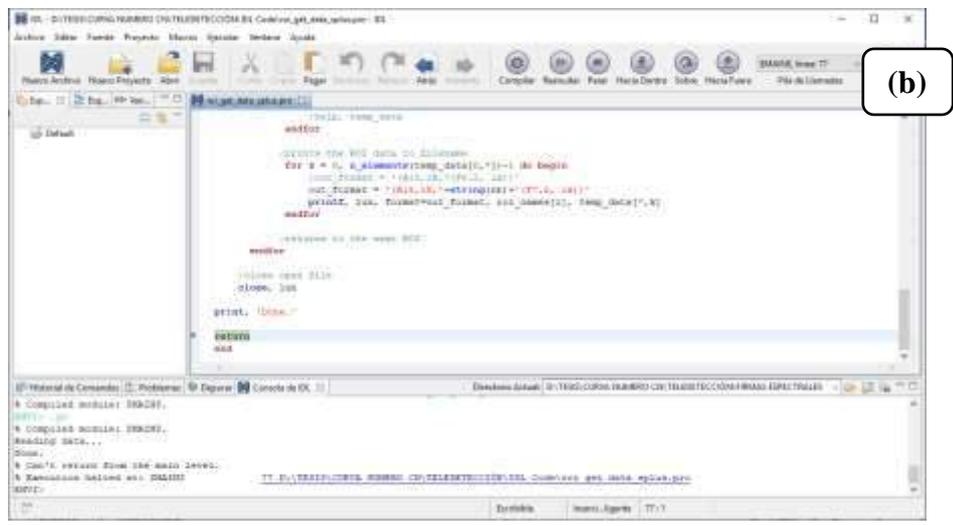
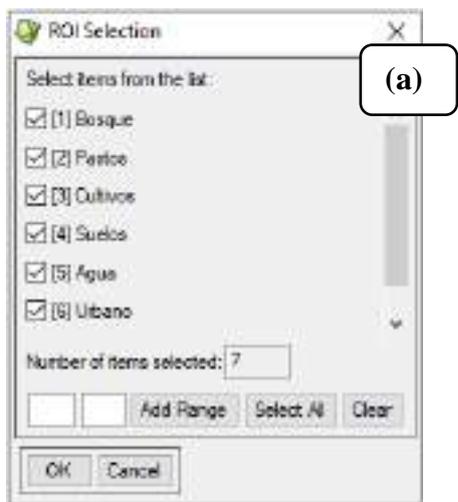
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 5. Muestreo de coberturas de uso de suelo



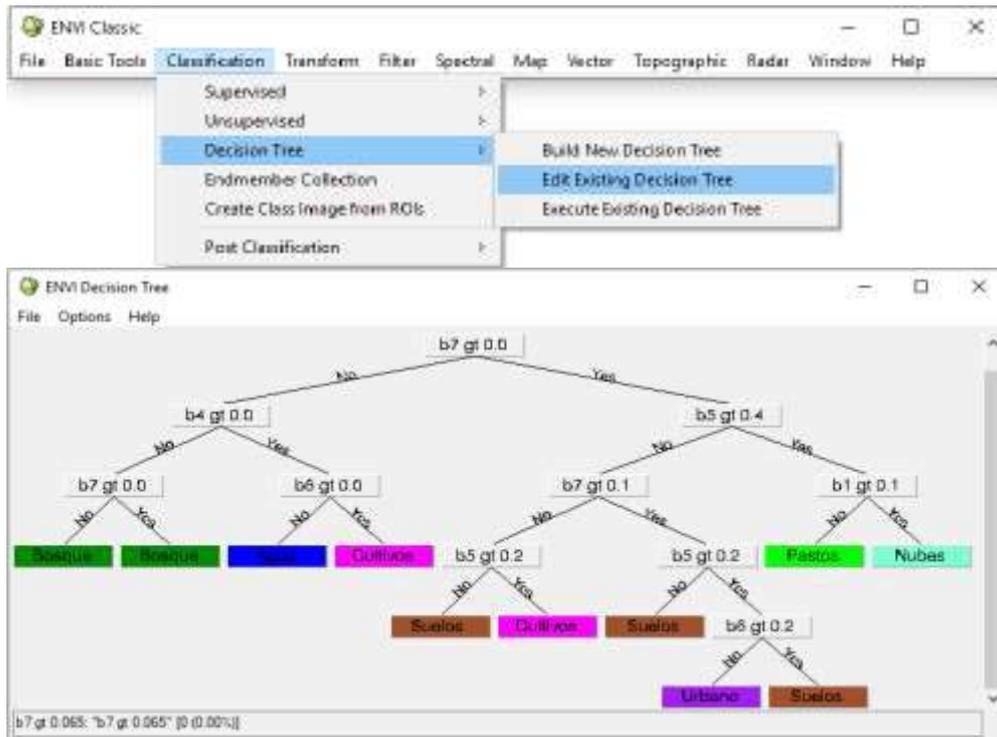
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 6. (a) Coberturas de uso de suelo y (b) aplicación del scrip en ENVI



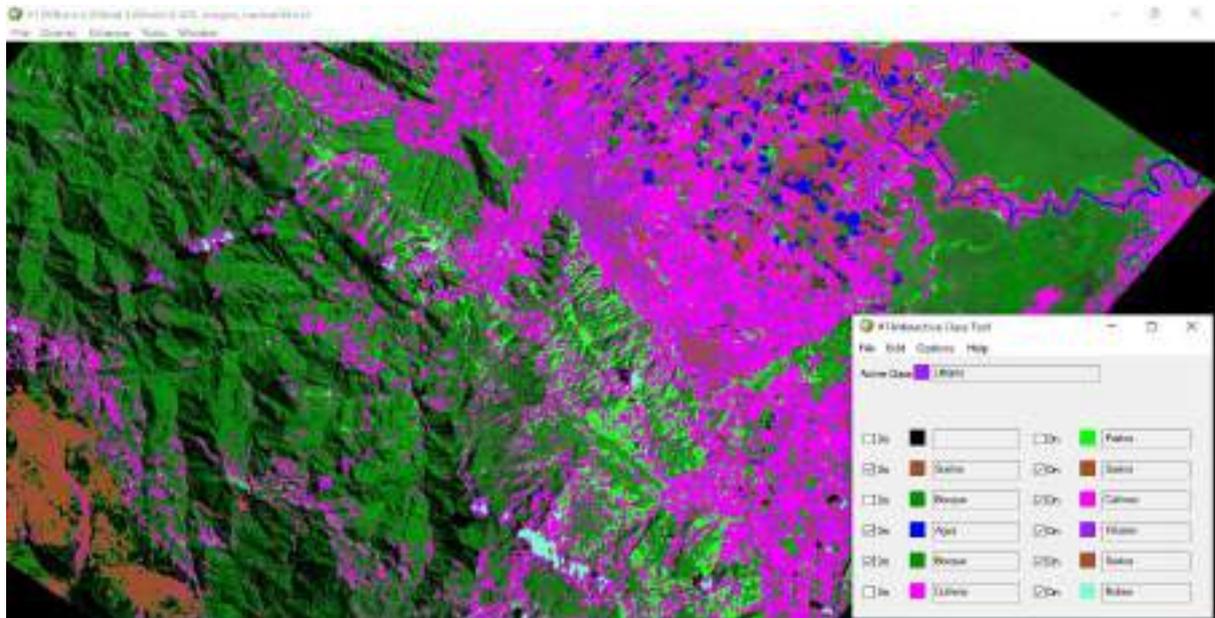
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 7. Esquema de árbol de decisión



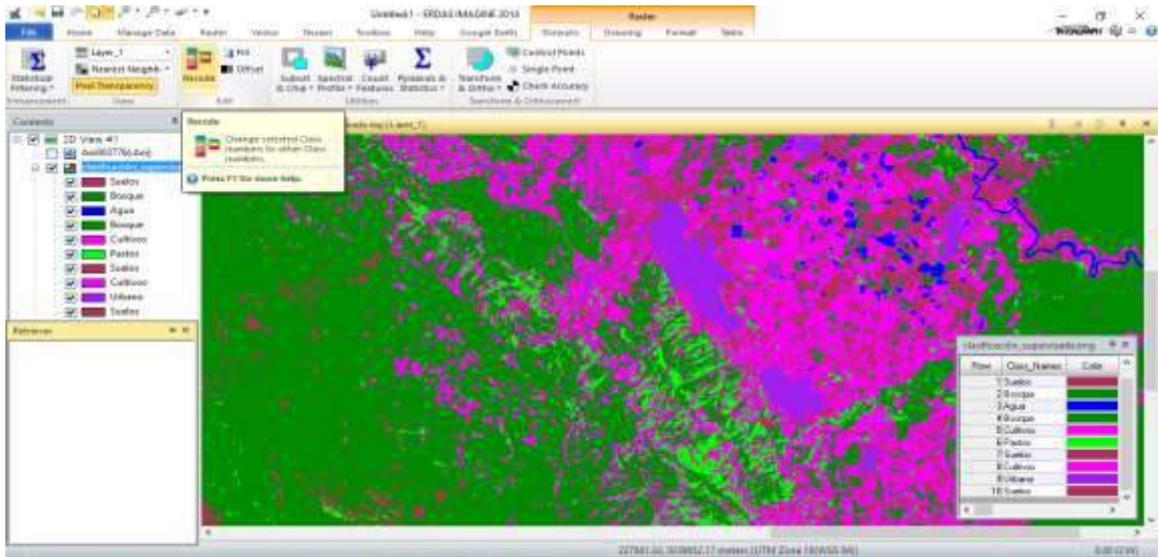
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 8. Clasificación supervisada del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 9. Corrección de coberturas de uso de suelo



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 10. Herramienta Basin Model Manager

c) Parámetro de subcuenca (Subbasin), donde se ingresa el área de cada UH

Basin Name: Modelo Yuracyacu
Element Name: W360
Initial Abstraction (MM): 17.701
*Curve Number: 74.159
*Impervious (%): 21.307

b) Parámetro de pérdidas (Loss), donde se ingresa el valor de CN

Basin Name: Modelo Yuracyacu
Element Name: W360
Description:
Downstream: Salida
*Area (KM2): 3.431
Latitude Degrees: 5
Latitude Minutes: 56
Latitude Seconds: 18
Longitude Degrees: 77
Longitude Minutes: 19
Longitude Seconds: 21
Canopy Method: --None--
Surface Method: --None--
Loss Method: SCS Curve Number
Transform Method: SCS Unit Hydrograph
Baseflow Method: --None--

a) Parámetro de transformación (Transforms), donde se ingresa el Tlag

Basin Name: Modelo Yuracyacu
Element Name: W360
Graph Type: Standard (PRF 484)
*Lag Time (MIN): 26.029

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 11. Registro histórico de precipitación máxima en 24 horas Estación Rioja

ESTACIÓN RIOJA

Estación: RIOJA/000377/DZ09		Longitud: 77° 10' 1" "W"		Dpto: SAN MARTIN									
Parámetro: PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)		Latitud: 6° 2' 48" "S"		Prov: RIOJA									
		Altitud: 880 m.s.n.m.		Dist: RIOJA									
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁX
1959							37.5	27.6	28.2	25.3	24.6	23.6	37.5
1960	32.0	24.8	20.8	23.5		22.5	10.5	23.7	49.8	49.8	67.4	44.3	67.4
1961	20.5	16.5	32.0	93.5		16.2	14.5	10.0	24.0	35.0	20.0	34.0	93.5
1962	26.3	20.7	26.4	58.5		19.4	12.5	16.9	36.9	42.4	43.7	39.1	58.5
1963	23.4	18.6	29.2	76.0		17.8	13.5	13.4	30.5	38.7	31.9	36.5	76.0
1964	24.8	44.5	60.6	34.0	19.0	54.5	39.0	45.0	26.3	40.0	13.5	40.0	60.6
1965	10.4	60	36.4	55	18.6	45	36.8	11.6	15	15.5	61.2	18	61.2
1966	23.8	9.8	27.1	14.1	82.6	19.1	40.7	14.1	15.9	55.3	42	18.5	82.6
1967	39.4	32.4	12.6	47	50.6	24.3	25.7	8.5	19.1	20.8	66.1	39.8	66.1
1968	58.2	38.8	20.5	58.3	24.7	30.2	18.3	12.3	40.4	39.7	26.2	38.3	58.3

Fuente: SENAMHI.

(Continuación)

<i>AÑO</i>	<i>ENE.</i>	<i>FEB.</i>	<i>MAR.</i>	<i>ABR.</i>	<i>MAY.</i>	<i>JUN.</i>	<i>JUL.</i>	<i>AGO.</i>	<i>SET.</i>	<i>OCT.</i>	<i>NOV.</i>	<i>DIC.</i>	<i>MÁX</i>
1969	42.3	33.8	28	80.3	22.2	24.5	28.4	20.6	37.1	46.8	49.4	68.2	80.3
1970	35.6	30.2	54.8	28.8	22.6	27.35	12.7	16.45	38.75	40.4	37.8	53.25	54.8
1971	19.2	64.5	52.5	20.3	60.1	22.7	26.5	13.5	13.5	33.9	41.3	19.4	64.5
1972	27.3	18.1	44.6	50.3	51.7	24.7	33	21.3	47.2	48.4	30.6	24	51.7
1973	24	32.7	14.7	48.3	70.5	17.2	22.4	17.9	12.3	41.3	26.7	17.6	70.5
1974	34.6	19.4	22.4	20.9	61.1	20.95	75.6	19.6	100.6	76.8	28.65	20.8	100.6
1975	29.3	80.3	31.4	59	49	34.4	54	29	21.4	17	29	67.8	80.3
1976	52.4	35.5	33	25.2	31.4	30.6	7.9	23	49.6	40	61.7	31.3	61.7
1977	23.2	44.4	34.5	51.8	26.5	33.7	13.8	22.2	13.6	52.8	54.9	47.2	54.9
1978	17.7	36.1	36.2	28.6	43.2	9.2	15.2	30	42.4	45.4	72.6	39.3	72.6
1979	24.8	16.2	50.9	17.9	42.8	19.4	33.4	30.5	58.6	54	68.4	39.7	68.4
1980	32	68	59	30	20	30.3	45	26	17.6	25.8	64	56.6	68
1981	30.7	70	75	46.8	65	54.7	4.6	20	0	54	48.2	30.3	75
1982	27.2	59	42.4	25.4	36	30	27	10	38	21.2	90.6	35	90.6
1983	24.6	48.6	46.4	30.6	28	35.4	15.8	15	19	37.6	69.4	32.65	69.4
1984	25.9	53.8	44.4	28	32	32.7	21.4	12.5	28.5	29.4	80	33.83	80
1985	25.3	51.2	45.4	29.3	30	34.05	18.6	13.75	23.75	33.5	74.7	33.24	74.7
1986	25.6	41.5	90	28.65	31	10.7	10.6	17.4	75.1	48.7	80.5	47.1	90
1987	30	39.2	36.4	85.7	40.3	20.6	30	28.7	24.1	53.5	73.8	27	85.7
1988	60.5	20.5	75.6	60	11.2	20	6	21.5	14	30.5	100.1	53.5	100.1
1989	44	41.2	57	39.8	25.7	29.5	9.5	19	32.7	40.5	23	16	57

Fuente: SENAMHI.

(Continuación)

<i>AÑO</i>	<i>ENE.</i>	<i>FEB.</i>	<i>MAR.</i>	<i>ABR.</i>	<i>MAY.</i>	<i>JUN.</i>	<i>JUL.</i>	<i>AGO.</i>	<i>SET.</i>	<i>OCT.</i>	<i>NOV.</i>	<i>DIC.</i>	<i>MÁX</i>
1990	28.8	100	76.7	32.2	15.1	15.5	27.5	33.4	43	20.1	21.5	25.5	100
1991	13.2	60	59	69	60	66.5	10.5	26.6	34.5	27.2	32.2	25.2	69
1992	30.3	36.3	61.2	40.5	13	12.7	28.2	18.5	27.6	53.4	33.5	31.3	61.2
1993	21.5	49.5	53.7	35.1	44	13.6	15.5	11.9	37	29.5	52	23	53.7
1994	17.7	36.5	58.6	36.7	50.5	26	25.6	8.4	22.7	98.5	66.3	27.2	98.5
1995	59.1	37	74.8	29.5	40	21.3	35.2	13.8	29.3	14.5	27	46.3	74.8
1996	32.8	16.5	22	37.2	22.3	9.9	17.6	29.2	30.3	36.1	18	30.2	37.2
1997	43.6	70.3	78	52.2	30.8	9	3.6	15.3	27.2	25.7	37.5	43.4	78
1998	23.7	29.5	72.4	86.5	30.3	16.1	6.8	21	13.1	70.6	43.2	18.1	86.5
1999	54	45.8	31.1	13.2	48.5	14.1	22.1	33	12	63.6	22	22.1	63.6
2000	34	27.7	28.2	32.1	35.1	4.8	26.6	18.3	35.9	9	17.9	45	45
2001	13.9	40.2	50	38.6	66.2	13.5	11.4	23.3	38.2	70.5	40.2	71.3	71.3
2002	50.9	22.2	27.8	55.2	31.2	7.9	22.5	22.2	29.8	77.5	21.5	18.2	77.5
2003	33.8	24.8	119.4	33.9	27.6	21.5	12.7	20.6	34.6	65.2	82.4	111.5	119.4
2004	11.8	16.7	50.2	60.8	35.2	6	8.7	47.2	32.4	55.3	35.4	47.6	60.8
2005	34.8	55.4	38.7	43.5	17.6	13.7	19.8	12.3	11.7	43.2	41.3	72.3	72.3
2006	10.9	84.3	25.9	19	21.2	22.8	26	40.8	13.4	13.2	26.3	35.3	84.3
2007	22.85	23	31.2	98.6	65.1	3.7	100	32.7	54.3	86.2	57.3	31.2	100
2008	26.5	23.5	42.5	25.5	68.3	30.2	35.2	17.8	22.1	47.7	36.2	22.4	68.3
2009	29.9	24.7	52	62.05	25.9	15.3	7.5	31.5	29.3	13.9	20.5	38.2	62.05
2010	14.8	38.6	28.7	90.2	21.6	9.5	40.3	5.3	21.7	21.4	35.3	48.6	90.2

Fuente: SENAMHI.

(Continuación)

<i>AÑO</i>	<i>ENE.</i>	<i>FEB.</i>	<i>MAR.</i>	<i>ABR.</i>	<i>MAY.</i>	<i>JUN.</i>	<i>JUL.</i>	<i>AGO.</i>	<i>SET.</i>	<i>OCT.</i>	<i>NOV.</i>	<i>DIC.</i>	<i>MÁX</i>
2011	40.8	49.2	54.6	11.5	29.6	11.8	15.6	37.2	12.3	99.2	35.3	46.2	99.2
2012	65	32.3	76.5	94.3	30.4	14.4	8.2	24.3	14.2	41	49.7	48.2	94.3
2013	53	52.5	61	44.2	28.6	24.5	16	29.7	67.5	26.3	69.3	17.4	69.3
2014	50.8	63.3	59.3	91.6	47	30.4	45.6	23.4	45.2	47.1	48	43.4	91.6
2015	32.4	41.6	68.3	51.3	50.9	10.7	27.4	37.1	15.7	42.5	69.9	33.3	69.9
2016	12.7	52.45	63.8	71.45	48.95	20.55	36.5	30.25	30.45	44.8	58.95	38.35	71.45
2017	22.55	47.025	66.05	61.375	44.9	28.8	18.6	26.6	24.2	28.4	18.8	14.8	66.05
2018	25.7	55.2	24.1	70.5	31.6	25.8	22.3	26.2	73.1	44.7	35.6	18.7	73.1
2019	34.2	69.2	24.2	26.7	28.1	25.2	30.6	23.2	59.1	26.1	48.6	16.75	69.2
PROMEDIO	31.014	41.592	47.003	46.834	37.596	22.622	24.336	22.164	31.733	42.236	45.960	36.669	73.611
DESV. EST.	13.241	19.189	21.038	23.180	16.588	12.129	16.661	9.115	18.159	19.918	21.103	17.288	16.369
MÁXIMO	65	100	119.4	98.6	82.6	66.5	100	47.2	100.6	99.2	100.1	111.5	119.4
MÍNIMO	10.4	9.8	12.6	11.5	11.2	3.7	3.6	5.3	0	9	13.5	14.8	37.2
Nº Datos	60	60	60	60	56	60	61	61	61	61	61	61	61

Fuente: SENAMHI.

Apéndice 12. Datos de precipitación máxima en 24 horas Estación Rioja

<i>Nº</i>	<i>Año</i>	<i>Orden</i>	<i>Pmáx24h</i>	<i>Log(Pmáx24h)</i>
1	1959	60	37.5	1.5740
2	1960	41	67.4	1.8287
3	1961	9	93.5	1.9708
4	1962	52	58.5	1.7672
5	1963	23	76	1.8808
6	1964	51	60.6	1.7825
7	1965	48	61.2	1.7868
8	1966	17	82.6	1.9170
9	1967	42	66.1	1.8202
10	1968	53	58.3	1.7657
11	1969	18	80.3	1.9047
12	1970	56	54.8	1.7388
13	1971	44	64.5	1.8096
14	1972	58	51.7	1.7135
15	1973	32	70.5	1.8482
16	1974	2	100.6	2.0026
17	1975	19	80.3	1.9047
18	1976	47	61.7	1.7903
19	1977	55	54.9	1.7396
20	1978	28	72.6	1.8609
21	1979	38	68.4	1.8351
22	1980	40	68	1.8325
23	1981	24	75	1.8751
24	1982	11	90.6	1.9571
25	1983	34	69.4	1.8414
26	1984	20	80	1.9031
27	1985	26	74.7	1.8733
28	1986	13	90	1.9542
29	1987	15	85.7	1.9330

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de SENAMHI.

(Continuación)

<i>Nº</i>	<i>Año</i>	<i>Orden</i>	<i>Pmáx24h</i>	<i>Log(Pmáx24h)</i>
30	1988	3	100.1	2.0004
31	1989	54	57	1.7559
32	1990	4	100	2.0000
33	1991	37	69	1.8388
34	1992	49	61.2	1.7868
35	1993	57	53.7	1.7300
36	1994	7	98.5	1.9934
37	1995	25	74.8	1.8739
38	1996	61	37.2	1.5705 ^(a)
39	1997	21	78	1.8921
40	1998	14	86.5	1.9370
41	1999	45	63.6	1.8035
42	2000	59	45	1.6532
43	2001	31	71.3	1.8531
44	2002	22	77.5	1.8893
45	2003	1	119.4	2.0770 ^(b)
46	2004	50	60.8	1.7839
47	2005	29	72.3	1.8591
48	2006	16	84.3	1.9258
49	2007	5	100	2.0000
50	2008	39	68.3	1.8344
51	2009	46	62.05	1.7927
52	2010	12	90.2	1.9552
53	2011	6	99.2	1.9965
54	2012	8	94.3	1.9745
55	2013	35	69.3	1.8407
56	2014	10	91.6	1.9619
57	2015	33	69.9	1.8445
58	2016	30	71.45	1.8540
59	2017	43	66.05	1.8199

^(a)Mínimo valor registrado, ^(b) Máximo valor registrado. *Fuente:* Elaboración propia a partir de datos de SENAMHI.

(Continuación)

<i>Nº</i>	<i>Año</i>	<i>Orden</i>	<i>P_{máx24h}</i>	<i>Log(P_{máx24h})</i>
60	2018	27	73.1	1.8639
61	2019	36	69.2	1.8401
<i>Número de datos n</i>		61	61	
<i>Suma Σ</i>		4490.25	113.2133	
<i>Máximo</i>		119.4	2.0770	
<i>Mínimo</i>		37.2	1.5705	
<i>Promedio \bar{x}</i>		73.6107	1.8560	
<i>Desviación estándar s</i>		16.3686	0.1002	
<i>Coficiente asimetría Cs</i>		0.2724	-0.5000	
<i>Cs/6 k</i>		0.0454	-0.0833	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de SENAMHI

Determinación de datos dudosos mediante el Método Water Resources Council

$$n = 61$$

$$K_n = 2.843^*$$

*K_n: valor recomendado, varía según el valor de n (significancia:10%)

Umbral de datos dudosos altos (X_H: Unid. Logarítmicas)

$$X_H = \bar{x} + K_n * s_x \quad X_H = 2.141$$

Precipitación máxima aceptada

$$P_H = 10^{x_H} \quad P_H = 138.318 \text{ mm}$$

Umbral de datos dudosos bajos (X_L: Unid. Logarítmicas)

$$X_L = \bar{x} - K_n * s_x \quad X_L = 1.571$$

Precipitación mínima aceptada

$$P_L = 10^{x_L} \quad P_L = 37.242 \text{ mm}$$

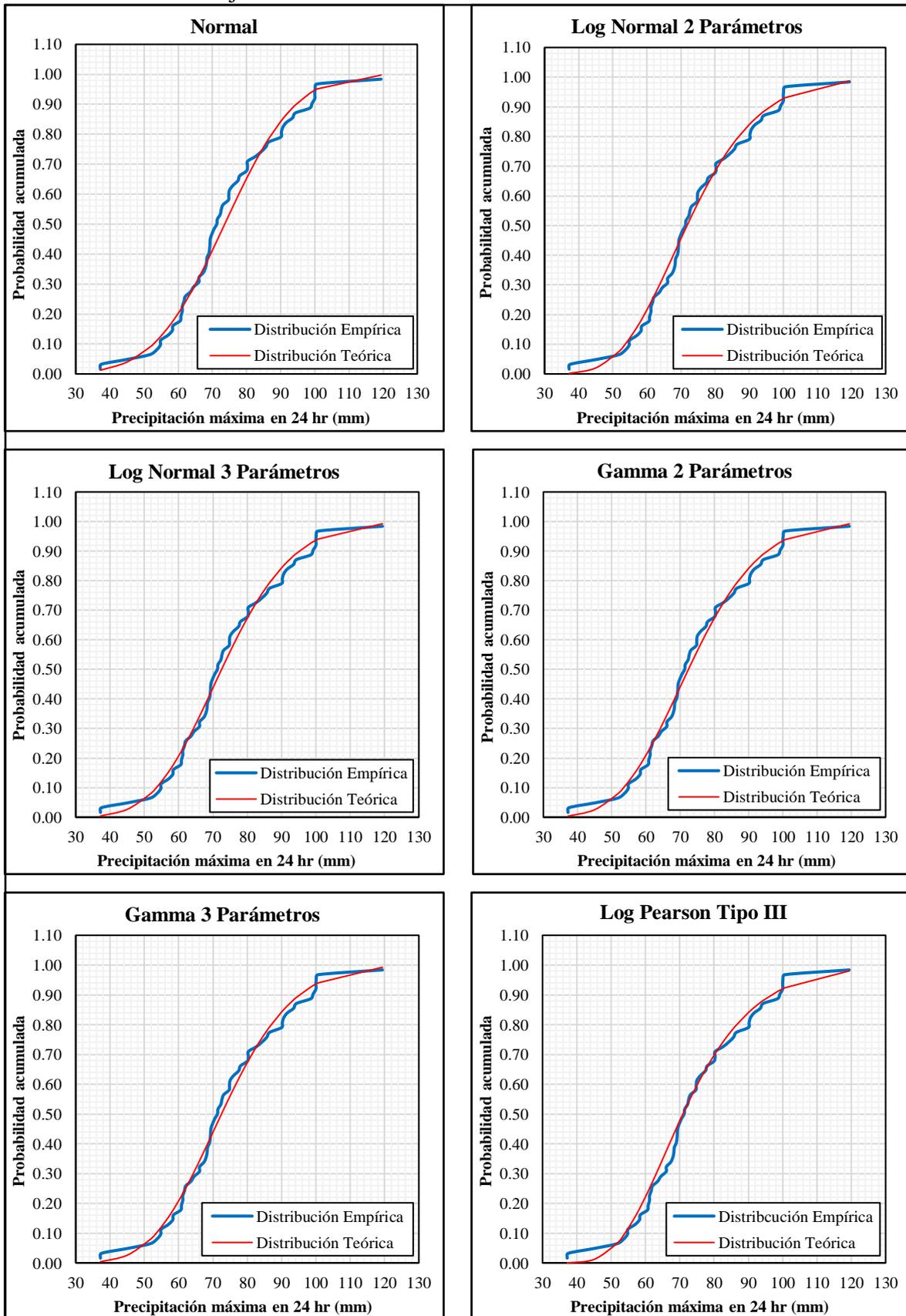
Nota: Se observa que todos los valores ' Pmáx24h ' están dentro de los límites P_H y P_L, es decir se encuentran entre 119.4 y 37.2 mm. Por lo tanto, no existen datos dudosos.

Apéndice 13. Resumen de prueba de bondad de ajuste - Estación Rioja

<i>PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE (Smirnov-Kolmogorov)</i>					
<i>Distribuciones</i>	Nivel de	Δ	Δ	Ajuste	Jerarquía
	significancia	Tabular	Teórico		
Normal	0.05	0.1741	0.0790	Si se ajusta	7
Log Normal 2P	0.05	0.1741	0.0524	Si se ajusta	2
Log Normal 3	0.05	0.1741	0.0531	Si se ajusta	4
Parámetros					
Gamma 2 Parámetros	0.05	0.1741	0.0515	Si se ajusta	1
Gamma 3 Parámetros	0.05	0.1741	0.0524	Si se ajusta	2
Log Pearson Tipo III	0.05	0.1741	0.0715	Si se ajusta	6
Gumbel	0.05	0.1741	0.0657	Si se ajusta	5
Log Gumbel	0.05	0.1741	0.1138	Si se ajusta	8

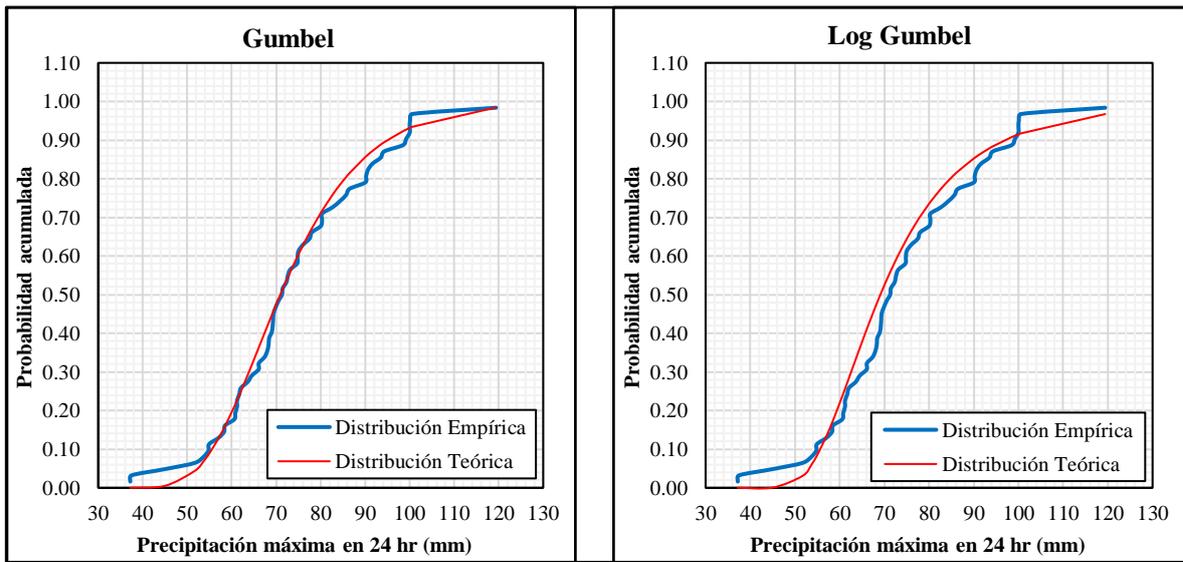
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 14. Gráficas de prueba de Smirnov-Kolmogorov para diversas distribuciones teóricas - Estación Rioja.



Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)

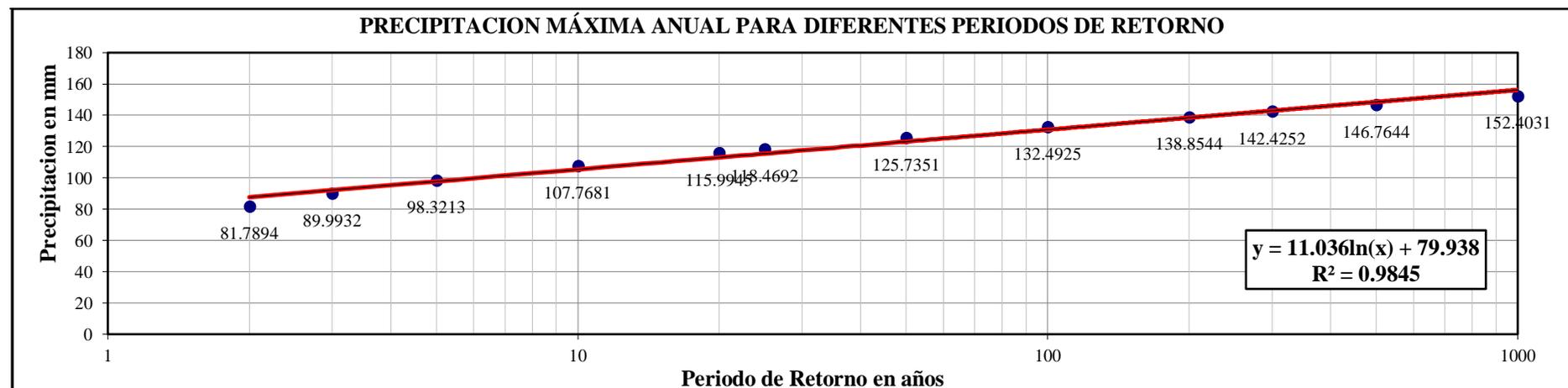


Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 15. Precipitación máxima anual corregida para diversos periodos de retorno - Estación Rioja

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

<i>T</i> (años)	P(X≤xT)	Normal	Log Normal 2 Parámetros	Log Normal 3 Parámetros	Gamma 2 Parámetros	Gamma 3 Parámetros	Log Pearson Tipo III	Gumbel	Log Gumbel	Pmáx mm	Pmáx (corregida) mm
2	0.5	73.61	71.77	72.51	72.38	72.48	70.92	70.92	69.1	72.38	81.7894
5	0.8	87.34	87.16	86.93	87.01	86.98	86.59	85.39	84.74	87.01	98.3213
10	0.9	94.52	96.48	95.17	95.37	95.22	96.78	94.96	96.99	95.37	107.7681
25	0.96	102.18	107.51	104.51	104.84	104.52	109.55	107.07	115.03	104.84	118.4692
50	0.98	107.12	115.3	110.87	111.27	110.82	119.03	116.04	130.55	111.27	125.7351
100	0.99	111.57	122.79	116.82	117.25	116.66	128.51	124.95	148.02	117.25	132.4925
200	0.995	115.64	130.07	122.46	122.88	122.15	138.01	133.83	167.76	122.88	138.8544
500	0.998	120.57	139.46	129.55	129.88	128.96	150.73	145.55	197.89	129.88	146.7644



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 16. Precipitación de diseño para duraciones menores a 24 horas IILA - SENAMHI – UNI Estación Rioja

ESTACIÓN RIOJA										
Duración		Periodos de retorno Tr (años)								
Horas	Minutos	2	5	10	20	25	50	100	200	500
0.17	10	13.4342	16.1496	17.7013	18.7850	19.4590	20.6524	21.7623	22.8073	24.1065
0.33	20	15.7946	18.9872	20.8115	22.0856	22.8780	24.2811	25.5861	26.8146	28.3422
0.50	30	17.7635	21.3540	23.4057	24.8387	25.7298	27.3079	28.7755	30.1572	31.8751
0.67	40	19.4804	23.4179	25.6679	27.2395	28.2167	29.9473	31.5567	33.0720	34.9560
0.83	50	21.0183	25.2667	27.6943	29.3899	30.4443	32.3115	34.0480	35.6829	37.7156
1.00	60	22.4208	26.9527	29.5424	31.3511	32.4758	34.4676	36.3200	38.0640	40.2324
1.50	90	26.0615	31.3293	34.3394	36.4418	37.7492	40.0645	42.2176	44.2448	46.7653
2.00	120	29.1321	35.0205	38.3854	40.7355	42.1969	44.7849	47.1918	49.4578	52.2752
4.00	240	37.7169	45.3405	49.6969	52.7395	54.6316	57.9823	61.0984	64.0322	67.6798
6.00	360	44.9373	54.0204	59.2107	62.8359	65.0902	69.0823	72.7950	76.2904	80.6363
7.00	420	48.0317	57.7403	63.2880	67.1628	69.5723	73.8393	77.8077	81.5438	86.1890
8.00	480	50.8839	61.1690	67.0461	71.1510	73.7037	78.2240	82.4280	86.3860	91.3071
10.00	600	56.0332	67.3591	73.8310	78.3513	81.1623	86.1401	90.7695	95.1280	100.5471
11.00	660	58.3885	70.1904	76.9344	81.6447	84.5738	89.7608	94.5849	99.1266	104.7734
12.00	720	60.6250	72.8790	79.8813	84.7720	87.8133	93.1991	98.2079	102.9235	108.7867
24.00	1440	81.7894	98.3213	107.7681	114.3662	118.4692	125.7351	132.4925	138.8544	146.7644

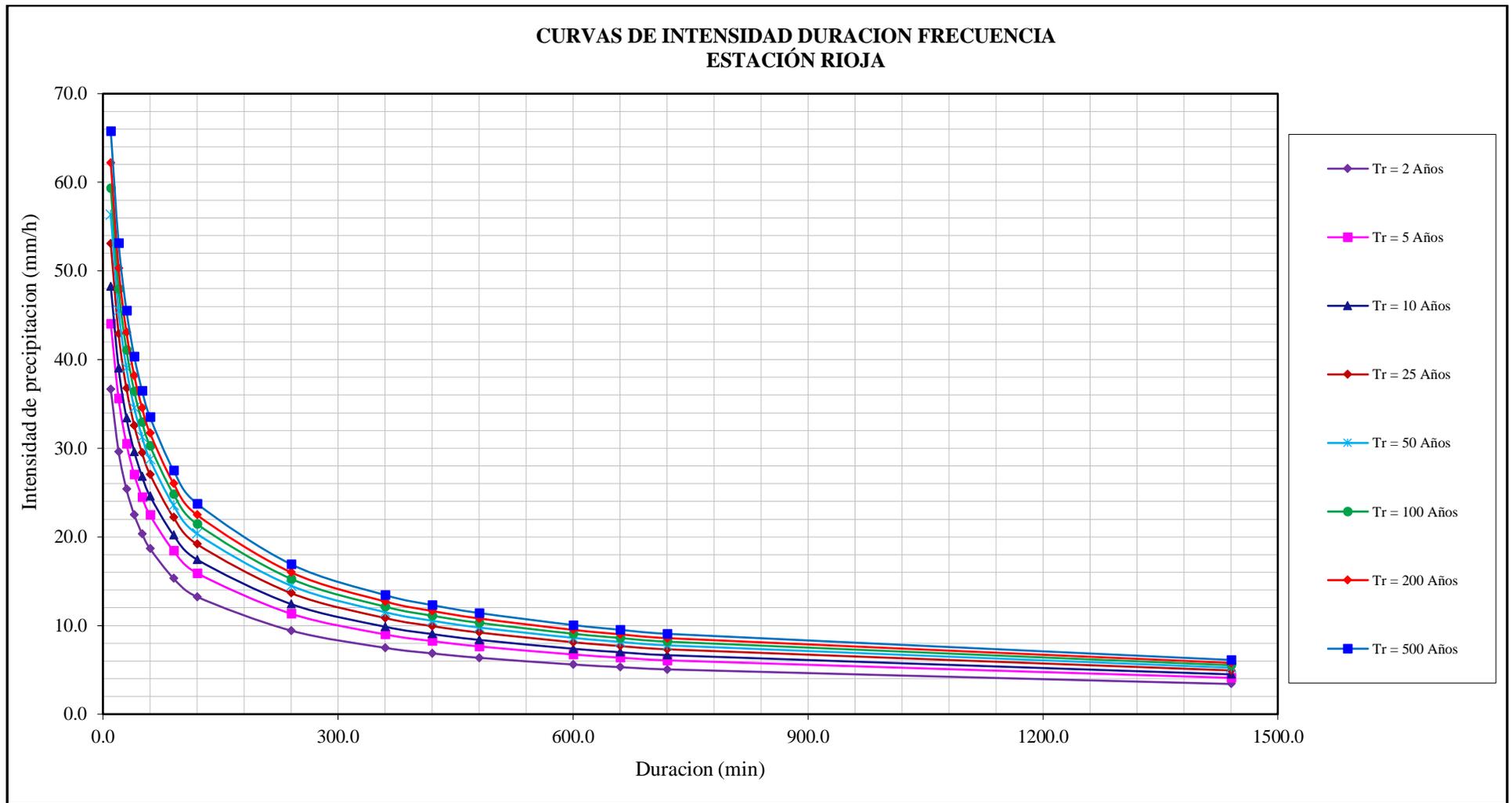
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 17. Intensidades de diseño para duraciones menores a 24 horas estación Rioja

ESTACIÓN RIOJA										
Duración		Periodos de retorno Tr (años)								
Horas	Minutos	2	5	10	20	25	50	100	200	500
0.17	10	36.6387	44.0443	48.2762	51.2319	53.0699	56.3247	59.3518	62.2017	65.7451
0.33	20	29.6149	35.6009	39.0215	41.4106	42.8962	45.5271	47.9739	50.2774	53.1415
0.50	30	25.3764	30.5057	33.4367	35.4838	36.7569	39.0112	41.1078	43.0817	45.5359
0.67	40	22.4774	27.0207	29.6169	31.4301	32.5577	34.5546	36.4116	38.1600	40.3338
0.83	50	20.3403	24.4516	26.8010	28.4418	29.4622	31.2692	32.9497	34.5318	36.4990
1.00	60	18.6840	22.4606	24.6186	26.1259	27.0632	28.7230	30.2667	31.7200	33.5270
1.50	90	15.3303	18.4290	20.1997	21.4364	22.2054	23.5673	24.8339	26.0264	27.5090
2.00	120	13.2419	15.9184	17.4479	18.5161	19.1804	20.3568	21.4508	22.4808	23.7615
4.00	240	9.4292	11.3351	12.4242	13.1849	13.6579	14.4956	15.2746	16.0080	16.9200
6.00	360	7.4896	9.0034	9.8685	10.4726	10.8484	11.5137	12.1325	12.7151	13.4394
7.00	420	6.8617	8.2486	9.0411	9.5947	9.9389	10.5485	11.1154	11.6491	12.3127
8.00	480	6.3605	7.6461	8.3808	8.8939	9.2130	9.7780	10.3035	10.7982	11.4134
10.00	600	5.6033	6.7359	7.3831	7.8351	8.1162	8.6140	9.0770	9.5128	10.0547
11.00	660	5.3080	6.3809	6.9940	7.4222	7.6885	8.1601	8.5986	9.0115	9.5249
12.00	720	5.0521	6.0733	6.6568	7.0643	7.3178	7.7666	8.1840	8.5770	9.0656
24.00	1440	3.4079	4.0967	4.4903	4.7653	4.9362	5.2390	5.5205	5.7856	6.1152

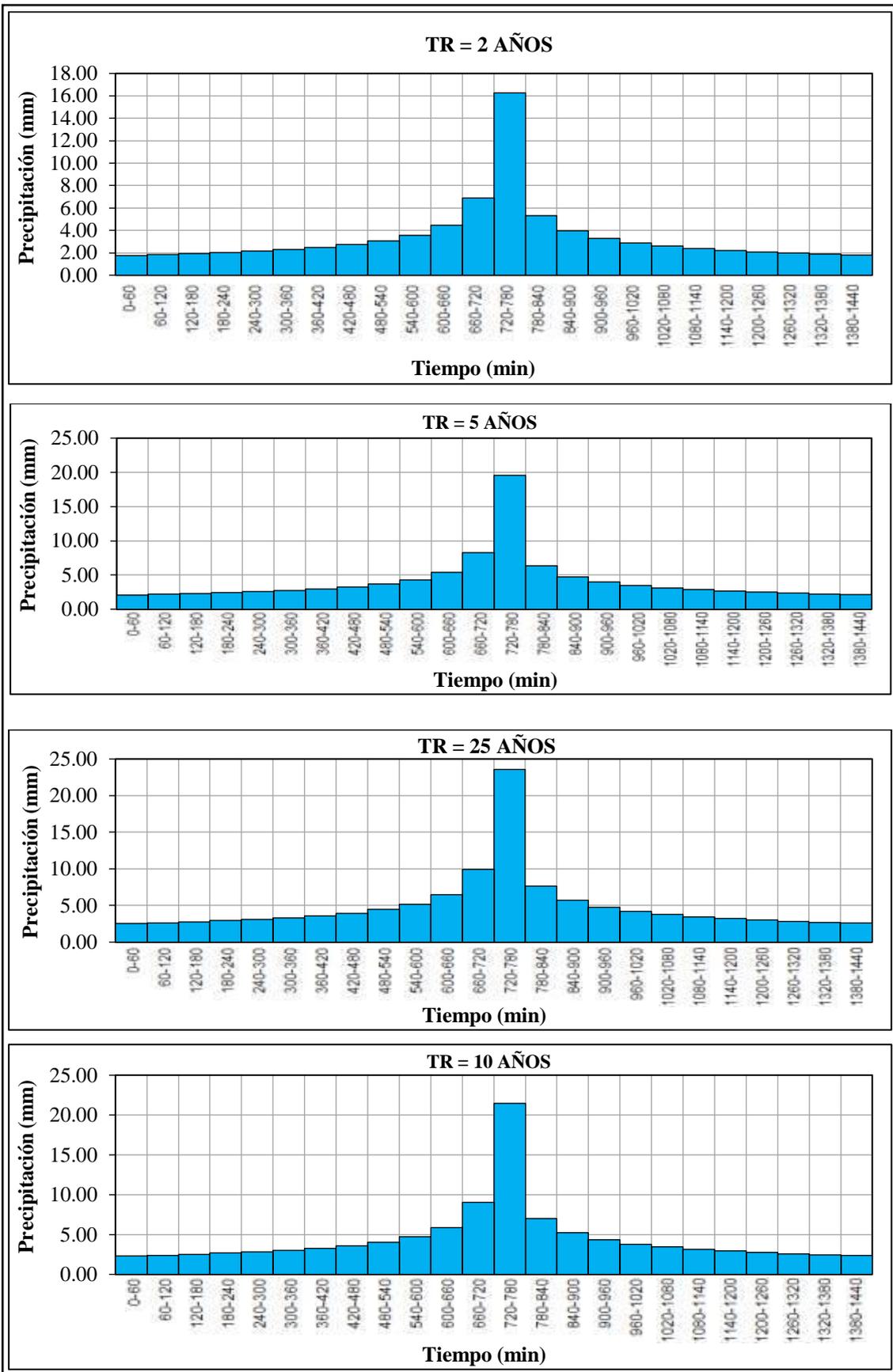
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 18. Gráfico de la Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) - Estación Rioja.



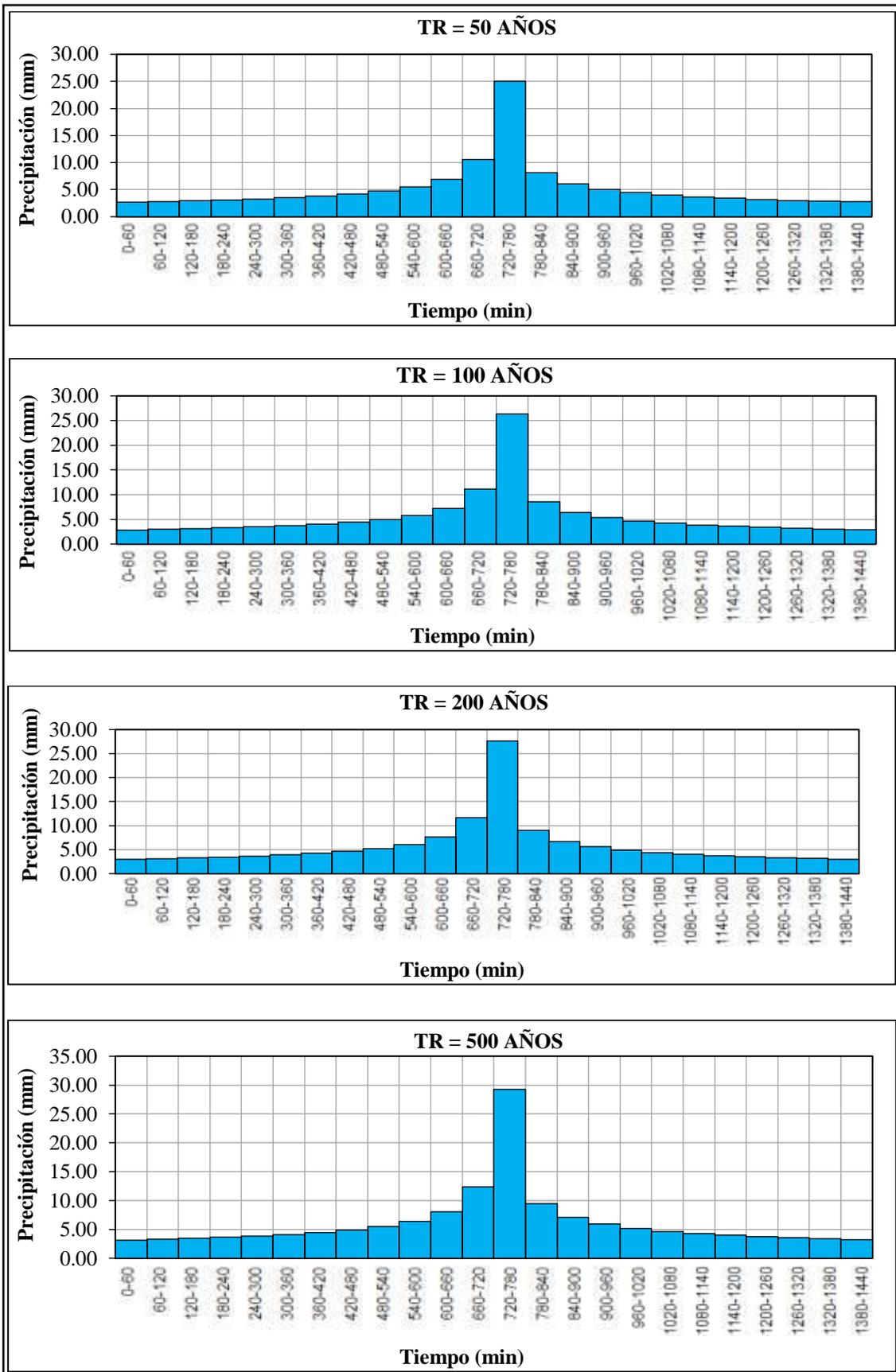
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 19. Hietogramas de precipitación - Estación Rioja



Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 20. Registro histórico de precipitación máxima 24 horas – Estación Naranjillo

ESTACIÓN NARANJILLO

Estación: NARANJILLO/000219/DZ09

Longitud: 77° 23' 14" "W"

Dpto: SAN MARTIN

Parámetro: PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

Latitud: 5° 49' 34" "S"

Prov: RIOJA

Altitud: 890 m.s.n.m.

Dist: NVA. CAJAMARCA

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁX
1975					58.0	35.0	17.5	20.0	57.0	36.0	28.0	22.0	58.0
1976	48.0	21.0	23.0	36.0	15.0	13.3	12.5	13.0	19.5	33.0	38.0	47.0	48.0
1977	20.0	31.0	69.5	41.0	33.0	51.0	37.0	27.0	24.0	50.0	26.0	25.0	69.5
1978	13.0	7.0	14.0	36.0	36.0	69.0	35.0	10.0	36.0	30.0	60.0	94.5	94.5
1979	35.0	30.5	64.0	40.0	34.0	10.0	35.0	15.0	45.0	22.0	89.0	67.0	89.0
1980	40.0	31.0	41.0	8.0	35.0	10.0	10.0	33.0	54.0	40.8	50.0	37.0	54.0
1981	30.0	62.0	41.0	43.0	64.0	18.0	7.5	20.0	15.0	45.0	130.5	42.0	130.5
1982	15.0	50.0	56.3	52.0	35.0	27.0	13.0	11.0	20.0	17.0	41.0	37.5	56.3
1983	20.0	31.0	50.5	53.5	21.3	10.0	3.0	15.0	15.0	32.0	15.0	27.0	53.5
1984	25.0	17.8	10.0	12.0	15.0	17.5	8.0	22.0	22.0	18.0	10.0	7.0	25.0

Fuente: SENAMHI

(Continuación)

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁX
1985	10	13	13	70.3	15	13	20	14	10	16	32	21	70.3
1986	43	45	32	33	17	11	12	15	17	12	30	16	45.0
1987	17	12	12	11	8.3	8	11	10	13	44	18	14.5	44.0
1988	8	7	19	30	11	22	13	13	15	12	12	17	30.0
1989	70	13	12	17	13	15	16.5	20	16	7	9	4.5	70.0
1990	59	23	25	12	8.6	7.5	14	16	18	15	14	12	59.0
1991	10	13	16	21	13	10.1	17	8.5	14	16	17	17	21.0
1992	10	20.3	17	21.5	18	12	28	22	9.8	19	20	20	28.0
1993	29	48	82.5	30.5	27	14.5	11.5	41	24	34	15	17	82.5
1994	45	28	28.5	54.3	21	29	22	9	25	60	82	26	82.0
1995	12	30	30	69.5	19	20.8	14.5	5	26	34	68.5	37	69.5
1996	24	32	31.5	13.5	35	9.9	7	31	17	68	40	33	68.0
1997	15	61	30.75	30.3	24.2	14.6	11.1	20.7	40.5	47.5	41.7	31.2	61.0
1998	21.4	33.6	42.6	68.5	49.3	15.4	6	32.8	11	41.6	15.6	31.2	68.5
1999	40	50.7	37	22.5	46.4	24.5	13.8	34.7	15.1	26.8	11.5	25.5	50.7
2000	39	36	27.5	35.8	11.3	31.6	12.6	16.8	20.5	26.3	16.9	32.5	39.0
2001	23.8	41.4	53.1	23.5	67.4	23.7	17	14.8	42.8	51.6	14.2	29	67.4
2002	32.8	37.5	83.5	44	33.2	5.5	19.4	26.5	35.4	55.3	47.7	29.8	83.5
2003	24.8	36.9	36.5	33.3	36.4	19.6	10.5	15.2	77.7	46.6	33.3	37.7	77.7

Fuente: SENAMHI

(Continuación)

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁX
2004	19.7	35.5	34.3	29.6	38.1	25.7	13.7	24.3	11.7	24.2	40.4	18.6	40.4
2005	38.9	25.5	29.5	68.5	40.8	26.1	19.6	11.7	24	19.5	61.3	36.7	68.5
2006	39.3	47.4	33.4	12	8.3	18.3	15	14	39.2	31.5	39.3	24.4	47.4
2007	39.1	18.7	25.9	63.4	24.55	9.5	21.2	47.7	37.4	101.2	71.1	42.6	101.2
2008	20.5	72.6	38.2	134.8	22.8	68.2	82.3	24.8	29.5	45.6	41.6	18.8	134.8
2009	29.6	21.5	60.3	81.5	23.7	32.8	17	22.6	22.7	24.1	35.9	12.8	81.5
2010	9.3	85.4	28.1	40.9	33.7	8.2	32.6	18	40.4	22.8	29.3	64.2	85.4
2011	29.5	20.8	25.3	35.5	49.1	27.8	60.9	38.9	23	70.5	20.8	36.2	70.5
2012	38.8	45	65	66.4	41.5	16.5	7.5	22.5	32.2	29.9	34.4	47.8	66.4
2013	40.7	29.6	71.2	30.8	45.5	34.2	31.4	49.8	60	44.3	34	23.5	71.2
2014	40.2	21.4	41.4	30.5	33.8	30	35.7	37.2	13	52	57.2	76.2	76.2
2015	94.5	81.8	45.5	45.1	22.6	25.2	19.6	31	17.7	67	51.8	49.85	94.5
2016	30.5	24.4	46.3	80.6	27.8	9.8	14.7	64	81.5	91.8	54.5	41.9	91.8
2017	62.5	90.5	58.8	20.4	25	36.6	8.1	29.6	46.2	41.2	56.1	12.4	90.5
2018	66.2	55	39.5	160	26.4	31	28.5	14	39.7	85.4	36.7	60.1	160.0
	21.6	30	49.15	27.5	52.4	22.8	36.2	8.5	27.4	49.2	55.2	36.25	55.2
PROMEDIO	31.8	35.6	38.4	43.0	29.7	22.0	20.0	22.5	28.9	39.0	38.8	32.4	69.6
DESV. EST.	18.3	20.3	18.9	30.4	14.9	14.1	14.6	12.4	17.1	21.6	24.3	18.4	27.8
MÁXIMO	94.5	90.5	83.5	160.0	67.4	69.0	82.3	64.0	81.5	101.2	130.5	94.5	160.0
MÍNIMO	8.0	7.0	10.0	8.0	8.3	5.5	3.0	5.0	9.8	7.0	9.0	4.5	21.0
Nº Datos	44	44	44	44	45	45	45	45	45	45	45	45	45

Fuente: SENAMHI.

Apéndice 21. Datos de precipitación máxima en 24 horas Estación Naranjillo

<i>N°</i>	<i>Año</i>	<i>Orden</i>	<i>Pmáx24h</i>	<i>Log(Pmáx24h)</i>
1	1975	30	58.0	1.7634
2	1976	36	48.0	1.6812
3	1977	21	69.5	1.8420
4	1978	5	94.5	1.9754
5	1979	9	89.0	1.9494
6	1980	33	54.0	1.7324
7	1981	3	130.5	2.1156
8	1982	31	56.3	1.7505
9	1983	34	53.5	1.7284
10	1984	44	25.0	1.3979
11	1985	19	70.3	1.8470
12	1986	38	45.0	1.6532
13	1987	39	44.0	1.6435
14	1988	42	30.0	1.4771
15	1989	20	70.0	1.8451
16	1990	29	59.0	1.7709
17	1991	45	21.0	1.3222 ^(a)
18	1992	43	28.0	1.4472
19	1993	12	82.5	1.9165
20	1994	13	82.0	1.9138
21	1995	22	69.5	1.8420
22	1996	25	68.0	1.8325
23	1997	28	61.0	1.7853
24	1998	23	68.5	1.8357
25	1999	35	50.7	1.7050
26	2000	41	39.0	1.5911
27	2001	26	67.4	1.8287
28	2002	11	83.5	1.9217
29	2003	15	77.7	1.8904
30	2004	40	40.4	1.6064

^(a)Mínimo valor registrado, ^(b) Máximo valor registrado. *Fuente:* Elaboración propia a partir de datos de SENAMHI.

(Continuación)

<i>Nº</i>	<i>Año</i>	<i>Orden</i>	<i>P_{máx24h}</i>	<i>Log(P_{máx24h})</i>
31	2005	24	68.5	1.8357
32	2006	37	47.4	1.6758
33	2007	4	101.2	2.0052
34	2008	2	134.8	2.1297
35	2009	14	81.5	1.9112
36	2010	10	85.4	1.9315
37	2011	18	70.5	1.8482
38	2012	27	66.4	1.8222
39	2013	17	71.2	1.8525
40	2014	16	76.2	1.8820
41	2015	6	94.5	1.9754
42	2016	7	91.8	1.9628
43	2017	8	90.5	1.9566
44	2018	1	160.0	2.2041 ^(b)
45	2019	32	55.2	1.7419
<i>Número de datos n</i>		45	45	
<i>Suma Σ</i>		3130.9	81.3461	
<i>Máximo</i>		160.0	2.2041	
<i>Mínimo</i>		21	1.3222	
<i>Promedio \bar{x}</i>		69.5756	1.8077	
<i>Desviación estándar s</i>		27.7727	0.1817	
<i>Coficiente asimetría Cs</i>		0.9770	-0.5528	
<i>Cs/6 k</i>		0.1628	-0.0921	

^(a)Mínimo valor registrado, ^(b) Máximo valor registrado. *Fuente:* Elaboración propia a partir de datos de SENAMHI.

Determinación de datos dudosos mediante el Método Water Resources Council

$$n = 45$$

$$Kn = 2.727^*$$

*Kn: valor recomendado, varía según el valor de n (significancia:10%)

Umbral de datos dudosos altos (X_H : Unid. Logarítmicas)

$$X_H = \bar{x} + K_n \cdot s_x \quad X_H = 2.303$$

Precipitación máxima aceptada

$$P_H = 10^{x_H} \quad P_H = 200.939 \text{ mm}$$

Umbral de datos dudosos bajos (X_L : Unid. Logarítmicas)

$$X_L = \bar{x} - K_n \cdot s_x \quad X_L = 1.312$$

Precipitación mínima aceptada

$$P_L = 10^{x_L} \quad P_L = 20.526 \text{ mm}$$

Nota: Se observa que todos los valores 'Pmáx24h' están dentro de los límites P_H y P_L , es decir se encuentran entre 160.0 y 20.5 mm. Por lo tanto, no existen datos dudosos.

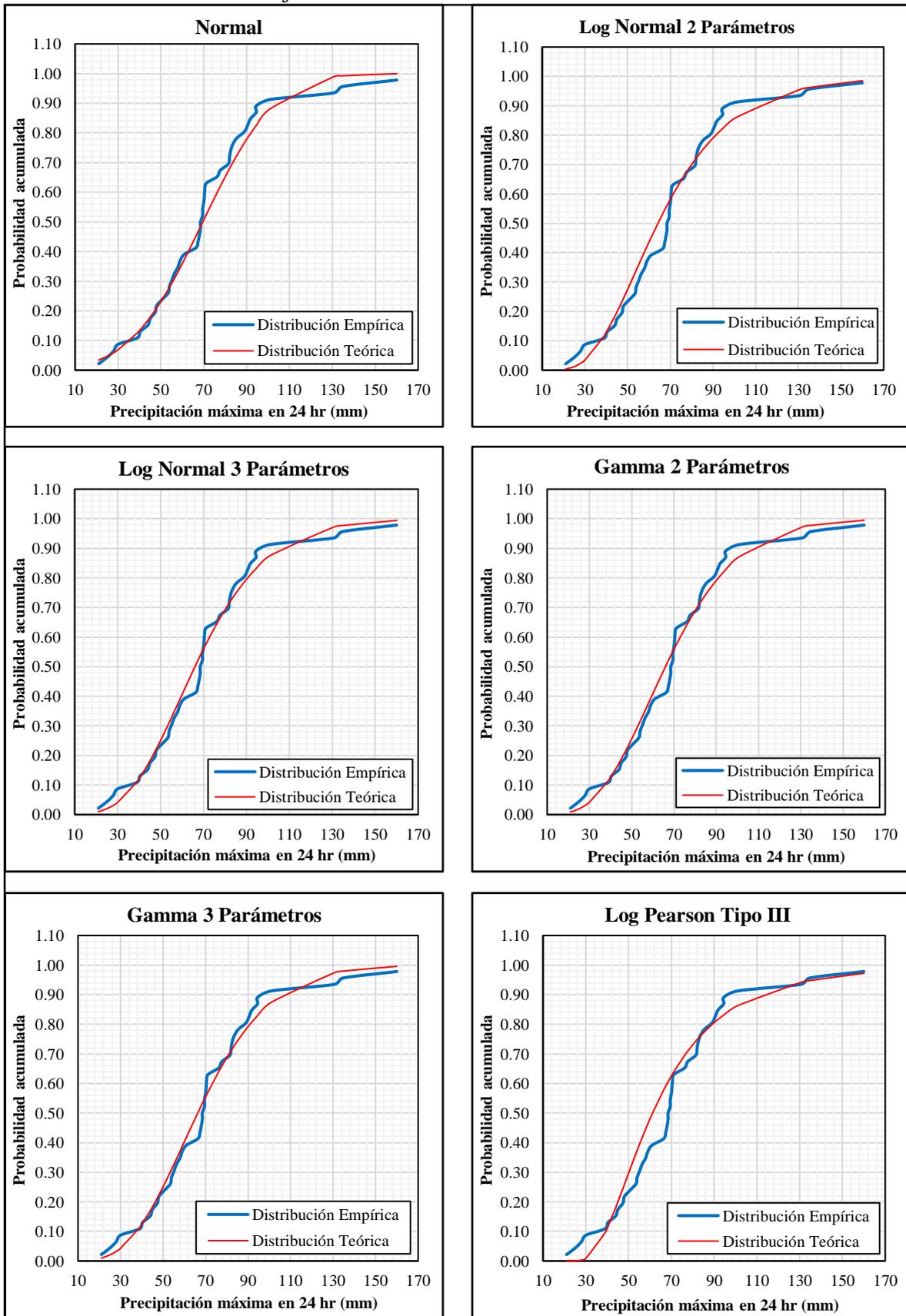
Apéndice 22. Resumen de prueba de bondad de ajuste - Estación Naranjillo

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE (Smirnov-Kolmogorov)

<i>Distribuciones</i>	Nivel de significancia	Δ Tabular	Δ Teórico	Ajuste	Jerarquía
Normal	0.05	0.2027	0.1061	Si se ajusta	4
Log Normal 2 Parámetros	0.05	0.2027	0.1187	Si se ajusta	6
Log Normal 3 Parámetros	0.05	0.2027	0.0929	Si se ajusta	2
Gamma 2 Parámetros	0.05	0.2027	0.0931	Si se ajusta	3
Gamma 3 Parámetros	0.05	0.2027	0.0878	Si se ajusta	1
Log Pearson Tipo III	0.05	0.2027	0.1645	Si se ajusta	7
Gumbel	0.05	0.2027	0.1089	Si se ajusta	5
Log Gumbel	0.05	0.2027	0.1887	Si se ajusta	8

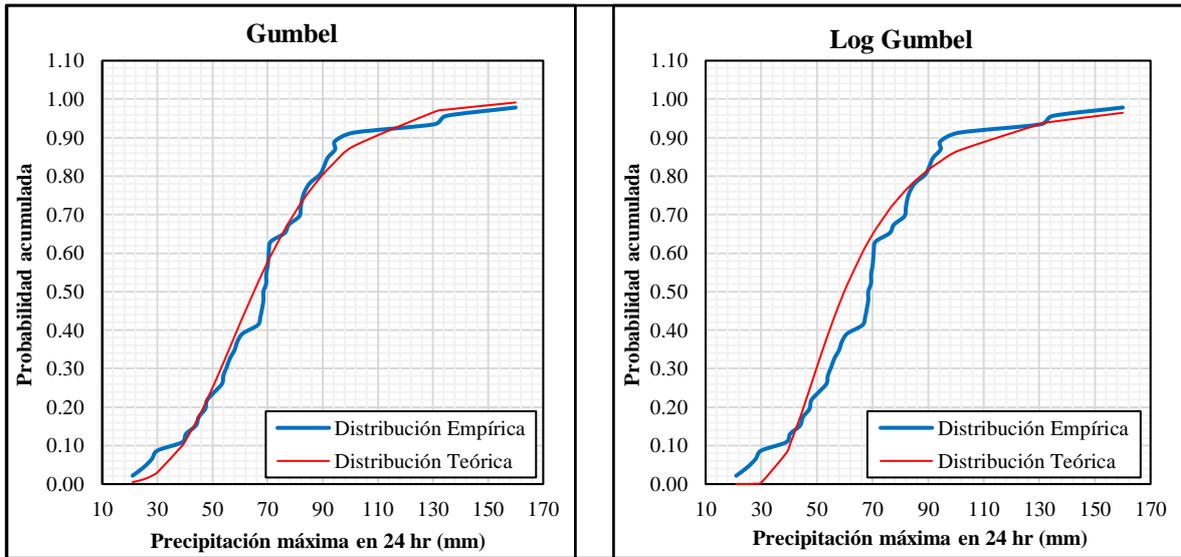
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 23. Gráficas de prueba de Smirnov-Kolmogorov para diversas distribuciones teóricas - Estación Naranjillo.



Fuente: Elaboración propia.

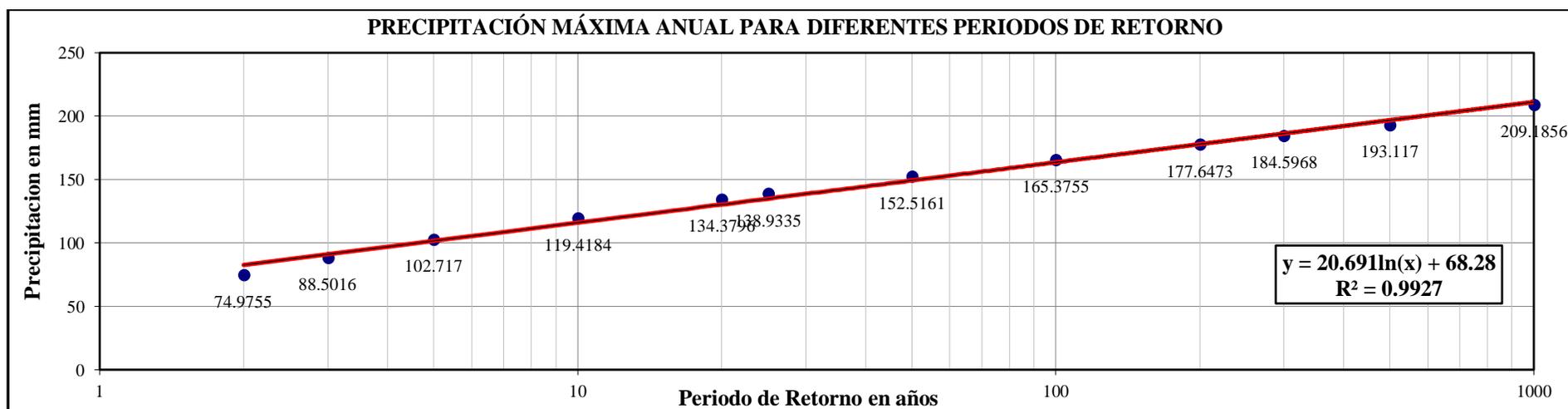
(Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 24. Precipitación máxima anual corregida para diversos periodos de retorno - Estación Naranjillo.

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)											
T	P(X≤xT)	Normal	Log Normal	Log Normal 3	Gamma 2	Gamma 3	Log	Gumbel	Log	Pmáx	Pmáx
(años)			2 Parámetros	Parámetros	Parámetros	Parámetros	Pearson		Gumbel	mm	(corregida)
							Tipo III				mm
2	0.500	69.580	64.220	66.010	65.990	66.350	61.230	65.010	59.880	66.350	74.976
5	0.800	91.990	91.320	90.560	91.040	90.900	89.120	89.560	87.270	90.900	102.717
10	0.900	103.720	109.780	105.810	106.290	105.680	111.570	105.810	111.990	105.680	119.418
25	0.960	116.220	133.590	124.180	124.270	122.950	144.990	126.340	153.470	122.950	138.934
50	0.980	124.290	151.650	137.350	136.830	134.970	173.900	141.570	193.890	134.970	152.516
100	0.990	131.550	169.970	150.140	148.780	146.350	206.510	156.690	244.520	146.350	165.376
200	0.995	138.190	188.660	162.700	160.220	157.210	243.270	171.750	308.120	157.210	177.647
500	0.998	146.250	214.090	179.110	174.690	170.900	299.050	191.630	418.010	170.900	193.117



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 25. Precipitación de diseño para duraciones menores a 24 horas IILA - SENAMHI – UNI Estación Naranjillo

ESTACIÓN NARANJILLO										
Duración		Periodos de retorno Tr (años)								
Horas	Minutos	2	5	10	20	25	50	100	200	500
0.17	10	12.3150	16.8716	19.6149	22.2436	22.8203	25.0513	27.1635	29.1791	31.7201
0.33	20	14.4788	19.8360	23.0613	26.1518	26.8299	29.4529	31.9362	34.3061	37.2935
0.50	30	16.2836	22.3087	25.9360	29.4118	30.1744	33.1243	35.9172	38.5824	41.9422
0.67	40	17.8575	24.4649	28.4428	32.2546	33.0908	36.3259	39.3887	42.3116	45.9961
0.83	50	19.2673	26.3963	30.6882	34.8009	35.7032	39.1937	42.4983	45.6519	49.6274
1.00	60	20.5530	28.1577	32.7361	37.1232	38.0857	41.8091	45.3342	48.6983	52.9390
1.50	90	23.8903	32.7299	38.0517	43.1512	44.2700	48.5980	52.6955	56.6058	61.5351
2.00	120	26.7051	36.5862	42.5350	48.2354	49.4860	54.3239	58.9042	63.2753	68.7853
4.00	240	34.5747	47.3676	55.0693	62.4495	64.0687	70.3322	76.2623	81.9214	89.0552
6.00	360	41.1936	56.4355	65.6117	74.4047	76.3338	83.7965	90.8618	97.6042	106.1037
7.00	420	44.0302	60.3217	70.1298	79.5282	81.5902	89.5667	97.1186	104.3253	113.4101
8.00	480	46.6448	63.9037	74.2942	84.2508	86.4352	94.8854	102.8856	110.5203	120.1446
10.00	600	51.3651	70.3706	81.8126	92.7767	95.1822	104.4875	113.2974	121.7047	132.3029
11.00	660	53.5241	73.3285	85.2514	96.6764	99.1830	108.8795	118.0597	126.8204	137.8640
12.00	720	55.5744	76.1373	88.5169	100.3795	102.9822	113.0500	122.5819	131.6781	143.1448
24.00	1440	74.9755	102.7170	119.4184	135.4223	138.9335	152.5161	165.3755	177.6473	193.1170

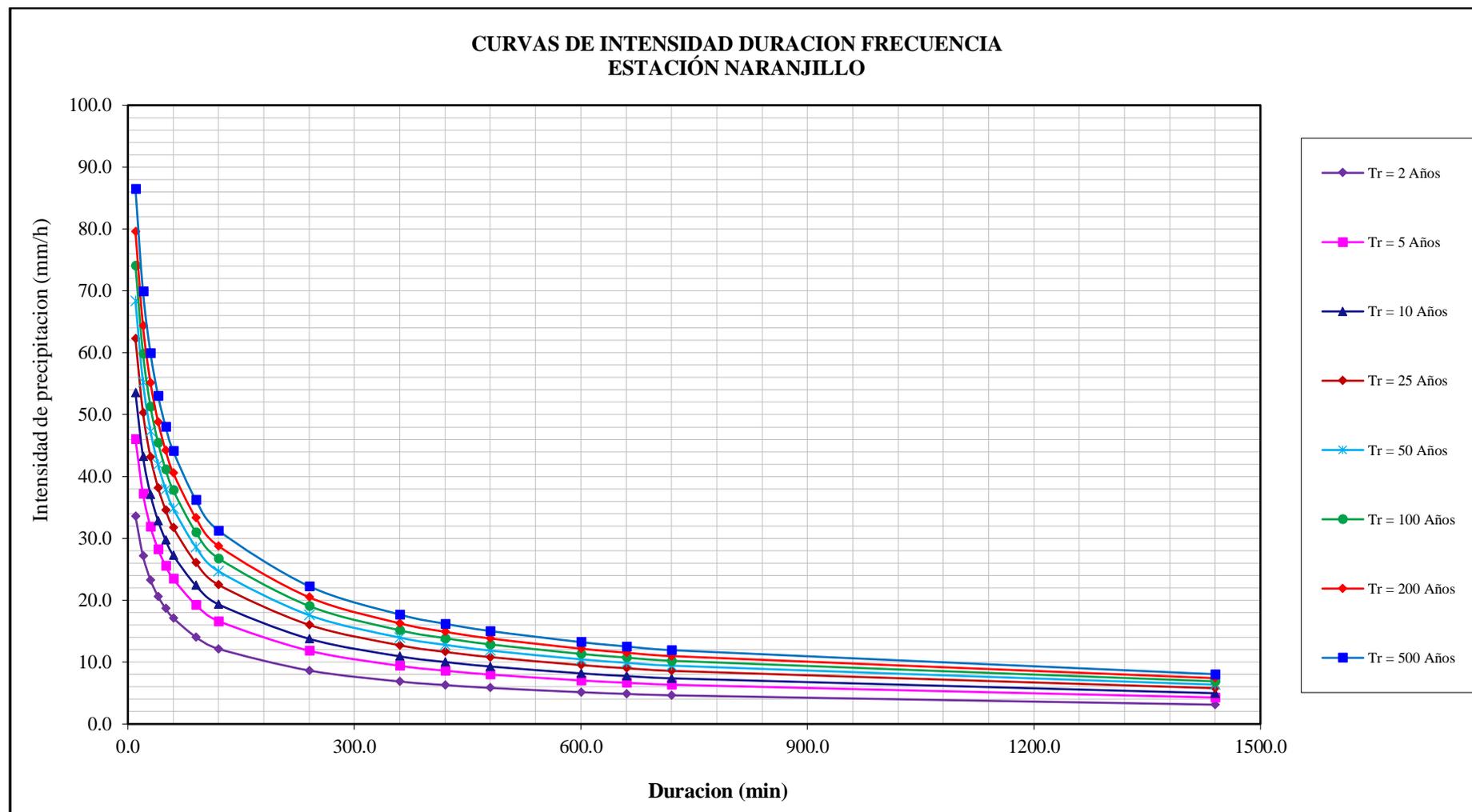
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 26. Intensidades de diseño para duraciones menores a 24 horas estación Naranjillo.

Duración		Estación Naranjillo								
Horas	Minutos	Periodos de retorno Tr (años)								
		2	5	10	20	25	50	100	200	500
0.17	10	33.5863	46.0135	53.4951	60.6642	62.2371	68.3216	74.0822	79.5795	86.5094
0.33	20	27.1477	37.1925	43.2399	49.0347	50.3061	55.2242	59.8804	64.3239	69.9252
0.50	30	23.2623	31.8695	37.0514	42.0168	43.1062	47.3204	51.3103	55.1178	59.9175
0.67	40	20.6048	28.2287	32.8186	37.2168	38.1817	41.9145	45.4485	48.8211	53.0725
0.83	50	18.6457	25.5448	29.6983	33.6783	34.5515	37.9294	41.1274	44.1793	48.0265
1.00	60	17.1275	23.4648	27.2800	30.9360	31.7381	34.8409	37.7785	40.5819	44.1158
1.50	90	14.0531	19.2529	22.3833	25.3831	26.0412	28.5871	30.9974	33.2976	36.1971
2.00	120	12.1387	16.6301	19.3341	21.9252	22.4936	24.6927	26.7747	28.7615	31.2661
4.00	240	8.6437	11.8419	13.7673	15.6124	16.0172	17.5831	19.0656	20.4803	22.2638
6.00	360	6.8656	9.4059	10.9353	12.4008	12.7223	13.9661	15.1436	16.2674	17.6840
7.00	420	6.2900	8.6174	10.0185	11.3612	11.6557	12.7952	13.8741	14.9036	16.2014
8.00	480	5.8306	7.9880	9.2868	10.5313	10.8044	11.8607	12.8607	13.8150	15.0181
10.00	600	5.1365	7.0371	8.1813	9.2777	9.5182	10.4488	11.3297	12.1705	13.2303
11.00	660	4.8658	6.6662	7.7501	8.7888	9.0166	9.8981	10.7327	11.5291	12.5331
12.00	720	4.6312	6.3448	7.3764	8.3650	8.5818	9.4208	10.2152	10.9732	11.9287
24.00	1440	3.1240	4.2799	4.9758	5.6426	5.7889	6.3548	6.8906	7.4020	8.0465

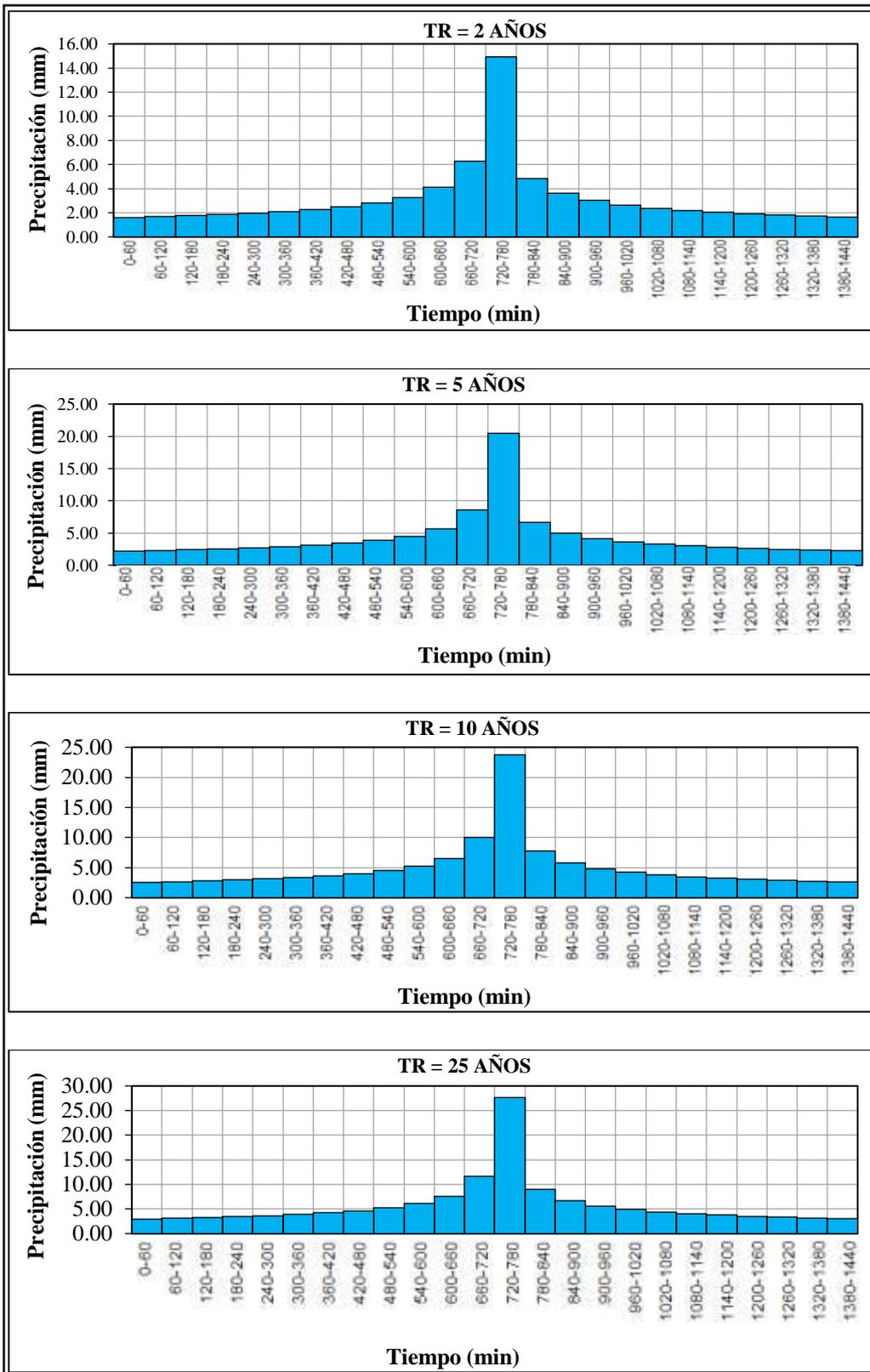
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 27. Gráfico de la Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) - Estación Naranjillo.



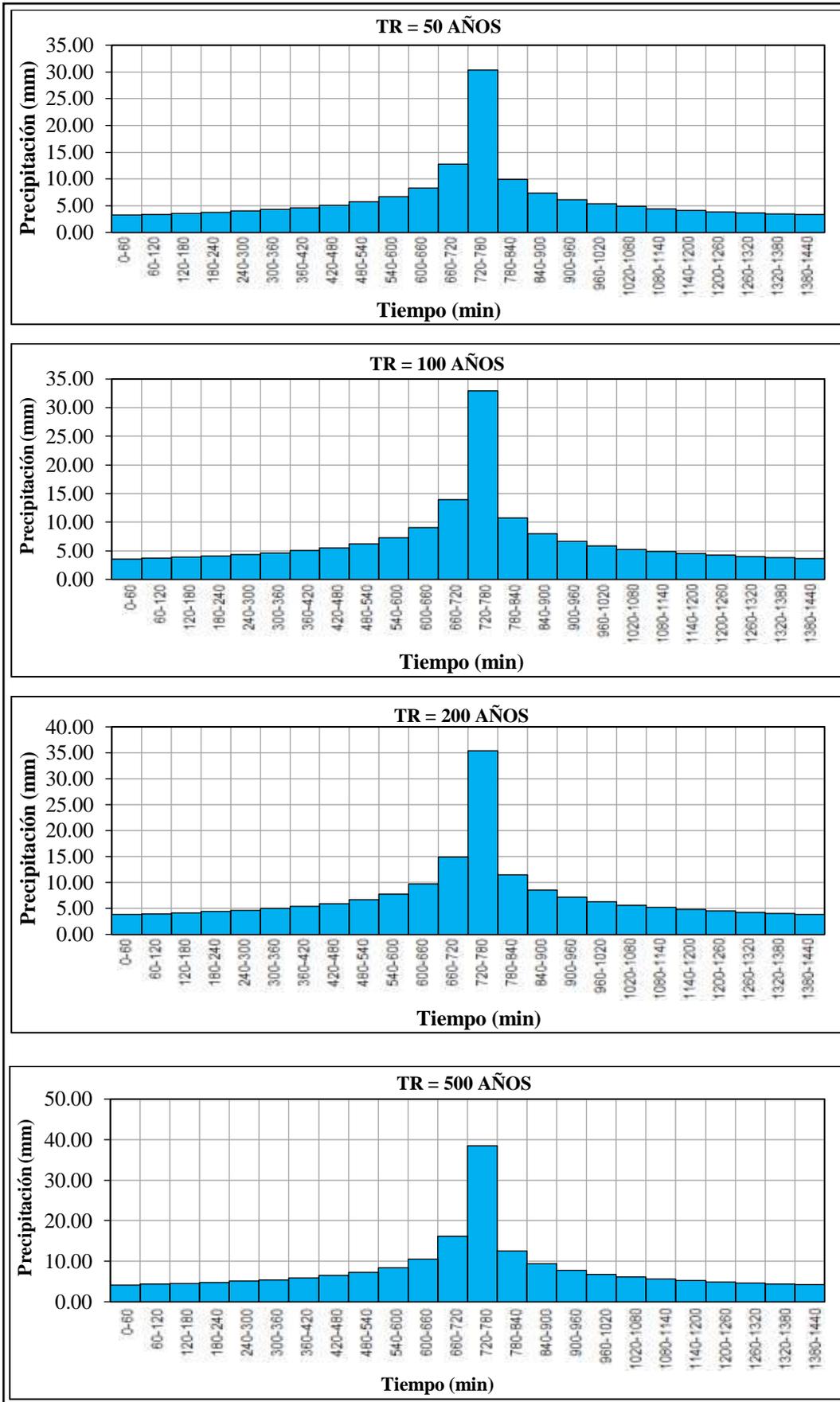
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 28. Hietogramas de precipitación de diseño - Estación Naranjillo



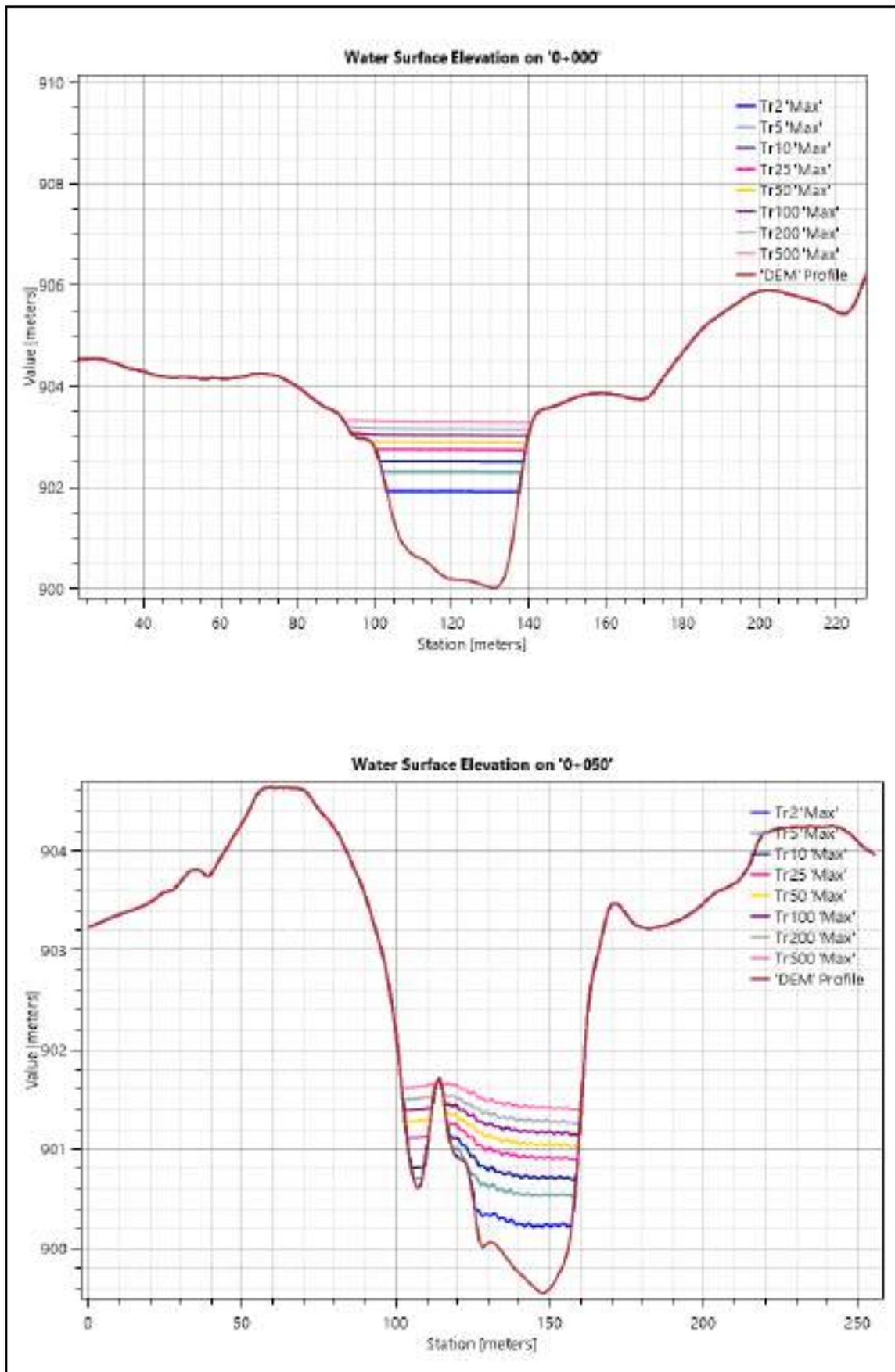
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



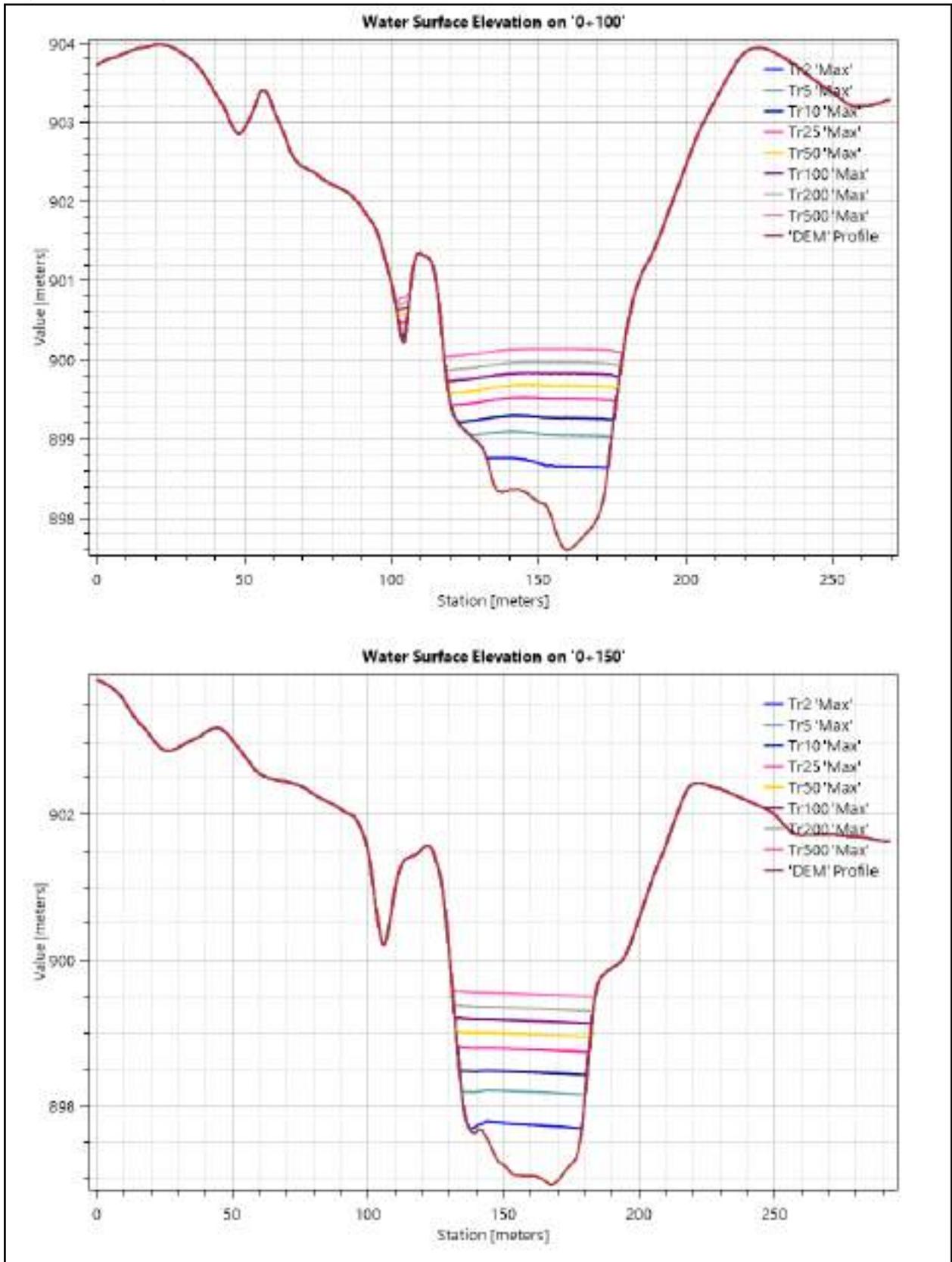
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 29. Secciones Transversales del tramo en estudio.



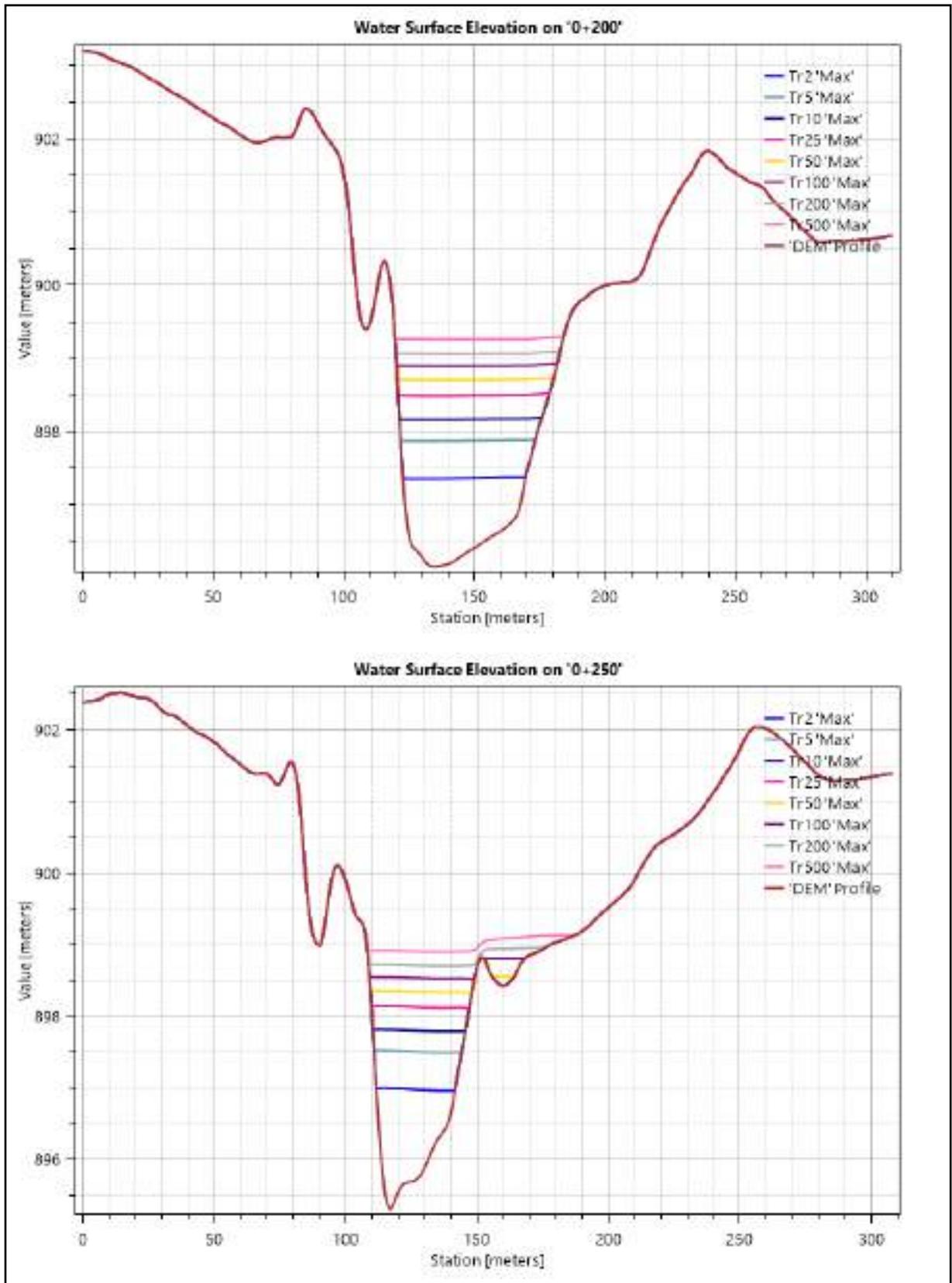
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



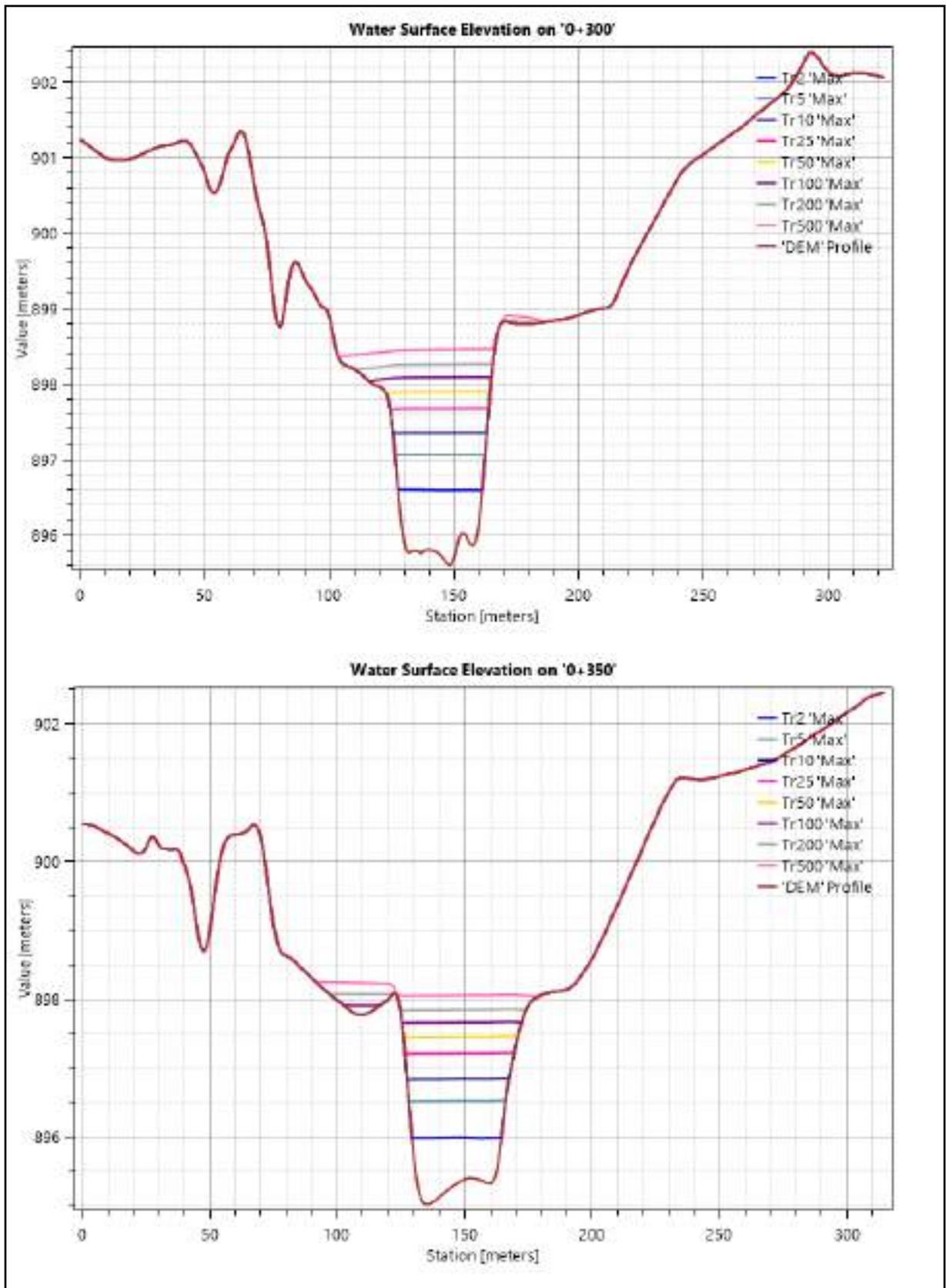
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



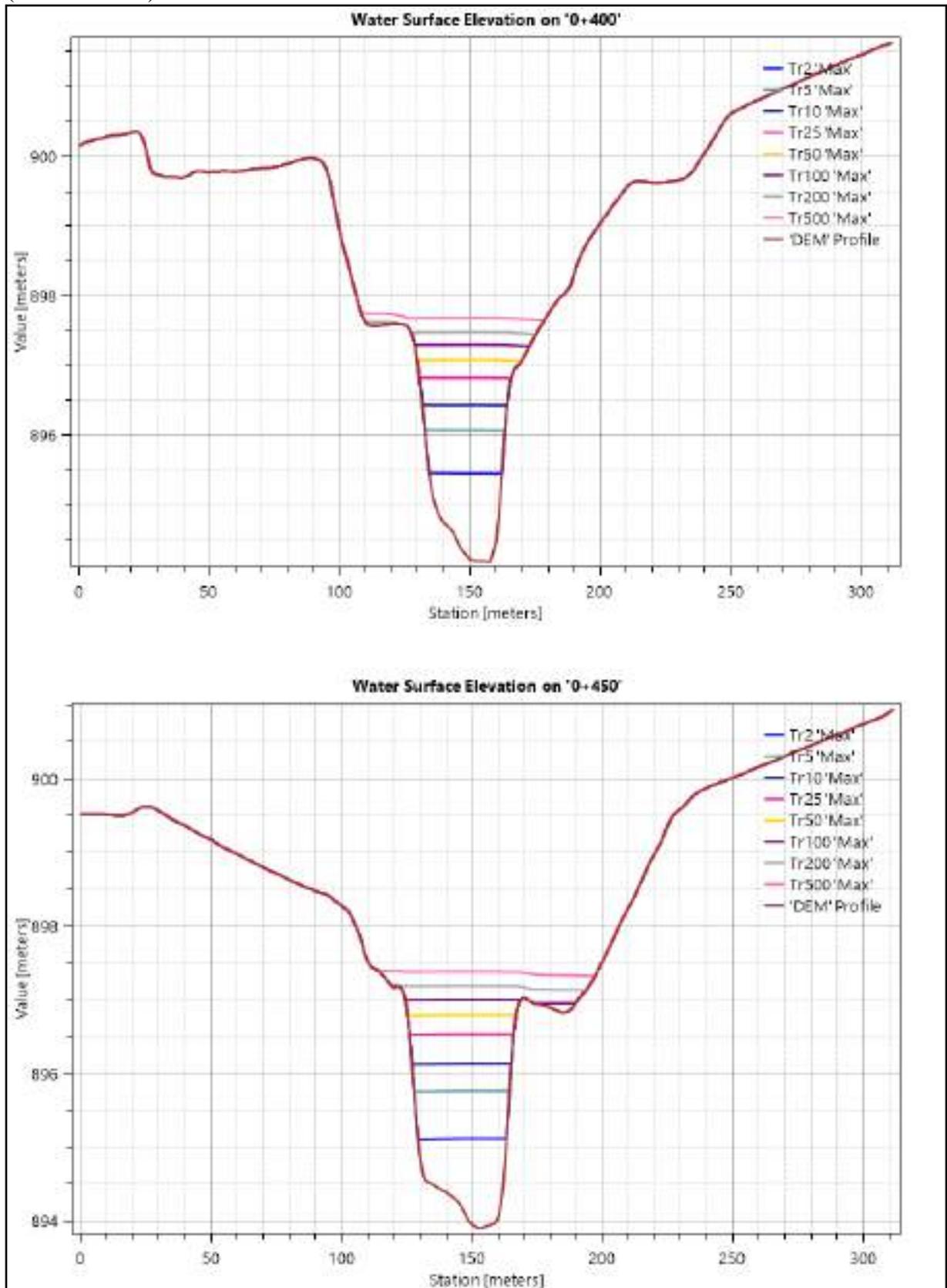
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



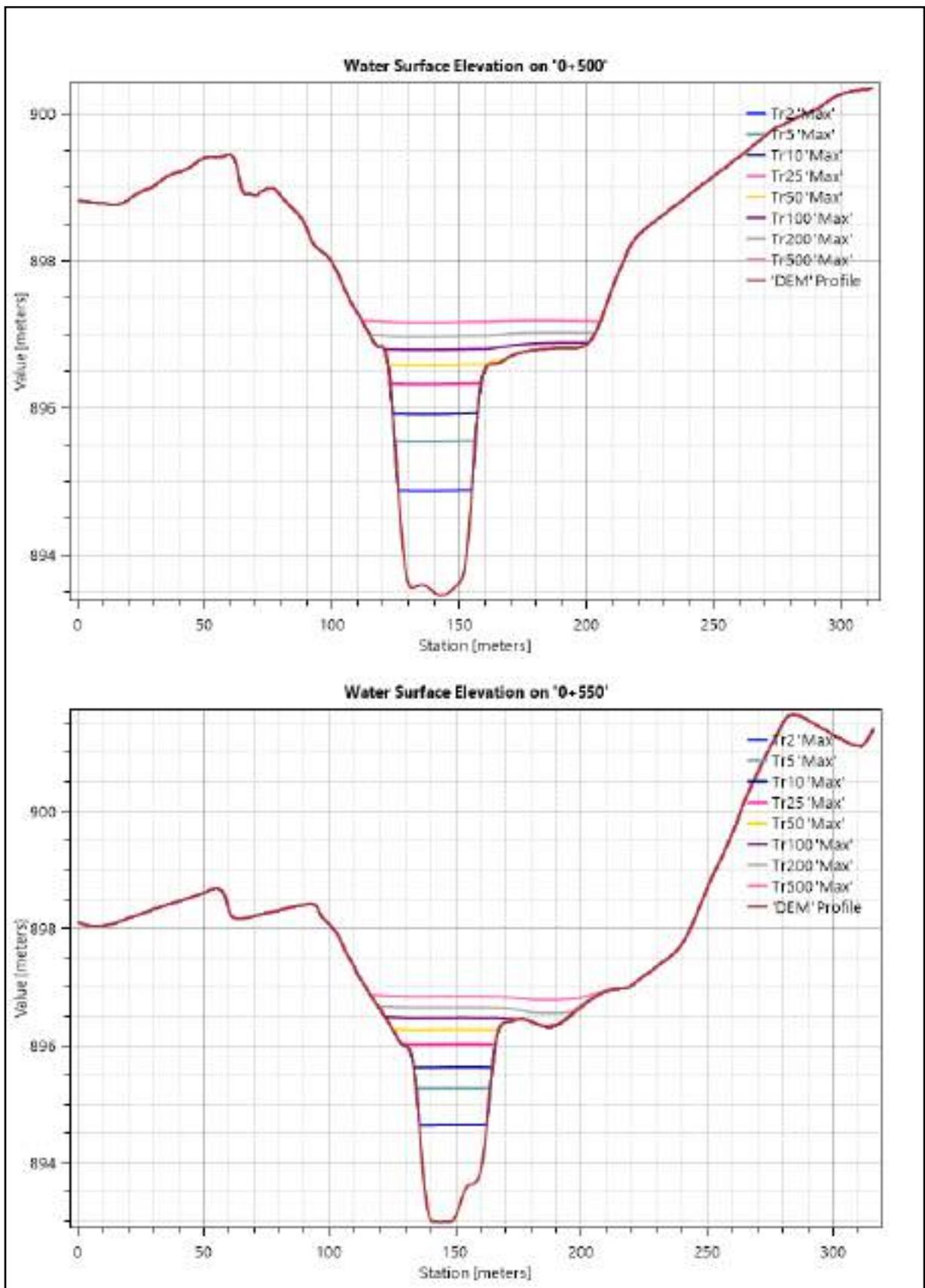
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



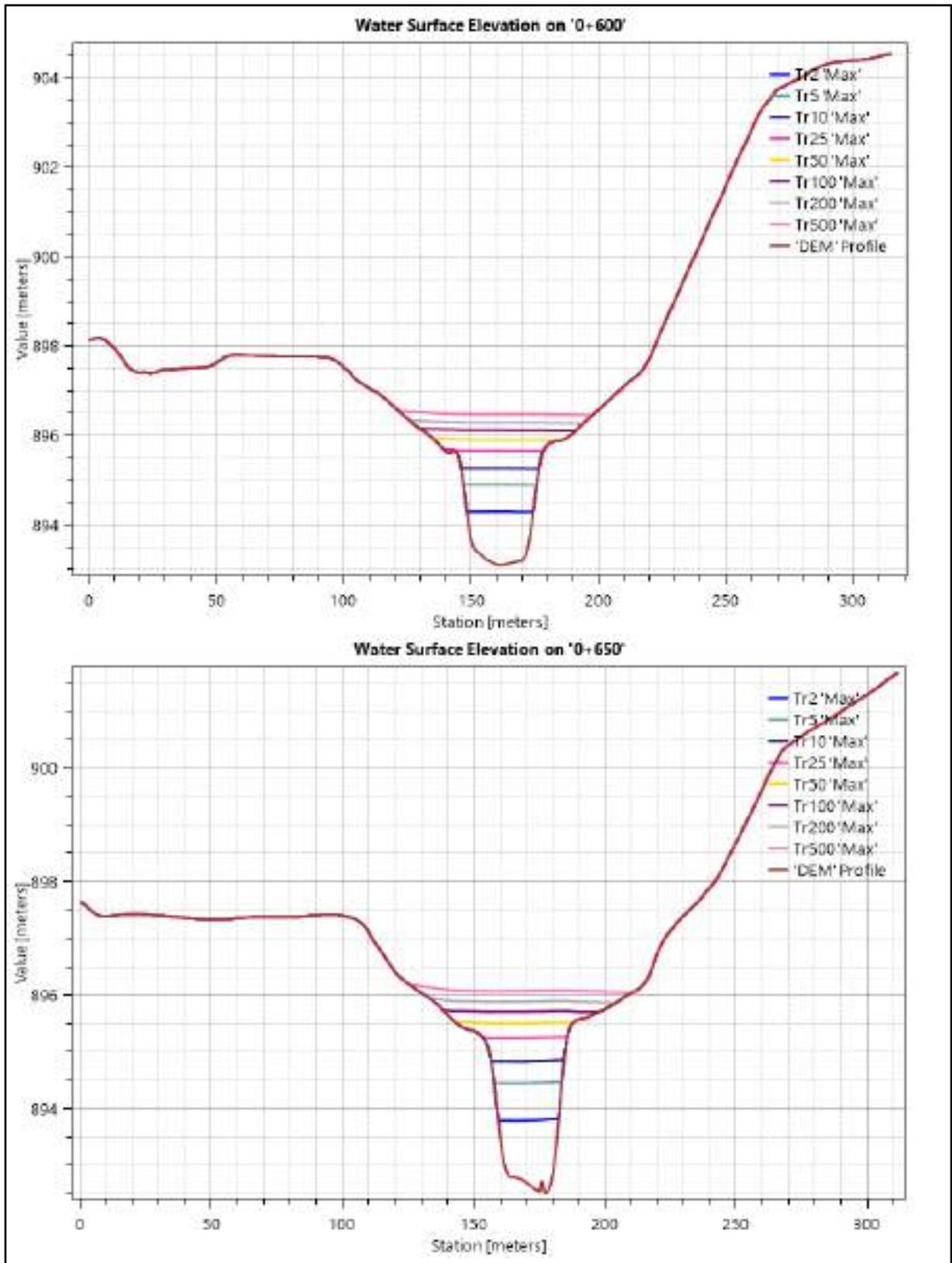
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



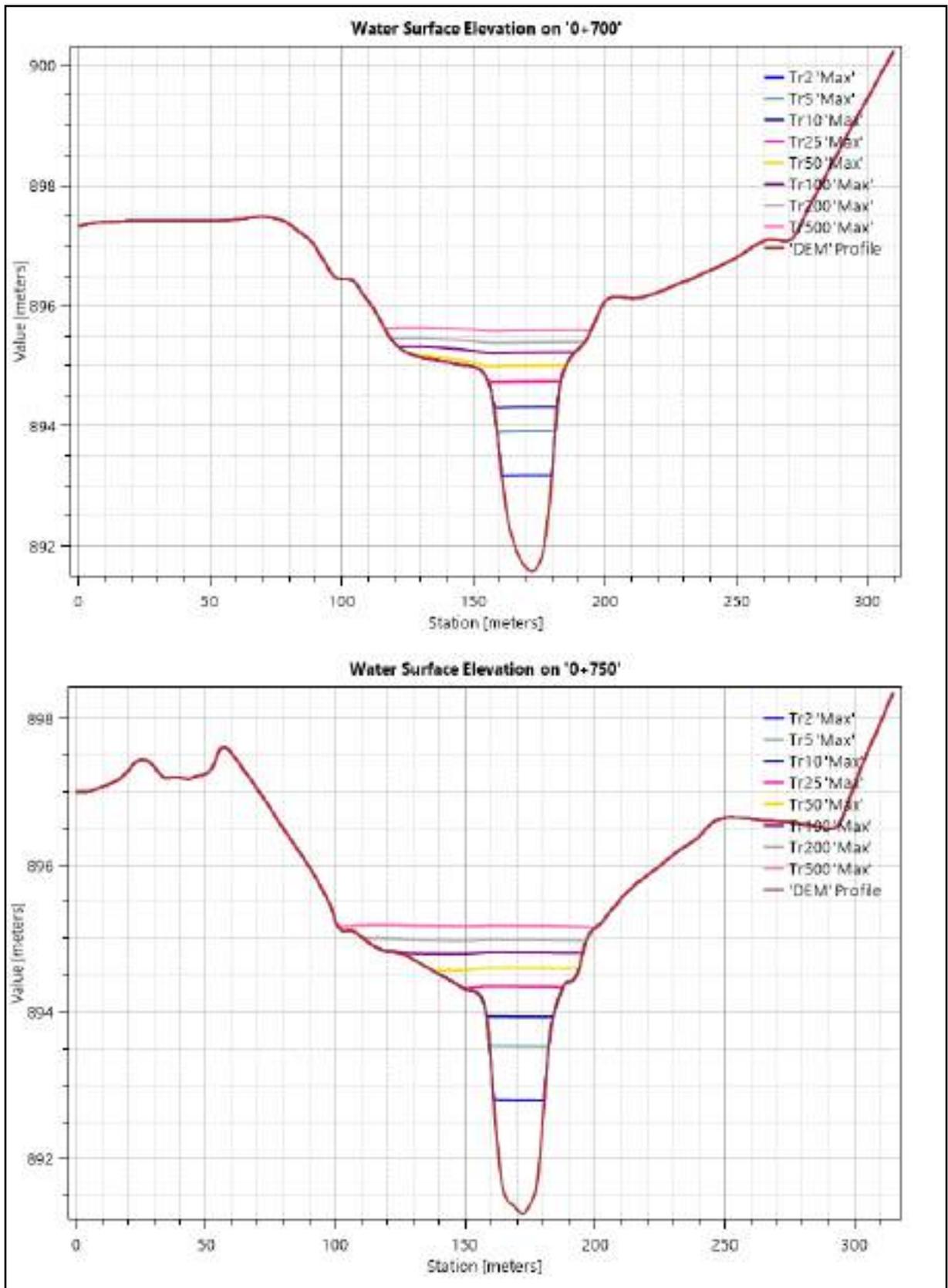
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



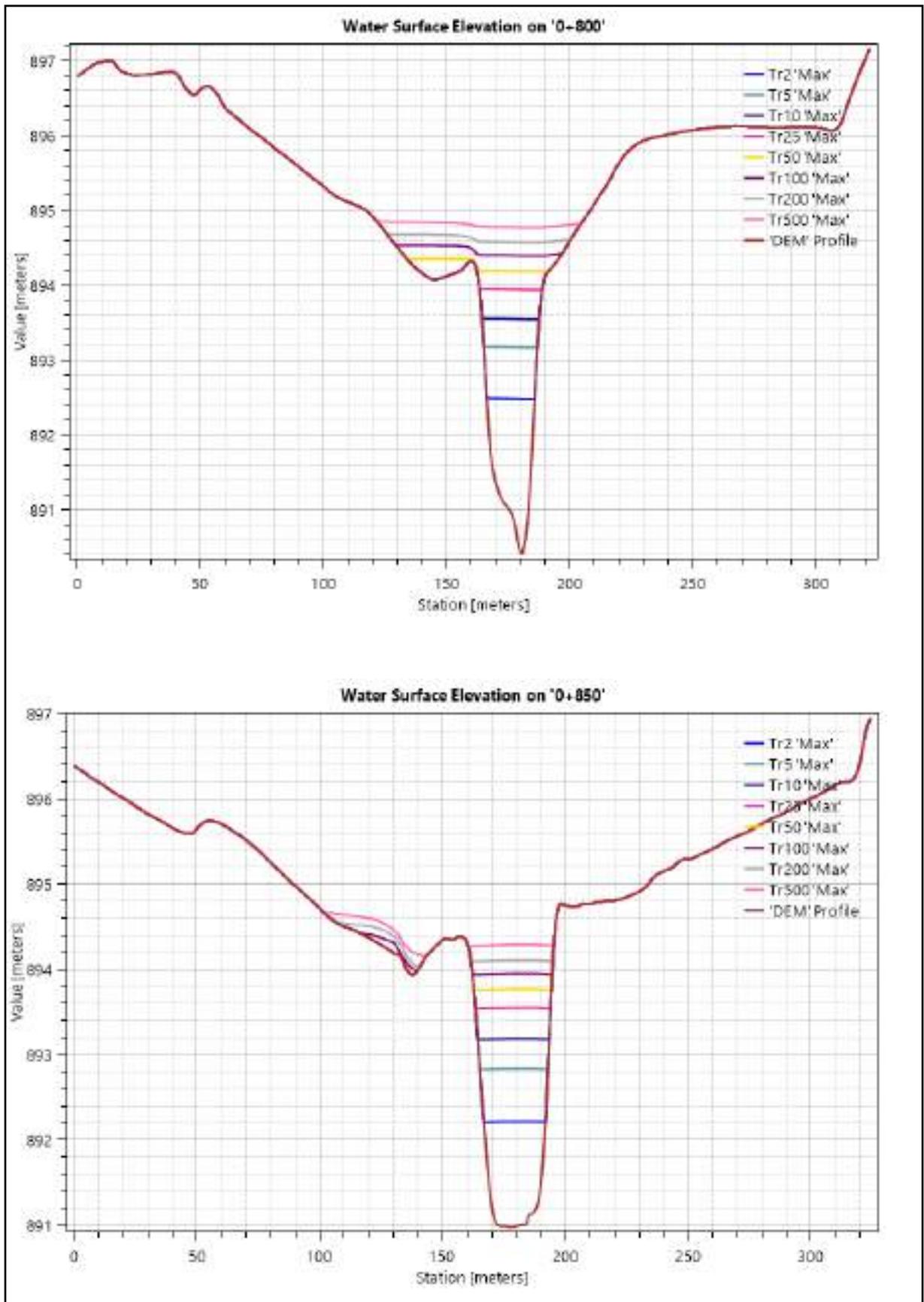
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



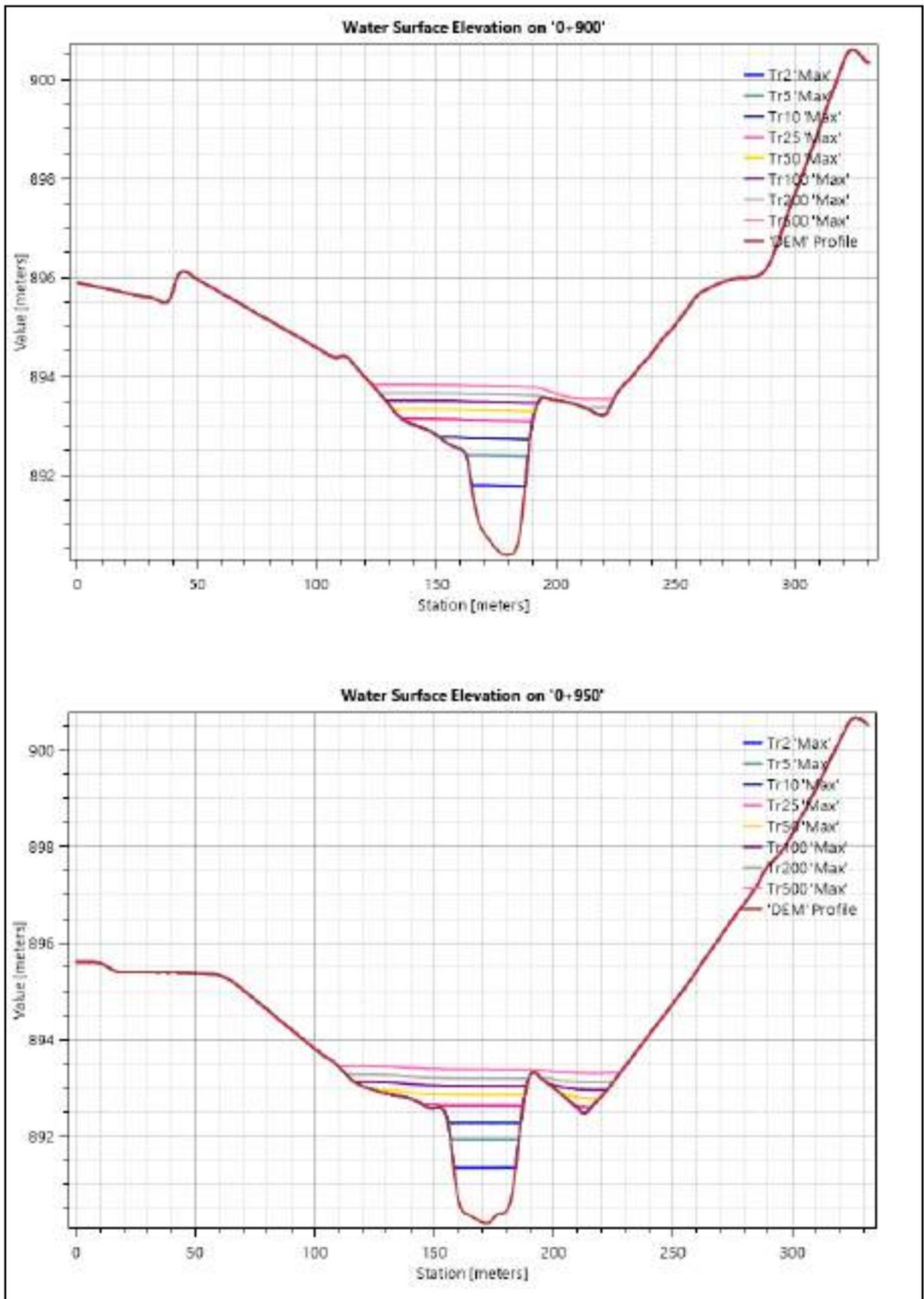
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



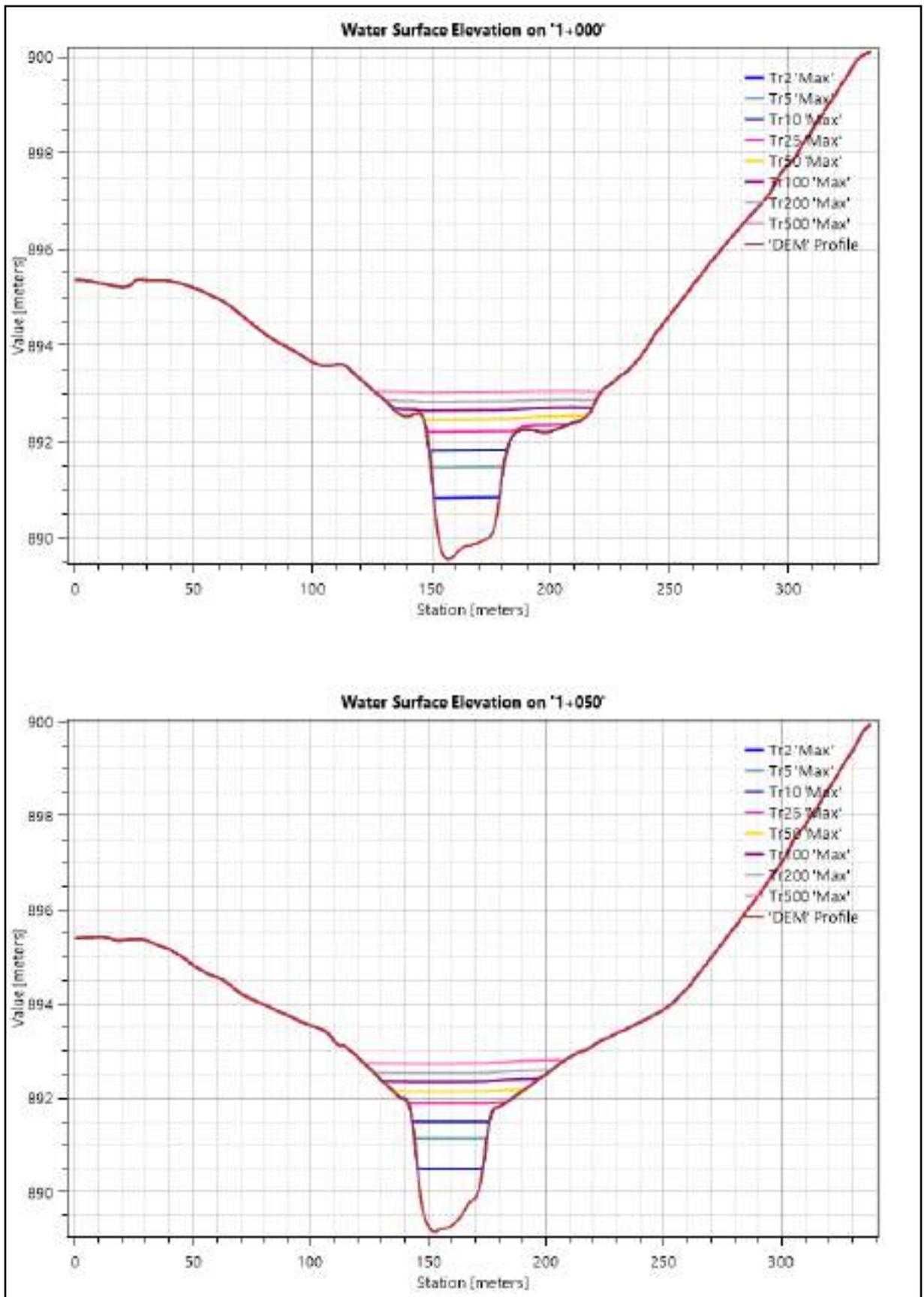
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



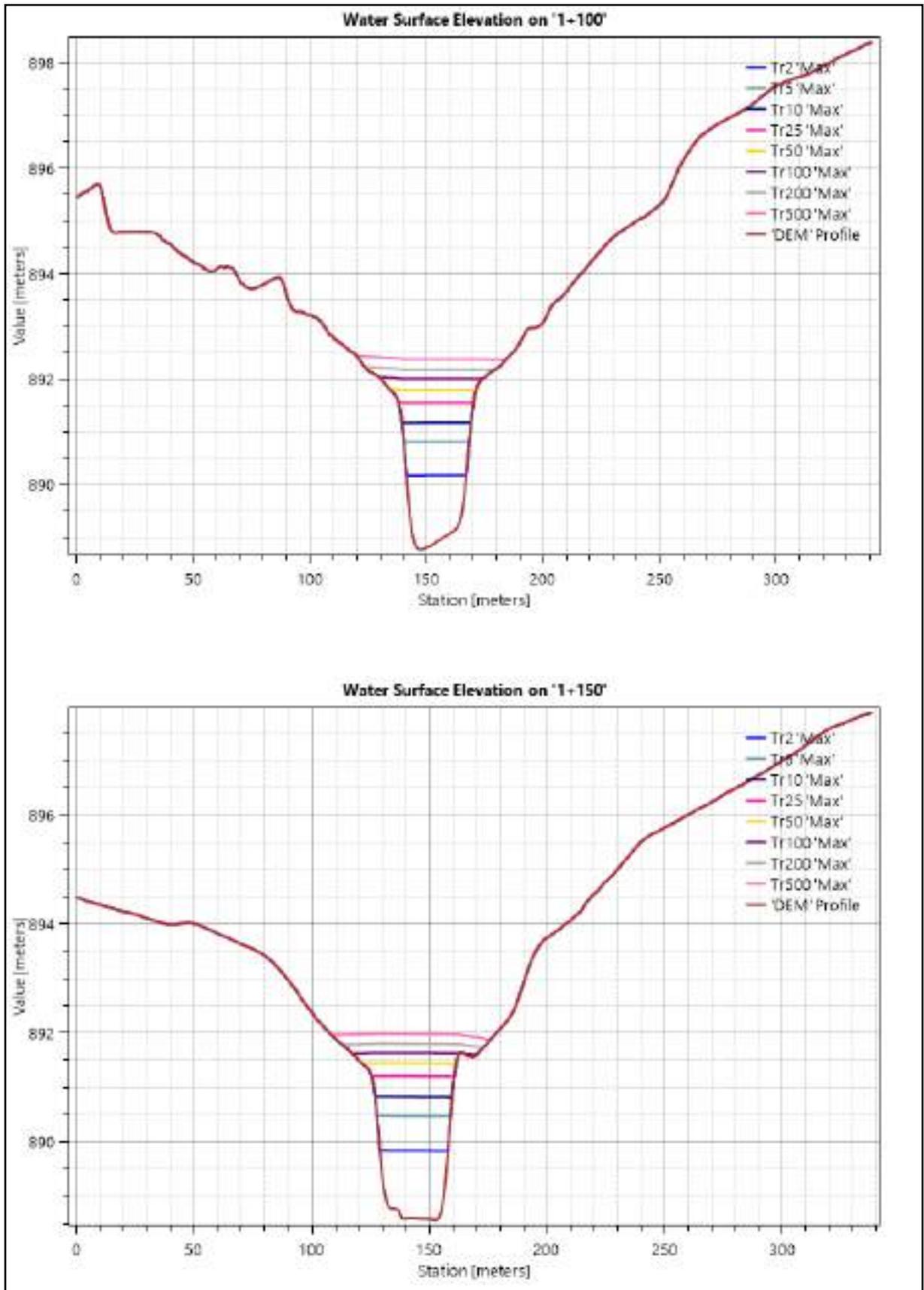
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



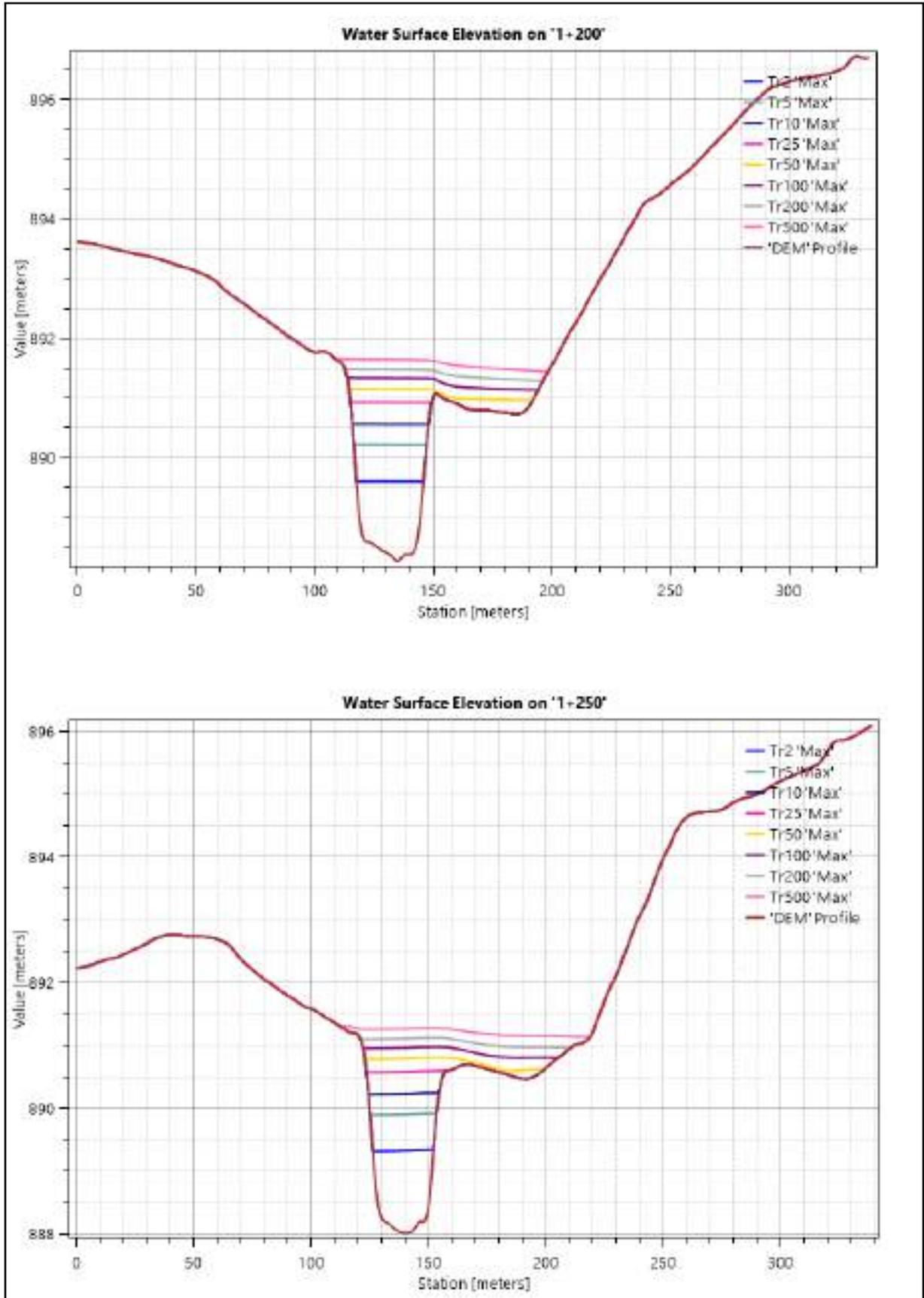
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



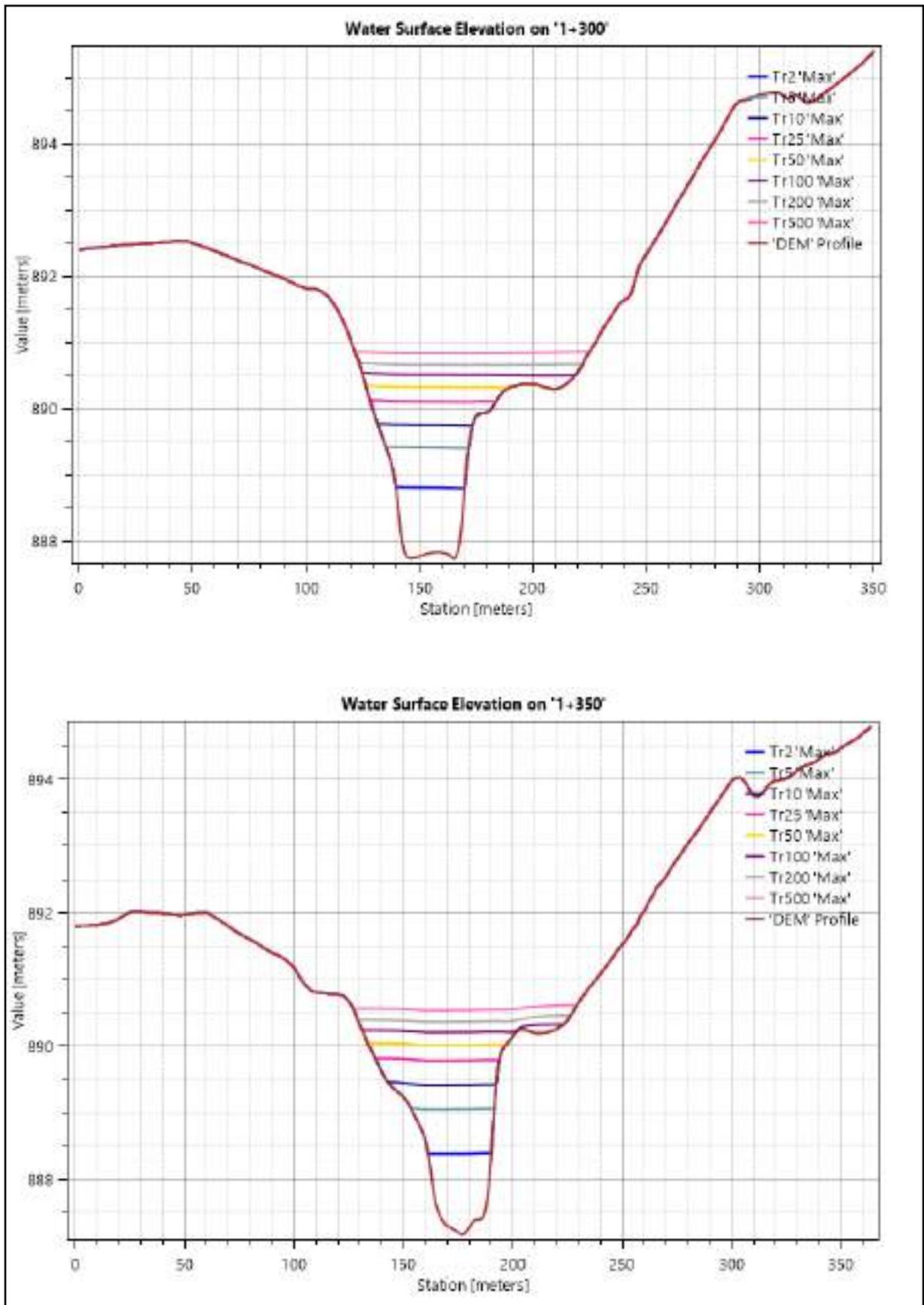
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



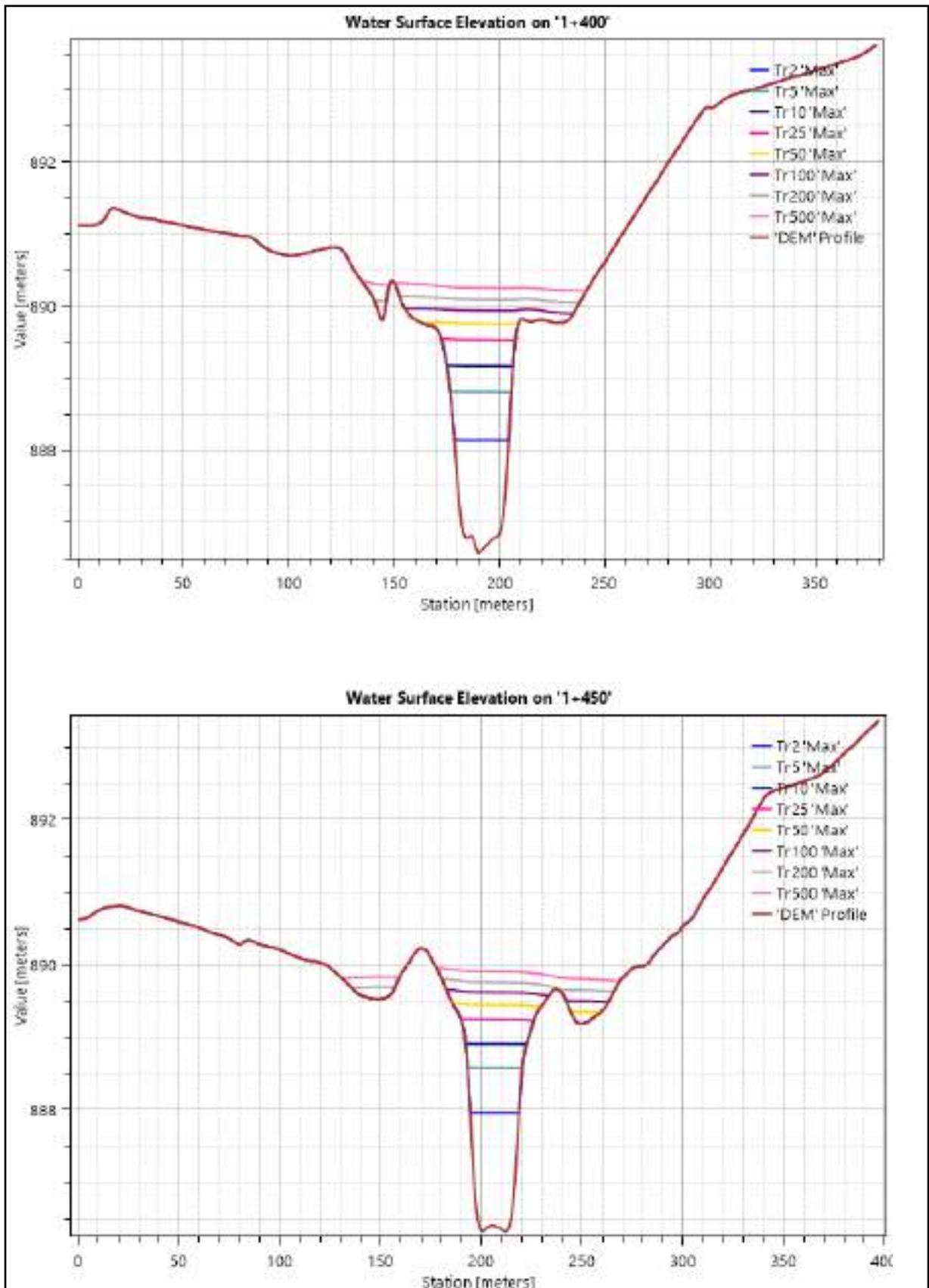
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



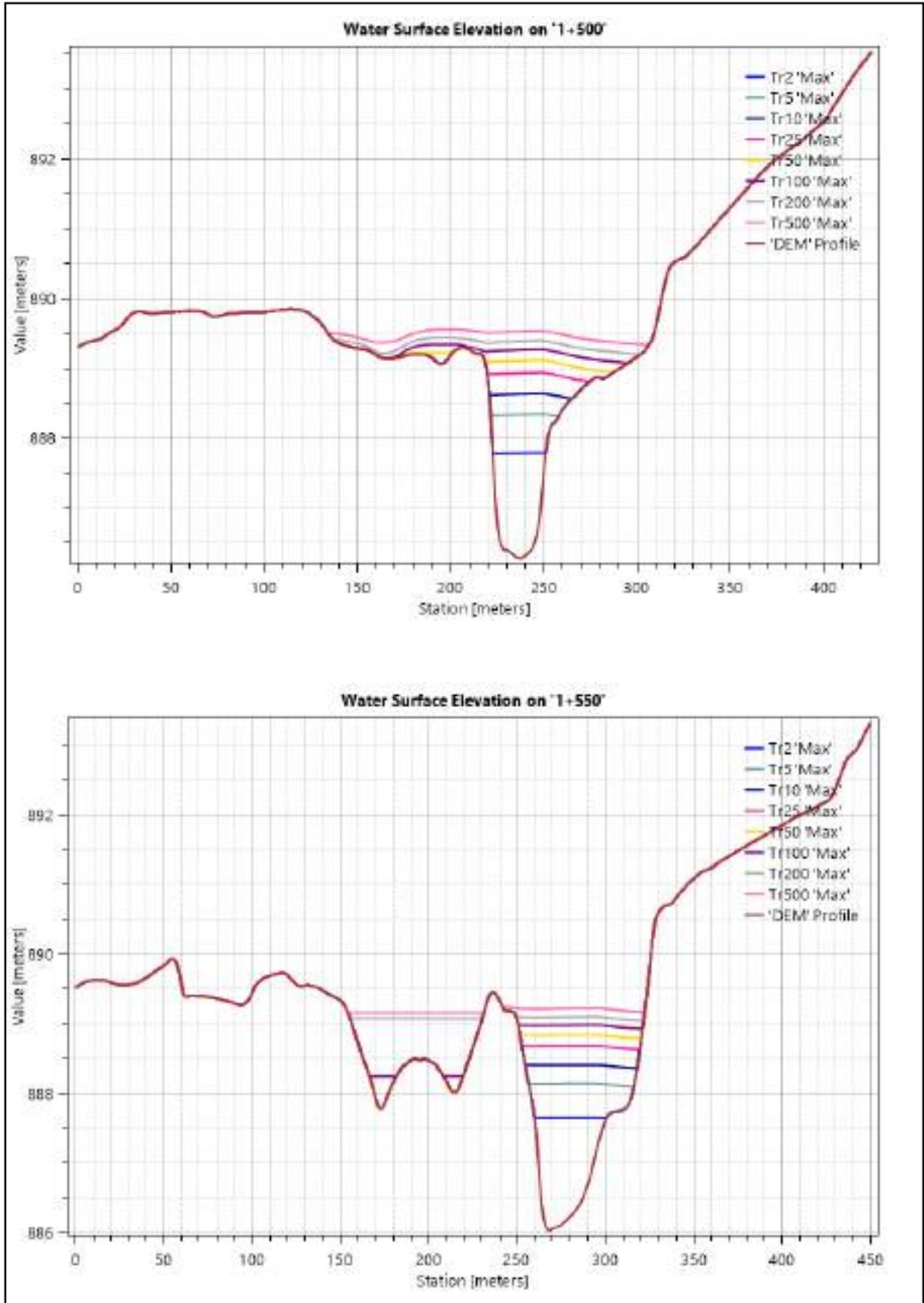
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



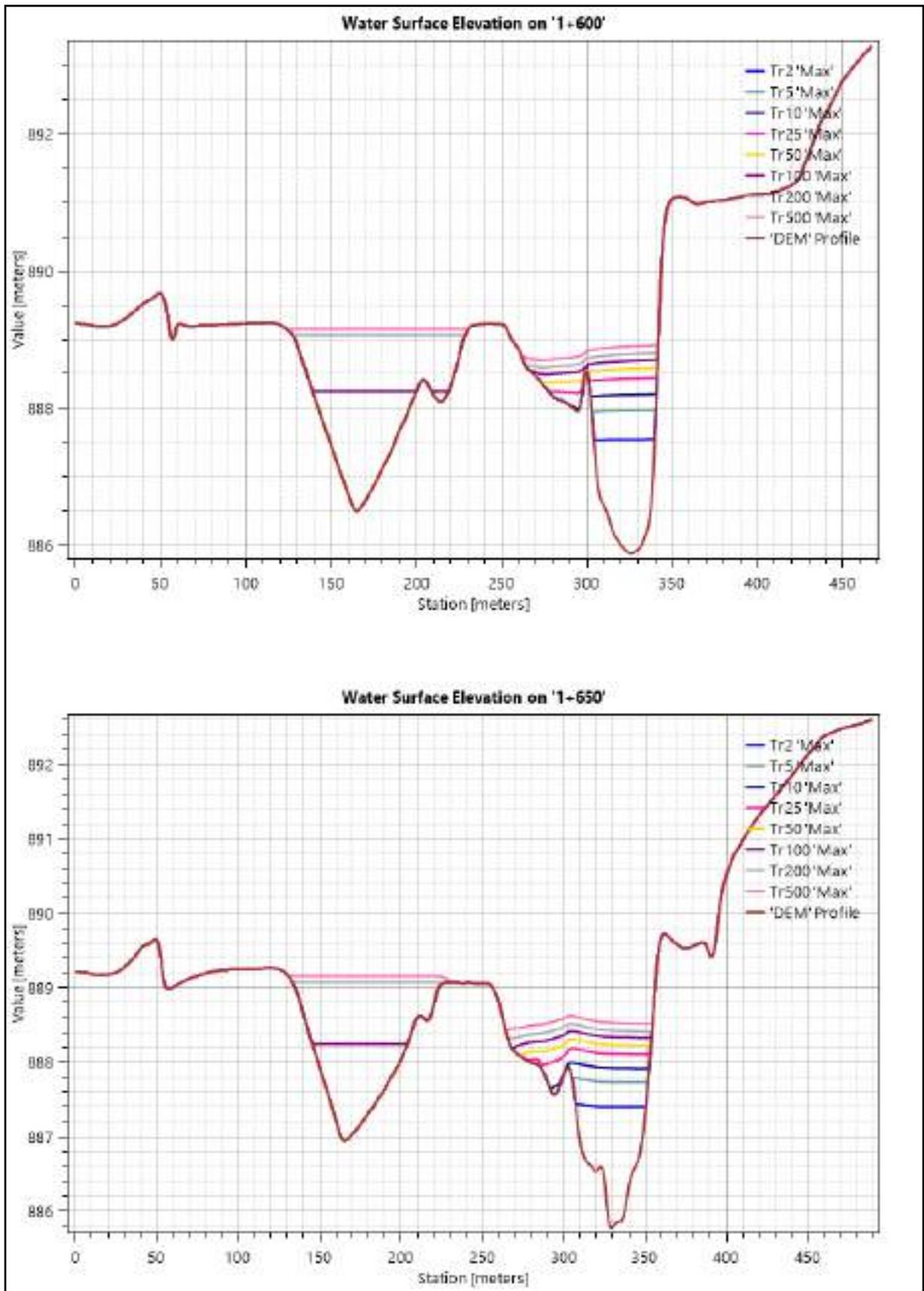
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



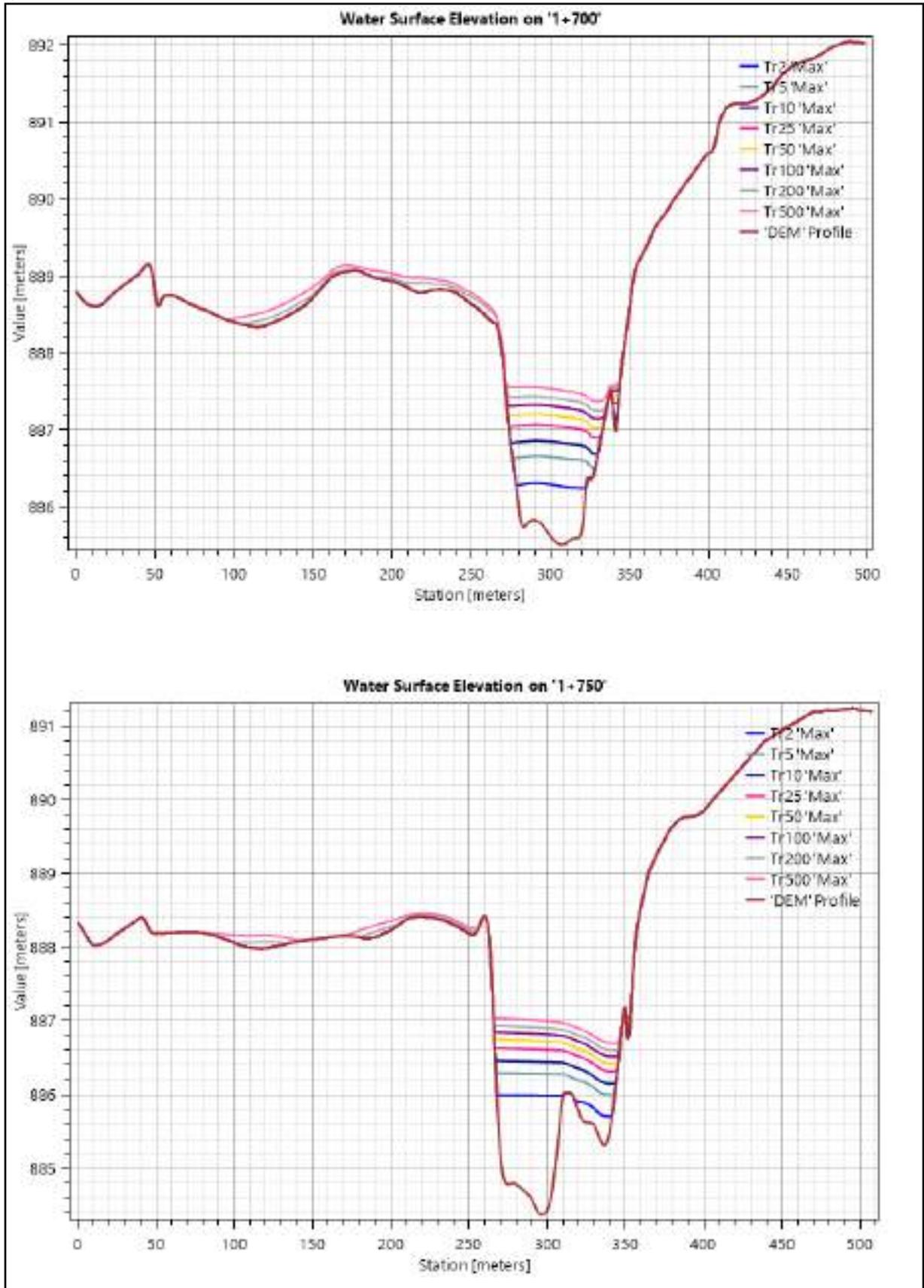
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



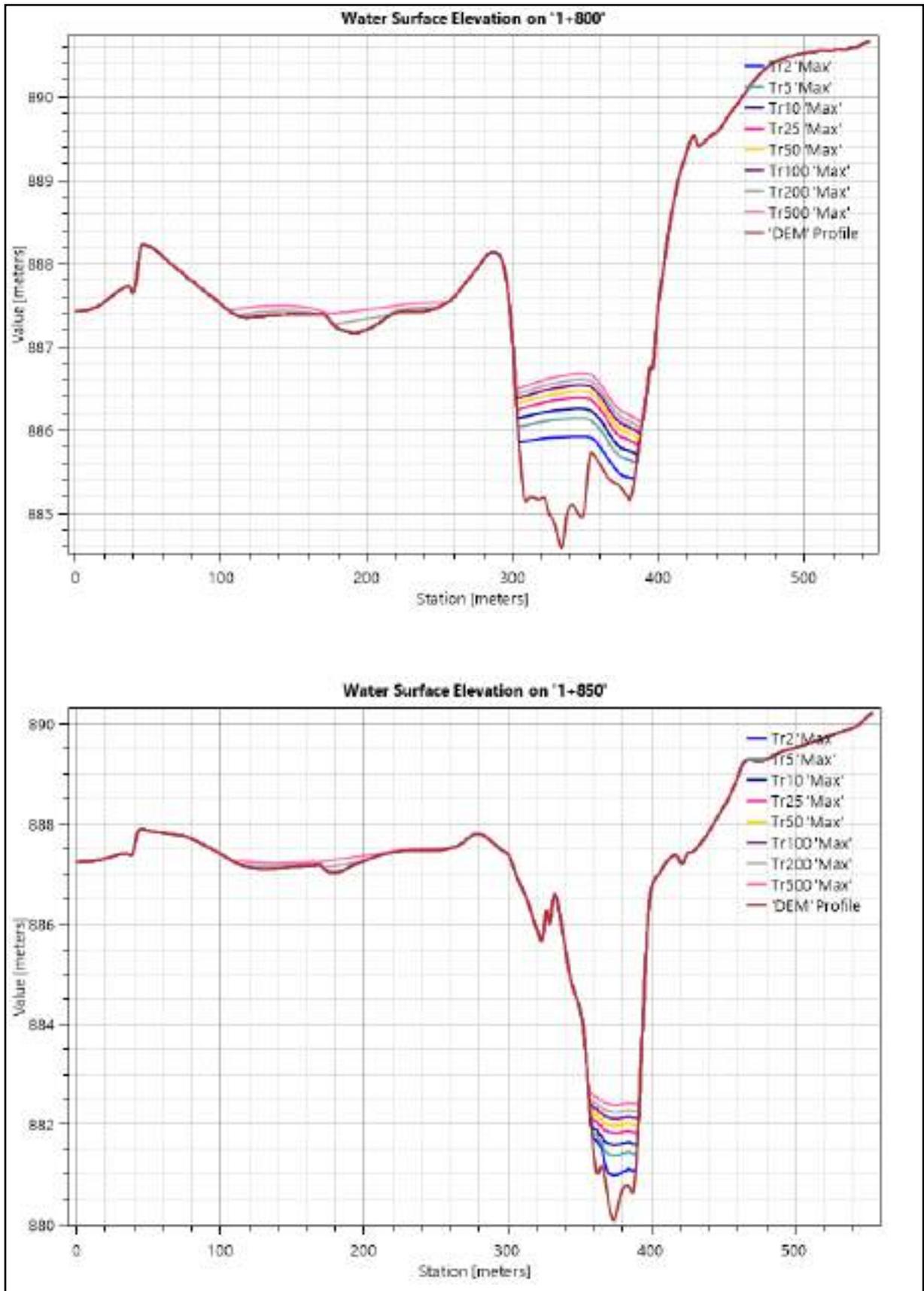
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



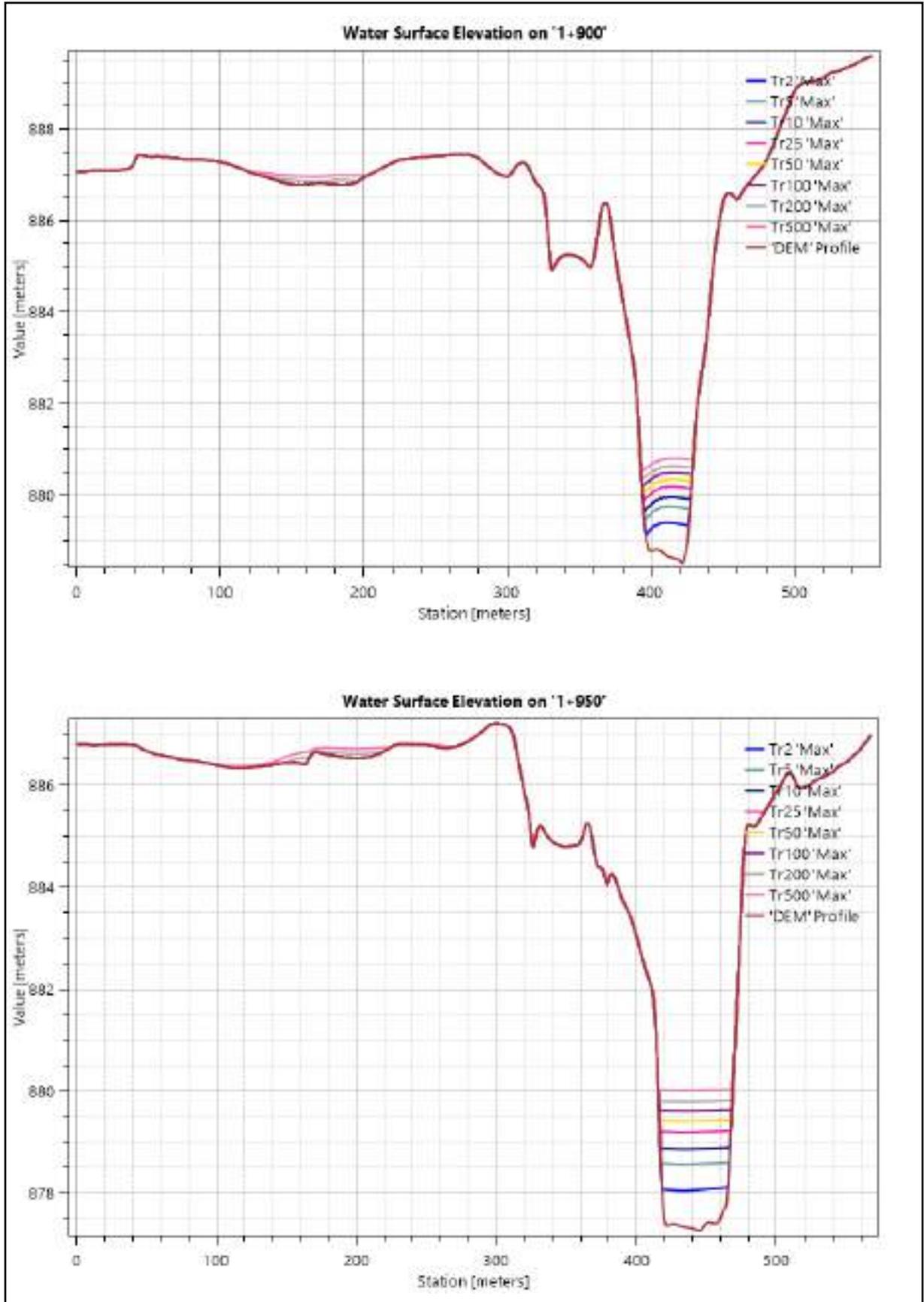
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



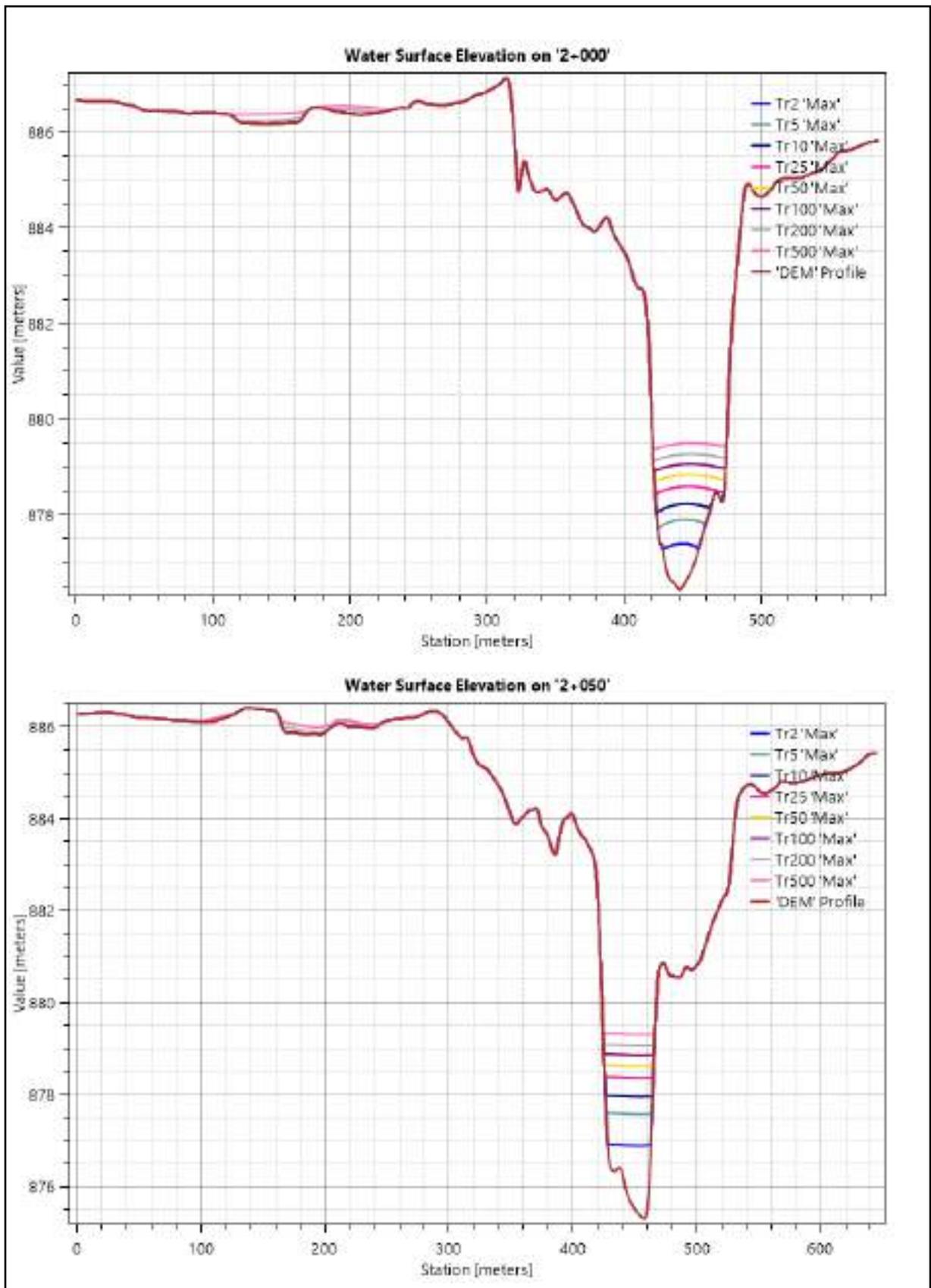
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



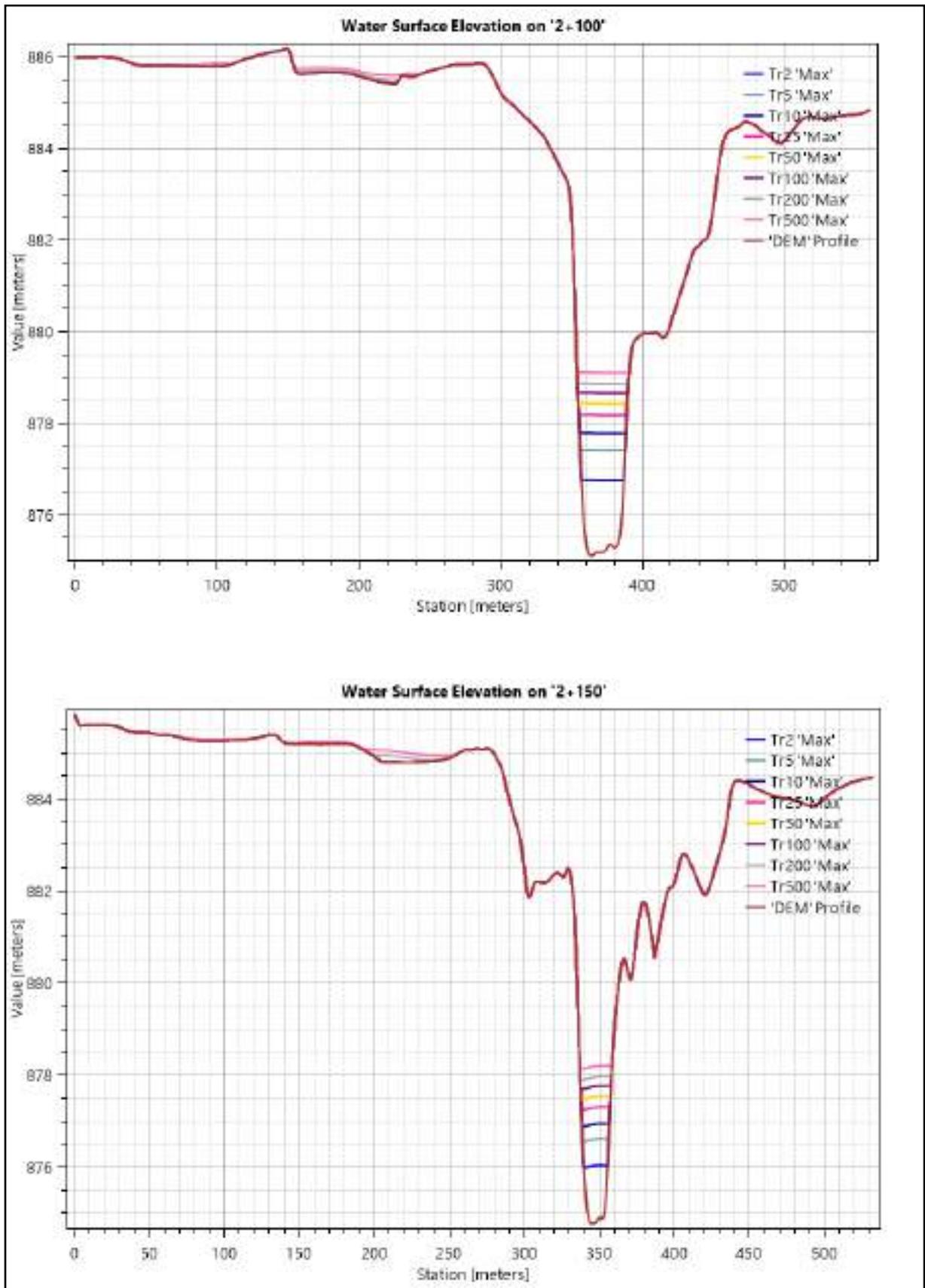
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



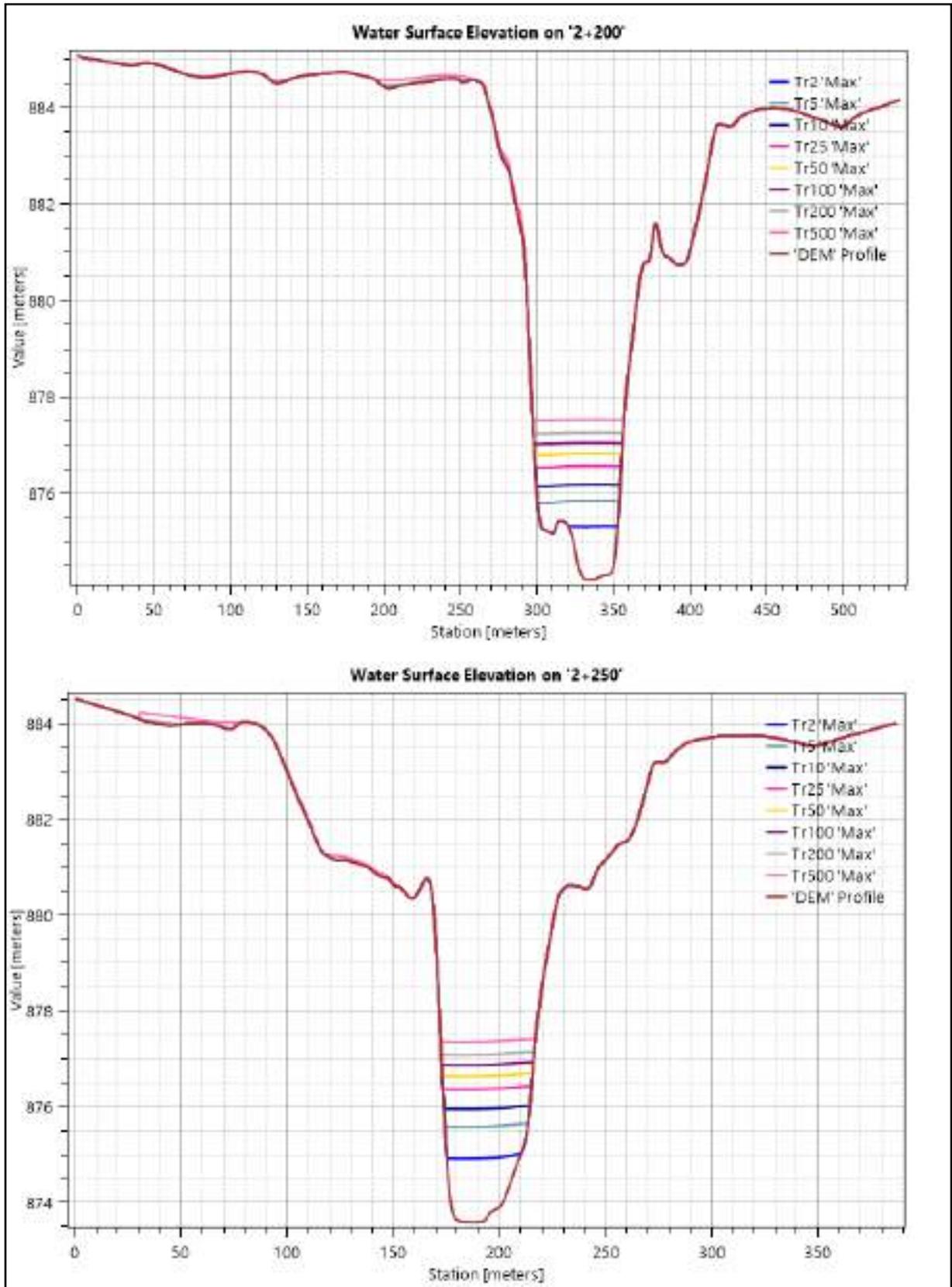
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



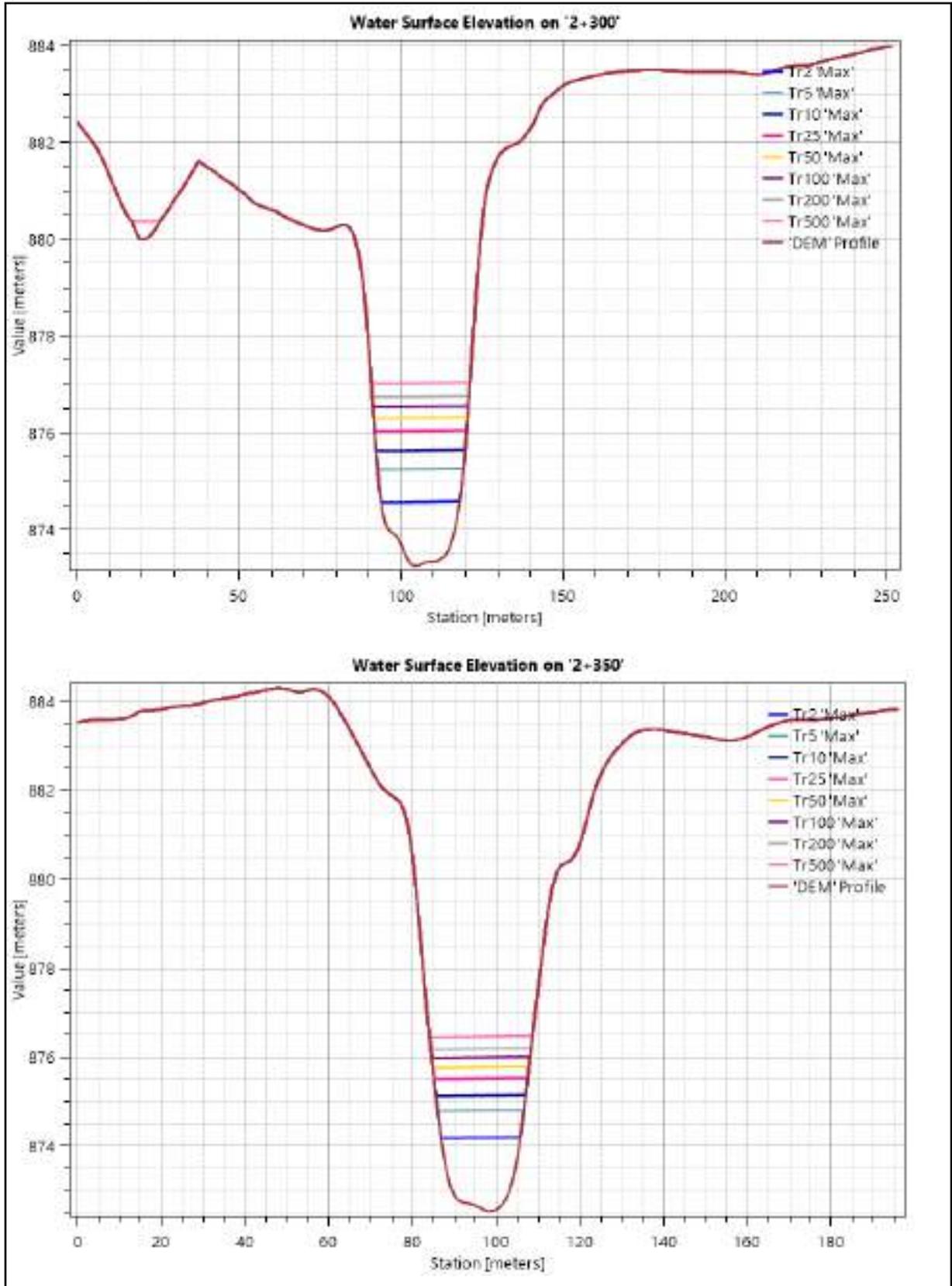
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



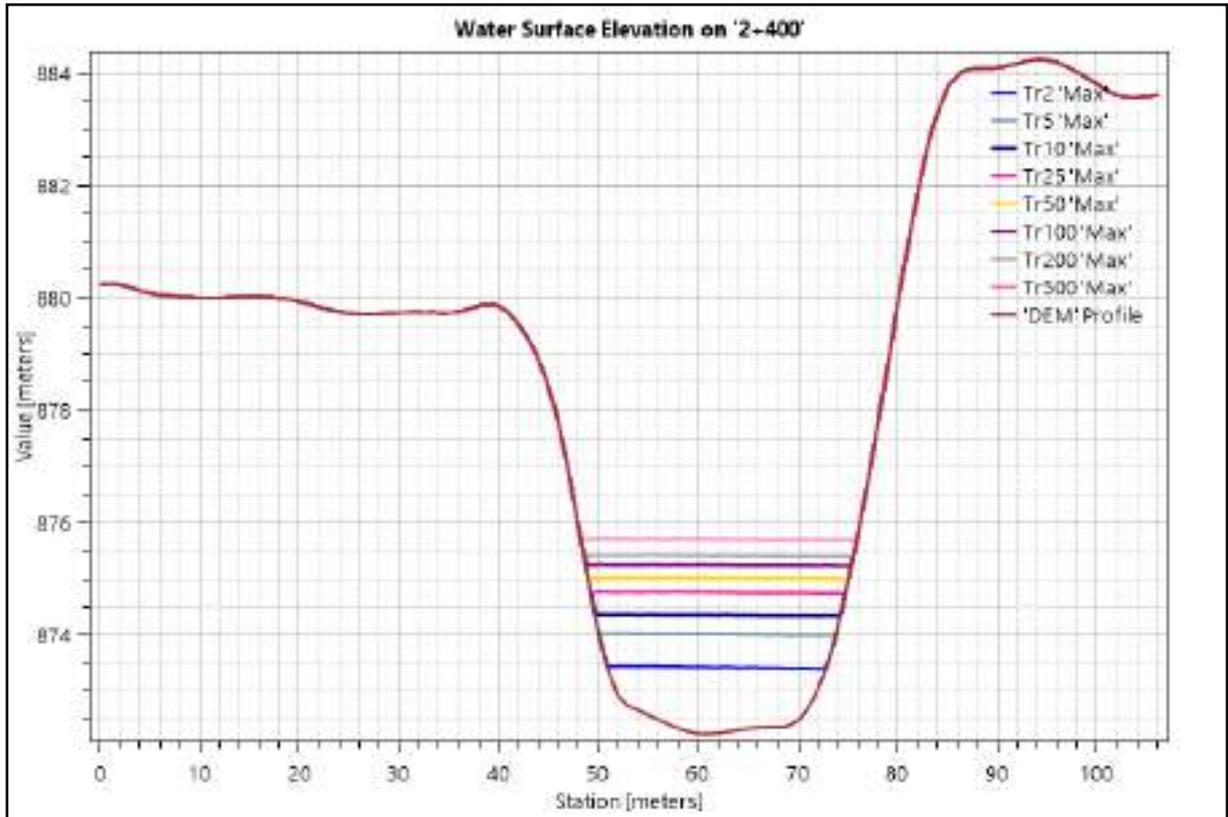
Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

(Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 30. (A) Inicio de tramo sujeto a estudio progresiva 0+000 km y (B) fin de tramo del área de estudio progresiva 2+400 km.



Apéndice 31. (A) Progresiva 0+000 que presenta secciones de vegetación, (B) acumulación de bancos de arena y material pedregoso en el cauce del río Yuracyacu y (C) erosión y socavación del suelo ubicado en el tramo de estudio.



Apéndice 32. Zonas vulnerables del tramo de estudio margen derecha – sector Monterrey (A y B) y margen izquierda – La Parada (C).



Apéndice 33. Identificación y codificación de banco de nivel de precisión (BM) para el levantamiento topográfico del área de estudio.



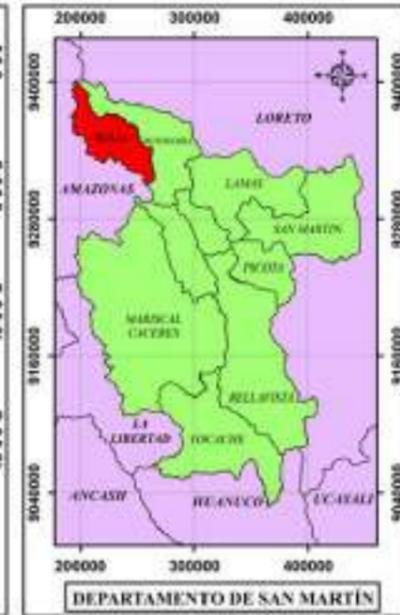
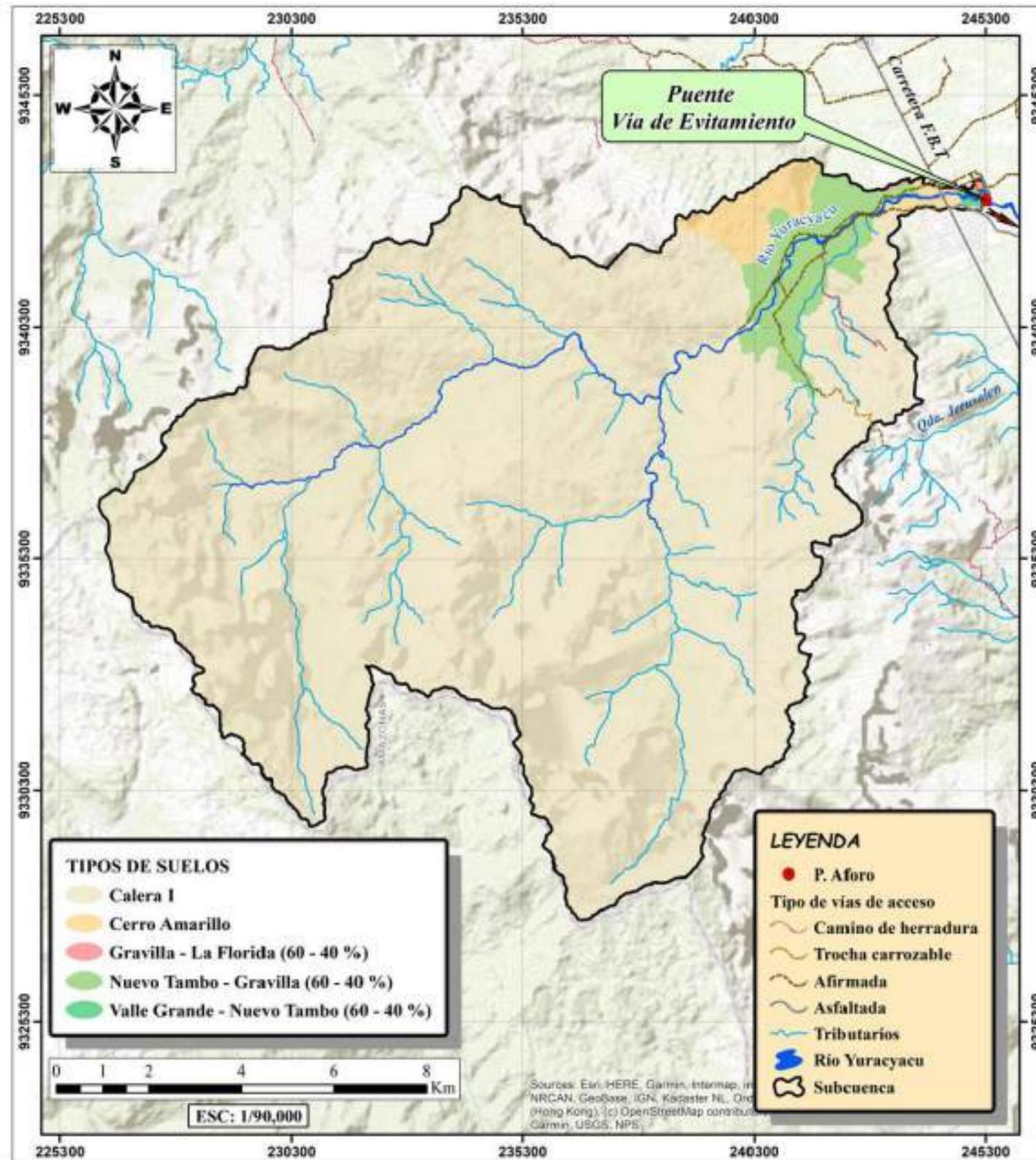
Apéndice 34. (A) Instalación de la base del GNSS Diferencial y (B) levantamiento topográfico del área de estudio con GNSS Diferencial GRX2.



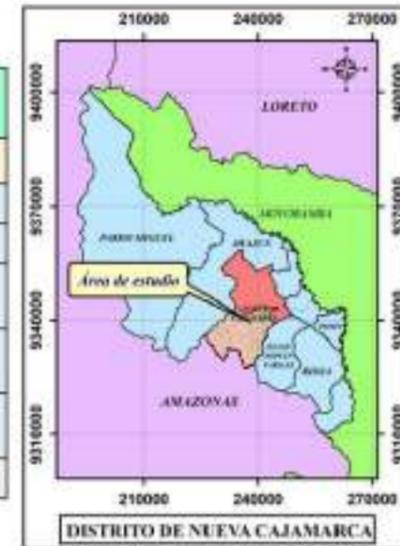
Apéndice 35. Levantamiento fotogramétrico con Drone PHANTOM 4 PRO para la obtención de la ortofoto del área de estudio.



Apéndice 36. Mapa de tipos de suelos de la subcuenca del río Yuracyacu.



TIPOS DE SUELOS SUBCUENCA YURACYACU		
DESCRIPCIÓN	ÁREA (km ²)	%
Calera I	159.838	93.45
Cerro Amarillo	3.815	2.23
Gravilla - La Florida (60 - 40 %)	0.150	0.09
Nuevo Tambo - Gravilla (60 - 40 %)	7.042	4.12
Valle Grande - Nuevo Tambo (60 - 40 %)	0.187	0.11
TOTAL	171.032	100.00



UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA
 Programa de Estudio de Ingeniería Ambiental

TESIS: "Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca - San Martín"

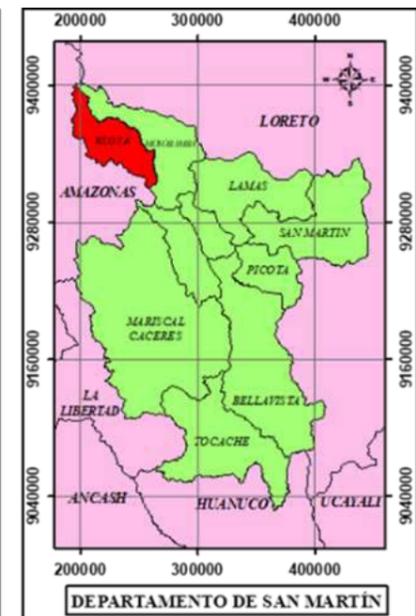
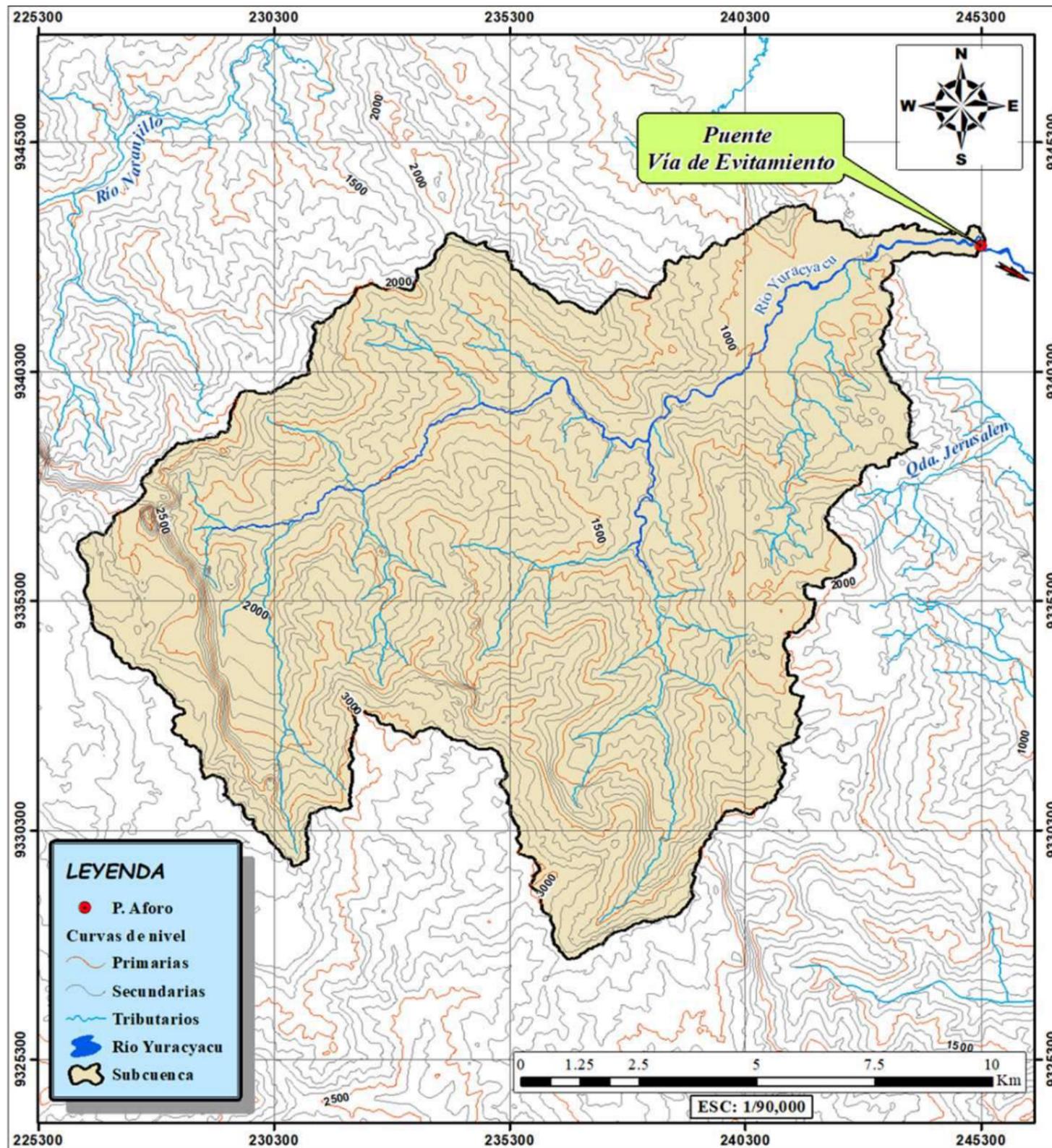
MAPA: *TIPOS DE SUELOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO YURACYACU*

AUTORES: Bach. José Esaú Medina Corrales Bach. Fran Kevin Blas Sinarahua	DEPARTAMENTO : SAN MARTÍN PROVINCIA : RIOJA DISTRITO : NUEVA CAJAMARCA	LÁMINA 06 N° 06 de 23
--	--	---

DATUM: WGS84	ZONA: 18 - SUR	FECHA: MAY-2020	ESCALA: INDICADA
--------------	----------------	-----------------	------------------

Fuente: Elaboración propia a partir de la ZEE - Alto Mayo.

Apéndice 37. Mapa de topografía y delimitación de la sub cuenca del río Yuracyacu.



CUADRO DE INFORMACIÓN DE LA SUBCUENCA - RÍO YURACYACU		
DESCRIPCIÓN	DATOS	UNIDADES
ÁREA	171.032	km ²
PERÍMETRO	78.165	km
LONG. DE LA SUBCUENCA	34.060	km
LONG. DEL CAUCE PRINCIPAL	29.885	km
COTA MÁXIMA	3644.00	m. s. n. m
COTA MÍNIMA	866.00	m. s. n. m
DESNIVEL	2778.00	m
PEND. PROM. - SUBCUENCA	51.770	%
PENDIENTE DEL CAUCE P.	10.070	%
PUNTO DE AFORO*		
Coordenadas UTM	N9343071.433	m
	E245336.145	m

*Referencia Puente - Via de Evitamiento



UCSS UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
 FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA
 Programa de Estudio de Ingeniería Ambiental

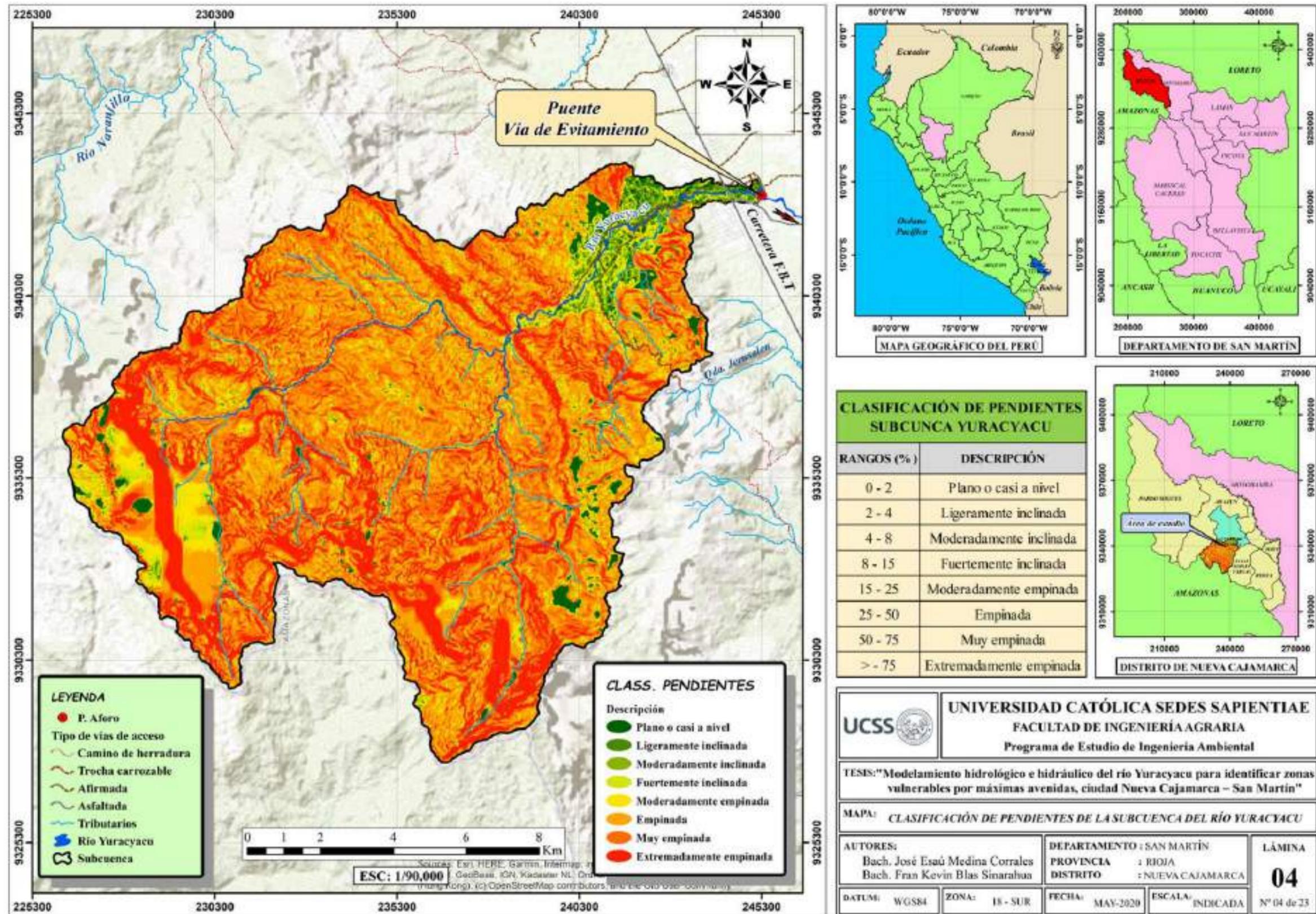
TESIS: "Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín"

MAPA: **TOPOGRAFÍA Y DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO YURACYACU**

AUTORES: Bach. José Esaú Medina Corrales Bach. Fran Kevin Blas Sinarahua	DEPARTAMENTO : SAN MARTÍN PROVINCIA : RIOJA DISTRITO : NUEVA CAJAMARCA	LÁMINA 03 Nº 03 de 23
DATUM: WGS84	ZONA: 18 - SUR	FECHA: MAY-2020
ESCALA: INDICADA		

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 38. Mapa de Clasificación de Pendiente de la Subcuenca del río Yuracyacu.



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 39. Certificado de Calibración del equipo topográfico GNSS Diferencial GRX2 Serie 1169-10240.



CERTIFICADO DE OPERATIVIDAD N° 0158-2019

EL SIGUIENTE DOCUMENTO ES EMITIDO PARA EL CLIENTE:

TROYA INGENIEROS E.I.R.L.

EQUIPO: GNSS DIFERENCIAL

MARCA: SOKKIA

MODELO: GRX2

SERIE: 1169-10240

FECHA DE VERIFICACIÓN: 04-10-2019

FECHA DE VENCIMIENTO: 04-10-2020

ESTE DOCUMENTO CONSTATA QUE EL EQUIPO EN MENCIÓN CUMPLE CON LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES EN LO QUE RESPECTA A RECEPTORES GNSS. SURVEY RENTAL & SALES S.A.C. VERIFICA LA PRECISIÓN Y CALIDAD DE LA SEÑAL RECIBIDA DE LAS CONSTELACIONES GPS/GLEONASS.

POSICIONAMIENTO RELATIVO – ESTÁTICO

HORIZONTAL: 3 mm + 0.5 ppm RMS

VERTICAL: 5 mm + 0.5 ppm RMS

POSICIONAMIENTO RELATIVO – REAL TIME KINEMATIC (RTK)

HORIZONTAL: 8 mm + 1 ppm RMS

VERTICAL: 15 mm + 1 ppm RMS

FECHA DE EMISIÓN: 04 de SEPTIEMBRE del 2019

Survey Rental & Sales S.A.C.

JOSE MANUEL QUISPE PEÑA

ING. JOSE QUISPE PEÑA

JEFE DE SERVICIO TÉCNICO

- 📍 Av. Dos de Mayo 1660-1664 - San Isidro
- ☎ Central: (51) 204-6430
- 📞 Servicio Técnico : (511) 204-6440
- ✉ ventas@surveyrental.com.pe
- 🌐 Website: www.surveyrental.com.pe



Apéndice 40. Certificado de Calibración del equipo topográfico GNSS Diferencial GRX2 Serie 1169-10249.



CERTIFICADO DE OPERATIVIDAD N° 0159-2019

EL SIGUIENTE DOCUMENTO ES EMITIDO PARA EL CLIENTE:

TROYA INGENIEROS E.I.R.L.

EQUIPO: GNSS DIFERENCIAL

MARCA: SOKKIA

MODELO: GRX2

SERIE: 1169-10249

FECHA DE VERIFICACIÓN: 04 – 10 – 2019

FECHA DE VENCIMIENTO: 04 – 10 – 2020

ESTE DOCUMENTO CONSTATA QUE EL EQUIPO EN MENCIÓN CUMPLE CON LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES EN LO QUE RESPECTA A RECEPTORES GNSS. SURVEY RENTAL & SALES S.A.C VERIFICA LA PRECISIÓN Y CALIDAD DE LA SEÑAL RECIBIDA DE LAS CONSTELACIONES GPS/GLONASS.

POSICIONAMIENTO RELATIVO – ESTÁTICO

HORIZONTAL: 3 mm + 0.5 ppm RMS

VERTICAL: 5 mm + 0.5 ppm RMS

POSICIONAMIENTO RELATIVO – REAL TIME KINEMATIC (RTK)

HORIZONTAL: 8 mm + 1 ppm RMS

VERTICAL: 15 mm + 1 ppm RMS

FECHA DE EMISIÓN: 04 de SEPTIEMBRE del 2019

Survey Rental & Sales S.A.C.

JOSE MANUEL GUISPE R
ING. ELECTRONICO DE SERVICIO TECNICO

JEFE DE SERVICIO TÉCNICO

- 📍 Av. Dos de Mayo 1660-1664 - San Isidro
- ☎ Central: (51) 204-6430
- 📞 Servicio Técnico : (511) 204-6440
- ✉ ventas@surveyrental.com.pe
- 🌐 Website: www.surveyrental.com.pe



Apéndice 41. Certificado de Georreferenciación del Punto Geodésico



INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
CENTRO DE PROCESAMIENTO GEODÉSICO



CERTIFICADO DE PUNTO GEODÉSICO

Visto el informe de procesamiento del punto geodésico **SNM08005** y habiendo verificado el resultado obtenido por la empresa **TROYA INGENIEROS E.I.R.L.**, el Instituto Geográfico Nacional procede a certificar la calidad del resultado obtenido, el cual cumple con los requisitos establecidos según Norma Técnica Geodésica, de acuerdo las siguientes características:

CÓDIGO DEL PUNTO GEODÉSICO		SNM08005	
COORDENADAS WGS-84			
	UTM		GEODÉSICAS
NORTE	9342825.297 m	LATITUD	05°56'26.25322" S
ESTE	244334.186 m	LONGITUD	77°18'33.51803" O
ZONA	18 Sur	ALT. ELIPSOIDAL	884.796 m
  		<p>Datos Generales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ORDEN: C - UBICACIÓN (Prov. – Dpto.): RIOJA – SAN MARTIN - ESTACIÓN GNSS BASE: MOYOBAMBA (SM01) - 2016 - ÉPOCA DE OBSERVACIÓN: OCTUBRE 2017 - NÚM. CORRELATIVO: 577 – 2017/IGN/DGC/DG/CPG 	
			

Lima, 10 de noviembre de 2017



Agapito Julca Lescano
D-262135768-D*
AGAPITO JULCA LESCANO
MY EP
Director de Fotogrametría

Mario Cesar Mendoza del Agula
DNI 44530098
MARIO CESAR MENDOZA DEL AGULA
CAS
Analista Geodésico del CPG