



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE NIVELES EN EL RÍO PULA POR AFECTACIÓN DE LA ESTACIÓN  
DE BOMBEO DE LA JRD PULA-JUNQUILLAL, CANTÓN SALITRE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Civil

**AUTOR:** CRISTIAN PAOLO RAMIREZ CARABAJO

**TUTOR:** ING. LUIS EDUARDO MOYA CHAVEZ

GUAYAQUIL-ECUADOR

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Cristian Paolo Ramirez Carabajo con documento de identificación No. 0926246711 manifiesto que: Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 11 agosto del año 2024

Atentamente,



---

Cristian Paolo Ramirez Carabajo

C.I 0926246711

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Cristian Paolo Ramirez Carabajo con documento de identificación No. 0926246711, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto técnico: ANÁLISIS DE NIVELES EN EL RÍO PULA POR AFECTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO DE LA JRD PULA-JUNQUILLAL, CANTÓN SALITRE, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 11 agosto del año 2024

Atentamente,



Cristian Paolo Ramirez Carabajo

C.I 0926246711

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Luis Eduardo Moya Chávez con documento de identificación No. 1310835457, docente de la Universidad, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE NIVELES EN EL RÍO PULA POR AFECTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO DE LA JRD PULA-JUNQUILLAL, CANTÓN SALITRE, realizado por Cristian Paolo Ramirez Carabajo con documento de identificación No. 0926246711, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 11 agosto del año 2024

Atentamente,



Luis Eduardo Moya Chávez

C.I 1310835457

## **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la Universidad Politécnica por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi Tutor de tesis, Ing. Luis Eduardo Moya Chávez por su esfuerzo y dedicación quien, con sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico.

Lo antes mencionado ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme agradecido y a la vez en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta tesis.

De igual manera agradecer a todos aquellos que han sido mis compañeros de clase durante todos los niveles en la universidad por su amistad, compañerismo y apoyo moral que contribuyeron en gran medida a mi deseo de seguir creciendo en mi carrera profesional y para finalizar, quiero agradecer sinceramente a mi compañera de aula Lesly Núñez quien fue una compañera siempre generosa y dispuesta como pocos, que compartió sus conocimientos y experiencias de tipo profesional y personal que fueron de gran valor para mi formación académica.

Cristian Paolo Ramirez Carabajo

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a la persona más especial y significativa en mi vida, mi madre, Gina Paola Carabajo Avelino. Mamá, este logro es tan tuyo como mío, porque en cada página de esta tesis está impreso tu sacrificio, tu amor y tu dedicación. No somos solo madre e hijo; somos un equipo, y siempre hemos sido solo tú y yo, luchando juntos.

Has sido mi madre y mi padre, mi apoyo incondicional, mi fuerza en los momentos de debilidad. Has llevado el peso de la familia sobre tus hombros, sin jamás quejarte, sin dejar que las dificultades nos derrumben. Cuando las circunstancias eran difíciles y parecía que no había recursos para continuar, tú encontrabas la manera, con esa determinación que solo tú tienes. Cada pequeño logro que he alcanzado es gracias a ti, porque fuiste tú quien me dio la oportunidad de estudiar, de soñar, y de llegar hasta aquí.

Tu amor y tu fortaleza han sido mi guía. Has enfrentado cada obstáculo con una sonrisa, y aunque los tiempos fueran duros, siempre hiciste que me sintiera amado y seguro. No tengo palabras suficientes para expresar cuánto te amo y lo mucho que significas para mí. Este trabajo lleva tu nombre, porque es un reflejo de todo lo que hemos superado juntos.

Mamá, esta tesis es para ti, porque sin ti, nada de esto sería posible. Eres mi mayor inspiración y te amo sobre todas las cosas. Este logro es el fruto de tu esfuerzo, y siempre lo será.

Finalmente, también agradecer a mi familia como en esta ocasión a mis abuelos, tíos y primos que siempre estuvo presente en mi proceso académico, por apoyarme en cualquier momento dónde los necesite, gracias por sus palabras de aliento para no rendirme esto también va para ustedes familia.

A Gillian Cáceres, mi compañera de vida, quien con su amor y apoyo constante ha sido la luz que ilumina mis días más oscuros. Tu presencia me ha dado la fuerza para superar cada obstáculo y la alegría de compartir cada éxito, grande o pequeño.

Gracias por ser mi inspiración y mi refugio. Este logro es tan tuyo como mío, porque sin ti, el camino habría sido mucho más difícil de recorrer.

Este logro está dedicado a mis queridos primos, quienes son la promesa de nuestra familia: Pablo, André, Thiago. Ustedes representan el futuro, y mi mayor deseo es que este esfuerzo los inspire a luchar por sus propios sueños. No olviden que, con dedicación y perseverancia, todo es posible. Siempre estaré aquí para apoyarlos en cada paso que den. Este trabajo es tanto suyo como mío.

Con amor,

Cristian Paolo Ramírez Carabajo

## **RESUMEN**

La presente investigación aborda el análisis de los niveles del río Pula, afectado por la operación de la estación de bombeo de la Junta de Riego y Drenaje Pula-Junquillal, ubicada en el cantón Salitre, provincia del Guayas, Ecuador. El estudio se enfoca en la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río, una región clave para la actividad agrícola local. A través de la modelación hidrológica e hidráulica, se examinan las condiciones actuales del flujo del río y se evalúan los impactos de la infraestructura existente. Los resultados obtenidos permiten proponer mejoras en la infraestructura hidráulica, con el objetivo de optimizar la distribución del agua para riego y reducir los riesgos asociados con eventos extremos como inundaciones. Este trabajo contribuye a la planificación y gestión sostenible del agua, esencial para el desarrollo agrícola y la resiliencia de las comunidades locales frente al cambio climático.

## **ABSTRACT**

This research addresses the analysis of the levels of the Pula River, affected by the operation of the pumping station of the Pula-Junquillal Irrigation and Drainage Board, located in the Salitre canton, Guayas province, Ecuador. The study focuses on the efficient and sustainable management of water resources in the river basin, a key region for local agricultural activity. Through hydrological and hydraulic modeling, the current conditions of the river flow are examined, and the impacts of the existing infrastructure are assessed. The results obtained allow proposing improvements in the hydraulic infrastructure, with the aim of optimizing the distribution of water for irrigation and reducing the risks associated with extreme events such as floods. This

work contributes to the planning and sustainable management of water, essential for agricultural development and the resilience of local communities in the face of climate change.

# INDICE DE CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | CAPITULO I.....                               | 18 |
| 1.1   | Introducción .....                            | 19 |
| 1.2   | Problema Del Estudio.....                     | 23 |
| 1.3   | Justificación.....                            | 25 |
| 1.4   | Ubicación Del Proyecto .....                  | 27 |
| 1.5   | Objetivos .....                               | 31 |
| 1.5.1 | Objetivo General.....                         | 31 |
| 1.5.2 | Objetivos Específicos.....                    | 31 |
| 2     | CAPÍTULO II.....                              | 32 |
| 2.1   | Marco Teórico .....                           | 32 |
| 2.1.1 | Ciclo hidrológico .....                       | 32 |
| 2.1.2 | Precipitación .....                           | 33 |
| 2.1.3 | Precipitación Neta o Efectiva.....            | 33 |
| 2.1.4 | Infiltración.....                             | 33 |
| 2.1.5 | Flujo Constante .....                         | 33 |
| 2.1.6 | Escorrentía o Escurrimiento Superficial. .... | 33 |
| 2.1.7 | Limnómetro .....                              | 34 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.1.8  | Pluviómetro.....   | 34 |
| 2.1.9  | Cálculo De Las Características Fisiográficas De La Cuenca..... | 34 |
| 2.1.10 | Cuenca Hidrológica. ....                                       | 34 |
| 2.1.11 | Delimitar Cuenca. ....   | 35 |
| 2.1.12 | Parteaguas. ....   | 35 |
| 2.1.13 | Área De La Cuenca.....   | 35 |
| 2.1.14 | Perímetro De La Cuenca. ....                                   | 35 |
| 2.1.15 | Introducción A La Hidrología E Hidráulica.....                 | 36 |
| 2.1.16 | Modelación Hidrológica .....                                   | 36 |
| 2.1.17 | Escurrimiento Superficial .....                                | 36 |
| 2.1.18 | Demarcación De La Cuenca, PLANO 1:50.000.....                  | 39 |
| 2.1.19 | Factor De Forma .....  | 39 |
| 2.1.20 | Curva Hipsométrica. ....                                       | 39 |
| 2.1.21 | Índice De Compacidad O Índice De Gravelious.....               | 40 |
| 2.1.22 | Perfil Longitudinal Del Río Pula .....                         | 41 |
| 2.1.23 | Perfil Longitudinal Del Curso De Agua.....                     | 41 |
| 2.1.24 | Pendiente Del Cauce .....                                      | 41 |
| 2.1.25 | Probabilidad Empírica .....                                    | 41 |
| 2.1.26 | Frecuencia.....  | 42 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.1.27 | Distribución De Gumbel.....  | 43 |
| 2.1.28 | Modelo Hidráulico Empleado.....  | 43 |
| 2.1.29 | Gestión De Recursos Hídricos.....  | 44 |
| 2.1.30 | Estudios Previos Y Aplicaciones De Modelación Hidrológica E Hidráulica<br>45 |    |
| 2.1.31 | Relevancia Y Aplicación En La Cuenca Del Río Pula.....                       | 46 |
| 3      | CAPITULO III.....  | 48 |
| 3.1    | Marco Metodológico.....  | 48 |
| 3.1.1  | Enfoque De La Investigación.....   | 48 |
| 3.1.2  | Modalidad De La Investigación.....   | 48 |
| 3.1.3  | Tipos De Investigación.....  | 48 |
| 3.2    | Métodos.....   | 49 |
| 3.2.1  | Fase 1.....  | 50 |
| 3.2.2  | Fase 2.....  | 51 |
| 3.2.3  | Fase 3.....  | 51 |
| 3.2.4  | Fase 4.....  | 52 |
| 3.3    | Metodología.....   | 53 |
| 3.3.1  | Factor De Forma.....   | 53 |
| 3.3.2  | Índice De Compacidad O Índice De Gravelious.....                             | 54 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.3.3 | Pendiente Del Cauce .....                         | 55 |
| 3.3.4 | Probabilidad .....                                | 55 |
| 3.3.5 | Probabilidad Empírica .....                       | 55 |
| 3.3.6 | Distribución De Gumbel .....                      | 56 |
| 3.3.7 | Distribución Normal .....                         | 56 |
| 3.3.8 | Ecuación de Manning .....                         | 57 |
| 3.4   | Recopilación de Datos.....                        | 57 |
| 3.4.1 | Datos Hidrológicos y Climáticos .....             | 57 |
| 3.4.2 | Datos Geográficos y de Uso del Suelo .....        | 58 |
| 3.4.3 | Datos de Infraestructuras Hidráulicas.....        | 59 |
| 3.5   | Modelación Hidráulica.....                        | 59 |
| 3.5.1 | Configuración del Modelo Hidráulico HEC-RAS.....  | 60 |
| 3.5.2 | Simulación De Flujos Hidráulicos .....            | 62 |
| 3.5.3 | Base Teórica Del Modelo.....                      | 62 |
| 3.5.4 | Análisis de Resultados .....                      | 64 |
| 4     | CAPITULO IV .....                                 | 65 |
| 4.1   | Desarrollo .....                                  | 65 |
| 4.1   | Factor De Forma.....                              | 66 |
| 4.2   | Índice De Compacidad O Índice De Gravelious ..... | 66 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.3   | Perfil Longitudinal Del Río Pula.....                                    | 68 |
| 4.4   | Pendiente De La Cuenca Del Rio Pula.....                                 | 68 |
| 4.5   | Estudio De Avenidas .....  | 70 |
| 4.5.1 | Información Básica Hidrometeorológica.....                               | 71 |
| 4.5.2 | Escurrimiento.....   | 71 |
| 4.5.3 | Cálculo De Caudales.....   | 71 |
| 4.5.4 | Caudales Máximos Hasta El Sitio De Cierre De La Cuenca.....              | 71 |
| 4.5.5 | Caudales Máximos En 24 Horas.....  | 72 |
| 4.5.6 | Distribución Teórica.....  | 73 |
| 4.5.7 | Análisis De Los Resultados Hidrológicos .....                            | 74 |
| 4.6   | Estudio Hidráulico.....  | 75 |
| 4.7   | Perfiles De La Superficie Del Agua En La Ubicación De La Estructura..... | 75 |
| 4.7.1 | Definición Del Modelo .....  | 75 |
| 4.7.2 | Datos Geométricos.....   | 75 |
| 4.7.3 | Sección Transversal .....  | 77 |
| 4.7.4 | Coficiente De Rugosidad .....  | 79 |
| 4.8   | Modelación Hidráulica.....   | 82 |
| 4.8.1 | Simulación Hidráulica .....  | 82 |
| 4.9   | Resultados De La Simulación .....  | 84 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.9.1 | Niveles Máximos .....                   | 84  |
| 4.9.2 | Análisis De Resultados Hidráulicos..... | 91  |
| 4.9.3 | Resultados De La Simulación.....        | 95  |
| 5     | Conclusiones y Recomendaciones.....     | 97  |
| 6     | Bibliografía.....                       | 100 |
| 7     | ANEXOS FOTOGRAFICOS.....                | 104 |

## TABLA DE ILUSTRACIÓN

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Ilustración 1  | Nivel de Vulnerabilidad al estrés hídrico en el mundo .....                       | 20 |
| Ilustración 2  | Diagrama de Sendal para la reducción del Riesgo de desastres 2015 – 2030<br>..... | 22 |
| Ilustración 3  | Esquema del sistema fluvial del río Vinces .....                                  | 27 |
| Ilustración 4  | Demarcación hidrográfica de la Cuenca del Río Guayas .....                        | 28 |
| Ilustración 5  | Río Pula en el sector de la estación de bombeo JRD Pula-Junquillal.....           | 29 |
| Ilustración 6  | Ubicación general .....   | 30 |
| Ilustración 7  | Ciclo Hidrológico .....   | 32 |
| Ilustración 8  | Curva hipsométrica .....  | 40 |
| Ilustración 9  | Esquema metodológico.....   | 50 |
| Ilustración 10 | Esquema de cálculo de los perfiles Hec -Ras. ....                                 | 63 |
| Ilustración 11 | Cuenca hidrográfica del río Pula hasta el punto de interés .....                  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 12 Perfil longitudinal del Río Pula .....   | 68 |
| Ilustración 13 Probabilidad Gumbel tipo I estación Pula en Laurel .....   | 74 |
| Ilustración 14 Topografía del cauce .....   | 76 |
| Ilustración 15 Vista en planta del río Pula en la parte de la estación de bombeo en la JRD<br>Pula-Junquillal ..... | 77 |
| Ilustración 16 Secciones tipo del río Pula en la zona de intervención.....  | 78 |
| Ilustración 17 Sección tipo, ubicación de las márgenes (punto rojo) .....   | 79 |
| Ilustración 18 Coeficiente de Rugosidad de Manning para las secciones del cauce .....                               | 82 |
| Ilustración 19 Ubicación de los caudales para la modelación y condición de borde.....                               | 83 |
| Ilustración 20 Steady Flow Analisis modelación río Pula .....   | 83 |
| Ilustración 21 Sección en la abscisa 0.....   | 85 |
| Ilustración 22 Sección en la abscisa 1.....   | 85 |
| Ilustración 23 Sección en la abscisa 3.....   | 86 |
| Ilustración 24 Sección en la abscisa 4.....   | 86 |
| Ilustración 25 Sección en la abscisa 5.....   | 87 |
| Ilustración 26 Sección en la abscisa 6.....   | 87 |
| Ilustración 27 Sección en la abscisa 7.....   | 88 |
| Ilustración 28 Sección en la abscisa 8.....   | 88 |
| Ilustración 29 Sección en la abscisa 9.....   | 89 |
| Ilustración 30 Sección en la abscisa 10.....  | 89 |
| Ilustración 31 Sección en la abscisa 11.....  | 90 |
| Ilustración 32 Sección en la abscisa 12.....  | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 33 Perfil Longitudinal río Pula para diferentes períodos de retorno..... | 91  |
| Ilustración 34 Sección del río sobre la que se implanta la estación de bombeo .....  | 96  |
| Ilustración 35 Vista 3D modelo HEC-RAS .....   | 96  |
| Ilustración 36 Tuberías de succión de la estación de bombeo Pula-Junquillal .....    | 104 |
| Ilustración 37 Tuberías de succión Río Pula.....                                     | 105 |
| Ilustración 38 Estación de bombeo Río Pula .....                                     | 106 |
| Ilustración 39 Motor de la estación de bombeo .....                                  | 107 |
| Ilustración 40 Canal principal de la JRD Pula-Junquillal .....                       | 108 |

## **CONTENIDO DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 (Cardona,2016) .....  | 67 |
| Tabla 2 Cálculo de la pendiente del Río Pula .....                                      | 69 |
| Tabla 3 Ubicación de la estación Pula en Laurel .....                                   | 70 |
| Tabla 4 Caudales máximos mensuales en la estación Pula en Laurel.....                   | 72 |
| Tabla 5 Caudales máximos diarios en la estación Pula en Laurel .....                    | 73 |
| Tabla 6 Caudales máximos para diferentes periodos de retorno, Río Pula en Laurel.....   | 74 |
| Tabla 7 Coeficiente de Manning para diferentes materiales. ....                         | 80 |
| Tabla 8 Resultados de la modelación en el río Pula, para diferentes períodos de retorno | 92 |
| Tabla 9 caudales en época de precipitaciones máximas .....                              | 97 |
| Tabla 10 Resumen de elevación del tirante de agua para diferentes períodos de retorno.  | 98 |
| Tabla 11 niveles de agua .....  | 99 |

## **1 CAPITULO I**

## 1.1 Introducción

El agua es esencial para la vida y el desarrollo de las sociedades humanas. Una gestión eficiente de los recursos hídricos es crucial para garantizar un progreso socioeconómico sostenible, apoyar la producción agrícola, generar energía, y promover el bienestar de la población. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, se estima que para 2050, una de cada tres personas residirá en países donde la escasez de agua dulce será una realidad, lo que subraya la importancia de implementar estrategias efectivas para el manejo integral de los recursos hídricos (UNESCO, 2019).

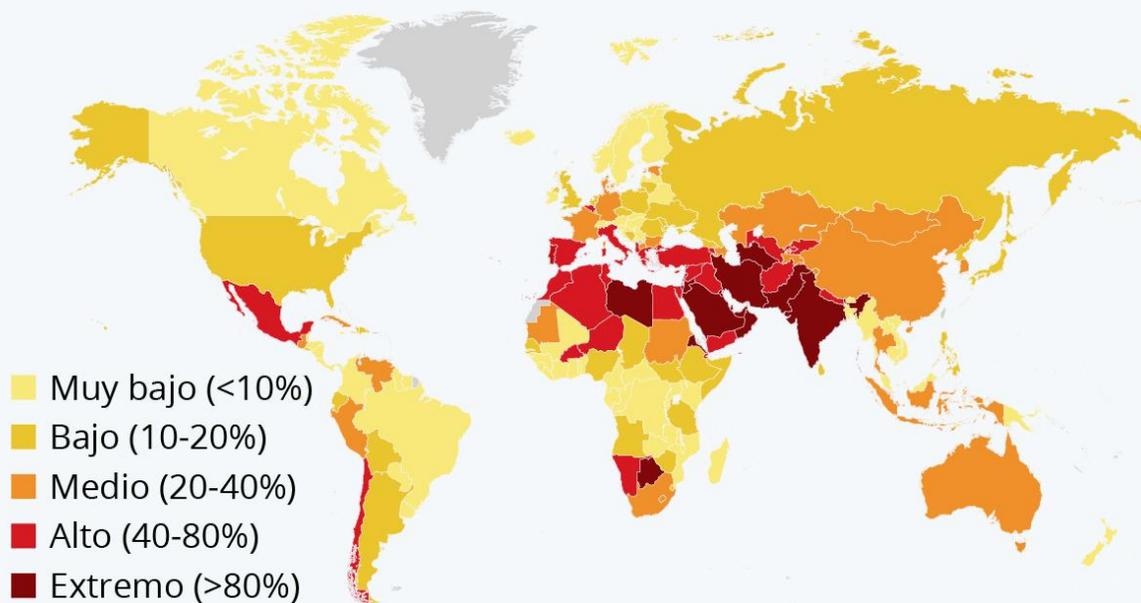
Aunque el 3.5% del agua en la Tierra es dulce, la mayor parte de este porcentaje, alrededor del 70%, está atrapada en glaciares y casquetes polares. El 30% restante se encuentra en depósitos subterráneos, como pozos y acuíferos, mientras que solo el 1% del agua dulce del planeta fluye a través de ríos y arroyos en las cuencas hidrográficas. Nuestro planeta enfrenta actualmente un doble desafío: la sequía y el estrés hídrico en algunas regiones, y la falta de acceso a agua potable en otras, donde, aunque no siempre hay escasez, las condiciones para su consumo no son óptimas. Este último desafío se aborda en el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (IAGUA, 2018).

Es imperativo establecer medidas o infraestructuras que promuevan el uso eficiente de este recurso, que no es renovable. Se sabe que solo un pequeño porcentaje del agua en la naturaleza es apto para su potabilización. Según las proyecciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua, pero

apenas un 0.025% es potable y apta para el consumo humano. Con una demanda global en aumento, se prevé que esta necesidad crecerá en un 55% entre el año 2000 y 2050.(IAGUA, 2018).

## ¿Qué países corren mayor riesgo de quedarse sin agua?

Nivel de vulnerabilidad al estrés hídrico en el mundo\*



\* Según la proporción de agua utilizada anualmente con respecto al suministro disponible.

Fuente: 2020 Ecological Threat Register



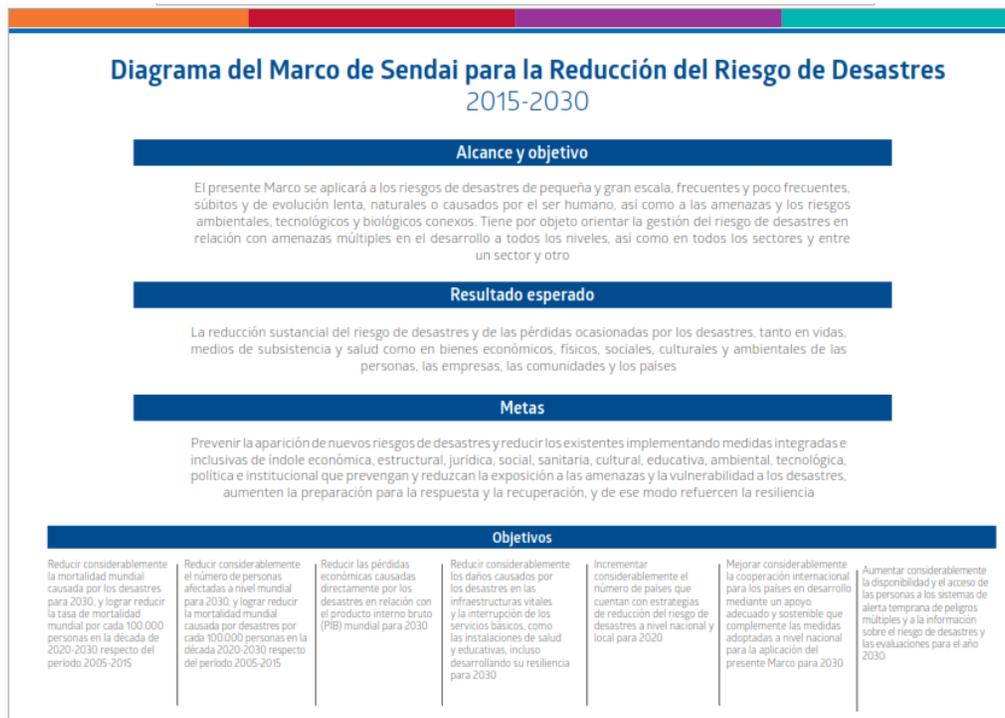
statista

*Ilustración 1 Nivel de Vulnerabilidad al estrés hídrico en el mundo*

*Fuente: STATISTA, 2022*

Además, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reporta que aproximadamente 2.200 millones de personas en todo el mundo no tienen acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (ONU, 2020). Esta cifra alarmante resalta la magnitud del desafío global en torno al acceso al agua limpia. A esta problemática se suman los efectos devastadores de los desastres naturales, que no solo amenazan la disponibilidad de agua potable, sino que también impactan negativamente las infraestructuras críticas necesarias para proveer estos servicios.

La falta de planificación y previsión adecuadas en el diseño y la construcción de diversas estructuras agrava aún más la situación. Cuando no se toman en cuenta los riesgos asociados con fenómenos naturales como inundaciones, terremotos o sequías, las inversiones realizadas en infraestructuras pueden quedar comprometidas. Esto resulta en daños severos a instalaciones esenciales, dejando a las poblaciones rurales, que ya son vulnerables, aún más expuestas y sin acceso a recursos vitales como el agua potable. La combinación de estos factores subraya la necesidad urgente de adoptar enfoques más integrales y resilientes en la gestión del agua y la infraestructura asociada, para proteger tanto a las comunidades como a las inversiones a largo plazo.



*Ilustración 2 Diagrama de Sendai para la reducción del Riesgo de desastres 2015 – 2030*

*Fuente (Ki-moon, 2015)*

En este contexto, el análisis hidrológico e hidráulico del río Pula se posiciona como una iniciativa crucial para comprender mejor y optimizar el manejo de los recursos hídricos en la región. Este estudio tiene como objetivo principal realizar una modelación detallada del comportamiento hidrológico e hidráulico del río, con el propósito de identificar los niveles de agua que se presentan durante diferentes periodos de retorno. De esta manera, se busca determinar la frecuencia de inundaciones en las zonas adyacentes, proporcionando información valiosa para la gestión de riesgos y la planificación del uso del suelo.

La investigación implica un riguroso análisis estadístico de los datos hidrométricos recolectados, así como la creación de un modelo hidráulico preciso utilizando el software HEC-

RAS. Los resultados de este estudio serán esenciales para el diseño de infraestructuras hidráulicas que no solo sean eficientes y sostenibles, sino que también estén alineadas con las necesidades actuales y futuras de la comunidad. Estas infraestructuras tendrán el potencial de mejorar significativamente la gestión del agua en la región, tanto para el riego agrícola como para otros usos críticos.

La importancia de este estudio va más allá de la optimización del riego; también es fundamental en la mitigación de riesgos asociados con eventos hidrológicos extremos, como inundaciones, que podrían tener consecuencias graves para la población y la economía local. Este trabajo se inscribe en un marco más amplio de objetivos globales, orientados hacia la gestión sostenible del agua y la adaptación al cambio climático. Al fomentar prácticas de gestión que equilibran el desarrollo humano con la conservación del medio ambiente, el estudio del río Pula contribuye a un futuro más resiliente y sostenible para la región y sus habitantes.

## **1.2 Problema Del Estudio**

La administración efectiva y sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río Pula, situada en la provincia de Guayas, Ecuador, representa un reto fundamental. Esta cuenca es crucial para numerosas actividades humanas, especialmente la agricultura, que constituye la base económica de la región. Sin embargo, la carencia de infraestructuras adecuadas y una gestión eficiente del agua han dado lugar a problemas graves que afectan tanto la disponibilidad como la calidad del recurso hídrico, repercutiendo negativamente en la productividad agrícola y en la calidad de vida de las comunidades locales.

Pula-Junquillal, que depende del río Pula para regar sus tierras agrícolas, enfrenta desafíos significativos. Entre estos se incluyen la variabilidad en la disponibilidad de agua debido a las fluctuaciones estacionales y climáticas, la falta de infraestructura adecuada para el almacenamiento y la distribución del agua, y una gestión ineficiente que provoca pérdidas importantes por infiltración y evaporación. Adicionalmente, eventos hidrológicos extremos, como sequías e inundaciones, agravan estos problemas, poniendo en peligro la seguridad hídrica y la sostenibilidad agrícola de la región.

Un obstáculo principal para desarrollar soluciones efectivas es la falta de conocimiento detallado sobre las características hidrológicas e hidráulicas de la cuenca del río Pula. La ausencia de datos precisos sobre caudales, precipitaciones y otros parámetros hidrológicos dificulta la planificación y el diseño de infraestructuras adecuadas. Sin una modelación precisa del comportamiento del río y su cuenca, es imposible prever y mitigar de manera efectiva los riesgos asociados con eventos hidrológicos extremos y optimizar el uso del agua para riego y otras necesidades.

Por lo tanto, se requiere desarrollar un modelo hidrológico e hidráulico del río Pula que ofrezca una comprensión detallada de los patrones de flujo, las condiciones de drenaje y las características de la cuenca. Este modelo es esencial para diseñar e implementar infraestructuras hidráulicas que mejoren la eficiencia del riego, reduzcan los riesgos de inundaciones y sequías, y promuevan la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región. Resolver estos problemas es crucial para la sostenibilidad de la agricultura local, la conservación del medio ambiente y el bienestar de la

comunidad, garantizando así la disponibilidad y calidad del agua para las generaciones actuales y futuras.

Esto nos lleva a plantear la siguiente cuestión: ¿permitirá la modelación hidráulica del río Pula conocer los niveles de agua en el cauce y, por ende, establecer los riesgos asociados a la estación de bombeo de la JRD Pula-Junquillal?

### **1.3 Justificación**

La gestión eficiente de los recursos hídricos es crucial para el desarrollo sostenible de cualquier región, incluyendo la cuenca del río Pula en la provincia de Guayas, Ecuador. Este río es fundamental para la comunidad local, particularmente para la Junta de Riego y Drenaje Unión y Progreso, que depende de sus aguas para la agricultura, el principal pilar económico de la región. Sin embargo, la falta de infraestructura adecuada y una gestión deficiente del recurso hídrico han causado problemas significativos, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua, y, por ende, la productividad agrícola y el bienestar de las comunidades.

La variabilidad en la disponibilidad de agua, acentuada por cambios estacionales y climáticos, junto con la falta de datos precisos sobre caudales y otros parámetros hidrológicos, complica la planificación y diseño de infraestructuras eficientes. Además, eventos hidrológicos extremos, como inundaciones y sequías, presentan riesgos adicionales que amenazan la seguridad hídrica y la sostenibilidad agrícola en la región. Estos problemas subrayan la necesidad urgente de llevar a cabo una modelación hidrológica e hidráulica del río Pula.

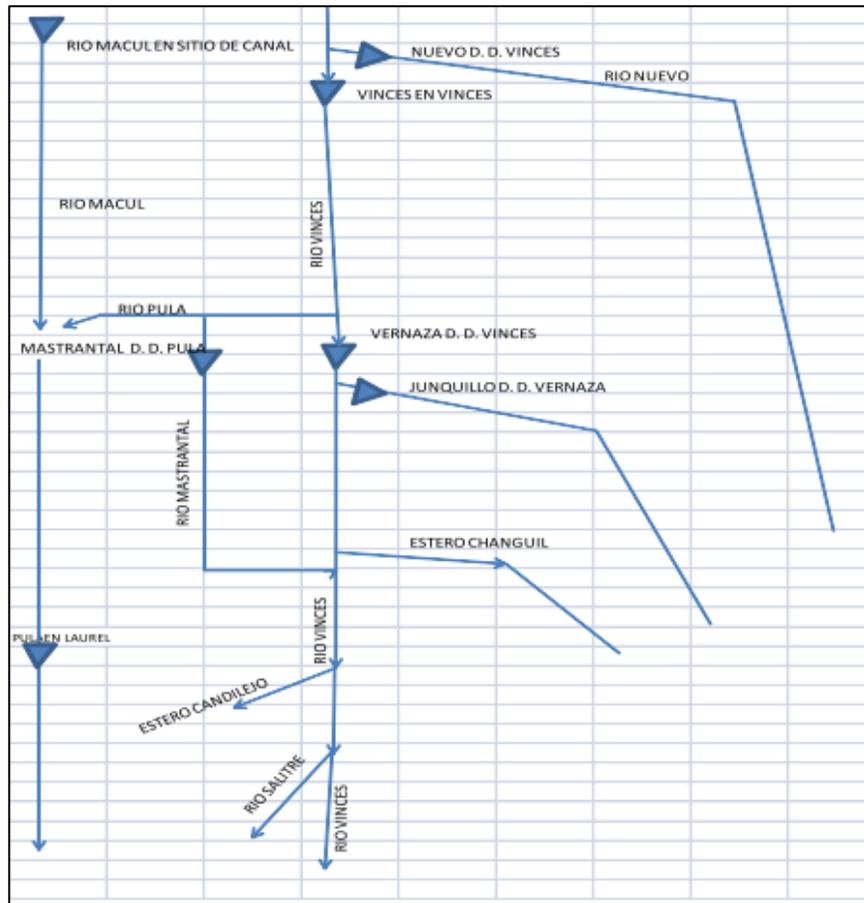
Implementar una modelación precisa ayudará a comprender mejor los patrones de flujo y las condiciones de drenaje en la cuenca. Este conocimiento es esencial para diseñar infraestructuras

hidráulicas que optimicen el uso del agua, minimizando pérdidas por infiltración y evaporación, y mejorando la eficiencia del riego. Además, una modelación adecuada contribuirá a mitigar los riesgos asociados con eventos hidrológicos extremos, protegiendo a la comunidad y sus medios de vida.

La justificación para este estudio se basa en varios aspectos clave. Primero, optimizar el riego es fundamental para maximizar la productividad agrícola y asegurar la sostenibilidad de las actividades agrícolas. Segundo, mitigar los riesgos de inundaciones y sequías es crucial para proteger la producción agrícola y la seguridad de la población local. Tercero, disponer de datos precisos y actualizados sobre los recursos hídricos es vital para una planificación a largo plazo y una gestión sostenible del agua. Cuarto, mejorar la gestión del agua beneficiará directamente a la comunidad local, incrementando la productividad agrícola y el bienestar general. Finalmente, este estudio aportará al conocimiento científico existente, sirviendo de referencia para investigaciones futuras y aplicaciones en otras regiones con condiciones hidrológicas similares.

Una modelación hidrológica e hidráulica precisa permitirá desarrollar soluciones sostenibles que optimicen el uso del agua, mitiguen los riesgos y promuevan el desarrollo económico y social de la región, asegurando así el bienestar de la comunidad y la conservación del medio ambiente.

La cuenca del río Vinces a la que pertenece el río Pula, es parte del sistema del Guayas, es una de las 3 cuencas principales, incluidas las del Babahoyo y el Daule, dentro de la cuenca existen varios subsistemas como lo son el Pula, Mastrantal, Salitre, Los Tintos como se puede ver en el esquema de la Ilustración 3.



*Ilustración 3 Esquema del sistema fluvial del río Vines*

*Fuente: (SENAGUA, 2010)*

### **1.4 Ubicación Del Proyecto**

El río en cuestión, situado en la provincia de Guayas, en Ecuador, desempeña un papel crucial dentro de la cuenca del río Vines. Se destaca como uno de los afluentes principales del río Guayas, junto con el río Daule y el Babahoyo, como se muestra en la Ilustración 4. Esta fuente hídrica es de suma importancia para la comunidad local, ya que contribuye significativamente al desarrollo de actividades relacionadas con el riego, en particular para la producción de arroz.



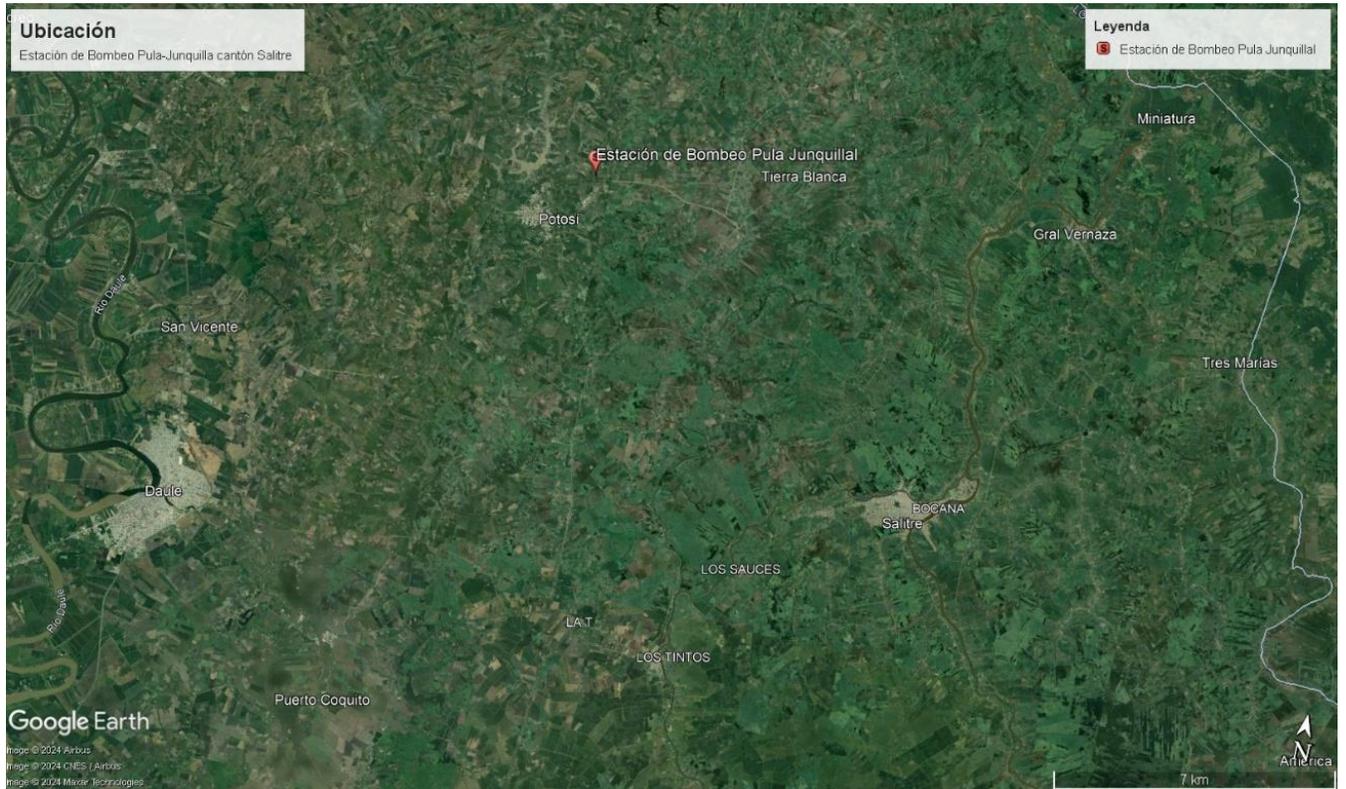
COORDENADAS:

- X: 622492.00
- Y: 9803964.00



*Ilustración 5 Río Pula en el sector de la estación de bombeo JRD Pula-Junquillal*

*Fuente: Prefectura del Guayas*



*Ilustración 6 Ubicación general*

*Fuente: Google earths*

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

- Analizar de niveles en el Rio Pula por afectación de la estación de bombeo de la JRD Pula-Junquillar, Cantón Salitre.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la información hidrométrica de la estación aplicando la metodología de Gumbel Tipo I para la obtención de los caudales para diferentes periodos de retorno.
- Desarrollar una modelación hidráulica del río Pula utilizando el software HEC-RAS, para determinar los niveles de la superficie libre del agua para cada periodo de retorno.
- Obtener los niveles para diferentes periodos de retorno estableciendo así la periodicidad en la que se puede tener problemas de inundación en la estación de bombeo, mediante el análisis de los resultados.

## 2 CAPÍTULO II

### 2.1 Marco Teórico

#### 2.1.1 Ciclo hidrológico

Según (Villón, 2004) son los cambios que el agua experimenta en la naturaleza, tanto en su estado (líquido, sólido, gaseoso) como en su forma (superficial, subterránea, y otros).

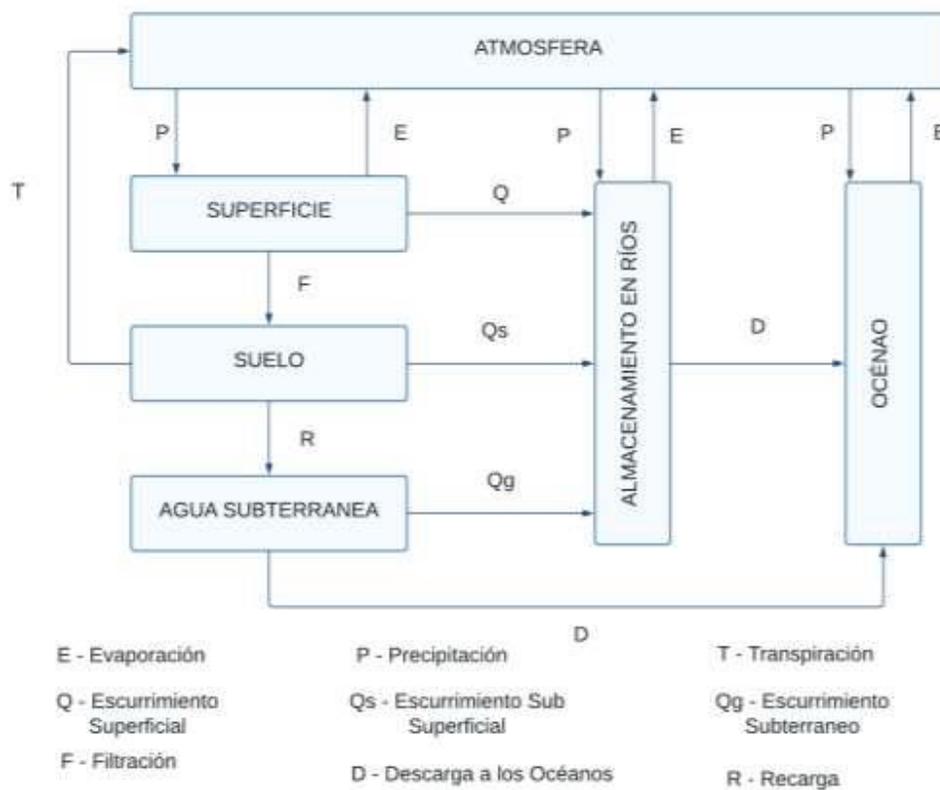


Ilustración 7 Ciclo Hidrológico

Fuente: (Moya, 2022)

### **2.1.2 Precipitación**

El agua que llega a la superficie terrestre después de la condensación se manifiesta en forma de precipitación. Aunque la mayoría de esta precipitación ocurre como lluvia, también puede presentarse en otras formas, como nieve, granizo, rocío y otros tipos de precipitación. (Han, 2010)

### **2.1.3 Precipitación Neta o Efectiva.**

La cantidad de lluvia que contribuye a la formación de cauces y corrientes de agua se denomina precipitación efectiva. Este valor se obtiene al restar las pérdidas de la precipitación total. (Han, 2010)

### **2.1.4 Infiltración.**

Según (Han, 2010) “es el proceso de penetración del agua desde la superficie del suelo hacia el suelo”.

### **2.1.5 Flujo Constante**

"El flujo invariable se refiere a condiciones en las que las propiedades del flujo, como la profundidad, la velocidad, el caudal y otros parámetros, permanecen constantes a lo largo del tiempo. (Han, 2010).

### **2.1.6 Escorrentía o Esguimiento Superficial.**

Según lo establecido por (Han, 2010), la precipitación efectiva representa el flujo de agua superficial en los ríos una vez que la lluvia ha empapado el suelo, permitiendo que el agua se acumule y se desplace siguiendo la fuerza de la gravedad."

#### **2.1.7 Limnómetro**

Es una regla graduada, colocada en una de las márgenes de los ríos, se debe procurar que uno de los lados de la regla se mantenga sumergida en el agua aún en la época seca (Villón, 2004)

#### **2.1.8 Pluviómetro**

El pluviómetro es un dispositivo empleado en estaciones meteorológicas para cuantificar la precipitación pluvial. Consiste en un recipiente cilíndrico con un embudo en su parte superior que facilita la recolección del agua de lluvia. La presencia de una probeta graduada en el pluviómetro posibilita la medición exacta de la cantidad de lluvia acumulada, tal como detalla (Villón, 2004).

#### **2.1.9 Cálculo De Las Características Fisiográficas De La Cuenca.**

Las características fisiográficas clave de una cuenca, que influyen en los procesos de transferencia y almacenamiento en el ciclo hidrológico, incluyen el área, el tipo y uso del suelo, la posición y orientación, la forma, la pendiente, la elevación y la red de drenaje. Estos elementos físicos del territorio son fundamentales para comprender la dinámica hidrológica, como señala (Villón, 2004).

#### **2.1.10 Cuenca Hidrológica.**

En un sentido general, una cuenca de drenaje se refiere al área de tierra donde las aguas de la precipitación se acumulan para formar un único curso de agua. Cada curso de agua tiene asociada una cuenca de drenaje claramente delimitada, lo que significa que para cada punto a lo largo de su recorrido existe una zona específica que contribuye al flujo de agua, tal como lo describe (Villón, 2004).

#### **2.1.11 Delimitar Cuenca.**

La delimitación de una cuenca hidrográfica se realiza, sobre un mapa con curvas de nivel, siguiendo las líneas de parteaguas, la que es la línea imaginaria que divide a cuencas contiguas y distribuye el escurrimiento ocasionado por la lluvia. (Villón, 2004)

#### **2.1.12 Parteaguas.**

También llamada línea divisoria, está conformada por los puntos de mayores cotas y cruza los cauces en los puntos de salida, también llamados sitios de interés o aforos. (Villón, 2004).

#### **2.1.13 Área De La Cuenca**

La superficie de una cuenca hidrográfica se define como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de esorrentía que fluye directa o indirectamente hacia un mismo curso de agua natural. Designada con la letra "A" mayúscula, esta superficie es posiblemente la característica geomorfológica más significativa, según lo explica (Villón, 2004).

#### **2.1.14 Perímetro De La Cuenca.**

Es el borde de la forma que la cuenca tiene proyectada sobre un plano horizontal. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la mayúscula "P" (Villón, 2004).

### **2.1.15 Introducción A La Hidrología E Hidráulica**

La hidrología es una rama de la ciencia que se dedica a examinar el agua en la Tierra, incluyendo su distribución, circulación, y características físicas y químicas. Este campo de estudio se basa en el análisis del ciclo del agua, que abarca fenómenos como la precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. Entender estos procesos es crucial para la gestión efectiva de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde el agua es un recurso escaso y esencial.

En contraste, la hidráulica es una especialidad dentro de la ingeniería que investiga el comportamiento del agua en movimiento, tanto en sistemas naturales como ríos y canales, como en infraestructuras artificiales como tuberías y embalses. La hidráulica ofrece los principios y herramientas necesarias para diseñar y evaluar sistemas de transporte y almacenamiento de agua, desempeñando un papel fundamental en la planificación de proyectos de riego, el control de inundaciones y el suministro de agua potable.

### **2.1.16 Modelación Hidrológica**

La modelación hidrológica es una herramienta crucial para analizar y prever el comportamiento del ciclo del agua dentro de una cuenca. A través de los modelos hidrológicos, es posible simular fenómenos como la precipitación, la infiltración, la escorrentía superficial y la evapotranspiración, lo que permite obtener estimaciones del caudal en distintos puntos de la cuenca. Estos modelos juegan un papel esencial en la planificación y gestión de los recursos hídricos, ya que facilitan la identificación de patrones y tendencias que afectan la disponibilidad y la calidad del agua.

### **2.1.17 Esguerrimiento Superficial**

El escurrimiento se refiere a la parte de la precipitación que llega a los canales naturales a través de la superficie terrestre o como agua subterránea. El hidrograma es una representación gráfica que muestra el caudal en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) en el eje vertical y el tiempo (en minutos, horas, días o meses) en el eje horizontal. Este gráfico puede mostrar un aumento rápido hacia un pico debido a lluvias intensas y descensos más lentos entre tormentas.

Las variaciones en un hidrograma se deben a los factores que afectan el escurrimiento, los cuales se dividen en dos categorías: climáticos y topográficos.

Factores climáticos que influyen en el escurrimiento:

- Tipo de precipitación: tormentas intensas o lluvias continuas.
- Intensidad de las precipitaciones.
- Duración de la Lluvia.
- Distribución espacial de las precipitaciones.
- Dirección del movimiento de las tormentas.
- Precipitación previa y estado de humedad del suelo.
- Condiciones climáticas que afectan la evaporación y transpiración.

Factores topográficos que afectan el escurrimiento:

- Uso del suelo.
- Tipo de suelo.
- Tamaño del área.
- Forma del terreno.

- Elevación.
- Curvatura del terreno.
- Orientación.

Tipo y extensión de la red de drenaje, incluyendo drenajes artificiales e indirectos.

Desarrollar una ecuación precisa para calcular el escurrimiento basado en estos factores es complicado, ya que ninguno de los factores por sí solo puede determinar el escurrimiento al 100%. Sin embargo, se pueden realizar estimaciones razonables del pico de escurrimiento para eventos menores utilizando una combinación de estos factores.

Actualmente, las predicciones de escurrimiento se realizan mediante diversos métodos, que incluyen:

- Fórmulas empíricas.
- Métodos estadísticos.
- Método del hidrograma unitario.
- Método racional.

En este informe, se ha implementado el método del hidrograma unitario, utilizando curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y hietogramas derivados de las estaciones relevantes en la zona de estudio. Se ha empleado un modelo matemático específico para analizar las cuencas de drenaje en función de los datos recogidos por las estaciones pluviográficas.

Los modelos hidrológicos varían en tipo y complejidad, cada uno con aplicaciones específicas. Los modelos de lluvia-escorrentía simulan la respuesta de una cuenca a eventos de

precipitación, permitiendo prever los escurrimientos y los picos de caudal. Por otro lado, los modelos de balance hídrico examinan la disponibilidad de agua en la cuenca, integrando todos los componentes del ciclo hidrológico, desde la entrada de agua hasta su salida. Además, los modelos de distribución de caudales ayudan a comprender cómo se distribuye el flujo de agua dentro de la cuenca y cómo las variaciones en el caudal responden a factores climáticos y usos del suelo.

#### **2.1.18 Demarcación De La Cuenca, PLANO 1:50.000**

En el área del proyecto, se emplearon cartas topográficas a una escala de 1:50,000 para definir las cuencas que aportan al río Pula hasta el punto de interés.

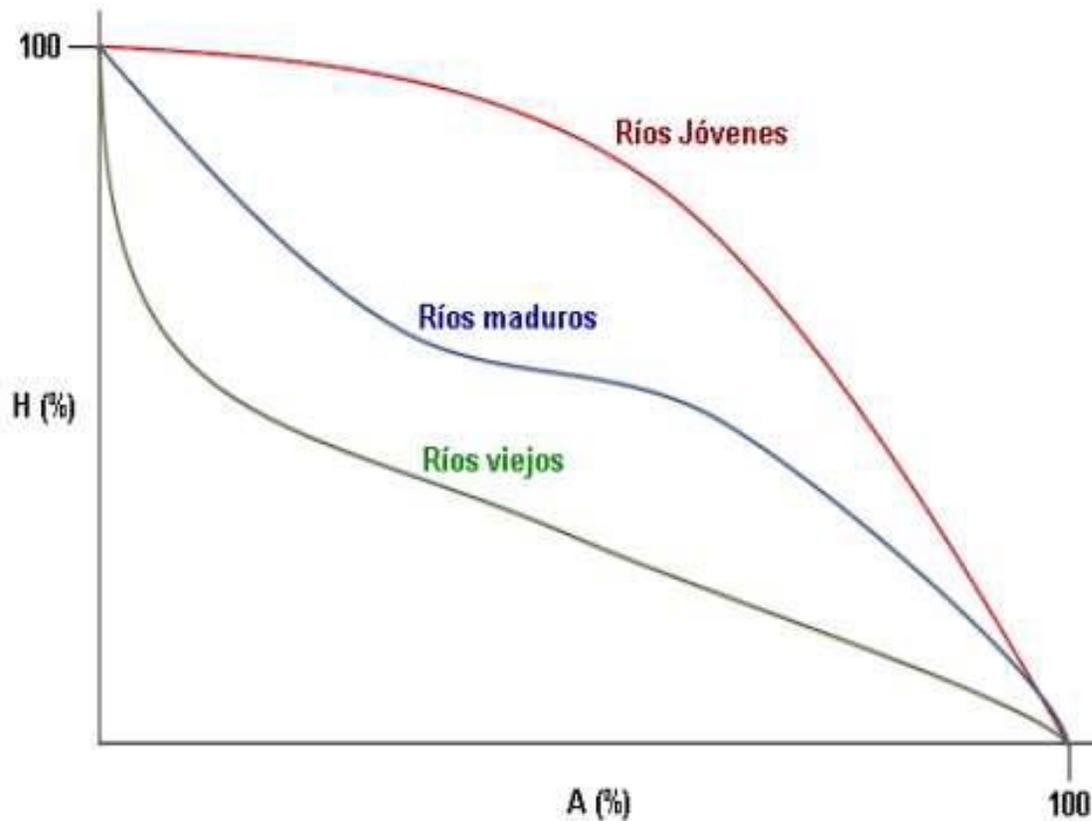
#### **2.1.19 Factor De Forma**

Según (Horton, 1945), la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud es un indicador clave en la hidrología. Si esta relación es mayor a uno, sugiere que la cuenca tiene una forma más achatada o que el río principal es relativamente corto. Esta configuración provoca que el escurrimiento de lluvias intensas se concentre rápidamente, lo que puede resultar en grandes avenidas de agua.

#### **2.1.20 Curva Hipsométrica.**

La curva hipsométrica es un gráfico que representa la relación entre la altitud y el área de una cuenca que se encuentra a esa altitud o por encima de ella. Este gráfico muestra el porcentaje acumulado del área de la cuenca que alcanza o supera una altitud específica. Para elaborar esta curva, se emplea un mapa topográfico que presenta curvas de nivel. El procedimiento para construirla consiste en segmentar la cuenca en áreas definidas por estas curvas de nivel, utilizando

intervalos regulares, como cada 20 metros. Este enfoque permite comprender cómo se distribuye el área de la cuenca en diferentes altitudes, proporcionando una visión detallada de su perfil topográfico.



*Ilustración 8 Curva hipsométrica*

*Fuente: (Ibáñez et al.,2010)*

### **2.1.21 Índice De Compacidad O Índice De Gravelious**

El índice de compacidad o de Gravelious es la relación entre el perímetro de la cuenca de drenaje, y el perímetro de una circunferencia, que tiene la misma área (Villón, 2004).

### **2.1.22 Perfil Longitudinal Del Río Pula**

Según ((Villón), este parámetro proporciona una indicación de las pendientes presentes en el cauce de un río. Además, puede servir como un criterio útil para optimizar el control de avenidas, identificar puntos adecuados para la instalación de captaciones, y planificar otros tipos de estructuras en el río.

### **2.1.23 Perfil Longitudinal Del Curso De Agua.**

Este parámetro es de suma importancia puesto que nos permite conocer una idea de las pendientes que se tiene en el cauce (Villón, 2004).

### **2.1.24 Pendiente Del Cauce**

En este caso, se aplicará el método de la ecuación de Taylor y Schwarz, el cual asume que el río se compone de n tramos de longitud uniforme, donde en cada uno se establece una pendiente constante (Villón, 2004). La ecuación asociada a este método se presenta a continuación.

En la práctica se espera que los tramos sean de diferentes longitudes, en este caso Taylor y Schwarz recomiendan usar una variación de la ecuación 3 (Villón, 2004).

### **2.1.25 Probabilidad Empírica**

Según (Han, 2010), la probabilidad empírica es una medida de probabilidad no paramétrica en la que no se asume una distribución teórica. Si "n" representa el total de puntos o datos analizados y "m" es el rango de cada punto individual, la probabilidad de excedencia se calcula de la siguiente manera.

### **2.1.26 Frecuencia**

El periodo de retorno, definido como "el tiempo promedio, expresado en años, durante el cual se espera que un caudal pico de una creciente específica sea igualado o superado al menos una vez" (Posso, 2009), es un concepto fundamental en la ingeniería hidráulica. Este parámetro no solo se utiliza para prever la frecuencia de eventos hidrológicos extremos, sino que también desempeña un papel crucial en la evaluación de la seguridad de las infraestructuras hidráulicas, especialmente en relación con las zonas aguas abajo que podrían verse afectadas.

Según diversas fuentes especializadas en la materia (Bureau of Reclamation, 1987; Chow et al., 1994; Terra, 1968), la selección del periodo de retorno para una estructura hidráulica debe basarse en una evaluación cuidadosa de los riesgos potenciales y de la seguridad de las áreas que se encuentran aguas abajo. El libro de diseño de pequeñas presas, por ejemplo, proporciona directrices para determinar este periodo, que es esencial para el diseño adecuado de los componentes de una obra hidráulica. La elección del periodo de retorno está directamente relacionada con los posibles daños que podrían derivarse de una falla estructural.

En situaciones donde las condiciones aguas abajo no presentan un riesgo significativo de pérdidas materiales, y considerando que la estructura en cuestión es de baja altura, se establece comúnmente un periodo de retorno de 25 años para el diseño. Este periodo es considerado suficiente para mitigar riesgos sin incurrir en costos excesivos. Sin embargo, en el caso de proyectos de drenaje agrícola, donde los riesgos y la escala de la obra son generalmente menores, es habitual emplear periodos de retorno más cortos, que pueden oscilar entre 5 y 10 años. Esta

flexibilidad en la elección del periodo de retorno permite adaptar el diseño a las condiciones específicas del proyecto, equilibrando adecuadamente seguridad y economía.

### **2.1.27 Distribución De Gumbel**

El modelo para evaluar valores extremos, tanto máximos como mínimos, se clasifica en tres categorías, según lo propuesto por Chow et al. [5]. Este enfoque fue inicialmente desarrollado por Fisher y Tippett en 1928, quienes establecieron tres tipos principales de distribuciones: la distribución de valor extremo tipo I, tipo II y tipo III. Posteriormente, Gumbel en 1941 exploró en mayor detalle las propiedades de la distribución de valor extremo tipo I, lo que llevó a que esta distribución se asocie frecuentemente con su nombre.(Díaz Salas (n.d.))

### **2.1.28 Modelo Hidráulico Empleado**

La integración adecuada de la información primaria y secundaria obtenida durante las actividades de campo, junto con la metodología empleada en el modelo, mejora significativamente el proceso de modelado y, por consiguiente, los resultados obtenidos (Instituto Geofísico – Universidad Javeriana, 2017).

Para la modelación hidráulica, se utilizó el software HEC-RAS (USACE, 2016), desarrollado en 1995 por el Hydrologic Engineering Center (HEC), una entidad del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. Este programa reemplaza al HEC-2 y es el modelo unidimensional más ampliamente empleado para calcular perfiles de agua en condiciones estacionarias en cauces naturales y artificiales. A diferencia del HEC-2, que requería repetir simulaciones cambiando el sentido del flujo, el HEC-RAS ofrece la capacidad de modelar flujos

mixtos (de rápido a lento y viceversa) y presenta mejoras significativas, como su interfaz en entorno Windows y salidas gráficas.

El software está diseñado para calcular perfiles de agua en regímenes estacionarios con variación gradual en cauces. Permite la simulación de flujos subcríticos, supercríticos y mixtos, y puede incluir diversos tipos de estructuras hidráulicas como puentes y alcantarillas. El cálculo se basa en la solución de la ecuación unidimensional de energía, considerando las pérdidas de energía, y utiliza el método conocido como "Paso Estándar".

### **2.1.29 Gestión De Recursos Hídricos**

La gestión de los recursos hídricos implica una serie de actividades esenciales, como la planificación, desarrollo, distribución y administración del agua, con el propósito de satisfacer de manera sostenible las necesidades humanas y ambientales. En la cuenca del río Pula, la gestión eficiente de los recursos hídricos es fundamental, ya que la agricultura, la principal actividad económica de la región, depende en gran medida de la disponibilidad de agua. Implementar estrategias de gestión basadas en datos precisos y modelos confiables es clave para optimizar el uso del agua en los sistemas de riego, reducir pérdidas innecesarias y mejorar la capacidad de la región para adaptarse a eventos climáticos extremos, como sequías o inundaciones.

Una gestión hídrica efectiva debe ser integral, considerando no solo los aspectos técnicos, sino también los factores sociales, económicos y ambientales que influyen en el uso del agua. Es esencial realizar un análisis exhaustivo de la oferta y la demanda de agua, implementar tecnologías avanzadas de riego que maximicen la eficiencia, y desarrollar infraestructuras robustas para el almacenamiento y la distribución del recurso. Además, la promoción de prácticas agrícolas

sostenibles es vital para asegurar que el uso del agua no comprometa la salud a largo plazo de los ecosistemas locales.

La participación de las comunidades locales es otro pilar crucial en el proceso de gestión hídrica. Involucrar a los habitantes en la toma de decisiones y fomentar la educación y concienciación sobre el uso responsable del agua contribuye a una gestión más equitativa y sostenible. Las políticas y estrategias que se adopten deben estar alineadas con las necesidades y capacidades de la comunidad, promoviendo un enfoque colaborativo que asegure la sostenibilidad de los recursos hídricos a largo plazo. En resumen, una gestión hídrica eficaz en la cuenca del río Pula requiere un enfoque holístico que equilibre los intereses humanos con la protección del medio ambiente, garantizando así la disponibilidad y calidad del agua para futuras generaciones.

### **2.1.30 Estudios Previos Y Aplicaciones De Modelación Hidrológica E Hidráulica**

Numerosos estudios han destacado la importancia de la modelación hidrológica e hidráulica en la gestión eficiente de cuencas y ríos. Investigaciones llevadas a cabo en distintas cuencas han empleado el software HEC-RAS para analizar el impacto de las infraestructuras hidráulicas, optimizar los sistemas de riego y diseñar estrategias para la mitigación de inundaciones. Estos estudios proporcionan una base sólida para aplicar técnicas similares en la cuenca del río Pula, adaptando los modelos y métodos a las particularidades de la región.

La revisión de la literatura subraya la importancia de integrar datos climáticos, hidrológicos y geográficos en los modelos, así como de calibrar y validar estos modelos con datos empíricos para garantizar su precisión y confiabilidad. Además, los estudios destacan la necesidad de

considerar los posibles efectos del cambio climático en la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos, lo cual es esencial para desarrollar estrategias sostenibles a largo plazo. Adaptar estas metodologías al contexto específico del río Pula permitirá una gestión más eficiente y resiliente frente a los desafíos actuales y futuros.

### **2.1.31 Relevancia Y Aplicación En La Cuenca Del Río Pula**

La cuenca del río Pula enfrenta desafíos significativos en cuanto a la disponibilidad y gestión del agua. Las fluctuaciones en los patrones climáticos, junto con la falta de infraestructura adecuada, impactan negativamente tanto en la productividad agrícola como en la calidad de vida de las comunidades locales. La implementación de modelos hidrológicos e hidráulicos precisos permitirá una comprensión más profunda de los patrones de flujo y las condiciones de drenaje dentro de la cuenca, lo que a su vez facilitará el diseño y la implementación de infraestructuras más eficientes y sostenibles.

En este contexto, el marco teórico del anteproyecto se fundamenta en la integración de principios y métodos de hidrología e hidráulica para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Pula. La modelación hidrológica e hidráulica, utilizando herramientas como HEC-RAS, ofrece un enfoque robusto para abordar los desafíos actuales y futuros, promoviendo una gestión del agua que sea sostenible y que aporte beneficios tanto a las comunidades locales como al entorno natural circundante.

Este marco teórico proporciona una explicación detallada de los conceptos fundamentales y su relevancia para el anteproyecto, estableciendo una base sólida para la investigación propuesta. La integración de estas técnicas permitirá no solo una gestión más eficiente del recurso hídrico,

sino también una mayor resiliencia ante los desafíos climáticos y ambientales que enfrenta la región.

### **3 CAPITULO III**

#### **3.1 Marco Metodológico**

##### **3.1.1 Enfoque De La Investigación**

La investigación se orientará principalmente hacia la recopilación y análisis cuantitativo de datos hidrológicos. Se recogerá información detallada para examinar a fondo las condiciones actuales del problema. Este enfoque permitirá identificar de manera precisa las soluciones más efectivas para resolver la situación estudiada.

##### **3.1.2 Modalidad De La Investigación**

El enfoque de investigación elegido es un modelo de proyecto factible, que se centra en una investigación minuciosa y un proceso de desarrollo basado en variables cruciales, particularmente en los aspectos hidrológicos e hidráulicos. Estas variables serán esenciales para entender las condiciones operativas de una estructura hidráulica, con el propósito de proponer soluciones que fomenten el desarrollo de las actividades agrícolas en la región.

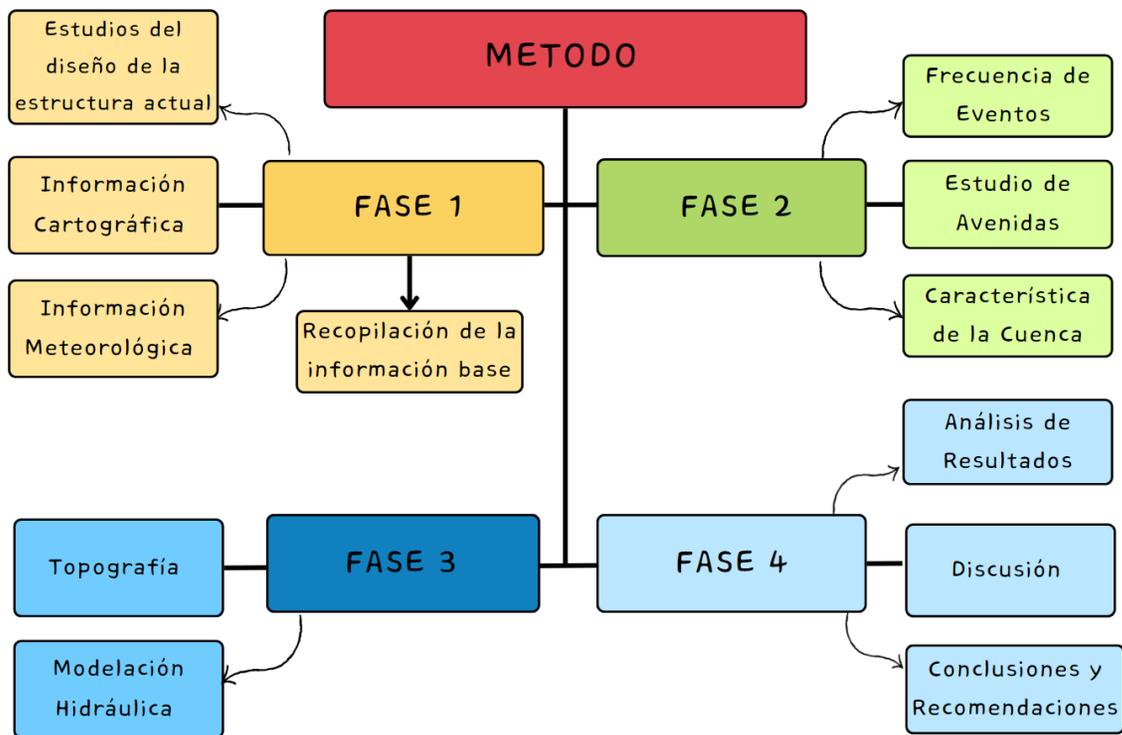
##### **3.1.3 Tipos De Investigación**

La investigación propuesta se adentra en el ámbito científico al centrarse en el análisis de variables físicas, en particular el proceso de conversión de la precipitación en flujo de agua en los cauces, conocido como lluvia y escorrentía. Este análisis se basa en datos pluviométricos y en la aplicación de una metodología desarrollada por (al, 1994) para crear un modelo que permita calcular los caudales en la sección de estudio.

El enfoque de la investigación se clasifica como descriptivo-correlacional. Es descriptivo porque pretende detallar las características de la estructura a implementar y su funcionamiento bajo las condiciones establecidas en el diseño. Simultáneamente, es correlacional ya que examina la relación entre el proceso de lluvia y escorrentía para determinar los niveles de agua.

### **3.2 Métodos**

La metodología propuesta en este trabajo se divide en cuatro fases para su desarrollo, como se detalla en el siguiente Ilustración 9. A continuación, se explican las acciones que engloba cada una de estas etapas:



*Ilustración 9 Esquema metodológico*

*Elaborado por: Cristian Ramirez*

### **3.2.1 Fase 1**

Durante esta fase, se realizará la búsqueda y recopilación de información esencial para el desarrollo del proyecto a partir del Instituto Geográfico Militar (IGM). Esto incluirá la obtención de datos cartográficos de la región donde se implementará el proyecto, con el objetivo de definir la cuenca de drenaje o área de aporte. Se buscará además información hidrometeorológica actualizada de estaciones cercanas, a través de fuentes oficiales como el INAMHI.

También se reunirá información bibliográfica relevante, que incluirá estudios previos sobre estructuras similares y trabajos de investigación relacionados con problemas análogos a los del proyecto. Se consultarán publicaciones científicas para profundizar en el tema y fortalecer el marco teórico del proyecto.

### **3.2.2 Fase 2**

En esta sección de la investigación, se examina la información relacionada con la hidrometría, en particular debido a la existencia de estaciones de medición de caudal en la región. Primero, se definirán las características de la cuenca de drenaje y se seleccionarán las estaciones hidrometeorológicas cuyas mediciones se utilizarán para el análisis.

Una vez obtenidos y evaluados estos datos, se procederá a estimar los caudales máximos en un período de 24 horas para distintos periodos de retorno. Esta estimación permitirá determinar los caudales necesarios para llevar a cabo las modelaciones.

### **3.2.3 Fase 3**

En esta etapa, es fundamental obtener las características detalladas del área de implementación para entender las condiciones actuales del cauce. También es esencial recopilar datos topográficos del estudio de la estructura existente. Si se observa que el cauce ha experimentado cambios significativos, se deberá realizar un nuevo análisis. No obstante, la información recopilada será útil para evaluar las condiciones actuales del cauce y su posible tendencia a cambiar.

Con estos datos, se podrá desarrollar un modelo que simule el comportamiento del flujo y determine los niveles para distintos periodos de retorno establecidos previamente. Esta modelación permitirá crear un modelo hidráulico que facilite la identificación de los niveles en el área de implementación, garantizando que la estructura pueda ofrecer el abastecimiento necesario para el sistema de riego.

#### **3.2.4 Fase 4**

En esta fase final del proyecto, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos de las modelaciones hidráulicas e hidrológicas realizadas previamente. Este análisis tiene como objetivo principal identificar y evaluar posibles problemas relacionados con los niveles de agua en la zona de estudio. La finalidad es optimizar el servicio proporcionado a los usuarios, teniendo en cuenta las condiciones y metas definidas en las etapas anteriores del proyecto.

Se procederá con una revisión minuciosa de los datos y resultados, para discutir en profundidad cómo estos afectan el rendimiento y la funcionalidad de las estructuras hidráulicas. La discusión incluirá la evaluación de cualquier discrepancia entre los resultados esperados y los observados, y se examinarán las implicaciones de estos hallazgos en la gestión del agua y el sistema de riego.

Además, se elaborarán conclusiones basadas en el análisis, y se desarrollarán recomendaciones específicas para abordar los problemas identificados. Estas recomendaciones estarán orientadas a mejorar el diseño y funcionamiento de las infraestructuras, así como a proponer medidas para futuras mejoras y ajustes necesarios. El objetivo es asegurar que el sistema

funcione de manera eficiente y cumpla con los objetivos establecidos, beneficiando tanto a los usuarios como a la gestión de los recursos hídricos en la región.

### **3.3 Metodología**

El enfoque del proyecto se basa en la aplicación de técnicas avanzadas de modelación hidrológica e hidráulica para analizar y gestionar los recursos hídricos en la cuenca del río Pula. Se utilizarán herramientas de software especializadas, como HEC-RAS, para simular los comportamientos hidrológicos e hidráulicos de la cuenca, con el objetivo de identificar áreas vulnerables, mejorar la eficiencia en el uso del agua y desarrollar estrategias efectivas para la mitigación de riesgos.

El proceso se organiza en varias etapas clave. En primer lugar, se recopilarán datos relevantes sobre la cuenca, incluyendo información topográfica y climática. A continuación, se configurarán y ejecutarán los modelos hidrológicos e hidráulicos utilizando el software HEC-RAS, permitiendo una simulación detallada de las condiciones del agua y su comportamiento en la cuenca. Finalmente, los resultados obtenidos serán analizados para identificar vulnerabilidades y desarrollar recomendaciones para la gestión y optimización de los recursos hídricos.

#### **3.3.1 Factor De Forma**

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Donde

- F es el factor de forma de Horton
- A es el área de la cuenca de drenaje
- L es la longitud de la cuenca de drenaje

### 3.3.2 Índice De Compacidad O Índice De Gravelious

$$K = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo de igual área}} = \frac{P}{P_o}$$

Donde:

- K es el índice de compacidad o de Gravelious
- P es el perímetro de la cuenca
- P<sub>o</sub> es el perímetro de un círculo de igual área.

$$K = \frac{P}{P_o} = \frac{P}{2 \pi r}$$

Si:

$$A = r^2 \pi \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Luego sustituyendo

$$K = \frac{P}{2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde

- K es el índice de compacidad o de Gravelious
- P es el perímetro de la cuenca en m.
- A es el área de la cuenca en m.

### 3.3.3 Pendiente Del Cauce

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i^{1/2}}} \right]^2$$

Donde:

- S es la pendiente media del cauce
- Li longitud del tramo i
- Si Pendiente del tramo i

### 3.3.4 Probabilidad

$$P(A) = \frac{NA}{NS}$$

Donde.

- P(A) es la probabilidad de ocurrencia de un evento
- NA resultados favorables
- NS resultados posibles

### 3.3.5 Probabilidad Empírica

$$P_m = P(X \geq x_m) = \frac{m}{n+1}$$

Donde:

- P es la probabilidad
- m es el número de orden
- n es el número de datos

### 3.3.6 Distribución De Gumbel

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[-\frac{x-\beta}{\alpha}\right]} e^{-e^{\left[\frac{x-\beta}{\alpha}\right]}}$$

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[\frac{x-\beta}{\alpha}\right]} e^{\left[\frac{x-\beta}{\alpha}\right]}$$

Donde:

- $x$  = Variable aleatoria
- $\alpha\beta$  = parámetro de la distribución de valores extremos Tipo I o doblemente exponencial.
- $-\alpha < x < \infty$
- $0 < \alpha < \infty$  = parámetro de escala
- $-\infty < \beta < \infty$  = parámetro de posición, llamado como moda.

### 3.3.7 Distribución Normal

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty$$

Donde:

- $F(x)$  = función densidad de probabilidad
- $X$  = variable aleatoria
- $\sigma$  = desviación estándar de la población
- $\mu$  = media de población

### 3.3.8 Ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- $Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )
- $n$  = Rugosidad ( $s/m^{1/3}$ )
- $A$  = Área ( $m^2$ )
- $R$  = Radio hidráulico = Área de la sección húmeda / Perímetro húmedo (m)

## 3.4 Recopilación de Datos

### 3.4.1 Datos Hidrológicos y Climáticos

La recopilación de datos hidrológicos y climáticos es fundamental para la modelación precisa de la cuenca del río Pula. Estos datos incluirán:

- Precipitación: Datos históricos de precipitación obtenidos de estaciones meteorológicas locales y bases de datos climáticas. Se considerarán datos diarios, mensuales y anuales para analizar las tendencias y variabilidad climática.
- Evapotranspiración: Información sobre la evapotranspiración potencial y real, obtenida mediante métodos indirectos o datos proporcionados por estaciones meteorológicas.
- Caudales: Datos de caudales medidos en diferentes puntos del río Pula y sus afluentes, proporcionando información sobre el comportamiento del flujo en la cuenca.

### **3.4.2 Datos Geográficos y de Uso del Suelo**

Los datos geográficos y de uso del suelo son fundamentales para la modelación hidrológica e hidráulica. Estos datos incluyen:

- Mapas topográficos: Proporcionan información detallada sobre la configuración del terreno en la cuenca, obtenida a partir de sistemas de información geográfica (SIG) y levantamientos topográficos precisos.
- Uso del suelo: Incluye mapas que detallan el uso actual del suelo y sus proyecciones futuras. Estos mapas abarcan áreas agrícolas, urbanas, forestales y cuerpos de agua, proporcionando una visión completa de cómo se utiliza y se transformará el suelo en la región.
- Cobertura vegetal: Información sobre la vegetación existente en la cuenca, que es crucial para calcular la evapotranspiración y la infiltración. Estos datos permiten

entender cómo la vegetación afecta el ciclo del agua y contribuye a la modelación hidrológica.

### **3.4.3 Datos de Infraestructuras Hidráulicas**

La recopilación de datos sobre las infraestructuras hidráulicas existentes es crucial para el análisis del comportamiento del agua en la cuenca. Estos datos incluirán:

- Canales y tuberías: Información sobre la ubicación, dimensiones y capacidad de los sistemas de conducción de agua.
- Embalses y presas: Datos sobre la capacidad de almacenamiento, niveles de agua y operación de las estructuras de almacenamiento.
- Obras de control de inundaciones: Información sobre diques, compuertas y otras infraestructuras diseñadas para mitigar el impacto de las inundaciones.

### **3.5 Modelación Hidráulica**

La modelación hidráulica se ocupa del análisis del flujo de agua a través de sistemas tanto naturales como artificiales, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del agua en movimiento. Un software ampliamente utilizado para esta tarea es HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. HEC-RAS facilita la simulación de flujos en uno o dos dimensiones, y ofrece herramientas para evaluar caudales, niveles de agua, velocidades de flujo y otros parámetros relevantes.

Esta técnica es fundamental para evaluar el impacto de eventos extremos como inundaciones y sequías, y para el diseño y optimización de infraestructuras hidráulicas. En el contexto de la cuenca del río Pula, la aplicación de HEC-RAS permitirá modelar diversos escenarios de flujo, identificar áreas propensas a inundaciones y sequías, y desarrollar estrategias para mitigar y adaptarse a los riesgos asociados con estos eventos climáticos extremos.

### 3.5.1 Configuración del Modelo Hidráulico HEC-RAS

El software HEC-RAS se utilizará para modelar el comportamiento hidráulico del río Pula y sus afluentes. Este proceso incluirá:

- Definición del sistema fluvial: Introducción de datos geográficos y topográficos en HEC-RAS para definir el sistema fluvial y sus características.
- Configuración de parámetros hidráulicos: Especificación de parámetros como rugosidad del cauce, condiciones de frontera y características de flujo.
- El programa está diseñado para el estudio de las curvas de remanso actuales y de las influencias de las obras de mejora de cauces mediante métodos estructurales.
- Las ecuaciones básicas citadas anteriormente son las siguientes:

$$\bullet \quad WS_2 + \frac{\varphi_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\varphi_1 V_1^2}{2g} + he$$

$$\bullet \quad he = LS_f + C \left( \frac{\varphi_2 V_2^2}{2g} - \frac{\varphi_1 V_1^2}{2g} \right)$$

Dónde:

- $WS_2, WS_1$  La elevación del agua en los extremos del tramo de cálculo.
- $V_2, V_1$  Las velocidades medias en los extremos del tramo de cálculo.

- $\Phi_2, \varphi_1$  Los coeficientes de la velocidad en los extremos del tramo.
- $g$  La aceleración de la gravedad.
- $h_e$  La pérdida de carga de energía.
- $L$  La longitud del tramo.
- $S_f$  La pendiente de fricción representativa del tramo.
- $C$  Coeficiente de pérdidas por expansión y contracción.
- El modelo HEC-RAS (Brunner et al., 2020) permite que para una misma sección se puedan especificar diferentes valores del coeficiente de rugosidad de Manning, pudiendo así diferenciar con mayor detalle entre el comportamiento del flujo en el cauce y fuera de él.
- En lo referente a la geometría de las secciones transversales, el programa permite definir las utilizando hasta 100 puntos, lo que confiere un gran nivel de detalle.
- El programa, puede generar secciones interpoladas si el cambio en la carga de velocidad excede un valor determinado por el usuario. Esta información se completa con la distancia entre perfiles medida sobre el fondo del cauce y sobre las zonas inundables laterales, con lo que se permite tener en cuenta, con las limitaciones propias asociadas a un modelo unidimensional, la existencia de tramos curvos de ríos.
- Los datos requeridos por el modelo se refieren a las características geométricas e hidráulicas del tramo del río sometido a estudio. Estos datos incluyen:

### **3.5.2 Simulación De Flujos Hidráulicos**

Se llevarán a cabo simulaciones de flujos hidráulicos utilizando HEC-RAS para examinar cómo se comporta el río bajo diversas condiciones. Estas simulaciones abarcarán:

- Flujo en condiciones permanentes y variables: Se analizarán tanto los escenarios de flujo estable como aquellos con fluctuaciones, teniendo en cuenta distintos caudales y niveles de precipitación.
- Impacto de las infraestructuras hidráulicas: Se evaluará cómo presas, canales y otras estructuras influyen en el comportamiento del flujo y en los niveles de agua.

### **3.5.3 Base Teórica Del Modelo**

A manera de explicación, se realizará el análisis estableciendo la existencia de tener un tramo de río, un flujo uniforme, que tiene las siguientes características principales:

- La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del tramo son constantes.
- La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos, es decir, sus pendientes son todas iguales  $S_f = S_w = S_o = S$ , donde  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía  $S_w$  es la pendiente del agua y  $S_o$  es la pendiente del fondo del canal.

Cuando el flujo ocurre en un canal natural (río), el agua encuentra resistencia a medida que fluye hacia aguas abajo. Esta resistencia por lo general es contrarrestada por las componentes de

las fuerzas gravitacionales que actúan sobre el cuerpo de agua en la dirección del movimiento, tal como se muestra en el esquema siguiente:

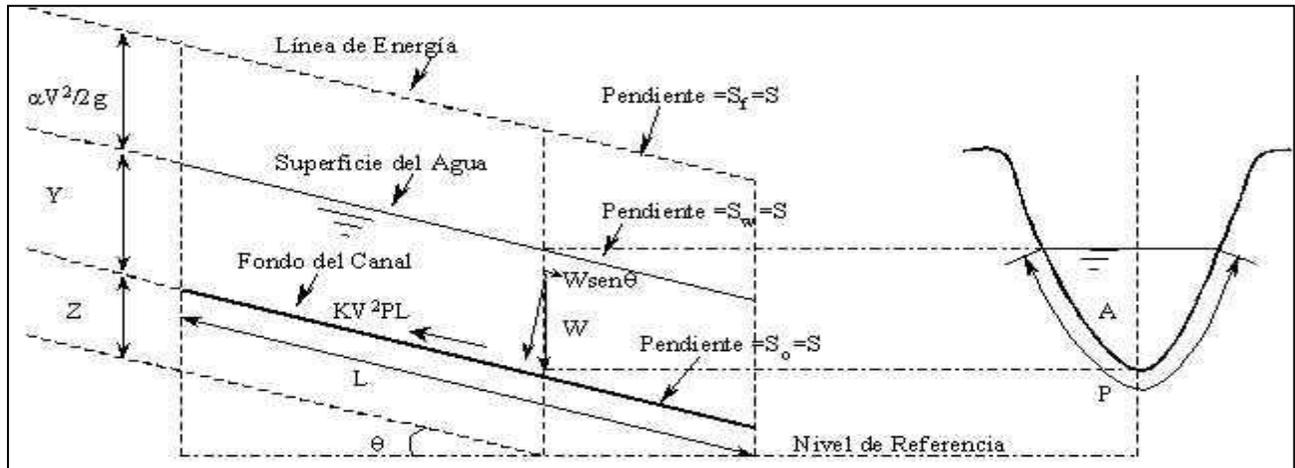


Ilustración 10 Esquema de cálculo de los perfiles Hec -Ras.

Un flujo uniforme se alcanzará si la resistencia se equilibra con las fuerzas gravitacionales. La profundidad del flujo uniforme se conoce como profundidad normal.

La mayor parte de las ecuaciones prácticas de flujo uniforme suelen expresarse en la forma:

$$V = C \times R^x \times S^y$$

Donde:

- R es el radio hidráulico
- V es la velocidad media
- S es la pendiente de la línea de energía
- X y Y son exponentes

- $C$  es un factor de resistencia al flujo, que varía con la velocidad media, el radio hidráulico, la rugosidad del canal, la viscosidad y muchos otros factores.

#### **3.5.4 Análisis de Resultados**

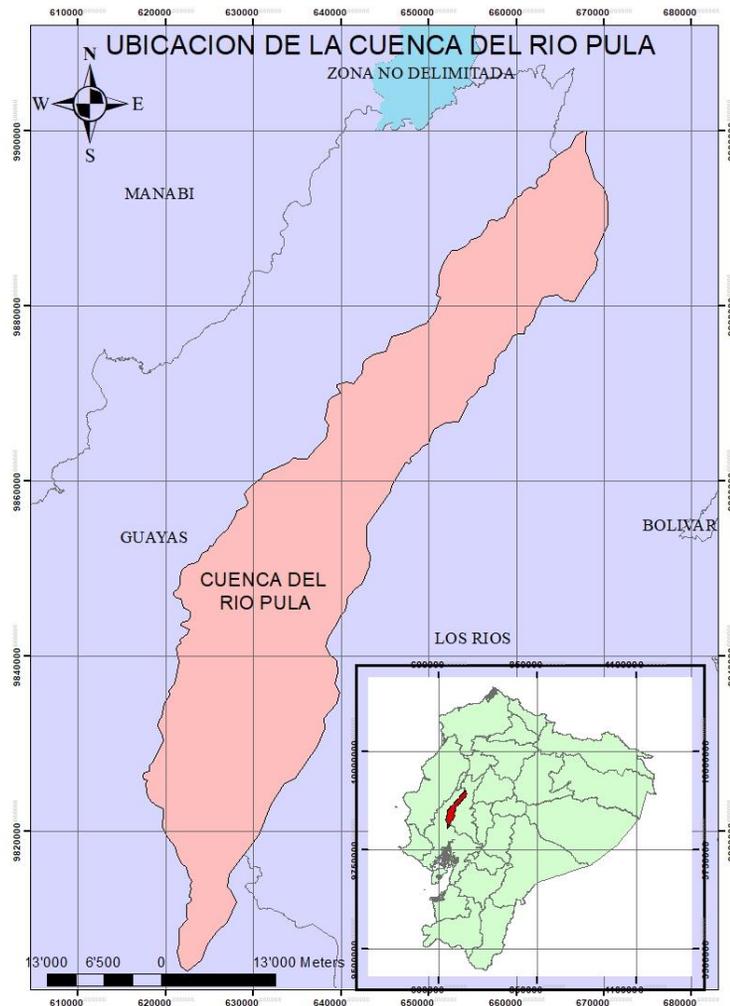
Los resultados de las simulaciones hidráulicas se analizarán para identificar áreas vulnerables a inundaciones y sequías, así como para evaluar la eficiencia de las infraestructuras hidráulicas existentes. Este análisis incluirá:

- Identificación de áreas de riesgo: Localización de zonas susceptibles a inundaciones y sequías, proporcionando información crucial para la planificación y gestión del riesgo.
- Evaluación de infraestructuras: Análisis del desempeño de las infraestructuras hidráulicas y recomendación de mejoras para optimizar su funcionamiento.

## 4 CAPITULO IV

### 4.1 Desarrollo

Para establecer el proyecto es necesario darle un área de intervención, en este caso se procede a la delimitación de la cuenca de drenaje, usando la documentación oficial en cuanto a mapas electrónicos en formato DWG.



*Ilustración 11 Cuenca hidrográfica del río Pula hasta el punto de interés*

*Fuente: elaboración propia*

#### 4.1 Factor De Forma

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

- F es el factor de forma de Horton
- A es el área de la cuenca de drenaje
- L es la longitud de la cuenca de drenaje

$$F = \frac{1270658213m^2}{(106282m)^2}$$

#### 4.2 Índice De Compacidad O Índice De Gravelious

$$k = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo de igual area}} = \frac{p}{Po}$$

Donde:

- K es el índice de compacidad o de Gravelious
- P es el perímetro de la cuenca
- Po es el perímetro de un círculo de igual área.

Si:

$$A = r^2 \pi \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Luego sustituyendo

$$K = \frac{P}{2\pi\sqrt{A\pi}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- K es el índice de compacidad o de Gravelious
- P es el perímetro de la cuenca en m.
- A es el área de la cuenca en m.

$$K = 0.28 \frac{252368}{\sqrt{1270658213}}$$

$$K = 1.982$$

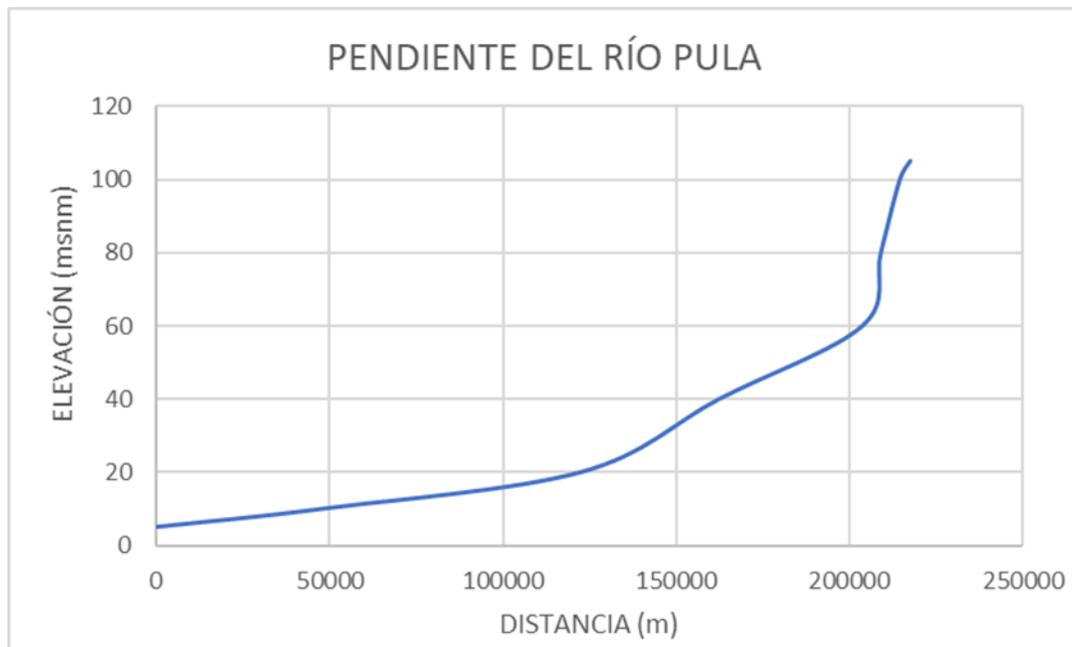
Tabla 1 (Cardona,2016)

| Clase de Forma | Índice de Compacidad | Forma de la Cuenca                   |
|----------------|----------------------|--------------------------------------|
| Clase I        | 1.0 a 1.25           | Casi redonda a oval - redondeada     |
| Clase II       | 1.26 a 1.50          | Oval - Redonda a oval oblonga        |
| Clase III      | 1.51 o más de 2      | Oval - oblonga rectangular - oblonga |

El valor obtenido sugiere que la cuenca pertenece a la clase III, lo que significa que tiene una forma rectangular u oblonga, de acuerdo con la descripción presentada en la tabla previamente mencionada.

### 4.3 Perfil Longitudinal Del Río Pula

Como menciona Villón (2004), este parámetro proporciona información sobre las pendientes presentes en el cauce, lo cual puede ser útil para mejorar el control de inundaciones, identificar ubicaciones adecuadas para instalar captaciones y otras estructuras en el río.



*Ilustración 12 Perfil longitudinal del Rio Pula*

*Elaborado por: Cristian Ramirez*

### 4.4 Pendiente De La Cuenca Del Rio Pula

La pendiente de un cauce es un parámetro de suma importancia si se desea realizar un proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico (Villón, 2004), para este caso se aplicará la metodología de Taylor y Schwarz.

Tabla 2 Cálculo de la pendiente del Río Pula

Elaborado por: Cristian Ramirez

| Elevación | Distancia | Desnivel | S      | 1/VS          |
|-----------|-----------|----------|--------|---------------|
| 5         | 0         |          |        |               |
| 10        | 48152     | 5        | 0.0001 | 98.13         |
| 20        | 74397     | 10       | 0.0001 | 86.25         |
| 40        | 39833     | 20       | 0.0005 | 44.63         |
| 60        | 41342     | 20       | 0.0005 | 45.47         |
| 80        | 5263      | 20       | 0.0038 | 16.22         |
| 100       | 5495      | 20       | 0.0036 | 16.58         |
| 105       | 3011      | 5        | 0.0017 | 24.54         |
|           |           |          |        |               |
|           |           |          |        | <b>331.82</b> |

$$S = \left[ \frac{n1}{\sqrt{s1 + 1\sqrt{s2} + 1\sqrt{s3} + \dots + 1\sqrt{sn}}} \right]$$

Donde:

- S es la pendiente media del cauce
- n es el número de tramos iguales, en los cuales se subdivide el perfil S1, S2, ... Sn

Pendiente de cada tramo según  $S \frac{H}{L}$

$$S = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{s1}} + \frac{1}{\sqrt{s2}} + \frac{1}{\sqrt{s3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{sn}}} \right]^2$$

$$S = \left[ \frac{7}{331.82} \right]^2$$

$$S = 0.00044$$

### Recopilación de la información básica

Dentro del ámbito hidrológico de este proyecto, el elemento fundamental para llevar a cabo la modelación hidráulica es la adquisición de los caudales de agua que fluyen hasta el punto de control. Esta información se recopila de fuentes oficiales, y en este escenario específico, se dispone de una estación cercana al punto de estudio, denominada estación Pula en Laurel, identificada con el código H0401.

*Tabla 3 Ubicación de la estación Pula en Laurel*

*Elaborado por: Cristian Ramirez*

| Estación              | Ubicación |            | Código |
|-----------------------|-----------|------------|--------|
|                       | Norte     | Este       |        |
| <b>Pula en Laurel</b> | 622011.27 | 9802943.22 | H0401  |

### 4.5 Estudio De Avenidas

Dado el enfoque del proyecto, el estudio hidráulico deberá incorporar dos componentes clave. Primero, se llevará a cabo un análisis de los datos promedio para realizar una evaluación de persistencia que permita prever, con un grado razonable de certeza, las condiciones de flujo en el río para su optimización. En segundo lugar, se utilizarán los datos de caudales máximos registrados para determinar los niveles extremos que el río puede alcanzar. Esta información es esencial para definir las cotas de instalación de las estructuras, los niveles necesarios para la succión y la altura adecuada de la tubería de succión.

#### **4.5.1 Información Básica Hidrometeorológica**

Para el análisis de avenidas, se utilizará la información de una estación de medición de caudales cercana, lo que permite inferir las descargas máximas de manera precisa. En este caso, se recurrirá a los datos proporcionados por la estación de caudales en Pula, ubicada en Laurel, que está prácticamente en el área de interés. Esta estación proporciona registros diarios de caudales durante 24 horas, con un período de observación confiable y suficientemente largo para realizar un análisis detallado.

#### **4.5.2 Escurrimiento**

Ya que en la cuenca se cuenta con estaciones hidrométricas en las que existen los datos de caudales máximos diarios y anuales, son estos datos que nos permitirá el cálculo de los escurrimientos para diferentes períodos de retorno.

#### **4.5.3 Cálculo De Caudales**

#### **4.5.4 Caudales Máximos Hasta El Sitio De Cierre De La Cuenca**

Tal como se hizo mención antes, el río Pula, y muy cerca del sitio de estudio, se encuentra una estación con datos suficientes para establecer los caudales máximos diarios para diferentes periodos de retorno, en la siguiente tabla se muestran los datos de los caudales máximos mensuales registrados que se tiene en la estación.

Tabla 4 Caudales máximos mensuales en la estación Pula en Laurel

| CAUDALES MÁXIMOS REGISTRADOS |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
|------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|
| ESTACION PULA EN LAUREL      |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           | H401      |       |
| AÑO                          | ENERO  | FEBRERO | MARZO  | ABRIL  | MAYO   | JUNIO  | JULIO  | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | ANUAL |
| 1971                         |        |         |        |        |        |        |        |        | 36.50      | 27.80   | 21.70     | 39.40     |       |
| 1972                         | 169.50 | 202.70  | 263.50 | 260.80 | 206.20 | 262.80 | 147.50 | 56.30  | 40.85      | 39.19   | 37.96     | 38.80     | 263.5 |
| 1973                         |        |         |        |        |        | 78.36  | 75.60  | 42.31  | 34.70      | 33.30   | 25.80     | 37.30     |       |
| 1974                         | 73.90  | 193.00  | 196.90 | 137.70 | 180.20 | 71.60  | 42.70  | 31.10  | 23.90      | 28.20   | 24.90     | 80.50     | 196.9 |
| 1975                         | 236.50 | 291.90  | 303.20 | 294.70 | 112.30 | 75.60  | 60.70  | 33.10  | 27.40      | 23.50   | 23.60     | 48.45     | 303.2 |
| 1976                         | 193.60 | 721.50  | 274.10 | 276.80 | 262.80 | 165.30 | 75.60  | 39.40  | 22.50      | 15.74   | 13.55     | 68.64     | 721.5 |
| 1977                         | 145.00 | 225.90  | 288.50 | 286.40 | 229.00 | 78.60  | 48.00  | 26.40  | 23.00      | 19.30   | 12.50     | 25.80     | 288.5 |
| 1978                         | 90.95  | 193.60  | 246.60 | 282.90 | 156.50 | 79.80  | 37.50  | 24.10  | 16.10      | 15.20   | 12.50     | 25.80     | 282.9 |
| 1979                         | 83.80  | 154.50  | 260.20 | 183.00 | 130.20 | 58.90  | 45.90  | 22.60  | 19.53      | 19.50   | 17.00     | 15.10     | 260.2 |
| 1980                         | 67.40  | 192.10  | 158.40 | 250.80 | 190.40 | 112.80 | 43.80  | 25.30  | 18.30      | 17.10   | 17.90     | 23.70     | 250.8 |
| 1981                         | 47.90  | 243.50  | 247.00 | 218.60 | 144.90 | 41.35  | 26.80  | 19.96  | 18.10      | 14.10   | 16.90     | 29.10     | 247.0 |
| 1982                         | 143.30 | 219.10  | 150.80 | 171.20 | 136.40 | 100.80 | 130.70 | 21.00  | 15.00      | 77.80   | 224.60    | 256.10    | 256.1 |
| 1983                         | 282.07 | 285.60  |        |        |        |        |        |        |            |         | 42.60     | 85.30     |       |
| 1984                         | 155.90 |         |        |        |        | 60.30  | 47.10  | 27.00  | 18.60      | 19.30   | 27.57     | 73.25     |       |
| 1985                         | 99.70  | 128.80  | 204.50 |        |        | 43.51  | 22.80  | 11.40  | 6.80       | 4.30    | 2.40      | 50.20     |       |
| 1986                         | 249.30 | 234.90  |        | 208.00 | 196.10 |        | 19.60  | 10.50  | 6.60       | 7.30    | 10.26     | 44.60     | 249.3 |
| 1987                         | 225.50 | 238.70  | 242.50 | 252.20 | 236.30 |        |        |        |            |         |           |           | 252.2 |
| 1988                         |        | 191.20  | 205.80 |        |        |        |        |        | 15.97      | 14.39   | 21.17     | 25.87     |       |
| 1989                         | 207.20 | 272.50  | 26.30  | 227.40 | 208.10 | 59.20  | 43.10  | 26.20  | 14.70      | 32.2    | 19.60     | 37.50     | 272.5 |
| 1990                         | 66.90  | 234.60  | 220.60 | 243.30 | 209.70 | 66.10  | 41.90  | 29.40  | 20.90      | 18.60   | 17.90     | 32.40     | 243.3 |
| 1991                         | 63.56  | 297.70  | 295.10 | 162.60 | 163.10 | 80.60  | 38.90  | 27.20  | 20.00      | 17.00   | 14.70     | 51.40     | 297.7 |
| 1992                         | 166.30 | 297.00  | 344.00 | 331.40 | 317.00 | 277.80 | 71.80  | 38.95  | 27.50      | 21.30   | 18.04     | 29.30     | 344.0 |
| 1993                         |        |         | 330.00 | 325.20 | 272.80 | 99.40  |        |        |            |         |           |           |       |
| 1994                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 1995                         | 234.05 | 282.90  | 212.90 | 283.50 |        | 86.10  | 52.40  | 39.10  | 25.20      | 21.75   | 25.21     | 25.20     | 283.5 |
| 1996                         | 90.40  | 283.50  | 343.30 | 274.10 | 177.90 | 55.90  | 30.90  | 22.50  | 16.70      | 14.95   | 15.70     | 27.20     | 343.3 |
| 1997                         | 34.20  | 258.10  | 252.70 |        |        |        |        |        | 272.80     | 291.80  | 378.20    | 370.80    |       |
| 1998                         | 359.10 | 366.40  | 366.40 | 364.90 | 363.50 |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 1999                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2000                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2001                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2002                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2003                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2004                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
| 2005                         |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |       |
|                              | 151.6  | 261.3   | 247.0  | 251.8  | 204.9  | 97.7   | 55.2   | 28.7   | 32.2       | 34.5    | 43.4      | 64.2      |       |

#### 4.5.5 Caudales Máximos En 24 Horas.

Dependiendo del tipo de estructura que se vaya a diseñar existen distintos datos que serán necesarios para la construcción de nuestro modelo, para el diseño se necesitan los datos de los registros máximos (Bolinaga, 1999), en la tabla que se muestra a continuación se presentan los caudales máximos anuales registrados en la estación, según los registros diarios obtenidos.

Tabla 5 Caudales máximos diarios en la estación Pula en Laurel

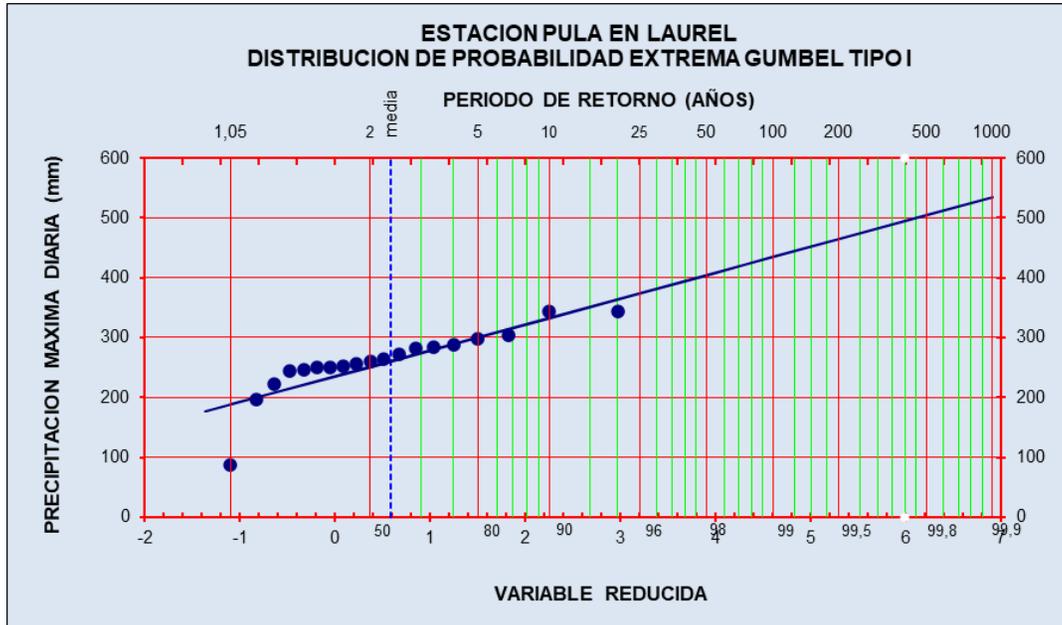
Fuente: INAMHI

| <b>ESTACION PULA EN LAUREL</b>     |              |            |              |
|------------------------------------|--------------|------------|--------------|
| <b>CAUDAL MAXIMO DIARIO (m³/s)</b> |              |            |              |
| <b>AÑO</b>                         | <b>P(mm)</b> | <b>AÑO</b> | <b>P(mm)</b> |
| 1971                               |              | 1989       | 272.5        |
| 1972                               | 263.5        | 1990       | 243.3        |
| 1973                               |              | 1991       | 297.7        |
| 1974                               | 196.9        | 1992       | 344          |
| 1975                               | 303.2        | 1993       |              |
| 1976                               | 721.5        | 1994       |              |
| 1977                               | 288.5        | 1995       | 283.5        |
| 1978                               | 282.9        | 1996       | 343.3        |
| 1979                               | 260.2        | 1997       |              |
| 1980                               | 250.8        | 1998       |              |
| 1981                               | 247          | 1999       | 86.6         |
| 1982                               | 256.1        | 2000       |              |
| 1983                               |              | 2001       |              |
| 1984                               |              | 2002       |              |
| 1985                               |              | 2003       |              |
| 1986                               | 249.3        | 2004       |              |
| 1987                               | 252.2        | 2005       |              |
| 1988                               |              | 2006       |              |

#### 4.5.6 Distribución Teórica.

La distribución teórica permite al hidrólogo predecir la probabilidad, también permite determinar la magnitud de un fenómeno para un determinado periodo de retorno (Villón, 2013).

A partir de estos datos registrados se realiza la distribución teórica de Gumbel tipo I, tal como se puede apreciar en la siguiente figura.



*Ilustración 13 Probabilidad Gumbel tipo I estación Pula en Laurel*

*Elaborado por: Cristian Ramirez*

#### **4.5.7 Análisis De Los Resultados Hidrológicos**

Como se explica anteriormente, a partir de los resultados de la distribución de probabilidad de valores máximos, Gumbel tipo I, se obtienen los valores de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno para la estación Pula en Laurel.

*Tabla 6 Caudales máximos para diferentes periodos de retorno, Río Pula en Laurel*

*Elaborado por: Cristian Ramirez*

| <b>Período de retorno<br/>(años)</b> | <b>Caudal en Pula<br/>en Laurel<br/>(m<sup>3</sup>/s)</b> |
|--------------------------------------|---|
| <b>2</b>                             | 266.64  |
| <b>5</b>                             | 298.91  |
| <b>10</b>                            | 320.27  |
| <b>25</b>                            | 347.26  |
| <b>50</b>                            | 367.29  |
| <b>100</b>                           | 387.16  |

## **4.6 Estudio Hidráulico**

El río Pula pertenece a la demarcación hidrológica del río Vinces, que es una de las cuencas principales del sistema del Río Guayas.

### **4.7 Perfiles De La Superficie Del Agua En La Ubicación De La Estructura.**

A partir de la topografía proporcionada por el equipo topográfico del proyecto se definirán las secciones transversales del río Pula, con la idea de poder visualizar cómo se comporta el cauce con las avenidas de diferentes periodos de retorno.

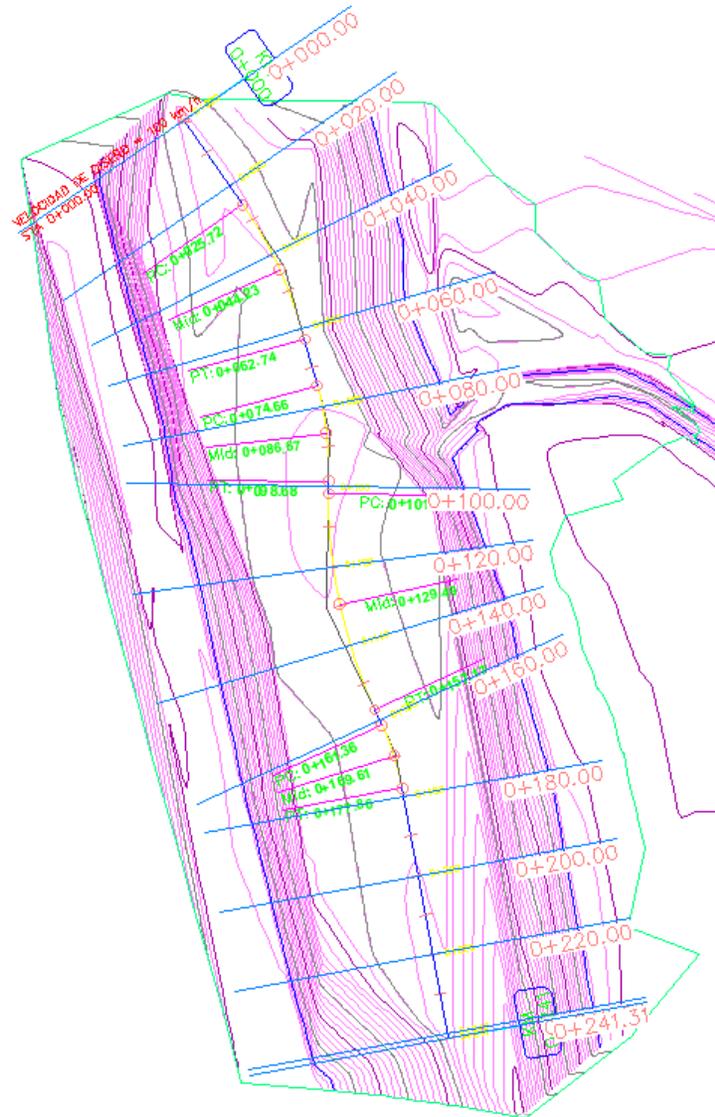
Se elabora una curva de descarga sintética que sirve como condición de borde de la aplicación del modelo a usar a efectos de determinar la superficie del agua para diferentes condiciones de descarga en el río.

#### **4.7.1 Definición Del Modelo**

Será necesario, de manera preliminar, definir el tipo de modelo a ser usado para simular el funcionamiento hidráulico de la sección en consideración, y se creyó conveniente utilizar un modelo de flujo permanente.

#### **4.7.2 Datos Geométricos**

Para la creación del modelo es necesario contar con las secciones transversales de nuestro cauce, para ello se contó con la topografía proporcionada por el equipo consultor, de donde con el uso de las curvas de nivel como se muestra en la siguiente imagen.



*Ilustración 14 Topografía del cauce*

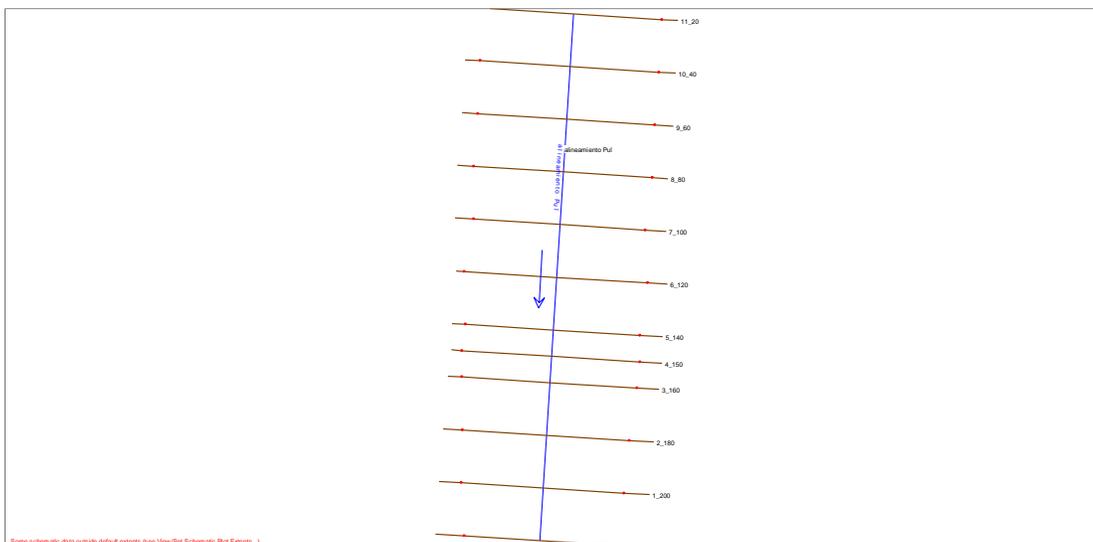
Se definen por puntos, desde la margen izquierda hacia la margen derecha (vista desde aguas arriba, de izquierda a derecha). La sección se tomará perpendicularmente al cauce.

La geometría del tramo se definió a partir de la topografía realizada a pie, cuya información correspondiente, que fue proporcionada por el equipo de topografía y de la que no se va a hablar en el presente informe.

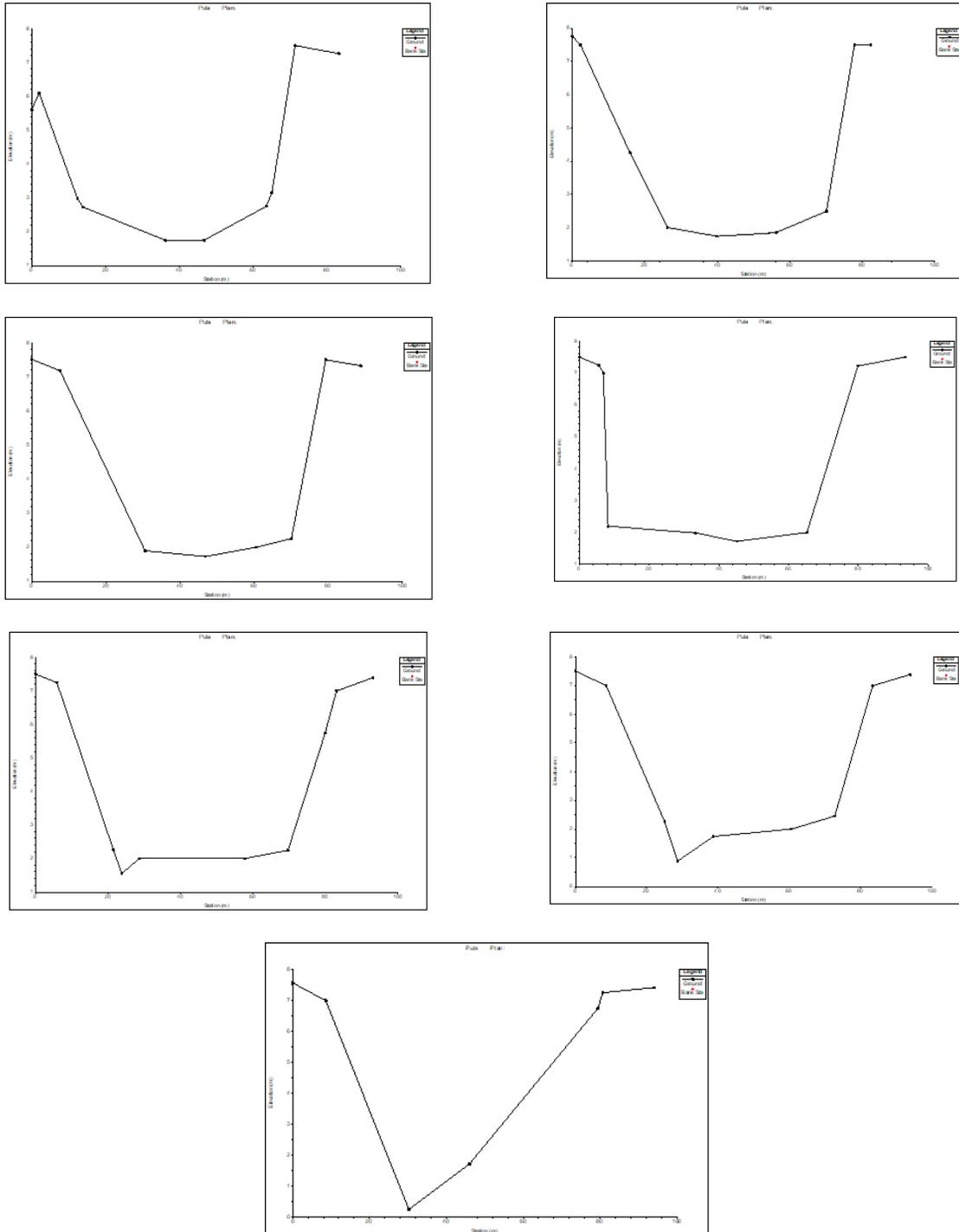
### 4.7.3 Sección Transversal

Con esta información se establecen las secciones que se tiene en el río, y son las que se ubican en el HEC – RAS, el tramo es relativamente corto, y se obtuvieron las siguientes secciones.

Una vez que se obtiene las secciones en el ras, se debe realizar unas ediciones en la topografía



*Ilustración 15 Vista en planta del río Pula en la parte de la estación de bombeo en la JRD Pula-Junquilla*

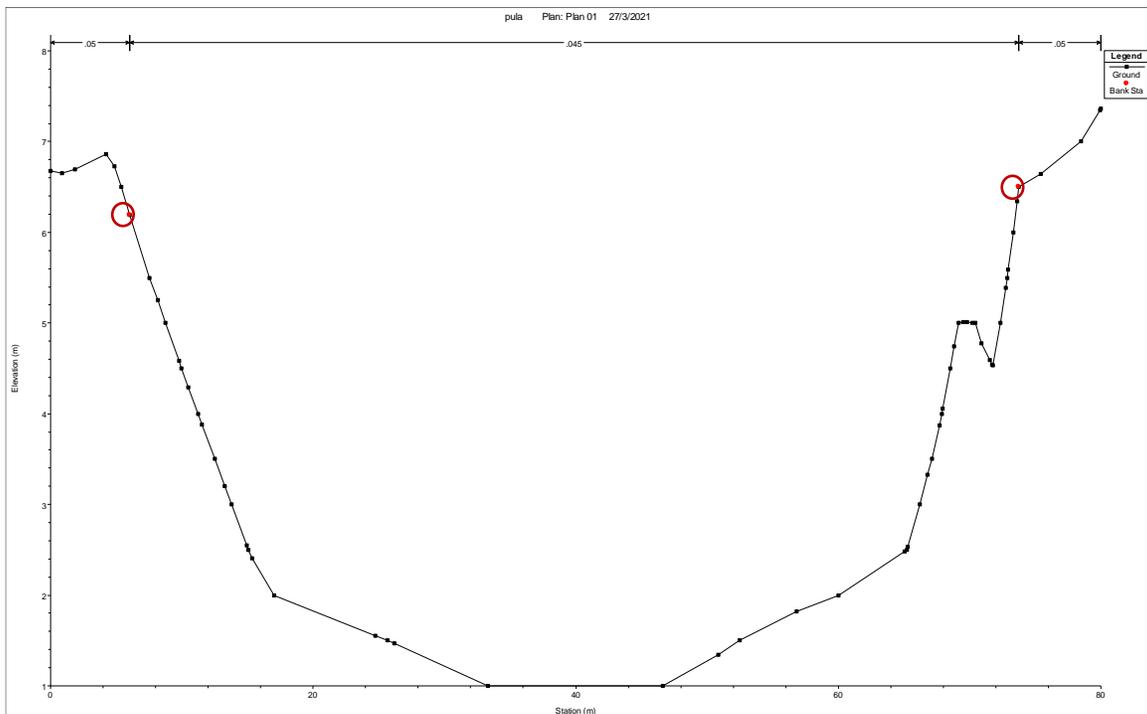


*Ilustración 16 Secciones tipo del río Pula en la zona de intervención*

*Fuente: HEC-RAS*

#### 4.7.4 Coeficiente De Rugosidad

En las secciones se deben completar datos como lo es identificar las márgenes de las secciones y el coeficiente de rugosidad de Manning para las secciones, especificando en este caso uno para la sección central y otro para las márgenes derecha e izquierda.



*Ilustración 17 Sección tipo, ubicación de las márgenes (punto rojo)*

Existen diferentes autores que recomiendan diversas variedades de valores estimativos para el coeficiente de Manning en una sección natural, sin embargo, es difícil establecer una para un cauce natural cuya sección va a ser desazolvada, como se explica es mucha la cantidad de literatura que dice cual usar, para este caso se aplicará la recomendación del libro de estructuras hidráulicas de Bolinaga (Bolinaga, 1999), las que se muestran a continuación:

Tabla 7 Coeficiente de Manning para diferentes materiales.

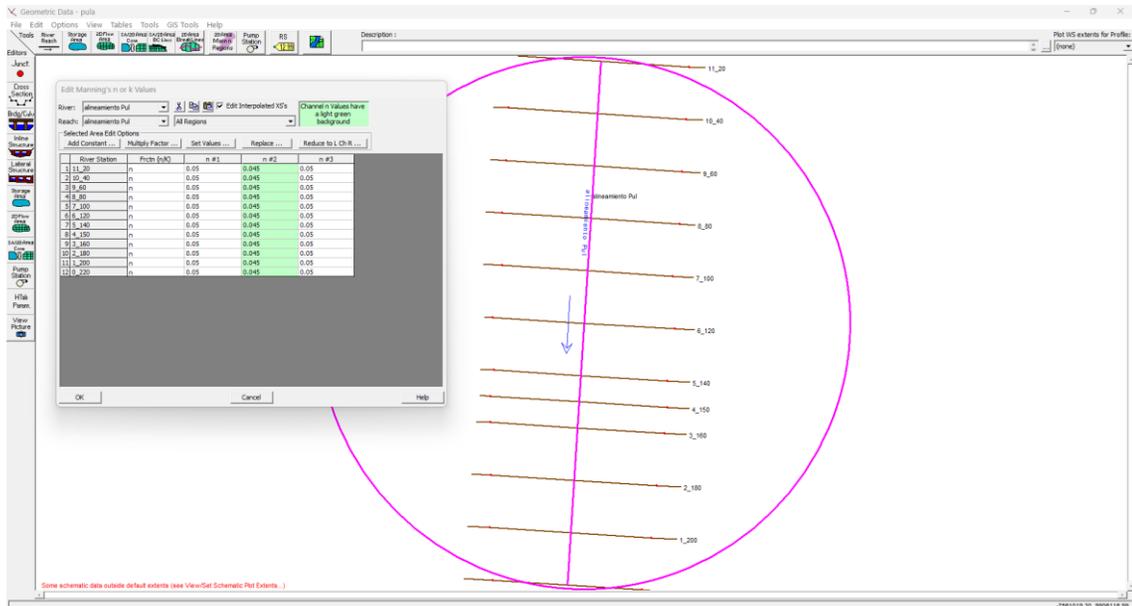
Fuente: (Bolinaga, 1999)

| Superficie   | Condiciones de las paredes |        |          |        |
|--|----------------------------|--------|----------|--------|
|  | Perfectas                  | Buenas | Medianas | Malas  |
| Tubería de hierro forjado negro comercial            | 0,012                      | 0,013  | 0,014    | 0,015  |
| Tubería de hierro forjado galvanizado                | 0,013                      | 0,014  | 0,015    | 0,017  |
| Tubería de latón o vidrio                            | 0,009                      | 0,01   | 0,011    | 0,013  |
| Tubería de acero remanchado en espiral               | 0,013                      | 0,015* | 0,017*   |        |
| Tubería de barro vitrificado                         | 0,01                       | 0,013* | 0,015    | 0,017  |
| Tubos comunes de barro para drenaje                  | 0,011                      | 0,012* | 0,014*   | 0,017  |
| Tabique vidriado                                     | 0,011                      | 0,012  | 0,013    | 0,015  |
| Tabique con mortero de cemento; albañales de tabique | 0,012                      | 0,013  | 0,015*   | 0,017  |
| Superficie de cemento pulido                         | 0,01                       | 0,011  | 0,012    | 0,013  |
| Superficies aplanadas con mortero de cemento         | 0,011                      | 0,012  | 0,013*   | 0,015  |
| Tuberías de concreto                                 | 0,012                      | 0,013  | 0,015*   | 0,016  |
| Tuberías de duela                                    | 0,01                       | 0,011  | 0,012    | 0,013  |
| <b>Acueductos de Tablón:</b>                         |                            |        |          |        |
| Labrado  | 0,01                       | 0,012* | 0,013    | 0,014  |
| Sin labrar   | 0,011                      | 0,013* | 0,014    | 0,015  |
| Con astillas   | 0,012                      | 0,015* | 0,016    |        |
| Canales revestidos con concreto                      | 0,012                      | 0,014* | 0,016*   | 0,018  |
| Superficie de mampostería con cemento                | 0,017                      | 0,02   | 0,025    | 0,03   |
| Superficie de mampostería en seco                    | 0,025                      | 0,03   | 0,033    | 0,035  |
| Acueductos semicirculares metálicos, lisos           | 0,011                      | 0,012  | 0,013    | 0,015  |
| Acueductos semicirculares metálicos, corrugado       | 0,0225                     | 0,025  | 0,0257   | 0,03   |
| <b>Canales y zanjas:</b>                             |                            |        |          |        |
| En tierra, alineados y uniformes                     | 0,017                      | 0,02   | 0,0225   | 0,025* |
| En roca lisos y uniformes                            | 0,025                      | 0,03   | 0,033*   | 0,035  |
| En roca, con salientes y sinuosos                    | 0,035                      | 0,04   | 0,045    |        |
| Sinuosos y de escurrimiento lento                    | 0,0225                     | 0,025  | 0,0275   | 0,03   |

| Superficie  | Condiciones de las paredes |         |          |       |
|---|----------------------------|---------|----------|-------|
|   | Perfectas                  | Buenas  | Medianas | Malas |
| Desgradados en tierra   | 0,025                      | 0,0275* | 0,03     | 0,033 |
| Con lecho pedregosos y bordos de tierra                                       | 0,025                      | 0,03    | 0,035*   | 0,04  |
| <b>Con hierba</b>   |                            |         |          |       |
| Plantilla de tierra, taludes ásperos  | 0,028                      | 0,03*   | 0,033*   | 0,035 |
| <b>Corrientes naturales</b>   |                            |         |          |       |
| (1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin herraduras no charcos profundos       | 0,025                      | 0,0275  | 0,03     | 0,033 |
| (2) Igual (1) pero con algo de hierba y piedra                                | 0,03                       | 0,033   | 0,035    | 0,04  |
| (3) Sinuoso, algunos charcos y escolio, limpio                                | 0,033                      | 0,035   | 0,04     | 0,045 |
| (4) Igual al (3), de poco tirante, con pendiente y secciones menos eficientes | 0,04                       | 0,045   | 0,05     | 0,055 |
| (5) Igual al (3) algo de hierba y piedras                                     | 0,035                      | 0,04    | 0,045    | 0,05  |
| (6) Igual al (4), secciones pedregosas  | 0,045                      | 0,05    | 0,055    | 0,06  |
| (7) Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos          | 0,5                        | 0,06    | 0,07     | 0,08  |
| 8) Playas muy enyerbadas  | 0,075                      | 0,1     | 0,125    | 0,15  |
| <b>*Valores de uso común en proyectos</b>                                     |                            |         |          |       |

El coeficiente de rugosidad empleado fue de:  $n = 0.045$ , para toda la parte principal del cauce, y para las márgenes se usará  $0.05$ , puesto que el río es relativamente recto en la zona que se está analizando.

Y se le da al programa el coeficiente de rugosidad de Manning para las secciones.



*Ilustración 18 Coeficiente de Rugosidad de Manning para las secciones del cauce*

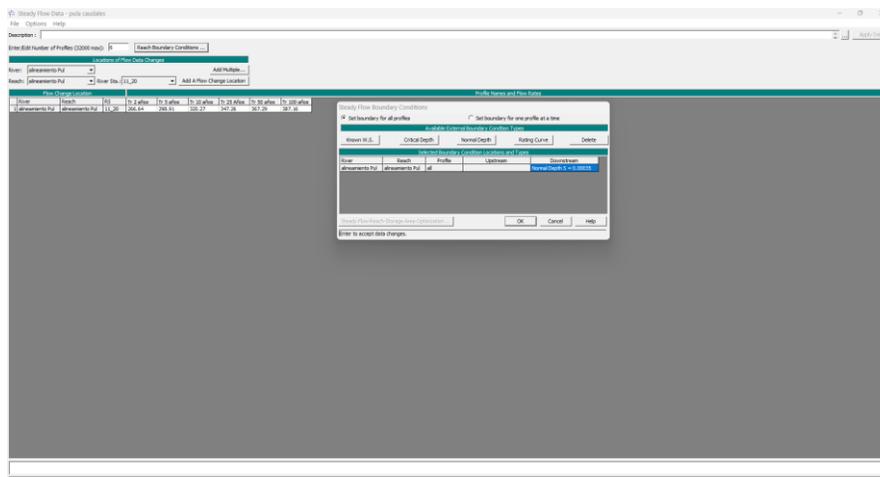
## 4.8 Modelación Hidráulica

Se realizarán dos modelos, uno en el que se analizará las secciones en condición natural, y otra con una condición en la que se realiza un trabajo de reconfiguración de muros.

### 4.8.1 Simulación Hidráulica

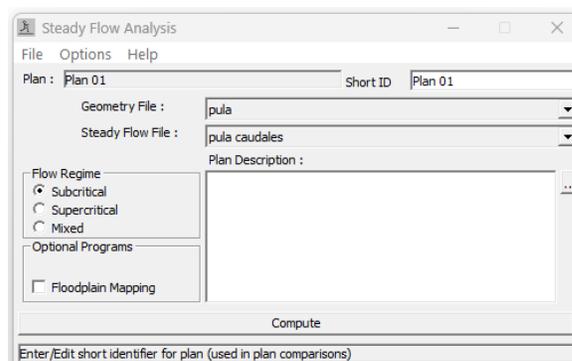
Una vez que se han obtenido las secciones naturales del cauce y usando el software libre del Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos (USACE, 2016) se obtuvieron las características del flujo en el río Pula, vale la pena hacer mención que se usa la opción de interpolar secciones intermedias para de esa forma mejorar el proceso de cálculo del programa.

Se plantean las condiciones de borde, y se establecen los caudales que se obtuvieron en el análisis estadístico que se realizó con los datos que se registraron en la estación, y como condición de borde se usa la pendiente longitudinal del cauce, en este caso el que se calculó al inicio de este capítulo.



*Ilustración 19 Ubicación de los caudales para la modelación y condición de borde.*

Ya con los datos de los caudales y de la topografía se puede continuar con el establecimiento de que perfil se va a realizar la modelación.



*Ilustración 20 Steady Flow Analysis modelación río Pula*

## **4.9 Resultados De La Simulación**

En los resultados de la simulación se va a dividir en 2 partes, primero el análisis con los datos máximos, y la segunda parte con el caudal de persistencia.

### **4.9.1 Niveles Máximos**

Tal como se ha mencionado con antelación esta modelación es realizada con los datos de los caudales máximos, que fueron obtenidos en la sección Como resultado de esta simulación, se obtuvieron los perfiles hidráulicos para caudales correspondientes a los diferentes periodos de retorno previamente establecidos, los mismos que se presentan en las imágenes que se muestran a continuación.

El perfil hidráulico para diferentes frecuencias fue de mucha utilidad para poder definir las características hidráulicas que prevalecen en el cauce natural y más aún en el propuesto, que es el que se muestra, con la finalidad de evaluar si las condiciones de proyecto satisfacen las condiciones.

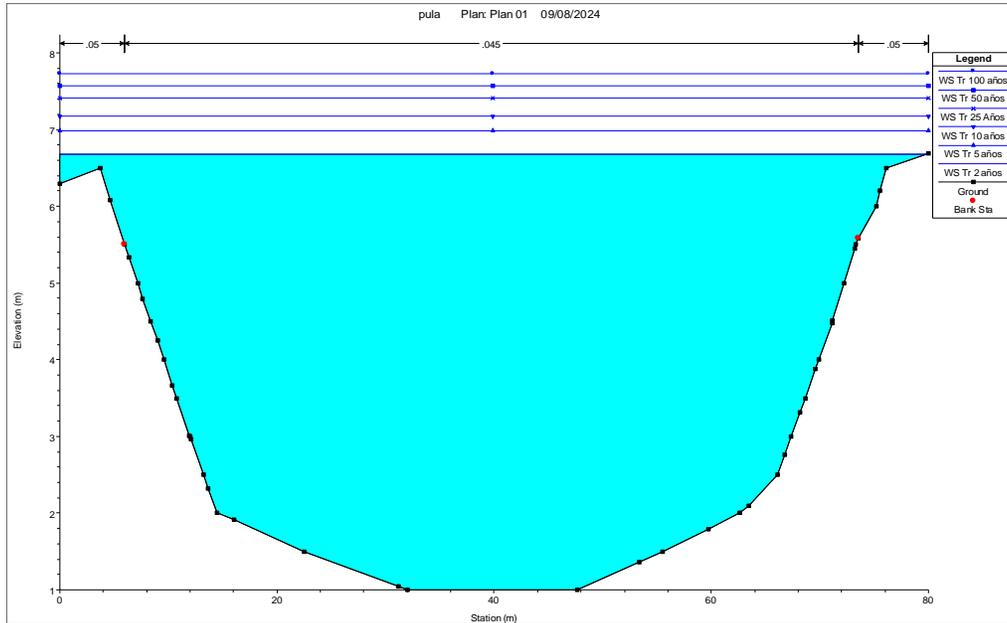


Ilustración 21 Sección en la abscisa 0

Fuente: HEC-RAS

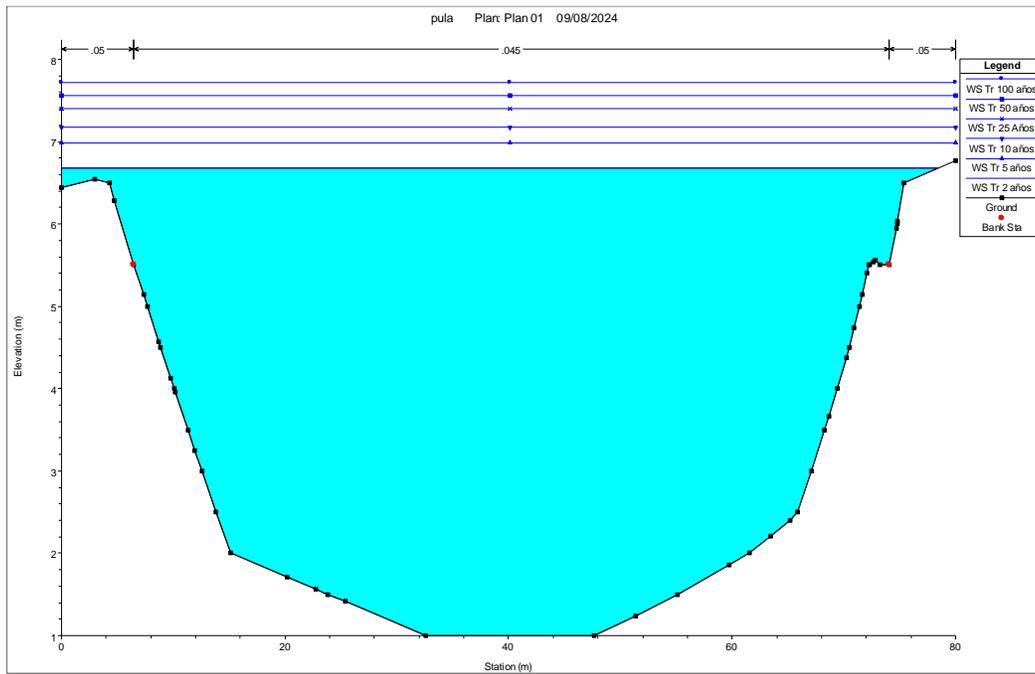


Ilustración 22 Sección en la abscisa 1

Fuente: HEC-RAS

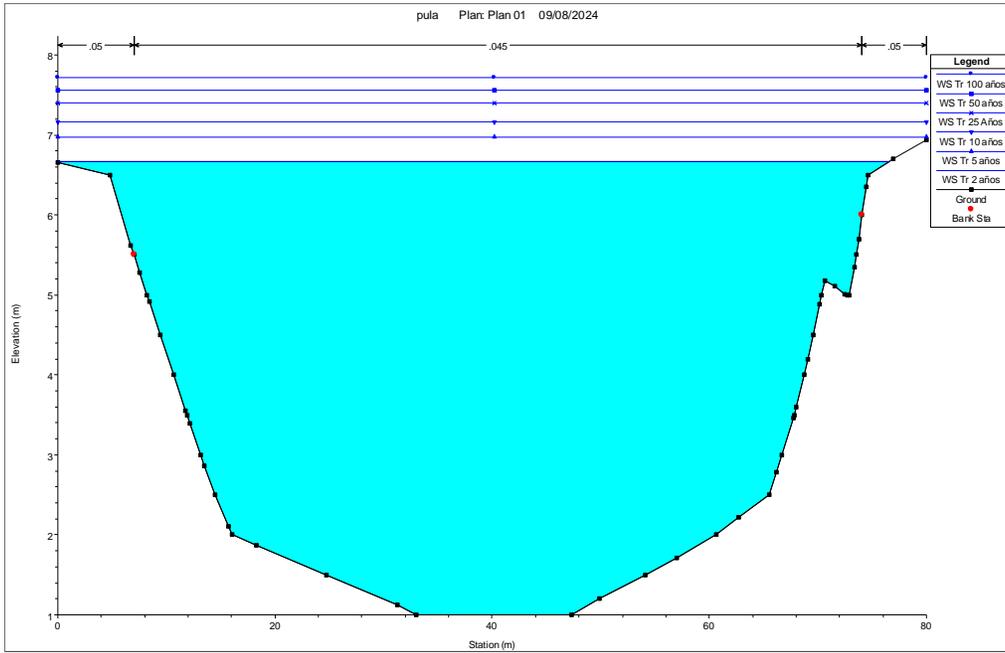


Ilustración 23 Sección en la abscisa 3

Fuente: HEC-RAS

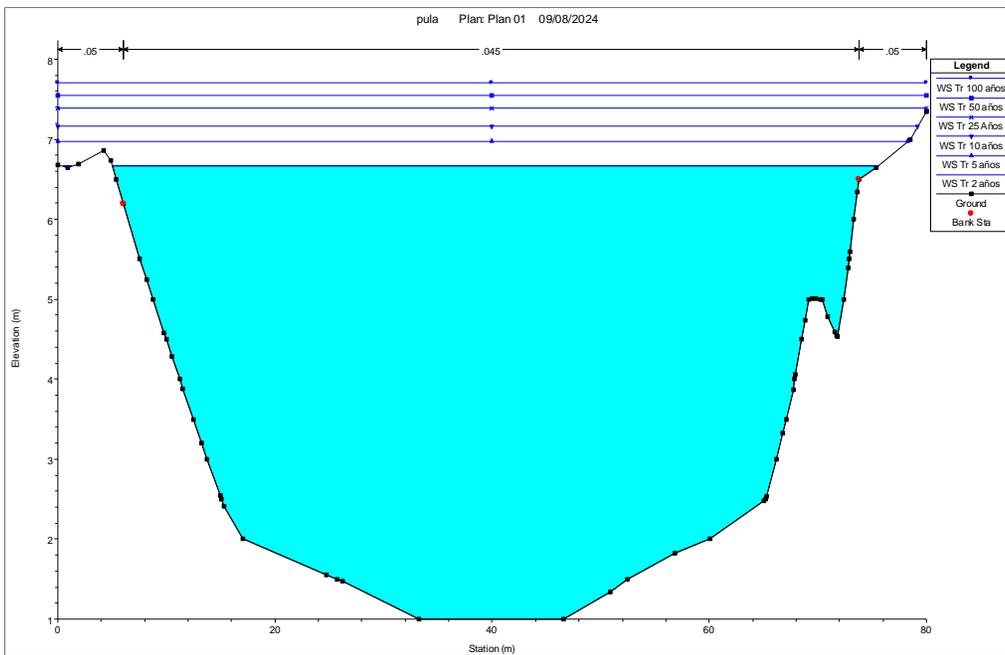


Ilustración 24 Sección en la abscisa 4

Fuente: HEC-RAS

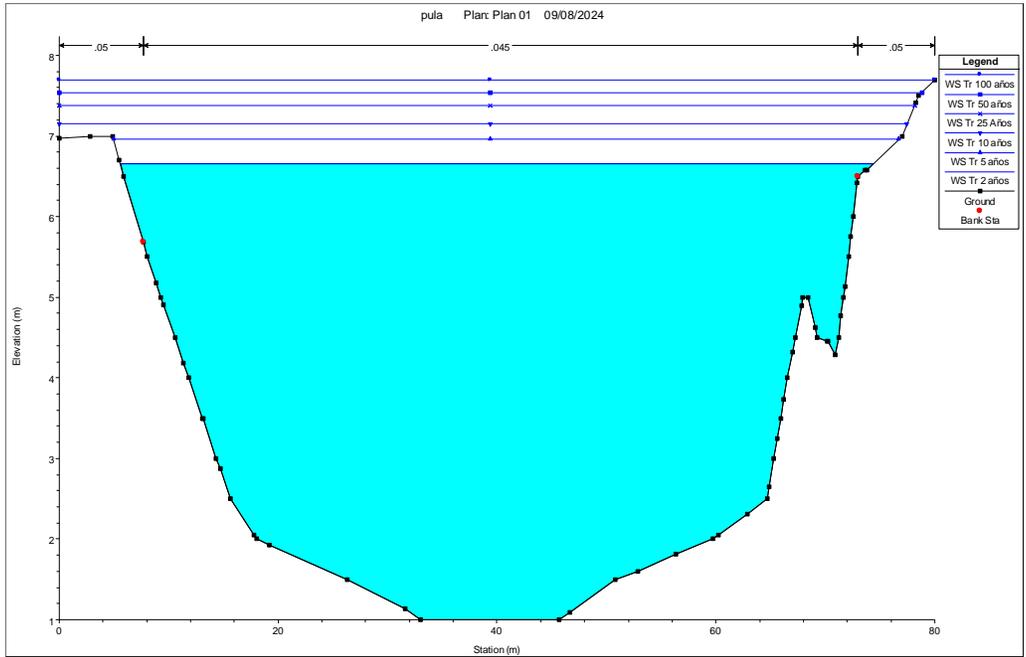


Ilustración 25 Sección en la abscisa 5

Fuente: HEC-RAS

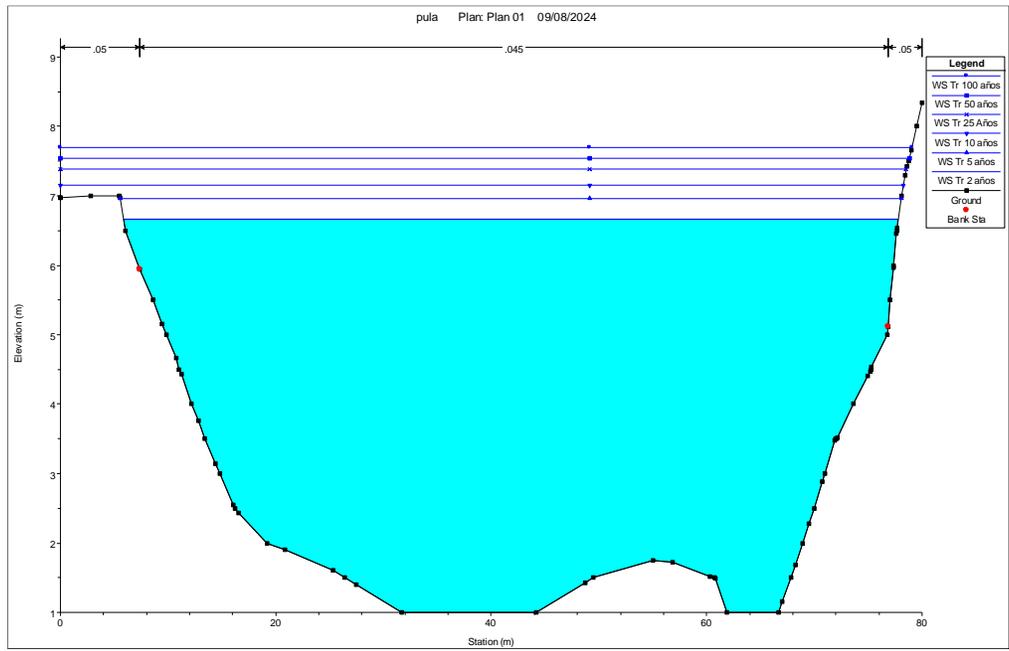


Ilustración 26 Sección en la abscisa 6

Fuente: HEC-RAS

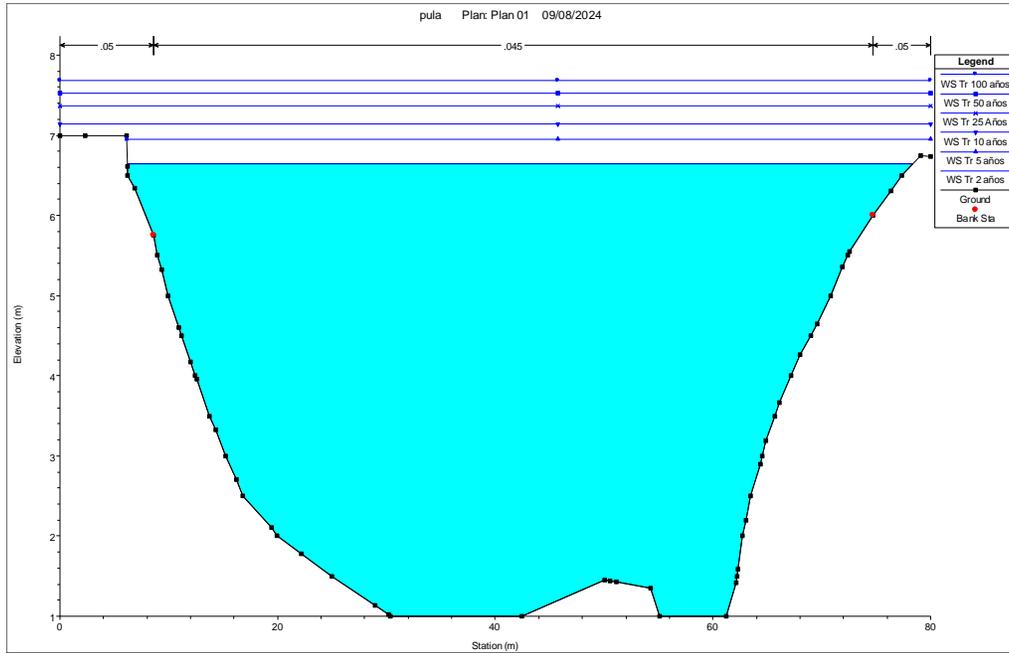


Ilustración 27 Sección en la abscisa 7

Fuente: HEC-RAS

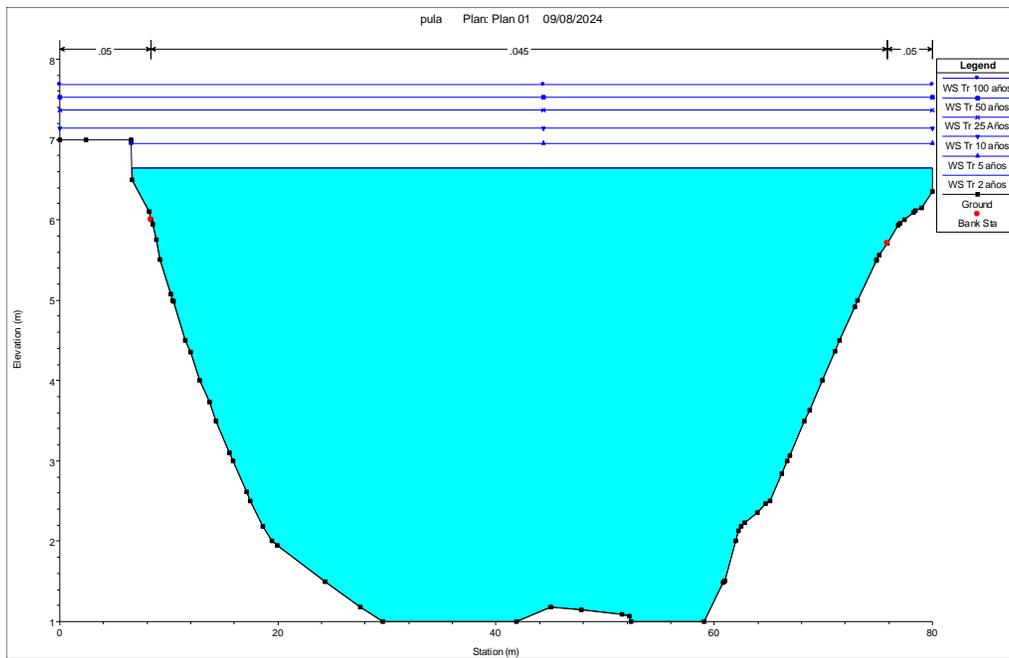


Ilustración 28 Sección en la abscisa 8

Fuente: HEC-RAS

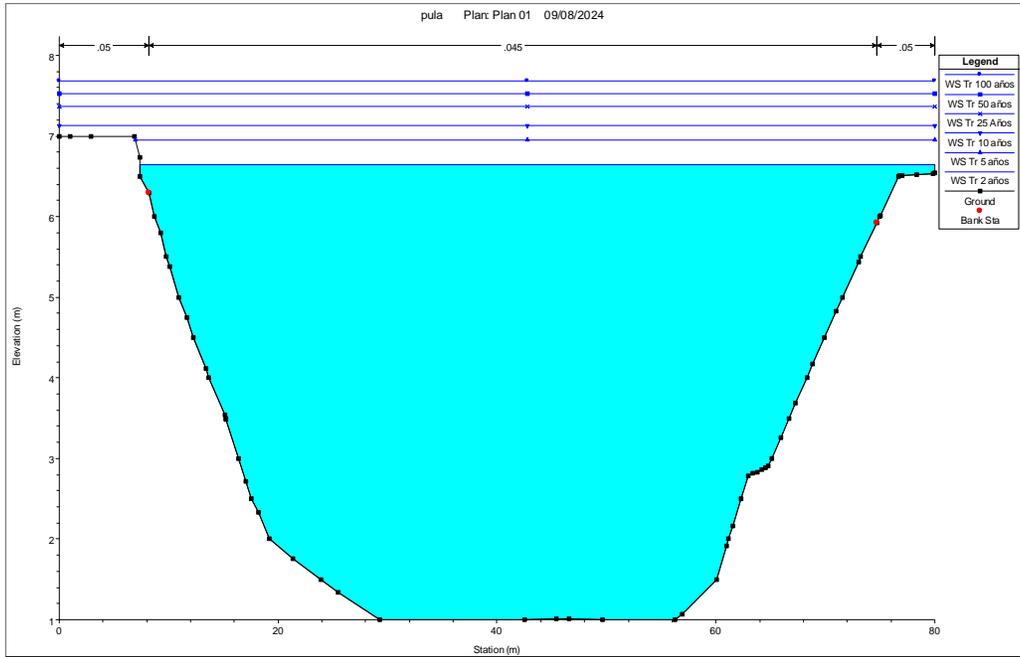


Ilustración 29 Sección en la abscisa 9

Fuente: HEC-RAS

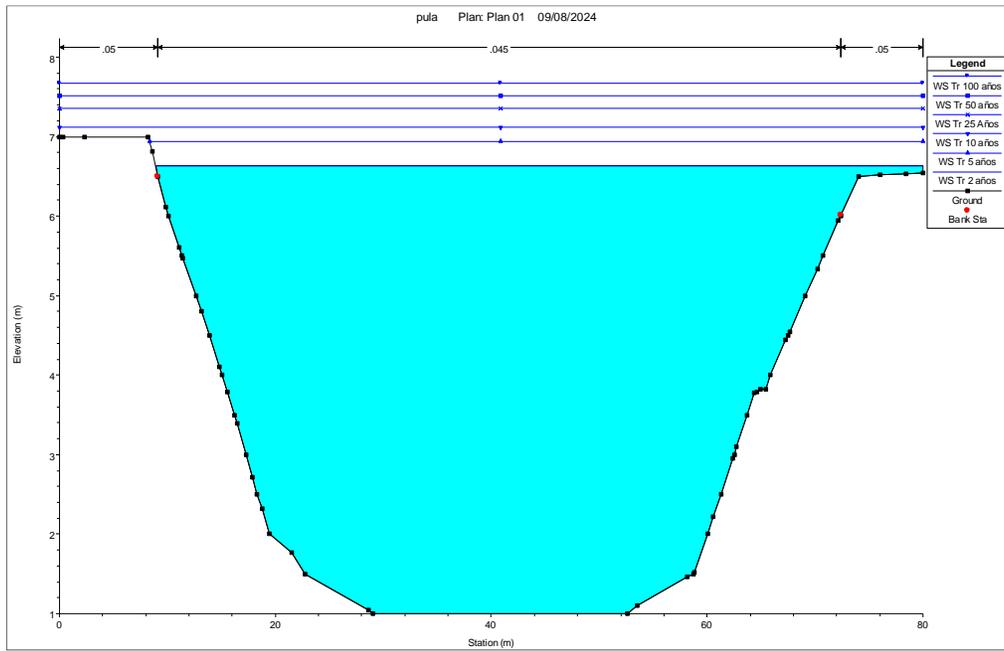


Ilustración 30 Sección en la abscisa 10

Fuente: HEC-RAS

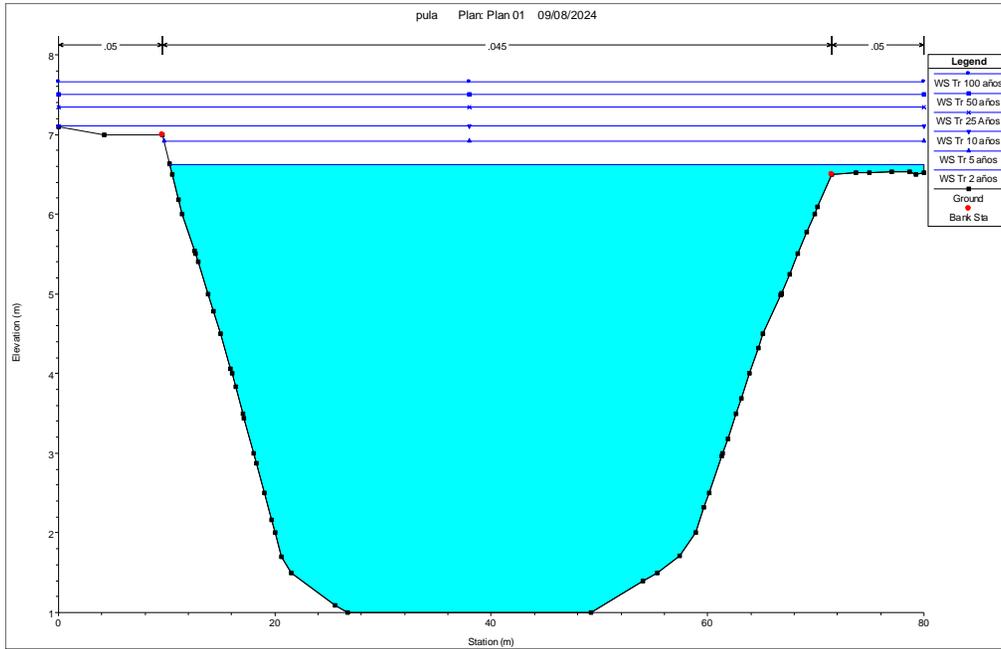


Ilustración 31 Sección en la abscisa 11

Fuente: HEC-RAS

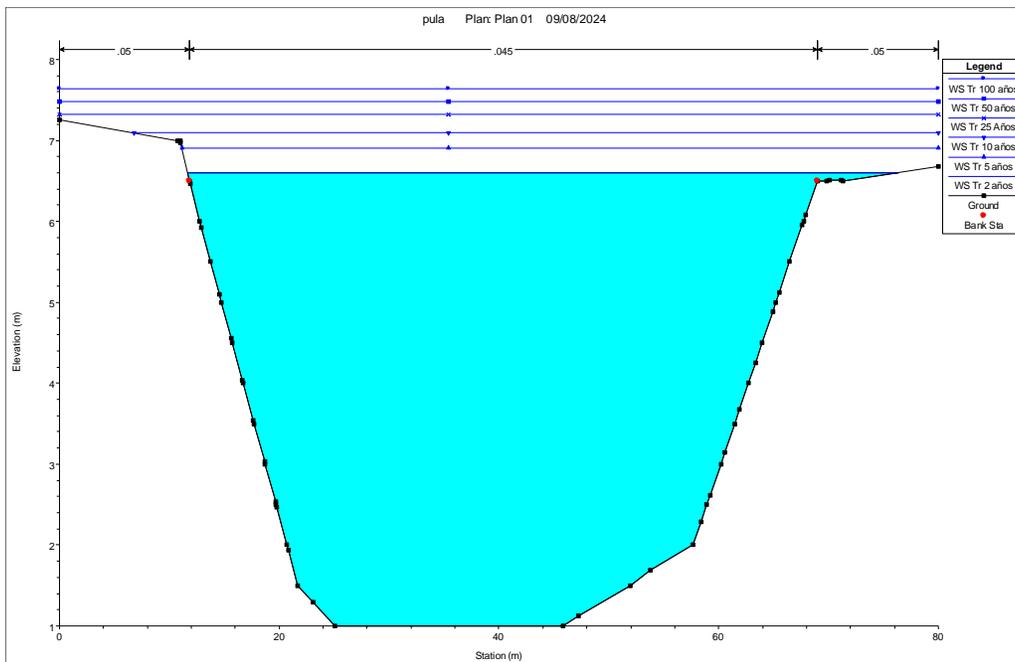
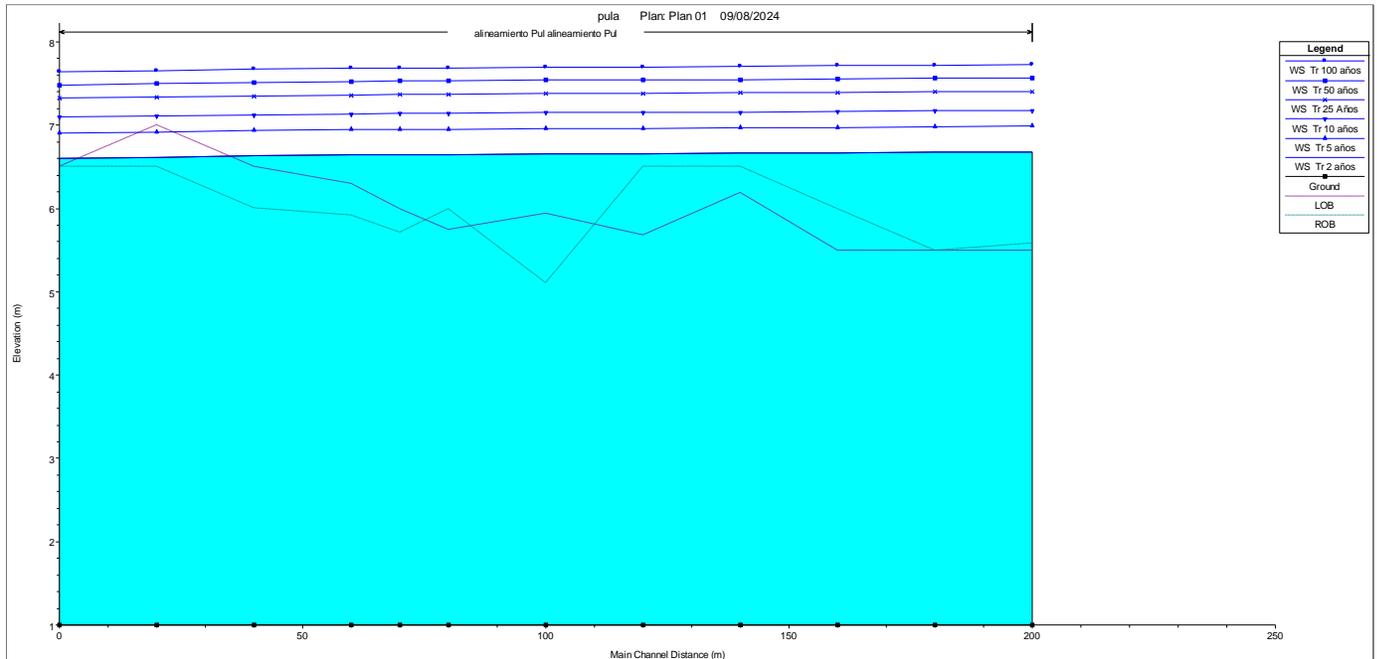


Ilustración 32 Sección en la abscisa 12

Fuente: HEC-RAS

También se puede visualizar los perfiles del agua para diferentes períodos de retorno, en la siguiente imagen.



*Ilustración 33 Perfil Longitudinal río Pula para diferentes períodos de retorno*

#### **4.9.2 Análisis De Resultados Hidráulicos**

Una vez que se han realizado los modelos se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes tablas.

En esta tabla se muestra el resumen para diferentes períodos de retorno de las condiciones del flujo en las diferentes secciones del río.

Tabla 8 Resultados de la modelación en el río Pula, para diferentes periodos de retorno

|           |             | (m <sup>3</sup> /s) | (m)       | (m)       | (m)          | (m <sup>2</sup> ) | (m)       |              | (m)          | (m)          |
|-----------|-------------|---------------------|-----------|-----------|--------------|-------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| River Sta | Profile     | Q Total             | Min Ch El | W.S. Elev | Max Chl Dpth | Flow Area         | Top Width | Froude # Chl | L. Freeboard | R. Freeboard |
| 11_20     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.68      | 5.68         | 323.2             | 79.83     | 0.12         | -1.18        | -1.1         |
| 11_20     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.99      | 5.99         | 347.7             | 80        | 0.12         | -1.49        | -1.41        |
| 11_20     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.18      | 6.18         | 362.9             | 80        | 0.13         | -1.68        | -1.6         |
| 11_20     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.41      | 6.41         | 381.3             | 80        | 0.13         | -1.91        | -1.83        |
| 11_20     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.57      | 6.57         | 394.2             | 80        | 0.13         | -2.07        | -1.99        |
| 11_20     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.73      | 6.73         | 406.9             | 80        | 0.13         | -2.23        | -2.15        |
| 10_40     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.68      | 5.68         | 316.1             | 78.4      | 0.13         | -1.18        | -1.18        |
| 10_40     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.98      | 5.98         | 340.4             | 80        | 0.13         | -1.48        | -1.48        |
| 10_40     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.17      | 6.17         | 355.7             | 80        | 0.13         | -1.67        | -1.67        |
| 10_40     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.4       | 6.4          | 374.1             | 80        | 0.13         | -1.9         | -1.9         |
| 10_40     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.56      | 6.56         | 386.9             | 80        | 0.13         | -2.06        | -2.06        |
| 10_40     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.72      | 6.72         | 399.6             | 80        | 0.13         | -2.22        | -2.22        |
| 9_60      | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.67      | 5.67         | 308.7             | 76.57     | 0.13         | -1.17        | -0.67        |
| 9_60      | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.98      | 5.98         | 332.6             | 80        | 0.13         | -1.48        | -0.98        |
| 9_60      | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.17      | 6.17         | 347.9             | 80        | 0.13         | -1.67        | -1.17        |
| 9_60      | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.4       | 6.4          | 366.3             | 80        | 0.13         | -1.9         | -1.4         |
| 9_60      | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.56      | 6.56         | 379.1             | 80        | 0.14         | -2.06        | -1.56        |
| 9_60      | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.71      | 6.71         | 391.8             | 80        | 0.14         | -2.21        | -1.71        |
| 8_80      | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.66      | 5.66         | 300.6             | 71.37     | 0.13         | -0.47        | -0.16        |
| 8_80      | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.97      | 5.97         | 323.7             | 78.25     | 0.14         | -0.78        | -0.47        |

|           |             | (m <sup>3</sup> /s) | (m)       | (m)       | (m)          | (m <sup>2</sup> ) | (m)       |              | (m)          | (m)          |
|-----------|-------------|---------------------|-----------|-----------|--------------|-------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| River Sta | Profile     | Q Total             | Min Ch El | W.S. Elev | Max Chl Dpth | Flow Area         | Top Width | Froude # Chl | L. Freeboard | R. Freeboard |
| 8_80      | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.16      | 6.16         | 338.7             | 79.18     | 0.14         | -0.97        | -0.66        |
| 8_80      | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.39      | 6.39         | 357               | 80        | 0.14         | -1.2         | -0.89        |
| 8_80      | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.55      | 6.55         | 369.8             | 80        | 0.14         | -1.36        | -1.05        |
| 8_80      | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.71      | 6.71         | 382.5             | 80        | 0.14         | -1.52        | -1.21        |
| 7_100     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.66      | 5.66         | 292.3             | 68.78     | 0.14         | -0.98        | -0.16        |
| 7_100     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.96      | 5.96         | 313.7             | 71.73     | 0.14         | -1.28        | -0.46        |
| 7_100     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.15      | 6.15         | 328.2             | 77.47     | 0.14         | -1.47        | -0.65        |
| 7_100     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.38      | 6.38         | 346.1             | 78.16     | 0.14         | -1.7         | -0.88        |
| 7_100     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.54      | 6.54         | 358.6             | 78.83     | 0.14         | -1.86        | -1.04        |
| 7_100     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.7       | 6.7          | 371.2             | 80        | 0.15         | -2.02        | -1.2         |
| 6_120     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.66      | 5.66         | 324.6             | 71.9      | 0.12         | -0.72        | -1.55        |
| 6_120     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.96      | 5.96         | 346.6             | 72.54     | 0.12         | -1.02        | -1.85        |
| 6_120     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.15      | 6.15         | 361.3             | 78.27     | 0.13         | -1.21        | -2.04        |
| 6_120     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.38      | 6.38         | 379.3             | 78.55     | 0.13         | -1.44        | -2.27        |
| 6_120     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.54      | 6.54         | 392               | 78.82     | 0.13         | -1.6         | -2.43        |
| 6_120     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.7       | 6.7          | 404.4             | 79.05     | 0.13         | -1.76        | -2.59        |
| 5_140     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.65      | 5.65         | 298               | 72.13     | 0.14         | -0.9         | -0.65        |
| 5_140     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.95      | 5.95         | 320.3             | 73.88     | 0.14         | -1.2         | -0.95        |
| 5_140     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.14      | 6.14         | 335.3             | 80        | 0.14         | -1.39        | -1.14        |
| 5_140     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.37      | 6.37         | 353.6             | 80        | 0.14         | -1.62        | -1.37        |



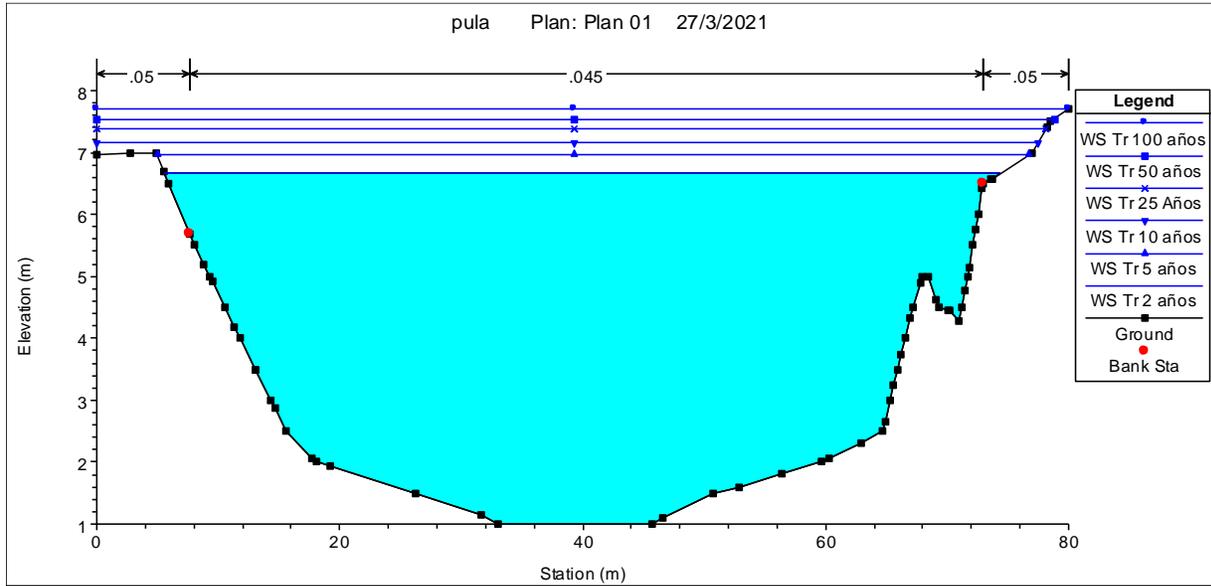
|           |             | (m <sup>3</sup> /s) | (m)       | (m)       | (m)          | (m <sup>2</sup> ) | (m)       |              | (m)          | (m)          |
|-----------|-------------|---------------------|-----------|-----------|--------------|-------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| River Sta | Profile     | Q Total             | Min Ch El | W.S. Elev | Max Chl Dpth | Flow Area         | Top Width | Froude # Chl | L. Freeboard | R. Freeboard |
| 1_200     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.62      | 5.62         | 263.2             | 69.73     | 0.16         | 0.38         | -0.12        |
| 1_200     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.92      | 5.92         | 284.4             | 70.26     | 0.16         | 0.08         | -0.42        |
| 1_200     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.11      | 6.11         | 298.7             | 80        | 0.16         | -0.11        | -0.61        |
| 1_200     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.34      | 6.34         | 317               | 80        | 0.16         | -0.34        | -0.84        |
| 1_200     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.5       | 6.5          | 329.7             | 80        | 0.16         | -0.5         | -1           |
| 1_200     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.66      | 6.66         | 342.4             | 80        | 0.16         | -0.66        | -1.16        |
| 0_220     | Tr 2 años   | 266.64              | 1         | 6.6       | 5.6          | 247.8             | 64.7      | 0.17         | -0.1         | -0.1         |
| 0_220     | Tr 5 años   | 298.91              | 1         | 6.91      | 5.91         | 268.4             | 68.87     | 0.17         | -0.41        | -0.41        |
| 0_220     | Tr 10 años  | 320.27              | 1         | 7.1       | 6.1          | 281.7             | 73.23     | 0.17         | -0.6         | -0.6         |
| 0_220     | Tr 25 Años  | 347.26              | 1         | 7.32      | 6.32         | 299.4             | 80        | 0.17         | -0.82        | -0.82        |
| 0_220     | Tr 50 años  | 367.29              | 1         | 7.48      | 6.48         | 312.2             | 80        | 0.17         | -0.98        | -0.98        |
| 0_220     | Tr 100 años | 387.16              | 1         | 7.64      | 6.64         | 324.8             | 80        | 0.17         | -1.14        | -1.14        |

### 4.9.3 Resultados De La Simulación

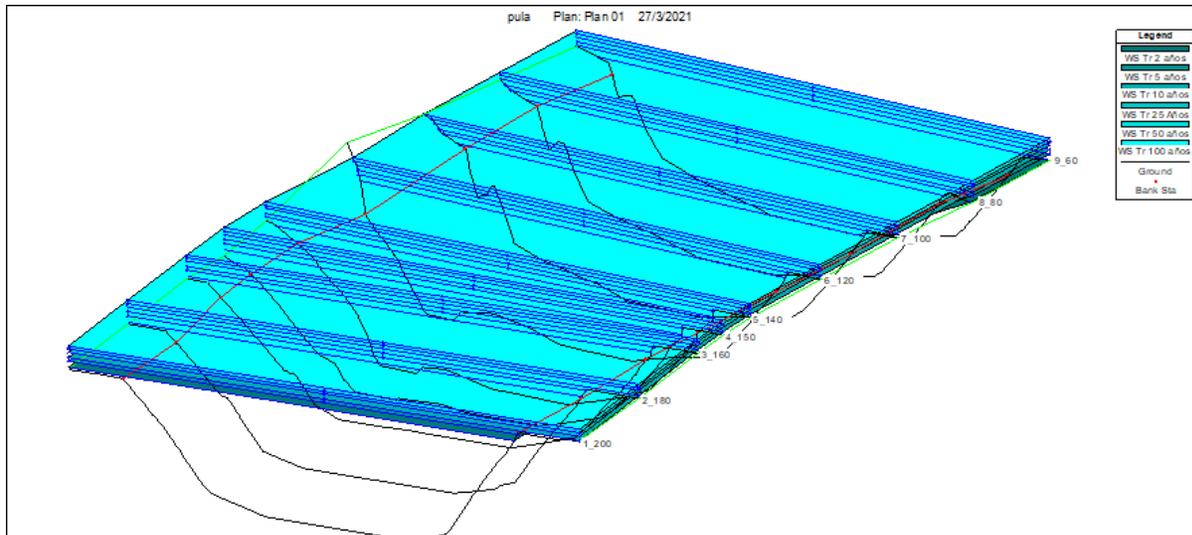
Como resultado de esta simulación, se obtuvo el perfil longitudinal para caudal correspondiente al periodo de retorno previamente establecido, que se presenta a continuación.

El perfil hidráulico para diferentes frecuencias fue de mucha utilidad para poder definir las características hidráulicas que prevalecen en el sitio de cruce, que, junto a la inspección de campo en cada sitio, sirvió para evaluar la socavación general en el sitio del puente.

En este caso, fue necesario elaborar una curva de descarga sintética a través del método sección pendiente, dicha sección analizada y se presenta a continuación.



*Ilustración 34 Sección del río sobre la que se implanta la estación de bombeo*



*Ilustración 35 Vista 3D modelo HEC-RAS*

En la sección más cercana donde se implanta la estación de bombeo tenemos a manera de resumen las siguientes cotas de agua:

Considerando los datos recopilados sobre la construcción de la estación de bombeo, se ha determinado que la cota del piso de la turbina se encuentra a 6.065 msnm. Sin embargo, es necesario elevar esta cota, ya que este nivel se supera en 60 cm durante un período de lluvias regular o multianual, es decir, lluvias que ocurren casi anualmente. Alternativamente, se deben realizar obras que mejoren y mitiguen estas condiciones. En el año en 2023, en donde se presentaron precipitaciones atípicas y con una intensidad de moderada a fuerte se registró un nivel de inundación de 7.205 msnm, correspondiente a un período de retorno entre 10 y 25 años, típico de una temporada de lluvias regular o media.

## 5 Conclusiones y Recomendaciones

De la información registrada en la estación ubicada en el río Pula se pudieron obtener los caudales máximos en 24 horas y se aplicando la metodología de distribución de valores extremos Gumbel tipo I, se obtuvieron los siguientes caudales.

*Tabla 9 caudales en época de precipitaciones máximas*

| Período de retorno<br>(años) | Caudal en Pula en Laurel<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------------|---|
| 2                            | 266.64  |
| 5                            | 298.91  |
| 10                           | 320.27  |
| 25                           | 347.26  |
| 50                           | 367.29  |
| 100                          | 387.16  |

En la Tabla 10 se establecen los datos para cada sección y para período de retorno, se ubica a manera de resumen, y se recomienda que, al hacer referencia a los datos, se utilice la sección correspondiente a la 80 en la tabla, ya que es esta la que se refiere a la de la estación de bombeo.

*Tabla 10 Resumen de elevación del tirante de agua para diferentes periodos de retorno*

| <b>Tr</b>  | <b>Elev WS<br/>(msnm)</b> |  |
|------------|---------------------------|--|
| <b>2</b>   | 6.66                      |  |
| <b>5</b>   | 6.96                      |  |
| <b>10</b>  | 7.15                      |  |
| <b>25</b>  | 7.38                      |  |
| <b>50</b>  | 7.54                      |  |
| <b>100</b> | 7.70                      |  |

De la modelación se obtuvieron los niveles que se tiene en las secciones del río para cada uno de los periodos de retorno, y se puede evidenciar que incluso para el de 2 años de recurrencia se tiene un nivel que supera con 60 cm el nivel de los equipos de bombeo, por lo que si se presentan eventos de una intensidad mayor este problema crece generando mayor problema para los equipos y los regantes de la Junta.

Para garantizar la correcta instalación de los equipos de bombeo, se aconseja considerar un período de retorno de 100 años, aunque este puede reducirse a un mínimo de 25 años en casos

excepcionales de lluvias intensas, con el objetivo de proteger la integridad de los equipos frente a posibles inundaciones.

En función de lo que menciona en el párrafo anterior los diversos niveles de agua para la sección 80 son:

*Tabla 11 niveles de agua*

|                    | <b>(m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>(msnm)</b>   | <b>(msnm)</b>       | <b>(m)</b>     |
|--------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|----------------|
| <b>Profile</b>     | <b>Q Total</b>           | <b>Elev min</b> | <b>Elev de agua</b> | <b>Tirante</b> |
| <b>TR 2 AÑOS</b>   | 266.64                   | 1.73            | 6.66                | 5.66           |
| <b>TR 5 AÑOS</b>   | 298.91                   | 1.73            | 6.97                | 5.97           |
| <b>TR 10 AÑOS</b>  | 320.27                   | 1.73            | 7.16                | 6.16           |
| <b>TR 25 AÑOS</b>  | 347.26                   | 1.73            | 6.75                | 5.02           |
| <b>TR 50 AÑOS</b>  | 367.29                   | 1.73            | 6.95                | 5.22           |
| <b>TR 100 AÑOS</b> | 387.16                   | 1.73            | 7.12                | 5.39           |

## 6 Bibliografía

Bolinaga, J. et al. (1999). Proyectos de Ingeniería Hidráulica Bolinaga. In Juan José Bolinaga. Polar.

Brunner, G. W., Warner, J. C., Wolfe, B. C., & Piper, S. S. (2020). HEC-RAS Applications Guide. December.

Bureau of Reclamation. (1987). Design of Small Dams. <https://doi.org/10.1002/3527603514.ch5>

Cardona, B. L. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINAI.xis&method=post&formato=2&cantidad=>

Díaz, A. (2010). ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD ( Diseño Hidrológico ).

FAO. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Fao, 4. <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/I>

FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. In Mundi-Prensa Madrid. [www.mundiprensa.com](http://www.mundiprensa.com)

Gobierno Provincial del Guayas. (2012). Plan Provincial de Riego y Drenaje de la Provincia del Guayas. 90, 1–15.

HORTON, R. E. (1945). EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)

Instituto Geofísico – Universidad Javeriana. (2017). Determinación de modelos Lluvia Escorrentía. 80.

[https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27207/Productos\\_Mocoa4\\_Determinación\\_modelos\\_lluvia\\_escorrentía.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27207/Productos_Mocoa4_Determinación_modelos_lluvia_escorrentía.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Muñoz, J.; B. R. (2021). Gestión integrada de recursos hídricos y gobernanza: Subcuenca del río Vinces, provincia Los Ríos-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 15. <https://www.redalyc.org/journal/280/28068276036/html/>

Organización de las Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. In *Revista de Derecho Ambiental (Issue 10)*. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). 2050: la escasez de agua en varias zonas del mundo amenaza la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. *Foro Mundial Del Agua 7*. <https://www.fao.org/news/story/es/item/283264/icode/>

Posso, H. (2009). *Manual de Drenaje para carreteras*. 538.

Pourrut, P., & Pouyaud, B. (1995). El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía. In Estudios de Geografía.

Rivero, J. (2014). Actualización Hidrológica del complejo Multiprósito Jaime Roldós Aguilera.

Rivero, J. (2016). Plan Provincial de Riego y Drenaje de la Provincia de Santa Elena.

Rivero Solórzano, J. (2018). ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD Y DISEÑO DEFINITIVO DE PRESAS DE CAUCE EN LA REGIÓN NORTE DE SANTA ELENA - ESTUDIO HIDROLÓGICO.

Sanfeliu Montolio, T., & Montaña Armijos, M. (2008). Ecosistema Guayas (Ecuador). Medio ambiente y Sostenibilidad. 21, 1–6.

SENAGUA. (2010). CAPITULO 4 INFORME DE HIDROLOGÍA DAUVIN.

Terra, R. (1968). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Uruguay, 101. [http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Manual Pequeñas Presas V1-v1\\_01.pdf](http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Manual Pequeñas Presas V1-v1_01.pdf)

UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. In Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la

Ciencia y la Cultura. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>

Universidad Agraria del Ecuador. (2010). Plan de ordenamiento territorial cuenca del río Guayas y Península de Santa Elena. 107.

USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System User ' s Manual. February, 171.

Villón, M. (2004). HIDROLOGÌA. In Máximo Villón Bejar.

Villón, M. (2013). Hidrología Estadística. 435.

(<https://www.iagua.es/noticias/fundacion-aquae/sabias-que-solo-0025-agua-tierra-es-potable-infografia-fundacion-aquae>, s.f.)

## 7 ANEXOS FOTOGRAFICOS



*Ilustración 36 Tuberías de succión de la estación de bombeo Pula-Junquillal*



*Ilustración 37 Tuberías de succión Río Pula*



*Ilustración 38 Estación de bombeo Río Pula*



*Ilustración 39 Motor de la estación de bombeo*



*Ilustración 40 Canal principal de la JRD Pula-Junquillal*