

Universidad Nacional, Costa Rica

Sede Regional Chorotega

Campus Liberia

Proyecto Final de Graduación

“Estudio hidrológico e hidráulico en un tramo del río Santa Bárbara para la prevención de la socavación de las carreteras de Santa Bárbara de Santa Cruz, Costa Rica”

Como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Hidrológica

Sustentante: Leyvin Andrés Méndez Leal

Cédula: 1-1674-0816

Equipo supervisor:

Ing. Christian Golcher Benavides

Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe

Ing. Diego Rodríguez

Municipalidad de Santa Cruz

Ing. Rolando Madriz Vargas

Universidad Nacional, Costa Rica

Santa Cruz, Costa Rica

Febrero 2022

ACTA DE APROBACIÓN

La comisión examinadora aprobó el trabajo titulado “**Estudio hidrológico e hidráulico en un tramo del río Santa Bárbara para la prevención de la socavación de las carreteras de Santa Bárbara de Santa Cruz, Costa Rica**” como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Hidrológica. Los miembros de la comisión examinadora corresponden a los siguientes profesionales:

MSc. Doriam Chavarría López

Representante de Decanatura, Sede Regional Chorotega.

ME.d. Wagner Castro Castillo

Director académico, Universidad Nacional, Campus Liberia.

Dr. Rolando Madriz Vargas

Coordinador de la Carrera Ingeniería Hidrológica.

Dr. Christian Golcher Benavides

Lector

M.Sc. Erick Orozco Orozco.

Lector

Dedicatoria

Este proyecto es dedicado a Dios, quien siempre me bendijo y me brindó fuerzas para salir adelante, a mi familia, quienes siempre fueron mi motivación e inspiración, a mis amigos, y a mi pareja quien siempre me ha apoyado.

Agradecimientos

Brindo mi mayor agradecimiento a la Universidad Nacional por la formación profesional que me brindó, a todos los profesores que pusieron un granito de arena para mi crecimiento profesional y a HIDROCEC-UNA, la institución que siempre me permitió desarrollar mis habilidades como ingeniero hidrológico.

Tabla de contenido

1) CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	17
1.1 Introducción del proyecto.....	17
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Justificación	23
1.4 Objetivos del proyecto	24
1.4.1 Objetivo general	24
1.4.2 Objetivos específicos.....	24
1.5 Alcances	24
1.6 Limitaciones.....	25
2) CAPÍTULO 2: CONTEXTO	26
2.1 Introducción	26
2.2 Descripción de la zona de estudio.....	26
2.3 Principales actividades socioeconómicas	27
2.4 Clima del área de estudio.....	29
3) CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	30
3.1 Parámetros de forma de la cuenca	30
3.1.1 Área	30
3.1.2 Perímetro	30
3.1.3 Longitud de la cuenca	30
3.1.4 Factor de forma de Horton	30
3.1.5 Coeficiente de compacidad (Kc)	31
3.2 Parámetros de relieve.....	32
3.2.1 Curva hipsométrica	32
3.2.2 Pendiente media	33
3.3 Parámetros de drenaje.....	34
3.3.1 Red de drenaje.....	34
3.3.2 Orden de cauces	34
3.3.3 Tiempo de concentración	35
3.4 Fundamentos teóricos de la hidrología	35
3.4.1 Cuenca hidrográfica	35
3.4.2 Hidrograma.....	35

3.4.3 Máximas avenidas o caudales máximos.....	35
3.4.4 Periodos de retorno.....	36
3.4.5 Socavación	36
3.5 Fundamentos teóricos de la modelación hidrológica e hidráulica	37
3.5.1 Modelamiento hidrológico	37
3.5.2 Modelo HEC-HMS	37
3.5.3 Modelamiento hidráulico	37
3.5.4 HEC-RAS.....	38
3.6 Software utilizados para realizar el procesamiento de datos	38
3.6.1 Microsoft Excel	38
3.6.2 QGIS.....	38
3.6.3 AutoCAD CIVIL 3D.....	38
4) CAPÍTULO 4: PREFACTIBILIDAD DEL PROYECTO.....	39
4.1 Estudio ambiental	39
4.2 Estudio legal	40
4.3 Estudio Técnico del proyecto	43
4.3.1 Procesamiento de datos	43
4.3.2 Ejecución del modelamiento	43
4.4 Estudio financiero	44
4.4.1 Egresos del proyecto	44
4.4.2 Ingresos del proyecto	46
4.4.3 Costos evitados.....	46
4.5 Estudio Social	48
5) CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA	50
5.1 Actividades del anteproyecto.....	50
5.2 Actividades del desarrollo del proyecto.....	51
5.2.1 Propuesta de modelamiento	52
5.2.2 Caracterización de la cuenca	52
5.2.2A Parámetros de forma de la cuenca.....	52
5.2.2B Parámetros de relieve de una cuenca.....	53
5.2.2C Parámetros de drenaje de la cuenca.....	53
5.2.3 Obtención de la precipitación máxima anual.	54

5.2.4 Complementación de datos	54
5.2.5 Procesamiento de datos de precipitación	54
5.2.6 Modelación hidrológica	54
5.2.7 Procesamiento de datos topográficos	57
5.2.8 Modelación hidráulica.....	57
5.2.9 Propuesta de obra de contención.....	57
5.3 Diagrama de trabajo del proyecto	57
5.4 Diseño metodológico vs objetivos específicos	58
6) RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
6.1 Resultados del estudio hidrológico.....	60
6.1.1 Características de forma de la subcuenca del río Santa Bárbara.....	60
6.1.2 Características de relieve de la subcuenca del río Santa Bárbara.....	61
6.1.3. Características de drenaje de la subcuenca del río Santa Bárbara.....	64
6.1.4 Procesamiento de datos	65
6.1.5 Procesamiento hidrológico	67
6.1.6 Modelaje con HEC HMS	74
6.2 Resultados del estudio hidráulico	78
6.2.1 Caracterización geofísica hidráulica del tramo de cauce del río Santa Bárbara ubicado en el sector “La Cueva del León”.....	79
6.2.2 Modelación hidráulica.....	82
6.2.3 Problemática en la simulación hidráulica.....	88
6.3 Propuesta de obras hidráulicas requeridas	89
6.3.1 Muros de enrocado	90
6.3.2 Muros de Gavión.....	92
6.4 Discusión de principales hallazgos del estudio.....	94
6.5 Discusión con respecto a objetivos planteados.....	95
6.6 Discusión con respecto al diseño metodológico	96
7) Conclusiones y recomendaciones.....	98
7.1 Conclusiones.....	98
7.2 Recomendaciones	99
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	108

Índice de tablas

Tabla 1. Rangos aproximados del Factor de Forma.

Tabla 2. Relación de la pendiente media de una cuenca y su tipo de relieve asociado.

Tabla 3. Marco de gobernanza legal referente proyecto.

Tabla 4. Costos directos del proyecto a desarrollar.

Tabla 5. Costos indirectos del proyecto a desarrollar.

Tabla 6. Egresos totales del proyecto

Tabla 7. Stakeholder entrevistados para conocer la prefactibilidad del proyecto.

Tabla 8. Descripción de las actividades del anteproyecto de la modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara.

Tabla 9. Clasificación según las condiciones de humedad antecedente en la zona de estudio.

Tabla 10. Grupos hidrológicos de suelos según sus características físicas.

Tabla 11. Números de Curva para distintos tipos de suelo y uso de suelo correspondientes a la condición de humedad II.

Tabla 12. Distribución de todas las actividades del desarrollo del proyecto a lo largo de 5 meses.

Tabla 13. Descripción de las principales actividades propias al desarrollo del proyecto y su relación con el cumplimiento de los objetivos específicos.

Tabla 14. Características de forma de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Tabla 15. Características de relieve de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Tabla 16. Características de drenaje de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Tabla 17. Registro de precipitación máxima diaria de la estación meteorológica Hacienda Pinilla para un periodo de 23 años (1998-2020).

Tabla 18. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones máximas según el periodo de retorno respectivo, según el método de distribución Gumbel.

Tabla 19. Tipo de suelo para los distintos usos de suelo que se encuentran en la cuenca del río Santa Bárbara y su respectivo valor de CN.

Tabla 20. Caudales máximos para distintos periodos de retorno obtenidos de la modelación hidrológica.

Tabla 21. Características hidrológicas de las subcuencas del río Diríá y el río Sardinal según (Barquero, 2019).

Tabla 22. Aspectos comparados correspondientes a las subcuencas del río Diríá, río Sardinal y río Santa Bárbara, Guanacaste, Costa Rica.

Tabla 23. Aspectos comparados correspondientes a las subcuencas del río Lepanto de Puntarenas, y subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Tabla 24. Caudales máximos obtenidos del río Lepanto según (Sírias, 2020) comparados con los caudales máximos obtenidos en el presente proyecto.

Tabla 25. Dimensiones básicas del puente sobre el río Santa Bárbara.

Tabla 26. Ventajas y desventajas del uso de muros de gavión como obras de protección de riberas.

Tabla 27. Parámetros asociados a la forma de la cuenca y su método de estimación.

Tabla 28. Parámetros de drenaje

Tabla 29. Resultados obtenidos de precipitación máxima mediante el uso del modelo de Dyck y Peschke, para diferentes periodos de retorno y duraciones

Tabla 30. Intensidades máximas de precipitación calculadas según el modelo de Dyck y Peschke.

Tabla 31. Número de curva según uso y tipo de suelo de la cuenca.

Tabla 32. Números de Curva para distintos tipos de suelo y uso de suelo.

Tabla 33. Orden de suelos encontramos en la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste y su respectivo grupo hidrológico

Tabla 34. Principales usos de suelo encontrados en la subcuenca del río Santa Bárbara mediante la Clasificación Supervisada y su respectivo Número de Curva.

Tabla 35. Diversos valores de rugosidad (n de Manning) para las diferentes condiciones naturales del cauce de un río.

Índice de figuras

Imagen 1. Ubicación del proyecto en donde prevalece la problemática de socavación de carretera, Santa Bárbara de Santa Cruz, Costa Rica.

Imagen 2. Estado actual de la carretera que comunica el caserío “La Cueva del León” con la vía 931, Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 3. Segunda imagen del estado actual de la carretera que comunica el caserío “La Cueva del León” con la vía 931, Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 4. Estado actual del segundo sector crítico producto de la socavación de la calle 3 en Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 5. Mapa de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Costa Rica

Imagen 6. Comparación de la forma de cuencas según valores del Coeficiente de Compacidad.

Imagen 7. Diferentes comportamientos de una curva hipsométrica según sus altitudes.

Imagen 8. Numeración de orden de corrientes según Horton.

Imagen 9. Metodología seleccionada para llevar a cabo el anteproyecto de la modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara.

Imagen 10. Actividades estratégicas para la ejecución del desarrollo del proyecto.

Imagen 11. Modelo digital de elevaciones de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste

Imagen 12. Representación gráfica de las altitudes de la cuenca del río Santa Bárbara mediante la curva hipsométrica.

Imagen 13. Diferentes comportamientos de una curva hipsométrica según sus altitudes vs porcentaje de área.

Imagen 14. Hidrografía y ordenes de corrientes de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 15. Curvas de intensidad-duración-frecuencia elaboradas mediante los datos de precipitación obtenidos de la estación meteorológica Hacienda Pinilla, Santa Cruz

Imagen 16. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas elaborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 17. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas elaborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 50 años

Imagen 18. Mapa de orden de suelos encontrados en la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 19. Mapa de uso de suelo de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Imagen 20. Hidrograma de caudales máximos obtenidos en la modelación hidrológica del río Santa Bárbara para distintos periodos de retorno.

Imagen 21. Mapa de ubicación del tramo del río Santa Bárbara en donde se realizará la simulación hidráulica.

Imagen 22. Protección temporal de enrocado elaborada como medida a corto plazo para combatir la socavación de la carretera y abrir el paso.

Imagen 23. Desprendimiento del enrocado por acción de la escorrentía superficial y la fuerza hidráulica del río Santa Bárbara.

Imagen 24. Luz de puente que se ubica sobre la carretera principal de la comunidad de Santa Cruz, Guanacaste.

Imagen 25. Vista panorámica del cauce del río Santa Bárbara en donde se visualiza los pastos predominantes en las márgenes del cauce pluvial.

Imagen 26. Diferentes profundidades presentes en el tramo en estudio del río Santa Bárbara para un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 27. Velocidades reportadas mediante la simulación hidráulica en el tramo en estudio del río Santa Bárbara.

Imagen 28. Ubicación de las secciones transversales trazadas en el cauce del río Santa Bárbara.

Imagen 29. Sección transversal número 1229, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 30. Sección transversal número 1198, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 31. Sección transversal aguas arriba del puente, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 32. Sección transversal aguas abajo del puente, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Imagen 33. Ilustración del uso de escolleras como defensa ribereña ante la acción erosiva de los ríos.

Imagen 34. Ejemplo de un muro de gavión de 130 m de largo para controlar la erosión de la margen derecha del Rio La Guama Tinaco. Cojedes, 2015.

Imagen 35. Ecuaciones de distribución de probabilidad Gumbel.

Imagen 36. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 5 años.

Imagen 37. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 10 años.

Imagen 38. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 100 años.

Imagen 39. Sección transversal número 787 sobre el cauce del río Santa Bárbara Santa Cruz, Guanacaste.

Índice de anexos

Anexo 1. Consultas realizadas a los Stakeholder asignados para el proyecto.

Anexo 2. Parámetros de la cuenca.

Anexo 3. Parámetros de drenaje de la cuenca.

Anexo 4. Ecuaciones de distribución de probabilidad de Gumbel.

Anexo 5. Resultados del cálculo de precipitación máxima según el modelo de Dyck y Peschke.

Anexo 6. Resultados del cálculo de intensidad máxima de precipitación según el modelo de Dyck y Peschke.

Anexo 7. Hietogramas de distribución de lluvia para un periodo de retorno de 5, 10 y 100 años.

Anexo 8. Tablas con números de curva (CN) según el tipo y uso de suelo de las cuencas en estudio.

Anexo 9. Sección transversal del río Santa Barbara.

Anexo 10. Valores de n de Manning para distintas condiciones del cauce pluvial.

Índice de siglas y acrónimos

CN: Número Curva

DEM: Modelo de Elevación Digital

HEC-RAS: Hydrological Engineering Center – River Analysis System

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System

SIG: Sistema de Información Geográfica

QGIS: Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre

IDF: Intensidad-Duración-Frecuencia.

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

PMA: Precipitación Máxima Anual

INEC: Instituto Costarricense de Estadística y Censos.

Ff: Factor de Forma de la cuenca

Kc: Coeficiente de compacidad

CNE: Comisión Nacional de Emergencia

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial

Glosario

Término	Definición
Socavación	La excavación y transporte de material del lecho y de las orillas de los arroyos como resultado de la acción erosiva del propio flujo de agua.
Erosión	Desgaste y modelación de la corteza terrestre causados por la acción del viento, la lluvia, los procesos fluviales, marítimos y glaciales, y por la acción de los seres vivos.
Ribera	Orilla al borde de un cuerpo de agua, haciendo referencia a la zona de tierra más cercana al río.
Cuenca hidrográfica	Es la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y eventualmente lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta.
Rugosidad	La rugosidad es el conjunto de irregularidades que posee una superficie.
Precipitación máxima anual	Valor máximo de precipitación registrado en un periodo de un año.
Modelo de elevación digital	Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Modelamiento hidrológico	Estudia las precipitaciones máximas y las transforma en caudales máximos en función del tiempo.
Modelación hidráulica	Simula el comportamiento físico del río en eventos de precipitaciones máximas.
Hidrograma	Es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, entre otros. Para un río, arroyo, rambla o canal, si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo
Hietograma	Diagrama de barras que representa las variaciones de altura de precipitación pluvial en intervalos de tiempo previamente seleccionados
Columna de agua	Es una columna conceptual de agua desde la superficie hasta los sedimentos del fondo.
Obra hidráulica	Inmueble destinado a la captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, control y aprovechamiento de las aguas.
Muro de escollera	Obra hecha con piedras echadas al fondo del agua, para formar un dique de defensa contra el oleaje, para servir de cimiento a un muelle o para resguardar el pie de otra obra.
Muro de gavión	Estructuras flexibles, constituidas por cajas fabricadas de malla de alta resistencia, con dimensiones que vienen en fracciones de medio metro, las cuales son rellenas con bloques sanos de roca.

Resumen

El presente proyecto consistió en elaborar un estudio hidrológico e hidráulico en un tramo del río Santa Bárbara para la generación de criterios de dimensionamiento y diseño de infraestructura que evite la erosión de las vías de la comunidad de Santa Bárbara en Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Para desarrollar el presente trabajo se utilizó la información de la Estación Meteorológica Hacienda Pinilla, la cual poseía 23 años de registro de datos de precipitaciones las cuales fueron procesadas mediante el uso de diversos métodos como Distribución Gumbel para la obtención de precipitación máxima en 24 horas, Modelo de Dick Peschke para la generación de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia y el Método de Bloques Alternos para la obtención de hietogramas de precipitación. Una vez procesada la información meteorológica se ejecutó una modelación hidrológica con ayuda del software HEC-HMS en donde se obtuvieron caudales máximos para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Posteriormente se realizó un levantamiento topográfico en 796.97 metros del cauce fluvial del río Santa Bárbara, específicamente en el sector donde el río socavó la carretera de la comunidad de Santa Bárbara, echo esto se ejecutó una simulación hidráulica con ayuda del software HEC-RAS en donde se utilizó un periodo de retorno de 25 años.

Dentro de los principales resultados obtenidos se determinó que el río presenta altas velocidades hidráulicas de hasta $4 \text{ m}^3/\text{s}$, este es el principal factor que ha provocado la socavación de la carretera que se encuentra en la margen derecha del río y por lo cual se concluye que en el sector afectado se debe construir un muro de contención de escollera que tenga la capacidad de brindar soporte a la carretera y al mismo tiempo servir de obra hidráulica que proteja el margen derecho del río Santa Bárbara.

Abstract

The present project consisted of preparing a hydrological and hydraulic study in a section of the Santa Bárbara river for the generation of dimensioning criteria and infrastructure design that prevents the erosion of the roads of the community of Santa Bárbara in Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. .

To develop this work, information from the Hacienda Pinilla Meteorological Station was used, which had 23 years of rainfall data records, which were processed through the use of various methods such as Gumbel Distribution to obtain maximum rainfall in 24 hours, Dick Peschke's model for the generation of Intensity-Duration-Frequency Curves and the Alternate Blocks Method for obtaining precipitation hyetograms. Once the meteorological information was processed, a hydrological modeling was carried out with the help of the HEC-HMS software, where maximum flows were obtained for return periods of 5, 10, 25, 50, 100 and 500 years.

Subsequently, a topographical survey was carried out in 796.97 meters of the fluvial channel of the Santa Bárbara River, specifically in the sector where the river undermined the highway of the Santa Bárbara community, after which a hydraulic simulation was executed with the help of the HEC-RAS software where a return period of 25 years was used.

Among the main results obtained, it was determined that the river has high hydraulic speeds of up to $4 \text{ m}^3/\text{s}$, this is the main factor that has caused the undermining of the road that is on the right bank of the river and for which it is concluded that in the affected sector a breakwater retaining wall should be built that has the capacity to provide support to the road and at the same time serve as a hydraulic work that protects the right bank of the Santa Bárbara River.

1) CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción del proyecto

Con frecuencia las obras de infraestructura y vías de comunicación terrestres construidas por las comunidades son afectadas por eventos hidrometeorológicos extremos. Durante la crecida de los ríos y arroyos se eleva, considerablemente, la cantidad de agua que fluye por sus cauces de forma torrencial, transformando los cuerpos de agua serenos en ríos caudalosos, de gran velocidad que, por sus características, pueden llegar a generar una importante afectación en las obras civiles como carreteras, puentes, alcantarillados y drenajes fluviales.

Los eventos hidrometeorológicos extremos que provocan mayores impactos por exceso de lluvias en Costa Rica son generados por efecto indirecto de huracanes del Caribe, los sistemas de baja presión y los frentes fríos. Los huracanes son los fenómenos que individualmente generan mayores precipitaciones siendo la mayor frecuencia de estos eventos entre septiembre y noviembre. Sus impactos afectan también la vertiente del pacífico. Los sistemas de baja presión se presentan principalmente entre abril y noviembre y sus efectos se pueden sentir tanto en el Caribe como en el Pacífico (Retana, 2012).

Costa Rica ha sufrido pérdidas económicas y de infraestructura en general producto de eventos hidrometeorológicos extremos. En el año 2016, el huracán Otto, se convirtió en el primer huracán en toda la historia, en ingresar al territorio nacional, ocasionando daños en infraestructuras como puentes y diques (La Nación, 2016).

En el año 2017, la influencia de la tormenta tropical Nate causó 516 daños en infraestructura vial en diferentes lugares del territorio nacional. Se estimó que se requerían de ₡ 11.175 millones de colones para rehabilitar las carreteras, caminos y puentes afectados (Universidad de Costa Rica, 2017).

En Costa Rica, los eventos hidrometeorológicos mencionados incrementan la cantidad de precipitación, afectando la capacidad de carga de los suelos. Esta precipitación se convierte en escorrentía superficial que drena hasta los cauces fluviales, incrementando los caudales de los ríos. Ante estos eventos los puentes o carreteras cerca de las márgenes de los ríos pueden sufrir procesos físicos de colmatación y eventual colapso.

La ejecución de modelamientos hidrológicos e hidráulicos son una metodología útil para conocer la velocidad de la corriente con la que el río impacta en los cauces y para predecir los caudales máximos de avenida en eventos hidrometeorológicos extremos.

Los modelos hidrológicos se utilizan para simular la respuesta de los procesos hidrológicos a cambios en las condiciones ambientales, por ejemplo, el incremento de la precipitación y la escorrentía, junto con la disminución de la infiltración a causa del crecimiento urbano. Los resultados típicamente se utilizan en la planeación y manejo de las obras hidráulicas, así como en el diseño de protocolos de protección civil. (Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, 2021).

HEC RAS es un programa informático que permite la modelación hidráulica de ríos, canales, y cauces abiertos. Este programa es de gran utilidad para la prevención de riesgos porque permite predecir áreas de inundación, genera variables hidráulicas para el diseño de estructuras hidráulicas como puentes, alcantarillas y cunetas. Además, HEC RAS delimita fajas marginales de los ríos y determina la altura óptima en el diseño de una carretera, que puede ser afectada por el caudal del río (Neo ingeniería DHCA, 2021).

En la comunidad de Santa Bárbara de Santa Cruz (Costa Rica), el río Santa Bárbara está generando socavación en tres tramos localizados en la vía N°920, las calles 3 y calle 4 que atraviesan el poblado. Este río ha formado múltiples meandros en las colindancias con dichas carreteras.

Los meandros son las curvas que describen los ríos a su paso que suelen originarse en sobrellanuras aluviales con escasa pendiente. La formación de los meandros depende de factores como el caudal, la velocidad de corriente y la composición material del cauce. La parte externa de los meandros presentan una mayor velocidad y turbulencia y por lo tanto concentran las zonas erosivas; mientras que, las partes internas de los meandros la sedimentación (Márquez, 2020). Cuando las carreteras o infraestructuras están ubicadas en la zona erosiva del meandro es cuando se genera la problemática que actualmente prevalece en la comunidad de Santa Bárbara.

En este trabajo se realizará una modelación hidrológica e hidráulica en un trayecto de 3 kilómetros sobre el cauce fluvial del río Santa Bárbara para generar variables hidráulicas e

hidrológicas importantes para el diseño y construcción de infraestructura hidráulica en tres puntos críticos que presentan procesos físicos de socavación.

1.2 Planteamiento del problema

En esta sección se desarrolla la problemática que actualmente existe en la comunidad de Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste y por la cual se considera de gran importancia la realización de una modelación hidrológica e hidráulica para el caso del río Santa Bárbara.

La afectación a las vías y carreteras forma parte de los daños que ocasionan estos eventos extremos. En muchas ocasiones los puentes, carreteras y muros de contención son erosionados a tal punto que se producen procesos de socavación.

Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste, es una comunidad que en la actualidad está presentando problemas de socavación en sus carreteras producto de la erosión que se da a causa de la interacción entre la margen derecha de la carretera y el paso del río Santa Bárbara. La presencia de los eventos hidrometeorológicos extremos han sido el principal detonante para de los procesos erosivos al punto de causar serios problemas en las carreteras de la comunidad.

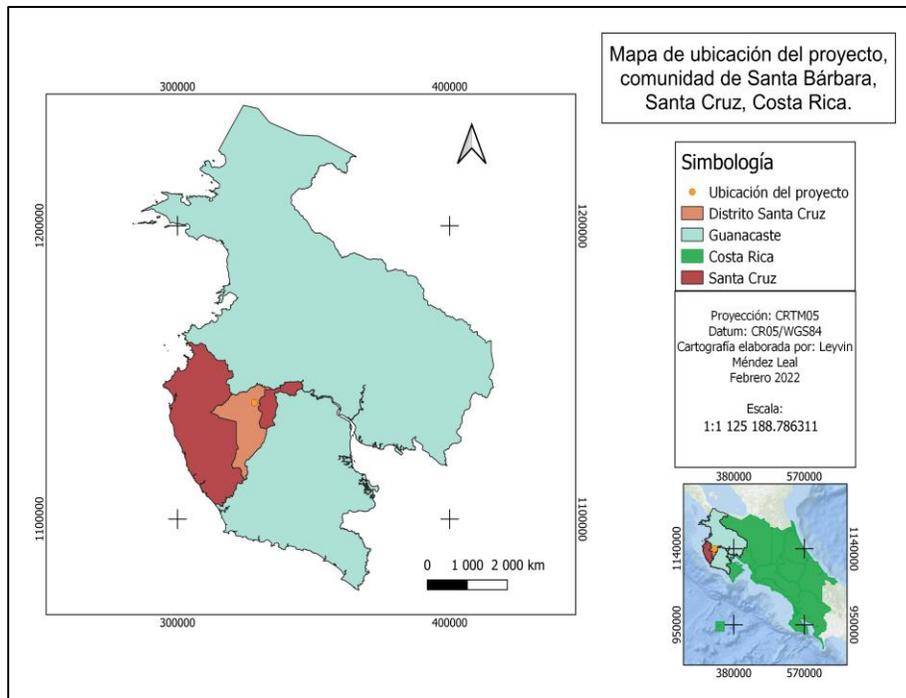


Imagen 1. Ubicación del proyecto en donde prevalece la problemática de socavación de carretera, Santa Bárbara de Santa Cruz, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia, 2021.



Imagen 2. Estado actual de la carretera que comunica el caserío “La Cueva del León” con la vía 931, Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Existen puntos críticos en donde la problemática se ha venido agravando con el pasar del tiempo. El primer sector se ubica sobre la carretera que comunica al caserío “La Cueva del León” con la vía principal 931, esta carretera se encuentra a 600 metros suroeste del centro de la comunidad de Santa Bárbara. En este sector, el río Santa Bárbara erosionó la carretera a tal punto que el gobierno local se vio en la obligación de cerrar el paso debido a que la carretera fue sometida a grandes velocidades hidráulicas que dieron paso a la socavación de esta según se muestra, en la siguiente imagen.



Imagen 3. Segunda imagen del estado actual de la carretera que comunica el caserío “La Cueva del León” con la vía 931, Santa Bárbara de Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Este es uno de los puntos más críticos en donde se evidencia la problemática que actualmente prevalece en la comunidad. La carretera fue destruida por la fuerza hidráulica que generó el río Santa Bárbara en el costado externo del meando colindante con la vía. Esto ha generado afectación a los vecinos de la zona que no pueden utilizar esta vía para desplazarse y deben buscar rutas alternas.

El segundo sector crítico de la comunidad se encuentra a 200 metros del centro de Santa Bárbara, específicamente en la calle 3. Allí el río ha ocasionado un problema similar, en

donde las márgenes del cauce coinciden con el espaldón de la calle. En esta zona el río ha generado un meandro el cual se ha venido erosionando con el pasar del tiempo y está presentando problemas de socavación de la carretera como se muestra en la Imagen 4.



Imagen 4. Estado actual del segundo sector crítico producto de la socavación de la calle 3 en Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una de las principales problemáticas es que ambas carreteras son utilizadas con frecuencia por los vecinos de la zona, mismos que se ponen en peligro ante el colapso de la vía producto de la socavación.

En el año 2019, en la carretera que comunica el caserío “La Cueva del León” con la vía 93, la municipalidad de Santa Cruz realizó una reconstrucción de la margen derecha del río Santa Bárbara y la carretera colindante a dicha margen (Zúñiga, 2019), sin embargo, esta labor fue destruida por la fuerza hidráulica del río en la crecida de la época de invierno 2021.

La inexistencia de estudios hidrológicos del río Santa Bárbara han obligado al gobierno local a realizar labores correctivas sin contar con un fundamento hidrológico que permita conocer el comportamiento del río en los sectores afectados y, partiendo de este conocimiento, poder establecer una solución concreta y acertada ante el problema. Los criterios hidrológicos son

fundamentales para el diseño de infraestructura de contención, ya que permiten conocer los caudales máximos para diversos periodos de tiempo seleccionados.

En la siguiente sección se presentarán argumentos que justifican la importancia de realizar un estudio hidrológico e hidráulico en un tramo de cauce sobre el río Santa Bárbara para la determinación de las zonas vulnerables a la erosión y socavación de carreteras.

1.3 Justificación

Santa Bárbara de Santa Cruz es una comunidad que en la actualidad está presentando un problema de socavación de carreteras producto de la erosión que se da a causa de la interacción entre la margen de la carretera y el río Santa Bárbara. Las precipitaciones de la temporada de invierno son el principal detonante de la problemática. Debido a esto, se argumentará que los estudios hidrológicos e hidráulicos son una herramienta útil y necesaria para generar información necesaria para prevenir, mitigar y contener el problema de erosión de carreteras.

- En primer lugar, los estudios hidrológicos permiten estimar los caudales máximos de avenida conociendo el régimen de las precipitaciones máximas que se presentan dentro de la zona de estudio. La información de caudales máximos es el principal fundamento hidrológico que se utiliza para poder ejecutar un modelamiento hidráulico en el tramo de estudio.
- Seguidamente, los estudios hidráulicos en tramos de los ríos permiten conocer la velocidad con la que fluyen estos cuerpos de agua, este dato es sumamente necesario y requerido para la posterior construcción de una infraestructura que ayude o mitigue la socavación de las carreteras de Santa Bárbara.
- Por último, la finalidad de este proyecto es generar información hidrológica importante e inexistente, que será utilizada por la Municipalidad de Santa Cruz como fundamento técnico para poder trabajar en la escogencia de la mejor solución ante el problema de erosión de las vías de Santa Bárbara.
- En relación con lo anterior, la ejecución de este proyecto ayudará a disminuir los gastos financieros que debe asumir el gobierno local para poder dar solución a la problemática de socavación de vías.

Todo lo anterior mencionado se llevará a cabo cumpliendo con los objetivos que se presentarán a continuación.

1.4 Objetivos del proyecto

1.4.1 Objetivo general

Elaborar un estudio hidrológico e hidráulico en un tramo del río Santa Bárbara para la generación de criterios de dimensionamiento y diseño de infraestructura que evite la erosión de las vías de la comunidad de Santa Bárbara en Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar y procesar datos meteorológicos mediante la revisión de la base de datos de la estación meteorológica Hacienda Pinilla, para la determinación de caudales máximos.
- Realizar un estudio hidrológico enfocado en la determinación de caudales máximos mediante la utilización del programa HEC-HMS para conocer la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Santa Bárbara.
- Realizar un modelamiento hidráulico en un tramo de 796.97 metros sobre el cauce del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste mediante el levantamiento topográfico y el uso del software HEC RAS, para la determinación de las características hidráulicas del río en el tramo de estudio.
- Proponer acciones y recomendaciones para la implementación de obras hidráulicas con el fin de prevenir la erosión de las carreteras producto de la corriente del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

1.5 Alcances

El proyecto posee los siguientes alcances que se muestran a continuación:

- Se procesan los datos meteorológicos, de tal forma que serán completados los datos de precipitación faltantes por medio del uso de diferentes métodos para completar datos faltantes como la media aritmética y regresión múltiple.

- El proyecto tiene alcances técnicos importantes ya que se realiza un análisis hidrológico que permite conocer el caudal máximo de avenida del río Santa Bárbara.
- Se realiza un levantamiento topográfico de 796,97 metros sobre el cauce del río Santa Bárbara, esto con la finalidad de generar información topográfica del cauce y posteriormente, realizar un modelamiento hidráulico que permita conocer los sectores del cauce donde existe mayor peligro de socavación de la margen producto de la velocidad del río.
- El proyecto también tiene un alcance económico importante ya que disminuirá los gastos financieros que deberá realizar el gobierno local para obtener estudios hidrológicos de la zona de estudio.
- Otro alcance importante y que beneficia a la sociedad es que, con la realización de este proyecto, se agilizarán los tiempos de ejecución de estudios preliminares para una posterior construcción de una obra de contención.
- El proyecto consiste en generar información hidrológica importante e inexistente que servirá de insumo para el diseño y dimensionamiento de las obras de infraestructura específicas requeridas para la contención de los procesos erosivos dados.

1.6 Limitaciones

Las limitaciones que tiene el proyecto son las que se presentan a continuación.

- La principal limitante del proyecto es que no se cuenta con estaciones hidrológicas ni meteorológicas dentro de la cuenca del río Santa Bárbara por lo que se utilizarán los datos de precipitación históricos de la estación meteorológica más cercana, la cual corresponde a la estación Hacienda Pinilla.
- En la cuenca del río Santa Bárbara no se ha realizado ningún estudio hidrológico que pueda servir de ayuda para la comparación de resultados obtenidos.
- La base de datos de precipitaciones de la estación meteorológica Hacienda Pinilla cuenta únicamente con datos históricos de 25 años.

2) CAPÍTULO 2: CONTEXTO

2.1 Introducción

En el capítulo 2 se realizará una descripción general de la zona de estudio correspondiente, se determinará su ubicación, y las principales actividades socioeconómicas que sostienen la economía de los pobladores, así como sus características climáticas e hidrología general de la subcuenca del río Santa Bárbara.

2.2 Descripción de la zona de estudio

La comunidad de Santa Bárbara se ubica en la vertiente del pacífico, dentro del distrito Diría, el cual forma parte del cantón de Santa Cruz, provincia Guanacaste, Costa Rica, geográficamente esta comunidad se encuentra dentro de las coordenadas 1136403,8N 332668,1E y 1137848,4N 333436,7E.

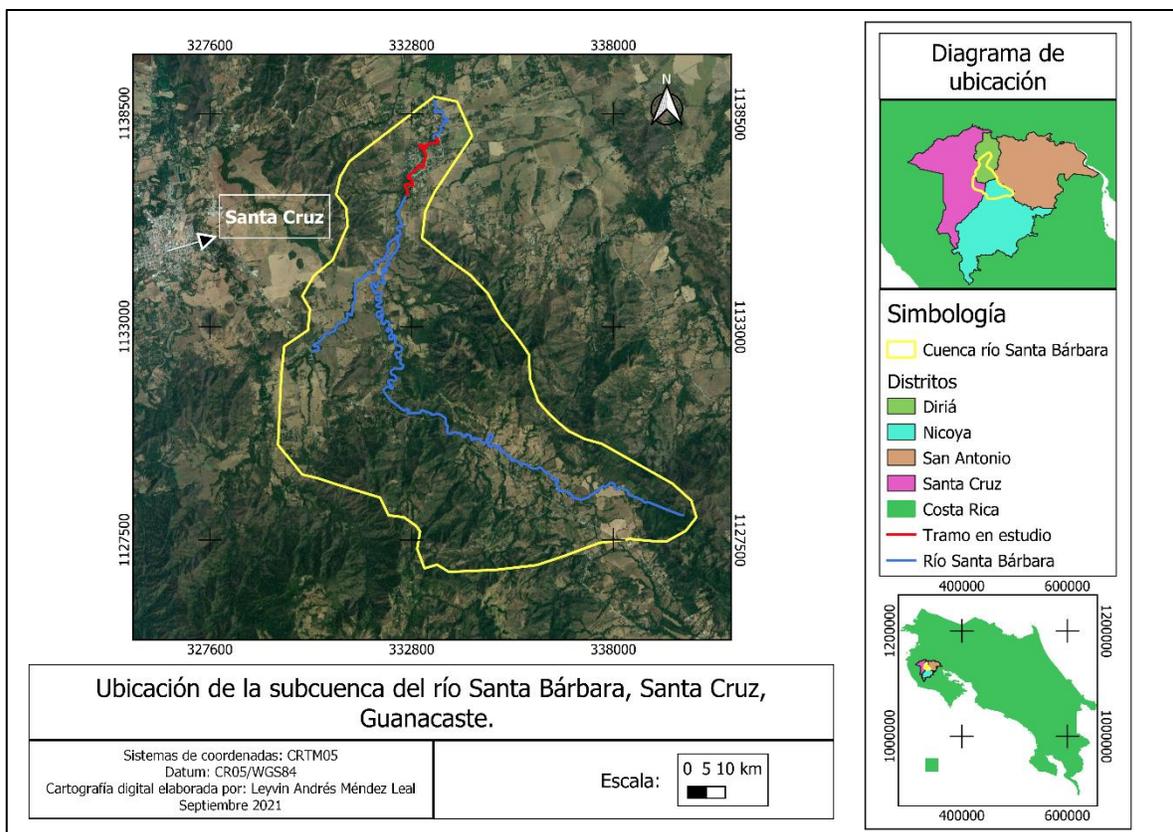


Imagen 5. Mapa de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Costa Rica

Fuente: Elaboración propia. 2021.

La subcuenca del río Santa Bárbara posee un área de 59.7 km² y un perímetro de la cuenca de 39.2 Km. Delimita al oeste con el distrito de Santa Cruz, al este delimita con el distrito de San Antonio, mientras que al norte de la cuenca se encuentra la comunidad de Ortega de Santa Cruz y al sur con el poblado de Sabana Grande de Nicoya.

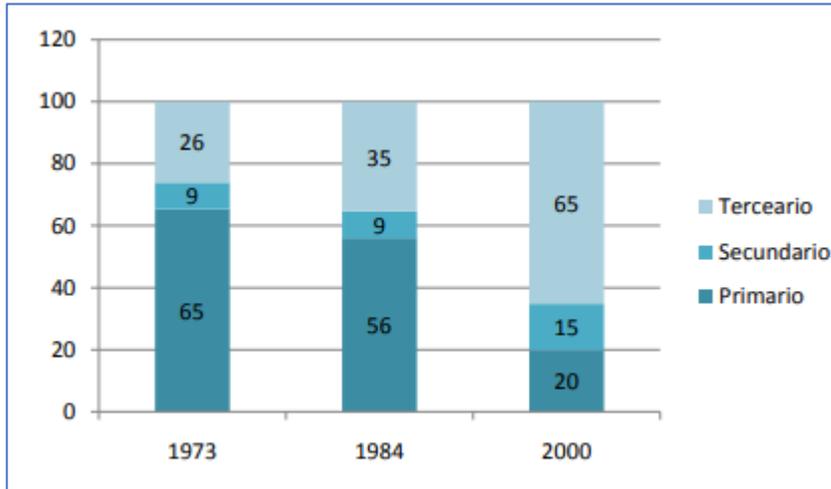
En la parte alta de la subcuenca del río Santa Bárbara se encuentra el cerro San Vicente y Cerro Coyolar, la altura aproximada es de 495 – 552 m.s.n.m. La comunidad de Santa Bárbara se encuentra asentada entre la parte media y baja de la subcuenca del río que lleva el mismo nombre del poblado, mientras que la parte baja de esta área ha sido ampliamente utilizada para ganadería de extensión y actividades agrícolas.

La red hidrológica de la subcuenca inicia entre los cerros San Vicente y Coyolar, ahí el cauce fluvial lleva el nombre de río Grande y se caracteriza por poseer pendientes considerablemente pronunciadas. En la parte media de la subcuenca, el río Grande une sus aguas con la quebrada Agua Fría y Quebrada Limonal, para formar el río Santa Bárbara, este recorre toda la parte media y baja de la subcuenca, formando meandros, hasta unir sus aguas con la quebrada Coyolar y de esta forma, dar inicio al río Troncón.

2.3 Principales actividades socioeconómicas

Entre las actividades económicas tradicionales del cantón se pueden mencionar la ganadería, la agricultura y la pesca. La extensión de suelos dedicada a la ganadería cubre parte importante del territorio cantonal y, junto con la agricultura y la pesca, la ganadería es una de las principales ramas económicas del cantón. Entre los productos agrícolas del cantón se encuentran caña de azúcar, arroz, café, maíz y frijol (Villareal et al., 2010).

Durante muchos años Santa Cruz se ha caracterizado por realizar actividades laborales del sector primario, en donde la ganadería por extensión ha sido una de las principales actividades del cantón. Sin embargo, estas actividades económicas tradicionales han venido disminuyendo debido a nuevas oportunidades laborales que se presentan en el cantón y que corresponden al sector turístico.

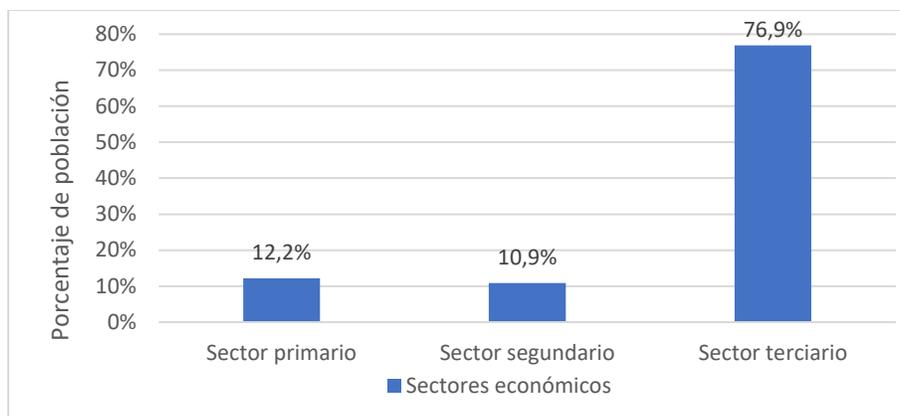


Gráfica 1. Porcentajes de actividades económicas según sector en el cantón de Santa Cruz, Guanacaste. Años 1973, 1984 y 2000.

Fuente: (INEC, 2009). Censo Nacional de Población y Vivienda 1973, 1984 y 2000.

En cuanto a las alternativas socio-productivas del cantón, a través del estudio se hace evidente el cambio de actividades propias del sector primario hacia actividades del sector terciario o de servicios. La importancia relativa de cada sector en menos de 30 años pasa de un 65% de actividades del sector primario a un 65% de actividades del sector terciario; esto marca un cambio agresivo en la dinámica económica, social, política, ambiental y cultural de los pobladores (Villareal et al., 2010).

Para el año 2011, gracias a los censos poblacionales que realiza el Instituto de Estadística y Censos (INEC), se determinó que aumentó el cambio en los sectores económicos del cantón de Santa Cruz, la gran mayoría de los pobladores se dedican a laborar en el sector terciario. Esto se logra observar con mayor claridad en la gráfica 2.



Gráfica 2. Porcentaje de población Santacruceña ocupada en el sector primario, secundario y terciario, año 2011.

Fuente: (INEC, 2011).

Aunque el sector económico terciario es el más predominante en el cantón de Santa Cruz, aún existen personas que se dedican al sector primario y esto se ve reflejado dentro de la subcuenca del río Santa Bárbara, en donde se logra visualizar, por medio de imágenes satelitales, que dentro de esta área de estudio se encuentran grandes parcelas pastizales y cultivos.

2.4 Clima del área de estudio

La subcuenca del río Santa Bárbara se ubica dentro de la región climática Pacífico Norte, específicamente en la unidad peninsular, allí se registran un promedio de lluvia anual entre los 1500- 2500 mm (línea base anual 1961-1990) con un total de 80 días de lluvia y temperaturas que variaron entre los 22.1°C y 33.0 °C. (Instituto Metrológico Nacional, 1990).

La temporada de lluvia dura 8,1 meses, del 12 de abril al 14 de diciembre. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 26 de septiembre, con una acumulación total promedio de 198 milímetros. Por otro lado, el periodo del año sin lluvia dura 3,9 meses, del 14 de diciembre al 12 de abril. La fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 25 de febrero, con una acumulación total promedio de 1 milímetros. (Weather Spark, 2016).

3) CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

Para facilitar la comprensión de las discusiones a lo largo de este documento se presentarán definiciones de palabras claves, conceptos hidrológicos relacionados con los parámetros morfométricos de la cuenca y también las nociones más específicas como máximas avenidas, hidrogramas, periodos de retorno, son importantes para la comprensión y e integración de fundamentos técnicos que serán desarrollados en este documento. También se definirá el concepto de socavación, modelamiento hidrológico, modelamiento hidráulico y levantamiento topográfico.

3.1 Parámetros de forma de la cuenca

3.1.1 Área

Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido de forma directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 (Cardona, 2012).

3.1.2 Perímetro

El Perímetro (P) corresponde con la longitud del polígono que define los límites de la cuenca y depende de la superficie y forma. Este dato normalmente se expresa en metros o kilómetros.

3.1.3 Longitud de la cuenca

Es la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (punto de desfogue) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Cardona, 2012).

3.1.4 Factor de forma de Horton

Es uno de los parámetros que explica la elongación de una cuenca. Se expresa como la relación entre el área de la cuenca y la longitud de esta. El parámetro está definido por la expresión (1):

(1)

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

Ff = Factor de forma
A = Área de la cuenca en km²
L = Longitud de la cuenca en Km

Fuente: Córdova, 2016.

Si la forma de la cuenca es aproximadamente circular, entonces el valor de Ff se acercará a uno. Mientras que, las cuencas más alargadas, tendrán un Ff menor (Córdova, 2016).

Tabla 1. Rangos aproximados del Factor de Forma.

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Pérez, 1979.

3.1.5 Coeficiente de compacidad (Kc)

Establece la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área equivalente a la superficie de la cuenca correspondiente. Este índice representa la forma de la superficie de la cuenca, según su delimitación, y su influencia sobre los escurrimientos y el hidrograma resultante de una precipitación (López & Mintegui, 1987).

El coeficiente de compacidad se obtiene de la fórmula (2):

(2)

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

Kc = Coeficiente de compacidad
P = Perímetro de la cuenca en Km
A = Área de la cuenca en Km²

Fuente: Córdoba, 2016.

Cuando el valor de Kc tienda a uno, la cuenca tendrá una forma casi circular. Esto significa que las crecientes tendrán mayor coincidencia debido a que los tiempos de concentración de los diferentes puntos de la cuenca serán iguales. En cuencas muy alargadas, el valor de Kc sobrepasa a 2.

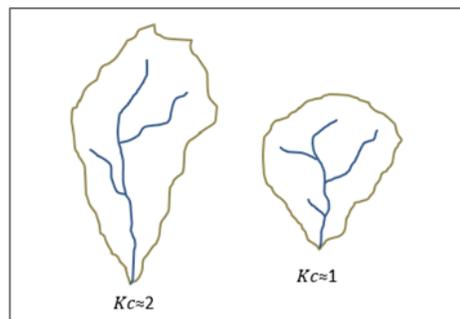


Imagen 6. Comparación de la forma de cuencas según valores del Coeficiente de Compacidad.

Fuente: Córdoba, 2016.

3.2 Parámetros de relieve

3.2.1 Curva hipsométrica

En términos simples, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. Esto lo podemos ver de una forma más sencilla en la siguiente imagen:

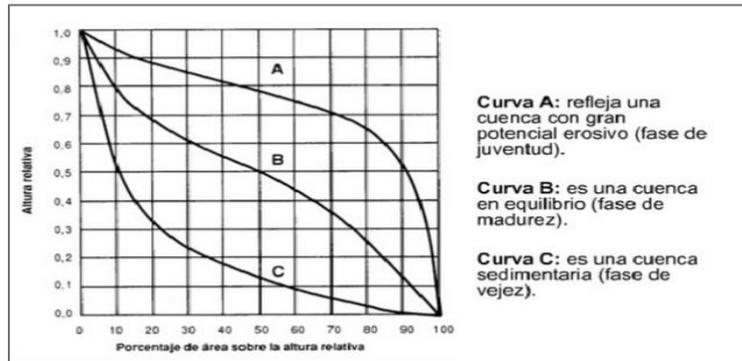


Imagen 7. Diferentes comportamientos de una curva hipsométrica según sus altitudes.

Fuente: Rojas, 2015.

3.2.2 Pendiente media

Es la variación de la inclinación de una cuenca. En zonas de altas pendientes se presentan, con mayor frecuencia, problemas de erosión, mientras que en zonas de baja pendiente predominan los problemas de drenaje y sedimentación. La pendiente media de la cuenca se calcula con la ecuación 3.

(3)

$$S_m = \frac{L \cdot D}{A}$$

Dónde:

- S_m : Pendiente media de la cuenca
- D : Diferencia entre curvas de nivel
- L : Longitud total de las curvas de nivel
- A : Área de la cuenca

Fuente: Min ambiente, 2021.

El resultado de la ecuación 3 se puede interpretar utilizando la tabla 2.

Tabla 2. Relación de la pendiente media de una cuenca y su tipo de relieve asociado.

Pendiente media (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Medianamente accidentado
12-20	Accidentado
20-35	Fuertemente accidentado
35-50	Muy fuertemente accidentado
50-75	Escarpado
>75	Muy escarpado

Fuente: Min ambiente, 2021.

3.3 Parámetros de drenaje

3.3.1 Red de drenaje

La Red de drenaje de una cuenca se refiere a las trayectorias que guardan entre sí los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Es otra característica importante en el estudio de una cuenca ya que manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir la rapidez, con la que desaloja la cantidad de agua que recibe. (Villón, 2004).

3.3.2 Orden de cauces

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca.

Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se une, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

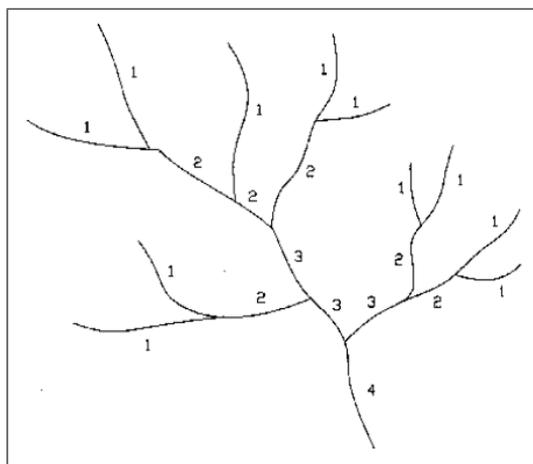


Imagen 8. Numeración de orden de corrientes según Horton.

Fuente: Horton, 1945 citado por Cardona, 2012.

3.3.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración consiste en la duración necesaria para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca llegue al punto de salida o desembocadura (Córdova, 2016). El cálculo para estimar el tiempo de concentración se muestra en el anexo 3.

3.4 Fundamentos teóricos de la hidrología

3.4.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es “un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o ‘divisoria de aguas’ se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río” (Ramakrishna, 1997 citando en Rodríguez, 2006: 115).

3.4.2 Hidrograma

“El hidrograma de una corriente es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo arregladas en orden cronológico en un lugar dado de la corriente” (Villón, 2004).

3.4.3 Máximas avenidas o caudales máximos

El estudio de máximas avenidas se realiza para conocer, con cierto nivel de confianza, la máxima magnitud de la descarga en un determinado punto del cauce. Este dato es

fundamental para el diseño de estructuras hidráulicas. La selección de un caudal de diseño menor a esta magnitud traerá como consecuencia el colapso de la estructura; y, por el contrario, la selección de un caudal de diseño mayor a esta magnitud implicará un sobre dimensionamiento de esta (Cardich, 2017).

Según Molina (1975), la máxima descarga de un río es el caudal que ha superado a todas las demás observadas durante un periodo dado. Cuando este periodo de tiempo es anual, el conjunto de descargas máximas forma una serie anual.

3.4.4 Periodos de retorno

En áreas de la ingeniería, el periodo de retorno es el tiempo esperado o tiempos medio entre dos sucesos de baja probabilidad. Por ejemplo, en la ingeniería hidráulica es el tiempo medio entre dos avenidas con caudales iguales o superiores a uno determinado. Suele ser requisito fundamental para el diseño de obras de ingeniería, ya que permite establecer el valor mínimo de un determinado parámetro (precipitación de lluvia) que debe ser soportado por la obra para considerar que es suficientemente segura (Acebey, 2019).

3.4.5 Socavación

La socavación es un proceso que resulta de la acción erosiva del flujo de agua que arranca y acarrea material de lecho y de las márgenes de un cauce, haciendo que disminuya el nivel del río por el incremento de su capacidad de arrastre de sedimentos. Este proceso ocurre cuando una corriente de agua encuentra un obstáculo, originándose un desequilibrio entre la cantidad de sedimentos aportados a una sección y la capacidad de transportar sedimentos fuera de ella, por lo cual, se modifican las condiciones de escurrimiento y se cambia la capacidad de arrastre en los alrededores de la obstrucción (Quispe, 2019).

Los factores que influyen en la socavación pueden ser divididos en dos grandes grupos: las características del cauce (geomorfología, topografía y características del sedimento) y las del flujo (régimen de flujo y características del fluido) (Borges, 2008 citado en Quispe, 2019: 20).

3.5 Fundamentos teóricos de la modelación hidrológica e hidráulica

3.5.1 Modelamiento hidrológico

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el llevar a cabo el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados... además, gracias al modelamiento hidrológico, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia (Cardich, 2017).

3.5.2 Modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS es un modelo lluvia-escorrentía, que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia. Es un programa muy flexible que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación. La simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de estos eventos (Cardich, 2017).

3.5.3 Modelamiento hidráulico

La simulación hidráulica cuando logra representar el flujo (tridimensional) de un río con detalle que un simple cálculo teórico, aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas. Esto significa que los diseños se ajustan más a las solicitaciones reales del flujo, lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado, se disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas; mientras que por otro lado también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. Este modelo es utilizado, entre otras cosas, para diseño de diques y paredes de contención sobre la erosión de los lechos (Cardich, 2017).

3.5.4 HEC-RAS

El programa HEC-RAS fue diseñado de manera que, por medio de la elaboración de modelos, se pueda realizar cálculos hidráulicos en una dimensión con régimen permanente para una red completa de cauces abiertos, canales, ríos ya sean naturales o artificiales. El objetivo del programa HEC-RAS es calcular las elevaciones de las superficies de agua en cualquier ubicación de interés ya sea para un conjunto dado de datos de flujo (simulación de flujo permanente) o a través del tránsito de hidrogramas por medio del sistema. (Simulación de flujo no permanente) (Cardich, 2017).

3.6 Software utilizados para realizar el procesamiento de datos

Para procesar toda la información necesaria para la modelación hidrológica e hidráulica se utilizan distintos softwares los cuales son los siguientes:

3.6.1 Microsoft Excel

Excel es un software de aplicación publicado por la empresa Microsoft, que brinda soporte digital a las labores contables, financieras, organizativas y de programación, mediante hojas de cálculo (Raffino, 2020). Este software no posee un costo financiero debido al uso con licencia de estudiante, será utilizado para procesar los datos de precipitaciones.

3.6.2 QGIS

Es un sistema de información geográfica de software libre que permite capturar, visualizar, analizar, modificar y compartir información geográfica (Mancomún, 2018). Para el proyecto será utilizado para generar mapas de localización de la zona de estudio con ayuda de documentos SHP e imágenes satelitales.

3.6.3 AutoCAD CIVIL 3D

Es un software utilizado para diseñar y generar documentación de proyectos de ingeniería civil. Este software soporta el diseño de proyectos de alta complejidad (Imasgal, 2021). Esta herramienta será utilizada para la revisión y procesamiento de los datos topográficos necesarios para la modelación, además, será utilizado con una licencia de estudiante, por lo que no generará costos al proyecto.

Como conclusión se determina que conocer los términos y parámetros anteriores es fundamental para poder comprender el universo de la modelación hidráulica e hidrológica de un río. En el capítulo 4 se expondrán todos los estudios de prefactibilidad que permiten dar viabilidad al proyecto.

4) CAPÍTULO 4: PREFACTIBILIDAD DEL PROYECTO

En este capítulo se realizaron cinco estudios de prefactibilidad del proyecto los cuales son:

- Estudio ambiental
- Estudio legal
- Estudio técnico
- Estudio financiero
- Estudio social

Todos los anteriores fueron elaborados con la finalidad de poder determinar si existe alguna limitante que comprometa la prefactibilidad del proyecto.

4.1 Estudio ambiental

Un estudio de impacto ambiental hace relación con un análisis tipo predictivo que, por medio de un proceso sistemático, permite conocer, describir, identificar y valorar correctamente los posibles efectos que la ejecución del proyecto pueda causar sobre los distintos aspectos socio ambientales (SENARA, 2021).

La finalidad del presente proyecto es realizar un estudio hidrológico e hidráulico para generar información básica que sirva para el diseño de obras de contención que mitiguen o eliminen el problema de socavación de las carreteras que se encuentran ubicadas en los márgenes del río Santa Bárbara.

La resolución N°2373-2016-SETENA de la comisión plenaria establece que existen obras que son consideradas como proyectos de muy bajo impacto ambiental. Por tal razón y según la resolución mencionada, estas obras no requieren ser sometidas a un proceso de estudio de impacto ambiental ante la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) debido a que posee muy bajo impacto ambiental. Dentro de esta misma resolución, específicamente en el

artículo 5, se enlistan los proyectos que son eximidos de un estudio de impacto ambiental, dentro de este listado, específicamente en el punto 40, se encuentran las obras de contención.

La modelación hidrológica e hidráulica forman parte de los estudios preliminares que se deben realizar para levantar una obra de contención, por ende, estos estudios hidrológicos forman parte de un proyecto que se encuentra eximido de un estudio de impacto ambiental debido a que su impacto en el ambiente normalmente es muy bajo, concluyendo de esta forma que el proyecto a realizar cuenta con viabilidad ambiental.

4.2 Estudio legal

Un estudio legal implica la revisión de todo el marco de gobernanza legal que esté relacionada con las actividades de un proyecto. Es vital conocer las leyes, normativas y reglamentos que regulen la ejecución del proyecto a desarrollar ya que los aspectos legales pueden restringir la localización del proyecto y obligar a desarrollar mayores costos por transporte (Sapag, et al., 2014, p.33).

Para el proyecto de modelamiento hidrológico e hidráulico no existe una ley que regule, de forma directa, la ejecución de los modelamientos y los estudios hidrológicos e hidráulicos, sin embargo, existen leyes, normativas y resoluciones que tienen relación inmediata con el recurso hídrico y su preservación. También se analizó el marco de gobernanza legal que menciona las obligaciones que tienen las municipalidades en materia de mantenimiento de vías públicas.

Para la ejecución de un estudio hidrológico, no se identificó una ley o reglamento que controle este tipo de proyectos, sin embargo, si existe un marco de gobernanza legal que se relaciona indirectamente con las actividades del proyecto y que serán respetados en todo el transcurso del proyecto, por tal razón se concluye que este estudio cuenta con viabilidad legal.

Tabla 3. Marco de gobernanza legal referente proyecto.

Marco de Gobernanza legal	Descripción	Relación con el proyecto
Constitución Política de la República de Costa Rica	Artículo 50: Todas las personas tienen derecho a un ambiente sano y seguro.	La socavación de las carreteras produce un alto riesgo de que ocurra un accidente.
Ley Orgánica del Ambiente N°7554.	Artículo 17: Toda actividad humana que altere el ambiente o genere residuos tóxicos o peligrosos deberá ser evaluado por medio de un estudio de impacto ambiental.	El proyecto por realizar genera el mínimo impacto ambiental posible, por tal razón, no requiere de un estudio de impacto ambiental.
Ley Orgánica del Ambiente N°7554.	Artículo 51: Se debe proteger, conservar y recuperar los ecosistemas acuáticos, además, se debe conservar todos los componentes de la cuenca hidrográfica.	El modelamiento implica un estudio hidrológico en donde se analizan todos los componentes de una cuenca y las actividades que puede alterar el escurrimiento superficial.
Ley de Aguas N°276	Artículo 1: Los ríos y sus afluentes en general son aguas de dominio público	Las aguas del río Santa Bárbara son de dominio público
Ley de Aguas N°276	Artículo 89: Los dueños de predios lindantes con cauces públicos tienen libertad de poner defensas contra las aguas en sus respectivas márgenes siempre y cuando esta no altere el comportamiento habitual del río o cauce el curso del agua.	Las obras de contención que se elaboren en los márgenes de los ríos no deben cambiar el curso del agua.
Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N°8488.	Artículo 14: Una de las funciones de la CNE es fomentar la ejecución de estudios e investigaciones que permitan la mitigación de los desastres	El proyecto generará información importante para la mitigación de desastres.
Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N°8488.	Artículo 25: Es obligación del estado prevenir los desastres, por cuanto, las instituciones deben incluir en sus programas, los conceptos de riesgo y desastre.	Las crecidas del río Santa Bárbara aumentan el riesgo de que suceda un desastre puntual como el colapso de la vía por socavación total.
Resolución N°2373-2016-SETENA	Esta resolución indica que existen obras y proyectos que no requieren ser sometidas a un estudio de impacto ambiental por parte del SETENA debido a su bajo impacto potencial.	Los estudios hidrológicos e hidráulicos son incluidos implícitamente, dentro de las labores o proyectos que no requieren de un estudio de impacto ambiental.

Marco de Gobernanza legal	Descripción	Relación con el proyecto
Ley General de Caminos Públicos	El artículo 1 indica que la administración de la red vial cantonal les corresponde a las municipalidades.	La municipalidad de Santa Cruz es la institución que deberá administrar las obras de contención que se realicen en las carreteras de Santa Bárbara.
Ley Orgánica del Ambiente N°7554.	Artículo 30: Uno de los criterios de ordenamiento territorial es establecer un equilibrio entre asentamientos humanos y sus condiciones ambientales	El modelamiento de ríos permite determinar el área inundable, esta información es vital para un buen ordenamiento territorial.
Ley Orgánica del Ambiente N°7554.	El artículo 53 indica que, para proteger y aprovechar el suelo, se considerarán las prácticas u obras de conservación de suelos y aguas que prevengan el deterioro del suelo.	El proyecto busca generar criterios hidrológicos de diseño para una obra de contención que ayudará a frenar la erosión de los suelos por el impacto del agua.
Ley Forestal N°7575	Artículo 30: explica que existe un área de protección de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado.	Es importante conocer y respetar el área de protección que se encuentra en la margen del río Santa Bárbara.
Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N°8488.	Artículo 14: La CNE debe asesorar a las municipalidades para reducir la vulnerabilidad de los habitantes ante una condición de riesgo.	La construcción de vías seguras, sin peligros de socavación, permite reducir la vulnerabilidad de los usuarios ante un accidente.
Ley de construcciones	El artículo 1 menciona que las municipalidades son las encargadas de que las ciudades y demás poblaciones reúnan las condiciones necesarias de seguridad, salubridad, comodidad, y belleza en sus vías pública.	Este artículo indica que le corresponde a la municipalidad de Santa Cruz velar por el buen funcionamiento de las vías públicas del respectivo cantón.
Código Municipal N°7794.	Artículo 5: Las municipalidades deben fomentar la participación del pueblo en las decisiones del gobierno local	Para cumplir con el artículo mencionado, se realizará un estudio social del proyecto.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.3 Estudio Técnico del proyecto

Un estudio técnico de un proyecto consiste en analizar los requerimientos de todas las herramientas y equipos que se deben utilizar para llevar a cabo el proyecto. También permite conocer los costos financieros que se generan producto de la adquisición de equipos, materia prima y demás herramientas utilizadas a lo largo de la obra o proyecto (Sapag, et al., 2014, p.32).

Para la ejecución de este estudio técnico se utilizarán diferentes softwares, datos de precipitaciones, levantamientos topográficos entre otros. Los requerimientos del proyecto serán separados por 3 diferentes etapas:

- 1- Procesamiento de datos.
- 2- Ejecución del modelamiento.

4.3.1 Procesamiento de datos

Los datos que serán procesados corresponden a datos de precipitaciones de estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y archivos SHP de interés del proyecto y levantamiento topográfico. Los datos de precipitaciones y levantamiento topográfico serán brindados por la municipalidad de Santa Cruz, mientras que los archivos SHP e imágenes se encuentran en internet y no poseen ningún costo.

Para realizar los procesamientos de los datos necesarios para realizar el modelamiento del río Santa Bárbara se utilizan las siguientes herramientas: Microsoft Excel, QGIS, Auto CAD CIVIL 3D, la descripción de estos softwares se encuentra en la sección 3.6.1 del presente documento.

4.3.2 Ejecución del modelamiento

En este apartado se exponen los softwares que serán necesarias para realizar la modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara. Se utiliza el programa HEC-HMS y HEC – RAS.

A) HEC-HMS

Como se mencionó en el apartado 3.5.2, HEC-HMS es un modelo lluvia-escorrentía, que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de

la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia (Cardich, 2017). Este es un modelo gratuito que se será utilizado para estimar caudales máximos del río Santa Bárbara.

B) HEC-RAS

En la sección 3.5.4 del presente documento se define HEC-RAS como un modelo de simulación hidráulica que permite conocer alturas de columna de agua, velocidades del río y otros parámetros hidráulicos (Cardich, 2017). Este modelo tiene la ventaja de ser gratuito y será utilizado para generar una simulación hidráulica del río Santa Bárbara ante eventos de precipitaciones máximas.

Finalmente se concluye que se cuenta con acceso a todas las herramientas, datos, softwares y modelos que se requieren para la ejecución del proyecto, por cuanto existe viabilidad técnica de la labor a realizar.

4.4 Estudio financiero

Los estudios financieros tienen como propósito el ordenamiento y sistematización de los ítems de inversiones, costos e ingresos que puedan deducirse de los estudios previos y que forman parte de todas las actividades monetarias que se efectúan a lo largo de las diferentes etapas del proyecto (Sapag, et al., 2014, p.34).

Su principal función se deduce en analizar la rentabilidad financiera del proyecto, señalar posibles costos directos e indirectos del proyecto y compararlos con los ingresos, o en este caso con los costos evitados.

4.4.1 Egresos del proyecto

Con costos directos corresponden a los que guardan una estrecha relación con el desarrollo de un proyecto concreto mientras que los costos indirectos no se atribuyen directamente a las actividades propias del proyecto y, por otro lado, no son exclusivos del proyecto en sí. (Pérez, 2020).

Tabla 4. Costos directos del proyecto a desarrollar.

Costos directos del proyecto					
Actividad	Precio unitario	Cantidad	Unidad	Costo (colones)	Observaciones
1. Levantamiento topográfico	₡700 000	0.796	km	₡465 000	Pagado por la municipalidad
2. Datos meteorológicos	45 000	1	global	₡45 000	Pagado por la municipalidad
3. Licencia de software	₡0	3	global		
3.1 QGIS	₡0	1	global	₡0	Software libre
3.2 HEC-HMS	₡0	1	global	₡0	Software libre
3.3 HEC - RAS	₡0	1	global	₡0	Software libre
3.4 AutoCAD CIVIL 3D	₡1 503 160	1	global	₡0	Licencia de estudiante
Total				₡510 000	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El principal costo directo necesario para llevar a cabo el proyecto corresponde al levantamiento topográfico. En proyectos de modelación de ríos, los levantamientos topográficos, normalmente son los costos de mayor valor, para el de este proyecto, la municipalidad de Santa Cruz asumirá el egreso correspondiente a la topografía de los 796 metros de cauce del río Santa Bárbara.

Una gran ventaja financiera que posee el proyecto es que no se requiere hacer inversión en para hacer uso de los diferentes softwares que se utilizarán ya que la mayoría son programas completamente gratuitos a excepción de AutoCAD CIVIL 3D que su licencia posee un costo anual de ₡1 503 160 colones, sin embargo, para efectos de este proyecto, se hará uso de la licencia gratuita para estudiantes la cual tiene una vigencia de 1 año.

Tabla 5. Costos indirectos del proyecto a desarrollar.

Costos indirectos del proyecto					
Actividad	Precio unitario	Cantidad	Unidad	Costo (colones)	Observaciones
1. Visitas de campo		3	Global		
1.1 Viáticos	₡3 500	3	Global	₡10 500	Almuerzos
1.2 Kilometraje	₡51	42	km	₡2 145	Motocicleta Yamaha 125 cc
1.3 Papelería e impresión	₡80 000	1	Global	₡80 000	Pagado por el autor
1.4 Insumos de oficina	₡30 000	2	Global	₡30 000	Pagado por el autor
Total				₡122 645	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los costos de papelería e impresión corresponden al costo indirecto más elevado, este valor responde a que, al finalizar el proyecto, este se deberá de imprimir por completo para entregar una copia a las instituciones involucradas, en este caso a la Municipalidad de Santa Cruz y a la Universidad Nacional.

El costo del kilometraje fue obtenido de acuerdo con el oficio R-DC-68-2020 de la Contraloría General de la República, en donde se obtuvo el costo por kilómetro según la antigüedad de la motocicleta que será utilizada por el autor para trasladarse a la zona de estudio.

Tabla 6. Egresos totales del proyecto

Egresos totales del proyecto	
Costos directos	₡510 000
Costos indirectos	₡122 645
Imprevistos (10%)	₡220 110
Utilidad (10%)	₡220 110
IVA 13%	357 222
Total	₡1 430 087

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Finalmente se muestran los egresos totales del proyecto, tomando como imprevistos un 10% de la sumatoria entre los costos directos e indirectos, para las utilidades se obtuvo el mismo porcentaje realizando el mismo procedimiento.

4.4.2 Ingresos del proyecto

El proyecto por ejecutar no cuenta con ingresos financieros que ayuden a solventar los egresos, sin embargo, estos gastos serán asumidos por la municipalidad de Santa Cruz y por el autor de este documento. Los egresos serán vistos como una inversión social que ayudará a la comunidad de Santa Bárbara de Santa Cruz, a poner en marcha la solución de la problemática de erosión de los márgenes del río que está exponiendo la estabilidad de las carreteras del pueblo que se encuentran estos márgenes.

4.4.3 Costos evitados

El proyecto de modelamiento hidrológico e hidráulico del río Santa Bárbara será el primer paso que dará el gobierno local en la carrera por solucionar la socavación de las carreteras de la comunidad. Es por esta razón que la ejecución del proyecto le permitirá, a la

municipalidad, tomar acciones y decisiones para poder evitar costos de rehabilitación de las carreteras afectadas por la erosión de las márgenes del río.

Para estimar los metros de carretera que se ven afectados y amenazados por la erosión de las márgenes del río, se realizó un análisis con imágenes satelitales supervisando los tramos seleccionados por medio de la visita de campo, en total se estima un total de 700 metros de carretera afectada por esta problemática.

Para poder estimar los costos de rehabilitación de los 700 metros de carretera se creó la siguiente fórmula:

$$CR: CKM \times KM \times FSC \times FM$$

CR: Costo de rehabilitación

CKM: Costo de rehabilitación por kilómetro

KM: Cantidad de kilómetros del proyecto (0,7km)

FSC: Factor de sobre costo

FM: Factor macroeconómico

Según (Lanamme, 2017) el costo promedio de rehabilitación por kilómetro (CKM) de una carretera de asfalto es de \$129 517, este dato corresponde a los costos promedios de obras realizadas hace 20 años.

Para este caso se utilizará el valor en colones. Según (Banco Central de Costa Rica, 2021) el tipo de cambio del día 11 de junio del 2021, la venta del dólar corresponde a \$ 620.54, por lo tanto, se realiza la siguiente conversión:

$$\text{Colones} = \$129\,517 * \$620.54$$

$$\text{Colones} = \text{₡}80\,370\,479$$

Finalmente, CKM= ₡80 370 479.

El valor de *CKM* corresponde a un promedio de costos hace 20 años, por esta razón se estimó la inflación promedio anual de costos de los últimos 20 años que según (Banco Central de Costa Rica, 2021) es de 0,5%, concluyendo de esta manera que el *Factor macroeconómico (FM)*, para este caso, es 0,5%.

El *factor de sobre costo (FSC)* se determinó que corresponde al 20% según la recomendación de del ingeniero Rolando Madriz Vargas.

$$CR: \text{€}80\,370\,479 \times 0.796 \text{ km} \times 1.20 \text{ (adimensional)} \times 1,005 \text{ (adimensional)}$$

$$CR: \text{€}77\,153\,730 \text{ colones}$$

Se determina que el valor de los costos evitados por el proyecto es: *€77 153 730 colones*.

Como resumen del estudio financiero se concluye que los egresos del proyecto son de *€2 747 865*, estos gastos serán cubiertos en su totalidad por la municipalidad y por el autor, por lo tanto, el proyecto cuenta con viabilidad financiera. Además, los costos evitados por el proyecto son de *€77 153 730 colones*, estos superan los egresos de este trabajo lo cual es un indicador de que la ejecución del proyecto debe llevarse a cabo.

La determinación de los costos evitados por un proyecto ayuda a resaltar la importancia del trabajo por realizar y refuerza la necesidad de llevarlo a cabo si se desea prever posibles gastos a futuro.

4.5 Estudio Social

“La evaluación social de proyectos compara los beneficios y costos que una determinada inversión tener para la comunidad de un país en su conjunto” (Sapag, et al., 2014, p.34).

Es muy importante conocer la perspectiva social del proyecto, los pobladores tienen el derecho de evaluar si el desarrollo de un proyecto en su comunidad genera un impacto negativo o positivo. La viabilidad social depende de la aceptación por parte de los pobladores de la zona de estudio y del gobierno local.

Los estudios hidrológicos tienen la ventaja de ser un proyecto que no genera alteraciones o modificaciones en el ambiente de las comunidades, por esto se considera que este tipo de estudios, normalmente, no presentan un rechazo social por parte de los pobladores, sin embargo, para el desarrollo del modelamiento hidrológico e hidráulico del río Santa Bárbara se realizarán consultas a instituciones y personas de gran importancia para la comunidad.

Para llevar a cabo el desarrollo del estudio de la prefactibilidad social se utilizó el método de muestreo Bola de Nieve el cual consiste en un muestro no probabilístico, en donde se

selecciona a los llamados stakeholder del proyecto, a estas personas se les realiza una serie de consultas y por último se les solicita que recluten a otros participantes o stakeholder del proyecto, para una prueba o estudio. En total se realizaron 3 consultas, las cuales se encuentran en el anexo 1. Los stakeholder del proyecto se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Stakeholder entrevistados para conocer la prefactibilidad del proyecto.

Entrevistado	Puesto
Jorge Alfaro Órias	Alcalde de Santa Cruz
Dixabeth Matarrita	Alcaldesa y presidenta del CNE
Diego Rodríguez	Director del desarrollo urbano de la municipalidad de Santa Cruz
Carlos Barrenechea	Síndico del distrito Diríá
Jenaro Ruíz	Sub- director de Obras Fluviales MOPT

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Diego Rodríguez es el director del desarrollo urbano de la municipalidad de Santa Cruz, durante la entrevista realizada mencionó que, para el gobierno local, el desarrollo del proyecto es de gran importancia debido a que generará información hidrológica que ayudará a establecer una solución a largo plazo de la problemática de la erosión de las carreteras y le permitirá garantizar el tránsito seguro para los habitantes de la comunidad de Santa Bárbara (Rodríguez, 2021).

Mientras que Don Jorge Alfaro Órias y Dixabeth Matarrita, ambos representantes de la alcaldía de Santa Cruz, comentaron que están totalmente de acuerdo con la ejecución del modelamiento hidrológico e hidráulico debido a que esto generará un beneficio para el desarrollo de Santa Bárbara (Órias y Matarrita, 2021).

Como conclusión se determina que todos los entrevistados mostraron completa aceptación y apoyo para llevar a cabo el proyecto de modelamiento hidrológico e hidráulico del río Santa Bárbara por lo que se establece que existe prefactibilidad social.

5) CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

La metodología de proyectos es la disciplina de conocimiento encargada de elaborar, definir y sistematizar el conjunto de técnicas, métodos y procedimientos que se deben seguir durante el desarrollo de un proyecto para la producción de los productos o servicios que supone (Universidad Internacional de La Rioja, 2020). También explica las herramientas a utilizar y el aporte de estos para la materialización del proyecto. Las actividades que se van a abordar en la sección metodológica están separadas según las dos fases de la elaboración de un proyecto las cuales son: el anteproyecto y el desarrollo del proyecto o puesta en marcha del proyecto.

5.1 Actividades del anteproyecto

Antes de iniciar con la ejecución de un proyecto se debe realizar un reconocimiento de la zona donde se va llevar, se debe analizar las condiciones en las que se encuentra el lugar, pero además es importante asegurarse que el proyecto sea una obra alcanzable, aceptable, que no posea ninguna restricción o problema social, económico, legal o técnico que pueda paralizar el proyecto o en los peores casos, impedir que este se lleve a cabo. Es por lo anterior que se desarrolló un anteproyecto para comprender el contexto que engloba la puesta en marcha del proyecto, las actividades que se ejecutaron se muestran en el siguiente diagrama de procesos y posteriormente, con mayor detalle, en la tabla 8:

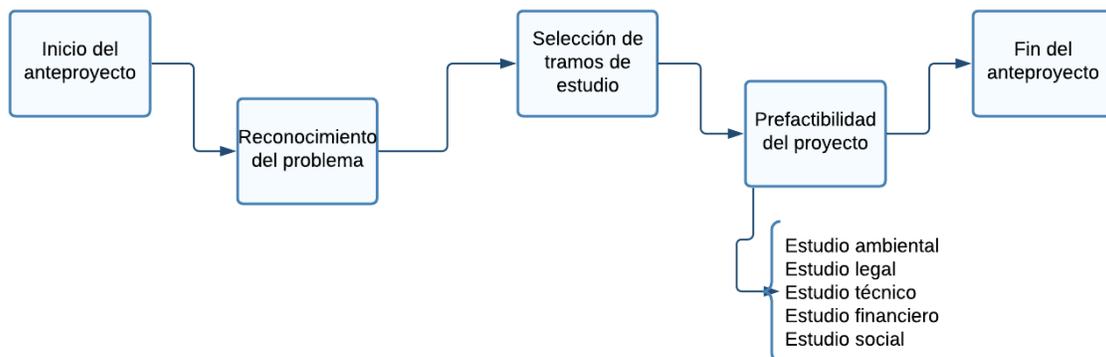


Imagen 9. Metodología seleccionada para llevar a cabo el anteproyecto de la modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 8. Descripción de las actividades del anteproyecto de la modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara.

Actividad	Método	Tipo de muestreo	Dato obtenido	Tipo de dato
Visita al sitio del proyecto	Notas de campo	No probabilístico	Fotografías, anotaciones y puntos de referencia	Cualitativo y cuantitativo
Selección de los tramos de estudio	Reunión con stakeholders	No probabilístico, intencional	Secciones del cauce por modelar	cuantitativo

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En el cuadro anterior se muestra a detalle las actividades que se fueron desarrollando en el anteproyecto, cabe destacar que los estudios de prefactibilidad del proyecto no están incluidas debido a que fueron descritas en el capítulo 4.

Para la selección de los tramos de estudio se realizó un muestreo intencional, seleccionando dos tramos sobre el cauce del río Santa Bárbara, en donde se evidencia una mayor afectación a sus cauces, producto de la erosión. En estos dos sectores se realizará la modelación hidrológica e hidráulica para poder comprender el comportamiento hidráulico del río en ambos sectores.

5.2 Actividades del desarrollo del proyecto

Una vez que se ha realizado el anteproyecto y se determina que no existen problemas legales, económicos, sociales, técnicos o ambientales al llevar a cabo el proyecto, se procederá a realizar su desarrollo, durante alrededor de 5 meses se llevarán a cabo todas las actividades que se muestran en el siguiente diagrama:

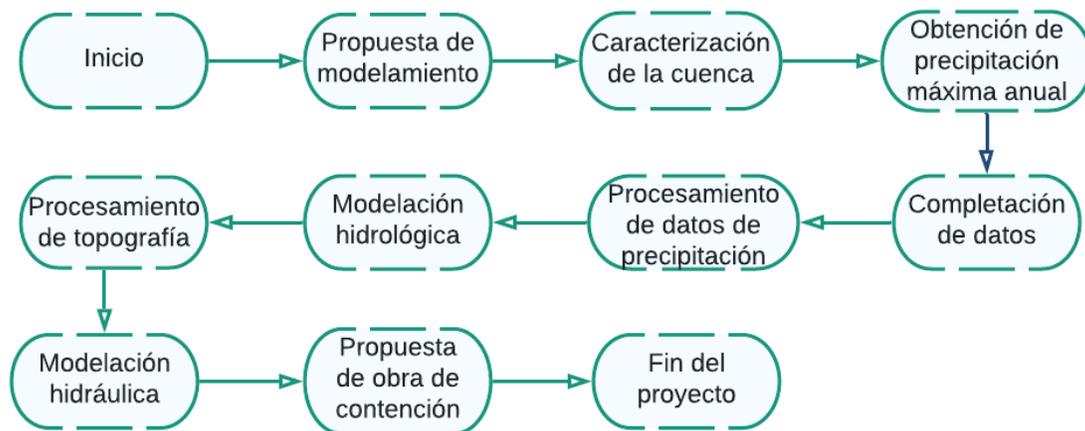


Imagen 10. Actividades estratégicas para la ejecución del desarrollo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2.1 Propuesta de modelamiento

Se iniciarán las actividades propias del desarrollo del proyecto por medio de la propuesta de modelamiento hidrológico e hidráulico. Para ello se utilizará un muestreo intencional el cual consiste en seleccionar un tramo del río Santa Bárbara (específicamente en el sector “La Cueva del León”) donde la afectación por socavación es mayor, dentro de este trayecto se encuentran los puntos que han sufrido más daño por socavación de carreteras y propiedades privadas producidas por el río Santa Bárbara. Además, este tramo seleccionado se encuentra muy cerca del centro de la comunidad, por lo que es de gran importancia conocer el comportamiento del río en esta zona, principalmente para prever algún otro problema ocasionado por la acción del río Santa Bárbara.

5.2.2 Caracterización de la cuenca

Este es un proceso preliminar importante en donde se determinará la morfología de la cuenca realizando un modelo de elevación digital (MED) utilizando las curvas de nivel que se encuentran en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). La caracterización de la cuenca se subdivide en los parámetros de forma de la cuenca, relieve y drenaje.

5.2.2A Parámetros de forma de la cuenca

La caracterización de la forma de la cuenca se realizará según el cuadro que se muestra en el anexo 2, en donde se determinaran los parámetros de: *factor de forma*, *índice de compacidad*,

área, perímetro y longitud de cuenca. Los últimos tres parámetros serán calculados con el software QGIS.

El Factor de Forma (ver anexo 2) se determina con la relación entre el ancho sobre la longitud de la cuenca, los resultados pueden variar según estas dos longitudes. La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por esta razón, es importante calcular este parámetro.

Para determinar el Índice de Compacidad se calcula el índice de Gravelius (ver anexo 2) el cual tratar de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía, particularmente en las características del hidrograma. Un valor de $K= 1$ es un indicador de que la cuenca posee forma circular mientras que para cuencas más alargadas $K > 1$.

5.2.2B Parámetros de relieve de una cuenca

Las características de relieve de la cuenca que se calcularán en este proyecto son: relieve, elevación máxima, media y mínima, pendiente y curva hipsométrica. Todos los parámetros mencionados se estimarán utilizando el software QGIS.

Para determinar el relieve de la cuenca de río Santa Bárbara se realiza, en el software QGIS, un modelo de elevación digital (MED) a partir de las curvas de nivel cada 10 metros que se encuentran disponibles en la página del SNIT. Una vez obtenidas las curvas de nivel se generará un MED utilizando los comandos *v.to.rast* y *r.surf.contour* que se encuentra en la caja de herramientas del software QGIS. Para calcular la elevación máxima, mínima y media de la cuenca se utilizará la herramienta de perfil de terreno de QGIS.

La curva hipsométrica se generó utilizando la herramienta “curva hipsométrica” de QGIS utilizando el MED con su archivo vectorial, además de la información tabulada en un archivo “csv”.

5.2.2C Parámetros de drenaje de la cuenca

Los parámetros de drenaje de la cuenca que serán estudiados en el presente proyecto son el tiempo de concentración (t_c) y las órdenes de corrientes, el método de cálculo utilizado se muestra en el anexo 3. Para estimar el tiempo de concentración se utilizará la fórmula de Kirpich en donde L = longitud máxima a la salida (m) y S = pendiente media del lecho (m/m).

5.2.3 Obtención de la precipitación máxima anual.

Para llevar a cabo la modelación hidrológica e hidráulica se necesita contar con información meteorológica de la zona de estudio, por lo que, para efectos de este proyecto, se utilizará el dato de precipitación máxima anual de la estación meteorológica Hacienda Pinilla que cuenta con un periodo de registro de 23 años (1998-2020), esta información será facilitada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

5.2.4 Complementación de datos

Si en el registro histórico de lluvia máxima anual hay datos faltantes se utilizará el método de Media Aritmética para la complementación de datos faltantes siempre y cuando estos sean inferiores al 10% de los datos totales.

La media aritmética es un tipo de media que otorga la misma ponderación a todos los valores. Se obtiene a partir de la suma de todos los valores dividida entre el número total de sumandos (López, 2020). Se selecciona esta metodología debido a su facilidad de aplicación.

5.2.5 Procesamiento de datos de precipitación

Para procesar los datos de precipitación se generarán curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) a partir de los datos de lluvia obtenidos de la estación Hacienda Pinilla.

Las curvas IDF representan la magnitud de la lluvia fuerte expresada en milímetros por hora para un periodo de tiempo determinado. Asimismo, son necesarias para generar el hietograma de la precipitación la cual es la representación gráfica de la lluvia en función del tiempo. Una vez que se obtiene el hietograma de lluvia se puede realizar la modelación hidrológica.

5.2.6 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica se realizará para distintos periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Además, se utilizará utilizando como fundamento teórico el método de Número de Curva, el cual se desarrollará de manera semiautomática con ayuda del software de modelación HEC-HMS.

Método de Número de Curva del SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía (P_0) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Numero de Curva toma un valor de 0 a 100

según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad (Villegas, 2017).

Para determinar el CN, primeramente, se debe de seleccionar la condición de humedad de la cuenca según la precipitación que haya caído en los 5 días anteriores a un evento de precipitación máxima, la clasificación se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 9. Clasificación según las condiciones de humedad antecedente en la zona de estudio.

Condición de humedad antecedente (CHA)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento
I	0-33mm
II	33-52.5 mm
III	Más de 52.5 mm

Fuente: Gómez y Monge, 2019.

Seguidamente se debe de conocer las características físicas de los tipos de suelos presente en la cuenca en estudio, para clasificarlos según su respectivo grupo hidrológico de suelo, en donde el tipo A corresponde a suelos con gran capacidad de infiltración y baja escorrentía mientras que en el grupo D se encuentran suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración bajas. Se utiliza la siguiente tabla para realizar la clasificación.

Tabla 10. Grupos hidrológicos de suelos según sus características físicas.

Grupo hidrológico de suelo	Composición	Características
A	Arena profunda, limos agregados	Bajo potencial de escurrimiento
B	Marga arenosa	Moderado-bajo potencial de escurrimiento
C	Margas arcillosas, suelos con bajo contenido orgánico	Moderado-alto potencial de escurrimiento
D	Suelos expansivos, arcillas plásticas, suelos salinos	Alto potencial de escurrimiento

Fuente: (Béjar, 2004).

Una vez que se obtuvo la condición de humedad y el grupo hidrológico de suelos, se debe obtener el CN según los diferentes usos de suelo que se encuentra en la cuenca en estudio, esto se realiza con ayuda de la siguiente tabla.

Tabla 11. Números de Curva para distintos tipos de suelo y uso de suelo correspondientes a la condición de humedad II.

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Fuente: (Chow, et al., 1994).

Una vez seleccionado el CN se realiza la modelación la cual dará como resultado Hidrogramas de Caudales que determinarán el caudal máximo para el respectivo periodo de retorno. Este dato, en conjunto con la topografía del cauce fluvial, es requerido para realizar la modelación hidráulica en la zona estudiada.

5.2.7 Procesamiento de datos topográficos

Se necesita conocer la topografía del tramo del río Santa Bárbara ubicado en el sector la “Cueva del León”, para poder realizar la simulación hidráulica, es por esta razón que el departamento de topografía de la municipalidad de Santa Cruz realizará un levantamiento topográfico del trayecto mencionado y este será el insumo que se validará a través del software AutoCAD CIVIL 3D, se revisará que no existan errores en el perfil topográfico y de existir alguno se procederá a realizar la corrección respectiva.

5.2.8 Modelación hidráulica

Para realizar la modelación hidráulica sobre el trayecto seleccionado, se requiere conocer de los siguientes datos:

- Topografía del cauce
- Coeficiente de rugosidad
- Hidrograma de caudales máximos.

La topografía de la zona será un insumo que brindará la municipalidad de Santa Cruz, se utilizará un coeficiente de rugosidad del cauce del río (0,035) y el hidrograma de caudales máximos será obtenido del resultado de la modelación hidrológica. El software utilizado será HEC RAS debido a que este brinda confianza en los resultados arrojados y posee la virtud de determinar la altura de la columna de agua, este último dato es de gran importancia puesto que permite conocer si esta altura es superior al margen del río, de ser así existirá peligro de inundaciones.

5.2.9 Propuesta de obra de contención.

Una vez que se obtienen los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico se procederá a tomar la información obtenida para seleccionar la obra de contención que mejor se adapte a las condiciones de la zona de estudio y, sobre todo, que brinde solución a la problemática de socavación de los márgenes del río Santa Bárbara.

5.3 Diagrama de trabajo del proyecto

Todas las actividades por realizar conllevan un tiempo estimado el cual será distribuido según lo que se muestra en el siguiente diagrama:

Tabla 12. Distribución de todas las actividades del desarrollo del proyecto a lo largo de 5 meses.

Meses	Julio		Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
Semanas	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
V PARTE. OBTENCIÓN DE DATOS																		
Datos de precipitación máxima anual	■	■																
Levantamiento topográfico		■	■	■														
Complementación de datos de lluvia				■														
Generación de curvas IDF					■													
Generación de hietograma						■												
VI PARTE. MODELACIÓN HIDROLÓGICA																		
Modelación con HEC-HMS							■	■										
Revisión del modelo									■									
VII PARTE. MODELACIÓN HIDRÁULICA																		
Revisión de la topografía									■	■	■							
Modelación con HEC-RAS												■						
Revisión del modelo													■	■				
VIII PARTE. ELABORACIÓN DEL ESCRITO																		
Correcciones															■	■		
Entrega del escrito a la coordinación																	■	■

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se logra ver en el diagrama anterior, el proyecto tendrá una duración de 5 meses para poner en desarrollo todas las actividades que no se han realizado en el anteproyecto. El levantamiento topográfico y el procesamiento de esta información es la labor que más tiempo requiere por su complejidad y principalmente por qué se debe de levantar el tramo sobre el cauce del río Santa Bárbara. Las demás actividades poseen una duración de 1-2 semanas como promedio.

5.4 Diseño metodológico vs objetivos específicos

El diseño metodológico del desarrollo del proyecto (imagen 9) muestra todas las actividades que se desarrollarán para poder realizar la modelación hidrológica e hidráulica. Estas diligencias fueron establecidas con la finalidad de cumplir con cada uno de los objetivos específicos del presente documento, es por esta razón que, en la tabla 9, se muestra la relación que tienen los objetivos específicos.

Tabla 13. Descripción de las principales actividades propias al desarrollo del proyecto y su relación con el cumplimiento de los objetivos específicos.

Actividad	Número de objetivo específico*	Metodología	Tipo de muestreo	Dato obtenido	Tipo de dato
Propuesta de modelamiento	2	Muestro intencional	No probabilístico	Dos secciones del río a modelar	Cuantitativo
Caracterización de la cuenca	2	Morfometría de cuenca	No probabilístico	Parámetros de la cuenca	Cuantitativo
Obtención de precipitación máxima anual	1	Revisión de base de datos	No probabilístico	Registro histórico, estación Hacienda Pinilla	Cuantitativo
Complementación de datos	1	Media aritmética	No probabilístico	Datos faltantes del registro histórico	Cuantitativo
Procesamiento de datos de precipitación	1	Curvas IDF e Hietograma	No probabilístico	Curvas IDF e hietograma	Cuantitativo
Modelación hidrológica	2	Número de curva	No probabilístico	Hidrograma de caudales máximos	Cuantitativo
Procesamiento de datos topográficos	3	Uso de software Auto CAD CIVIL 3D	No probabilístico	Curvas de nivel de los tramos a modelar	Cuantitativo
Modelación hidráulica	3	Uso de software HEC RAS	No probabilístico	Secciones hidráulicas	Cuantitativo
Propuesta de obra de contención	4	Resultados obtenidos vrs revisión de literatura	No probabilístico	Obra de contención recomendada	Cualitativo

**Objetivos específico:*

1. Recopilar y procesar datos meteorológicos mediante la revisión de la base de datos de la estación meteorológica Hacienda Pinilla, para la determinación de caudales máximos.
2. Realizar un estudio hidrológico enfocado en la determinación de caudales máximos mediante la utilización del programa HEC-HMS para conocer la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Santa Bárbara.
3. Realizar un modelamiento hidráulico en un tramo de 3 kilómetros sobre el cauce del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste mediante el levantamiento topográfico y el uso del software HEC RAS, para la determinación de las características hidráulicas del río en el tramo de estudio.
4. Proponer acciones y recomendaciones para la implementación de obras hidráulicas con el fin de prevenir la erosión de las carreteras producto de la corriente del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como conclusión se determina que el proyecto demanda diferentes actividades hidrológicas por realizar en donde se tiene como fin poder conocer el comportamiento del río Santa Bárbara en eventos de lluvias máximas para comprender el por qué se está dando la socavación de las márgenes del río y establecer una recomendación de una posible solución como lo podría ser una obra de contención.

6) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados del estudio hidrológico

Se inicia estudiando las características morfométricas de la subcuenca del río Santa Bárbara, en donde se determinaron los parámetros más importantes de relieve, forma y drenaje de la subcuenca, con la finalidad de expresar la geometría y relieve de la subcuenca en análisis numéricos.

6.1.1 Características de forma de la subcuenca del río Santa Bárbara.

Es la configuración geométrica de la cuenca tal como está proyectada sobre el plano horizontal. La forma incide en el tiempo de respuesta de la cuenca, es decir, al tiempo de recorrido de las aguas a través de la red de drenaje, y, por consiguiente, a la forma del hidrograma resultante de una lluvia dada (Galvez, 2011).

Lo mencionado en el texto anterior deja en claro de que la respuesta hidrológica de la cuenca está determinada por diferentes factores, entre ellos, su forma. Pueden existir dos cuencas con igual área y perímetro que si su forma es distinta, la respuesta hidrológica, ante un evento de precipitación, será desigual para ambas cuencas.

Tabla 14. Características de forma de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Características de forma de la cuenca	Unidades	Dato
Área	Km ²	59.7
Perímetro	Km	39.2
Largo	Km	12.2
Ancho	Km	10.7
Longitud axial	Km	15.4
Factor de forma	Adimensional	0.25
Coefficiente de compacidad	Adimensional	1.42

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La subcuenca del río Santa Bárbara está conformada por un área total de 59.7 km², este terreno se encuentra, en mayor extensión, dentro del distrito Diríá de Santa Cruz y el distrito de Nicoya correspondiente al cantón Nicoyano. Posee un perímetro de 39.2 km. Según

(Villón, 2004), se considera una cuenca pequeña aquella cuya área varíe desde unas pocas hectáreas hasta un límite de 250 km², por lo que este argumento afirma que la cuenca del río Santa Bárbara es de menor tamaño.

El factor de forma de Horton (Kf) de la cuenca corresponde a 0.25, al comparar este resultado con la tabla 1, rangos aproximados del Factor de Forma, se determina que la cuenca posee una forma alargada debido a que se encuentra entre el rango 0.22-0.30. Hidrológicamente se comenta que una cuenca con un valor Kf bajo, está menos sujeta a otra cuenca con misma área, pero con un valor de Kf más alto. Los valores de Kf pueden ir desde <0.22 hasta >1.20.

La cuenca del río Santa Bárbara posee un coeficiente de compacidad (Kc) de 1.42. Recordando lo indicado en la sección 3.1.5, un valor de Kc de 1 indica que la cuenca posee una forma casi circular mientras que un Kc igual o mayor a 2 corresponde a una cuenca alargada. Para el caso de la cuenca del río Santa Bárbara, el resultado fue un valor intermedio indicando que posee una forma ovalada, en donde se determina que la cuenca posee medianas posibilidades de producir avenidas máximas.

6.1.2 Características de relieve de la subcuenca del río Santa Bárbara.

Para poder conocer mejor el relieve de la cuenca se realizó un mapa donde se ilustran las diferentes elevaciones del terreno, las cuales también se encuentran tabuladas en la siguiente tabla:

Tabla 15. Características de relieve de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Características de relieve de la cuenca	Unidades	Dato
Pendiente media	%	13.6
Elevación máxima	m.s.n.m.	580
Elevación mínima	m.s.n.m.	25
Elevación media	m.s.n.m.	166.2

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La pendiente media de la cuenca arrojó un valor de 13.6%, al comparar este dato con la tabla 2, se determina que la cuenca del río Santa Bárbara posee un tipo de relieve clasificado como accidentado el cual corresponde a valores de pendiente media entre 12% y 20%.

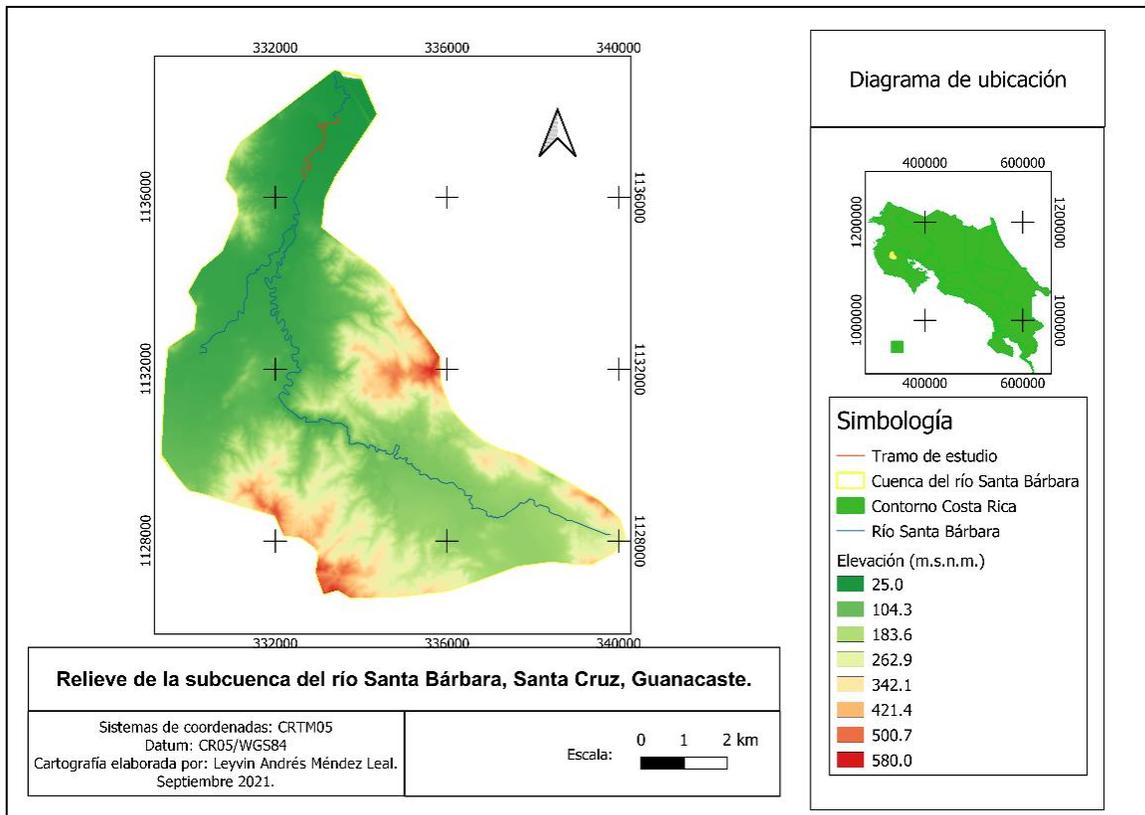


Imagen 11. Modelo digital de elevaciones de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se ilustra en el mapa de relieve, las cotas máximas de la cuenca se encuentran entre la cuenca media y alta, siendo 580m.s.n.m. la elevación mayor, entre la cuenca media y baja se puede observar una gran planicie de aproximadamente 25 m.s.n.m., estas diferentes de elevación contribuyen a que en las partes bajas de la cuenca el río Santa Bárbara tienda a generar problemas como desbordamiento del cauce pluvial y problemas erosivos.

Otro parámetro de relieve de una cuenca es su curva hipsométrica, la cual constituye un criterio de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región. Además, refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca y la dinámica en el ciclo de erosión. Es la representación gráfica del relieve de la cuenca en función de las superficies correspondientes Díaz et al., (1999).

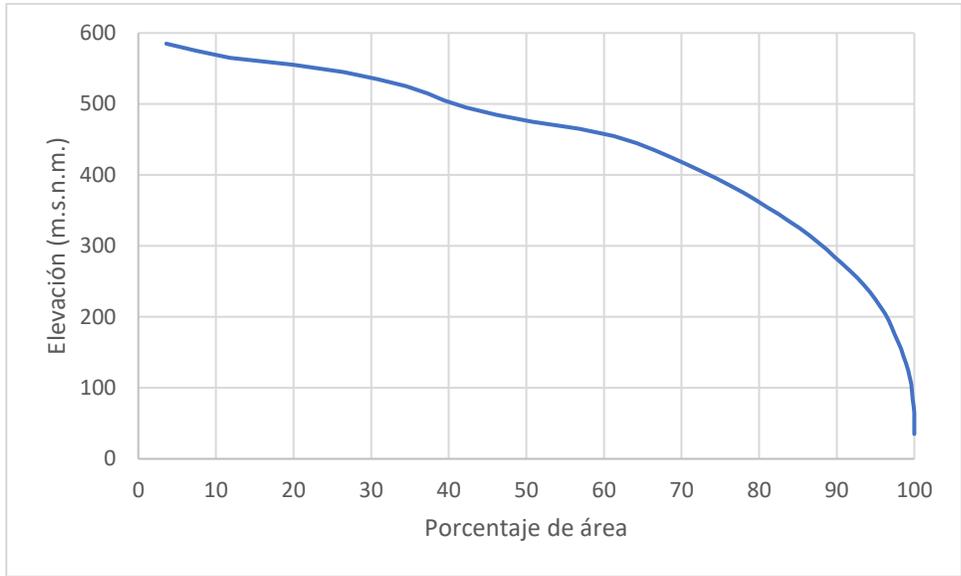


Imagen 12. Representación gráfica de las altitudes de la cuenca del río Santa Bárbara mediante la curva hipsométrica.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La imagen 12 representa el resultado de graficar las distintas elevaciones de la cuenca del río Santa Bárbara con el porcentaje de área que poseen dichas elevaciones, para poder interpretar el significado del comportamiento de la curva, se muestra la siguiente imagen:

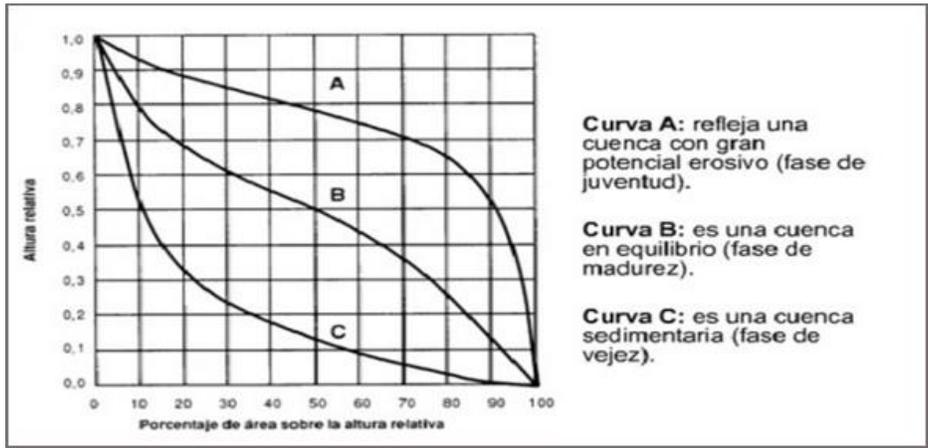


Imagen 13. Diferentes comportamientos de una curva hipsométrica según sus altitudes vs porcentaje de área.

Fuente: Rojas, 2015.

Como se logra apreciar, existe una gran similitud entre la curva de la cuenca del río Santa Bárbara y la curva A de la imagen anterior, este comportamiento alude a una cuenca que se

encuentra en su fase de juventud, por lo tanto, posee un gran erosivo el cual se ha evidenciado mediante la socavación de las carreteras que se encuentran en la parte baja de la cuenca.

6.1.3. Características de drenaje de la subcuenca del río Santa Bárbara.

Es de gran importancia conocer las características de drenaje de la cuenca ya que estos cauces son los que condicionan la descarga hidrológica de una cuenca, en la siguiente tabla se muestran alguno de estos parámetros.

Tabla 16. Características de drenaje de la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Características de drenaje de la cuenca	Unidades	Dato
Tiempo de concentración	Horas	2.04
Pendiente promedio del cauce principal	Porcentaje	0.84
Elevación máxima del cauce principal	m.s.n.m.	234.7
Elevación mínima del cauce principal	m.s.n.m.	25
Longitud de cauce principal	Km	25.02
Longitud total de drenajes	Km	87.32
Densidad de drenaje	Km/Km ²	1.46

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La subcuenca posee un tiempo de concentración alto debido a que la pendiente promedio del cauce principal es baja. No obstante, el cauce principal es sumamente largo (25,02 Km) por lo que le permite tener una mayor oportunidad de coleccionar y drenar el recurso hídrico que cae sobre la cuenca. Además, posee más de 87 km de longitud total de cauces que permiten drenar el agua.

La densidad de drenaje permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca.

Con ayuda de sistema QGIS se logró determinar que la cuenca del río Santa Bárbara posee una densidad de drenaje de 1.46 km/km², para catalogar una cuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, (Jiménez, 1992, citando en Gonzales y Sánchez 2013) considera que valores de densidad de drenaje próximos a 0.5 km/km² corresponden a una cuenca pobremente drenada mientras que valores de 3,5 km/km² o mayores indican una red

de drenaje eficiente, lo cual genera grandes volúmenes de escurrimientos, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas. Por lo que se determina que la cuenca del río Santa Bárbara posee una densidad de drenaje intermedia.

Para ilustrar la densidad de cauces que drenan las aguas recibidas en la cuenca del río Santa Bárbara se realizó un mapa donde se muestra la hidrografía de la zona y su respectivo orden de corrientes.

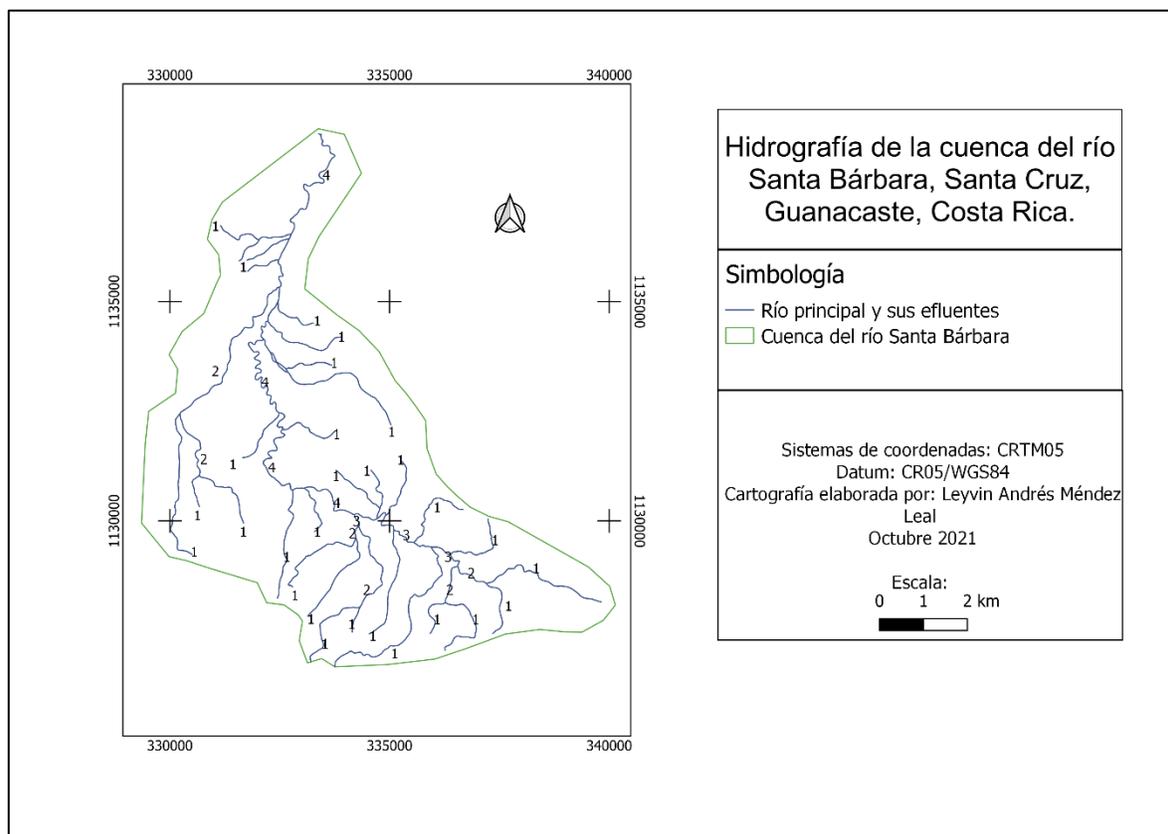


Imagen 14. Hidrografía y ordenes de corrientes de corrientes de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se logra observar que la cuenca posee una amplia hidrografía, que va desde pequeños canales de orden 1 hasta ríos con gran capacidad hídrica de orden 4.

6.1.4 Procesamiento de datos

Para poder realizar la modelación hidrológica de la cuenca del río Santa Bárbara se utilizaron los datos de precipitación máxima anual (PMA) de la estación meteorológica Hacienda

Pinilla, este registro posee un total de 22 años de datos que fueron colectados desde el año 1998 hasta 2020.

Tabla 17. Registro de precipitación máxima diaria de la estación meteorológica Hacienda Pinilla para un periodo de 23 años (1998-2020).

Año	Precipitación máxima anual (mm)	Año	Precipitación máxima anual 24 (mm)
1998	75.3	2010	101.1
1999	98.1	2011	93.7
2000	88.1	2012	124.7
2001	196.6	2013	60.7
2002	62.2	2014	89.1
2003	81.1	2015	66.9
2004	73.8	2016	77.8
2005	101.7	2017	236.7
2006	113.7	2018	133.4
2007	103.9	2019	93.7
2008	104.8	2020	128.8
2009	104.8		

Fuente: IMN, 2021.

Esta base de datos de PMA de la estación automática Hacienda Pinilla posee un faltante de datos de los años 2008 y 2009, por lo que se procedió a completar esa información utilizando el método estadístico llamado Media Aritmética, dando como resultado un valor de 104.8 mm.

La media aritmética muestra el valor central de los datos constituyendo ser la medida de ubicación que más se utiliza. En general, es calculada sumando los valores de interés y dividiendo entre el número de valor (Paz, s.f.). Este método estadístico puede ser empleado cuando los datos faltantes no superan el 10% del total de los datos. La PMA faltante en el registro de datos corresponden al 2.3%, dando factibilidad al uso del método.

6.1.5 Procesamiento hidrológico

1. Distribución de frecuencia de precipitaciones

Para realizar este proceso se utilizó la distribución de Gumbel, la cual, en la teoría de probabilidad y estadística, es utilizada para modelar la distribución del máximo, por lo que se usa para calcular valores extremos. La aplicabilidad potencial de la distribución de Gumbel para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos (Espirilla, 2020).

Los valores extremos se definen como aquellos eventos atípicos que están muy alejados de la media o de lo que se podría esperar; en la vida diaria se ven reflejados como eventos que pueden causar daño. (Ramos y Rodríguez, 2019).

En el anexo 4 se muestran las ecuaciones para utilizadas en la metodología de distribución de probabilidad Gumbel, sin embargo, este proceso se realizó de manera semiautomática con la ayuda de la herramienta Hidroesta 2, con un nivel de significancia del 5%, en donde se obtuvieron distintas precipitaciones para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años:

Tabla 18. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones máximas según el periodo de retorno respectivo, según el método de distribución Gumbel.

Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno según la distribución Gumbel			
Periodo de retorno (años)	Probabilidad de Excedencia $P = F(x)$	Probabilidad de no Excedencia $1-F(x)$	Precipitación máxima en 24hrs (mm)
5	50.0%	50.0%	131.82
10	20.0%	80.0%	153.78
25	10.0%	90.0%	181.54
50	2.0%	98.0%	202.12
100	1.0%	99.0%	222.56
500	0.2%	99.8%	269.78

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se observa que los datos de precipitación máxima podrían ser de 131.82 hasta 269.78, esto según su periodo de retorno. Cabe destacar que esta información es generada debido a que se necesita para realizar la curva de intensidad, duración y frecuencia, las cuales serán creadas con ayuda del modelo Dick Peschke.

2. Generación de Curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF).

Para la elaboración de las curvas de intensidad, duración y frecuencia de la zona de estudio, se utilizó el modelo Dick Pescheke.

Según (Arce, 2015) el modelo de Dyck y Peschke propone que las lluvias de corta duración, P_D , es función de la precipitación de 24 horas, en otras palabras, este criterio es aplicable a precipitaciones máximas de 24 horas, de acuerdo con la ecuación empírica que se muestra a continuación:

$$P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440} \right)^{0,25}$$

- P_D = Precipitación máxima de duración D , en mm
- P_{24h} = Precipitación máxima de 24 horas, en mm
- D = Duración de la precipitación, en horas

Los valores de P_D obtenidos mediante el cálculo anterior se encuentran en el anexo 4. Una vez calculados estos valores de precipitación máxima (P_D) se calculó la intensidad (I) de la precipitación mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{PD}{D}$$

PD = precipitación máxima de duración D , en mm

D = duración de la precipitación, en horas

Una vez obtenidos los resultados de precipitación e intensidad máxima, se elaboró el gráfico de las curvas IDF para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con la finalidad de comprender el comportamiento de la intensidad de precipitación registrada por la estación meteorológica Hacienda Pinilla durante los 23 años de registro.

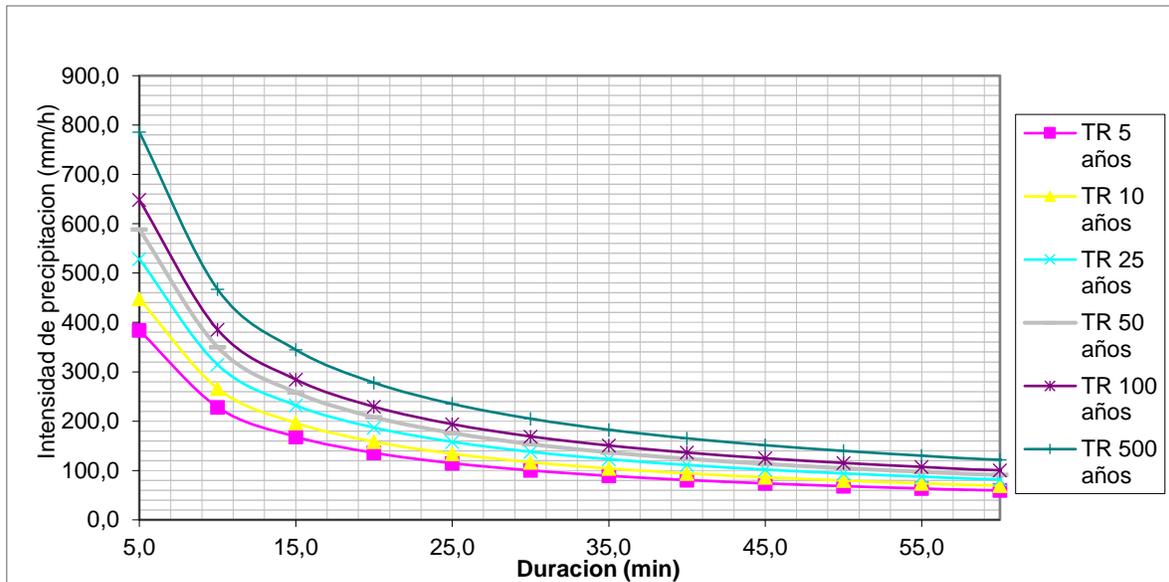


Imagen 15 Curvas de intensidad-duración-frecuencia elaboradas mediante los datos de precipitación obtenidos de la estación meteorológica Hacienda Pinilla, Santa Cruz Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Según la gráfica de curvas IDF se determina que existe un comportamiento de mayor intensidad de las precipitaciones en los primeros 30 minutos del evento, posterior a este dato, la intensidad mantiene un comportamiento casi lineal.

Estas curvas IDF son de gran utilidad, en muchos ríos del país no se cuenta con registros diarios de caudales, esto dificulta la construcción y diseño de infraestructura hidráulica como puentes, muros de contención, alcantarillado, entre otros, sin embargo, las curvas IDF permiten estimar un caudal máximo a partir de las intensidades de lluvia de una determinada duración.

3. Hietograma método de bloques alternos

Uno de los requisitos para realizar una modelación hidrológica es contar con hietogramas que representen el comportamiento de las precipitaciones máximas durante un periodo de tiempo específico. Los hietogramas se pueden generar a partir de las curvas IDF con las que ya se encuentra en este proyecto y una forma de realizar este ejercicio es mediante el Método de Bloques Alternos.

El Método de Bloques Alternos, según Chow et al., (1994), es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n\Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$, y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración.

Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño.

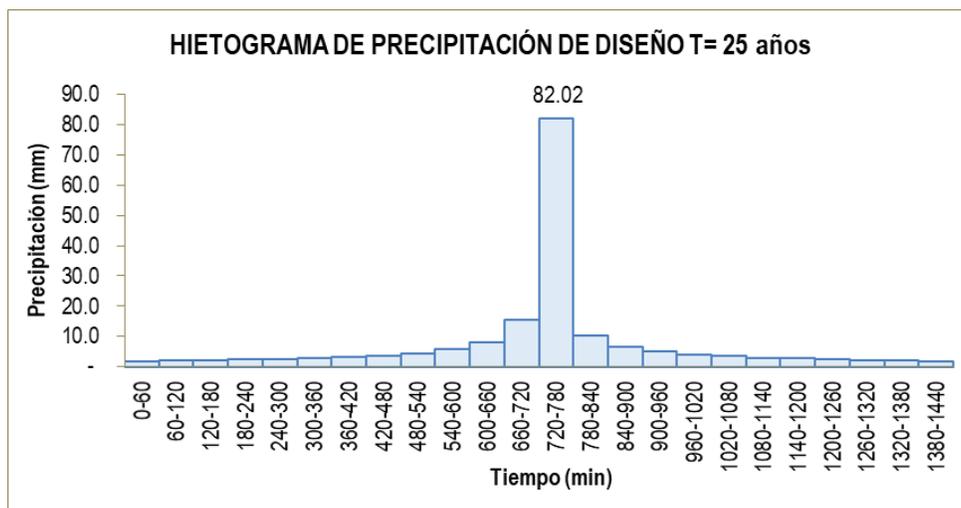


Imagen 16. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas elaborado según el método de bloques alteros para un período de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

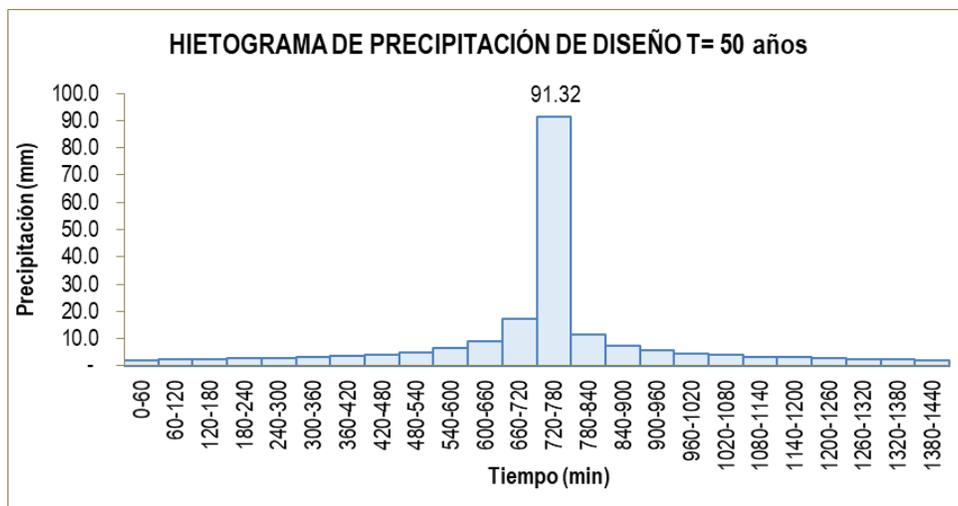


Imagen 17. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas elaborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 50 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las precipitaciones máximas que pueden caer en 60 minutos son 82,02 mm y 91.32 mm para los periodos de retorno de 25 y 50 años respectivamente. Esta información es ampliamente utilizada en estudios de eventos hidrometeorológicos para la prevención de desastres naturales.

4. Número de Curva de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Para poder estimar el CN de la cuenca en estudio se debe de contar con información cartográfica del tipo de suelo de la cuenca, ya que propiedades como su textura, tipo de suelo, permeabilidad y porosidad condicionan el escurrimiento superficial y la infiltración del agua. Por lo que se procedió a realizar el mapa de tipo de suelo de la cuenca del río Santa Bárbara.

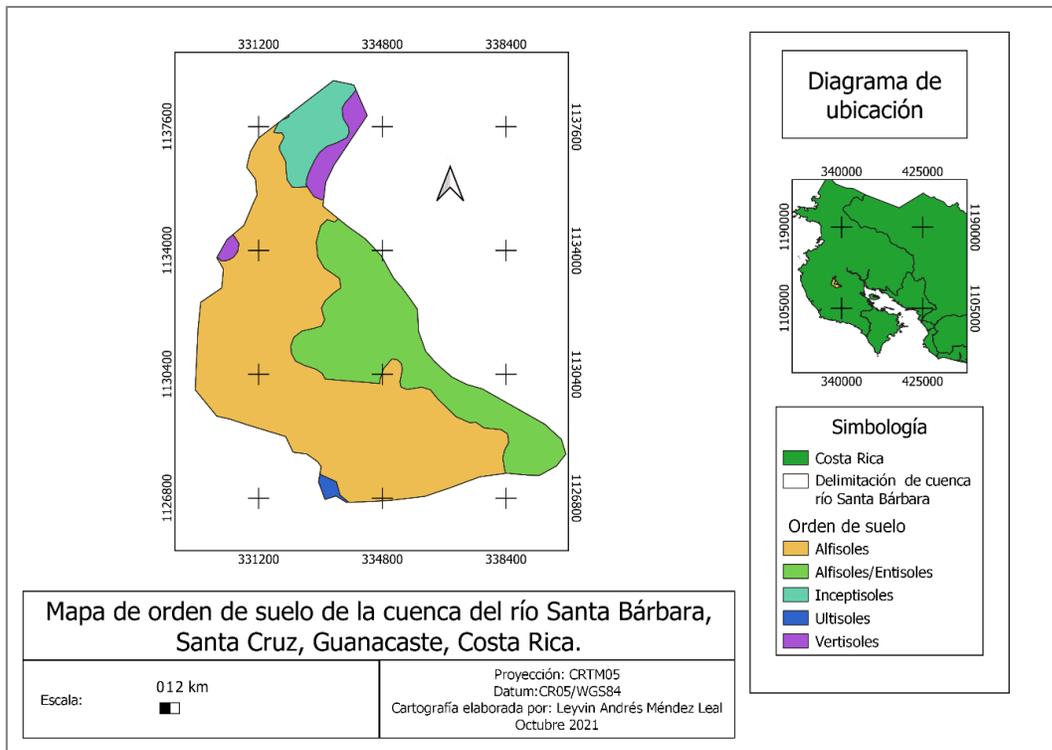


Imagen 18. Mapa de orden de suelos encontrados en la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Asimismo, se debe de contar con información de uso de suelo de la cuenca, puesto que la vegetación existente como pastizales, bosques y actividades antropogénicas como agricultura y asentamientos humanos, alteran las condiciones hidrográficas de la cuenca. Por tanto, se realizó el siguiente mapa de uso de suelo de la cuenca del río Santa Bárbara mediante la Clasificación Supervisada.

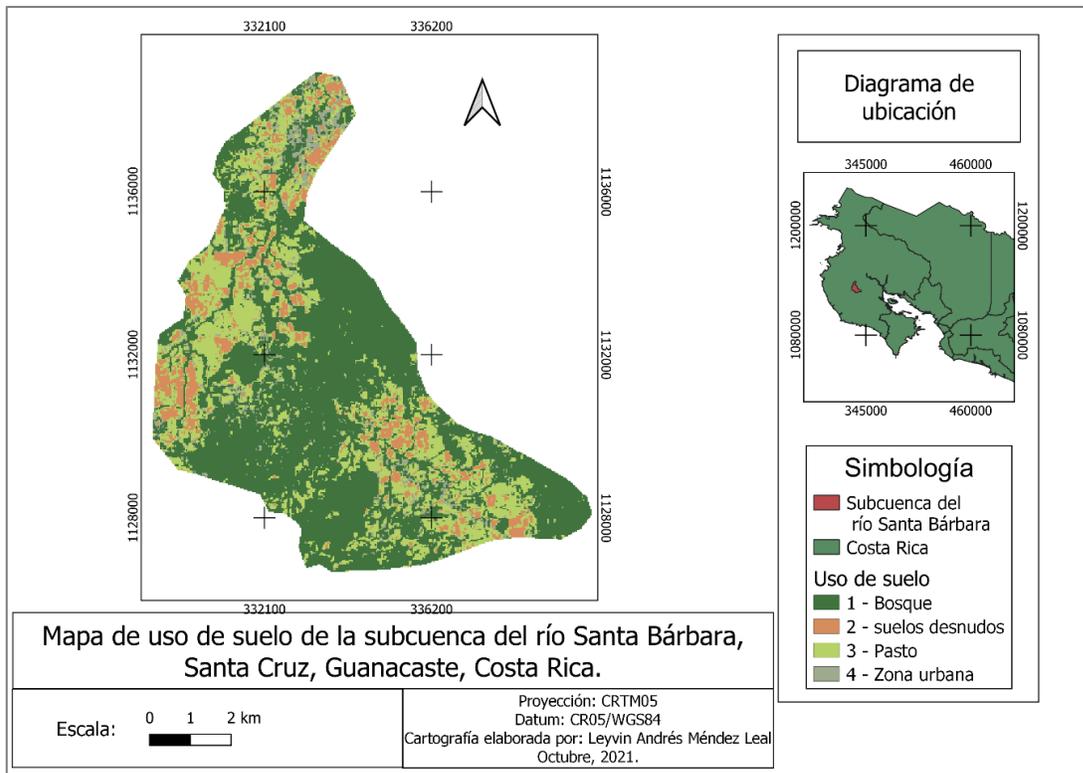


Imagen 19. Mapa de uso de suelo de la cuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para relacionar el uso de suelo con el tipo de suelo de la cuenca en estudio, se realizó una extrapolación de ambos mapas, el resultado de esta relación se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 19. Tipo de suelo para los distintos usos de suelo que se encuentran en la cuenca del río Santa Bárbara y su respectivo valor de CN.

Uso de suelo	Área	Porcentaje de área	Tipo de suelo	Grupo hidrológico de suelos	Valor de CN
Bosque	34.64	58.0	Alfisoles/Entisoles	B	66
Pastizales	16.267	27.3	Alfisoles/Inceptisoles	B	70
Suelos desnudos	5.319	8.9	Alfisoles	B	71
Zona urbana	3.473	5.8	Ultisoles/vertisoles	C	85

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Finalmente, al sacar un promedio de los valores de CN para la cuenca del río Santa Bárbara se determinó que el valor corresponde a $CN = 73$.

6.1.6 Modelaje con HEC HMS

Para desarrollar la simulación hidrológica de la subcuenca del río Santa Bárbara, se utilizó el método de Número de Curva, que permitió transformar los datos de precipitación máxima anual de la estación meteorológica Hacienda Pinilla, en datos de caudales máximos en 24 horas. Todo este proceso fue implementado con ayuda del software HEC HMS, como resultado se obtuvo los caudales máximos para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

La modelación se realizó ingresando los siguientes datos de la cuenca en el software HEC HMS:

- Área: 59.7 km^2
- Número de Curva: 73
- Tiempo de retraso ($0.6 \times$ tiempo de concentración): 73.44 minutos
- Hietograma de precipitaciones según periodo de retorno.

En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos de la modelación hidrológica según su respectivo periodo de retorno:

Tabla 20. Caudales máximos para distintos periodos de retorno obtenidos de la modelación hidrológica.

Periodo de retorno (años)	Caudal máximo en 24 horas (m^3/s)
5	319.6
10	396.7
25	497.2
50	573.2
100	648.4

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Otro de los resultados obtenidos de la modelación hidrológica fue el hidrograma de caudales el cual muestra el comportamiento de la escorrentía del río Santa Bárbara en función del

tiempo. Este fue graficado con un periodo de tiempo de 24 horas en el cual se muestra el valor de caudal cada hora para el respectivo periodo de retorno.

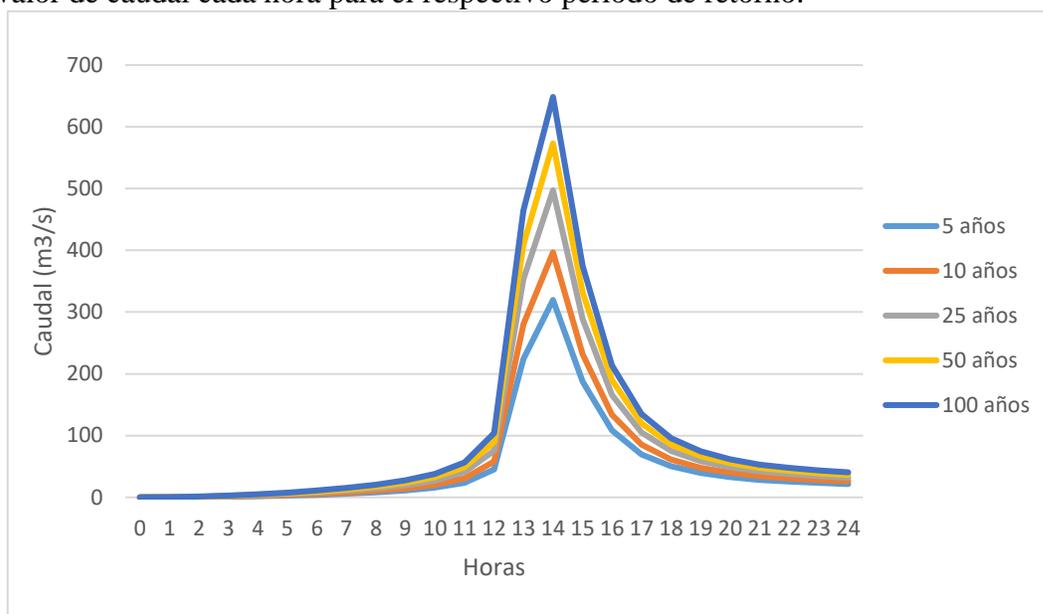


Imagen 20. Hidrograma de caudales máximos obtenidos en la modelación hidrológica del río Santa Bárbara para distintos periodos de retorno.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Cabe destacar que las transformaciones de precipitaciones máximas a caudales máximos dan como resultado una estimación de los posibles valores de caudal máximo que se presentan en un río. La mejor manera de poder verificar que estos datos estimados de caudal máximo representan el comportamiento real del río en eventos de precipitaciones máximas es mediante la comparación con valores de caudal medidos de forma directa en el río Santa Bárbara, sin embargo, este río, al igual que muchos en el país, no posee una estación hidrológica o un registro de medición de caudal por lo que es imposible realizar dicha comparación.

No obstante, se puede comparar el resultado de la modelación hidrológica del río Santa Bárbara con otros estudios hidrológicos realizados en cuencas cercanas o que posean características similares a la del río Santa Bárbara, esto con la finalidad de asegurarse que los caudales máximos obtenidos sean valores aceptables.

Análisis hidrológico de cauces de la cuenca del río Tempisque Involucrados en el proyecto de abastecimiento de agua para la cuenca media del río Tempisque y sus comunidades costeras (PAACUME).

Esta tesis fue desarrollada por Giancarlo Barquero Pizarro, en el año 2019, tuvo como objetivo general la construcción de los hidrogramas de crecida en los puntos de intersección de algunos cauces con el canal Oeste y el río Tempisque en el proyecto PAACUME.

El estudio hidrológico fue elaborado, de manera separada, para cada una de las subcuencas del río Tempisque. Para efectos comparativos y por su cercanía a la cuenca del río Santa Bárbara, se estudió las características hidrológicas de la subcuenca del río Diríá y la subcuenca del río Sardinal, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21. Características hidrológicas de las subcuencas del río Diríá y el río Sardinal según (Barquero, 2019).

Aspectos comparados	Unidad	Subcuenca río Diríá	Subcuenca río Sardinal
Área	Km ²	166	121
Long. Cauce	Km	31.1	23.1
Grupo hidrológico	Adimensional	C	C
NC	Adimensional	89	89
Periodo de retorno	Años	29.5	29.5

Fuente: Barquero, 2019.

Estas características hidrológicas fueron comparadas con los datos de la subcuenca del río Santa Bárbara en la siguiente tabla:

Tabla 22. Aspectos comparados correspondientes a las subcuencas del río Diríá, río Sardinal y río Santa Bárbara, Guanacaste, Costa Rica.

Aspectos comparados	Unidad	Subcuenca río Diríá	Subcuenca río Sardinal	Subcuenca río Santa Bárbara
Área	Km ²	166	121	59.7
Long. Cauce	Km	31.1	23.1	25
Grupo hidrológico	Adimensional	C	C	C y D
NC	Adimensional	89	89	73
Periodo de retorno	Años	29.5	29.5	25
Caudal máximo (Q _{max})	m ³ /s	872.3	663.3	497.2

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Al realizar la comparación de aspectos se logró observar que existe cierta similitud en la longitud de cauce, grupo hidrológico y el periodo de retorno de las tres cuencas. Esto permite poder relacionar los resultados obtenidos de la modelación hidrológica los cuales corresponden a los caudales máximos. Al comparar los valores de caudal máximo de las tres subcuencas se observa que los ríos Diriyá y Sardinal presentan un mayor valor de caudal que el valor del río Santa Bárbara, esto es un valor razonable y se debe a que las primeras dos cuencas poseen una mayor área de captación de lluvia que la cuenca del río Santa Bárbara.

Modelación hidrológica e hidráulica para la valoración del riesgo de inundación en un tramo del río Lepanto en la península de Nicoya, Costa Rica.

Este proyecto fue elaborado por Brainer sirias, en el año 2020, tuvo como objetivo general la realización modelaciones hidrológicas e hidráulicas que permitan determinar el riesgo que tiene un tramo del río Lepanto a los posibles escenarios de inundación.

La modelación hidrológica fue realizada por el método de Número de Curva, aplicado para la cuenca del río Lepanto, se utilizó diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25 50 y 100 años.

En la siguiente tabla se muestra algunas características hidrológicas de la subcuenca del río Lepanto según (Sirias, 2020), estos aspectos fueron comparados con las características de la subcuenca del río Santa Bárbara.

Tabla 23. Aspectos comparados correspondientes a las subcuencas del río Lepanto de Puntarenas, y subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Aspectos comparados	Unidad	Subcuenca río Lepanto	Subcuenca río Santa Bárbara
Área	Km ²	31.37	59.7
Long. Cauce	Km	11.26	25
Grupo hidrológico	Adimensional	C	C y D
NC	Adimensional	70.6	73

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La comparación de ambas cuencas es bastante similar, aunque se determina que el área de la subcuenca del río Santa Bárbara posee mayor espacio que la del río Lepanto, además, el cauce principal del río Santa Bárbara es significativamente más extenso que el cauce

principal del río Lepanto, por lo que se espera que este último río posea valores inferiores de caudales máximos.

Tabla 24. Caudales máximos obtenidos del río Lepanto según (Sirias, 2020) comparados con los caudales máximos obtenidos en el presente proyecto.

Periodo de retorno (años)	Caudales máximos	
	Río Lepanto	Río Santa Bárbara
5	132.92	319.6
10	187.08	396.7
25	256.9	497.2
50	304.72	573.2
100	355.71	648.4

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se determina que el río Santa Bárbara presenta mayor volumen de caudal máximo en todos sus periodos de retorno. Esto posiblemente esté relacionado con sus características hidrológicas que favorecen el escurrimiento superficial y, además, la subcuenca del río Santa Bárbara tiene mayor área de captación de lluvia que la subcuenca del río Lepanto.

Las comparaciones realizadas con las dos tesis anteriores ayudaron a determinar que los valores de caudal máximo obtenidos de la subcuenca del río Santa Bárbara son valores razonables y similares a los obtenidos en cuencas cercanas o con características similares, por lo que genera un nivel de confianza mayor y permite abrir paso a la modelación hidráulica.

6.2 Resultados del estudio hidráulico

La modelación hidráulica se realizó en un tramo del río Santa Bárbara, ubicado en el sector “La Cueva del León”. El software utilizado para llevar a cabo la simulación fue HEC RAS. En la siguiente sección se especifica la ubicación del tramo en estudio y sus características geofísicas.

6.2.1 Caracterización geofísica hidráulica del tramo de cauce del río Santa Bárbara ubicado en el sector “La Cueva del León”.

Para identificar con mayor claridad el tramo de cauce del río Santa Bárbara, donde se realizó la simulación hidráulica se procedió a realizar el siguiente mapa de ubicación:

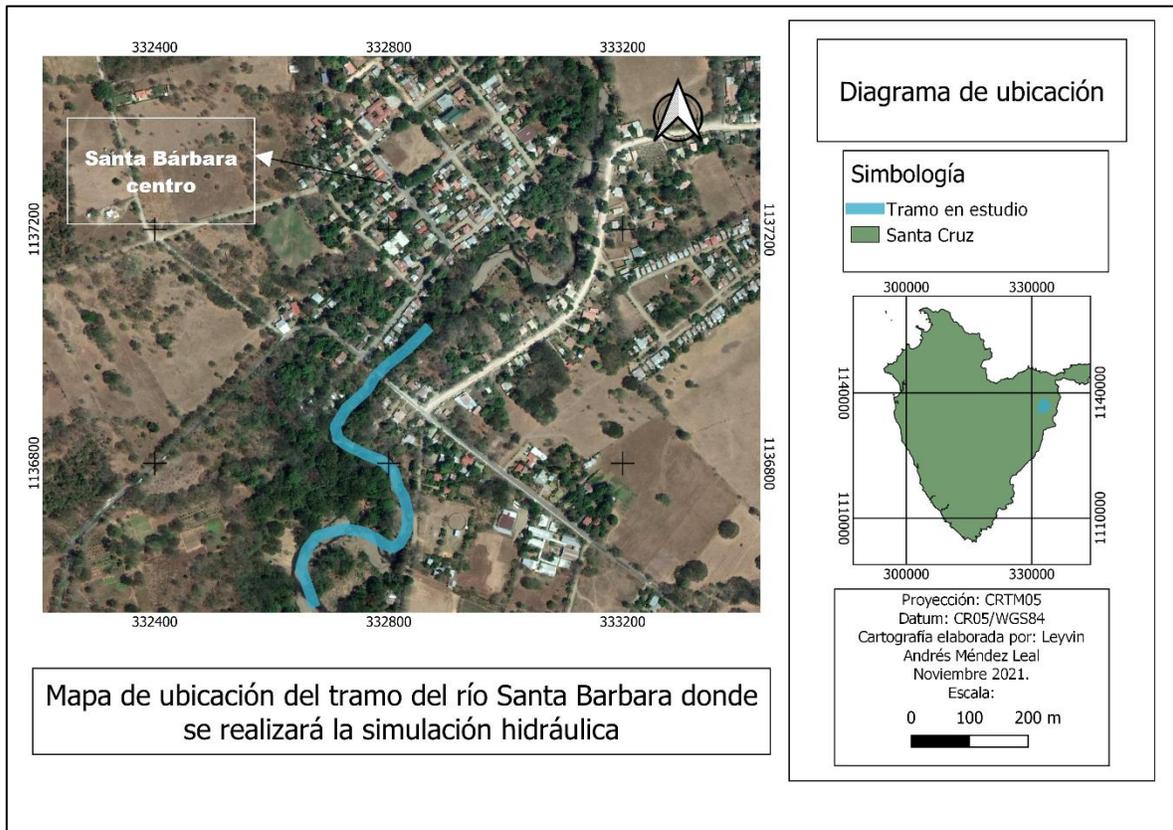


Imagen 21. Mapa de ubicación del tramo del río Santa Bárbara en donde se realizará la simulación hidráulica.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La longitud de tramo por modelar es de 796.97 metros de cauce del río Santa Bárbara, con un ancho promedio de 40 metros. En la margen derecha del cauce se logra visualizar el daño por socavación que el río Santa Bárbara le ocasionó a la carretera de la comunidad. Como medida de protección temporal se elaboró un enrocado que protege la carretera de la socavación por acción del río (ver imagen 21 y 23).



Imagen 22. Protección temporal de enrocado elaborada como medida a corto plazo para combatir la socavación de la carretera y abrir el paso.

Fuente: Elaboración propia, 2021.



Imagen 23. Desprendimiento del enrocado por acción de la escorrentía superficial y la fuerza hidráulica del río Santa Bárbara.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la imagen 23 se evidencia el enrocado que se ha desprendido posiblemente producto de la escorrentía superficial y la acción erosiva del río Santa Bárbara, dejando en evidencia que este enrocado requiere de una intervención que impida el desprendimiento del material y con ello, la erosión del margen del cauce pluvial. Es posible que se requiera de un enrocado que posea un diámetro mayor para que el río no pueda desprender el mismo o bien, ayudar colocar una lechada de cemento para darle mayor resistencia a la obra.

Levantamiento de las dimensiones del puente

Además, dentro del tramo de 796.97 metros por modelar, existe la presencia de un puente vehicular. Esta infraestructura hidráulica se debe de tomar en cuenta al realizar la modelación

hidráulica debido que el puente tiene influencia directa sobre el comportamiento del agua en el tramo de estudio.

Debido a lo anterior, se realizó una visita de campo en donde se tomaron las medidas básicas del puente como lo es su ancho, largo, diámetro de alcantarillado, entre otros.

Tabla 25. Dimensiones básicas del puente sobre el río Santa Bárbara.

Dimensiones	Distancia (metros)
Ancho	6.7
Largo	27.8
Alto	6.56
Ancho de luz de puente	26.43
Alto de luz de puente	6.56

Fuente: Elaboración propia, 2021.



Imagen 24. Luz de puente que se ubica sobre la carretera principal de la comunidad de Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Cabe destacar que las mediciones fueron realizadas con una cinta métrica, por lo que se determina que no es un levantamiento que posea una alta precisión, sin embargo, es de gran utilidad para poder realizar la simulación hidráulica.

Coefficiente de rugosidad (n).

La n de Manning es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces, naturales o artificiales. Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie de factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros (Fernández, 2018).

Este coeficiente es uno de los datos que se necesita para realizar una simulación hidráulica y depende de las condiciones en las que se encuentra las riberas y el cauce del río.



Imagen 25. Vista panorámica del cauce del río Santa Bárbara en donde se visualiza los pastos predominantes en las márgenes del cauce pluvial.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la imagen anterior se visualiza, en la margen izquierda y derecha, pasto de mediano tamaño, mientras que en el cauce se logra observar un suelo poco rocoso. Teniendo en cuenta estas condiciones naturales del río, se determinó que el n de Manning para la sección a modelar del río Santa Barbara corresponde a un valor de 0.035, este valor fue obtenido de la tabla 34 que se encuentra en el anexo 10.

6.2.2 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó para un periodo de retorno (PR) de 25 años, este periodo de retorno fue elegido con base en la importancia que tiene la carretera y tomando en cuenta que existe la presencia de una infraestructura hidráulica como lo es el puente de la carretera principal.

Es importante mencionar que para realizar la simulación hidráulica se creó un modelo de elevación digital del tramo de río en estudio, sin embargo, el DEM no fue un modelo representativo de la zona, en la sección 6.2.3 se detalla la problemática presentada en la modelación, sus causas y una posible solución al respecto.

A continuación, se presentarán las velocidades hidráulicas y la altura de columna de agua o profundidad que puede alcanzar el río Santa Bárbara para un PR de 25 años.

Profundidades encontradas en la modelación



Imagen 26. Diferentes profundidades presentes en el tramo en estudio del río Santa Bárbara para un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021

La imagen anterior muestra las diferentes profundidades presentes en el trayecto de 796.97 metros sobre el cauce del río Santa Bárbara. Se logra observar poca profundidad en la parte inferior del río mientras que la profundidad aumenta conforme el río se acerca al puente que se encuentra en la carretera principal.

Velocidades presentes en la modelación



Imagen 27: Velocidades reportadas mediante la simulación hidráulica en el tramo en estudio del río Santa Bárbara.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se observa un incremento en las velocidades de hasta 20 m/s en los primeros 500 metros del tramo en estudio, cabe destacar que, en este trayecto, en el margen derecho del río Santa Bárbara, se encuentra la calle que conduce hasta el sector La Cueva del León, es en esta carretera donde actualmente se han presentado problemas por socavación, situación que es ocasionada por las altas velocidades hidráulicas que presenta el río en este sector y que se evidenció en la imagen 26.

Secciones transversales del cauce del río Santa Bárbara

En la siguiente imagen se detalla la ubicación de las secciones transversales trazadas en el cauce del río Santa Bárbara, con el objetivo de mapear el comportamiento de la columna de agua durante la avenida máxima correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.



Imagen 28. Ubicación de las secciones transversales trazadas en el cauce del río Santa Bárbara.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez realizadas las secciones se procedió a observar el comportamiento del río en las diferentes secciones, no obstante, se realizará un énfasis en las secciones 1229, 1198 debido a que corresponden al tramo de estudio donde el río ha generado socavación a la carretera de la comunidad de Santa Bárbara. También se mostrará las secciones aguas arriba y aguas abajo del puente de Santa Bárbara, con el objetivo de evaluar un posible rebasamiento del cauce sobre la estructura hidráulica producto de la avenida máxima.

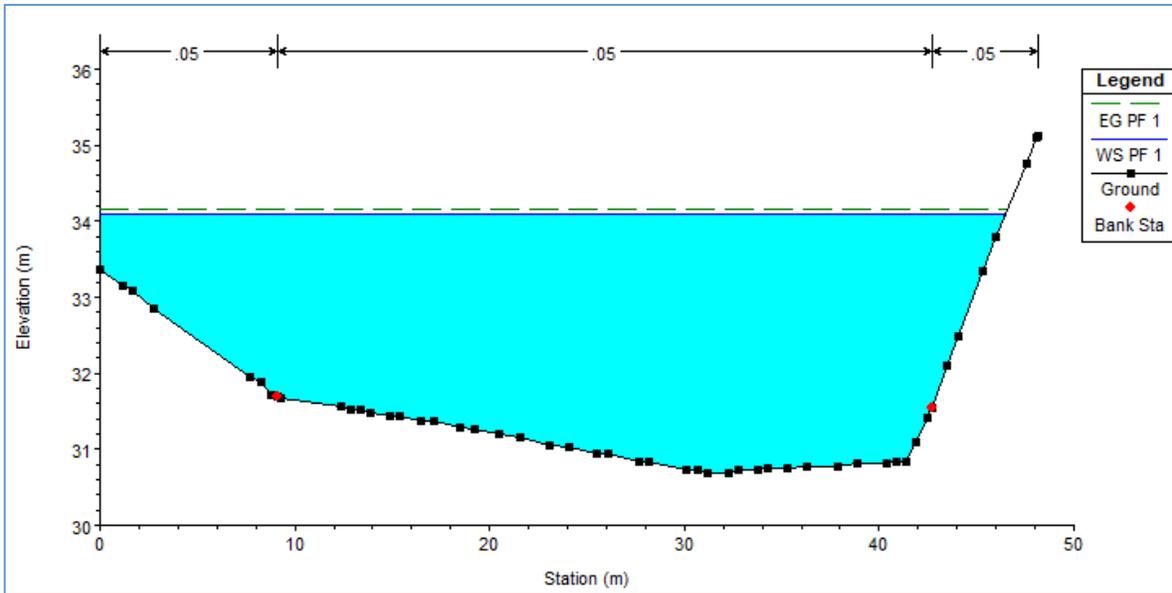


Imagen 29. Sección transversal número 1229, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

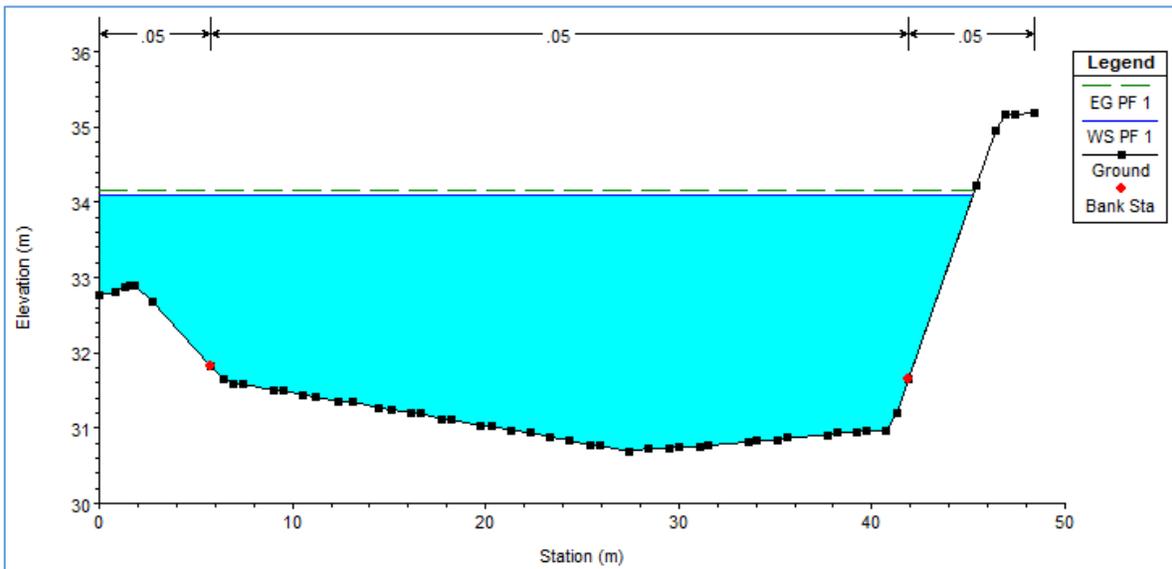


Imagen 30. Sección transversal número 1198, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se muestra en las secciones 1229 y 1198, la columna de agua no logra superar la margen derecha del cauce del río, lugar donde se encuentra la carretera socavada, sin embargo, en la ribera izquierda, la columna de agua se encuentra aproximadamente a 1.1 metros por encima de la altura de la margen, propiciado una inundación en la zona sin embargo esto no significa peligro alguno ya que en la zona inundada únicamente se encuentran arboles de gran tamaño.

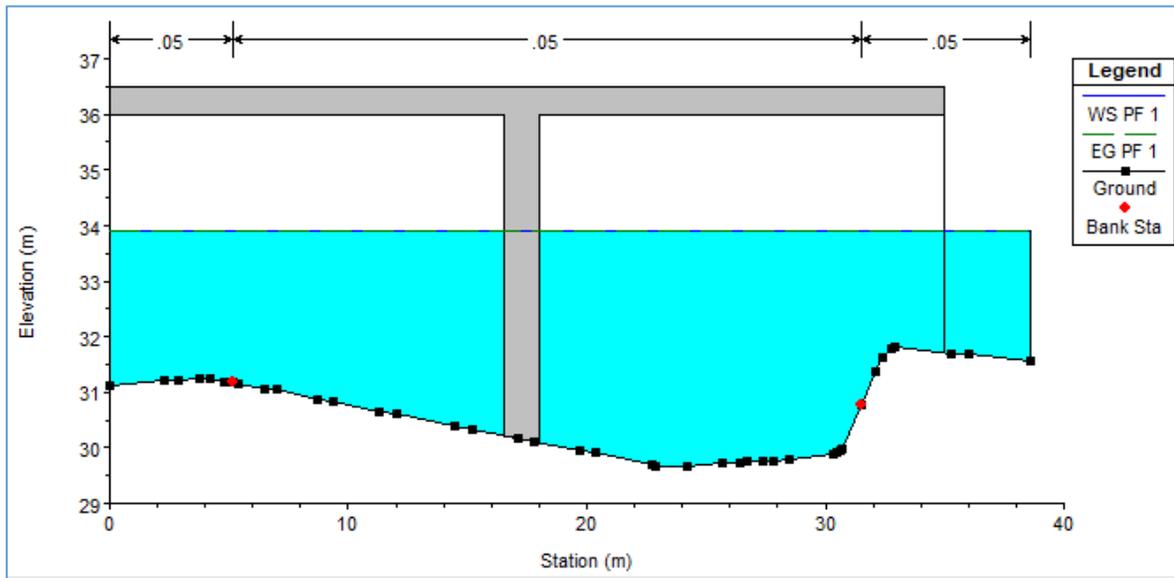


Imagen 31. Sección transversal aguas arriba del puente, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

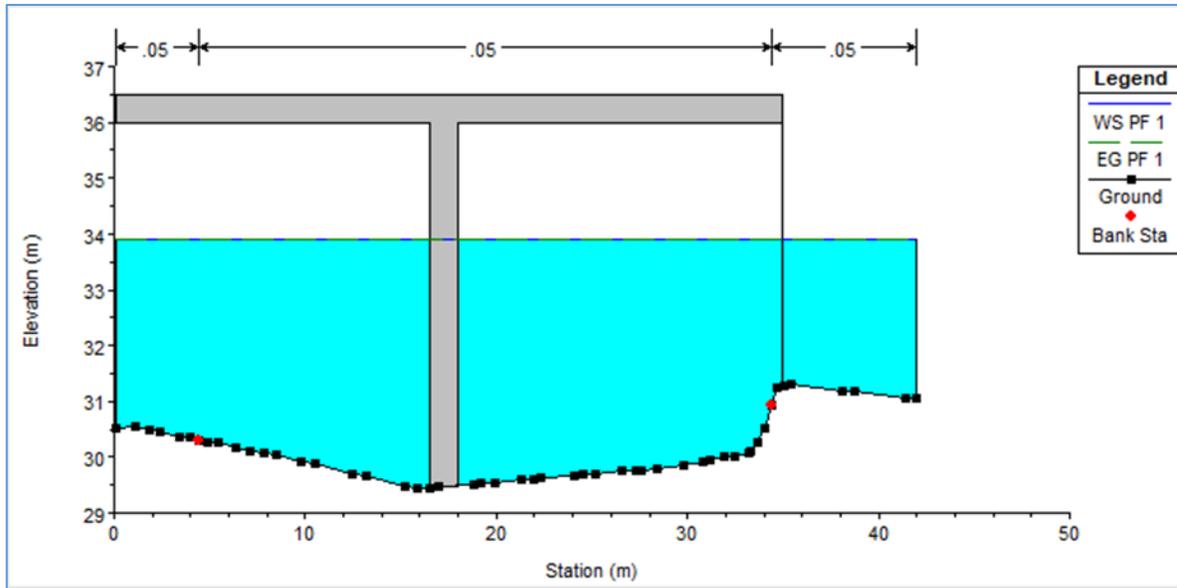


Imagen 32. Sección transversal aguas abajo del puente, ante el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se observa en las imágenes 30 y 31, la avenida máxima no supera la altura del puente la cual corresponde a 6.56 metros. Las márgenes sí fueron superadas por la columna de agua, no obstante, eso se debe a que el modelo de elevación digital no posee suficiente detalle de la forma transversal y las dimensiones reales del cauce del río donde está ubicado el puente.

6.2.3 Problemática en la simulación hidráulica

Luego de realizar el modelo de elevación digital con la información topográfica enviada por la municipalidad de Santa Cruz se detectó que el modelo presentaba secciones en donde las dimensiones topográficas mostradas en el modelo no eran similares a las dimensiones del cauce del río Santa Bárbara. Esto generó conflicto al momento de realizar la modelación hidráulica ya que, en sectores del tramo de estudio, la altura de las márgenes del río, según el DEM, eran mínimas y con facilidad eran superadas por el caudal de 497.2 m³/s correspondiente a 25 años de periodo de retorno.

Causas de la problemática

El DEM utilizado para realizar la simulación hidráulica fue creado con base en la información topográfica facilitada por el gobierno local. Las curvas de nivel enviadas no poseían el

atributo de elevación, por lo que el DEM se tuvo que realizar con un archivo de puntos el cual si poseía información de las distintas elevaciones encontradas dentro del cauce.

El problema de haber realizado el DEM con el archivo de puntos radica en que el shp brindaba la información de elevación en una zona en específico, por lo que el modelo tuvo que interpolar los demás sectores del cauce donde no se tenía información de elevaciones.

Soluciones ante la problemática

La solución ante este problema es sencilla, únicamente se recomienda volver a realizar un levantamiento topográfico para generar nuevas curvas de nivel y asegurarse de que estas curvas sí posean el atributo de elevación para posteriormente realizar el DEM. Este nuevo modelo generado a partir de las curvas de nivel tendrá mayor detalle en cuanto a las diferentes elevaciones del cauce en estudio y será representativo a las dimensiones del cauce debido a que las curvas de nivel, a diferencia del archivo de puntos, abarcan todo el cauce en estudio.

Se recomienda realizar las nuevas curvas de nivel cada 2 metros de distancia y abarcar un retiro de 10 metros de ambas márgenes, esto con la finalidad de tener más detalle del cauce fluvial.

6.3 Propuesta de obras hidráulicas requeridas

Según la modelación hidráulica realizada, en el tramo de 796.97 metros sobre el cauce del río Santa Bárbara no se presentan desbordamientos del río en eventos de precipitación máxima, sin embargo, las velocidades hidráulicas son elevadas, afectando la margen derecha del río Santa Barbara, principalmente en el área donde el cauce toma una forma meándrica.

Debido a lo anterior es indispensable construir una protección ribereña que evite que las altas velocidades del río sigan socavando la margen afectada. Por lo que, para poder construir una obra de protección ribereña se deben tener en cuenta una gran cantidad de elementos que influyen directamente sobre la escogencia de la obra que mejor se adapte a las condiciones del sitio y que logre dar solución al problema de socavación del margen derecho. Según (Cárdenas, 2012) los aspectos a tomar en cuenta para la construcción de una obra de protección ribereña son:

- Caudal de diseño
- Sección geométrica
- Análisis morfológico e hidráulico
- Determinación de la longitud a proteger
- Altura y profundidad por proteger
- Tipo de obra
- Especificaciones de diseño

En el presente estudio hidrológico e hidráulico se obtuvieron la mayoría de los elementos enlistados anteriormente, no obstante, aún falta por conocer el análisis morfológico y las especificaciones de diseño de la obra de protección. En la presente sección se dará énfasis a la escogencia del tipo de obra que podría ser seleccionada para dar solución al problema del presente proyecto.

Como las velocidades son elevadas en el tramo de estudio se necesita de una obra que pueda soportar la presión ejercida por la corriente del río y a su vez brinde estabilidad al margen. Es por lo anterior que se recomienda el uso de una obra de protección longitudinal, las cuales permiten dar soporte y protección a la ribera del río y por lo tanto a la carretera afectada por socavación.

Por medio de la revisión de literatura se determinó que las obras que cumplen con los requerimientos mencionados y que además brinde facilidad en la construcción de la obra, eficiencia, menor costo de elaboración, mayor adaptabilidad a la zona de estudio y menor tiempo de construcción corresponde a los muros de enrocados y los muros de gaviones.

6.3.1 Muros de enrocado

Consiste en bloques o cantos de roca de diferentes tamaños y formas irregulares colocados sobre el talud a lo largo de la orilla de una corriente. La estabilidad del conjunto se proporciona por el peso de los bloques individuales y el entrelace entre ellos. El enrocado se utiliza cuando hay disponibilidad de roca con canteras cercanas. Se prefieren las piedras con forma de bloque (irregulares) que las elongadas o redondeadas (Cárdenas, 2012).



Imagen 33. Ilustración del uso de escolleras como defensa ribereña ante la acción erosiva de los ríos.

Fuente: Agro-técnica Los Antonios, 2013.

Como se ilustra en la imagen anterior, las escolleras son una excelente obra que brinda protección a la margen de un río que ha presentado problemas erosivos producto de las fuerzas de arrastre que posee un cuerpo de agua.

Según xxx algunas de las ventajas que poseen este tipo de obras son las siguientes:

- Economía respecto a los muros tradicionales de hormigón
- Supresión del empuje del agua, dadas sus características perfectamente drenantes
- Facilidad de adaptarse a movimientos diferenciales del terreno
- Disminución del impacto ambiental al ser posible enmascarar el muro con vegetación

Es posible que la única desventaja que posee este tipo de obras es que se debe de contar con bloques o Cantos relativamente grandes, este tipo de roca no necesariamente se logran encontrar en todos los lugares, por lo que la ausencia de los bloques en la zona de estudio conlleva un gasto para poder obtener y transportar este material hasta la zona donde se realizará su construcción.

6.3.2 Muros de Gavión

Los muros de gaviones son estructuras flexibles, constituidas por cajas fabricadas de malla de alta resistencia, con dimensiones que vienen en fracciones de medio metro, las cuales son rellenas con bloques sanos de roca (Cárdenas, 2012).

En el sitio de la obra, los gaviones se unen entre sí con una costura manual del mismo alambre de la malla. Los bloques de roca que se utilizan para el llenado no deben ser susceptibles de meteorización o disgregación y deben tener una dimensión de una a dos veces la menor dimensión de la malla, para evitar pérdidas de material y asegurar la mayor densidad posible (Cárdenas, 2012).

Los gaviones son de fácil instalación y se adecuan e integran armoniosamente a su entorno, logrando que inclusive la vegetación pueda desarrollarse en ella, presentando así, un paisaje agradable contraponiéndose con las soluciones rígidas de concreto o enrocados.



Imagen 34. Ejemplo de un muro de gavión de 130 m de largo para controlar la erosión de la margen derecha del Rio La Guama Tinaco. Cojedes, 2015.

Como se muestra en la imagen, los muros de gavión son una estructura que se adapta a las condiciones de la ribera, genera bajo impacto visual en comparación con los muros de concreto, además durante su elaboración se generan muy pocos residuos.

Para conocer mejor sobre las virtudes y debilidades de este tipo de obra se presenta la siguiente tabla:

Tabla 26. Ventajas y desventajas del uso de muros de gavión como obras de protección de riberas.

Muros de gavión	
Ventajas	Desventajas
Por la naturaleza de los materiales que se emplean en los gaviones, estos permiten su construcción de manera manual o mecanizada en cualquier condición climática, ya sea en presencia de agua o en lugares de difícil acceso.	Las mallas de acero galvanizado se corroen fácilmente en ambientes ácidos, por ejemplo, en suelos residuales de granitos se requiere cantos o bloques de roca, los cuales no necesariamente están disponibles en todos los sitios
Las estructuras en gaviones, debido a su flexibilidad, permiten asentamientos y deformaciones sin perder su eficiencia y función estructural	Al amarre de la malla y las unidades generalmente no se le hace un buen control de calidad.
Los gaviones, al estar constituidos por malla y bloques sanos de roca, son estructuras altamente permeables, lo que impide que se generen presiones hidrostáticas.	Las piedras utilizadas en los muros de gaviones pueden sufrir desgaste con el pasar del tiempo.
Fácil alivio de presiones de agua. Soportan movimientos sin pérdida de eficiencia. Es de construcción sencilla y económica	

Fuente: Cárdenas, 2012 y Piñar, 2008.

Como se aprecia en la tabla anterior, los muros de gavión poseen muchas ventajas que hacen de esta obra de protección, una gran idea para poder mitigar la socavación que se presenta en el tramo de estudio del río Santa Bárbara.

Cabe recalcar que es recomendable el uso de un material impermeable que vaya colocado entre el margen por proteger y los muros de gavión, esto con el fin de que el agua no pueda erosionar el margen del río, el cual sirve como soporte de los muros de gavión.

6.4 Discusión de principales hallazgos del estudio

En la parte baja de la cuenca del río Santa Bárbara, el río posee una forma meándrica. Ese hallazgo es relevante porque puede alterar las condiciones sobre el depósito de sedimentos e hidrología general del río, lo que dificulta su modelación. Además, su forma meándrica implica un constante cambio en los depósitos y erosión de materiales por lo que cambia constantemente su caracterización geofísica del cauce, lo cual influye en la confiabilidad de los datos de campo del levantamiento topográfico de la sección hidráulica del río.

Por otro lado, según la representación gráfica de las altitudes de la cuenca del río Santa Bárbara elaboradas mediante la curva hipsométrica, se determinó que la cuenca posee un gran potencial erosivo debido a que se cataloga como una cuenca en fase de juventud.

Los procesos erosivos que afectan las condiciones y la estabilidad de las márgenes del cauce. Esto implica una problemática debido a que, en la cuenca baja del río, se encuentra la comunidad de Santa Bárbara, hay presencia de construcciones de casas de habitación y carreteras en ambas márgenes, lo cual significa un riesgo para los habitantes del lugar. Por lo que es importante identificar las secciones hidráulicas del cauce que se encuentren propensas a presentar erosión y posterior a esto, se debe de buscar estrategias para su protección.

Otro hallazgo relevante corresponde a que dentro del tramo de 796.97 metros por modelar, existe la presencia de un puente vehicular que atraviesa el cauce fluvial.

Lo anterior tiene relevancia debido a que para poder realizar correctamente la simulación hidráulica del tramo del río Santa Bárbara, se debe de considerar la presencia de una estructura hidráulica, como lo es el puente que atraviesa el cauce fluvial y que da acceso a poblados cercanos como Guaitil y San Vicente. Por lo tanto, al existir un puente dentro del

cauce a modelar, el programa HEC RAS solicita la información de las dimensiones y localización de la estructura hidráulica. Por lo que se requirió hacer una visita de campo para tomar las medidas aproximadas de la estructura.

El último hallazgo corresponde a que el modelo de elevación digital presenta discontinuidades que dificultan una correcta modelación hidráulica. Al convertir el levantamiento topográfico, en un modelo de elevación digital (DEM), se logró determinar que el DEM no es lo suficientemente realista debido a que presenta secciones topográficas en donde el cauce fluvial es irregular y no coincide con las condiciones topográficas que actualmente presenta el cauce del río Santa Bárbara.

Esta situación afecta el tercer objetivo específico debido a que la simulación hidráulica no brindó resultados confiables y realistas producto de que el DEM es parte fundamental de la simulación y cualquier incongruencia en el DEM se verá reflejada en los resultados de la modelación hidráulica.

6.5 Discusión con respecto a objetivos planteados

Para realizar el presente proyecto se establecieron cuatro objetivos específicos y un objetivo general. En esta sección se discutirá la forma en la que estos objetivos fueron abordados.

El primer objetivo específico se fundamentó en la recopilación de datos de precipitaciones obtenidos de la estación Hacienda Pinilla, Santa Cruz, Costa Rica. Una vez obtenidos estos datos se debían procesar para poder utilizarlos en la ejecución de un modelamiento hidrológico.

El objetivo anterior fue desarrollado de forma exitosa obteniéndose los registros de precipitaciones máximas anuales, del periodo de 1998-2020, correspondientes a la estación meteorológica Hacienda Pinilla. Su procesamiento constó, primeramente, de un análisis estadístico llamado Media Aritmética, este fue elaborado para completar los datos faltantes en el periodo de registro de precipitaciones.

Posteriormente se dio inicio al procesamiento hidrológico, durante el cual se elaboró una distribución de frecuencia de precipitaciones con ayuda del método Gumbel. También se

generaron curvas IDF para finalmente elaborar hietogramas mediante el método de bloques alternos. De esta manera se concluyó el desarrollo del objetivo específico 1.

El segundo objetivo específico constó de un estudio hidrológico para la obtención de caudales máximos presentes en el río Santa Bárbara. Dicho estudio inició con la estimación de los parámetros de forma, relieve y drenaje de la cuenca. Posteriormente, se realizó la simulación hidrológica mediante el método Número de Curva, con esto se estimaron caudales máximos para diferentes periodos de retorno que van desde los 5 y hasta los 100 años.

Como tercer objetivo específico se planteó realizar un modelamiento hidráulico en un tramo de 796. 97 metros sobre el cauce del río Santa Bárbara, mediante el levantamiento topográfico y el uso del software HEC RAS, para la determinación de las características hidráulicas del río en el tramo de estudio. Este objetivo inició con el levantamiento topográfico del cauce en estudio, el cual fue realizado por el departamento ingeniería de la municipalidad de Santa Cruz, seguidamente, se procesaron los datos topográficos creando un modelo de elevación digital, finalmente se realizó la simulación hidráulica.

El cuarto y último objetivo se fundamentó en proponer acciones y recomendaciones para la implementación de obras hidráulicas con el fin de prevenir la erosión de las carreteras producto de la corriente del río Santa Bárbara. Para desarrollar este objetivo se realizó una exhaustiva revisión de literatura en donde se seleccionó la obra hidráulica que mejor se adapte a la situación y que pueda brindar pronta solución al problema de erosión de las márgenes del río Santa Bárbara.

6.6 Discusión con respecto al diseño metodológico

El diseño metodológico planteado en el presente proyecto fue elaborado con el objetivo de establecer una ruta o pasos a seguir para poder determinar el comportamiento de las avenidas máximas presentes en el río Santa Bárbara, Santa Cruz mediante la transformación de datos de precipitación de la estación Meteorológica Hacienda Pinilla a datos de caudales máximos.

Durante el desarrollo de la metodología planteada se determinó que existen oportunidades de mejora que permiten aportar, de forma positiva, en el desarrollo de la modelación y mejora la estimación de caudales máximos.

Una de las oportunidades de mejora se basa en modelar con más bases de datos de precipitaciones máximas anuales que se encuentren cerca de la cuenca del río Santa Bárbara. En el presente proyecto se utilizó solamente la base de datos de precipitación máxima anual de la estación meteorológica Hacienda Pinilla debido a que es la estación más cercana a la cuenca. No obstante, existen otras estaciones meteorológicas pertenecientes al IMN y al SENARA que pudieron haberse utilizado para brindar más información de la cantidad de precipitación y su distribución espacial obtenida mediante Polígonos de Thiessen.

Por otro lado, aunque se realizaron visitas de campo en la cuenca baja del río Santa Bárbara, se pudo haber realizado visitas de campo en la cuenca alta y media, para poder tener un panorama más amplio de las principales actividades que actualmente se desarrollan en las diferentes partes de la cuenca, esta información, en conjunto con el tipo de suelo, es de vital importancia para estimar, de forma correcta, el Número de Curva de la cuenca.

Asimismo, se pudo haber realizado diferentes aforos al río Santa Bárbara en distintos puntos de interés para conocer su caudal y su velocidad media. Estos valores medios brindan un punto de referencia y permiten determinar si los caudales máximos obtenidos con el software HEC-HMS son valores aceptables en comparación con el caudal medio medido in situ.

El levantamiento topográfico se realizó de forma tradicional, con ayuda de estaciones totales, abarcándose un total de 796. 97 metros de cauce principal y un promedio de 4 metros de retiro de ambas márgenes, con una distancia de cada 5 metros entre cada sección. Aunque este tipo de levantamiento es el que tradicionalmente se utiliza, existe otro método más eficaz de realizar la labor topográfica el cual corresponde al levantamiento topográfico por medio de la Fotometría Aérea realizada por medio de un Dron.

Asimismo, Santana et al., (2020) explica que la fotogrametría es la técnica cuyo objetivo es el determinar las dimensiones y posición de objetos en el espacio a partir de imágenes fotográficas, esto se consigue a través de la medida o medidas realizadas a partir de la

intersección de dos o más fotografías, por medio de la fotogrametría podemos obtener modelos digitales de terreno.

La principal ventaja de realizar el levantamiento con un Dron es la seguridad, debido a que el dron puede llegar a lugares donde sea peligroso o imposible el ingreso para una persona.

Además, Santana et al. (2020) menciona que el levantamiento topográfico de un dron, debido a sus cámaras de última generación aporta mucha más información gráfica que un levantamiento tradicional. También, la información es mucho más completa en cuanto a color de las fotografías, mayor resolución y realismo del terreno.

7) Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos de la modelación hidrológica e hidráulica se realizaron distintas conclusiones para las cuales se redactó la recomendación sugerida describiendo las implicaciones que tendrá cada una de las recomendaciones establecidas.

7.1 Conclusiones

1. Con base en las visitas de campo y el estudio hidrológico realizado se determinó que el río Santa Bárbara posee un constante cambio en su cauce fluvial producto de procesos erosivos y sedimentaciones que se deben a la forma meándrica que posee el cauce, esto puede alterar la confiabilidad del estudio hidrológico y su topografía.
2. La cuenca del río Santa Bárbara es catalogada como una cuenca joven, con alto potencial erosivo que influye directamente en la estabilidad de las márgenes del cauce fluvial y que pone en riesgo las obras civiles realizadas en ambas márgenes y podría poner en riesgo la vida de los habitantes que se asientan en los márgenes del cauce fluvial.
3. Las estructuras hidráulicas como puentes, alcantarillas, represas, entre otros, tienen influencia directa sobre el comportamiento del río, principalmente en eventos de avenidas máximas, ya que en algunas ocasiones la estructura reduce el ancho del cauce fluvial, generando altas velocidades y un remanso hidráulico.

4. La modelación hidráulica indicó que, en las secciones 1229 y 1198, la columna de agua no supera la elevación del margen derecho del cauce, en el cual se encuentra ubicada la carretera afectada por el río, sin embargo, la velocidad de flujo en estas secciones es elevada ($20 \text{ m}^3/\text{s}$), este incremento en la velocidad de flujo en el sector es el factor que provoca la erosión del margen derecho, provocando socavación en la carretera que se encuentra a un costado del río Santa Bárbara.
5. El levantamiento topográfico no poseía suficiente información de las elevaciones topográficas tomadas en el cauce fluvial del río Santa Bárbara, esto tuvo influencia en la simulación hidráulica provocando que existan secciones transversales del cauce donde los márgenes del río no son representativos a la realidad.
6. Los muros de gaviones son una de las mejores obras de protección que pueden ser implementadas para poder mitigar la socavación de la margen derecha del río Santa Bárbara y de esta manera poder asegurar la estabilidad correcta de la carretera afectada.

7.2 Recomendaciones

1. Se recomienda actualizar los datos topográficos e hidrológicos lo más cercano posible a la planificación de las obras hidráulicas con el fin de proteger la infraestructura y maximizar el potencial de beneficios de las obras que se ejecutan con presupuesto municipal.

Con miras a proteger la estructura e inversión pública la actualización de datos topográficos e hidrológicos que se van a utilizar como parte de los estudios preliminares para el anteproyecto de obras hidráulicas deberían tener al menos tres meses y dependerá de la estación en la que se va a desarrollar el proyecto, si será en época de invierno, será máximo 1.5 meses. Este nuevo estudio actualizado puede realizarlo ingenieros de la municipalidad y profesionales en hidrología. La elaboración de un estudio más un informe técnico pudiera tomar alrededor de 3 meses de tiempo y requerir una inversión de aproximadamente \$4 000.

2. La municipalidad, como gobierno local, deberá ejecutar las políticas nacionales de ordenamiento territorial con la finalidad de promover el desarrollo de la población,

su bienestar social, económico y su seguridad. Este plan de ordenamiento territorial deberá hacer respetar lo estipulado en el artículo 33 de la Ley Forestal, la cual indica la distancia de área de protección a partir de las márgenes de los ríos.

La ejecución de un plan de ordenamiento territorial mejoraría la seguridad de los habitantes de Santa Bárbara, sin embargo, si se respeta lo estipulado en el artículo 33 de la Ley Forestal, es posible que se deba reubicar a los habitantes que han construido su hogar en las respectivas áreas de protección. El costo de la reubicación es dependiente de la cantidad de personas que se deban de trasladar.

3. Al realizar una simulación hidráulica se debe de conocer si existe la presencia de una estructura que se encuentre dentro o cerca del tramo donde se llevará a cabo la simulación. De existir la misma, se deben de tomar las medidas de la estructura hidráulica para realizar la modelación. En muchas ocasiones los puentes, alcantarillas, represas, entre otros, tienen influencia directa sobre el comportamiento del río, principalmente en eventos de avenidas máximas.

La simulación hidráulica con la presencia de una estructura hidráulica implica realizar una visita de campo en donde se deben de tomar las medidas básicas de la estructura, como ancho, largo, altura desde el cauce fluvial, ubicación geográfica, si posee alcantarillas o se trata de un puente con luz, entre otros. Esta actividad la puede realizar el ingeniero a cargo del proyecto, con la ayuda de alguna herramienta de medición de distancias como estación total o cinta métrica ya que no se requiere de una alta precisión de datos.

4. Debido a las altas velocidades de flujo registradas en las secciones 1229 y 1198, se recomienda realizar la construcción de una infraestructura hidráulica que proteja la margen derecha de la erosión y a su vez, brinde soporte a la carretera que se encuentra en dicha margen. La infraestructura por construir debe de adaptarse a las condiciones del sitio como tipo de suelo, geometría de la zona, etc.

La construcción de una infraestructura hidráulica puede ser desarrollada por un grupo de ingenieros civiles, los cuales diseñarán, con base en las características del sitio, el muro de contención más apropiado para poder finalizar el problema de socavación de

la margen derecha es posible que para ello se requiera hacer un estudio del tipo de suelo y sus características físicas.

5. Se recomienda realizar un nuevo levantamiento topográfico con el objetivo de crear nuevas curvas de nivel cada 2 metros, se debe asegurar de que las curvas de nivel posean el atributo de elevación para poder realizar el modelo de elevación digital con base en el atributo mencionado.

La ejecución del nuevo levantamiento topográfico puede ser realizado por el mismo departamento de ingeniería del gobierno local y este levantamiento deberá ser realizado a manera que se puedan generar curvas de nivel con su respectiva elevación de elevación. El nuevo levantamiento topográfico tendrá el mismo costo de la topografía que se obtuvo para el presente trabajo, siendo este de 465 000 colones.

6. Se recomienda la construcción de un muro de gavión en la margen derecha del río Santa Bárbara con la finalidad de que esta obra sirva de protección y estabilidad a la margen afectada por la socavación.

Para asegurarse de su correcto funcionamiento se debe de colocar un revestimiento impermeable o semi impermeable que se ubique entre la margen y los muros de gavión, esto impide que el agua que percole entre los muros logre erosionar la ribera del río.

BIBLIOGRAFÍA

Acebey, F. (2019) Periodo de retorno. Tesis doctoral no publicada. San Andrés: Universidad Mayor de San Andrés.

Banco Central de Costa Rica (2021) Tipo de Cambio de Referencia y Tasas [en línea] disponible en < <https://www.bccr.fi.cr/SitePages/Inicio.aspx> > [consulta: 11 junio 2021].

Barboza. G. (2019) Análisis hidrológico de cauces de la cuenca del río Tempisque Involucrados en el proyecto de abastecimiento de agua para la cuenca media del río Tempisque y sus comunidades costeras (PAACUME). [en línea] disponible en < https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11244/analisis_hidrologico_cauces_cuenca_rio_tempisque.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consulta: 26 octubre 2021].

Cardona. B (2012) Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas [en línea] disponible en <<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>> [consulta: 4 junio 2021].

Cárdenas, O (2012) Estudios y Diseño de las Obras de Protección de Orillas en la Margen Izquierda del Río Cauca en el Sector de Candelaria en el Distrito de riego Roldanillo-La Unión-Toro. Tesis doctoral no publicada. Cali, Colombia. Universidad del Valle.

Cardich, K. (2017) Modelación de máximas avenidas en la cuenca del río Lurín utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos. Tesis doctoral no publicada. Lima-Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Córdova, M (2016) Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas [en línea] disponible en <https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26> [consulta: 4 junio 2021].

Díaz. E et al. (1999) Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México [en línea] disponible en < <https://www.redalyc.org/pdf/104/10401504.pdf> > [consulta: 01 octubre 2021].

Espirilla, R. (2020) Hidrología, distribución de Gumbel [Vídeo online] disponible en < https://www.youtube.com/watch?v=_yBRWv6BXPM&list=PLqGDxM9AfnCdPbMazpy79E9tGfJJrSpkM&index=1&t=173s > [consulta: 12 octubre 2021].

Fernández, C. (2018) Scielo. Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Disponible en < http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002 > [Consulta: 10 febrero 2022]

Ibáñez, S. Moreno, H. Gisbert. J (s.f.) Universidad Politécnica de Valencia [en línea] disponible en <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo%20de%20concentraci%C3%B3n.pdf>> [consulta: 19 junio 2021].

Instituto Meteorológico Nacional (2021) Estaciones automáticas [en línea] disponible en <<https://www.imn.ac.cr/estaciones-automaticas>> [consulta: 11 octubre 2021].

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2011) Indicadores económicos según cantón y distritos Hidrológica [en línea] disponible en < <https://www.inec.cr/censos/censos-2011> > [Consulta: 20 mayo 2021]

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2009) Censo Nacional de Población y Vivienda de 1973 [En Línea]. Disponible en <www.inec.go.cr> [Consulta: 20 mayo 2021]

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2009) Censo Nacional de Población y Vivienda de 1984 [En Línea]. Disponible en <www.inec.go.cr> [Consulta: 20 mayo 2021]

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2009) Censo Nacional de Población y Vivienda de 2000 [En Línea]. Disponible en <www.inec.go.cr> [Consulta: 20 mayo 2021]

Imasgal (2021) Autocad Civil 3D – Soluciones BIM para proyectos de ingeniería civil [En Línea]. Disponible en < <https://imasgal.com/autocad-civil-3d-soluciones-bim-proyectos-ingenieria-civil/> > [Consulta: 12 junio 2021]

Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (2021) Modelación Hidrológica [en línea] disponible en < http://lancis.ecologia.unam.mx/iai/modelacion_hidrologica > [Consulta: 19 mayo 2021]

La Nación. (2016) La huella imborrable de Otto, el primer huracán que cruzó Costa Rica [en línea] disponible en < https://www.nacion.com/sucesos/desastres/la-huella-imborrable-de-otto-el-primer-huracan-que-cruzo-costa_rica/6OKJQB6G4ZCYLBKPPW4A3VSCQM/story/> [consulta: 19 mayo 2021].

Lanamme (2017) Costos de Carreteras en Costa Rica [en línea] disponible en < https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/831/Costo__carreteras_CR.pdf?sequence=1&isAllowed=y > [consulta: 11 junio 2021].

López, C & Mintegui, A. (1987). Hidrología de Superficie. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. Editorial Salazar. PP 222.

Márquez, A. (2020) Ecología Verde. Qué es un meandro, sus características, formación y tipos 28 de diciembre. Disponible en <<https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-meandro-sus-caracteristicas-formacion-y-tipos-3161.html>> [Consulta: 19 mayo 2021]

Mancomún. (2018) Solución de Sistema de Información Geográfica con Software Libre [en línea] Disponible en < <https://www.mancomun.gal/es/artigo-tic/qgis-solucion-de-sistema-de-informacion-geografica-con-software-libre/>> [Consulta: 12 junio 2021]

Min ambiente (2021) Parámetros morfométricos de una cuenca [en línea] disponible en < https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf> [consulta:4 junio 2021].

Noriega, J (s.f.) Coeficientes de escorrentía de manning [en línea] disponible en <https://es.scribd.com/doc/167771562/Coeficientes-n-de-Manning>> [Consulta: 10 febrero 2022]

Neo ingeniería DHCA (2021) Modelación hidráulica de ríos en HEC-RAS [en línea] disponible en <<http://www.neoingenieriadhca.com/departamento-de-hidraulica-e-hidrologia/modelacion-hidraulica-de-rios-en-hec-ras/>> [consulta: 23 mayo 2021].

Órias y Matarrita. (2021) Estudio de prefactibilidad del proyecto modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara [comunicación personal] 11 junio 2021

Paz, K (s.f.) Media aritmética simple [en línea] disponible en < https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin07/URL_07_BAS01.pdf> [consulta: 4 octubre 2021].

Pérez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. PP 38.

Piñar, R (2008). Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Gonzales, J y Sánchez, C. 2013, Repositorio edu, Caracterización Hidrológica de la Microcuenca Caño Grande, consultado el 01 de octubre de 2021, < https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/13074/1/2013_caracterizacion_hidrologica_microcuenca_.pdf>

Pérez, A. (2020) Costes directos e indirectos de un proyecto [en línea] disponible en < <https://www.obsbusiness.school/blog/costes-directos-e-indirectos-de-un-proyecto>> [Consulta: 10 junio 2021]

Quispe, N, (2019) Modelamiento hidrológico e hidráulico para control de socavación de estribos del puente Marita de la carretera Sancos Saccsamarca, provincia de Huanca Sancos - Ayacucho. Tesis doctoral no publicada. Ayacucho-Perú: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Raffino, M. (2020) Concepto de Excel [en línea] disponible en < <https://concepto.de/excel/>> [Consulta: 12 junio 2021]

Renata, J. (2012) Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. Revista de Ciencias Ambientales, volumen (44), 5-6.

Real Academia Española. (2020). Socavación [en línea] disponible en < <https://dle.rae.es/socavaci%C3%B3n>> [consulta: 19 mayo 2021].

Rojas, P. (2015) Curva Hipsométrica [en línea] disponible en < <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>> [Consulta: 4 junio 2021]

Rodríguez, F. (2006) Cuencas hidrográficas, descentralización y desarrollo regional participativo. Tesis doctoral no publicada. Costa Rica: Universidad de Costa Rica

Rodríguez, D. (2021) Estudio de prefactibilidad del proyecto modelación hidrológica e hidráulica del río Santa Bárbara [comunicación personal] 10 junio 2021

Sapag, N; Sapag, R y Sapag, j. (2014) Preparación y evaluación de proyectos. Sexta edición. México: Mac Gracw Hill.

Santana, O., Córdova, F., Carrillo, V., Esqueda, J. y Espinoza, A. (2020) Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones. Cuba: Redalyc.

SENARA (2021) Estudio de impacto ambiental [en línea] disponible en <http://www.senara.or.cr/proyectos/paacume/estudio_impacto_ambiental.aspx> [consulta: 8 junio 2021].

SETENA (2016) Resolución N° 2373-2016-SETENA [en línea] disponible en <<http://www.setena.go.cr/Downloads/documentos/Normativa/RES-2373-2016.pdf>> [consulta: 8 junio 2021].

Sirias, B. (2020) Modelación hidrológica he hidráulica para la valoración del riesgo de inundación en un tramo del río Lepanto en la península de Nicoya, Costa Rica. Tesis doctoral no publicada. Lepanto, Puntarenas: Universidad Nacional, Costa Rica.

Torres y Rodríguez (2019) Distribución Gumbel, antecedentes y aplicación [en línea] disponible en <https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2.8f3b5fceb28337a2.363930372e706466.pdf> [consulta: 12 octubre 2021].

Universidad de Costa Rica. (2017) Costa Rica Tormenta tropical Nate [PowerPoint]. Disponible en <<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/10/12/tormenta-tropical-nate-entre-los-mayores-desastres-de-costa-rica.html>> [consulta: 19 mayo 2021].

Universidad Internacional de La Roja (2020) Metodología para la gestión de proyectos [en línea] disponible en <<https://www.unir.net/empresa/revista/metodologias-gestion-proyectos/>> [consulta: 19 junio 2021].

Villareal et al., (2010) Tendencias del desarrollo en el cantón de Santa Cruz, Guanacaste. Periodo 1979-2009 [PowerPoint]. Disponible en <<https://www.uned.ac.cr/extension/images/ifcmdl/213/RESUMEN.pdf>> [consulta: 20 mayo 2021].

Villegas, P. (2017) Método del Número de Curva del SCS [en línea] disponible en <https://aguaysig.com/metodo-del-numero-de-curva-del-scs/> [Consulta: 18 octubre 2021].

Villón, M. (2004) Hidrología. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Zúñiga, X. (2019) Municipalidad de Santa Cruz reconstruye vía pública. Info Noticias, 17 de diciembre del 2019, 1-4.

ANEXOS

Anexo 1. Consultas realizadas a los Stakeholder asignados para el proyecto.

- ¿Nombre completo?
- ¿Puesto laboral?
- ¿Usted considera que este proyecto es necesario para generar una solución a la problemática de socavación de carreteras den la comunidad de Santa Bárbara?
- ¿Considera usted que este proyecto generará un aporte positivo a la comunidad de Santa Bárbara?
- ¿Usted apoya la ejecución del proyecto?

Anexo 2. Parámetros de la cuenca.

Tabla 27. Parámetros asociados a la forma de la cuenca y su método de estimación.

Parámetro de la cuenca	Método de estimación
Área	Calculado con QGIS
Perímetro	Calculado con QGIS
Longitud de la cuenca	Calculado con QGIS
Factor de forma (F)	$F = \frac{\text{Ancho } (B)}{\text{Longitud } (L)}$
Índice de compacidad (índice de Gravelius) (K)	$K = \frac{\text{Perímetro de cuenca } (P)}{\text{Perímetro de un circulo de misma área } (Po)}$

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 3. Parámetros de drenaje de la cuenca.

Tabla 28. Parámetros de drenaje

Parámetro de la cuenca	Método de estimación
Tiempo de concentración (tc)	Ecuación de Kirpich: $Tc = 0,000323 * (L^{0,77} / S^{0,385})$
Orden de corrientes	Estimado según (Villón, 2004)

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 4. Ecuaciones de distribución de probabilidad de Gumbel.

Distribución estándar de Gumbel [\[editar \]](#)

La distribución estándar de Gumbel es el caso donde $\mu = 0$ y $\beta = 1$ con la función acumulada

$$F(x) = e^{-e^{-x}}$$

y la función de densidad

$$f(x) = e^{-x} e^{-e^{-x}}.$$

La mediana es $-\ln(\ln(2)) \approx 0.36651292058166432701$.

La media es $\gamma \approx 0.5772156649015328606$.

La desviación estándar es

$$\pi/\sqrt{6} \approx 1.28254983016186409554.$$

La moda es 0.

Imagen 35. Ecuaciones de distribución de probabilidad Gumbel.

Anexo 5. Resultados del cálculo de precipitación máxima según el modelo de Dyck y Peschke.

Tabla 29. Resultados obtenidos de precipitación máxima mediante el uso del modelo de Dyck y Peschke, para diferentes periodos de retorno y duraciones.

Duración (Minutos)	Precipitación en 24 horas (mm)					
	131.82	153.78	181.54	202.12	222.56	269.78
	Precipitación (mm)					
	5	10	25	50	100	500
5	32.00	37.33	44.07	49.06	54.03	65.49
10	38.05	44.39	52.41	58.35	64.25	77.88
15	42.11	49.13	58.00	64.57	71.10	86.19
20	45.25	52.79	62.32	69.39	76.40	92.61
25	47.85	55.82	65.90	73.37	80.79	97.93
30	50.08	58.42	68.97	76.79	84.55	102.49
35	52.05	60.72	71.68	79.81	87.88	106.52
40	53.82	62.78	74.11	82.52	90.86	110.14
45	55.42	64.66	76.33	84.98	93.57	113.43
50	56.90	66.38	78.37	87.25	96.07	116.46
55	58.27	67.98	80.26	89.35	98.39	119.26
60	59.56	69.48	82.02	91.32	100.55	121.89
120	70.82	82.62	97.54	108.60	119.58	144.95
180	78.38	91.44	107.94	120.18	132.33	160.41
240	84.23	98.26	115.99	129.14	142.20	172.37
300	89.06	103.89	122.65	136.55	150.36	182.26
360	93.21	108.74	128.37	142.92	157.37	190.76
420	96.87	113.01	133.41	148.54	163.56	198.26
480	100.16	116.85	137.94	153.58	169.11	204.99
540	103.15	120.34	142.06	158.17	174.16	211.11
600	105.91	123.55	145.85	162.39	178.81	216.75
660	108.46	126.53	149.37	166.30	183.12	221.98
720	110.85	129.31	152.66	169.96	187.15	226.86
780	113.09	131.93	155.74	173.40	190.93	231.44
840	115.20	134.39	158.65	176.64	194.50	235.77
900	117.21	136.73	161.41	179.71	197.89	239.87
960	119.11	138.96	164.04	182.64	201.11	243.77
1020	120.93	141.08	166.55	185.43	204.18	247.50
1080	122.67	143.11	168.94	188.09	207.12	251.06
1140	124.34	145.06	171.24	190.65	209.93	254.475127
1200	125.95	146.93	173.45	193.11	212.64	257.759356
1260	127.49	148.73	175.58	195.48	215.25	260.922264
1320	128.98	150.47	177.63	197.77	217.77	263.974885
1380	130.42	152.15	179.62	199.98	220.20	266.924783
1440	131.82	153.78	181.54	202.12	222.26	269.78

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 6. Resultados del cálculo de intensidad máxima de precipitación según el modelo de Dyck y Peschke.

Tabla 30. Intensidades máximas de precipitación calculadas según el modelo de Dyck y Peschke.

Duracion (Horas)	Duracion (min)	Periodo de Retorno (Años)					
		5	10	25	50	100	500
		Intensidad (mm/hr)					
0.08	5	383.99	447.95	528.82	588.77	648.31	785.86
0.17	10	228.32	266.35	314.44	350.08	385.49	467.27
0.25	15	168.45	196.51	231.99	258.29	284.41	344.75
0.33	20	135.76	158.38	186.97	208.16	229.21	277.84
0.42	25	114.84	133.97	158.15	176.08	193.89	235.03
0.50	30	100.16	116.85	137.94	153.58	169.11	204.99
0.58	35	89.23	104.09	122.88	136.81	150.65	182.61
0.67	40	80.72	94.17	111.17	123.77	136.29	165.21
0.75	45	73.90	86.21	101.77	113.31	124.77	151.24
0.83	50	68.28	79.66	94.04	104.70	115.29	139.75
0.92	55	63.57	74.16	87.55	97.48	107.33	130.11
1.00	60	59.56	69.48	82.02	91.32	100.55	121.89
2.00	120	35.41	41.31	48.77	54.30	59.79	72.47
3.00	180	26.13	30.48	35.98	40.06	44.11	53.47
4.00	240	21.06	24.56	29.00	32.29	35.55	43.09
5.00	300	17.81	20.78	24.53	27.31	30.07	36.45
6.00	360	15.54	18.12	21.39	23.82	26.23	31.79
7.00	420	13.84	16.14	19.06	21.22	23.37	28.32
8.00	480	12.52	14.61	17.24	19.20	21.14	25.62
9.00	540	11.46	13.37	15.78	17.57	19.35	23.46
10.00	600	10.59	12.36	14.59	16.24	17.88	21.67
11.00	660	9.86	11.50	13.58	15.12	16.65	20.18
12.00	720	9.24	10.78	12.72	14.16	15.60	18.90
13.00	780	8.70	10.15	11.98	13.34	14.69	17.80
14.00	840	8.23	9.60	11.33	12.62	13.89	16.84
15.00	900	7.81	9.12	10.76	11.98	13.19	15.99
16.00	960	7.44	8.68	10.25	11.41	12.57	15.24
17.00	1020	7.11	8.30	9.80	10.91	12.01	14.56
18.00	1080	6.82	7.95	9.39	10.45	11.51	13.95
19.00	1140	6.54	7.63	9.01	10.03	11.05	13.39
20.00	1200	6.30	7.35	8.67	9.66	10.63	12.89
21.00	1260	6.07	7.08	8.36	9.31	10.25	12.42
22.00	1320	5.86	6.84	8.07	8.99	9.90	12.00
23.00	1380	5.67	6.62	7.81	8.69	9.57	11.61
24.00	1440	5.49	6.41	7.56	8.42	9.26	11.24

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 7. Hietogramas de distribución de lluvia para un periodo de retorno de 5, 10 y 100 años.

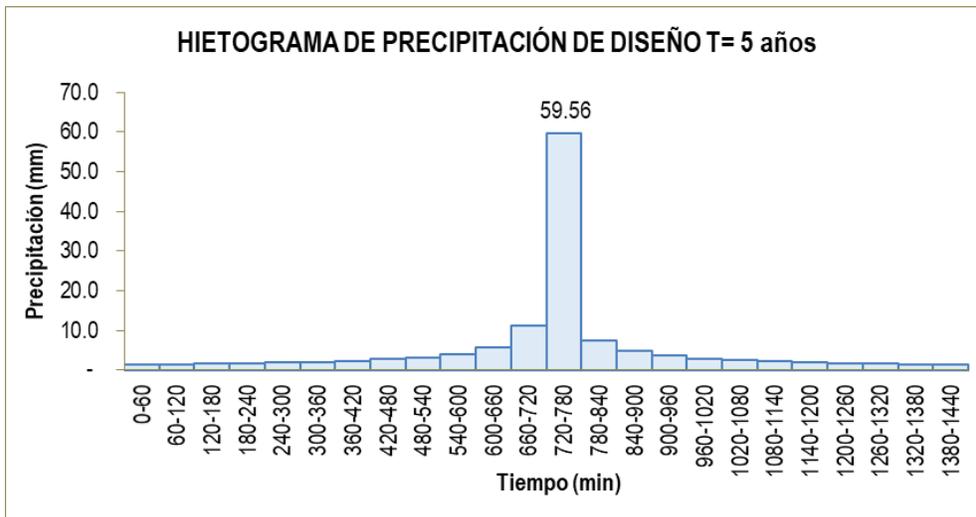


Imagen 36. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 5 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

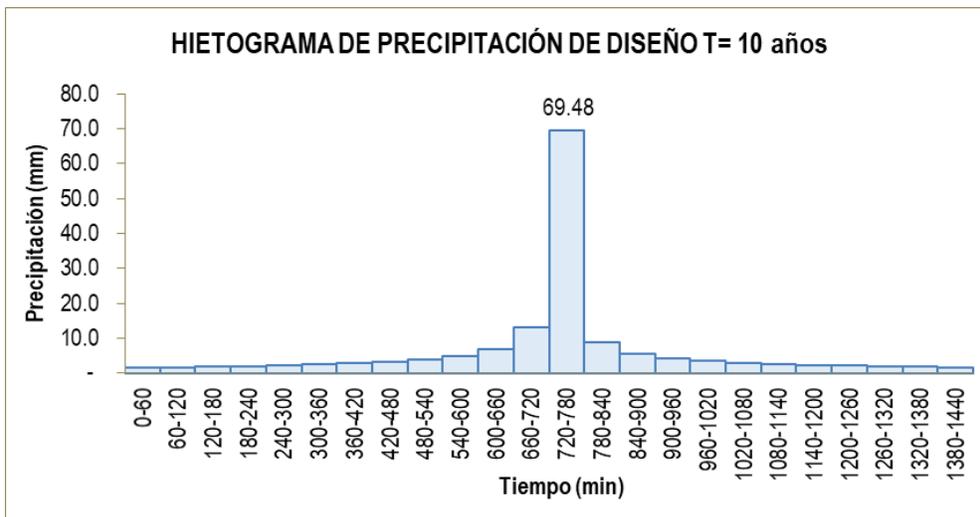


Imagen 37. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 10 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

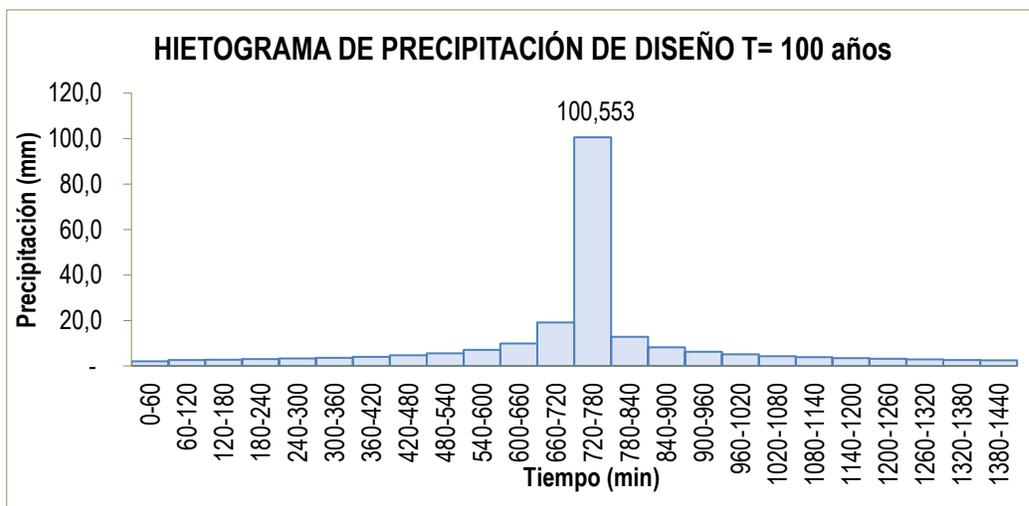


Imagen 38. Hietograma de distribución de lluvia en 24 horas laborado según el método de bloques alteros para un periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 8. Tablas con números de curva (CN) según el tipo y uso de suelo de las cuencas en estudio.

Grupo de suelo	Composición	Características
A	Arena profunda, limos agregados	Bajo potencial de escurrimiento
B	Marga arenosa	Moderado-bajo potencial de escurrimiento
C	Margas arcillosas, suelos con bajo contenido orgánico	Moderado-alto potencial de escurrimiento
D	Suelos expansivos, arcillas plásticas, suelos salinos	Alto potencial de escurrimiento

Fuente: (Béjar, 2004).

Tabla 31. Números de Curva para distintos tipos de suelo y uso de suelo.

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Fuente: (Chow, et al., 1994).

Tabla 32. Orden de suelos encontramos en la subcuenca del río Santa Bárbara, Santa Cruz, Guanacaste y su respectivo grupo hidrológico.

Tipo	Grupo hidrológico
Alfisoles	C
Alfisoles/Inceptisoles	C
Inceptisoles	D
Ultisoles	C
Vertisoles	D

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 33. Principales usos de suelo encontrados en la subcuenca del río Santa Bárbara mediante la Clasificación Supervisada y su respectivo Número de Curva.

Uso	Número Curva
Bosque	86
Pasto	79
Suelos desnudos	91
Urbano	82

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anexo 9. Sección transversal del río Santa Barbara.

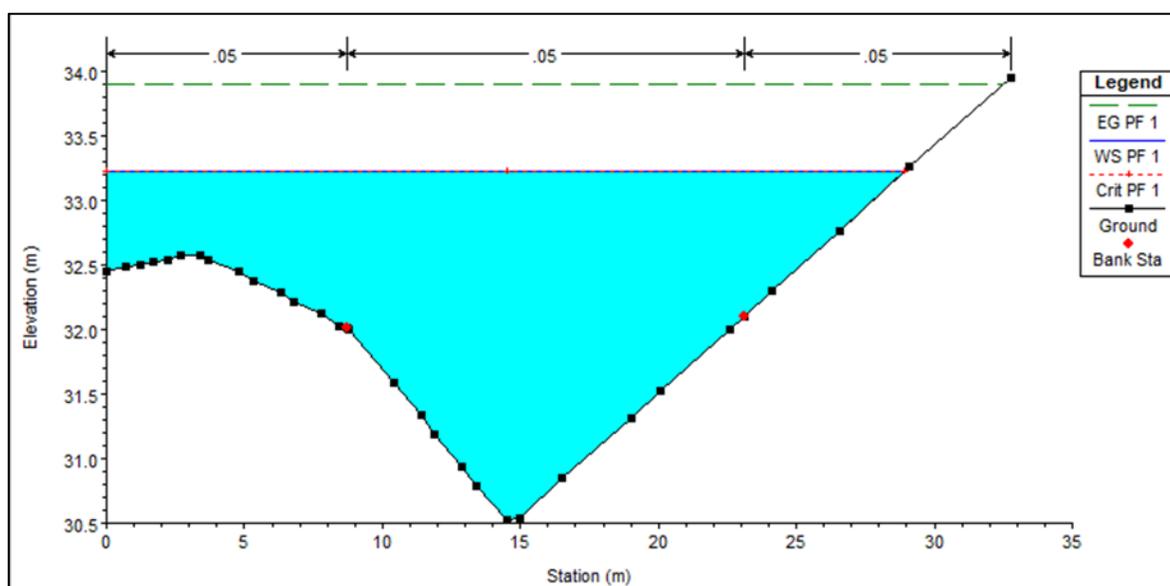


Imagen 39. Sección transversal número 787 sobre el cauce del río Santa Bárbara Santa Cruz, Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia. 2021.

Anexo 10. Valores de n de Manning para distintas condiciones del cauce pluvial.

Tabla 34. Diversos valores de rugosidad (n de Manning) para las diferentes condiciones naturales del cauce de un río.

D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060

Fuente: Noriega, s.f.