

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL RIO “BRAVO” MEDIANTE HEC-RAS EN UN
TRAMO DE 24KM. EN CD. JUÁREZ.**

POR:

EDUARDO DAVID GARZA BENAVIDES

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA EN
HIDROLOGIA**

COMITÉ

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

FECHA 12 DE JUNIO DE 2025



MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL RIO "BRAVO" MEDIANTE HEC-RAS EN UN TRAMO DE 24KM. EN CD. JUÁREZ. Tesis presentada por Eduardo David Garza Benavides como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico

Dr. Gerónimo Llerar Meza
Director(a) de Tesis

Abril 2025

COMITÉ

Dr. Gerónimo Llerar Meza
Dra. Lizbeth Salas Lechuga
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
M.I. Ana Carolina Quiroz



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

07 de abril de 2025.

ING. EDUARDO DAVID GARZA BENAVIDES
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Gerónimo Llerar Meza** para que lo desarrolle como tesis, con el título **“Modelación hidráulica del río “bravo” mediante HEC-RAS en un tramo de 24km. En Cd. Juárez”**.

Índice de Contenido

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Índice de Contenido

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Capítulo 1: Introducción

- 1.1 INTRODUCCIÓN
- 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- 1.3 ALCANCES Y OBJETIVOS
 - 1.3.1. Objetivo general
 - 1.3.2. Objetivos específicos
- 1.4 HIPÓTESIS
- 1.5 JUSTIFICACIÓN
- 1.6 LIMITANTES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 2: Marco Teórico

- 2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO
- 2.2 RÍOS
- 2.3 CAUSAS DE LAS INUNDACIONES
- 2.4 ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS
 - 2.4.1 Periodo de retorno de una avenida
 - 2.4.2 Métodos Estadísticos
 - 2.4.2.1 Método de Gumbel
 - 2.4.2.2 Método de Nash
- 2.5 CONCEPTOS BÁSICOS HIDRÁULICA
 - 2.5.1 Hidráulica fluvial
 - 2.5.1.1 Morfología de un río
 - 2.5.1.2 Perfil longitudinal de un río
 - 2.5.2 Hidráulica de canales
 - 2.5.2.1 Profundidad Hidráulica Media
 - 2.5.2.2 Bordo Libre
 - 2.5.2.3 Número de Froude
 - 2.5.2.4 Ecuación de la energía
 - 2.5.2.5 Rugosidad
 - 2.5.2.5.1 Factores que afectan el coeficiente de Rugosidad de Manning
- 2.6 MODELACIÓN HIDRÁULICA
 - 2.6.1 Introducción
 - 2.6.2 ¿ Qué es la modelación hidráulica?
 - 2.6.2.1 Software disponible para modelación numérica
 - 2.6.2.2 Tipos de modelización hidrodinámica
 - 2.6.2.2.1 Modelos unidimensionales (1D)
 - 2.6.2.2.2 Modelos bidimensionales (2D)
 - 2.6.2.2.3 Malla computacional
 - 2.6.2.2.3.1 Mallas estructuradas
 - 2.6.2.2.3.2 Mallas no estructuradas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 2.6.2.2.4 Tiempo computacional
 - 2.6.2.2.4.1 Número de Courant
- 2.6.2.2.5 Condiciones de Contorno
- 2.6.3 Software HEC-RAS
 - 2.6.3.1 Modelo unidimensional en HEC-RAS 1D en régimen de flujo permanente
 - 2.6.3.1.1 Ecuaciones de cálculo de perfiles hidráulicos
 - 2.6.3.1.2 Subdivisión de secciones transversales para cálculos de transporte
 - 2.6.3.1.3 Estimación de la carga de energía cinética media
 - 2.6.3.1.4 Estimación de pérdidas por fricción
 - 2.6.3.1.5 Estimación de pérdidas de contracción y expansión
 - 2.6.3.1.6 Procedimiento de estimación de perfiles hidráulicos
 - 2.6.3.1.7 Cálculo del tirante crítico
 - 2.6.3.1.7.1 Método Parabólico
 - 2.6.3.1.7.2 Método de la secante
 - 2.6.3.2 Modelo bidimensional en HEC-RAS 2D en régimen de flujo no permanente
 - 2.6.3.2.1 Introducción
 - 2.6.3.2.2 Ecuacion de conservación de masa
 - 2.6.3.2.3 Ecuacion de conservación de Momentum
 - 2.6.3.2.3.1 Aceleración
 - 2.6.3.2.3.2 Fricción inferior
 - 2.6.3.2.3.3 Efecto de Coriolis
 - 2.6.3.2.4 Aproximación de la onda difusa a ecuaciones de aguas profundas
 - 2.6.3.2.5 Cuadrícula y Cuadrícula dual
 - 2.6.3.2.5.1 Batimetría Sub-grid
 - 2.6.3.2.6 Métodos Numéricos
 - 2.6.3.2.6.1 Aproximación por diferencias finitas
 - 2.6.3.2.6.2 Aproximación por volúmenes finitas
 - 2.6.3.2.6.3 Condiciones de contorno



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 3: Información Disponible

- 3.1 DATOS HIDROMÉTRICOS DISPONIBLES
- 3.2 EVENTO DE LLUVIA EXTRAORDINARIA DEL 2006 EN CD. JUÁREZ
- 3.3 CAUDALES PICOS REPORTADOS EN EL RIO BRAVO DURANTE EL EVENTO DEL 2006.
- 3.4 TOPOGRAFÍA.
- 3.5 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Capítulo 4: Metodología

- 4.1 ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS
 - 4.1.1 Método de Gumbel
 - 4.1.2 Método de Nash
- 4.2 ESTRUCTURA DE DATOS PARA REALIZAR UN MODELAMIENTO HIDRAULICO CON HEC – RAS.
 - 4.2.1 Modelación Unidimensional
 - 4.2.1.1 Secciones transversales del cauce del Rio Bravo
 - 4.2.1.1.1 Modelo Digital de Elevación
 - 4.2.1.1.2 Modelo Curvas Topográficas y delimitación del cauce del río Bravo
 - 4.2.1.1.3 Obtención del buffer de las secciones del cauce del río Bravo
 - 4.2.1.1.4 Obtención de las secciones transversales de la zona de estudio del Rio Bravo
 - 4.2.1.1.5 Obtención del perfil del terreno y de la pendiente del cauce del río Bravo.
 - 4.2.1.1.6 Obtención de la altimetría de las secciones del cauce del río Bravo y alimentación de la geometría en HEC-RAS para la modelación unidimensional.
 - 4.2.1.2 Crear nuevo proyecto
 - 4.2.1.2.1 Crear un nuevo proyecto en HEC-RAS
 - 4.2.1.2.2 Definir sistemas de sistemas de unides en HEC-RAS
 - 4.2.1.2.3 Importar geometría para la modelación unidimensional HEC-RAS
 - 4.2.1.2.3.1 Datos necesarios ingresar en las secciones transversales para la modelación unidimensional HEC-RAS.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 4.2.1.3 Ingresar datos de flujo y condiciones de borde
 - 4.2.1.3.1.1 Ingresar datos de flujo.
 - 4.2.1.3.1.2 Ingresar condiciones de frontera.
- 4.2.1.4 Ejecución de cálculos hidráulicos
- 4.2.2 Modelación Bidimensional
 - 4.2.2.1 Elaboración de la capa de terreno de la zona de estudio
 - 4.2.2.1.1 Georreferenciado del modelo digital de elevación (MDT) en la zona de estudio
 - 4.2.2.1.2 Importación de la capa de terreno en la zona de estudio
 - 4.2.2.2 Elaboración de la capa de malla 2D
 - 4.2.2.3 Asignación de los parámetros de flujo no permanente para la modelación bidimensional
 - 4.2.2.3.1 Condición de frontera de entrada
 - 4.2.2.3.2 Condición de frontera de salida
 - 4.2.2.4 Corrida de la modelación bidimensional en HEC-RAS
 - 4.2.2.4.1 Creación de análisis de flujo no permanente
 - 4.2.2.4.2 Opciones de Calculo y Tolerancias

Capítulo 5: Resultados

5.1 COMPARACIÓN DE MÁXIMAS AVENIDAS

5.2 MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL

- 5.2.1 Análisis de Sensibilidad (Rugosidad del Manning) y Resultados de la Modelación unidimensional.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

5.3 MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

5.3.1 Modelación Bidimensional Análisis de Sensibilidad (Mallado y Rugosidad) y Resultados de la Modelación bidimensional.

5.3.1.1 Análisis de Sensibilidad de Mallado

5.3.1.2 Análisis de Sensibilidad de Rugosidad

Capítulo 6: Conclusiones, Limitantes y Recomendaciones

Referencias

Curriculum Vitae

ATENTAMENTE

“naturam subiecit aliis”

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue realizar un modelamiento hidráulico unidimensional y bidimensional, para el evento de precipitación presentado durante el año 2006 del Rio Bravo, desde el tramo de la presa americana que comienza en el tramo km0+000 hasta la sección km24+000 que corresponde al tramo revestido rectificado, para la sección del lado mexicano que corresponde a Cd. Juárez, Chihuahua, México, mediante la utilización del software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) a fin de desarrollar un mapa de los tirantes de inundación esperados para el periodo de retorno mencionado. La fase de análisis hidrológico consistió en procesar la información de promedios mensuales (1938-2024) históricos de la estación hidrométrica “Rio Grande” ubicada en el Paso, Texas, para posteriormente determinar los caudales máximos anuales para diferentes periodos de retornos (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años) por medio de métodos estadísticos. Se probó el ajuste de los caudales anuales máximos mediante el método de Gumbel y de Nash; para la calibración del caudal anual máximo se contaba con un caudal conocido, derivado de un evento de precipitación que tuvo lugar en la zona de estudio durante el año 2006. El modelo hidráulico se creó a partir del modelo digital de elevación Lidar con resolución de 1.0 m disponible por parte del servicio geológico de Estados Unidos (USGS) que sus siglas en inglés significan (United States Geological Survey). Con los resultados obtenidos de la modelación hidráulica se conocieron los distintos puntos críticos vulnerables en la zona de estudio; por lo cual los hallazgos de la presente investigación servirán de base para una futura investigación para desarrollar una solución que permita prevenir una catástrofe derivada de una inundación en la misma zona de estudio.

Palabras claves: HEC-RAS, modelación hidráulica, métodos estadísticos, caudales.

Abstract

The objective of the present investigation was to carry out a one-dimensional and two-dimensional hydraulic modeling, for the precipitation event that occurred during 2006, of the Rio Bravo from the section of the American dam that begins at the km0+000 section to the km24+000 section that corresponds to the rectified lined section, for the section of the Mexican side that corresponds to Cd. Juárez, Chihuahua, Mexico, utilizing the HEC-RAS software (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) to create a map of expected flood depths for the specified return period. The hydrological analysis phase involved processing historical monthly averages (1938-2024) from the “Rio Grande” hydrometric station located in El Paso, Texas, to determine the maximum annual flows for various return periods (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500, and 1000 years) using statistical methods. The adjustment of the maximum annual flow was tested using the Gumbel and Nash method. To calibrate the maximum annual flow, a known flow was available, derived from a precipitation event that occurred in the study area in 2006. The hydraulic model was created from the Lidar digital elevation model, which has a 1.0 m resolution, available from the United States Geological Survey (USGS). With the results obtained from hydraulic modeling, the different vulnerable critical points in the study area were known; Therefore, the findings of this research will serve as a basis for future research to develop a solution that prevents a catastrophe derived from a flood in the same study area.

Key Word: HEC-RAS, Hydrological and Hydraulic modeling, Statistical Methods

Agradecimientos

A DIOS, por proporcionarme de salud, fuerza y permitirme llevar a cabo el plan de vida que tenga destinado para mi persona.

A mi esposa Areli Yolanda Cantú Moreno, por su apoyo y compañía en esta etapa de mi vida, así como a mi hija: Mariana Garza Cantú, que se convirtió uno de mis motores principales en mi vida, a la cual le dedico especialmente cada uno de mis logros y metas alcanzadas.

A mi madre Gloria Benavides García y a mi padre Jaime Mario Garza Quiroga, por darme la vida, por siempre creer en mí, por amarme y sobre todo por los valores que han hecho que sea una persona de bien.

A mi hermana Angela Garza Benavides y a mi hermano Jaime Mario Garza Benavides, por toda la historia que tenemos como hermanos, por su gran cariño y apoyo.

A la gran empresa donde laboro especialmente a Cristian, Alfredo y David que me dieron todo su apoyo para hacer realidad este gran logro profesional en mi vida profesional.

A mi director de tesis el Dr. Gerónimo Llerar, a la Dra. Lizbeth Salas, al Dr. Alejandro Villalobos, y a la Maestra Ana Carolina Quiroz, por apoyarme a desarrollar el presente trabajo de investigación; que gracias a su constante apoyo a partir del día de hoy será el punto de inflexión para una nueva etapa en mi carrera tanto personal como profesional.



Índice de Contenido

Resumen	9
Abstract.....	10
Agradecimientos.....	11
Índice de Contenido.....	12
Índice de Figuras	16
Índice de Tablas.....	19
Capítulo 1: Introducción.....	20
1.1 INTRODUCCIÓN.....	20
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
1.3 ALCANCES Y OBJETIVOS.....	23
1.3.1. Objetivo general	23
1.3.2. Objetivos específicos.....	23
1.4 HIPÓTESIS	23
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	23
1.6 LIMITANTES	25
Capítulo 2: Marco Teórico	26
2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO.....	26
2.2 RÍOS	27
2.3 CAUSAS DE LAS INUNDACIONES	28
2.4 ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS ..	29
2.4.1 Periodo de retorno de una avenida	29
2.4.2 Métodos Estadísticos	30
2.4.2.1 Método de Gumbel.....	31
2.4.2.2 Método de Nash.....	34
2.5 CONCEPTOS BÁSICOS HIDRÁULICA	36
2.5.1 Hidráulica fluvial.....	36
2.5.1.1 Morfología de un río.....	36
2.5.1.2 Perfil longitudinal de un río.....	36
2.5.2 Hidráulica de canales.....	37
2.5.2.1 Profundidad Hidráulica Media	37



2.5.2.2	Bordo Libre	37
2.5.2.3	Número de Froude	38
2.5.2.4	Ecuación de la energía	38
2.5.2.5	Rugosidad	38
2.5.2.5.1	Factores que afectan el coeficiente de Rugosidad de Manning	39
2.6	MODELACIÓN HIDRAÚLICA	40
2.6.1	Introducción	40
2.6.2	¿ Qué es la modelación hidráulica?	41
2.6.2.1	Software disponible para modelación numérica	41
2.6.2.2	Tipos de modelización hidrodinámica	42
2.6.2.2.1	Modelos unidimensionales (1D)	42
2.6.2.2.2	Modelos bidimensionales (2D)	43
	Malla computacional	43
2.6.2.2.2.1	Mallas estructuradas	44
2.6.2.2.2.2	Mallas no estructuradas	44
2.6.2.2.3	Tiempo computacional	44
2.6.2.2.3.1	Número de Courant	44
2.6.2.2.4	Condiciones de Contorno	45
2.6.3	Software HEC-RAS	45
2.6.3.1	Modelo unidimensional en HEC-RAS 1D en régimen de flujo permanente 46	
2.6.3.1.1	Ecuaciones de cálculo de perfiles hidráulicos	46
2.6.3.1.2	Subdivisión de secciones transversales para cálculos de transporte	48
2.6.3.1.3	Estimación de la carga de energía cinética media	49
2.6.3.1.4	Estimación de pérdidas por fricción	51
2.6.3.1.5	Estimación de pérdidas de contracción y expansión	51
2.6.3.1.6	Procedimiento de estimación de perfiles hidráulicos	51
2.6.3.1.7	Cálculo del tirante crítico	52
2.6.3.1.7.1	Método Parabólico	53
2.6.3.1.7.2	Método de la secante	53
2.6.3.2	Modelo bidimensional en HEC-RAS 2D en régimen de flujo no permanente	54
2.6.3.2.1	Introducción	54
2.6.3.2.2	Ecuación de conservación de masa	54



2.6.3.2.3	Ecuacion de conservación de Momentum	55
2.6.3.2.3.1	Aceleración.....	56
2.6.3.2.3.2	Fricción inferior.....	56
2.6.3.2.3.3	Efecto de Coriolis	57
2.6.3.2.4	Aproximación de la onda difusa a ecuaciones de aguas profundas....	57
2.6.3.2.5	Cuadrícula y Cuadrícula dual	58
2.6.3.2.5.1	Batimetría Sub-grid	58
2.6.3.2.6	Métodos Numéricos.....	59
2.6.3.2.6.1	Aproximación por diferencias finitas	59
2.6.3.2.6.2	Aproximación por volúmenes finitas	60
2.6.3.2.6.3	Condiciones de contorno	61
Capítulo 3:	Información Disponible.....	63
3.1	DATOS HIDROMÉTRICOS DISPONIBLES	63
3.2	EVENTO DE LLUVIA EXTRAORDINARIA DEL 2006 EN CD. JUÁREZ....	68
3.3	CAUDALES PICOS REPORTADOS EN EL RIO BRAVO DURANTE EL EVENTO DEL 2006.	68
3.4	TOPOGRAFÍA.....	70
3.5	USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	70
Capítulo 4:	Metodología.....	71
4.1	ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS ..	71
4.1.1	Método de Gumbel.....	71
4.1.2	Método de Nash.....	73
4.2	ESTRUCTURA DE DATOS PARA REALIZAR UN MODELAMIENTO HIDRAULICO CON HEC – RAS.	74
4.2.1	Modelación Unidimensional.....	74
4.2.1.1	Secciones transversales del cauce del Rio Bravo	74
4.2.1.1.1	Modelo Digital de Elevación.....	74
4.2.1.1.2	Modelo Curvas Topográficas y delimitación del cauce del río Bravo	74
4.2.1.1.3	Obtención del buffer de las secciones del cauce del río Bravo	76
4.2.1.1.4	Obtención de las secciones transversales de la zona de estudio del Rio Bravo	77
4.2.1.1.5	Obtención del perfil del terreno y de la pendiente del cauce del río Bravo.	78
4.2.1.1.6	Obtención de la altimetría de las secciones del cauce del río Bravo y alimentación de la geometría en HEC-RAS para la modelación unidimensional.	79



4.2.1.2	Crear nuevo proyecto.....	79
4.2.1.2.1	Crear un nuevo proyecto en HEC-RAS.....	79
4.2.1.2.2	Definir sistemas de sistemas de unides en HEC-RAS.....	80
4.2.1.2.3	Importar geometría para la modelación unidimensional HEC-RAS..	80
4.2.1.2.3.1	Datos necesarios ingresar en las secciones transversales para la modelación unidimensional HEC-RAS.....	85
4.2.1.3	Ingresar datos de flujo y condiciones de borde	89
4.2.1.3.1.1	Ingresar datos de flujo.	89
4.2.1.3.1.2	Ingresar condiciones de frontera.....	90
4.2.1.4	Ejecución de cálculos hidráulicos	91
4.2.2	Modelación Bidimensional.....	93
4.2.2.1	Elaboración de la capa de terreno de la zona de estudio	93
4.2.2.1.1	Georreferenciado del modelo digital de elevación (MDT) en la zona de estudio	93
4.2.2.1.2	Importación de la capa de terreno en la zona de estudio	94
4.2.2.2	Elaboración de la capa de malla 2D	95
4.2.2.3	Asignación de los parámetros de flujo no permanente para la modelación bidimensional	98
4.2.2.3.1	Condición de frontera de entrada.....	99
4.2.2.3.2	Condición de frontera de salida	99
4.2.2.4	Corrida de la modelación bidimensional en HEC-RAS	101
4.2.2.4.1	Creación de análisis de flujo no permanente	102
4.2.2.4.2	Opciones de Calculo y Tolerancias	102
Capítulo 5:	Resultados.....	104
5.1	COMPARACIÓN DE MÁXIMAS AVENIDAS	104
5.2	MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL	105
5.2.1	Análisis de Sensibilidad (Rugosidad del Manning) y Resultados de la Modelación unidimensional.	105
5.3	MODELACIÓN BIDIMENSIONAL.....	108
5.3.1	Modelación Bidimensional Análisis de Sensibilidad (Mallado y Rugosidad) y Resultados de la Modelación bidimensional.	108
5.3.1.1	Análisis de Sensibilidad de Mallado	108
5.3.1.2	Análisis de Sensibilidad de Rugosidad.....	114
Capítulo 6:	Conclusiones, limitantes y recomendaciones	115
Referencias	117



Índice de Figuras

Figura 1.2.1: Precipitación y probabilidades de excedencia anual de inundaciones durante los eventos de precipitación del 2006 y 2021 en El Paso, Texas. Fuente: (AECOM Technical Services, 2023).....	22
Figura 1.2.2 : Cauce del Rio Bravo en el evento de precipitación el 2006. Fuente: (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2016).....	22
Figura 1.5.3 : Zona de estudio del rio Bravo. Fuente: (CILA, 2008).	24
Figura 1.5.4 : Secciones de estudio sobre el cauce del Rio Bravo. Fuente: Elaboración propia en el software HEC-RAS.	24
Figura 2.1.5 : El Ciclo hidrológico. Fuente (Vera & Camilloni, 2019).....	27
Figura 2.2.6 : Un ejemplo de una llanura de inundación y sus sistemas fluviales relacionados con cuatro gradientes dimensionales. Fuente (Noe, 2022).....	28
Figura 2.4.7 : Riesgo de que al menos un evento de diseño exceda su vida útil. Fuente (Chow, 1994).....	30
Figura 2.4.8 : Constante en función de N. Fuente (Estrada, 2008).	33
Figura 2.4.9 : Constante $N \propto \partial_m$ en función de N. Fuente (Estrada, 2008).....	34
Figura 2.5.10 : Esquematación del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido. Fuente (Rocha, 1988).....	37
Figura 2.5.11: Coeficientes de Rugosidad de Manning. Fuente (Chow & Maidment, 1998).	39
Figura 2.5.12 : Criterio de Cowan para ajustamiento de los factores que influyen en la irregularidad de las llanuras de inundación . Fuente (Chow & Maidment, 1998).	40
Figura 2.6.13 : Malla computacional estructurada (celdas simétricas). Fuente (Castro & García, 2021).	44
Figura 2.6.14 : Malla computacional no estructurada (celdas asimétricas). Fuente (Castro & García, 2021).	44
Figura 2.6.15 : Subdivisión de transporte. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024).....	46
Figura 2.6.16 : Representación de los términos de la ecuación de energía. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024).....	47
Figura 2.6.17 : Distribución de flujo entre dos secciones. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)	48
Figura 2.6.18 : División de franjas en las secciones transversales. Fuente (HEC-RAS)	49
Figura 2.6.19 : Estimación de carga cinética media. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)	50
Figura 2.6.20 : Curva de la energía específica. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024).....	53
Figura 2.6.21 : Representación de la estructura de malla. Fuente (HEC-RAS, 2024)	58
Figura 2.6.22 : Cuadrícula cartesiana y cuadrícula computacional. Fuente (HEC-RAS, 2024).....	59
Figura 2.6.23 : Derivada direccional entre celdas. Fuente (Casulli, 2009)	60



Figura 2.6.24 : Celda y Celda dual por volúmenes finitos. Fuente (Casulli, 2009)	60
Figura 3.1.25 : Caudales históricos máximos en la estación 08364000 (1889-2024). Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 3.1.26 : Caudales históricos máximos en la estación 08364000 (1939-2024). Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 3.1.27 : Cuenca del Rio Bravo. Fuente (AECOM, 2023).	66
Figura 3.1.28 : Cuenca del Rio Bravo. Fuente (AECOM, 2023).	67
Figura 3.2.29 : Hidrograma de caudal pico en el Rio Bravo durante el evento del 2006. Fuente (Lugo, 2016).	68
Figura 3.3.30 : Análisis estadístico de caudal pico en el Rio Bravo en la estación Rio Grande para distintos periodos de retorno. Fuente (AECOM, 2023).....	69
Figura 4.2.31: Modelo Digital de Elevación ingresado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración Propia.	75
Figura 4.2.32 : Curvas de Nivel a cada 20 metros y delimitación manual del cauce del rio Bravo realizado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 4.2.33 : Delimitación manual del cauce del rio Bravo realizado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 4.2.34 : Delimitación manual del buffer del cauce del rio Bravo @ 350 metros del lado izquierdo y derecho realizado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 4.2.35 : Elaboración de las Secciones transversales @ 20 metros. Mediante el software AutoCAD. . Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 4.2.36 : Secciones transversales @ 20 metros en la zona de estudio exportadas mediante el software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 4.2.37 : Pendiente del cauce del Rio Bravo calculada mediante el software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 4.2.38 : Altimetría de las secciones del cauce del Rio Bravo Obtenidas mediante software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 4.2.39 : Ventana para crear un nuevo proyecto en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS	80
Figura 4.2.40 : Ventana para seleccionar el sistema de unidades en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.....	80
Figura 4.2.41: Ventana para importar la geometría del modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.....	81
Figura 4.2.42 Ventana para seleccionar el archivo CVS de altimetría del modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.	81
Figura 4.2.43 : Ventana de CVS Import de altimetría para el modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.....	82
Figura 4.2.44 : Ventana de Import Geometry Data para el modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.....	82
Figura 4.2.45 : Secciones transversales importadas de la zona de estudio para el modelo 1D. Fuente: Software HEC-RAS.....	83
Figura 4.2.46 : Ventana de Import Geometry Data para el modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.....	83
Figura 4.2.47 : Sección de la topografía de aguas arriba. Fuente: Software HEC-RAS.	84
Figura 4.2.48 : Sección de la topografía de aguas abajo. Fuente: Software HEC-RAS.....	85



Figura 4.2.49 : Definición de los bancos izquierdos y derechos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.....	86
Figura 4.2.50 : Distancia de separación definidas para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.....	86
Figura 4.2.51: Coeficientes de expansión-contracción definidos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.....	88
Figura 4.2.52 : Coeficientes de Rugosidad Manning definidos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.....	88
Figura 4.2.53 : Ingreso del gasto para el evento del año 2006.Fuente: Software HEC-RAS.....	89
Figura 4.2.54 : Ingreso del gasto para el evento del año 2006.Fuente: Software HEC-RAS.....	89
Figura 4.2.55 : Ingreso de condiciones de frontera. Fuente: Software HEC-RAS.....	91
Figura 4.2.56 : Ingreso de condiciones de frontera. Fuente: Software HEC-RAS.....	91
Figura 4.2.57 : Análisis de flujo permanente .Fuente: Software HEC-RAS.....	92
Figura 4.2.58 : Ventana de progreso de modelación unidimensional. Fuente: Software HEC-RAS.....	93
Figura 4.2.59 : Georreferenciación del MDT en la zona de estudio Fuente: Software HEC-RAS.....	94
Figura 4.2.60 : Capa ráster importada en RAS MAPPER. Fuente Software HEC-RAS. ...	95
Figura 4.2.61 : Creación de Malla 2D en Geometric Data. Fuente Software HEC-RAS....	95
Figura 4.2.62 : Establecimiento de los parámetros para la creación de la malla 2D. Fuente Software HEC-RAS.....	97
Figura 4.2.63 : Capa de Malla 2D elaborada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.....	98
Figura 4.2.64 : Asignación de parámetros hidráulicos para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.....	99
Figura 4.2.65 : Condición de entrada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.....	100
Figura 4.2.66 : Hidrograma de entrada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.....	101
Figura 4.2.67 : Condición de salida para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.....	101
Figura 4.2.68 : Ventana de ejecución del modelo bidimensional de flujo no permanente en HEC-RAS. Fuente Software HEC-RAS.....	102
Figura 4.2.69 : Ventana de opciones de cálculos y tolerancia del modelo bidimensional de flujo no permanente en HEC-RAS. Fuente Software HEC-RAS.....	103
Figura 5.1.70 : Comparación de Caudales (m^3 / s) por el método de Gumbel y Nash y el evento del 2006. Fuente: Elaboración Propia.....	105
Figura 5.2.71 : Perfil longitudinal del río. Fuente: Elaboración Propia	106
Figura 5.2.72 : Sección 1, aguas arriba. Fuente: HEC-RAS.	107
Figura 5.2.73 : Sección 1, aguas abajo. Fuente: HEC-RAS.	107



Figura 5.2.74 : Representación de desborde del flujo en la modelación 1D. Fuente: HEC-RAS	108
Figura 5.3.75 : Tirantes con un mallado de 7 metros. Fuente: HEC-RAS	109
Figura 5.3.76 : Tirantes con un mallado de 10 metros. Fuente: HEC-RAS	109
Figura 5.3.77 : Tirantes con un mallado de 15 metros. Fuente: HEC-RAS	110
Figura 5.3.78 : Tirantes con un mallado de 25 metros. Fuente: HEC-RAS	110
Figura 5.3.79 : Tirantes con un mallado de 40 metros. Fuente: HEC-RAS	111
Figura 5.3.80 : Tirantes en la sección aguas arriba. Fuente HEC-RAS	112
Figura 5.3.81 : Tirantes en la sección aguas abajo. Fuente HEC-RAS	112

Índice de Tablas

Tabla 3.1.1 : Características de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 3.1.2 : Caudales históricos máximos (1889-2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 3.3.3 : Caudales pico en el Rio Bravo en la estación Rio Grande para distintos periodos de retorno. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 4.1.4 : Caudales históricos máximos (1939-2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia	71
Tabla 4.1.5 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Gumbel (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 4.1.6 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Gumbel (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 4.1.7 : Caudales por el método de Gumbel m^3 / s . Fuente: Elaboración Propia.....	72
Tabla 4.1.8 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Nash (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 4.1.9 : Caudales por el método de Nash m^3 / s . Fuente: Elaboración Propia	73
Tabla 4.2.10 : Asignación de Rugosidad de Manning para la modelación 1D. Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 5.1.11 : Comparación de Caudales por el método de Gumbel y Nash m^3 / s . Fuente: Elaboración Propia	104
Tabla 5.2.12 : Coeficientes de rugosidad asignados en la modelación bidimensional. Fuente: Elaboración Propia	105
Tabla 5.3.13 : Parámetros para la sección aguas arriba para cada tamaño de malla. Fuente: Elaboración Propia	113
Tabla 5.3.14 : Parámetros para la sección aguas abajo para cada tamaño de malla. Fuente: Elaboración Propia.	113
Tabla 5.3.15 : análisis de sensibilidad de la rugosidad. Fuente: Elaboración Propia.....	114

Capítulo 1: Introducción

1.1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son riesgos naturales o antropogénicos que se caracterizan por generar estragos de índole económico, ambiental, demográfico, social (López Rodríguez *et al.*, 2021). En base a los registros históricos de los últimos años, se espera que conforme transcurra el tiempo la intensidad de estas será mayor, así como la recurrencia de estas (Annuar *et al.*, 2021)

Barrales & Díaz (2018) indicaron que las inundaciones encabezan la lista de las principales causas de pérdidas económicas derivadas de fenómenos naturales a nivel global. México no sería la excepción a esta estadística mundial, dado que el país adolece de reglamentaciones y programas sólidos para mitigar las mismas. En la mayoría de los casos estos efectos devastadores se ven reflejados mediante afectaciones en las vías de comunicación, la infraestructura urbana, la fauna, actividades económicas; inclusive en algunos casos pueden provocar pérdida de vidas humanas (Cajigal Molina & Maldonado González, 2019).

Los efectos de las causas naturales debido al cambio climático y a las alteraciones del ciclo hidrológico, etc. y los efectos derivados de las actividades humanas son factores que contribuyen a magnificar las inundaciones. Por ejemplo, la urbanización (Reyes *et al.*, 2022), Schön & Achkar (2022) mencionaron que el cambio en el uso de suelo es un factor que tiene una contribución significativa en incrementar la severidad y la magnitud de las inundaciones en las grandes ciudades. López García *et al.* (2020) indican, que en los últimos años Ciudad Juárez, Chihuahua ha experimentado cambios desmesurados en la demografía y en la urbanización, lo cual podría representar una amenaza en potencializar las inundaciones en la ciudad.

Por lo anterior, el presente estudio de investigación tiene como objetivo modelar hidráulicamente el río Bravo, en un tramo de 24 km. en Cd. Juárez, para identificar las secciones propensas a desbordes ante un potencial evento de desbordamiento.

La estructura de la tesis se describe en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: *Introducción*, se describe el planteamiento del problema, se enlistan los antecedentes, se declaran los objetivos generales y específicos, se detalla la justificación y se enlistan las limitantes.
- Capítulo 2: *Marco Teórico*, en este apartado se presenta la base teórica del antecedente de la investigación con su respectivo marco conceptual.
- Capítulo 3: *Información Disponible*, se presenta la información disponible para el desarrollo de la presente investigación.
- Capítulo 4: *Metodología*, se detalla el tipo, nivel y diseño de la presente tesis; se declaran las variables dependientes e independientes.

- Capítulo 5: Resultados, se exponen los resultados obtenidos del análisis de la hidrología; así como los resultados obtenidos del modelamiento.
- Capítulo 6: Conclusiones, se presentan las conclusiones y las recomendaciones obtenidas a partir de las investigaciones realizadas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ciudad Juárez, Chihuahua, México dentro de sus límites geográficos colinda al Norte con el río Bravo, lo cual representa una fuente potencial de inundación. El trabajo realizado por Mendoza (2022) muestra que el crecimiento urbano de Cd. Juárez en un periodo de 28 años (1990-2008), conllevó al incremento de un 155% del cambio de uso de suelo a urbano. Esta condición provocó una modificación de la geomorfología y topografía de la superficie terrestre natural; que se tradujo en una alteración en el comportamiento de los flujos de escorrentía. Durante la década de los setenta, Cd. Juárez experimentó un proceso de industrialización, lo que resultó en un aumento exponencial en el cambio de uso de suelo (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2016).

De acuerdo con el estudio desarrollado por AECOM Technical Services, Inc. (2023) para la Región 14 del Grupo Regional de Planificación de Inundaciones del Alto Río Grande de los Estados Unidos, indica que en el valle de Cd. Juárez y el condado del el Paso, Texas se presentaron lluvias de larga duración y baja intensidad (20 centímetros sobre cuatro días en 2006) y lluvias de corta duración y alta intensidad (8 centímetros en una hora en 2021) causando peligros de inundaciones en el condado de El Paso y Cd. Juárez. Ambos eventos de tormenta, que se muestran en la Figura 1, tuvieron una probabilidad de excedencia anual (AEP) de aproximadamente 0.4% (que se traduce en un evento de periodo de retorno de 250 años).

En el 2006, durante los meses de Julio y Agosto, se presentaron fenómenos climatológicos extraordinarios que afectaron severamente a Cd. Juárez; trayendo una cantidad de precipitación muy superior a la registrada en los últimos años. En la Figura 2 se ilustra el caucel del Río Bravo en Cd. Juárez, durante el evento del 2006. La figura fue obtenida de la base de datos hemerográficas históricas locales y regionales con las que tiene acceso el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (2016).

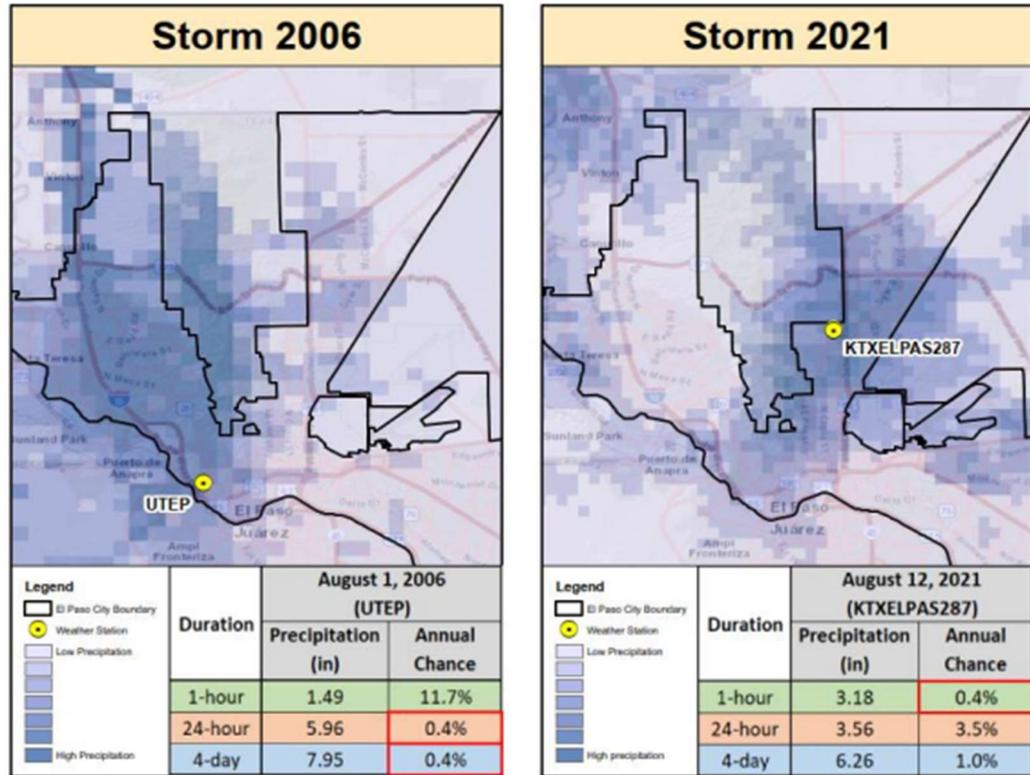


Figura 1.2.1: Precipitación y probabilidades de excedencia anual de inundaciones durante los eventos de precipitación del 2006 y 2021 en El Paso, Texas. Fuente: (AECOM Technical Services, 2023).



Figura 1.2.2 : Cauce del Rio Bravo en el evento de precipitación el 2006. Fuente: (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2016).

1.3 ALCANCES Y OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Modelar la hidráulica en el cauce del río Bravo (Tramos Km 0+000 al Km 24 0+000), los cuales son administrados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) en la sección correspondiente a Cd. Juárez, Chihuahua.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definir la geometría del Río Bravo para un tramo de 24km. a partir de un modelo digital de elevación LIDAR.
- Analizar la hidrología para determinar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno a través de métodos estadísticos.
- Realizar el modelamiento hidráulico unidimensional del Río Bravo en un tramo de 24 kilómetros mediante el software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) para el evento de inundación del 2006.
- Realizar el modelamiento hidráulico bidimensional del Río Bravo en un tramo de 24 kilómetros mediante el software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) para el evento de inundación del 2006.
- Identificar áreas propensas a inundación, mediante el cálculo de avenidas de inundación para el evento que se presentó en el año 2006.
- Realizar un análisis de sensibilidad de mallado para la calibración del modelo hidráulico.

1.4 HIPÓTESIS

El río Bravo en el lado mexicano representa un riesgo potencial de inundación, en especial en el tramo que abarca desde la presa americana (km 0+000) hasta el cauce rectificado revestido (km 24+000).

1.5 JUSTIFICACIÓN

Tomando como premisa las condiciones descritas anteriormente, la presente investigación busca analizar las máximas avenidas con datos hidrométricos para estimar los caudales máximos mediante métodos estadísticos a diferentes periodos de retorno y plantear el modelo hidráulico en HEC – RAS, para el evento del 2006, para la identificación de tramos críticos sobre el cauce del río Bravo susceptibles a desbordamientos. Se aclara que la presente evaluación se realizará en una zona que corresponde a 24 kilómetros en extensión territorial; la zona de estudio está bajo la jurisdicción a cargo de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) que se extiende desde la presa americana (km 0+000) hasta la sección del cauce rectificado revestido (km 24+000).



Figura 1.5.3 : Zona de estudio del rio Bravo. Fuente: (CILA, 2008).

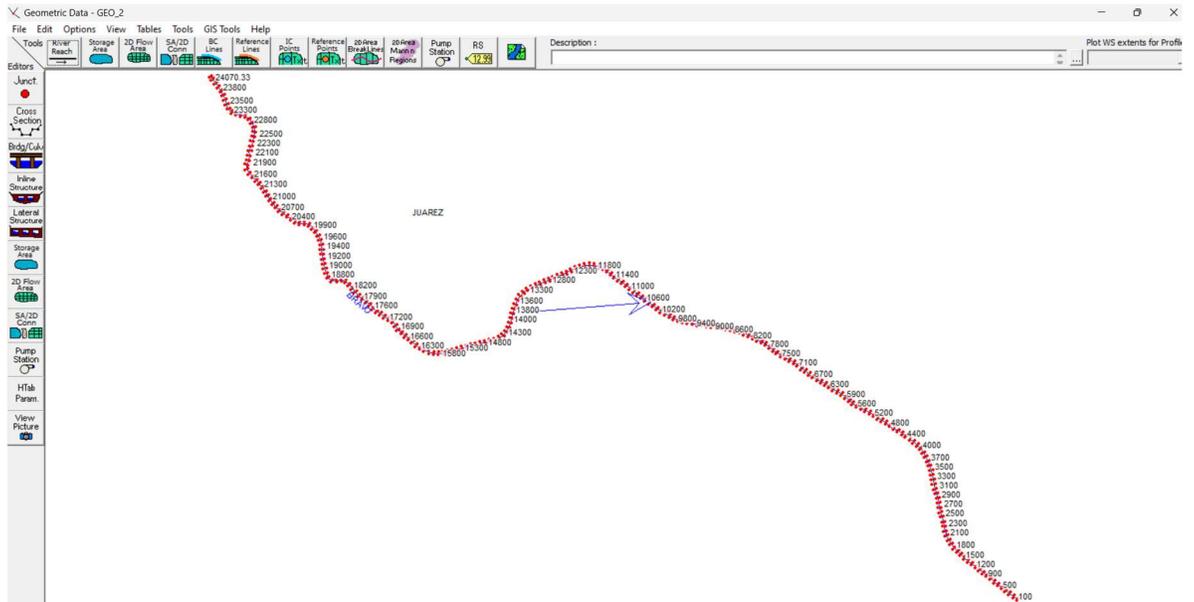


Figura 1.5.4 : Secciones de estudio sobre el cauce del Rio Bravo. Fuente: Elaboración propia en el software HEC-RAS.

1.6 LIMITANTES

Los hallazgos de la presente investigación no tienen como objetivo plantear soluciones para mitigar las afectaciones en las zonas susceptibles a través de las secciones identificadas en el modelo hidráulico formulado. Así mismo, tampoco incorpora elementos estructurales y/o hidráulicos tales como: (puentes, diques de contención, presas reguladoras, etc.) debido a la información limitante que se tiene. Por lo tanto, para complementar y ampliar el estudio, los hallazgos de la presente investigación serán compartidos con cualquier estudiante, profesional y autoridades municipales o regionales interesado en trabajar, así como proponer políticas para el desarrollo y prevención de catástrofes ocasionados en un evento extraordinario de precipitación que favorezcan un potencial desbordamiento del río Bravo.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO

El agua cubre aproximadamente el 75% de la superficie de la Tierra. Uno de los recursos más valiosos y utilizados del mundo es el agua. La lluvia, los manantiales, los arroyos, los ríos y los lagos son las principales fuentes de esta sustancia líquida. El agua, como vapor, se puede encontrar en el aire, donde suele condensarse y formar nubes. Montini (2021) conceptualiza el ciclo hidrológico como una serie de procesos sin un principio ni un fin finamente delimitados; ya que los procesos que tiene lugar en el ciclo hidrológico tienen lugar de forma simultánea.

La siguiente figura muestra esquemáticamente cómo el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso a través del proceso de evaporación. Durante este proceso, el agua se incorpora en estado gaseoso a la atmósfera terrestre, mientras que el vapor de agua regresa a la atmósfera a través de la condensación y cae a la superficie terrestre o a los cuerpos de agua. El agua que proviene de la precipitación atmosférica puede convertirse en movimiento superficial de agua sobre el suelo, interceptarse en la vegetación, infiltrarse en el suelo e incorporarse a las corrientes de agua subterránea y desembocar en los cuerpos de agua mediante escorrentía superficial. El agua que se infiltra en el manto subterráneo podría caer muy profundamente para recargar los sistemas de aguas subterráneas y luego aparecer en la superficie en algún cuerpo de agua para escurrir al mar o evaporarse de nuevo a la atmósfera (Montini, 2021).

En esencia, la Tierra es un "sistema cerrado". En otras palabras, el planeta no gana ni pierde materia, ni tampoco agua. Este líquido vital se mueve constantemente de un lugar a otro y de un estado a otro gracias al ciclo del agua o ciclo hidrológico, según Vera & Camilloni (2019).

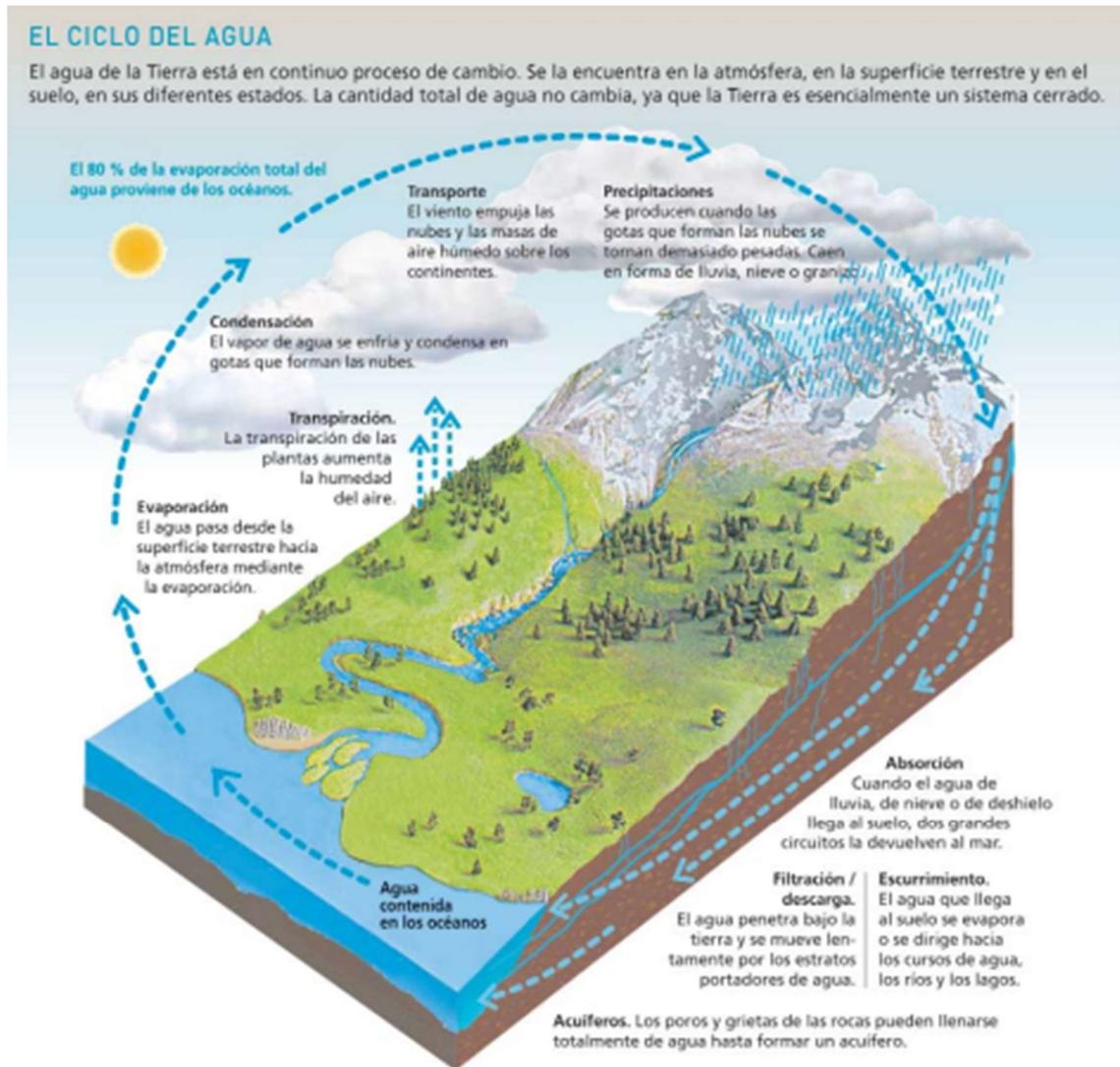


Figura 2.1.5 : El Ciclo hidrológico. Fuente (Vera & Camilloni, 2019).

2.2 RÍOS

Hernández (2018) menciona que los ríos son corrientes de agua permanentes que recogen el agua de las lluvias directamente o a través de manantiales y la llevan al mar, un lago u otro río. El río normalmente nace en un lugar conocido que sirve como nacimiento o fuente, pero también puede formarse por la confluencia de varios torrentes o de varios ríos principales como se ilustra en la figura 2.1.6. Los ríos son cruciales para la vida humana porque proporcionan recursos alimentarios, mantienen reservas de agua para el riego y el consumo, son fuentes energéticas aprovechables a través de las centrales hidroeléctricas y son importantes vías de comunicación.

Los desbordamientos en las partes bajas de las corrientes naturales pueden causar inundaciones donde la pendiente del cauce es pequeña y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida; lo cual puede derivar consecuencias socioeconómicas significativas en la medida que afecten residencias para personas, centros de producción agrícola o industrial e infraestructura para las vías Cordova Diaz (2017).

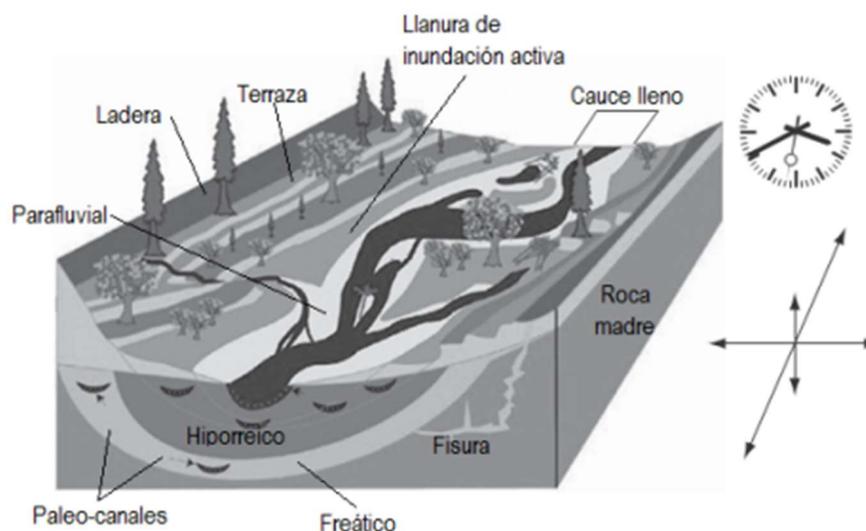


Figura 2.2.6 : Un ejemplo de una llanura de inundación y sus sistemas fluviales relacionados con cuatro gradientes dimensionales. Fuente (Noe, 2022).

2.3 CAUSAS DE LAS INUNDACIONES

Resulta de vital importancia conocer cómo se producen las inundaciones, sus categorías, factores que las ocasionan y su comportamiento en el futuro; con la intención de adquirir la capacidad de desarrollar planes de respuesta temprana a dicha contingencia (Muñoz, 2020).

De acuerdo con Cordova (2017), las inundaciones se clasifican en función de la fuente de donde provienen. Existen tres tipos de Inundaciones:

- 1) Las pluviales se caracterizan por fuertes precipitaciones concentradas en una zona particular,
- 2) fluviales se distinguen por el desbordamiento de cuerpos de agua (ríos, presas, arroyos) y su posterior extensión a los terrenos aledaños y finalmente
- 3) las inundaciones costeras que principalmente entran por las zonas marítimas, cubriendo grandes extensiones de tierra, generalmente se asocian con fenómenos naturales como: huracanes, ciclones, tifones.

2.4 ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS

2.4.1 *Periodo de retorno de una avenida*

Estrada (2008) indica que, para un caudal de diseño, el periodo de retorno se define como el período de tiempo dentro del cual un evento de magnitud Q puede ser igualado o excedido en promedio por lo menos una vez. Si un evento igual o mayor a Q ocurre una vez cada T años, la probabilidad de que ocurra P es igual a 1 en todos los casos T, es decir:

$$P = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Donde:

P : Probabilidad de ocurrencia de un caudal “Q”

T : Periodo de retorno

Las relaciones de probabilidades se pueden desglosar de acuerdo con la definición anterior:

- La probabilidad de un caudal “Q” ocurran en cualquier año es:

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

- La probabilidad de que Q no ocurra en cualquier año; en otras palabras, la probabilidad de que ocurra un caudal menor de Q es:

$$\bar{p} = 1 - P \quad (3)$$

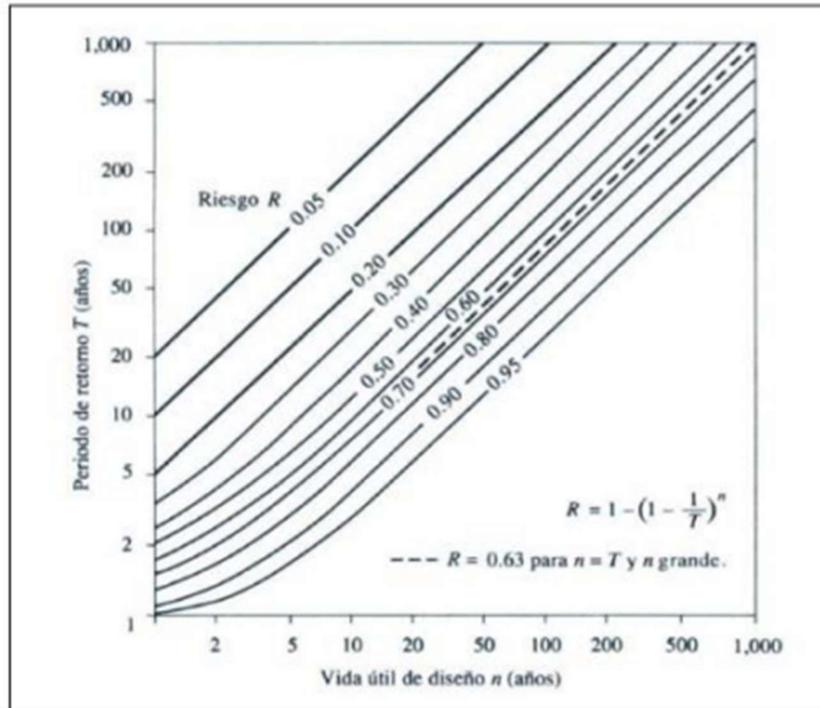


Figura 2.4.7 : Riesgo de que al menos un evento de diseño exceda su vida útil. Fuente (Chow, 1994)

El cálculo de las avenidas máximas se puede realizar por los siguientes métodos (Estrada, 2008)

- Métodos directos
- Métodos empíricos
- Métodos del número de la curva
- Métodos estadísticos
- Métodos hidrológicos

Debido a que se tiene la información hidrométrica requerida, la presente tesis utilizará métodos estadísticos para calcular los valores de avenidas máximas.

2.4.2 Métodos Estadísticos

Los métodos estadísticos asumen que el caudal máximo anual es una variable aleatoria con una distribución específica. Para usarlos, es necesario contar con un registro de caudales máximos anuales como información de entrada; cuanto mayor sea el registro, mayor será la aproximación del cálculo del caudal de diseño, que se calcula para un periodo de retorno específico Estrada (2008).

En la mayoría de las ocasiones, se cuenta con pocos años de registro, por lo que, si se quiere inferir un caudal con un periodo de retorno mayor al tamaño del registro, se debe prolongar la curva de distribución de probabilidades de los caudales máximos en su extremo.

El problema surge debido a la gran cantidad de distribuciones que se adhieren a los datos y, sin embargo; difieren significativamente en los extremos. Esto ha llevado a una variedad de enfoques estadísticos diferentes, dependiendo del tipo de distribución en cuestión. Los métodos estadísticos más ampliamente usados para estimar las máximas avenidas de inundación son (Estrada, 2008):

- Gumbel
- Nash

Tanto Gumbel como Nash consideran una distribución de valores extremos, pero con la diferencia es que el método de Nash es menos riguroso que Gumbel; ya que, permite ajustar la distribución por mínimos cuadrados. Idealmente, es recomendable seleccionar varias distribuciones y determinar cuál se ajusta mejor; para lograr esto, es necesario contar con los datos necesarios para realizar pruebas estadísticas, como la prueba de bondad de ajuste (Estrada, 2008).

2.4.2.1 Método de Gumbel

La siguiente ecuación se utiliza para encontrar el caudal máximo para un periodo de retorno específico (Estrada, 2008).

$$Q_{max} = Q_m - \frac{\partial_Q}{\partial_N} (Y_n - \ln T) \quad (4)$$

$$\partial_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 - nQ_m^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$P = 1 - (1 - q)^n \quad (6)$$

$$q = \frac{1}{T_r} \quad (7)$$

$$T_r = \frac{n}{P} \quad (8)$$

$$\psi = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (9)$$

Donde:

Q_{max} : Caudal máximo para un periodo de retorno dado (m^3 / s)

N : Número de años de registro

Q_i : Caudales máximos anuales registrados (m^3 / s)

- Q_m : Caudal promedio (m^3 / s)
 T : Periodo de retorno
 ∂_N : Constante en función de N, ver Figura 2.4.8
 ∂_Q : Desviación standard de los caudales
 q : Probabilidad de que ocurra la avenida en un año particular
 P : Probabilidad de que ocurra la avenida o una mayor
 n : Vida útil de la obra
 T_r : Periodo de retorno de la avenida
 ψ : Intervalo de confianza

Si $\psi = 1 - \frac{1}{T_r}$ oscila entre 0.20 y 0.80, la siguiente fórmula se utiliza para calcular el intervalo de confianza, que es aquel dentro del cual puede variar Q_{max} dependiendo de los registros disponibles (Estrada, 2008):

$$\Delta Q = \pm \frac{\partial_q}{\partial_N \sqrt{N}} \sqrt{N \infty \partial_m} \quad (10)$$

Donde:

- N : Número de años de registro
 $N \infty \partial_m$: Constante en función de N, ver Figura 2.4.8
 ∂_Q : Desviación standard de los caudales
 ∂_N : Constante en función de N, ver Figura 2.4.9

N	Y_N	σ_N	N	Y_N	σ_N
8	0.4843	0.9043	49	0.5481	1.1590
9	0.4902	0.9288	50	0.54854	1.16066
10	0.4952	0.9497	51	0.5489	1.1623
11	0.4992	0.9676	52	0.5493	1.1638
12	0.5035	0.9833	53	0.5497	1.1653
13	0.5070	0.9972	54	0.5501	1.1667
14	0.5100	1.0095	55	0.5504	1.1681
15	0.5128	1.02057	56	0.5508	1.1696
16	0.5157	1.0316	57	0.5511	1.1708
17	0.5181	1.0411	58	0.5515	1.1721
18	0.5202	1.0493	59	0.5518	1.1734
19	0.5220	1.0566	60	0.55208	1.17467
20	0.52355	1.06283	62	0.5527	1.1770
21	0.5252	1.0696	64	0.5533	1.1793
22	0.5268	1.0754	66	0.5538	1.1814
23	0.5283	1.0811	68	0.5543	1.1834
24	0.5296	1.0864	70	0.55477	1.18536
25	0.53086	1.09145	72	0.5552	1.1873
26	0.5320	1.0961	74	0.5557	1.1890
27	0.5332	1.1004	76	0.5561	1.1906
28	0.5343	1.1047	78	0.5565	1.1923
29	0.5353	1.1086	80	0.55688	1.19382
30	0.53622	1.11238	82	0.5572	1.1953
31	0.5371	1.1159	84	0.5576	1.1967
32	0.5380	1.1193	86	0.5580	1.1980
33	0.5388	1.1226	88	0.5583	1.1994
34	0.5396	1.1255	90	0.55860	1.20070
35	0.54034	1.12847	92	0.5589	1.2020
36	0.5410	1.1313	94	0.5592	1.2032
37	0.5418	1.1339	96	0.5595	1.2044
38	0.5424	1.1363	98	0.5598	1.2056
39	0.5430	1.1388	100	0.56002	1.20649
40	0.54362	1.14132	150	0.56461	1.22534
41	0.5442	1.1436	200	0.56715	1.23998
42	0.5448	1.1458	250	0.56878	1.24292
43	0.5453	1.1480	300	0.56993	1.24786
44	0.5458	1.1499	400	0.57144	1.25450
45	0.54630	1.15185	500	0.57240	1.25880
46	0.5468	1.1538	750	0.57377	1.26506
47	0.5473	1.1557	1000	0.57450	1.26851
48	0.5477	1.1574		0.57722	1.28255

Figura 2.4.8 : Constante en función de N. Fuente (Estrada, 2008).

Φ	$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$	Φ	$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$
0.01	2.1607	0.55	1.15130
0.02	1.7894	0.60	1.5984
0.05	1.4550	0.65	1.7034
0.10	1.3028	0.70	1.8355
0.15	1.2548	0.75	2.0069
0.20	1.2427	0.80	2.2408
0.25	1.2494	0.85	2.5849
0.30	1.2687	0.90	3.1639
0.35	1.2981	0.95	4.4721
0.40	1.3366	0.98	7.0710
0.45	1.3845	0.99	10.000
0.50	1.4427		

Figura 2.4.9 : Constante $N\alpha\sigma_m$ en función de N . Fuente (Estrada, 2008)

Si $\psi = 1 - \frac{1}{T_r}$ es mayor de 0.9, la siguiente fórmula se utiliza para calcular el intervalo de confianza (Estrada, 2008):

$$\Delta Q = \pm \frac{1.14\partial_q}{\partial_N} \quad (11)$$

Por último, el costo máximo de diseño para un periodo de retorno específico se calcula con la siguiente ecuación (Estrada, 2008):

$$Q_{max} = \left[Q_m - \frac{\partial Q}{\partial_N} (Y_n - \ln T) \right] \pm \Delta Q \quad (12)$$

2.4.2.2 Método de Nash

El gasto máximo para un periodo de retorno específico se encuentra en la ecuación utilizando el método de Nash (Estrada, 2008).

$$Q_{max} = a + b \log \log \frac{T}{T-1} \quad (13)$$

Donde:

- b, a : Constantes en función del registro de gastos máximos anuales
 Q_{max} : Caudal máximo para un periodo de retorno determinado en m³/s
 T : Período de retorno en años

Los parámetros a y b se calculan mediante el método de los mínimos cuadrados, utilizando la ecuación lineal: $Q = a + bX$, utilizando las ecuaciones siguientes (Estrada, 2008):

$$a = Q_m - bX_m \quad (14)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Q_i - nX_m Q_m}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - nX_m^2} \quad (15)$$

$$X_i = \log \log \left(\frac{T}{T-1} \right) \quad (16)$$

Donde:

- N : Número de años de registro
 Q_i : Caudales máximos anuales registrados en m³/s
 Q_m : Caudal medio en m³/s
 X_i : Constante para cada caudal Q registrado, em función de su período de retorno correspondiente

Para determinar los valores de X_i asociados con Q_i , se ordenan en orden decreciente, asignándoles a cada uno un número de orden m_i . Por ejemplo, al Q_i más alto se le asignará el valor 1, al inmediato siguiente 2, etc. Posteriormente, la ecuación de Weibull se utilizará para encontrar el valor del periodo de retorno de Q_i . Por último, el valor de cada X_i , se calculará obteniendo el valor de la ecuación 13 en la ecuación 12 (Estrada, 2008).

$$T = \frac{N + 1}{m_i} \quad (17)$$

El intervalo del caudal Q_{max} , se calculará con la siguiente ecuación (Estrada, 2008).

$$\Delta Q = \pm 2 \sqrt{\frac{S_{qq}}{N^2(N-1)} + (X - X_M)^2 \frac{1}{N-2} \frac{1}{S_{XX}} \left(S_{qq} - \frac{S_{Xq}^2}{S_{XX}} \right)} \quad (18)$$

$$S_{xx} = N \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \quad (19)$$

$$S_{qq} = N \sum Q_i^2 - \left(\sum Q_i \right)^2 \quad (20)$$

$$S_{xq} = N \sum Q_i x_i - \left(\sum Q_i \right) \left(\sum x_i \right) \quad (21)$$

El caudal máximo de diseño correspondiente a un periodo de retorno específico será igual al caudal máximo de la ecuación 13 más el intervalo de confianza, ecuación 21, es decir (Estrada, 2008):

$$Q_d = Q_{max} + \Delta Q \quad (22)$$

2.5 CONCEPTOS BÁSICOS HIDRÁULICA

2.5.1 *Hidráulica fluvial*

Es la disciplina que se encarga de estudiar el comportamiento hidráulico de los ríos en términos de caudales y otros factores como las velocidades de flujo, las variaciones de fondo por socavación y sedimentación, la capacidad de transporte de sedimentos y los ataques contra los márgenes (Rocha, 1998).

2.5.1.1 Morfología de un río

La morfología de un río implica el estudio de los cambios en su recorrido y sección transversal (lecho y márgenes). La topografía y las condiciones geológicas influyen mucho en su comportamiento. Además, el desarrollo de un río y las formas que adopta varían en áreas planas y en áreas con fuertes pendientes (Rocha, 1988).

2.5.1.2 Perfil longitudinal de un río

Rocha (1998) identifica las siguientes características de un perfil longitudinal de un río:

- Los ríos no tienen un eje hidráulico recto; la curvatura del río es natural.
- La sinuosidad natural de los ríos hace que su recorrido sea una serie de curvas.
- La pendiente del río varía a lo largo de su recorrido desde su origen hasta su desembocadura. En general, las partes altas tienen las pendientes más altas. La pendiente de los cauces fluviales disminuye notablemente en las partes bajas.
- La siguiente figura muestra el perfil longitudinal característico de un río de manera esquemática. El perfil típico, cóncavo hacia arriba, es el resultado del equilibrio entre la capacidad de transporte de la corriente y el tamaño y cantidad de sólidos aportados por la

cuenca. Se pueden ver tres tramos principales y las secciones transversales comunes para cada uno de ellos en la figura mencionada.

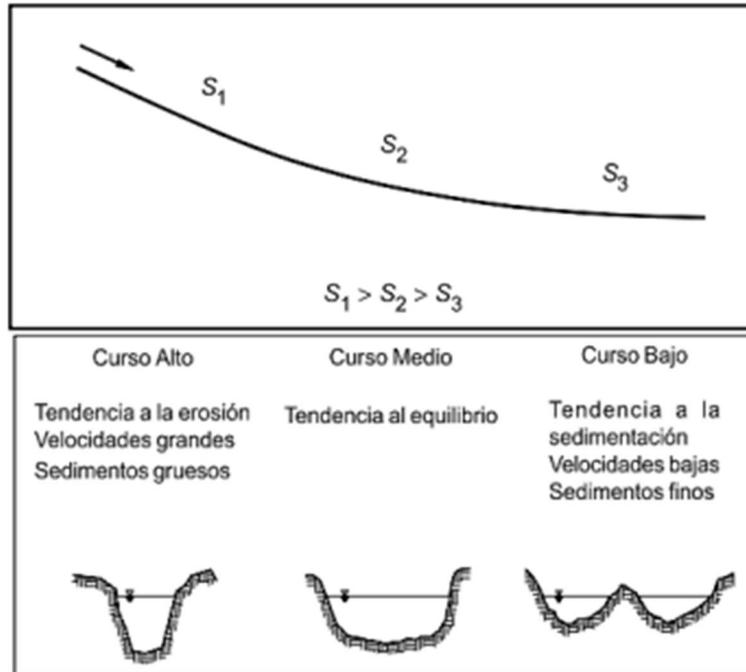


Figura 2.5.10 : Esquemización del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido. Fuente (Rocha, 1988).

2.5.2 Hidráulica de canales

Chow & Maidment (1998) identifica los siguientes elementos geométricos de un canal hidráulico:

2.5.2.1 Profundidad Hidráulica Media

Es la proporción entre el ancho de la superficie y el área mojada; la expresión matemática para calcularlo es la siguiente (Chow & Maidment, 1998):

$$Y_m = \left(\frac{A}{B} \right) \quad (23)$$

Donde:

Y_m : Profundidad hidráulica media (m)

A : Área Hidráulica (m^2)

B : Ancho Estable (m)

2.5.2.2 Bordo Libre

Es la distancia entre la superficie del agua y las paredes del canal. Se diseña para evitar que el agua desborde debido a las fluctuaciones del nivel de la superficie libre o a las ondas; la expresión matemática para calcularlo es la siguiente (García, 2016):

$$B_l = \left(\frac{y}{3}\right) \quad (24)$$

2.5.2.3 Número de Froude

El número de Froude, simbolizado por F_r , es un parámetro adimensional que se define como la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza gravitatoria que actúa sobre un fluido en movimiento; la expresión matemática para calcularlo es la siguiente (García, 2016):

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY_m}} \quad (25)$$

Donde:

- F_r : Número de Froude
- V : Velocidad media (m/s)
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- Y_m : Profundidad hidráulica media (m)

Dependiendo del valor del número de Froude, los flujos se clasifican de la siguiente manera (García, 2016):

- $F_r > 1$: Flujo Supercrítico
- $F_r = 1$: Flujo Crítico
- $F_r < 1$: Flujo Subcrítico

2.5.2.4 Ecuación de la energía

Representa la energía del flujo total. La energía interna, el potencial y la cinética componen esta ecuación en conformidad con el manual de HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2024).

$$E_t = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (26)$$

Donde:

- E_T : Carga de energía total, en (m-Kg / Kg)
- z : Carga de posición, en (m-Kg / Kg)
- $\frac{v^2}{2g}$: Carga de velocidad, en (m-Kg / Kg)

2.5.2.5 Rugosidad

Debido a que no existe una técnica precisa para elegir el valor n , la mayor dificultad al aplicar la ecuación de Manning es encontrar el coeficiente de rugosidad (Chow & Maidment, 1988).

Tipo de cauce y descripción	Valor de <i>n</i>		
	Mínimo	Normal	Máximo
D. Cauces naturales menores (ancho superior a nivel de crecida menor que 30 m)			
D1) Cauces en planicie			
1) Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2) Igual que arriba pero más piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
3) Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
4) Igual que arriba pero algunos pastos y piedras	0.035	0.045	0.050
5) Igual que arriba, niveles más bajos, pendiente y secciones más inefectivas	0.040	0.048	0.055
6) Igual que 4, pero más piedras	0.045	0.050	0.060
7) Tramos sucos, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8) Tramos con muchos pastos, pozos profundos o recorridos de la crecida con mucha madera o arbustos bajos	0.075	0.100	0.150
D2) Cauces de montaña, sin vegetación en el canal, laderas con pendientes usualmente pronunciadas, árboles y arbustos a lo largo de las laderas y sumergidos para niveles altos			
1) Fondo: grava, canto rodado y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2) Fondo: canto rodado y algunas rocas	0.040	0.050	0.070
E) Cauces con planicie crecida			
1) Pastos, sin arbustos			
- Pastos cortos	0.025	0.030	0.035
- Pastos altos	0.030	0.035	0.050
2) Áreas cultivadas			
- Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
- Cultivos maduros alineados	0.025	0.035	0.045
- Campo de cultivos maduros	0.030	0.040	0.050
3) Arbustos			
- Arbustos escasos, muchos pastos	0.035	0.050	0.070
- Pequeños arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
- Pequeños arbustos y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
- Arbustos medianos a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
- Arbustos medianos a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
4) Árboles			
- Sauces densos, en verano, y rectos	0.110	0.150	0.200
- Tierra clara con ramas, sin brotes	0.030	0.040	0.050
- Igual que arriba pero con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
- Grupos grandes de madera, algunos árboles caídos, poco crecimiento inferior y nivel de la inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
- Igual que arriba, pero con el nivel de inundación alcanzando las ramas	0.100	0.120	0.160
F) Cursos de agua importantes (ancho superior a nivel de inundación mayor que 30 m). Los valores de <i>n</i> son menores que los de los cursos menores de descripción similar, ya que las bancas ofrecen menor resistencia efectiva.			
1) Sección regular sin rocas y arbustos	0.025	-	0.060
2) Sección irregular y áspera	0.035	-	0.100

Figura 2.5.11: Coeficientes de Rugosidad de Manning. Fuente (Chow & Maidment, 1998).

2.5.2.5.1 Factores que afectan el coeficiente de Rugosidad de Manning

Cowan creó un método para estimar el valor de *n* a partir de una variedad de factores que influyen en el coeficiente de rugosidad. Este método se puede utilizar para encontrar el valor de *n*, mediante la siguiente expresión matemática: (Chow & Maidment, 1998).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (27)$$

Donde:

- n_0 : Rugosidad base para un canal recto, uniforme y con rugosidad homogénea
- n_1 : Rugosidad adicional por irregularidades superficiales a lo largo del tramo en estudio.
- n_2 : Rugosidad adicional equivalente por la variación de forma y dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.
- n_3 : Rugosidad equivalente debido a obstrucciones existentes en el cauce
- n_4 : Rugosidad equivalente debido a la presencia de vegetación
- m : Factor de corrección para incorporar por el efecto de la sinuosidad del cauce o presencia de meandros.

CONDICIONES DEL CANAL		VALORES	
MATERIAL INVOLUCRADO	Tierra	no	0.020
	Corte en Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
GRADO DE IRREGULARIDAD	Suave	n1	0.000
	Menor		0.005
	Moderada		0.010
	Severo		0.020
VARIACIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	Gradual	n2	0.000
	Ocasionalmente Alternante		0.005
	Frecuentemente Alternante		0.010-0.015
EFECTO RELATIVO DE LAS OBSTRUCCIONES	Insignificante	n3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
VEGETACIÓN	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy Alta		0.050-0.100
GRADO DE LOS EFECTIVOS POR MEANDRO	Menor	m5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Figura 2.5.12 : Criterio de Cowan para ajustamiento de los factores que influyen en la irregularidad de las llanuras de inundación . Fuente (Chow & Maidment, 1998).

2.6 MODELACIÓN HIDRAÚLICA

2.6.1 Introducción

Para usar la modelación hidráulica de ríos en el diseño de obras hidráulicas, la creación de mapas de inundación, la delimitación de zonas federales, etc., es necesario conocer cierta información topográfica del terreno, como la batimetría del río en el tramo que nos interesa analizar, las características principales (o predominantes) del cauce y establecer las condiciones iniciales y de frontera adecuadas (Alcántara & Castro, 2021)

Castro & Willems (2011) mencionan que se distinguen dos áreas cuando se realiza un estudio de inundación de un río. El valle del río y las planicies inundables; dado que el movimiento se produce principalmente en una dirección, los modelos unidimensionales (1D) son ampliamente utilizados y brindan resultados muy precisos para los cauces de un río. Sin embargo, debido a las pendientes menores y las velocidades diferentes que se generan en las llanuras de inundación, los movimientos son bidimensionales, por lo que se recomienda utilizar modelos bidimensionales (2D) para estas áreas. Por último, pero no menos importante, los modelos 2D son la tecnología más avanzada para la modelización de inundaciones, pero tienen sus desventajas y limitaciones, que requieren un hardware y software de alta capacidad de procesamiento.

2.6.2 ¿Qué es la modelación hidráulica?

La mayoría de los fenómenos naturales, especialmente en el ámbito de la hidráulica, son extremadamente complejos y, por lo tanto, difíciles de tratar y de comprender cómo funcionan. En ocasiones, es complicado encontrar una solución que pueda resolver adecuadamente el comportamiento de los elementos en respuesta a un evento, como una tormenta. Este es el caso de las obras hidráulicas y los ríos, donde el comportamiento de las estructuras y del propio cauce es extremadamente difícil de predecir y determinar el alcance del evento. Por lo tanto, resulta muy retador determinar el riesgo para las estructuras, poblados que se encuentran en la llanura de inundación. Actualmente, hay una variedad de técnicas que nos permiten comprender el comportamiento del agua y anticipar sus movimientos (Parra, 2016).

Parra (2016) indica que se pueden utilizar varios tipos de modelos para representar la distribución hidráulica, incluyendo:

- a) Modelos Matemáticos: Los modelos matemáticos utilizan ecuaciones o expresiones matemáticas para describir el fenómeno en estudio. Dentro de esta categoría, podemos subclasificarlos de la siguiente manera:
 - Modelos estocásticos: Se distinguen por la utilización de variables aleatorias y probabilísticas para representar los procesos físicos.
 - Modelos determinísticos: Los procesos físicos involucrados se expresan mediante relaciones fundamentales determinísticas y no se tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
 - Modelos numéricos: Esta categoría utiliza principalmente ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de contorno; solucionan las ecuaciones mediante el uso de métodos de análisis numérico tales como: diferencias o elementos finitos. Los métodos de solución más utilizados frecuentemente son:
 - ✓ Diferencias finitas: Los métodos de diferencias finitas pueden simular algunos procesos que no se pueden resolver mediante el cálculo simple.
 - ✓ Elementos finitos: Parten de la premisa de resolver ecuaciones diferenciales parciales. Este método está destinado a ser utilizado en una computadora; el modo de solución consiste en discretizar el área de estudio mediante la creación de una malla compuesta por pequeños elementos con formas triangulares o cuadrangulares.

2.6.2.1 Software disponible para modelación numérica

Padilla (2018) indica que, en México, hasta la década pasada, las aplicaciones más utilizadas se basaban en modelos de tipo unidimensional, como es el caso del software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center- River Analysis System) (en su modalidad unidimensional), ampliamente utilizado como herramienta de cálculo; sin embargo, en ésta última década, el empleo de modelos bidimensionales ha ido en aumento, haciendo uso de herramientas como: Telemac, Mike flood, HEC-RAS 2D, IBER, entre otros. Algunos de los programas más utilizados son, entre muchos otros:

- a) HEC-RAS: Dado que es un programa libre, muy completo y de fácil manejo, es el más conocido y se usa ampliamente. Su uso y renombre es mundial. Antes de la versión 5.0, solo se permitían cálculos unidimensionales, pero ahora se pueden realizar cálculos tanto bidimensionales como unidimensionales ((US Army Corps of Engineers, 2024).
- b) TUBFLOW: Este programa es uno de los programas informáticos más populares para calcular inundaciones en el Reino Unido. Este programa utiliza algoritmos numéricos sofisticados y herramientas de apoyo para simular el flujo de agua en superficies libres en ríos, llanuras aluviales, estuarios y costas (Padilla,2018).
- c) IBER: Se trata de un modelo matemático bidimensional que posee un módulo hidrodinámico que resuelve las ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas mediante las ecuaciones de Saint Venant 2D. Finalmente, es importante resaltar que tanto el módulo hidrodinámico, el de turbulencia y el de sedimentos resuelven las ecuaciones en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada (Padilla, 2018).

2.6.2.2 Tipos de modelización hidrodinámica

Cada situación y escenario tiene su propia solución y modelo ideal. El uso de un modelo más complejo, como un modelo bidimensional, no siempre proporciona una representación más precisa de la realidad. Por ejemplo, los modelos 1D se consideran mucho más valiosos y precisos en la región del cauce principal, pero arrojan resultados inexactos para el flujo en áreas planas y extensas, como una planicie de inundación. Sin embargo, los modelos bidimensionales pueden conducir a mayores inestabilidades y tiempos de ejecución de programas. En algunas circunstancias, estos tiempos tan altos pueden no ser necesarios (Castro & Willems, 2011).

2.6.2.2.1 Modelos unidimensionales (1D)

El uso de este tipo de modelos es muy popular hoy en día, se basan en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, específicamente las leyes de conservación de masa y momentum; las ecuaciones se utilizan para calcular la superficie libre de agua tanto para un flujo de agua estacionario como no estacionario. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, generalmente utilizando el método de las diferencias finitas, y ocasionalmente utilizando elementos o volúmenes finitos en un esquema implícito.

Una de las principales ventajas de la modelización unidimensional es su corto tiempo resolución. Adicionalmente, un modelo unidimensional ejecutado de manera adecuada puede conseguir un nivel de estabilidad mucho mayor y de una manera mucho más sencilla en comparación a otros tipos de modelizaciones. A continuación se enumeran aquellos casos donde sería más recomendable utilizar modelos unidimensionales como lo indica Goodell (2016).

- Ubicaciones donde el flujo de agua no se expande o se extiende significativamente.
- Canales bien definidos o ríos muy encauzados, con pendientes pronunciadas en los laterales que impiden que el río se expanda lateralmente.
- Cuando la calidad de los modelos digitales de elevación no es de buena calidad.

2.6.2.2.2 Modelos bidimensionales (2D)

Goodell (2016) menciona que los modelos bidimensionales son mucho más complejos en comparación a los unidimensionales; los mismos utilizan ecuaciones de conservación de masa y momentum en dos dimensiones. Las ecuaciones se solucionan en cada punto de una malla creada en el área de estudio; el método de los elementos finitos o las diferencias o los volúmenes finitos pueden utilizarse para resolver modelos en dos dimensiones. A continuación se enumeran aquellos casos donde sería más recomendable utilizar modelos bidimensionales:

- Llanura de inundación: Dado que el agua se desplaza en todas las direcciones en una planicie de inundación, esta forma de modelo sería recomendable para obtener resultados mucho más precisos. Por lo tanto, la planicie de inundación de un río sería el lugar ideal para realizar este tipo de simulaciones.
- Zonas urbanas: Por ejemplo, en ciudades sería más fácil usar un modelo bidimensional porque hay muchos obstáculos y objetos que pueden cambiar la dirección del agua, así como muchas calles por las que el agua puede desviarse.
- Aguas abajo de una estructura que contiene agua: El desarrollo de un modelo bidimensional es aconsejable debido a la complejidad de este tipo de escenarios de fractura; por ejemplo; diques de contención, presas, etc.

Así mismo, es importante destacar que las simulaciones en dos dimensiones presentan una serie de desafíos. Los siguientes son algunos de los problemas más importantes que deben tenerse en cuenta Goodell (2016):

- Elevado tiempo de simulación: Este es posiblemente uno de los problemas más significativos con los modelos bidimensionales. Los tiempos de ejecución de los softwares pueden ser muy altos, especialmente en áreas de extensión significativa, con una gran cantidad de celdas en la malla. La simulación de una cuenca con 100,000 a 1 millón de celdas puede tomar horas.
- Calidad del modelo digital de elevación (MDE): Si no se cuenta con un MDE de calidad, los resultados del modelo bidimensional tendrán altas probabilidad de ser imprecisos.

Malla computacional

Uno de los pasos más retadores para desarrollar una simulación numérica en los ríos es el desarrollo de la malla numérica puesto que esta actividad requiere una cantidad importante de tiempo y esfuerzo. Para resolver las ecuaciones que regulan el flujo fluctuante de los ríos, es necesario primero realizar una discretización espacial del dominio a analizar agrupando las ecuaciones en una malla de cálculo que representa la batimetría de la zona en dos

dimensiones. Generalmente los ríos carecen de una geometría regular, dado esta condición la elaboración de una malla no es un proceso sencillo (Castro & García, 2021).

2.6.2.2.1 Mallas estructuradas

Uno de los pasos más retadores para desarrollar una simulación numérica en los ríos es el desarrollo de la malla numérica puesto que esta actividad requiere una cantidad importante de tiempo y esfuerzo. Para resolver las ecuaciones que regulan el flujo fluctuante de los ríos, es necesario primero realizar una discretización espacial del dominio a analizar agrupando las ecuaciones en una malla de cálculo que representa la batimetría de la zona en dos dimensiones. Generalmente los ríos carecen de una geometría regular, dado esta condición la elaboración de una malla no es un proceso sencillo (Castro & García, 2021).

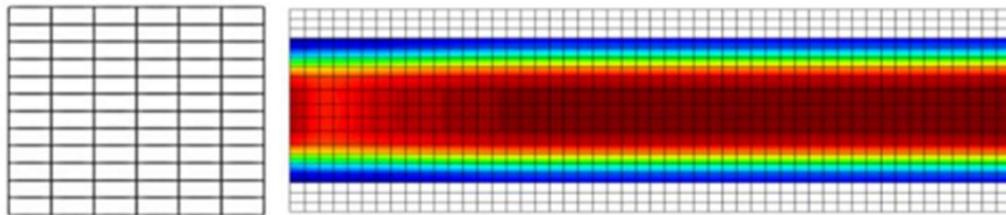


Figura 2.6.13 : Malla computacional estructurada (celdas simétricas). Fuente (Castro & García, 2021).

2.6.2.2.2 Mallas no estructuradas

Pueden construirse con elementos poligonales de diferentes tamaños y formas, aunque su forma típica es triangular. Al contrario de las mallas estructuradas, este tipo de mallas es muy útil para representar las irregularidades del terreno de manera más precisa (Castro & García, 2021).

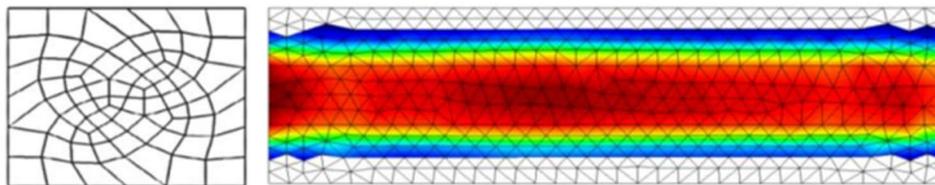


Figura 2.6.14 : Malla computacional no estructurada (celdas asimétricas). Fuente (Castro & García, 2021).

2.6.2.2.3 Tiempo computacional

El tiempo computacional que se alimenta en el software, para efectuar el modelo es otro parámetro importante a la hora de modelar. Para encontrar el tiempo computacional, debemos saber el parámetro que relaciona ese tiempo con la malla que estamos utilizando. (Castro & García, 2021).

2.6.2.2.3.1 Número de Courant

El número de Courant se calcula de la relación entre espacio, velocidad y tiempo, bajo la premisa de la relación debe ser menor a uno. Este parámetro, se interpreta como un medio de

restricción para los modelos de ecuaciones bidimensionales. El número de Courant se obtiene a través de la siguiente expresión matemática (Castro & García, 2021).

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1 \quad (28)$$

Donde:

- C : Número de Courant
- V : Velocidad de flujo
- ΔT : Paso de tiempo computacional
- ΔX : Promedio del tamaño de celda (malla)

2.6.2.2.4 Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno describen el comportamiento de un modelo dentro de sus límites. Como resultado, es comprensible que cada modelo requerirá la inserción de condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. Es crucial tener en cuenta que las condiciones de contorno se deben aplicar lo suficientemente lejos de la zona de estudio para que no afecten negativamente la zona de estudio. Las condiciones de contorno inadecuadas pueden causar inestabilidades en el modelo y resultados falsos (Castro & García, 2021).

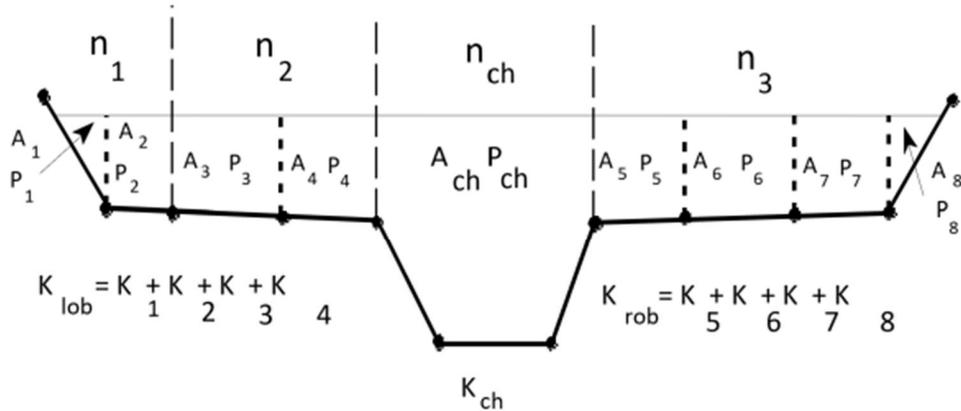
2.6.3 Software HEC-RAS

El Centro de Ingeniería Hidrológica de Sistemas de Análisis de Ríos que sus siglas en inglés significan Hydrologic Engineering Center- River Analysis System (HEC-RAS) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers) desarrolló HEC-RAS, una herramienta de modelación numérica que se utiliza en ingeniería hidráulica y fluvial.

La versión actual HEC-RAS 6.5 permite realiza modelaciones hidráulicas unidimensionales de flujo constante; modelaciones hidráulicas unidimensionales y bidimensionales de flujo variable; análisis de temperatura del agua; transporte de sedimentos o fondo móvil y modelación generalizada de la calidad del agua (US Army Corps of Engineers, 2024).

El programa HEC-RAS tiene como antecesor al HEC-2, desarrollado en 1970 por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos; bajo la hipótesis del flujo unidimensional, el HEC-2 permitía calcular perfiles de la superficie libre del agua en régimen de flujo permanente para flujo gradual en canales o ríos. El proceso de cálculo se basó en resolver la ecuación de energía utilizando el método del paso estándar. El cálculo del transporte era el elemento clave para resolver la ecuación de energía en HEC-2. Las pérdidas por fricción entre cruces, secciones, distribución del flujo en una sección transversal y coeficiente de ponderación de velocidad alfa se calculaban mediante el transporte.

HEC-2 calculaba el transporte entre cada punto de coordenadas en la cruz de las secciones como se indica en el manual de HEC-RAS (2024).



HEC-2 Conveyance Subdivision

Figura 2.6.15 : Subdivisión de transporte. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)

HEC-RAS (versión 1.0) se lanzó por primera vez en julio de 1995, con ligeros cambios del predecesor HEC – 2, salvo la incorporación de una interfaz gráfica de usuario (GUI), que permite escribir, editar, mostrar datos y graficas dentro de un entorno Windows. Desde entonces, se han producido las versiones 1.1, 1.2, 2.0, 2.1, 2.2, 3.0, 3.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 4.0, 4.1, 5.0 y la más reciente versión 6.0 en 2020 (HEC-RAS, 2024).

2.6.3.1 Modelo unidimensional en HEC-RAS 1D en régimen de flujo permanente

Bajo la hipótesis del flujo unidimensional, el cálculo de los perfiles hidráulicos se basa en la solución de la ecuación de energía. La ecuación de Manning se usa para calcular las pérdidas de energía causadas por la fricción, la contracción o la expansión del flujo. Para la contracción o la expansión, el coeficiente de pérdida se multiplica por la carga de velocidad.

En conformidad con el manual de referencia técnica del "HEC – RAS" del 2024, se utilizan las siguientes metodologías y criterios para modelar un flujo gradualmente variado en régimen permanente y unidimensional.

2.6.3.1.1 Ecuaciones de cálculo de perfiles hidráulicos

El cálculo de los perfiles hidráulicos se basa en el balance de la ecuación de energía, se calcula la superficie libre de agua de una sección a otra utilizando un método iterativo conocido como paso estándar (HEC-RAS,2024).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (29)$$

Donde:

Z_1 y Z_2 : Carga de posición de las secciones 1 y 2

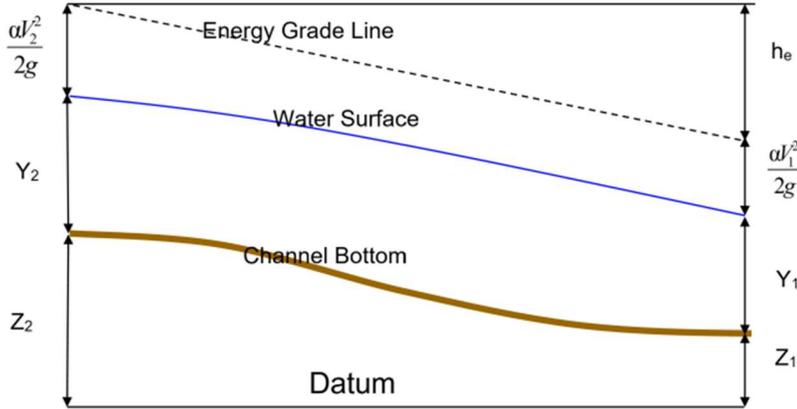
Y_1 y Y_2 : Tirante de agua en las secciones 1 y 2

V_1 y V_2 : Velocidades medias en las secciones 1 y 2

α_1 y α_2 : Coeficiente de Coriolis en las secciones 1 y 2

- g : aceleración de la gravedad
 h_e : pérdida de cargas de energía entre las secciones 1 y 2

En la siguiente figura se muestra un diagrama de los términos de la ecuación de energía.



Representation of Terms in the Energy Equation

Figura 2.6.16 : Representación de los términos de la ecuación de energía. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)

La pérdida de energía (h_e), que se produce entre las secciones 1 y 2, es la suma de las pérdidas debido a la fricción y las fuerzas que se deben a la contracción o expansión del flujo; la ecuación empleada para evaluar la pérdida de energía es la siguiente:

$$h_e = C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) + L \bar{S}_f \quad (30)$$

Donde:

- L : Longitud ponderada entre las secciones 1 y 2
 S_f : Pendiente de fricción entre las secciones 1 y 2
 C : Coeficiente de pérdidas por expansión o contracción

La longitud ponderada (L) se determina con la siguiente ecuación.

$$L = \frac{L_{rob} \bar{Q}_{rob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{lob} \bar{Q}_{lob}}{\bar{Q}_{rob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{lob}} \quad (31)$$

Donde:

- L_{rob}, L_{ch}, L_{lob} : Distancias entre las secciones 1 y 2
 $\bar{Q}_{rob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{lob}$: Gasto aritmético de los flujos que transitan entre las secciones 1 y 2; por el margen izquierdo, al centro del cauce y por el margen derecho.

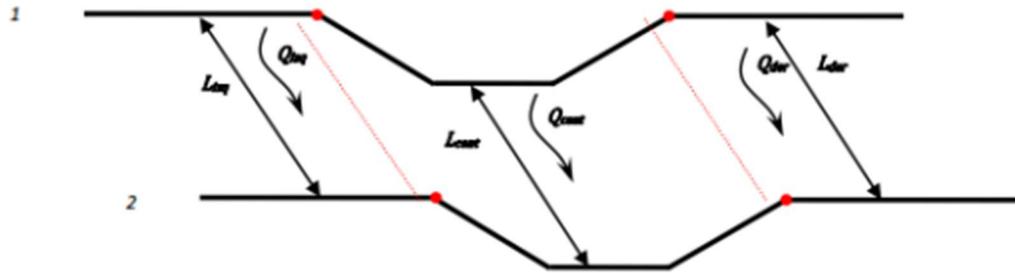


Figura 2.6.17 : Distribución de flujo entre dos secciones. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)

2.6.3.1.2 Subdivisión de secciones transversales para cálculos de transporte

Para la estimación de la velocidad media y el gasto que se transporta a través de una sección transversal; HEC – RAS, intrínsecamente, secciona las secciones transversales en subgrupos (franjas), tomando en consideración el número de coeficientes de Manning (n) que se alimentaron en cada una de las franjas; el factor de conducción para cada una de las franjas se estima a partir de la Ecuación 32. Mientras que el caudal total que es transportado por cada sección transversal es el equivalente de la sumatoria de los caudales en el margen izquierdo, al centro del cauce y en la margen derecha (Ecuación 33).

$$Q = KS_f^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (33)$$

Donde:

- K : Factor de conducción en las subdivisiones
- S_f : Pendiente de la línea de grado de energía
- A : Área de flujo en las subdivisiones
- n : Coeficiente de rugosidad Manning en las subdivisiones
- R : Radio hidráulico en las subdivisiones

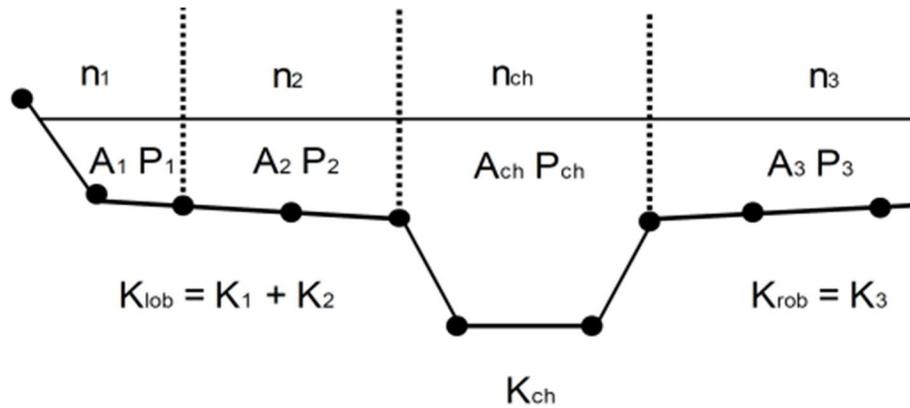


Figura 2.6.18 : División de franjas en las secciones transversales. Fuente (HEC-RAS)

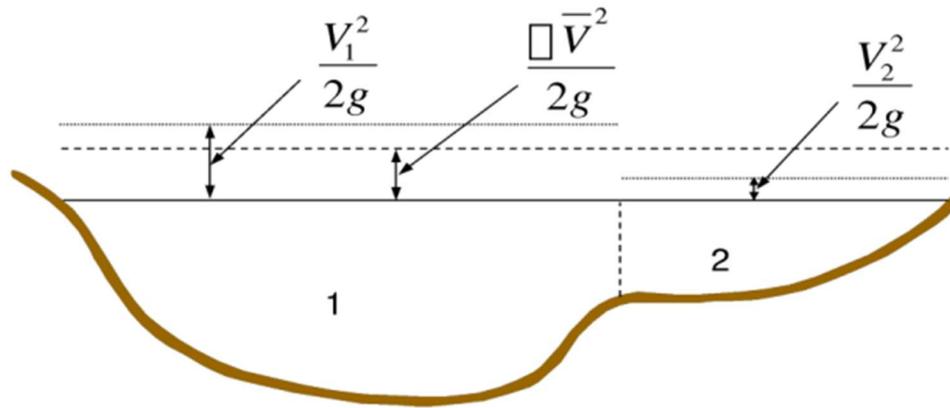
$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad (34)$$

Donde:

- n_c : Coeficiente de rugosidad de Manning equivalente
- P : Perímetro mojado del cauce entero
- P_i : Perímetro mojado de cada subdivisión
- n_i : Coeficiente de rugosidad Manning en cada subdivisión

2.6.3.1.3 Estimación de la carga de energía cinética media

Solo hay una superficie libre de agua y consecuentemente una sola medida de energía media dentro de las condiciones de frontera en un tramo de un río, en una modelación 1D. Para cada segmento de elevación de superficie libre de agua, se calcula la energía ponderada por flujo de las tres subsecciones de una sección transversal (banco izquierdo, canal principal y margen derecho). La siguiente figura muestra cómo se calcula la energía media para una sección transversal con un canal principal y un margen derecho.



V_1 = mean velocity for subarea 1

V_2 = mean velocity for subarea 2

Figura 2.6.19 : Estimación de carga cinética media. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024)

Para estimar la energía cinética media es necesario obtener el coeficiente ponderado de cabeza de velocidad alfa (α). El coeficiente se estima con la siguiente expresión matemática:

$$\alpha \frac{\overline{V^2}}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (35)$$

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots Q_n V_n^2]}{Q \overline{V^2}} \quad (36)$$

El coeficiente de velocidad alfa (α) se basa en el transporte de tres elementos de flujo: banco izquierdo, banco derecho y el canal principal. La ecuación anterior, puede ser reescrita en términos del área de transporte de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K^3} \quad (37)$$

Donde:

A_t : Área de flujo total de la sección transversal total
 A_{rob}, A_{ch}, A_{lob} : Área de flujo del banco derecho, canal principal e izquierdo
 K_t : Factor de conducción total de la sección transversal total
 K_{rob}, K_{ch}, K_{lob} : Factor de conducción del banco derecho, canal principal e izquierdo

2.6.3.1.4 Estimación de pérdidas por fricción

En HEC-RAS las pérdidas por fricción se calculan como el producto de la pendiente de la línea de grado de energía (S_f) y la longitud ponderada entre dos secciones (L). El método de transporte medio es la ecuación predefinida que utiliza por defecto HEC-RAS para encontrar la pendiente de fricción (S_f) entre dos secciones transversales:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (38)$$

2.6.3.1.5 Estimación de pérdidas de contracción y expansión

Para estimar las pérdidas por contracción y expansión del fluido, se considera que ocurre una contracción cuando el valor la carga de velocidad en la sección aguas abajo es mayor que la carga de velocidad en la sección aguas arriba; mientras que, si la carga de velocidad en la sección aguas abajo es mayor que la carga de velocidad en la sección aguas arriba, el software asume una expansión. Predeterminadamente, se asigna un valor "C" para la contracción y para la expansión. Por default, HEC-RAS asigna intrínsecamente los valores de 0.1 y 0.3 para la contracción y la expansión, respectivamente.

$$h_{ce} = C \left[\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right] \quad (39)$$

2.6.3.1.6 Procedimiento de estimación de perfiles hidráulicos

El procedimiento iterativo del cálculo de los perfiles hidráulicos se resume de la siguiente manera: (HEC-RAS,2024).

1. Asume un valor de superficie de agua en la sección aguas arriba o en la sección aguas abajo si se calcula un perfil del régimen supercrítico.
2. Calcula el gasto y la carga de velocidad a partir del nivel de agua asumido.
3. Estima la pendiente de fricción (S_f) y se resuelve para h_e , a partir de los valores de gasto y carga de velocidad calculados previamente en el punto anterior.

4. Resuelve la ecuación anterior, para determinar la superficie de agua en la sección aguas arriba, a partir de los valores de la carga de velocidad y la pérdida de energía calculados previamente en los pasos número dos y tres respectivamente.
5. Compara los valores de superficie de agua libre asumidos en el punto 1 y con el obtenido en punto 4; el proceso iterativo continua, si la diferencia entre estos valores es mayor que la tolerancia (la tolerancia ingresada por default al software es de 0.003 m).

En conformidad con HEC-RAS (2024), el método utilizado para determinar el valor de la superficie del agua del punto 1 es el siguiente: se supone que el nivel del agua en la sección aguas arriba es igual al de la proyección de la superficie del agua en la sección aguas abajo. Si la diferencia es mayor que la tolerancia, el nuevo valor del punto 1 será igual al valor del proceso anterior más el 70% del error del primer cálculo. Si la diferencia aún es mayor que la tolerancia, el valor de la superficie del agua del punto 1 el método numérico para calcular el valor de la superficie del agua es el de la secante. La siguiente ecuación muestra el método de la secante:

$$WS_1 = WS_{I-1} - ERR_{I-1} \left(\frac{Assum_Diff}{Err_Diff} \right) \quad (40)$$

Donde:

- WS_1 : Nuevo valor asumido de superficie de agua
- WS_{I-1} : Valor de superficie de agua asumido en la interacción anterior
- Err_{I-1} : Valor calculado – asumido en la interacción anterior
- $Assum_Diff$: Diferencia de valores supuestos, entre los dos valores previos
- Err_Diff : Diferencia entre el valor previo y el error actual

2.6.3.1.7 Cálculo del tirante crítico

Para una sección transversal dada el cálculo del tirante crítico se realizará, si alguna de las siguientes condiciones se cumple: (HEC-RAS,2024).

- Se ha indicado que el régimen del flujo es supercrítico
- El usuario ha solicitado al software que los estime en alguna sección
- Cuando se tenga una condición de frontera externa de una sección transversal y el tirante crítico requiera ser calculado para asegurarse que se ingresó el régimen de flujo correcto en la condición de frontera.
- Si se ingresó un régimen de flujo subcrítico y si el número de Froude da como resultado que en realidad el régimen de flujo es supercrítico.
- Si el software no logra resolver la ecuación de energía dentro de la tolerancia especificada antes de alcanzar el número máximo de iteraciones.

El cabezal de energía para una sección transversal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (41)$$

Donde:

H : Cabezal total de energía
 WS : Elevación de superficie de agua
 $\frac{\alpha V^2}{2g}$: Cabezal de velocidad

De acuerdo con el manual de referencia técnica de HEC-RAS; el software utiliza dos métodos numéricos para calcular el tirante crítico: el método parabólico y el método secante.

Dado que el método parabólico suele ser rápido, se utiliza para calcular el tirante crítico. Sin embargo, si no logra converger durante el cálculo, el método numérico cambia automáticamente al método secante.

2.6.3.1.7.1 Método Parabólico

El método parabólico encuentra la energía específica (H) mínima en tres puntos del tirante del agua (WS) con igual distancia. El punto del que se parte para realizar otra iteración es el valor del tirante del agua (WS), al que corresponde la energía específica menor (H); el tirante crítico (WS_c) se evalúa hasta que la diferencia entre los dos últimos procesos sea menor que 0.003m.

2.6.3.1.7.2 Método de la secante

El método de secante se basa en la creación de un registro que relaciona la profundidad del agua (WS) con la energía específica (H). Para lograr esto, se secciona la sección transversal en 30 intervalos. El programa encuentra el valor del tirante con la menor energía específica y, a partir de ese tirante, toma como nuevo intervalo las profundidades inmediatas superior e inferior, posteriormente secciona nuevamente en 30 intervalos hasta que el tirante crítico sea crítico (WS_c) sea obtenido con mayor precisión.

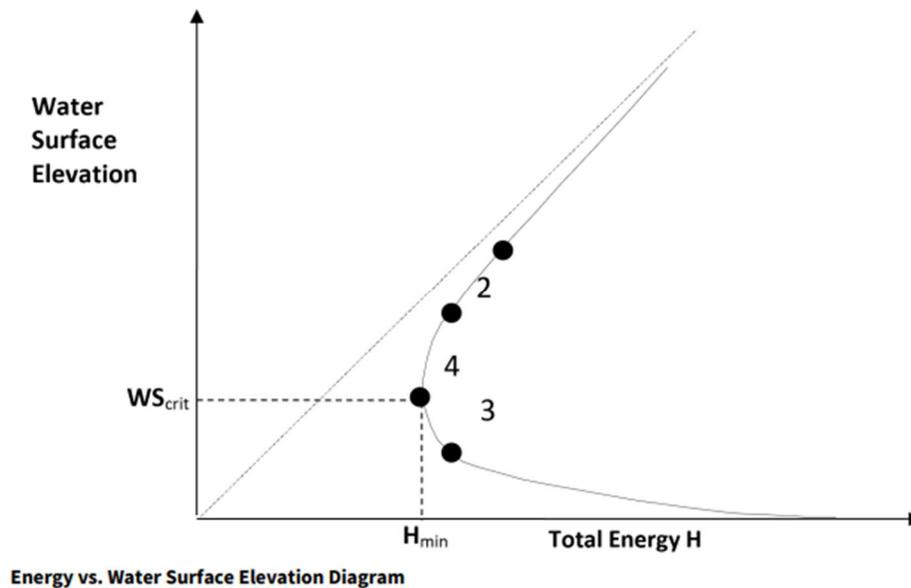


Figura 2.6.20 : Curva de la energía específica. Fuente (HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, 2024).

2.6.3.2 Modelo bidimensional en HEC-RAS 2D en régimen de flujo no permanente

De acuerdo con la indicado en el manual de referencia técnica del HEC-RAS (2024); el software resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D o de Onda Difusa 2D para realizar el modelamiento bidimensional. En el caso de una malla estructurada, las ecuaciones se resuelven mediante diferencias finitas y, en el caso de una malla no estructurada, mediante volúmenes finitos.

2.6.3.2.1 Introducción

Las ecuaciones de Navier-Stokes proporcionan una descripción tridimensional del movimiento de fluidos. Se imponen nuevas simplificaciones en el contexto del modelado de canales e inundaciones. Las ecuaciones diferenciales de aguas poco profundas, que sus siglas en inglés significan Shallow Water (SW), son un conjunto de ecuaciones simplificadas que asumen presión hidrostática y densidad uniforme y flujo incompresible.

Así mismo, para aproximar el flujo turbulento se utiliza la viscosidad de remolino con un numero de Reynolds ponderado: además, asumen que la escala de longitud vertical es significativamente menor que la escala de longitud horizontal (HEC-RAS, 2024). Alternativamente el software también utiliza modelos de ecuaciones, denominado ecuaciones de aproximación de ondas difusivas de aguas poco profundas, que sus siglas en inglés significan Diffusive Wave Approximation of Shallow Water (DSW), se obtienen combinando la ecuación de Momentum con la ecuación de conservación de masa.

2.6.3.2.2 Ecuación de conservación de masa

Considerando flujo incompresible, la ecuación diferencial de flujo no permanente de la ecuación de la conservación de masa es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (42)$$

Donde:

- t : es el tiempo
- u, v : componentes de velocidad en las direcciones x, y respectivamente
- q : es un término de flujo fuente/sumidero

En forma vectorial la ecuación de conservación de masa toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (43)$$

Donde:

$V = (u, v)^T$: es el vector de velocidad

∇ : es el operador gradiente dado por $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)^T$

Integrando sobre una región horizontal con el vector normal límite n y utilizando el teorema de divergencia de Gauss, se obtiene la forma integral de la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_s V \cdot n dS = Q \quad (44)$$

Donde:

Ω : es el espacio tridimensional ocupado por el fluido

n : Los límites laterales del vector normal dados por el contorno S

Q : El flujo.

2.6.3.2.3 Ecuación de conservación de Momentum

La conservación del volumen implica que la velocidad vertical es pequeña cuando las escalas de longitud horizontal son mucho más grandes que las escalas de longitud vertical. Se puede decir que la presión es casi hidrostática utilizando la ecuación de impulso vertical de Navier-Stokes. Sin embargo, en ausencia de gradientes de presión (densidad variable), fuerza de resistencia al viento y presión hidrostática no variable, es adecuado considerar una aproximación mediante una ecuación de Momentum vertical ponderado. Por lo tanto, los términos derivados verticales y la velocidad vertical se pueden considerar nulos. Bajo esta premisa se obtiene la siguiente ecuación de conservación de Momentum (HEC-RAS,2024):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v \\ = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c u \\ = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \end{aligned} \quad (46)$$

Donde:

u, v : velocidades en las direcciones cartesianas

g : aceleración de la gravedad

z_s : elevación de superficie de agua

$v_{t,xx}, v_{t,yy}$: coeficientes de viscosidad de remolino horizontal en x, y

$\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$: esfuerzos cortantes inferiores en direcciones en x, y

R : Radio hidráulico

$\tau_{s,x}, \tau_{s,y}$: esfuerzos del viento en la superficie en direcciones en x, y

h : profundidad del agua

f_c : parámetro de Coriolis

p_a : presión atmosférica

De acuerdo con el manual de referencia técnica de HEC-RAS (2024) el lado izquierdo de la igualdad contiene los componentes de la aceleración; mientras que el lado derecho de la expresión está conformado por las fuerzas internas o externas que actúan sobre el fluido.

Ambos lados de la igual suelen estar agrupados en conformidad a la segunda ley de Newton, misma ley de donde se desprenden las ecuaciones de conservación de Momentum.

Las ecuaciones 17 y 18 pueden ser reformuladas en su forma vectorial; la ventaja de usar la notación vectorial es que la misma se hace más compacta y se facilita su lectura. La forma vectorial de la ecuación de Momentum es la siguiente:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V + f_c k \times V = -g\nabla z_s + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau_b}{\rho R} + \frac{\tau_s}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \nabla p_a \quad (47)$$

Donde:

$V = (u, v)^T$: es el vector de velocidad

∇ : es el operador gradiente dado por $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$

v : es el tensor de viscosidad turbulenta

k : es el vector unitario en dirección vertical

τ_s : es el esfuerzo cortante de viento

Cada componente de la ecuación vectorial de conservación de Momentum tiene un significado físico. Leyendo las componentes de la ecuación de izquierda derecha se traducen a: aceleración de régimen no permanente, aceleración convectiva, término de Coriolis, presión barotrópica, difusión de Momentum, fricción inferior y resistencia del viento.

2.6.3.2.3.1 Aceleración

Los componentes de la aceleración Euleriana y el término de velocidad del lado izquierdo de la ecuación pueden ser agrupados por medio del término que se le conoce como aceleración Lagrangiana derivativa, tal como se muestra en la siguiente igualdad.

$$\frac{DV}{Dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V \quad (48)$$

2.6.3.2.3.2 Fricción inferior

El esfuerzo de fricción inferior se calcula por la siguiente expresión:

$$\tau_b = \frac{\rho C_D}{V} \quad (49)$$

Donde:

ρ : es la densidad del agua

C_D : es el coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre viene dado por la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{n^2 g}{R^{1/3}} \quad (50)$$

Donde:

n : es el coeficiente de rugosidad de Manning

R : es el Radio hidráulico

g : es la aceleración de la gravedad

2.6.3.2.3.3 Efecto de Coriolis

El componente de Coriolis contabiliza los efectos asociados al marco de referencia con la rotación intrínseca de la Tierra alrededor de su propio eje. La componente vertical del término de Coriolis se desprecia en condiciones de agua poco profundas; la componente horizontal que experimenta cualquier objeto en el marco giratorio es directamente proporcional al parámetro de Coriolis, el cual se calcula con la siguiente expresión matemática.

$$f_c = 2\omega \sin \varphi \quad (51)$$

Donde:

ω : velocidad angular de la Tierra = 0.00007292115855306587 1/s

φ : es el valor de la latitud

2.6.3.2.4 Aproximación de la onda difusa a ecuaciones de aguas profundas

Para obtener una versión simplificada de la ecuación de Momentum; el flujo superficial controlado por fricción y gravedad deben prescindir de la inestabilidad, la advección, la turbulencia y los términos de Coriolis. El gradiente de presión barotrópica equilibrado por la fricción interna impulsa el movimiento del flujo, que da como resultado la forma de la onda difusiva para la ecuación de Momentum.

$$\frac{gn^2}{R^{4/3}} |V|V = -g\nabla z_s - \frac{1}{\rho} \nabla p_a + \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (52)$$

La ecuación anterior se puede reorganizar de una manera más compacta al dividir ambos lados de la ecuación por la raíz cuadrada de su norma. Al realizar esta operación se obtiene la forma más clásica de la expresión.

$$V = -\frac{R^{2/3}}{n} \frac{\nabla z_s + \frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho g h}}{\left| \nabla z_s + \frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho g h} \right|} \quad (53)$$

Donde:

V : vector de velocidad

g : aceleración de la gravedad

z_s : elevación de superficie de agua

n : coeficientes de rugosidad de Manning

ρ : es la densidad del agua

R : Radio hidráulico

τ_s : esfuerzos del viento

2.6.3.2.5 Cuadrícula y Cuadrícula dual

El solucionador de HEC-RAS no establece límites para el número de lados de las celdas poligonales; sin embargo, se ha establecido un límite de 8 lados para la eficiencia y el ahorro de espacio de memoria, pero las celdas deben ser convexas. La elección de una rejilla es crucial porque la estabilidad y la precisión de la solución dependen en gran medida del tamaño, la orientación y las características geométricas de los elementos de la rejilla.

Para modelar numéricamente las ecuaciones diferenciales, será necesaria una malla dual además de la malla regular debido a los parámetros de derivadas de segundo orden y la naturaleza diferencial de las relaciones entre variables.

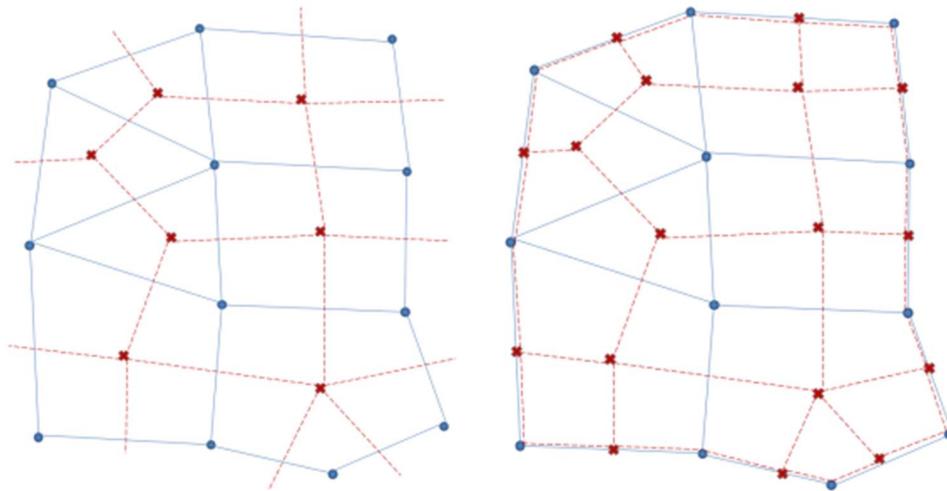


Figura 2.6.21 : Representación de la estructura de malla. Fuente (HEC-RAS, 2024)

2.6.3.2.5.1 Batimetría Sub-grid

El solucionador de HEC-RAS no establece límites para el número de lados de las celdas poligonales; sin embargo, se ha establecido un límite de 8 lados para la eficiencia y el ahorro de espacio de memoria, pero las celdas deben ser convexas. La elección de una rejilla es crucial porque la estabilidad y la precisión de la solución dependen en gran medida del tamaño, la orientación y las características geométricas de los elementos de la rejilla.

Los datos topográficos de alta resolución se pueden obtener gracias a los avances actuales en el campo de la teledetección aérea. En muchos casos, los datos son demasiado densos para que el modelo numérico los utilice directamente como una grilla. El dilema que surge en esta situación es que aunque se debe utilizar una cuadrícula computacional relativamente burda para crear una simulación de una proporción fluidos, el cálculo debe incluir características topográficas finas.

Según Casulli (2009) HEC-RAS utiliza el enfoque de batimetría sub-grid para direccionar este problema. Las celdas de la cuadrícula computacional contienen información adicional, como radio hidráulico, volumen y área de la sección transversal que se puede calcular previamente a partir de la batimetría fina. Los detalles de alta resolución se pierden, pero hay suficiente información disponible para que el método numérico pueda contabilizar la detallada batimetría a través de la conservación de masa. Para muchas aplicaciones este método es apropiado porque la superficie del agua libre es más lisa que la batimetría; por lo tanto, se puede utilizar una rejilla más gruesa utilizando para calcular la variabilidad espacial en la elevación de la superficie libre. En la siguiente figura, la cuadrícula final se representa mediante la cuadrícula cartesiana en gris y la cuadrícula computacional se muestra en azul.

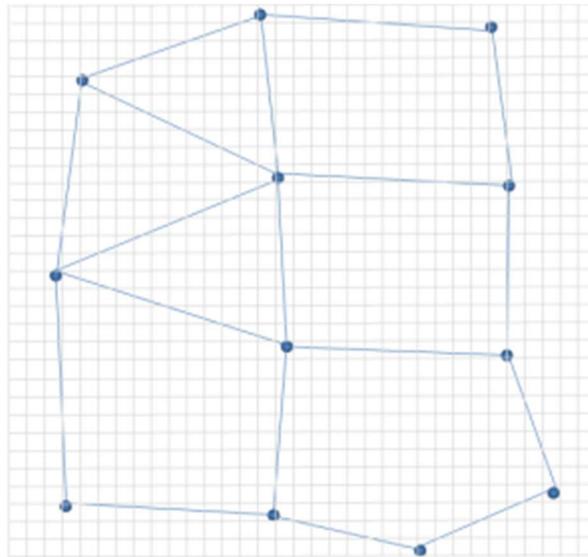


Figura 2.6.22 : Cuadrícula cartesiana y cuadrícula computacional. Fuente (HEC-RAS, 2024)

2.6.3.2.6 Métodos Numéricos

HEC-RAS soluciona las ecuaciones de difusión de onda (DWE) y las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE). En el software, se pueden usar dos métodos para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas: el método euleriano-lagrangiano (ELM-SWE) y el método euleriano (EM-SWE). Los solucionadores son idénticos excepto en la forma en que manejan los conceptos de aceleración y gradiente de presión.

2.6.3.2.6.1 Aproximación por diferencias finitas

De acuerdo con Casulli (2009) una derivada se representa como la diferencia entre dos cantidades en el esquema de diferencias finitas. El funcionamiento de las diferencias finitas en el espacio es idéntico; en dos celdas adyacentes, con elevación de superficie de agua H_1 y H_2 respectivamente, el centro de las celdas determina la derivada direccional en la dirección n' por medio de la siguiente expresión matemática:

$$\nabla H \cdot n' = \frac{\partial H}{\partial n'} \approx \frac{H_2 - H_1}{\Delta n'} \quad (54)$$

Donde $\Delta n'$ es la distancia entre los centros de la celda

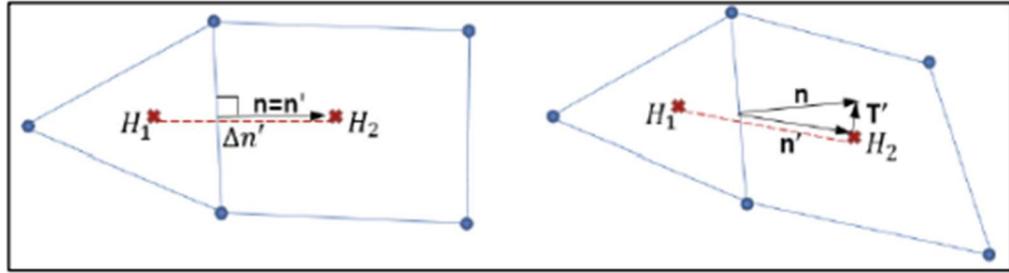


Figura 2.6.23 : Derivada direccional entre celdas. Fuente (Casulli, 2009)

2.6.3.2.6.2 Aproximación por volúmenes finitas

Cuando la malla no es localmente ortogonal, se utiliza una aproximación por volúmenes finitos. También se utilizará este esquema para aproximar otros términos diferenciales, como la viscosidad turbulenta. El valor del gradiente ∇H en una cara de malla se aproxima al promedio de las celdas duales utilizando la técnica de volúmenes finitos (Casulli,2009).

$$\nabla H \approx \frac{\oint_L HndL}{A'} \quad (55)$$

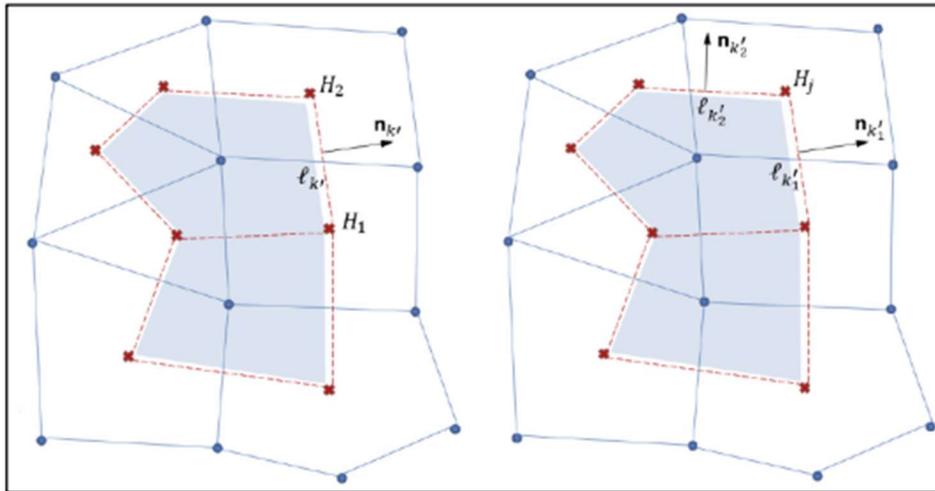


Figura 2.6.24 : Celda y Celda dual por volúmenes finitos. Fuente (Casulli, 2009)

2.6.3.2.6.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en todos los bordes del contorno deben darse en cualquier paso de tiempo dado, dentro de HEC-RAS se manejan las siguientes condiciones de contorno:

- **Elevación de superficie del agua:** En este tipo de borde de contorno el valor de la elevación de la superficie del agua $z_s^{n+1} = z_{s,b}$, se da en uno de los bordes límite.
- **Profundidad normal:** El flujo en cada cara de cálculo se calcula utilizando la pendiente de fricción. En el lado derecho del sistema, las celdas internas incluyen los flujos de cara límite como término fuente de las ecuaciones.
- **Flujo:** Cada cara computacional especifica la condición de contorno del flujo en función del transporte local. En el lado derecho del sistema, las celdas internas incluyen los flujos de cara límite como término fuente de las ecuaciones.

Una de las herramientas ampliamente utilizadas hoy en día para llevar a cabo análisis de inundación es la utilización de sistemas de información geográfica (SIGs); que extraen e incorporan datos de grandes extensiones geográficas que se utilizan como entrada para soportar el desarrollo de las modelaciones hidráulicas e hidrológicas (Arriola *et al.*, 2022); las modelaciones hidrológicas e hidráulicas constituyen la columna vertebral de los análisis de inundación; ya que los resultados de ambos modelos dependen intrínsecamente uno del otro.

Una de las etapas en el desarrollo de los análisis de inundación consiste en llevar a cabo la modelación hidrológica; la misma utiliza modelos matemáticos para predecir el comportamiento de los flujos de agua en las zonas de estudio. Para el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan la modelación se requiere el ingreso de parámetros de entrada que son particulares para cada zona de estudio tales como: la configuración de la red de drenaje de la cuenca, delimitación y subdivisión de esta en subcuencas, longitudes y pendientes de los tramos del cuerpo en estudio, superficies, longitudes, información de tipo y cobertura del suelo, topografía, entre otros (Achá *et al.*, 2022).

La modelación hidrológica requiere ser complementada con la modelación hidráulica (Navas *et al.*, 2022); esta última es necesaria para determinar el comportamiento y la caracterización de los cuerpos de agua para eventos de riesgos naturales (Hosseiny *et al.*, 2020). Las relaciones matemáticas estiman el flujo en movimiento (principios de conservación de masa y momento) para predecir las propiedades propias del flujo en cuestión; posteriormente los resultados de estas ecuaciones se traducen en valores de salida tales como flujos y avenidas de inundación, velocidades de flujos, extensión de manchas de inundación (Gutiérrez *et al.*, 2022).

Resolver las ecuaciones de los modelos hidráulicos puede convertirse en un trabajo laborioso y ostentoso especialmente cuando se trata de una zona de gran extensión geográfica. Para llevar a cabo las modelaciones hidráulicas existe una amplia gama de softwares; la elección del software dependerá de las necesidades y tolerancias requeridas en cada proyecto particular; por ejemplo, existen softwares que realizan modelaciones unidimensionales, como otros que tiene la capacidad de realizar modelaciones bidimensionales.

Una vez que se combinan los modelos hidráulicos e hidrológicos se tiene una estimación inicial del riesgo de inundación; sin embargo, resulta necesario evaluar la incertidumbre inherente a los datos de entrada que impacta en el poder predictivo del modelo. De esta manera se dispone de una herramienta como la geoestadística que permite evaluar la variabilidad espacial mediante técnicas de análisis de datos lo que conduce a un enfoque estocástico que permita llevar a cabo la calibración del modelo y lograr determinar los intervalos de confianza y las limitantes del mismo (Bathrellos et al., 2018)

Capítulo 3: Información Disponible

3.1 DATOS HIDROMÉTRICOS DISPONIBLES

Sobre el lecho del Rio Bravo en la sección de estudio, solamente la estación hidrométrica número 08364000 “Rio Grande” ubicada aguas arriba de la presa Americana, cuenta con registros históricos de caudales desde 1889 hasta el año 2024. La estación está regulada por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) en la sección correspondiente a El Paso, Texas.

La obtención y descarga de la información de los registros de los caudales históricos de la estación hidrométrica Rio Grande, es a través de la página de internet de la CILA con dirección: [Datos - USIBWC Water Data](#)

Tabla 3.1.1 : Características de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

ESTACION	FUENTE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	PERÍODO
Rio Grande en El Paso, TX	CILA	31° 48' 11"	- 106° 32' 28"	1135.1 m	1910/2024

En las siguientes tablas se muestra los registros de los caudales máximos, para un periodo de tiempo desde 1889 hasta el año 2024; los mismos datos fueron obtenidos a través de la fuente mencionada anteriormente.

Tabla 3.1.2 : Caudales históricos máximos (1889-2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

Año	Qi (m³/s)	Año	Qi (m³/s)	Año	Qi (m³/s)	Año	Qi (m³/s)
1889	133.09	1933	113.55	1973	44.17	2013	21.8
1890	203.88	1934	72.77	1974	45.87	2014	30.1
1891	470.63	1935	163.95	1975	78.44	2015	34.3
1892	283.17	1936	88.91	1976	37.66	2016	49.8
1893	187.74	1937	101.09	1977	30.47	2017	36.2
1897	481.39	1938	115.53	1978	42.19	2018	34.1
1898	280.34	1939	76.74	1979	71.92	2019	34.7
1900	100.52	1940	62.3	1980	39.93	2020	30.6
1901	112.7	1941	119.78	1981	40.78	2021	26
1902	60.6	1942	198.22	1982	37.1	2022	38.2
1903	511.69	1943	90.33	1983	30.87	2023	28
1904	484.22	1944	92.88	1984	54.93		
1905	670.54	1945	51.54	1985	43.89	Q_m	75.23
1906	246.36	1946	43.61	1986	90.9	∂_Q	63.53
1907	304.41	1947	71.08	1987	110.44	∂_N	1.20649

1908	96.84	1948	54.65	1988	60.6	Y_N	0.56002
1909	193.97	1949	54.09	1989	40.21		
1910	218.61	1950	69.66	1990	44.5		
1911	334.42	1951	32.56	1991	49.1		
1912	452.5	1952	49.55	1992	40.9		
1913	110.44	1953	44.74	1993	43.6		
1914	236.45	1954	27.5	1994	70.8		
1915	125.73	1955	33.98	1995	110		
1916	150.08	1956	20.61	1996	48.3		
1917	79.94	1957	85.52	1997	47.6		
1918	53.8	1958	156.59	1998	52.1		
1919	59.21	1959	51.54	1999	96.5		
1920	89.76	1960	41.91	2000	68		
1921	89.48	1961	60.6	2001	40.5		
1922	67.96	1962	89.76	2002	59.8		
1923	90.44	1963	35.4	2003	27.1		
1924	82.12	1964	11.5	2004	36		
1925	259.38	1965	37.38	2005	39.3		
1926	139.09	1966	52.95	2006	206		
1927	106.19	1967	52.95	2007	35.8		
1928	79.57	1968	46.16	2008	80.8		
1929	165.09	1969	47.01	2009	38.1		
1930	66.26	1970	51.25	2010	60.7		
1931	119.21	1971	30.02	2011	32.9		
1932	56.35	1972	24.41	2012	22.9		



Figura 3.1.25 : Caudales históricos máximos en la estación 08364000 (1889-2024). Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.1.26 : Caudales históricos máximos en la estación 08364000 (1939-2024). Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la AECOM (2023) es importante aclarar que la presa el Elefante y el Caballo se construyeron en los años de 1916 y 1938 respectivamente; por esta razón en los años previos a 1938 se pueden observar valores de caudales máximos muy por encima de la media, en comparación a los años posteriores a 1938. Así mismo, el bordo del Rio Bravo entre Cd. Juárez y el Paso, Texas se construyó en la década de 1930.



Figura 3.1.27 : Cuenca del Rio Bravo. Fuente (AECOM, 2023).



Figura 3.1.28 : Cuenca del Río Bravo. Fuente (AECOM, 2023).

3.2 EVENTO DE LLUVIA EXTRAORDINARIA DEL 2006 EN CD. JUÁREZ

Lugo (2016) realizó un análisis de los caudales registrados en la estación número 08364 “Rio Grande”, durante el evento de precipitaciones extraordinarios que tuvo lugar en los meses de julio y agosto del 2006, que tuvieron lugar en el valle de Cd. Juárez y el Paso. Los resultados del análisis mencionado muestran un hidrograma de los caudales registrados durante el evento.

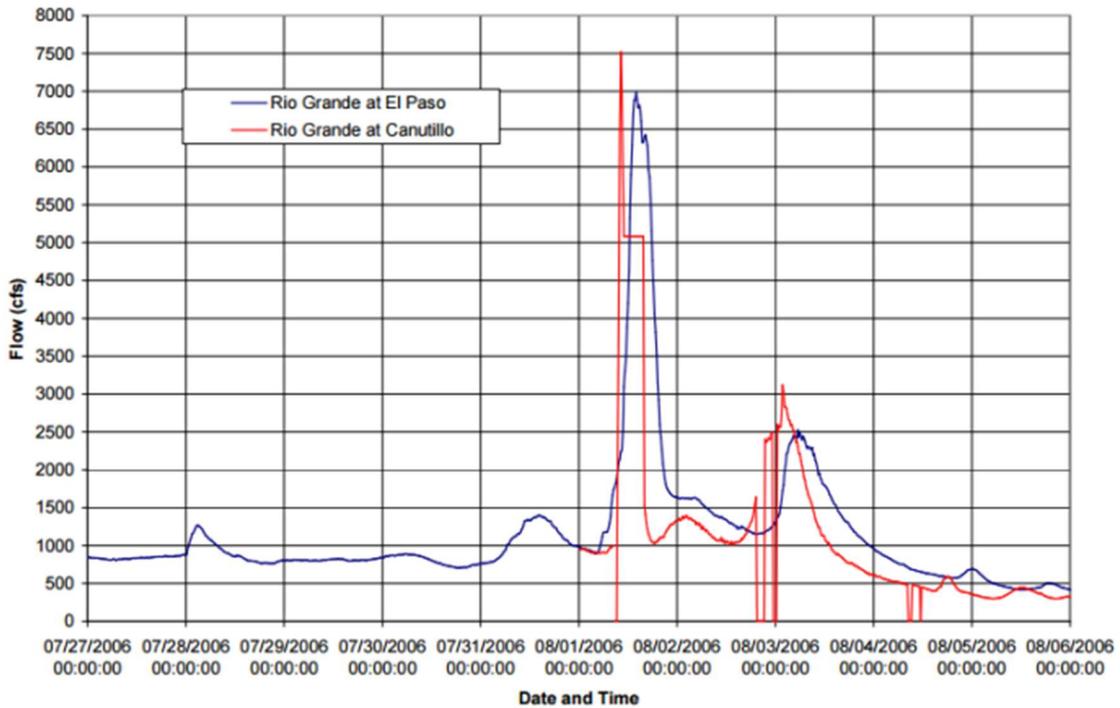


Figura 3.2.29 : Hidrograma de caudal pico en el Rio Bravo durante el evento del 2006. Fuente (Lugo, 2016).

3.3 CAUDALES PICOS REPORTADOS EN EL RIO BRAVO DURANTE EL EVENTO DEL 2006.

La contraparte de la CILA en el lado americano, la International Boundary and Water Comissioning (AECOM, 2023) por sus siglas en inglés, llevó a cabo un análisis estadístico de los caudales picos, para distintos periodos de retorno, registrados en la estación número 08364000 “Rio Grande”. El periodo de tiempo analizado de caudales máximos fue desde 1938 hasta el 2006; utilizaron el software HEC-HFFA (Hydrologic Engineering Center-Flood Flow Frequency) los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura y tabla.

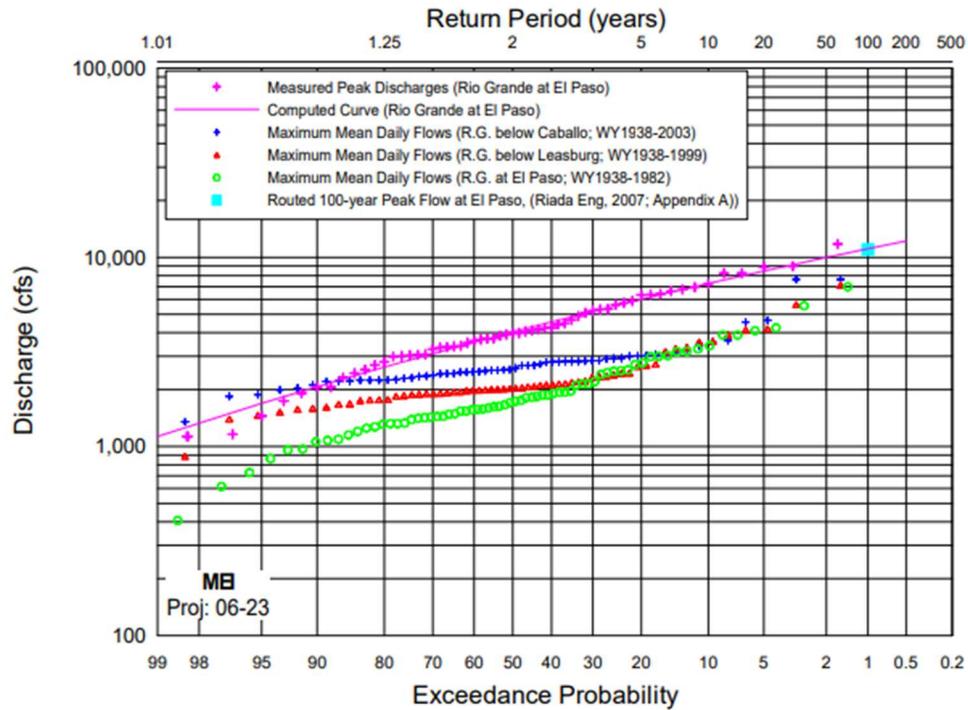


Figura 3.3.30 : Análisis estadístico de caudal pico en el Rio Bravo en la estación Rio Grande para distintos periodos de retorno. Fuente (AECOM, 2023).

Tabla 3.3.3 : Caudales pico en el Rio Bravo en la estación Rio Grande para distintos periodos de retorno. Fuente: Elaboración propia.

Caudales pico en el Rio Bravo en la estación Rio Grande	
Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
2	114.4
5	169.9
10	205.8
20	239.8
50	282.6
100	314.3

3.4 TOPOGRAFÍA.

La topografía de la zona de estudio se obtuvo del modelo digital de elevación Lidar con resolución de 1.0 m disponible por parte del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). La topografía de la zona es variada con zonas montañosas y de lomeríos que alcanzan elevaciones de 1342 msnm. La referencia espacial del modelo digital de elevación es el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), por sus siglas en inglés y con el sistema de datum de Norteamérica de 1983 (NAD1983).

3.5 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Para la determinación del uso de suelo y vegetación se utilizó la información disponible del Continuo Nacional Serie VIII del año 2018. Uso de Suelo y Vegetación ambas recopiladas del INEGI.

Capítulo 4: Metodología

4.1 ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS CON DATOS HIDROMÉTRICOS

Para la estimación de los caudales a diferentes periodos de retorno se utilizó la metodología descrita en la sección 2.4 del Capítulo II y la información disponible reportada en la sección 3.1 del Capítulo III (Es importante aclarar que se analizaron los datos a partir 1939, posterior a la construcción de la Presa del Caballo); los cálculos se realizaron mediante los métodos estadísticos de: Gumbel y de Nash. En las siguientes tablas y figuras se muestran los caudales máximos y los respectivos intervalos para cada uno de los dos métodos descritos previamente.

Así mismo, es importante aclarar que la presente investigación no consideró el tránsito de avenidas de las presas (Elefante, Caballo); se le da crédito a la regulación de las mismas.

Tabla 4.1.4 : Caudales históricos máximos (1939-2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

Año	Q _i (m ³ /s)								
1939	76.74	1958	156.59	1977	30.47	1996	48.3	2016	49.8
1940	62.3	1959	51.54	1978	42.19	1997	47.6	2017	36.2
1941	119.78	1960	41.91	1979	71.92	1998	52.1	2018	34.1
1942	198.22	1961	60.6	1980	39.93	1999	96.5	2019	34.7
1943	90.33	1962	89.76	1981	40.78	2000	68	2020	30.6
1944	92.88	1963	35.4	1982	37.1	2001	40.5	2021	26
1945	51.54	1964	11.5	1983	30.87	2002	59.8	2022	38.2
1946	43.61	1965	37.38	1984	54.93	2003	27.1	2023	28
1947	71.08	1966	52.95	1985	43.89	2004	36		
1948	54.65	1967	52.95	1986	90.9	2005	39.3		
1949	54.09	1968	46.16	1987	110.44	2007	35.8		
1950	69.66	1969	47.01	1988	60.6	2008	80.8		
1951	32.56	1970	51.25	1989	40.21	2009	38.1		
1952	49.55	1971	30.02	1990	44.5	2010	60.7		
1953	44.74	1972	24.41	1991	49.1	2011	32.9		
1954	27.5	1973	44.17	1992	40.9	2012	22.9		
1955	33.98	1974	45.87	1993	43.6	2013	21.8		
1956	20.61	1975	78.44	1994	70.8	2014	30.1		
1957	85.52	1976	37.66	1995	110	2015	34.3		

4.1.1 Método de Gumbel

Aplicando la metodología de Gumbel descrita en la sección 2.4.2.1 a partir de los datos de la tabla anterior se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 4.1.5 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Gumbel (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

Q_m	55.40
∂_Q	34.08
∂_N	1.198
Y_N	0.558

Aplicando las ecuaciones de la metodología de Gumbel descrita en la sección 2.4.2.1 se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 4.1.6 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Gumbel (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

T_r	$Ln(T_r)$	$\psi = 1 - \frac{1}{T_r}$
2	0.6931	0.5
5	1.6094	0.8
10	2.3026	0.9
25	3.2189	0.96
50	3.9120	0.98
100	4.6052	0.99
200	5.2983	0.995
250	5.5215	0.996
500	6.2146	0.998

Aplicando las ecuaciones mencionadas de la metodología de Gumbel descrita en la sección 2.4.2.1 se obtuvieron los gastos máximos para los diferentes periodos de retorno:

Tabla 4.1.7 : Caudales por el método de Gumbel m^3 / s . Fuente: Elaboración Propia

Periodo de retorno	Caudales por el método de Gumbel m^3/s					
	$\sqrt{N\infty\partial_m}$	ΔQ	Q_{max} (m^3/s)	$Q_{max} + \Delta Q$	$Q_{max} - \Delta Q$	\bar{Q}
2	1.4427	4.43	54.82	63.67	54.82	59.25
5	2.2408	0.82	84.49	86.14	84.49	85.31
10	-	69.62	35.41	174.65	35.41	105.03
25	-	69.62	61.47	200.72	61.47	131.09

50	-	69.62	81.19	220.44	81.19	150.81
100	-	69.62	100.91	240.15	100.91	170.53
200	-	69.62	120.62	259.87	120.62	190.25
250	-	69.62	126.97	266.22	126.97	196.60
500	-	69.62	146.69	285.94	146.69	216.31

4.1.2 Método de Nash

Aplicando la metodología de Nash descrita en la sección 2.4.2.2 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.1.8 : Parámetros para el cálculo de gastos para distintos periodos de retorno por medio de la metodología de Nash (a partir de los datos del periodo de 1939 al 2023) de la estación hidrométrica Rio Grande. Fuente: Elaboración propia

S_{xx}	S_{qq}	S_{xq}	Q_m	X_m	X_m^2	$\sum X_i$
2002.48	8561382.70	- 124364.1	56.37	-0.6045	54.82	-51.98
$\sum q_i$	$\sum q_i^2$	$\sum q_i X_i$	$\sum X_i^2$	$\sum X_i$	a	b
-4376.85	372839.48	-4376.85	54.71	-51.98	93.91	-62.10

Aplicando las ecuaciones de la metodología de Nash descrita en la sección 2.4.2.2 se obtuvieron los gastos máximos para los diferentes periodos de retorno:

Tabla 4.1.9 : Caudales por el método de Nash m^3 / s . Fuente: Elaboración Propia

Periodo de retorno	Caudales por el método de Nash m^3/s					
	X	ΔQ	Q_{max} (m^3/s)	$Q_{max} + \Delta Q$	$Q_{max} - \Delta Q$	\bar{Q}
2	-0.5213	0.0344	126.30	126.48	126.11	126.30
5	-1.013	0.8335	156.87	157.78	155.95	156.87
10	-1.3395	2.6906	177.11	178.75	175.47	177.11

25	-1.7513	6.5500	202.68	205.24	200.12	202.68
50	-2.0568	10.5044	221.65	224.89	218.41	221.65
100	-2.3600	15.3489	240.49	244.40	236.57	240.49
200	-2.6621	21.0800	259.25	263.84	254.66	259.25
250	-2.7592	23.1244	265.28	270.09	260.47	265.28
500	-3.0607	30.0476	284.00	289.48	278.52	284.00

4.2 ESTRUCTURA DE DATOS PARA REALIZAR UN MODELAMIENTO HIDRRAULICO CON HEC – RAS.

4.2.1 Modelación Unidimensional

Para llevar a cabo la modelación hidráulica unidimensional con el software HEC-RAS (Versión 6.5), se tuvo que llevar a cabo una serie de pasos, para ir generando secuencialmente una serie de documentos que definieron la geometría, las condiciones de borde en la zona de estudio. Para llevar a cabo la modelación hidráulica unidimensional se llevaron las siguientes actividades:

- Generar secciones transversales del cauce del Rio Bravo
- Crear un nuevo proyecto
- Ingresar datos de flujo y condiciones de borde
- Ejecutar cálculos hidráulicos

4.2.1.1 Secciones transversales del cauce del Rio Bravo

4.2.1.1.1 Modelo Digital de Elevación

Se utilizó el modelo digital de elevación declarado en la sección 3.4. El mismo se consiguió a través de la página del servicio geológico de Estados Unidos (USGS), el mismo tiene una resolución espacial de 1 metro. A lo cual, se ingresó en software de ArcGis 10.8 para procesarlo.

4.2.1.1.2 Modelo Curvas Topográficas y delimitación del cauce del río Bravo

Posteriormente se procedió a obtener las curvas de elevación a cada 20 metros de la zona de estudio y se definir manualmente el cauce del río Bravo mediante el uso del software ArcGis 10.8



Figura 4.2.31: Modelo Digital de Elevación ingresado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración Propia.

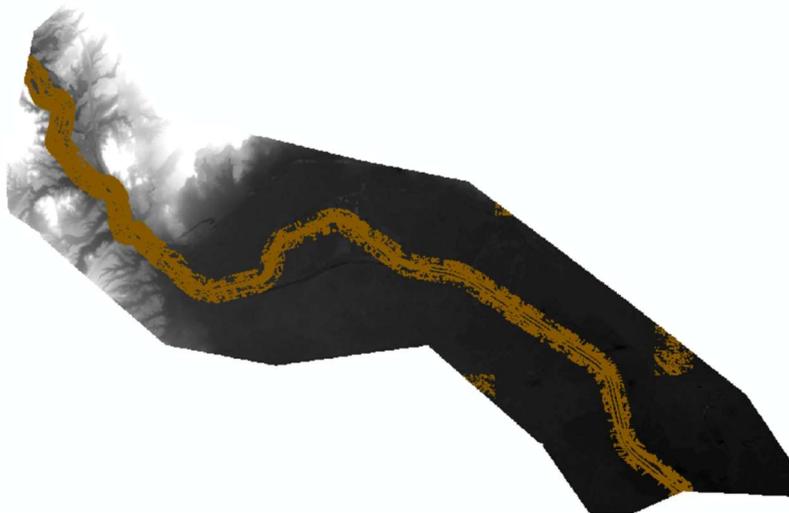
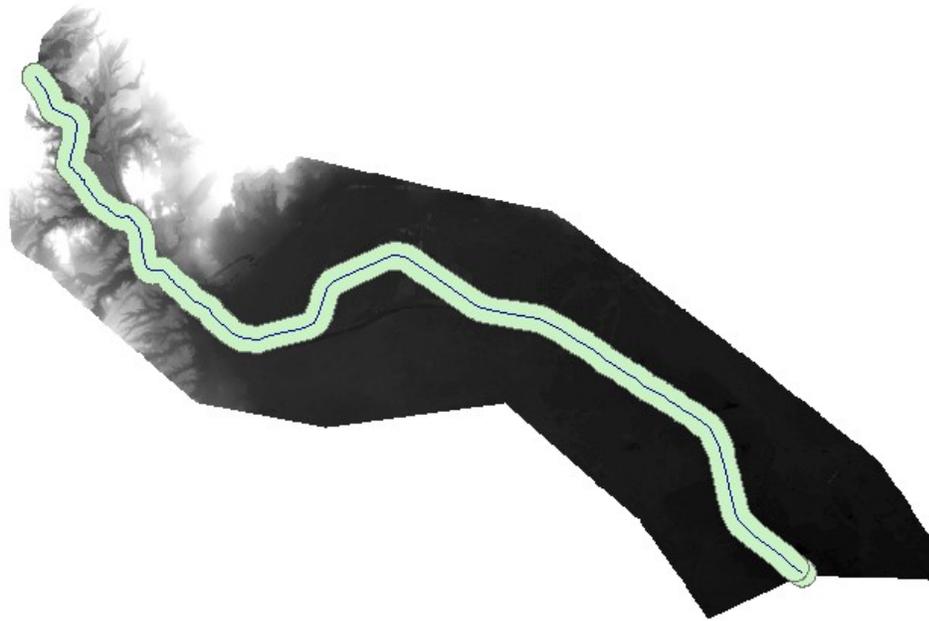


Figura 4.2.32 : Curvas de Nivel a cada 20 metros y delimitación manual del cauce del rio Bravo realizado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 4.2.33 : Delimitación manual del cauce del río Bravo realizado en el software ArcGis 10.8.
Fuente: Elaboración propia.*

4.2.1.1.3 Obtención del buffer de las secciones del cauce del río Bravo

Secuencialmente se procedió a obtener un buffer de las secciones del cauce del río Bravo mediante el uso del software ArcGis, para posteriormente importarlas en el software AutoCAD para generales las secciones transversales de la zona de estudio. En este proceso se definió una longitud de 300 metros tanto para el lado izquierdo como para el lado derecho.

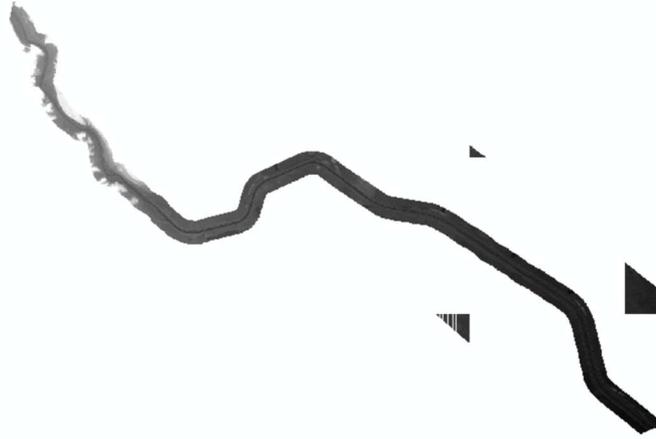


Figura 4.2.34 : Delimitación manual del buffer del cauce del rio Bravo @ 350 metros del lado izquierdo y derecho realizado en el software ArcGis 10.8. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1.4 Obtención de las secciones transversales de la zona de estudio del Rio Bravo

Para la obtención de las secciones del rio Bravo, se utilizó AutoCAD y Civil Cad, las secciones se definieron cada 20 metros, así mismo se especificó una longitud de secciones a prueba y error de manera que se mostrara el perfil completo de las secciones del cauce buffer extraído de ArcGis; la distancia optima fue a 350 metros tanto para el lado izquierdo como para el derecho. Este procedimiento se ejecutó manualmente para cada una de las secciones analizadas en la zona de estudio. En este proceso se ingresaron la geometría de las secciones buffer descritas en la sección anterior.

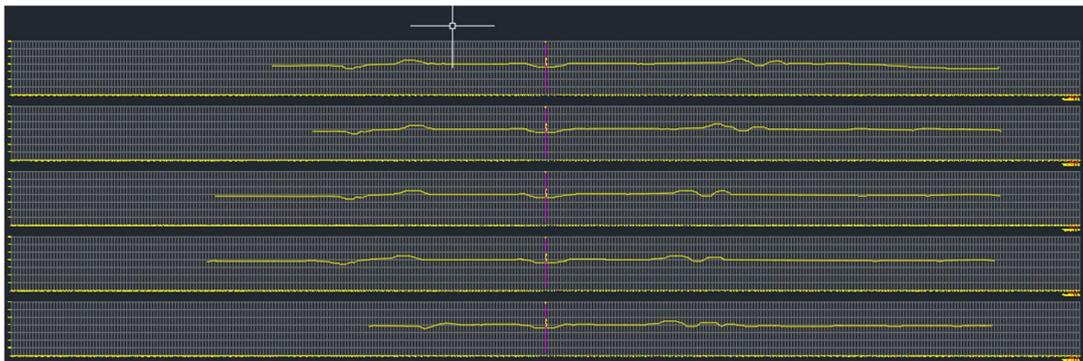


Figura 4.2.35 : Elaboración de las Secciones transversales @ 20 metros. Mediante el software AutoCAD. . Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2.36 : Secciones transversales @ 20 metros en la zona de estudio exportadas mediante el software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.1.5 Obtención del perfil del terreno y de la pendiente del cauce del río Bravo.

La pendiente del cauce del río Bravo se determinó mediante el uso de la función de **perfil de terreno** mediante Civil Cad. La pendiente calculada para el tramo de estudio fue de **+0.0747%**; este parámetro es de suma importancia para la modelación unidimensional en el software HEC-RAS.



Figura 4.2.37 : Pendiente del cauce del Río Bravo calculada mediante el software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.1.6 Obtención de la altimetría de las secciones del cauce del río Bravo y alimentación de la geometría en HEC-RAS para la modelación unidimensional.

Finalmente se utilizó la función de generar altimetría mediante el uso de la función altimetría de civil Cad. Esta altimetría se utilizará como la geometría de entrada en la modelación unidimensional en el software HEC-RAS. Los datos de altimetría se exportan en un archivo de Excel con extensión CVS.

RS	STATION	Y	X	Z
0	35	3508343.416	371311.3457	1120
0	33.094	3508341.877	371310.2215	1120
0	32.835	3508341.668	371310.0684	1120
0	32.754	3508341.602	371310.0208	1120
0	32.234	3508341.182	371309.714	1120.3149
0	31.898	3508340.911	371309.5159	1120.4636
0	31.861	3508340.882	371309.4943	1120.5
0	31.642	3508340.704	371309.3647	1120.5
0	31.53	3508340.614	371309.2986	1120.5
0	28.806	3508338.414	371307.6918	1120.5
0	20.761	3508331.919	371302.9465	1120.5
0	20.559	3508331.755	371302.8274	1120.5

Figura 4.2.38 : Altimetría de las secciones del cauce del Rio Bravo Obtenidas mediante software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2 Crear nuevo proyecto

4.2.1.2.1 Crear un nuevo proyecto en HEC-RAS

El paso inicial para modelar un sistema hidráulico es desarrollar un proyecto nuevo; inicialmente se determina el directorio en el que se pretende trabajar. Para comenzar un nuevo proyecto, es necesario acceder al menú File en la ventana principal de HEC – RAS y elegir New Project. Al hacerlo, se despliega una ventana similar a la que se ilustra en la siguiente figura, donde se detalla la unidad y el camino a seguir, además de darle un nombre al proyecto y un nombre de archivo.

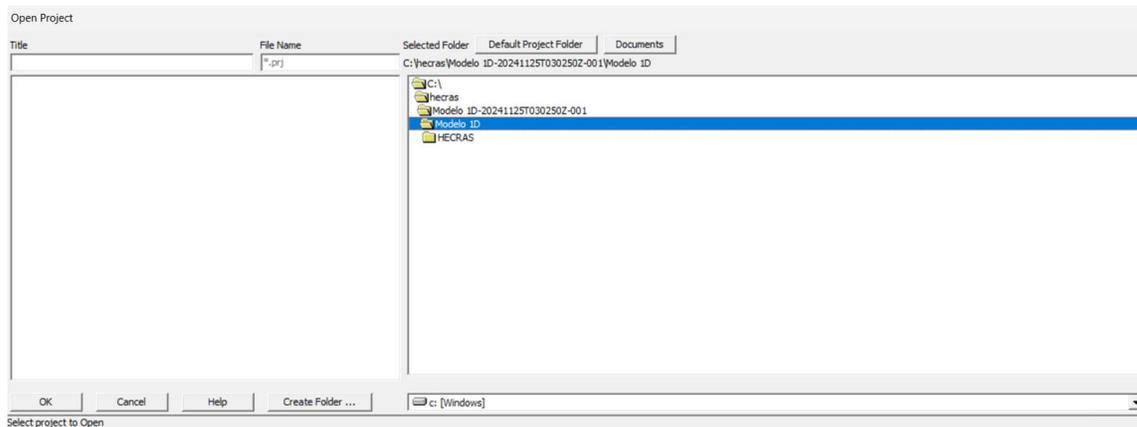


Figura 4.2.39 : Ventana para crear un nuevo proyecto en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS

4.2.1.2.2 Definir sistemas de sistemas de unides en HEC-RAS

Antes de introducir los datos geométricos, es necesario configurar el sistema de unidades con el que se desea trabajar. El programa proporciona al usuario la posibilidad de elegir entre el sistema decimal Ingles y el sistema métrico. El procedimiento para seleccionar es **Unit System (US Customary /SI)**, el cual se halla en el menú **Options**, en la ventana principal del HEC – RAS. En la presente investigación se seleccionó el sistema métrico.

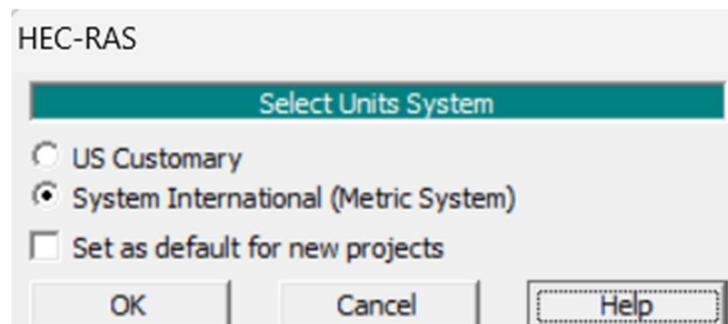


Figura 4.2.40 : Ventana para seleccionar el sistema de unidades en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS

4.2.1.2.3 Importar geometría para la modelación unidimensional HEC-RAS

La geometría de entrada para la modelación unidimensional se generó a partir del archivo de altimetría definido en la sección 4.2.1.1.6. El procedimiento para ingresar la geometría es a través del menú **File** en la sección de **Geometric Data**, posteriormente se seleccionó la opción de **Import Geometry Data + CSV (Comma Separated Value) Format**.

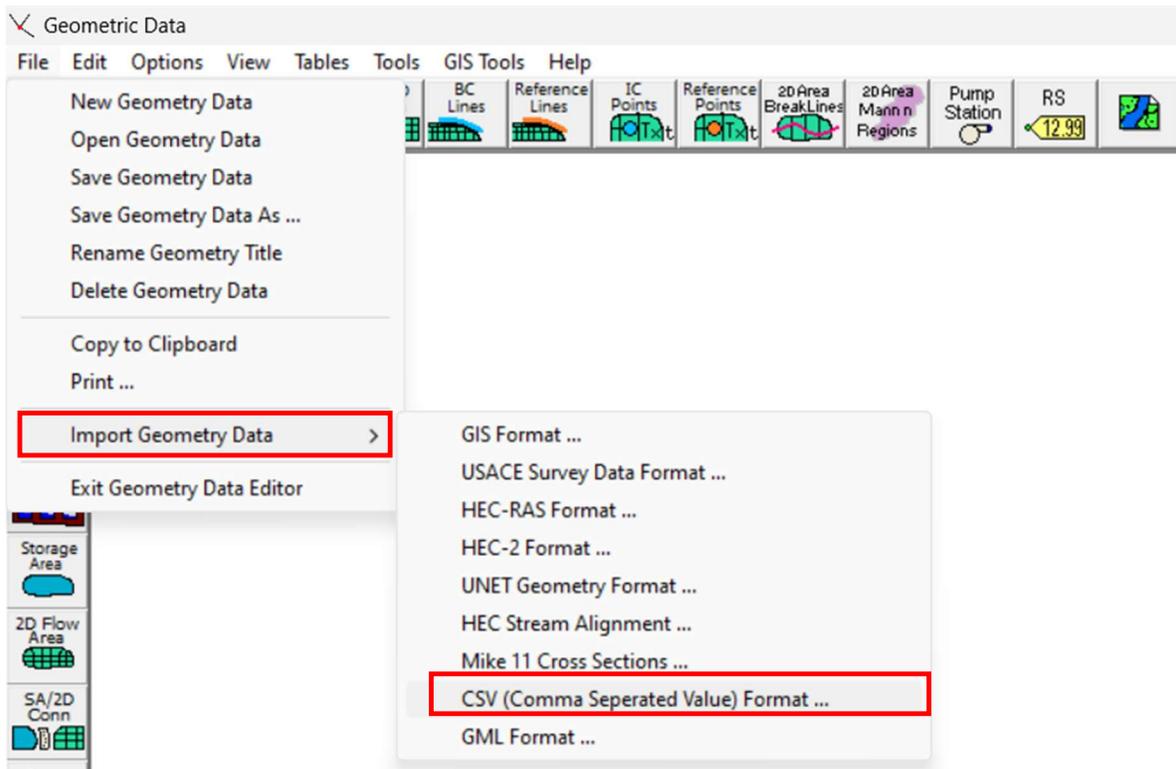


Figura 4.2.41: Ventana para importar la geometría del modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.

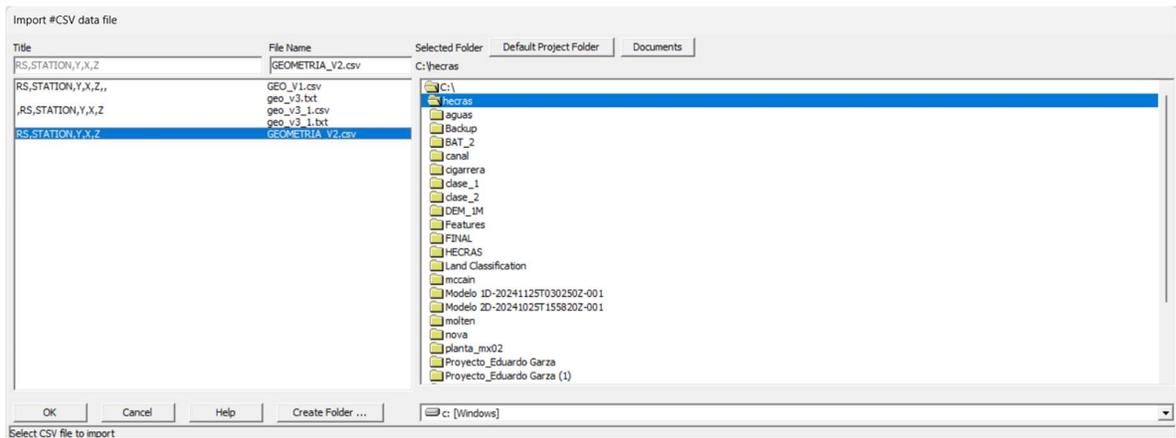


Figura 4.2.42 Ventana para seleccionar el archivo CVS de altimetría del modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.

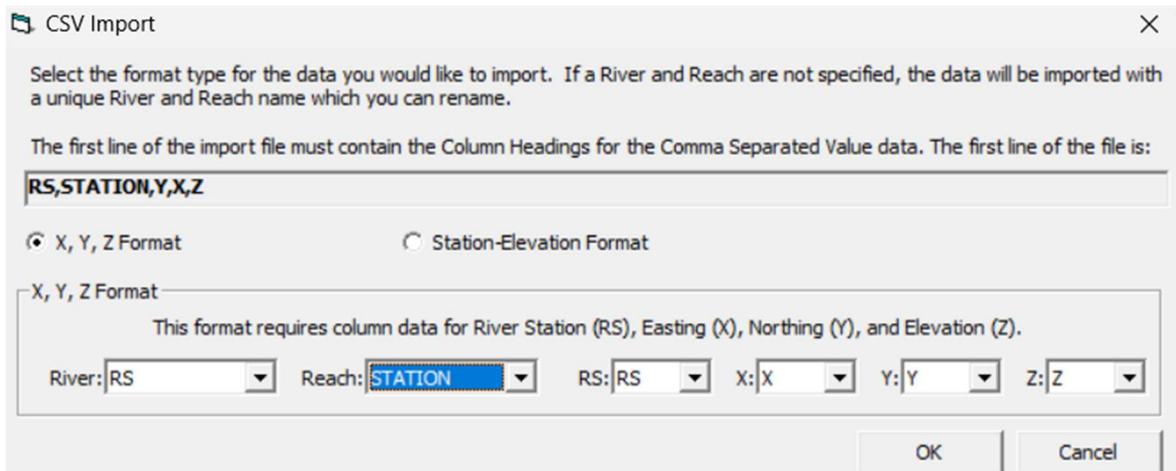


Figura 4.2.43 : Ventana de CVS Import de altimetría para el modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.

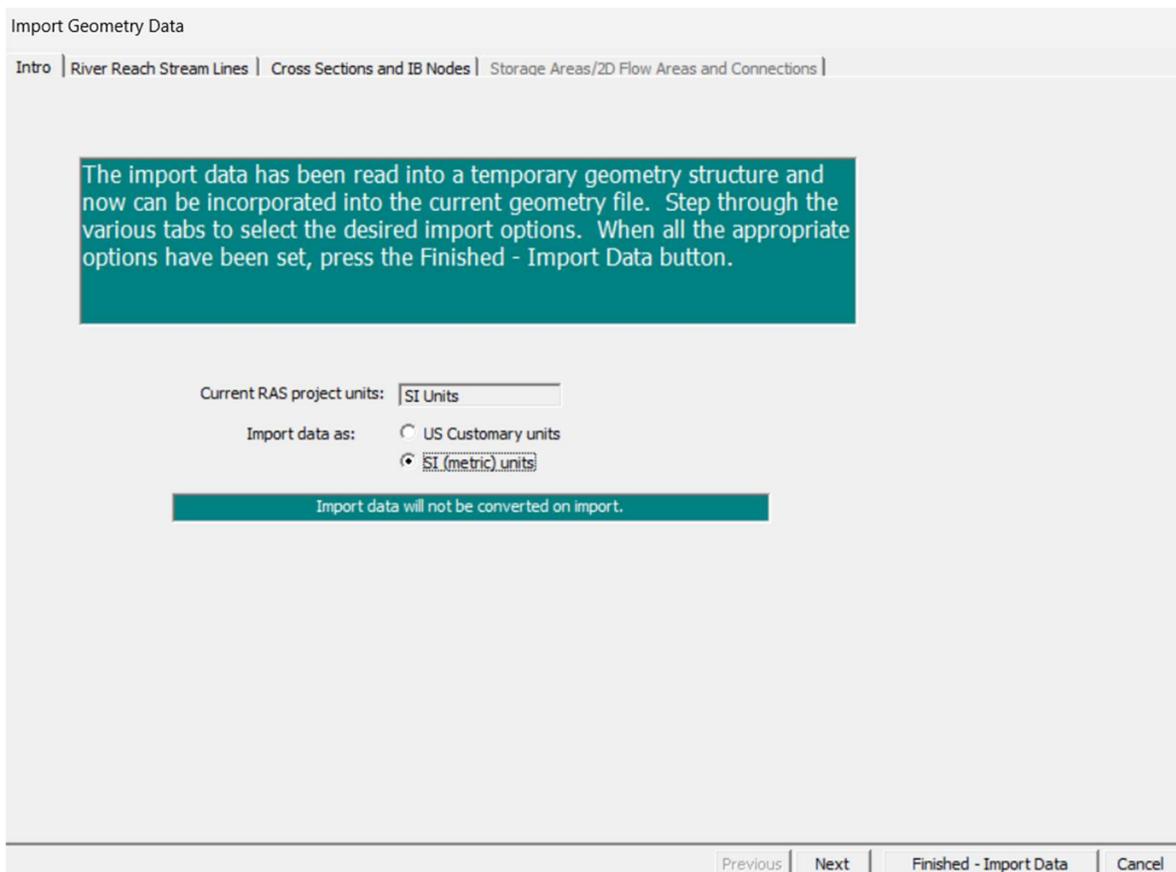


Figura 4.2.44 : Ventana de Import Geometry Data para el modelo unidimensional en HEC – RAS. Fuente: Software HEC-RAS.

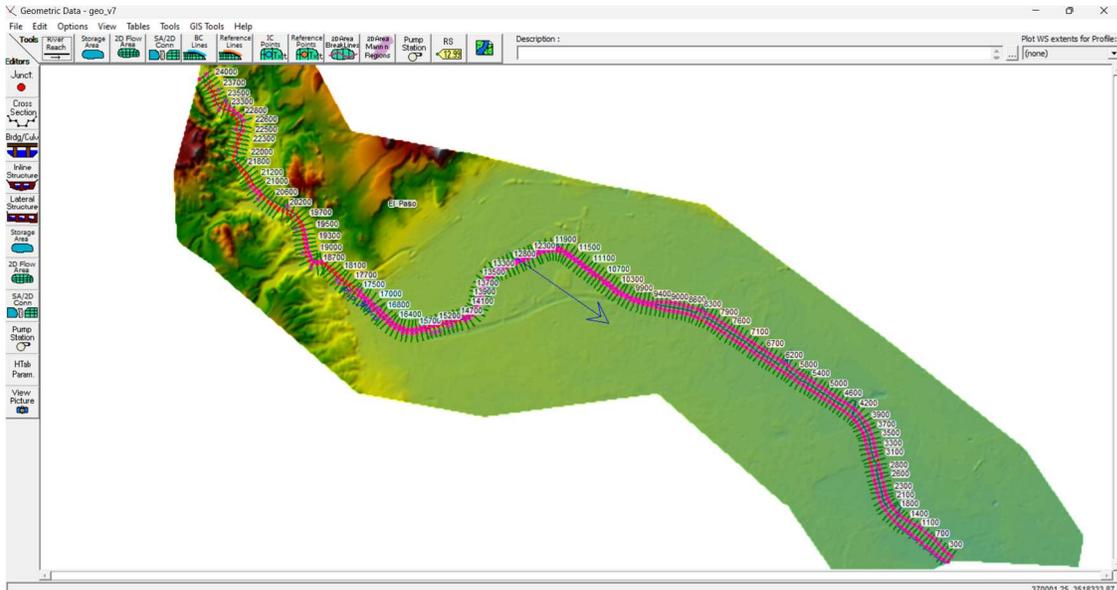


Figura 4.2.45 : Secciones transversales importadas de la zona de estudio para el modelo 1D.
Fuente: Software HEC-RAS.

Import Geometry Data

Intro | River Reach Stream Lines | Cross Sections and IB Nodes | Storage Areas/2D Flow Areas and Connections

The river reach stream lines found in the file or generated while reading it are listed below. Check the reaches you want to import, and modify the import name and way existing stream lines are merged. (A range of reaches can be checked/unchecked with the space bar)

	Import File	Import File	Invert	Import As	Import As	Import	Import	Merge Mode
	River	Reach	#Points	River	Reach	Status	Stream Lines	
1	0	33.094	0	0	33.094	new	<input type="checkbox"/>	Replace
2	0	32.835	0	0	32.835	new	<input type="checkbox"/>	Replace
3	0	32.754	0	0	32.754	new	<input type="checkbox"/>	Replace
4	0	32.234	0	0	32.234	new	<input type="checkbox"/>	Replace
5	0	31.898	0	0	31.898	new	<input type="checkbox"/>	Replace
6	0	31.861	0	0	31.861	new	<input type="checkbox"/>	Replace
7	0	31.642	0	0	31.642	new	<input type="checkbox"/>	Replace
8	0	31.53	0	0	31.53	new	<input type="checkbox"/>	Replace
9	0	28.806	0	0	28.806	new	<input type="checkbox"/>	Replace
10	0	20.761	0	0	20.761	new	<input type="checkbox"/>	Replace
11	0	20.559	0	0	20.559	new	<input type="checkbox"/>	Replace
12	0	20.385	0	0	20.385	new	<input type="checkbox"/>	Replace
13	0	20.287	0	0	20.287	new	<input type="checkbox"/>	Replace
14	0	20.106	0	0	20.106	new	<input type="checkbox"/>	Replace
15	0	19.383	0	0	19.383	new	<input type="checkbox"/>	Replace
16	0	19.238	0	0	19.238	new	<input type="checkbox"/>	Replace
17	0	18.45	0	0	18.45	new	<input type="checkbox"/>	Replace
18	0	17.838	0	0	17.838	new	<input type="checkbox"/>	Replace
19	0	17.688	0	0	17.688	new	<input type="checkbox"/>	Replace
20	0	16.931	0	0	16.931	new	<input type="checkbox"/>	Replace
21	0	16.765	0	0	16.765	new	<input type="checkbox"/>	Replace
22	0	16.662	0	0	16.662	new	<input type="checkbox"/>	Replace
23	0	16.478	0	0	16.478	new	<input type="checkbox"/>	Replace
24	0	12.749	0	0	12.749	new	<input type="checkbox"/>	Replace
25	0	12.396	0	0	12.396	new	<input type="checkbox"/>	Replace
26	0	12.32	0	0	12.32	new	<input type="checkbox"/>	Replace

Previous | Next | Finished - Import Data | Cancel

Figura 4.2.46 : Ventana de Import Geometry Data para el modelo unidimensional en HEC – RAS.
Fuente: Software HEC-RAS.

Las secciones transversales fueron generadas como se describió en la sección 4.2.1.1, permitiendo visualizar con detalle tanto la zona de cauce como la zona de planicie de inundación. Las secciones ofrecen una representación precisa de la geometría del río, destacando las variaciones en las cotas altimétricas entre las áreas más elevadas y las más bajas.

La primera sección, ubicada aguas arriba, presenta cotas que oscilan entre los 1135 m y 1170 m, reflejando un cauce con una pendiente significativa y márgenes laterales claramente diferenciadas.

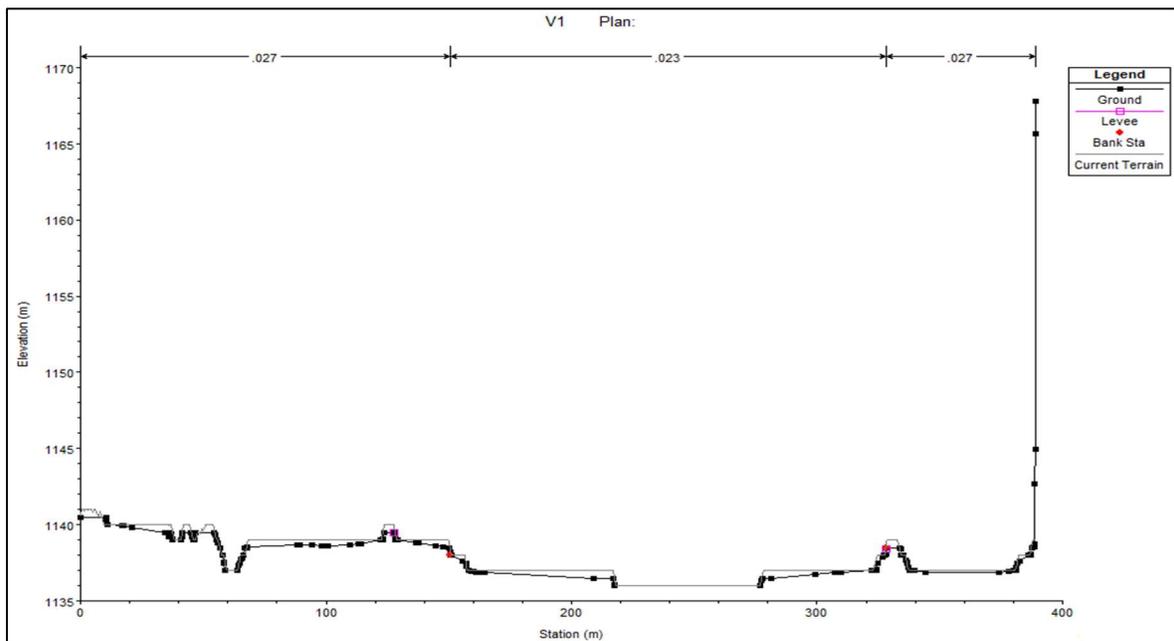


Figura 4.2.47 : Sección de la topografía de aguas arriba. Fuente: Software HEC-RAS.

Por otro lado, la sección más baja del modelo, con cotas que varían entre los 1115 m y 1123 m, muestra una morfología más suave.

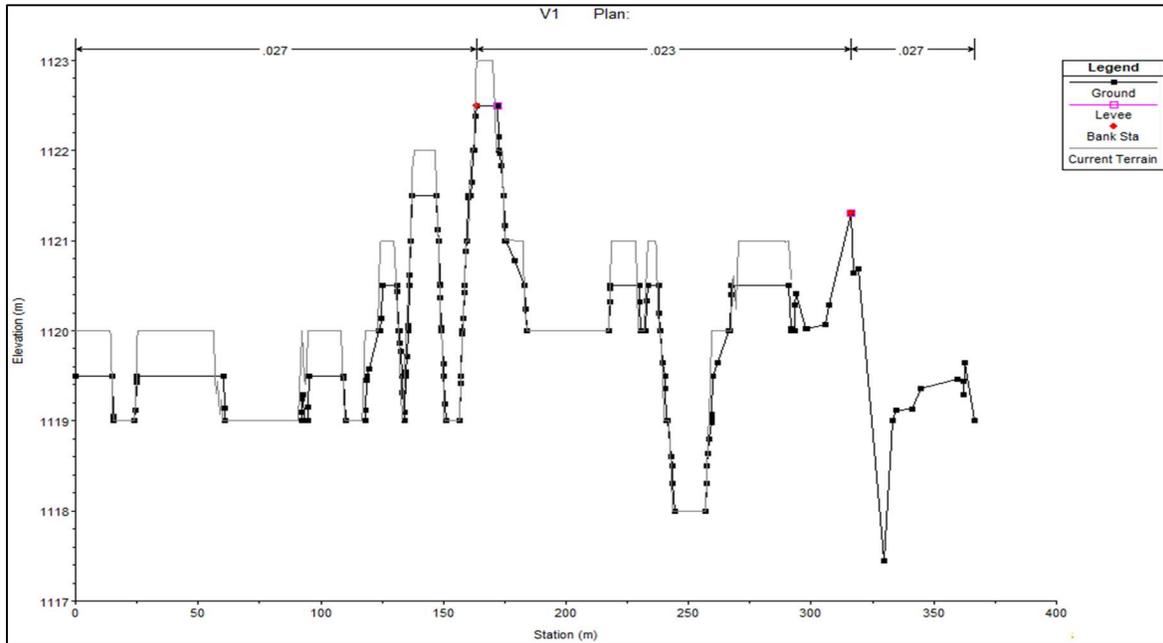


Figura 4.2.48 : Sección de la topografía de aguas abajo. Fuente: Software HEC-RAS

4.2.1.2.3.1 Datos necesarios ingresar en las secciones transversales para la modelación unidimensional HEC-RAS.

Una vez importada la geometría de las secciones transversales fue necesario realizar las siguientes actividades en las mismas:

a) Definición de los bancos izquierdos y derechos de las secciones de geometría en HEC-RAS

Se procedió a definir manualmente los límites de los bancos izquierdos y derechos del cauce del río, en la zona de estudio, para cada uno de los bancos. Esta actividad se realizó manualmente para cada una de las secciones. Estos bancos vienen representados con los círculos color rojo identificados en el software HEC-RAS como “**Bank Stations**”

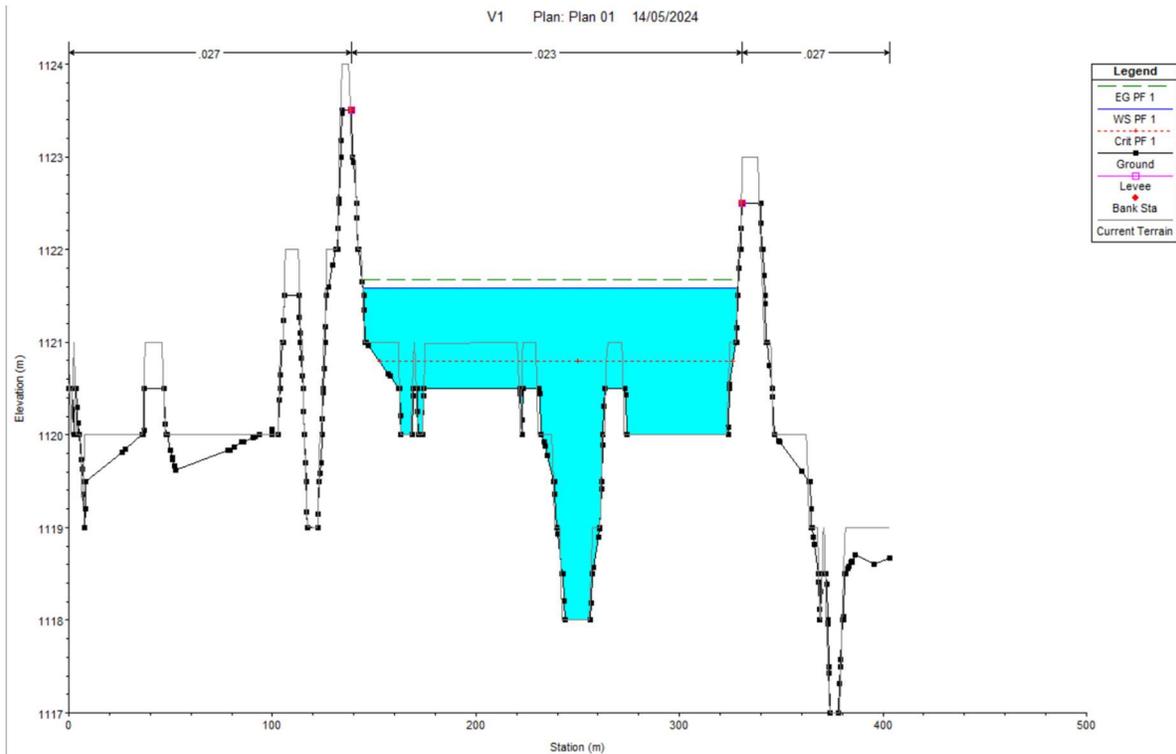


Figura 4.2.49 : Definición de los bancos izquierdos y derechos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS

b) Distancia hasta la siguiente sección transversal

Se definen las distancias de una sección dada hasta la próxima inmediatas **aguas abajo**. En la presente investigación, se definió esta distancia de separación cada 100 m. Naturalmente si señalamos los tres valores equivalentes, los dos perfiles transversales y los dos perfiles transversales aparecerán paralelos sucesivos.

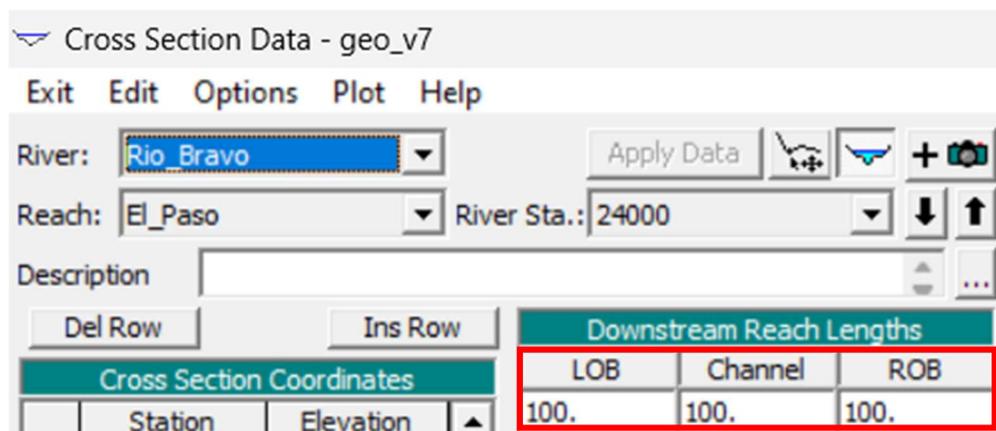


Figura 4.2.50 : Distancia de separación definidas para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.

c) Coeficiente de contracción-expansión

De acuerdo con HEC-RAS (2024) el software utiliza los coeficientes de contracción y expansión para determinar las pérdidas de energía entre dos secciones contiguas. Los valores recomendables son de 0.1 (contracción) y 0.3 (expansión).

d) Coeficiente de Rugosidad Manning

Se emplearon valores del coeficiente de rugosidad de Manning, los cuales se asignaron a cada tramo del río en función de las características del cauce y la vegetación circundante. Las rugosidades variaron en función de la presencia de sedimentos, gravas y vegetación en las márgenes del río como se explicó en la sección 2.5.2.10.1 (Chow & Maidment, 1998).

De acuerdo con (Chow & Maidment, 1998) para estimar la rugosidad de Manning, se debe realizar el proceso de calibración, el consiste en tener una medida de tirante o extensión de agua, la cual no se ha encontrado la información a detalle, solamente noticias que mencionan que en las zonas de planicie se llegó.

En este análisis del modelo hidráulico, no se contó con mediciones directas de tirantes ni velocidades, y tampoco se dispuso de ortofotos del área de desborde. Esta falta de datos de referencia imposibilitó la calibración precisa del modelo hidráulico. Para obtener resultados aproximados, se asignó un valor de rugosidad de Manning de 0.035 en el cauce del río y 0.045 en las riberas (Chow & Maidment, 1998).

Tabla 4.2.10 : Asignación de Rugosidad de Manning para la modelación 1D. Fuente: Elaboración propia

Superficie o Material	Coeficiente de Manning (n)
Ríos	
Lecho de grava gruesa o piedras pequeñas	0.035
Planicie	
Vegetación con poca densidad	0.045

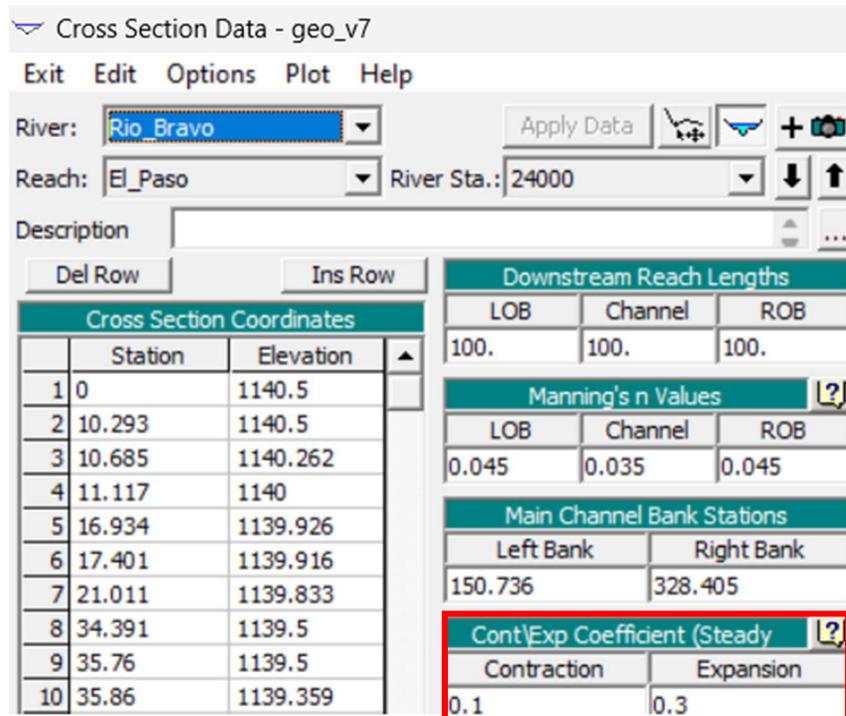


Figura 4.2.51: Coeficientes de expansión-contracción definidos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS

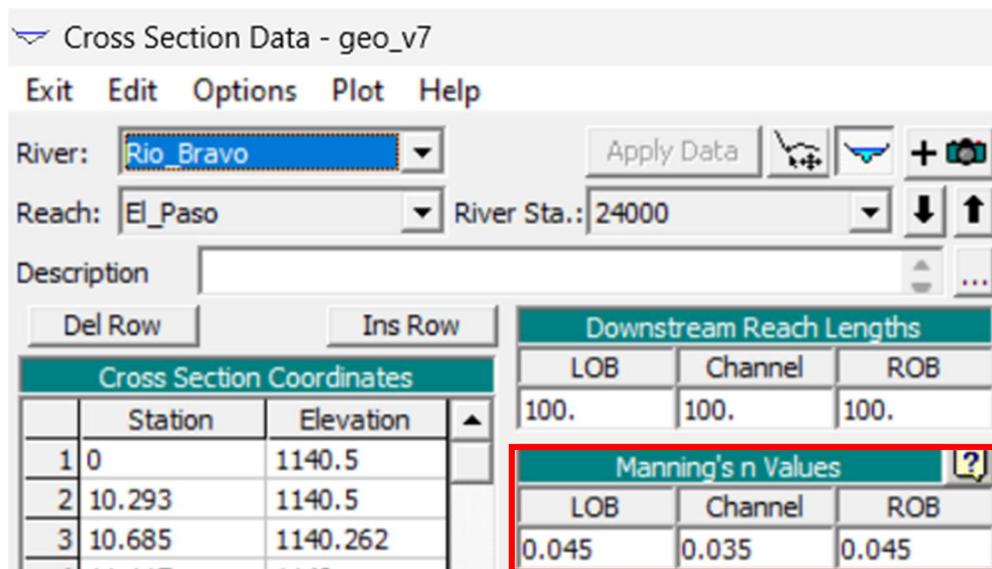


Figura 4.2.52 : Coeficientes de Rugosidad Manning definidos para cada una de las secciones transversales del cauce del Rio Bravo en la zona de estudio. Fuente: Software HEC-RAS.

4.2.1.3 Ingresar datos de flujo y condiciones de borde

4.2.1.3.1.1 Ingresar datos de flujo.

Para ingresar los datos de flujo de la modelación unidimensional se procedió a ingresar el gasto calculado para el evento que se presentó en Juárez en el año 2006, como se definió en la sección 4.1. El procedimiento para ingresar los datos de flujo es a través del menú **File** en la sección de **Geometric Data**, posteriormente se seleccionó la opción de **Import Geometry Data + CSV (Comma Separated Value) Format**.

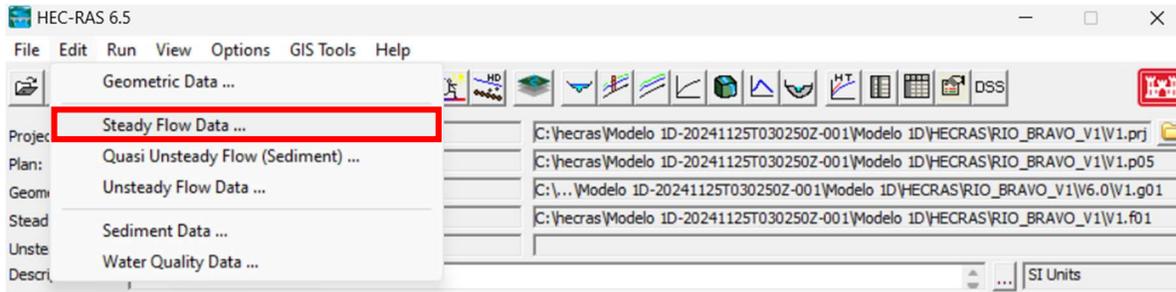


Figura 4.2.53 : Ingreso del gasto para el evento del año 2006. Fuente: Software HEC-RAS.

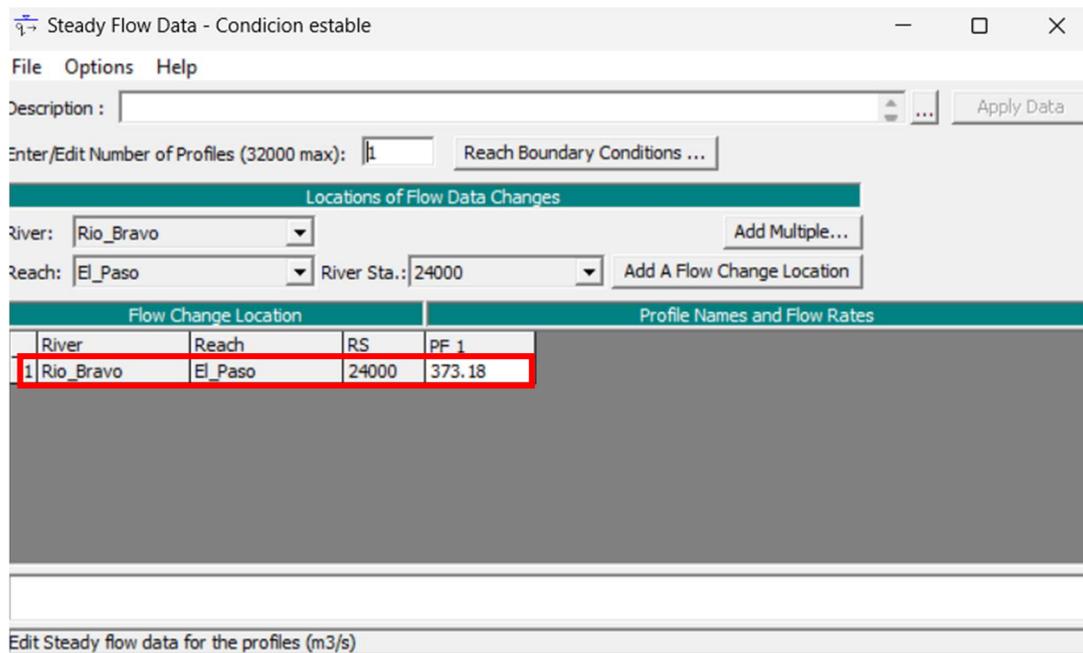


Figura 4.2.54 : Ingreso del gasto para el evento del año 2006. Fuente: Software HEC-RAS.

4.2.1.3.1.2 Ingresar condiciones de frontera.

De acuerdo con HEC-RAS (2024) es necesario ingresar especificar las "condiciones de contorno" (Reach Boundary Conditions), seleccionando en el botón Conditions Boundary Reach; en la misma ventana donde alimentamos los datos de flujos descritos en la sección anterior.

En la ventana que se muestra a continuación, el software HEC – RAS requiere de ciertos datos para determinar el nivel del agua inicial en ambos extremos de la sección del tramo del río: aguas arriba y/o aguas abajo. En un régimen subcrítico, únicamente se realiza necesita en la orilla de aguas abajo; en el régimen supercrítico solo requiere aguas arriba, y si se estimará en un sistema mixto requeriría en ambos extremos del segmento.

Según los botones que se presentan, existen cuatro opciones (HEC-RAS,2024):

a) **Alturas de la superficie de agua conocidas (Known W.S.):**

En este caso es necesario alimentar la altura del tirante de agua para cada uno de los perfiles que se van a estimar.

b) **Profundidad Crítica (Critical Depth):**

En este escenario, no es necesario ingresar ningún parámetro de entrada; el software estimara la profundidad crítica para ambos perfiles y la ligara como condición de contorno.

c) **Profundidad Normal (Normal Depth):**

En esta situación, se debe ingresar la pendiente de la línea de energía que se utilizará para calcular la profundidad normal en ese punto (ecuación de Manning). Si se desconoce este parámetro, se puede remplazar por la pendiente del cauce o la pendiente del fondo del cauce.

d) **Curva de gastos (Rating Curve):**

Este caso requiere de una serie de parejas de valores nivel – caudal.

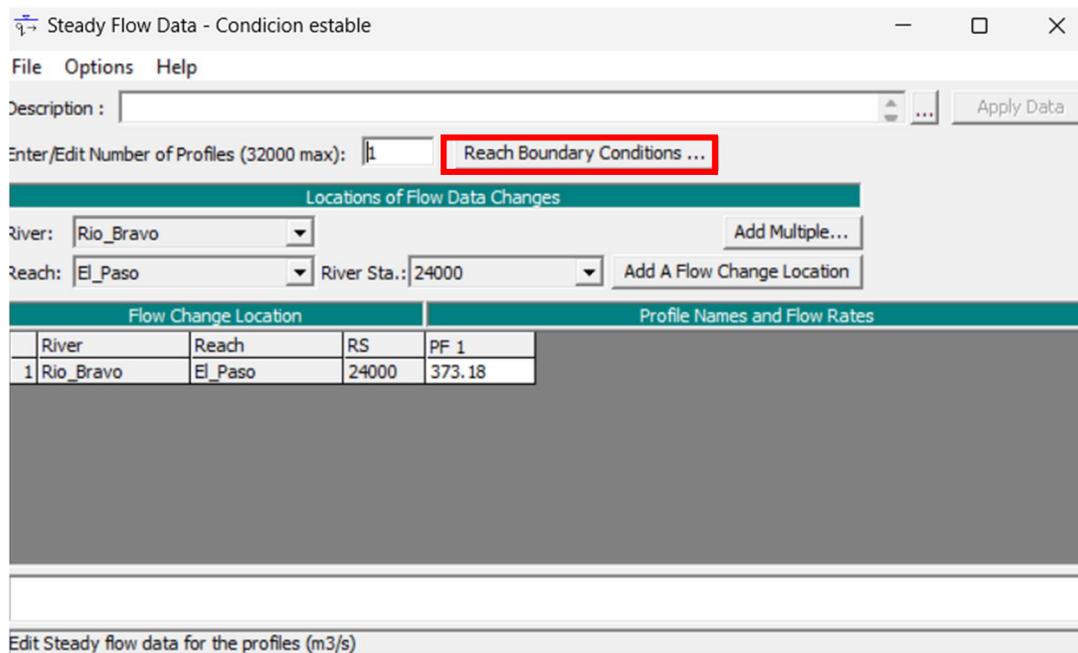


Figura 4.2.55 : Ingreso de condiciones de frontera. Fuente: Software HEC-RAS.

En la presente investigación se selecciona la opción de normal Depth y se ingresó el valor de la pendiente del cauce en la zona de estudio, tal como se calculó en la sección 4.2.1.1.5.

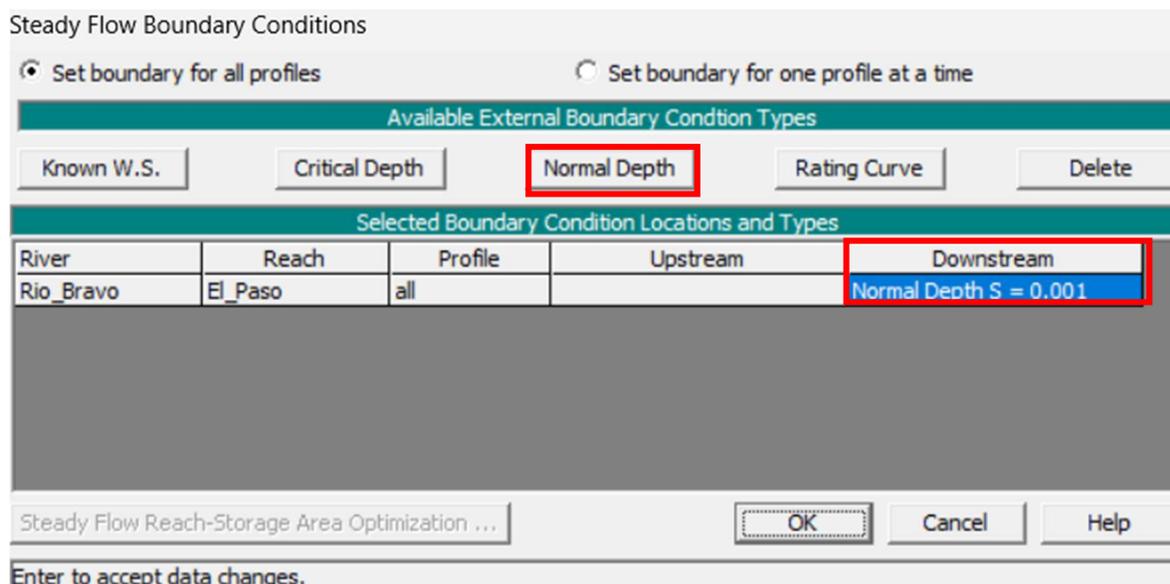


Figura 4.2.56 : Ingreso de condiciones de frontera. Fuente: Software HEC-RAS.

4.2.1.4 Ejecución de cálculos hidráulicos

Una vez definidos los parámetros de entrada geométricos e hidráulicos (descritos en las secciones anteriores); ya es posible realizar la simulación unidimensional.

Para realizar los cálculos es necesario seleccionar en la ventana principal del software HEC-RAS el menú **Run + Steady Flow Analysis**. Para llevar a cabo la modelación se requiere la creación de un **Plan** que integre tantos los parámetros geométricos como hidráulicos descritos en las secciones anteriores.

Para dar de alta un Plan se requiere seleccionar la opción de **New Plan** que se encuentra en el menú File de la pestaña de **Steady Flow Analysis**, descrito en la sección anterior, se requiere asignarle un nombre; así como también seleccionar los respectivos archivos de datos geométricos como hidráulicos creados en la sección anterior, en la presente investigación se escogió la opción de **Subcritical**.

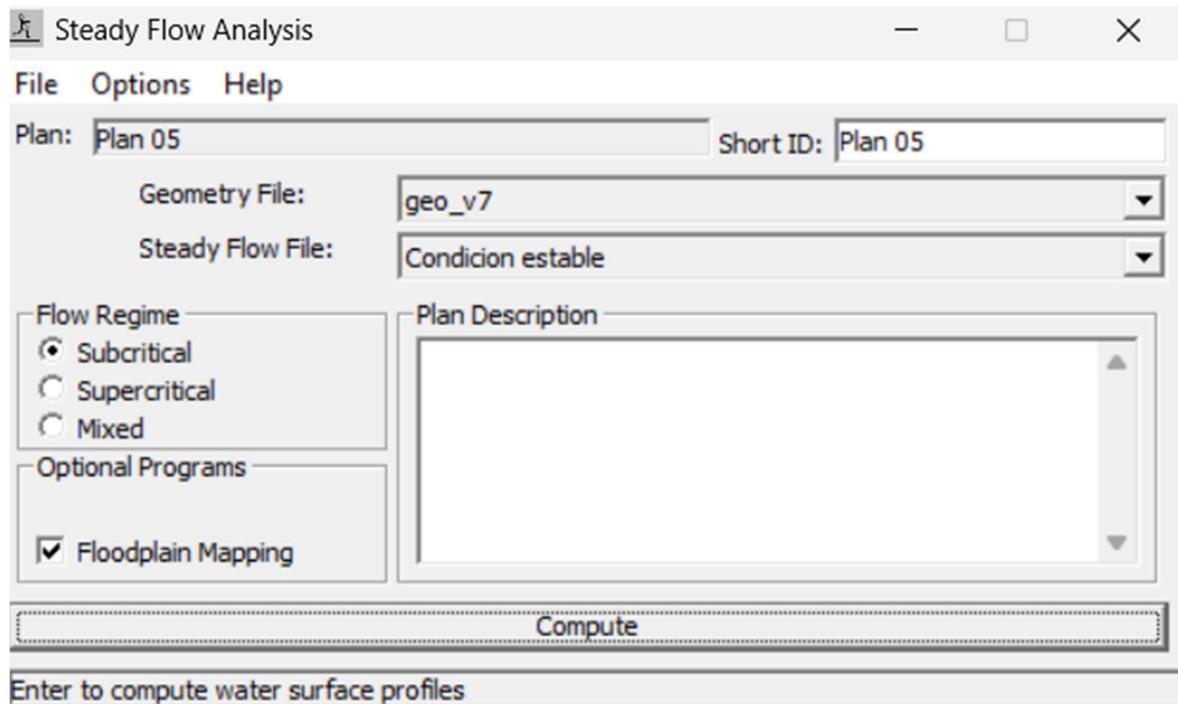


Figura 4.2.57 : Análisis de flujo permanente .Fuente: Software HEC-RAS.

La modelación hidráulica unidimensional se ejecuta una vez que se oprime el botón **Compute**, al hacerlo aparece una ventana como al que se muestra a continuación:

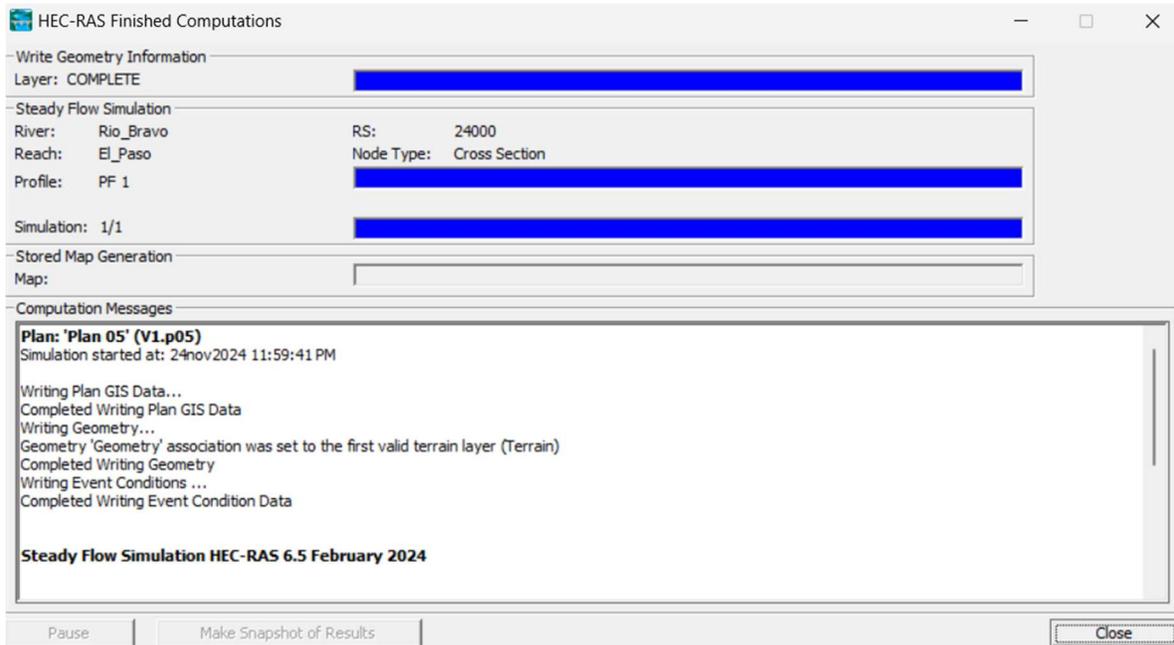


Figura 4.2.58 : Ventana de progreso de modelación unidimensional. Fuente: Software HEC-RAS.

4.2.2 Modelación Bidimensional

De manera análoga para llevar a cabo la modelación hidráulica bidimensional con el software HEC-RAS (Versión 6.5), se tuvo que llevar a cabo una serie de pasos, para ir generando secuencialmente una serie de insumos que definieron la geometría, las condiciones de frontera en la zona de estudio. Para llevar a cabo la modelación hidráulica bidimensional se llevaron las siguientes actividades:

- Creación de la capa de terreno en la zona de estudio
- Elaboración de la malla de cálculo de la zona de estudio
- Generar la malla de rugosidad de la zona de estudio
- Ingresar datos de flujo y condiciones de frontera
- Ejecutar cálculos hidráulicos

4.2.2.1 Elaboración de la capa de terreno de la zona de estudio

4.2.2.1.1 Georreferenciado del modelo digital de elevación (MDT) en la zona de estudio

En versiones anteriores, HEC-RAS requería herramientas externas como HEC-GeoRAS para trabajar con la geometría del cauce y la trayectoria del flujo. Sin embargo, a partir de la versión 5.0.4, y más específicamente en la versión 6.3.1, HEC-RAS permite realizar todo el trabajo directamente dentro del software. Esto incluye la manipulación de la geometría de la zona de estudio en el modelo digital del terreno (MDT), facilitando la edición de áreas en

dos dimensiones, la construcción de áreas de almacenamiento, la asignación de valores de Manning, entre otras tareas (HEC-RAS, 2024).

Para procesar la geometría en la zona de estudio, se utilizó el modelo digital de elevación declarado en la sección 3.4. El mismo tiene una resolución espacial de 1 metro; posteriormente, se ingresó a la pestaña de RAS Mapper de HEC-RAS 6.5, para ejecutar los pasos previos de la modelación bidimensional donde se ingresó un archivo de extensión *prj* (ESRI projection file) georreferenciado para la zona de interés.

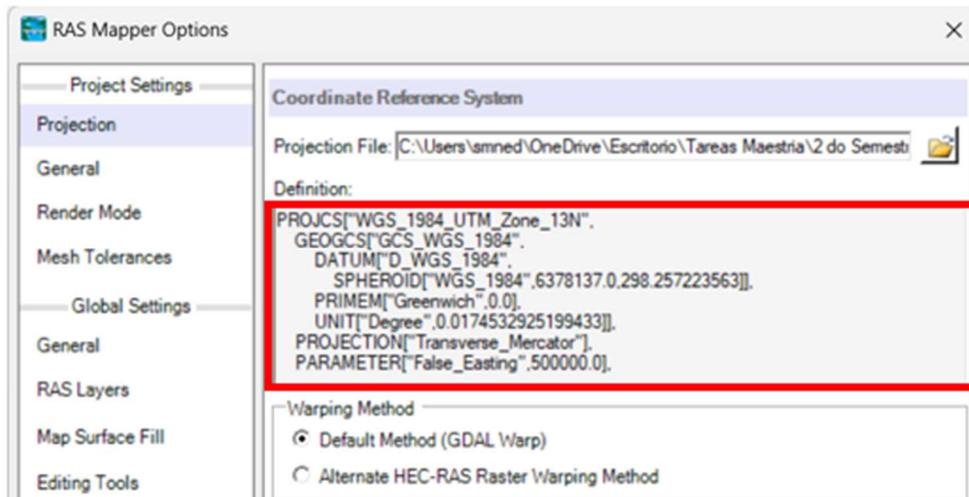
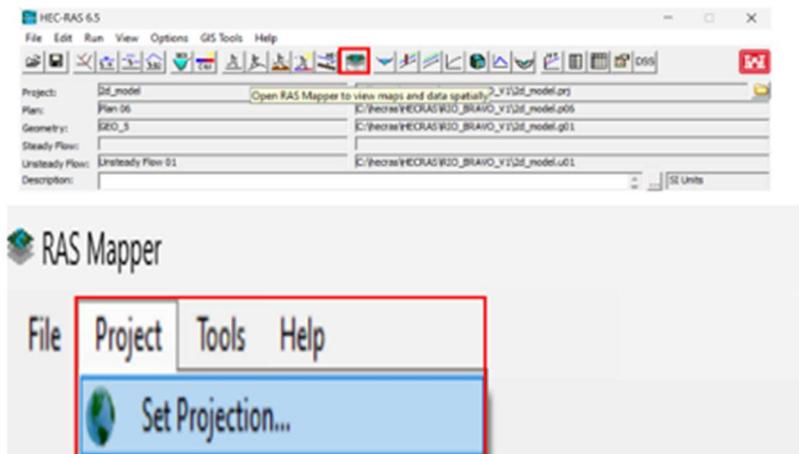


Figura 4.2.59 : Georreferenciación del MDT en la zona de estudio Fuente: Software HEC-RAS.

4.2.2.1.2 Importación de la capa de terreno en la zona de estudio

Posteriormente, se creó la malla de superficie en RAS Mapper, mediante la opción de *Create New RAS Terrain* y en la venta emergente se ingresó la malla de superficie en formato TIF.

Una vez validado el ráster dentro de HEC-RAS, se procede a su importación para continuar con el análisis, tal como se muestra en la Figura, en el contexto del Río Bravo en México.

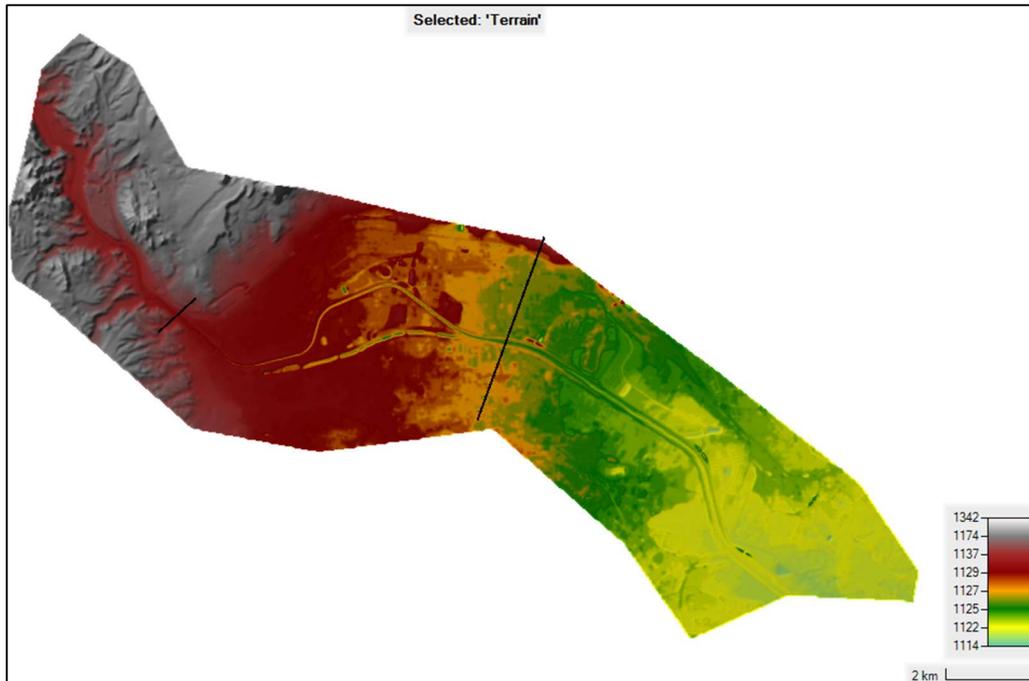


Figura 4.2.60 : Capa ráster importada en RAS MAPPER. Fuente Software HEC-RAS.

4.2.2.2 Elaboración de la capa de malla 2D

Para la creación de la malla 2D se procedió a utilizar la herramienta *Geometric Data*, se realizaron las siguientes actividades (HEC-RAS, 2024).

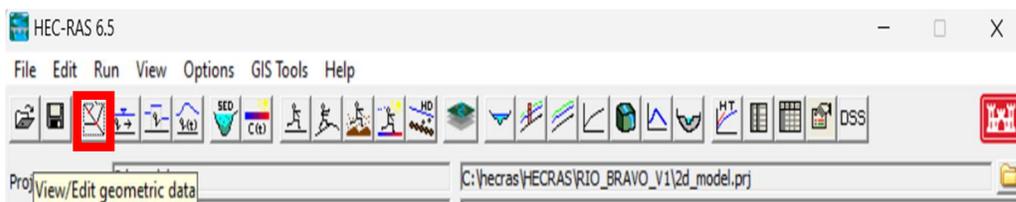


Figura 4.2.61 : Creación de Malla 2D en Geometric Data. Fuente Software HEC-RAS.

- Primer paso, se utilizó la herramienta *2D Flow Area* para delimitar el área donde se llevó a cabo la modelación. Es importante aclarar que en este paso no se realizó ninguna configuración de los parámetros de la creación de la malla 2D.
- Segundo paso, mediante la herramienta *2D Area Breaklines*, se definió el margen izquierdo y derecho respectivamente.
- Finalmente, con la opción *SA/2D Area BC Lines* se definieron las condiciones de contorno, que se representaron mediante una polinia tanto la entrada como la salida de flujo respectivamente.

Una vez que se haya construido el polígono que contiene la malla, automáticamente se generará un conjunto de celdas, cuyos lados pueden variar entre 3 y 8. No obstante, si es necesario, estas celdas pueden ser modificadas para ajustar el mallado de manera más precisa en puntos de interés, tal como se muestra en la Figura. Esto permite una mayor flexibilidad y precisión en la representación del terreno y en la realización de cálculos hidráulicos en áreas críticas. Por lo tanto, regresando al primer paso, se seleccionó el área delimitada donde se llevará a cabo la modelación bidimensional y se seleccionó la opción de *Edit 2D Flow Area*, para especificar el tamaño de celda; el tamaño de celda se ingresó con la opción *Generate Computational Points on Regular Interval with all Breaklines* y predeterminadamente se seleccionó un tamaño de celda de 20 metros (En la sección de resultados se presenta un análisis de sensibilidad para analizar los efectos de la modelación al variar el tamaño de las celdas). Así mismo, en esta parte es importante asegurarse de seleccionar la opción *Edit Land Cover to Manning's* con el objetivo que los valores que se ingresaron de rugosidad sean importados correctamente (ver sección 4.2.2.3) además para aquellas celdas que no tengan información HEC-RAS asumirá un valor de 0.06.

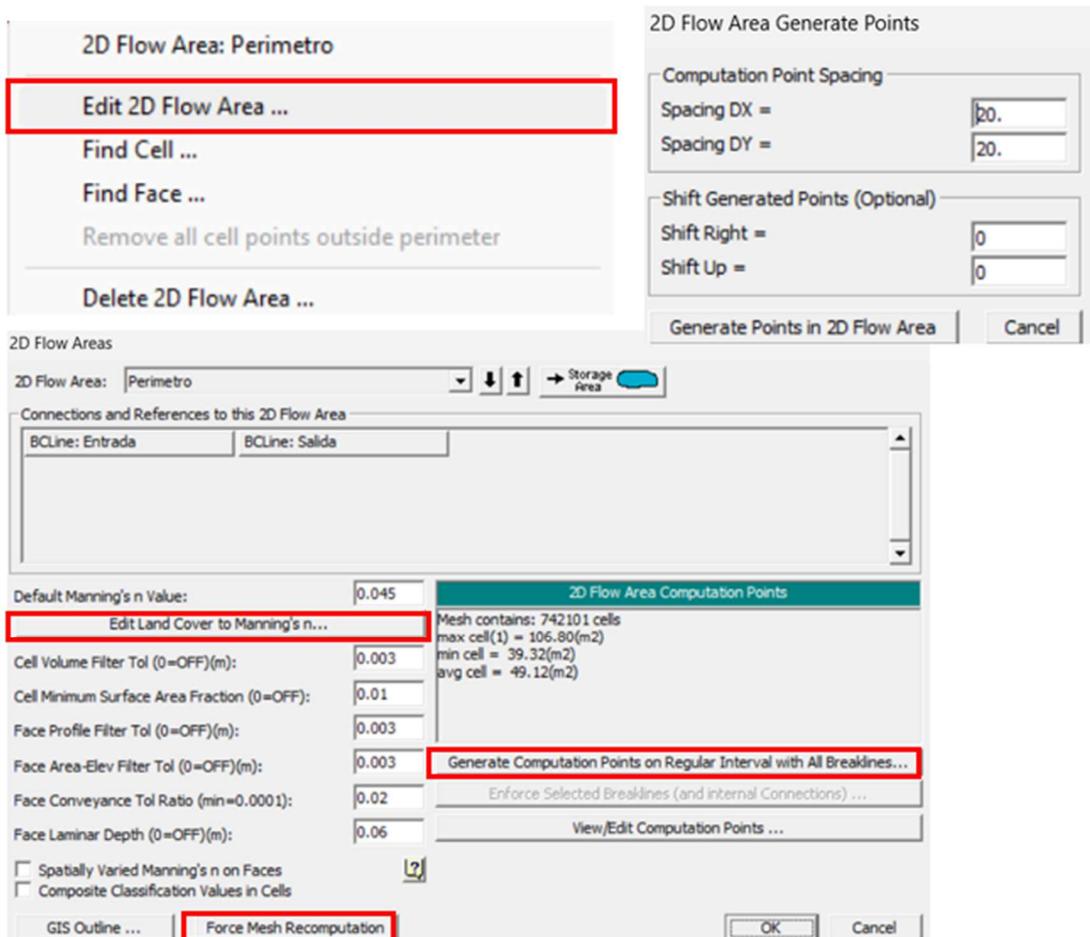


Figura 4.2.62 : Establecimiento de los parámetros para la creación de la malla 2D. Fuente Software HEC-RAS.

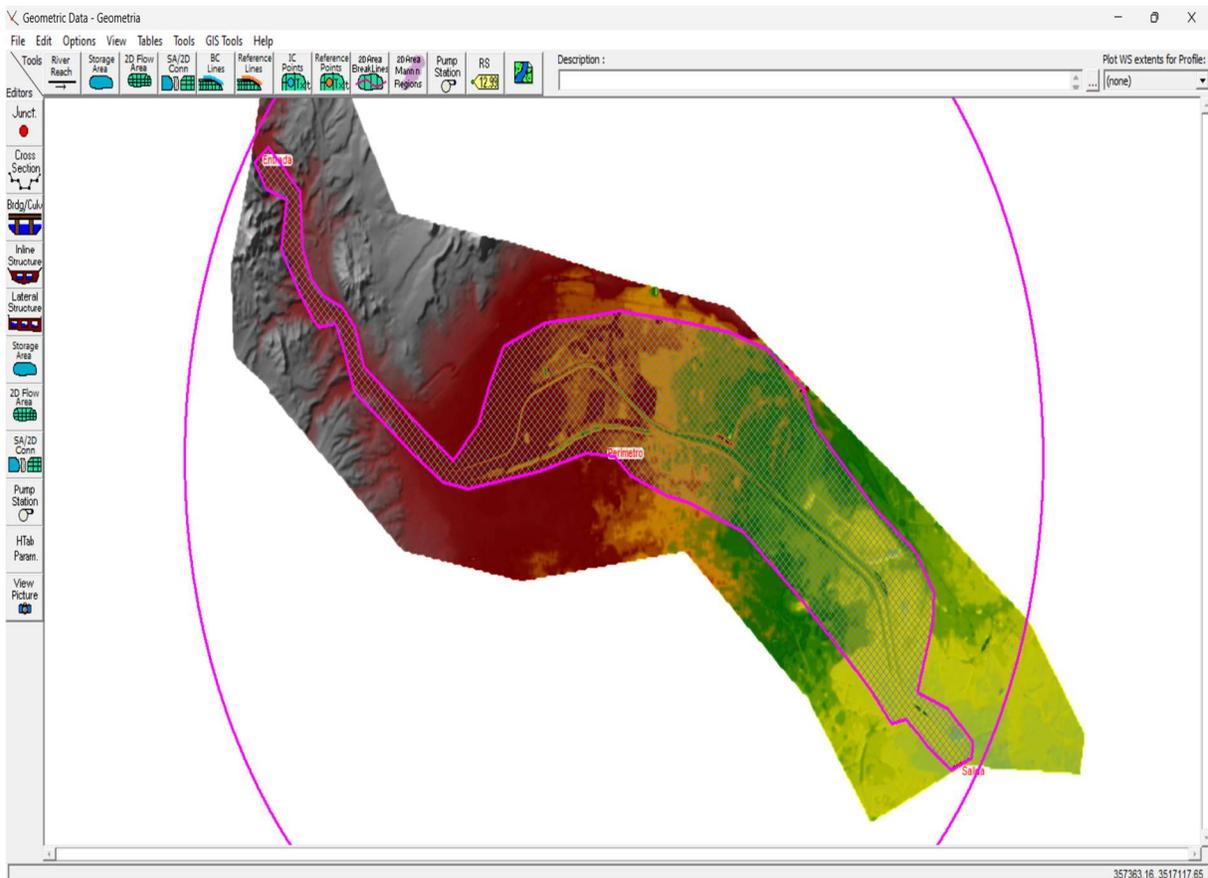


Figura 4.2.63 : Capa de Malla 2D elaborada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.

4.2.2.3 Asignación de los parámetros de flujo no permanente para la modelación bidimensional

El siguiente paso consiste en ingresar los de flujo no permanente, para realizar estación se ingresó a la ventana de *Unsteady Flow*, tal como se muestra en la siguiente figura, donde se pueden apreciar las condiciones de entrada y salida del flujo. Para la condición de entrada se utilizó la opción de *Flow Hydrograph* mientras que para la condición de salida se seleccionó la opción de *Normal Depth*.

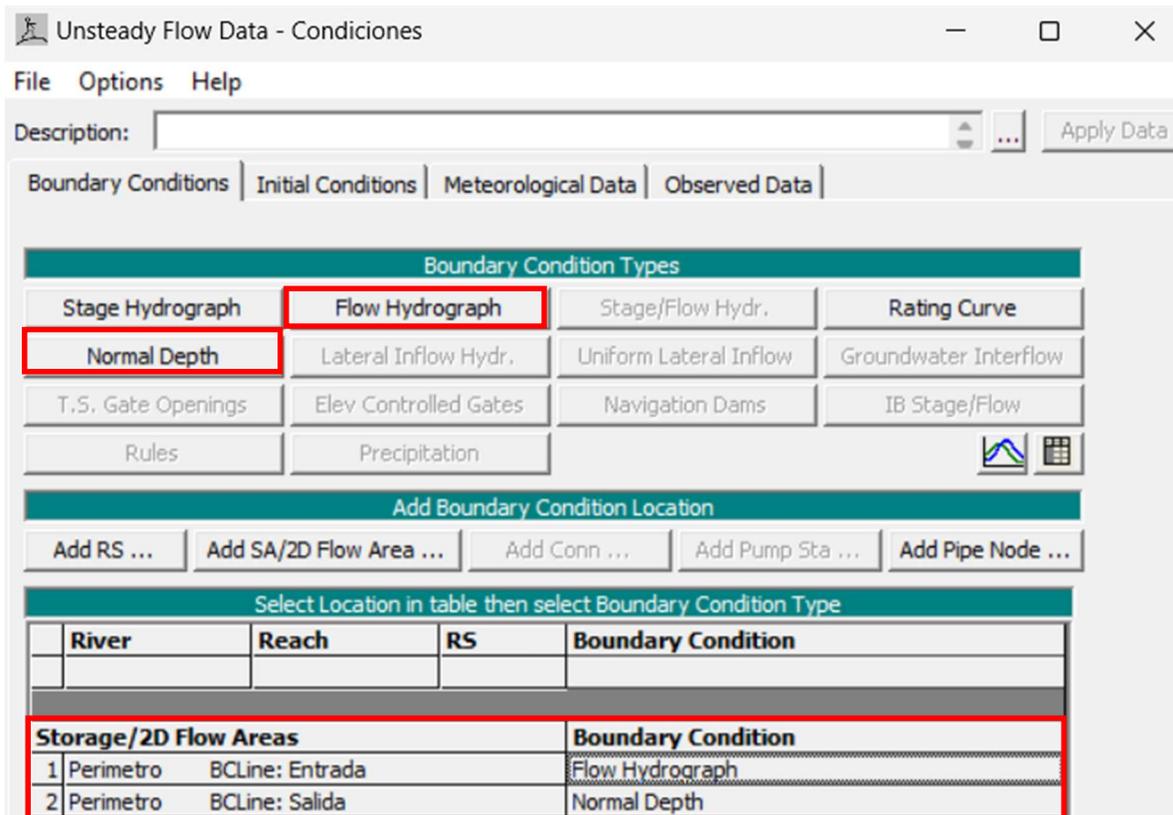


Figura 4.2.64 : Asignación de parámetros hidráulicos para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.

4.2.2.3.1 Condición de frontera de entrada

En la condición de frontera de entrada se alimentó el hidrograma durante el evento de lluvia extraordinaria del evento del 2006 (Ver sección 3.2) y un valor de 0.001 m/m para la pendiente de entrada.

4.2.2.3.2 Condición de frontera de salida

Para la condición de frontera de salida como se mencionó anteriormente se seleccionó la opción del tirante normal cuyo valor corresponde a la pendiente de salida de 0.001 m/m.

Flow Hydrograph

2D: Perimetro BCLine: Entrada

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 10 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 18AUG2024 Time: 0000

Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	17ago2024 2400	0:00:00	0
2	18ago2024 0010	0:10:00	12.633
3	18ago2024 0020	0:20:00	25.267
4	18ago2024 0030	0:30:00	37.9
5	18ago2024 0040	0:40:00	50.533
6	18ago2024 0050	0:50:00	63.167
7	18ago2024 0100	1:00:00	75.8
8	18ago2024 0110	1:10:00	88.433
9	18ago2024 0120	1:20:00	101.067
10	18ago2024 0130	1:30:00	113.7
11	18ago2024 0140	1:40:00	126.333
12	18ago2024 0150	1:50:00	138.967
13	18ago2024 0200	2:00:00	151.6
14	18ago2024 0210	2:10:00	164.233
15	18ago2024 0220	2:20:00	176.867

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.01 TW C

Figura 4.2.65 : Condición de entrada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.

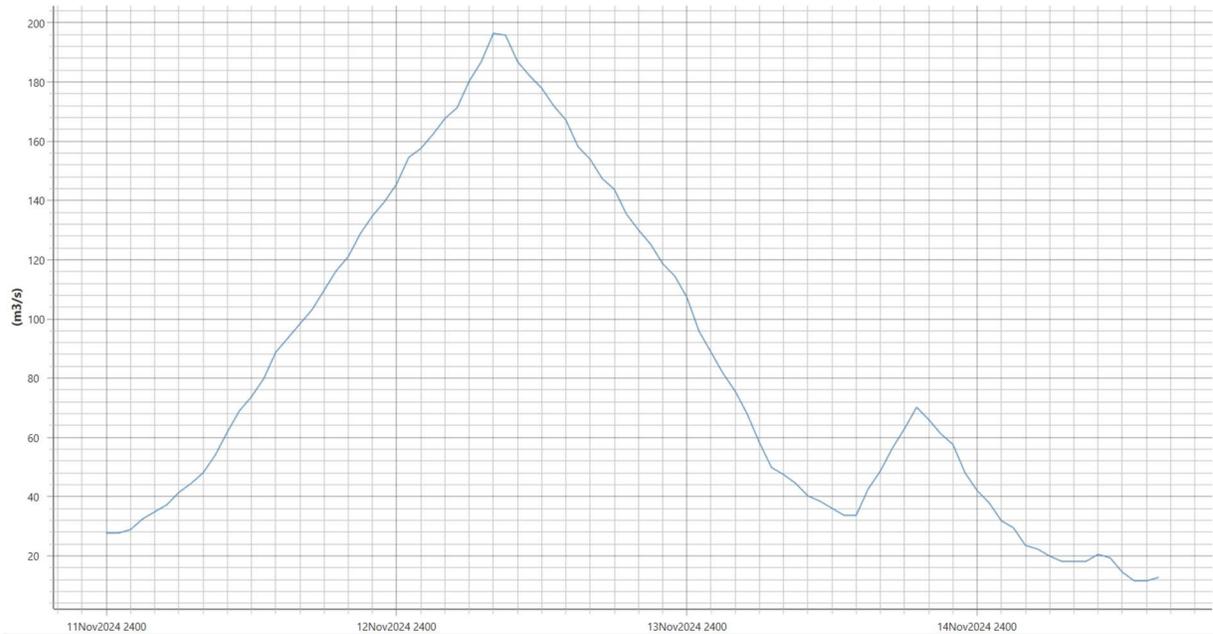


Figura 4.2.66 : Hidrograma de entrada para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS.

Normal Depth Downstream Boundary

2D: 2D BCLine: SALIDA

Friction Slope:

2D Flow Area Boundary Condition Parameters

Compute separate water surface elevation per face along BC Line

Compute single water surface for entire BC Line

OK Cancel

Figura 4.2.67 : Condición de salida para la modelación bidimensional. Fuente Software HEC-RAS

4.2.2.4 Corrida de la modelación bidimensional en HEC-RAS

4.2.2.4.1 Creación de análisis de flujo no permanente

Para crear una corrida de análisis de flujo no permanente se ingresó al menú *Run* y posteriormente se seleccionó la opción *Unsteady Flow Analysis*. Dentro de esta ventana se seleccionó un intervalo de cálculo de modelación de 5 segundos y un intervalo e hidrograma de 10 minutos.

4.2.2.4.2 Opciones de Calculo y Tolerancias

Se ingresó a la ventana de calculation option and tolerance y se seleccionó el tipo de ecuación hidráulica full Momentum, dado que esta ecuación se e utiliza para flujos rápidamente variados y régimen de flujos mixtos como saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y confluencia de ríos; adicionalmente, se eligió un máximo de 30 interacciones (HEC-RAS, 2024).

Geometry File: Geometria

Unsteady Flow File: Condiciones

Programs to Run

- Geometry Preprocessor
- Unsteady Flow Simulation
- Sediment
- Post Processor
- Floodplain Mapping

Plan Description

Simulation Time Window

Starting Date: 01AUG2024

Ending Date: 05AUG2024

Starting Time: 0000

Ending Time: 0000

Computation Settings

Computation Interval: 5 Second

Hydrograph Output Interval: 10 Minute

Mapping Output Interval: 10 Minute

Detailed Output Interval: 10 Minute

Project DSS Filename: C:\hecras\HECRAS\Modelo 2D-20241125T030341Z-001\Mod...

Compute

Figura 4.2.68 : Ventana de ejecución del modelo bidimensional de flujo no permanente en HEC-RAS. Fuente Software HEC-RAS.

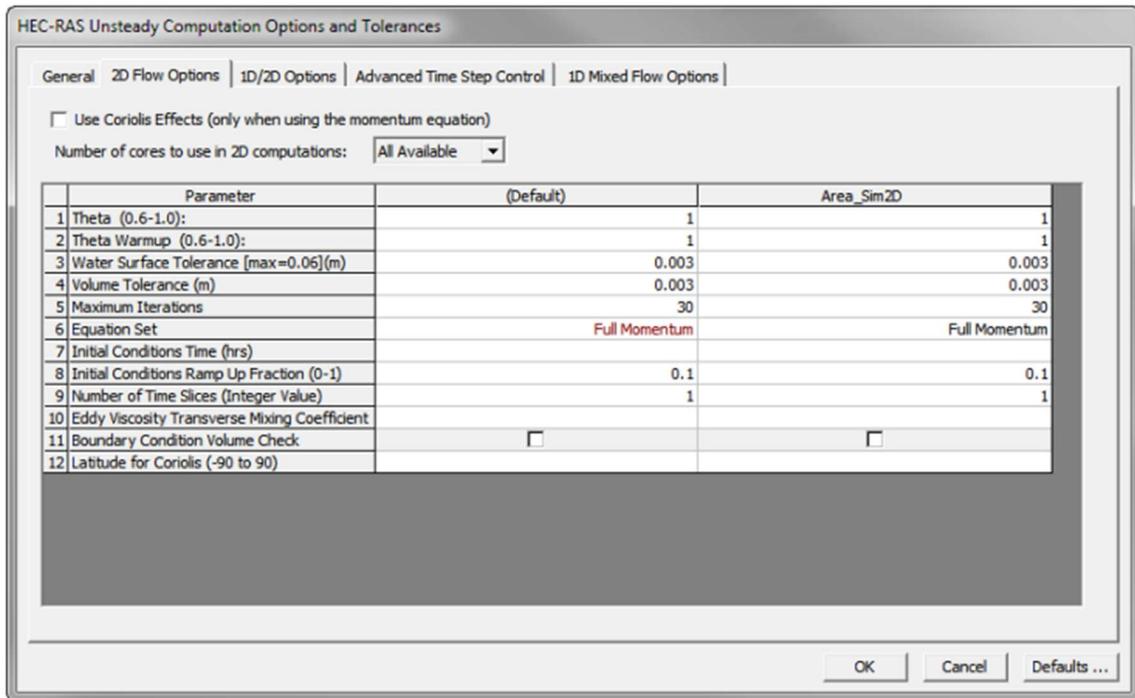


Figura 4.2.69 : Ventana de opciones de cálculos y tolerancia del modelo bidimensional de flujo no permanente en HEC-RAS. Fuente Software HEC-RAS.

Capítulo 5: Resultados

5.1 COMPARACIÓN DE MÁXIMAS AVENIDAS

En esta sección se muestra un comparativo de la estimación de los máximos gastos de avenidas calculados previamente en el capítulo IV por medio del método de Gumbel y Nash, para compararlos con el gasto del evento conocido durante el año 20006.

Tabla 5.1.11 : Comparación de Caudales por el método de Gumbel y Nash m³ / s. Fuente: Elaboración Propia

Periodo de retorno	Comparativo Caudales m ³ /s		
	Gumbel	Nash	Evento 2006
2	59.25	126.30	
5	85.31	156.87	
10	105.03	177.11	
25	131.09	202.68	
50	150.81	221.65	
100	170.53	240.49	
200	190.25	259.25	
250	196.60	265.28	198.21
500	216.31	284.00	

En la siguiente figura se puede observar que el caudal estimado para el periodo de retorno de 250 años (196.6 m³/s) reproduce mejor el evento registrado durante el 2006; asimismo, el factor de correlación de su línea de tendencia es 1.0. Por lo tanto, se utilizará el gasto estimado por medio del método de Gumbel para la modelación hidráulica.

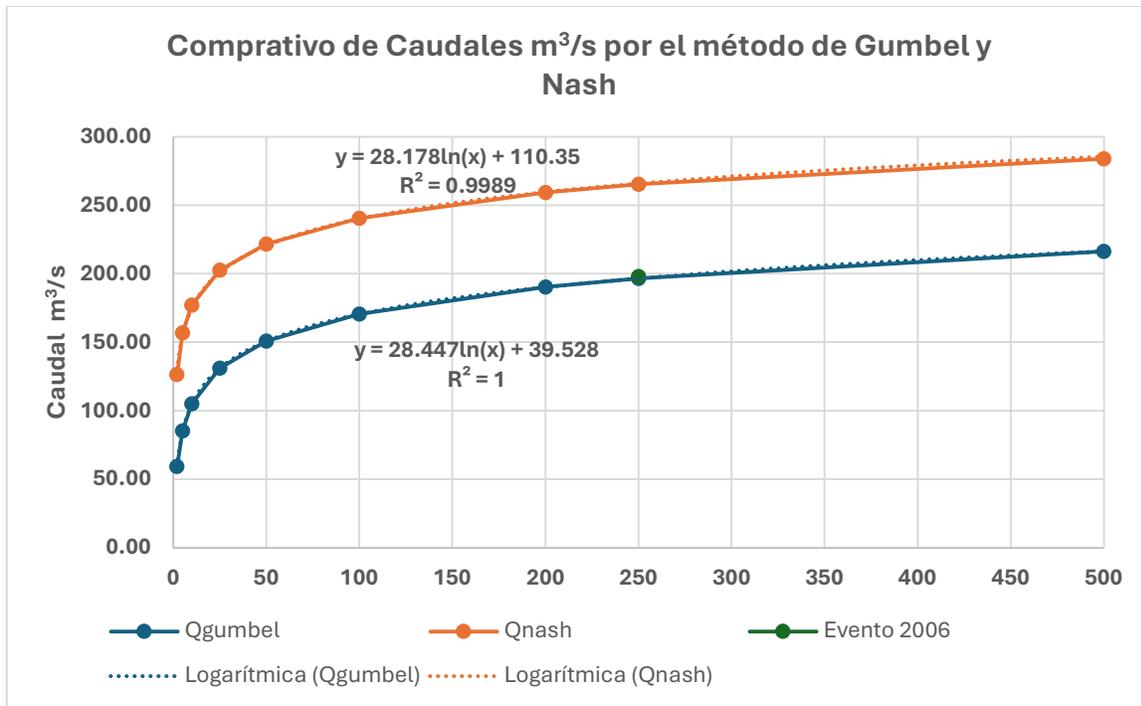


Figura 5.1.70 : Comparación de Caudales (m^3 / s) por el método de Gumbel y Nash y el evento del 2006. Fuente: Elaboración Propia

5.2 MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL

5.2.1 Análisis de Sensibilidad (Rugosidad del Manning) y Resultados de la Modelación unidimensional.

Se emplearon valores del coeficiente de rugosidad de Manning, los cuales se asignaron a cada tramo del río en función de las características del cauce y la vegetación circundante; las rugosidades variaron en función de la presencia de sedimentos, gravas y vegetación en las márgenes del río.

Para estimar la rugosidad de Manning, se debe realizar el proceso de calibración, el cual consta de tener una medida de tirante o extensión de agua, la cual no se ha encontrado la información a detalle, solamente noticias que mencionan que en las zonas de planicie se llegó.

Tabla 5.2.12 : Coeficientes de rugosidad asignados en la modelación bidimensional. Fuente: Elaboración Propia

Superficie o Material	Coficiente de Manning (n)
Ríos	
Lecho de grava gruesa o piedras pequeñas	0.035
Planicie	
Vegetación con poca densidad	0.045

En este análisis del modelo hidráulico, no se contó con mediciones directas de tirantes ni velocidades, y tampoco se dispuso de ortofotos del área de desborde. Esta falta de datos de referencia imposibilitó la calibración precisa del modelo hidráulico. Para obtener resultados aproximados, se asignó un valor de rugosidad de Manning de 0.035 en el cauce del río y 0.045 en las riberas.

Los resultados obtenidos del perfil longitudinal muestran que no hay indicios de remansos producidos por variaciones en las pendientes, lo cual sugiere un flujo gravitacional uniforme a lo largo de todo el cauce. Esto se refleja en una pendiente lineal continua en la dirección del flujo.

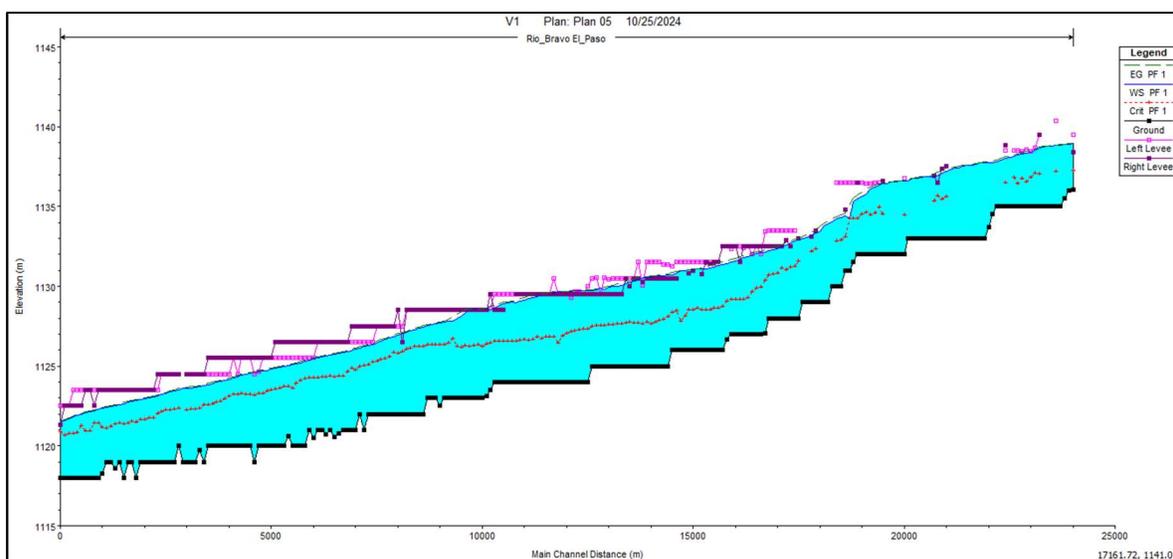
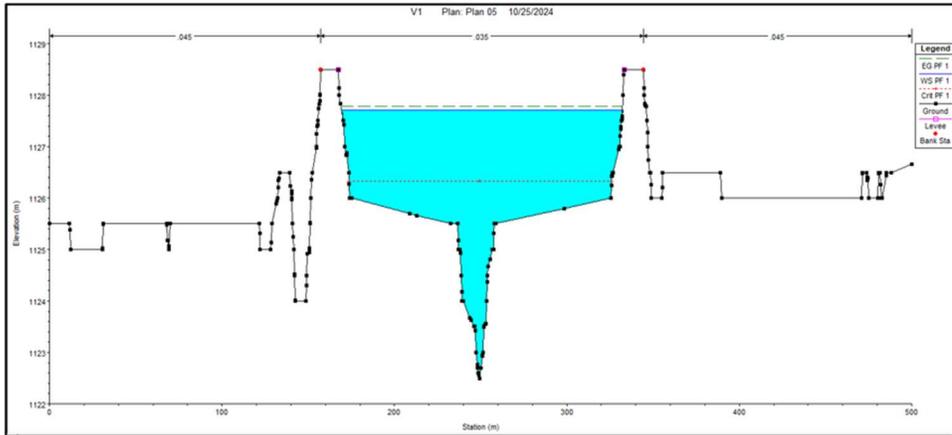


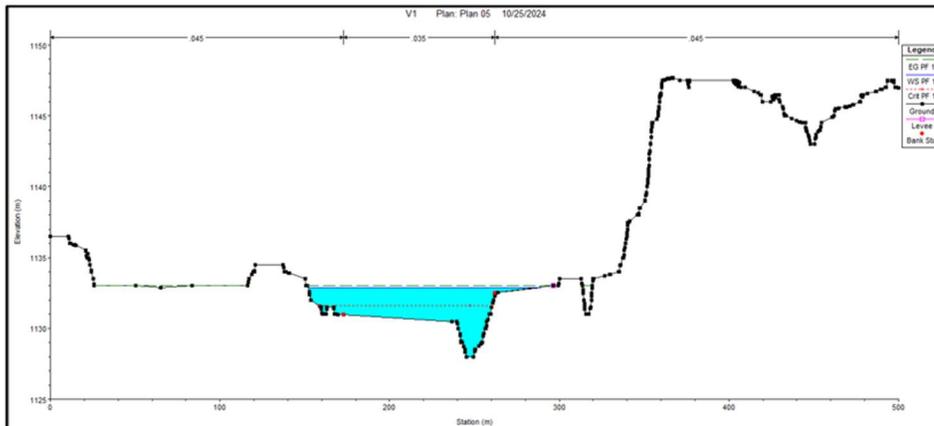
Figura 5.2.71 : Perfil longitudinal del río. Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, al observar la relación entre caudal y nivel de agua, se aprecia un comportamiento lineal, lo cual indica una correspondencia estable entre el caudal y la elevación del nivel de agua, característica de un régimen de flujo bien definido y sin interferencias geomorfológicas significativas. Teniendo como resultados en las 2 secciones a evaluación, lo siguiente.



Plan: Plan 05 Rio Bravo El Paso RS: 17500 Profile: PF 1		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	1133.01	Wt. n-Val.	0.045	0.035	0.045
Vel Head (m)	0.12	Reach Len. (m)	100.00	100.00	100.00
W.S. Elev (m)	1132.89	Flow Area (m2)	29.77	224.39	5.26
Crit W.S. (m)	1131.59	Area (m2)	29.77	224.39	5.26
E.G. Slope (m/m)	0.000889	Flow (m3/s)	24.49	347.52	1.17
Q Total (m3/s)	373.18	Top Width (m)	21.38	89.61	26.82
Top Width (m)	137.80	Avg. Vel. (m/s)	0.82	1.55	0.22
Vel Total (m/s)	1.44	Hydr. Depth (m)	1.39	2.50	0.20
Max Ch Dpth (m)	4.89	Conv. (m3/s)	821.4	11657.0	39.4
Conv. Total (m3/s)	12517.8	Wetted Per. (m)	22.15	91.52	26.82
Length Wtd. (m)	100.00	Shear (N/m2)	11.72	21.37	1.71
Min Ch El (m)	1128.00	Stream Power (N/m s)	9.64	33.09	0.38
Alpha	1.10	Cum Volume (1000 m3)	754.11	4703.41	1315.55
Frctn Loss (m)	0.08	Cum SA (1000 m2)	386.38	2066.22	1068.42
C & E Loss (m)	0.01				

Figura 5.2.72 : Sección 1, aguas arriba. Fuente: HEC-RAS.



Plan: Plan 05 Rio Bravo El Paso RS: 9000 Profile: PF 1		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	1127.78	Wt. n-Val.		0.035	
Vel Head (m)	0.06	Reach Len. (m)	100.00	100.00	100.00
W.S. Elev (m)	1127.72	Flow Area (m2)		348.60	
Crit W.S. (m)	1126.33	Area (m2)		348.60	
E.G. Slope (m/m)	0.000521	Flow (m3/s)		373.18	
Q Total (m3/s)	373.18	Top Width (m)		163.02	
Top Width (m)	163.02	Avg. Vel. (m/s)		1.07	
Vel Total (m/s)	1.07	Hydr. Depth (m)		2.14	
Max Ch Dpth (m)	5.22	Conv. (m3/s)		16351.0	
Conv. Total (m3/s)	16351.0	Wetted Per. (m)		165.73	
Length Wtd. (m)	100.00	Shear (N/m2)		10.74	
Min Ch El (m)	1122.50	Stream Power (N/m s)		11.50	
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m3)	78.42	2961.04	51.94
Frctn Loss (m)	0.05	Cum SA (1000 m2)	33.50	1544.12	31.63
C & E Loss (m)	0.00				

Figura 5.2.73 : Sección 1, aguas abajo. Fuente: HEC-RAS.



Figura 5.2.74 : Representación de desborde del flujo en la modelación 1D. Fuente: HEC-RAS

5.3 MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

5.3.1 Modelación Bidimensional Análisis de Sensibilidad (Mallado y Rugosidad) y Resultados de la Modelación bidimensional.

5.3.1.1 Análisis de Sensibilidad de Mallado

El objetivo de este análisis es identificar cómo los cambios en el tamaño de las celdas afectan el rendimiento y los resultados, para elegir la mejor relación entre el tamaño de la malla y el tiempo de cómputo. Para llevarlo a cabo, se utilizarán dos secciones del área de inundación ficticia del proyecto: una en el parteaguas arriba, donde no se producen desbordes, y otra en la zona donde ocurre el mayor desborde.

Para el análisis hidráulico se consideró inicialmente la posibilidad de reducir el tamaño de la malla a 6 metros con el objetivo de incrementar la precisión en la simulación de tirantes y velocidades. Sin embargo, se constató que el rendimiento del equipo utilizado no permitía la visualización de resultados debido al elevado número de nodos y el tiempo de cálculo excesivo. Por tanto, se optó por una malla de 7 metros, que permite obtener resultados satisfactorios, balanceando precisión y capacidad de procesamiento computacional. Por ello se tiene los escenarios de mallado de: 7 metros, 10 metros, 15 metros, 25 metros y por último 40 metros.

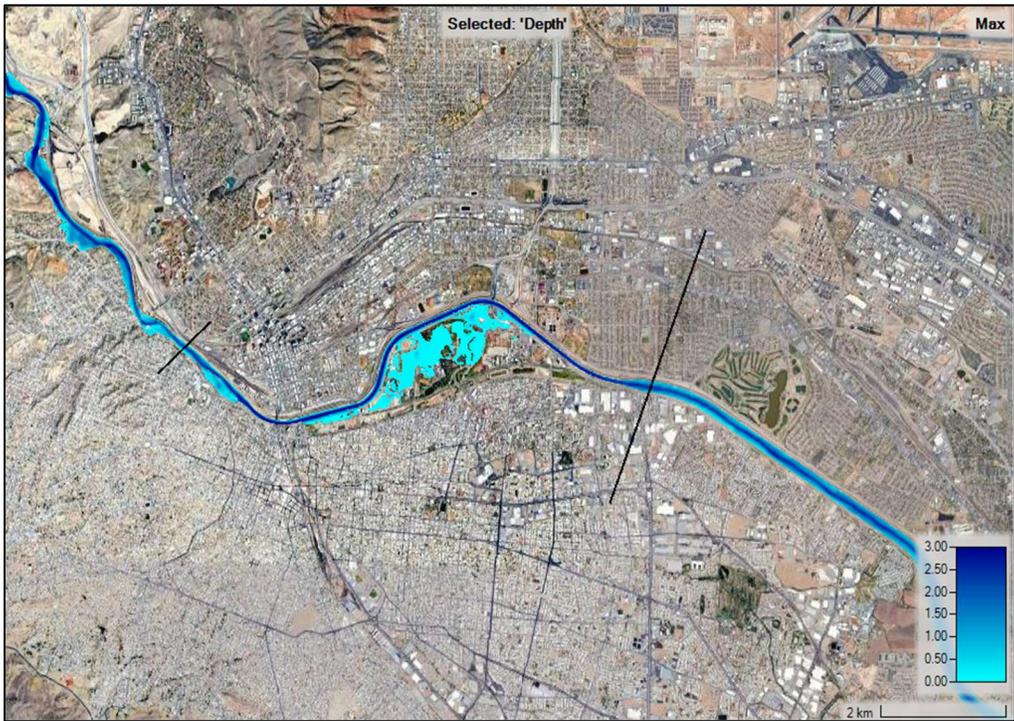


Figura 5.3.75 : Tirantes con un mallado de 7 metros. Fuente: HEC-RAS

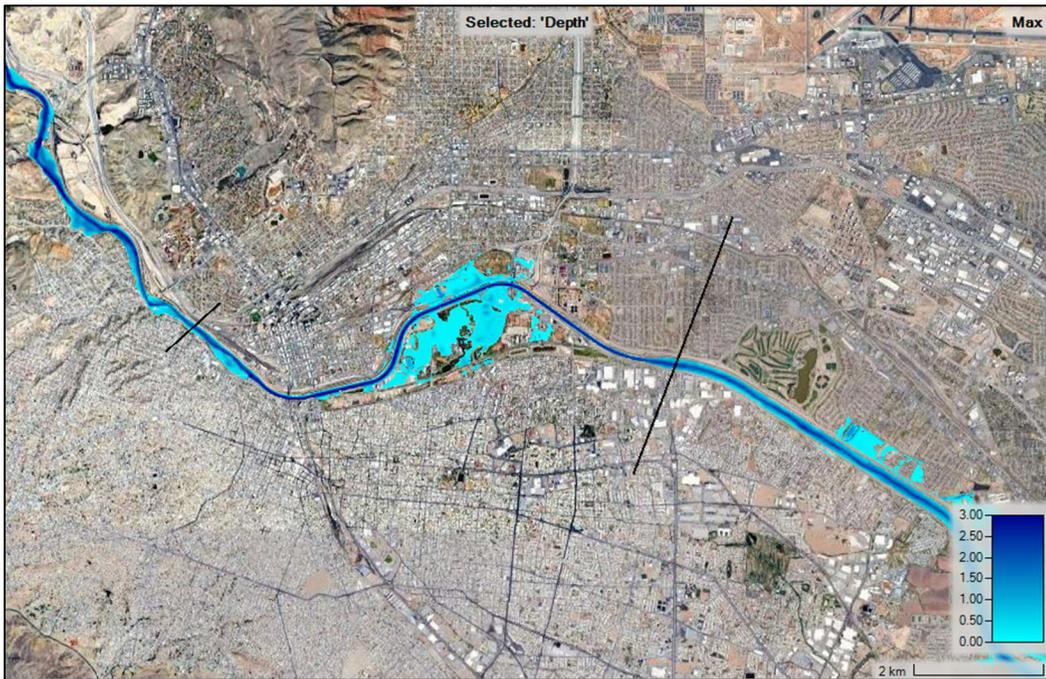


Figura 5.3.76 : Tirantes con un mallado de 10 metros. Fuente: HEC-RAS

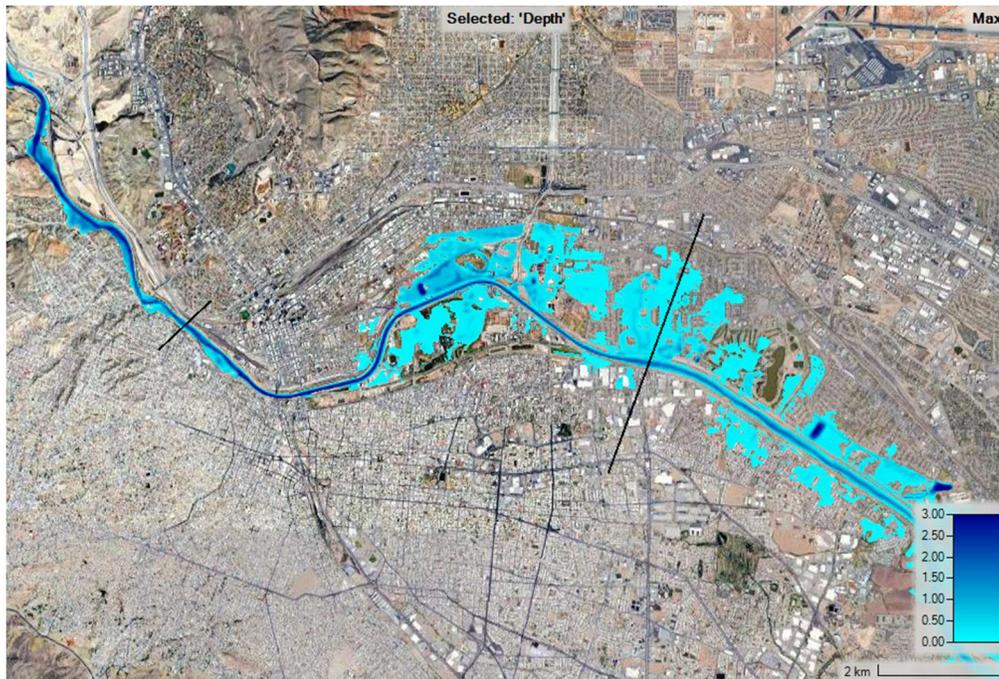


Figura 5.3.77 : Tirantes con un mallado de 15 metros. Fuente: HEC-RAS



Figura 5.3.78 : Tirantes con un mallado de 25 metros. Fuente: HEC-RAS



Figura 5.3.79 : Tirantes con un mallado de 40 metros. Fuente: HEC-RAS

En base a las figuras anteriores, se interpreta que, durante la simulación con HEC-RAS 2D, se observó que, al reducir el tamaño de la malla, las áreas de desbordes en las zonas planas y de cauce se vieron restringidas. Este fenómeno puede justificarse por la mayor resolución que una malla más densa (de menor tamaño) proporciona en la representación del flujo. Con un tamaño de malla más reducido, se logra capturar mejor los detalles topográficos y las pequeñas variaciones en el relieve, lo que permite una mayor precisión en la simulación de los tirantes y las áreas inundadas. Esto reduce la sobreestimación de áreas potenciales de desbordes que podrían ocurrir con mallas más grandes y menos detalladas, donde se tiende a suavizar el terreno y, por ende, el flujo de agua tiende a distribuirse en mayores superficies.

Esto argumenta que la restricción de las zonas de desbordes está directamente relacionada con la mayor precisión que una malla más pequeña ofrece en la representación de la topografía y el flujo hidráulico.

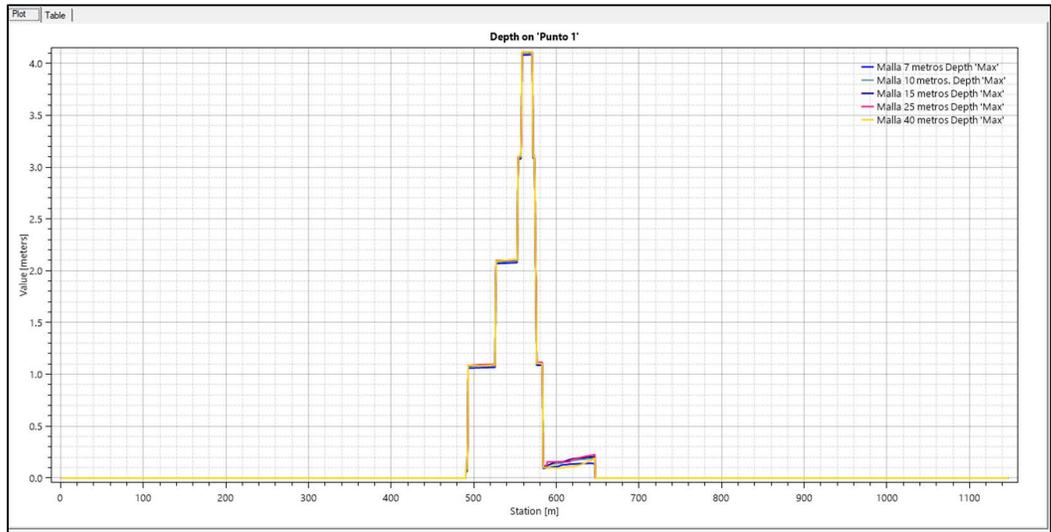


Figura 5.3.80 : Tirantes en la sección aguas arriba. Fuente HEC-RAS

Durante la simulación se observó un comportamiento diferenciado en las zonas de la cuenca al ajustar el tamaño de la malla. En la parte superior, la disminución del tamaño de la malla resultó una disminución del tirante. Esto puede explicarse por la mayor precisión en la representación de la topografía, que permite capturar con mayor detalle las irregularidades del terreno.

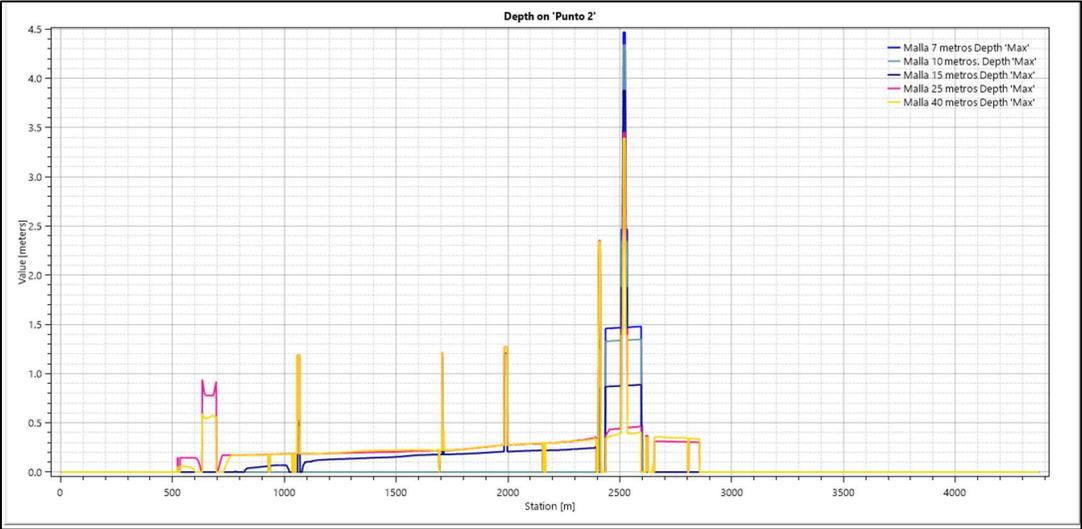


Figura 5.3.81 : Tirantes en la sección aguas abajo. Fuente HEC-RAS

En el caso de la zona baja con pendientes no tan pronunciadas, al reducir el tamaño de la malla en el cauce, se logra una representación más detallada de la topografía y las características del río (pendientes, curvaturas, y cambios en el ancho). Con una mayor precisión en la captura de estos detalles, el flujo tiende a concentrarse más en el cauce principal, lo que incrementa el caudal máximo. Esto se debe que a mayor resolución topográfica se evita que el flujo se disperse tanto lateralmente, obligando a que el agua siga más estrictamente las formas naturales del cauce, resultando en mayor velocidad y volumen acumulado en secciones más estrechas del río, aumentando el caudal máximo.

En la planicie, la reducción del tamaño de la malla tiende a suavizar la representación de la inundación. Una malla más pequeña capta mejor las depresiones y los detalles del terreno, permitiendo que el flujo se distribuya en mayor medida lateralmente en vez de concentrarse en una franja o dirección principal. Este mayor detalle hace que el caudal no se concentre tanto en puntos específicos de la planicie, sino que se reparta más eficientemente sobre la superficie, resultando en menores caudales máximos.

Teniendo como un resumen, los cambios de tirantes máximo y su tiempo computo, en base a las 2 secciones de evaluación.

Tabla 5.3.13 : Parámetros para la sección aguas arriba para cada tamaño de malla.
Fuente: Elaboración Propia

	Tamaño de malla (metros)	Manning Constante	Tamaño de celda del raster (metros)	Tirante máximo (metros)	Tiempo de computo (h:min:ss)
CASO 1	7	0.35 / 0.45	1	4.085	04:50:11
CASO 2	10	0.35 / 0.45	1	4.099	04:10:25
CASO 3	15	0.35 / 0.45	1	4.109	03:40:17
CASO 4	25	0.35 / 0.45	1	4.111	02:20:35
CASO 5	40	0.35 / 0.45	1	4.109	00:35:15

Tabla 5.3.14 : Parámetros para la sección aguas abajo para cada tamaño de malla.
Fuente: Elaboración Propia.

	Tamaño de malla (metros)	Manning Cauce del río - Riberas	Tamaño de celda del raster (metros)	Tirante máximo (metros)	Tiempo de computo (h:min:ss)
CASO 1	7	0.35 / 0.45	1	4.470	04:50:11
CASO 2	10	0.35 / 0.45	1	4.340	04:10:25
CASO 3	15	0.35 / 0.45	1	3.878	03:40:17
CASO 4	25	0.35 / 0.45	1	3.450	02:20:35
CASO 5	40	0.35 / 0.45	1	3.391	00:35:15

5.3.1.2 Análisis de Sensibilidad de Rugosidad

Al incrementar el coeficiente de Manning, se observa una disminución en los tirantes del flujo, aunque este efecto es menos significativo en comparación con el impacto generado por el cambio en el tamaño de la malla. Además, se identifica que, en aquellas secciones donde se asigna un mayor valor de fricción al coeficiente de Manning, el tiempo de cómputo para el cálculo de los parámetros hidráulicos se reduce.

Tabla 5.3.15 : análisis de sensibilidad de la rugosidad. Fuente: Elaboración Propia.

	Tamaño de celda (metros)	Manning [Sección del cauce del río]	Manning [Planicie y riberas] “cte”	Tirante máximo (metros)	Tiempo de computo (h:min:ss)
CASO 1	7	0.35	0.45	4.470	04:50:11
CASO 2	7	0.45	0.45	4.330	04:32:01
CASO 3	7	0.55	0.45	4.288	04:15:11

Capítulo 6: Conclusiones, limitantes y recomendaciones

1. Mediante los métodos análisis estadísticos (Método de Gumbel y Nash) se estimaron los caudales para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 250 y 500 años) a partir de los datos disponibles de la estación hidrométrica en el Paso, Texas; resultado que el gasto estimado por el método de Gumbel para el periodo de retorno de 250 años ($196.6 \text{ m}^3/\text{s}$) reproduce mejor el gasto registrado, de $198.21 \text{ m}^3/\text{s}$, en Cd. Juárez en el año 2006, que correspondió a un evento de un periodo de retorno de 250 años.
2. En la modelación unidimensional, la representación del desborde es limitada; ya que el modelo se basa en secciones transversales predefinidas y puntos de banco que marcan el límite del cauce. Este enfoque tiende a simplificar la geometría del río, interpretando el flujo como contenido dentro de un canal, sin captar fielmente las variaciones topográficas del terreno en la planicie de inundación.
3. En contraste, la modelación bidimensional permite un modelado más realista del desborde, ofreciendo un flujo que se expande naturalmente en el terreno circundante. En el modelo 2D, el agua puede fluir sin restricciones, siguiendo los contornos naturales y la topografía detallada de la zona, lo que resulta en una representación más precisa de la dinámica de inundación. Esto se evidencia en la figura 5.3.75, donde se aprecia cómo el flujo en 2D se distribuye más libremente en comparación con el flujo confinado y simplificado del modelo 1D, el cual, al interpolar las secciones a intervalos específicos, crea una imagen de flujo canalizado que no refleja adecuadamente la complejidad del terreno.
4. De los resultados del análisis de sensibilidad del tamaño del mallado de la modelación bidimensional se puede observar que un mallado más grande puede afectar significativamente la precisión de los resultados de un modelo hidráulico, especialmente en la forma en que se representan las zonas de inundación y los perfiles de tirante a lo largo del cauce. Es importante seleccionar un tamaño de mallado adecuado que equilibre la precisión del modelo con el tiempo de computación. Para el presente estudio se optó por seleccionar el tamaño de malla de 7 metros.
5. Del análisis de sensibilidad del valor de la rugosidad de Manning, en base a los resultados presentados se puede apreciar al variar el valor de rugosidad de Manning tiene variaciones mínimas en los tirantes máximos calculados en comparación al variar el mallado de celda.
6. Tomando en cuenta los resultados de la modelación bidimensional, existe evidencia para confirmar que el lado mexicano es vulnerable ante un potencial evento de desbordamiento del Rio Bravo, para el presente estudio llevó la modelación para reproducir el gasto registrado durante el evento registrado en el valle de El Paso, Texas y Cd. Juárez durante el año 2006. Así mismo, los resultados muestran que el lado americano también pudiera ser vulnerable a un evento de esta índole.

7. Dado que las presas el Elefante y el Caballo son controladas por las autoridades americanas, la información disponible es limitada, por lo tanto, el presente estudio no consideró el estudio del tránsito de avenidas de las mismas; ya que se le dio crédito a la regulación en ambos vasos reguladores. Por lo tanto, se recomienda tomar el presente estudio como punto de partida para una futura investigación incorporando el tránsito de avenidas para confirmar y/o descartar la regulación de los mismos vasos.

8. La presente investigación no considera modelaciones de escenarios de “Overbreaching” y “Overtopping” del bordo del Rio Bravo (en ambos lados) dado la limitante de información en el diseño del bordo tanto en el lado mexicano como en el lado americano. Por lo tanto, se recomienda que en el futuro se pueda extender el alcance de la presente investigación para confirmar el efecto que tendría en los resultados del presente estudio.

9. El alcance del presente estudio no considera proponer soluciones hidráulicas y/o civiles para mitigar un posible desbordamiento del Rio Bravo. Se invita a tomar la presente investigación como punto de partida para futuro proyectos de mitigación una vez que se tenga evidencia suficiente para cubrir las limitantes de los puntos 8 y 9 mencionados previamente.

Referencias

Achá, N. A., Saavedra, O. C., & Ureña, J. E. (2022). Modelación hidrológica en la cuenca del río Rocha incorporando lineamientos de caudal ecológico. *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-5i>

AECOM Technical Services, I. (2023). 2023 Regional Flood Plan Region 14 Upper Rio Grande. <https://www.twdb.texas.gov/flood/planning/regions/14/index.asp>

Alcántara Boza, A., & Castro Tenorio, A. (2021). Determinación de zonas inundables con HEC-RAS en zonas de la Cordillera Central de los Andes. Microcuenca del río Saraus-río La Llanga. Celendín. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19852>

Annuar, A. S., Rahman, R. A., Munir, A., Murad, A., El-enshasy, H. A., & Illias, R. (2021). Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics. *Carbohydrate Polymers*.

Arriola Carrasco, G. G., Coronado Zuloeta, O., Sotomayor Nunura, G. del S., Villegas Villegas, D. Vander, Caballero Talledo, R. D., & Olaya Aguilar, W. A. (2022). Evaluación del riesgo de inundación empleando un sistema de información geográfica y modelamiento hidráulico aplicados al río la Leche Lambayeque. *Revista científica epistemia*, 6(1). <https://doi.org/10.26495/re.v6i1.2132>

Barrales-Díaz, C. (2018). Atención psicológica en situaciones de emergencias y desastres. *Horizonte Sanitario*, 18(1). <https://doi.org/10.19136/hs.a18n1.2581>

Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., Soukis, K., & Koskeridou, E. (2018). Temporal and spatial analysis of flood occurrences in the drainage basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece). *Land*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/land7030106>

Cajigal Molina, E., & Maldonado González, A. L. (2019). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergente ante el cambio climático. *Economía Sociedad y Territorio*. <https://doi.org/10.22136/est20191342>

Castro Malca, P. C., & García Alvarado, C. del P. (2021). Propuesta de modelamiento bidimensional para la estimación del tamaño de malla y el tiempo computacional en canales anchos de 100 metros usando IBER 2.5.2. Y HEC-RAS 5.0.7.

Casulli, V. (2009). A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60(4), 391–408. <https://doi.org/10.1002/flid.1896>

Chow, V. te., & Maidment, D. R. . (1998). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Cordova Diaz, C. J. (2017). Modelación hidráulica del río “la leche” con el programa HEC-RAS en un tramo de 4km. en el distrito de Íllimo, y departamento de Lambayeque. in repositorio académico usmp.

Estrada, G. (2008). 600629757_Conceptos_Basicos_de_Hidrologia_Por_Guadalupe_Estrada (2).

García Villanueva, N. H. (2016). Hidráulica de canales Principios básicos. www.gob.mx/imta

Gutiérrez García, J. V., Rubiños Panta, J. E., Fernández Reynoso, D. S., Ramírez Ayala, C., Roblero Hidalgo, R., Gutiérrez García, F. G., & Romero Sánchez, M. E. (2022). Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 13(71). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1238>

Hernández, N. (2018). El río y su territorio. Espacio de libertad: un concepto de gestión. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72157132006>

Hosseiny, H., Nazari, F., Smith, V., & Nataraj, C. (2020). A Framework for Modeling Flood Depth Using a Hybrid of Hydraulics and Machine Learning. Scientific Reports, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65232-5>

Instituto Municipal de Investigación y Planeación. (2016). Atlas de Riesgos Naturales y Atlas de Riesgos Antropogénicos. <https://www.imip.org.mx/atlasderiesgos/docs/VOLUMEN1.pdf>

Leon, A. S., & Goodell, C. (2016). Controlling HEC-RAS using MATLAB. Environmental Modelling and Software, 84. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.026>

López García, A., Javier Llera, F., Pérez Pulido, L. A., & Simental Orona, J. (2020). Modelo de urbanización y desigualdad urbana. El caso de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Terr Plural, 14. <https://doi.org/10.5212/terraplural.v.14.2016215.053>

López Rodríguez, E., Leco Berrocal, F., & Mateos Rodríguez, A. B. (2021). Peligrosidad de inundaciones en Extremadura y daños asociados. Investigaciones Geográficas, 75. <https://doi.org/10.14198/ingeo.16990>

Lugo, R. (2016). Flood in El Paso, Texas.

Maya Muñoz, G. (2020). Cambio climático: ¿La Humanidad culpable? Ensayos de Economía, 30(56). <https://doi.org/10.15446/ede.v30n56.87109>

Mendoza Terrazas, C., & Sánchez Flores, E. (2022). Crecimiento urbano disperso en la frontera norte de México: organización espacial y eficiencia de los patrones de crecimiento urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. <https://doi.org/10.5821/ctv.7544>

Montini Ramos dos Santos, G. (2021). Análise de tendência pluviométrica no estado da bahia. Anais Dos Seminários de Iniciação Científica, 23. <https://doi.org/10.13102/semic.v0i23.7018>

Navas Muñoz, M. J., Matovelle Bustos, C., Vélez Arcentales, A., & Córdova, F. (2022). Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña. AlfaPublicaciones, 4(1). <https://doi.org/10.33262/ap.v4i1.181>

Noe, G. B. (2022). Interactions Among Hydrogeomorphology, Vegetation, and Nutrient Biogeochemistry in Floodplain Ecosystems. In Treatise on Geomorphology. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.60050-0>

Oliva Rivera, R. J., & Silva Díaz, J. J. (2021). Universidad Privada Antenor Orrego Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Civil tesis para optar el título de ingeniero civil “diseño de estructuras complementarias de las bocatomas chiclín y chicamita para estabilizar el río chicama sector chicama” Línea de Investigación: Hidráulica Autor (es).

Padilla, A. (2018). Modelación numérica de ríos. análisis 1d-2d.

Parra, A. D. (2016). Ernest Bladé i Castellet Enginyeria de Camins, Canals i Ports.

Reyes-García, V., Vieira Da Cunha Ávila, J., & Caviedes, J. (2022). Evidencias locales del cambio climático y sus impactos: ejemplos desde Sudamérica. Antropologías Del Sur, 9(17). <https://doi.org/10.25074/rantros.v9i17.2317>

Rios Varillas, D. I. (2014). Investigación de la disipación de energía en el modelo hidráulico del Proyecto Alto Piura.

Rocha -Felices, A. (1998). Introducción a la Hidráulica Fluvial. <https://www.researchgate.net/publication/315829253>

Schön, F., & Achkar, M. (2022). Cambios de uso del suelo e inundaciones en espacios urbanos en Uruguay: tres casos de estudio. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 31(2). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.88561>

Timbe Castro, L. M., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones Lus Timbe. MASKANA, 2(1), 91–98. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.07>

US Army Corps of Engineers. (2024). HEC-RAS Mapper User's Manual.

Vera, C., & Camilloni, I. (2019). Vapor de agua en el ciclo del agua. Revista de Obras Públicas, 166(3606).

Curriculum Vitae

EDUARDO GARZA

P376150@UACH.MX

EDUCACION

BS Universidad Autonoma de Nuevo León, Ingeniería Química Ene 2010
Pedro de Alba S/N, Niños Héroes, Ciudad Universitaria
San Nicolas, Nuevo León, 66455

HONORES Y RECONOCIMIENTOS

Tercer lugar de generación 2010

EXPERIENCIA PROFESIONAL

FM Global Mexico S.A de C.V 01/01/2024 – Presente
Segmento de industria: Aseguradora
Puesto: Engineering Specialist-Flood

Descripción del puesto: El Especialista en Ingeniería en inundaciones es un puesto de nivel especializado para ingeniería de campo. El Especialista en Ingeniería en inundaciones trabaja con el gerente y el equipo de Clima y Resiliencia Estructural para liderar inundaciones, tormentas de viento y otros componentes de la estrategia de peligros naturales de FM.

FM Global Mexico S.A de C.V 03/28/2022 – 01/01/2024
Segmento de industria: Aseguradora
Puesto : Ingeniero Consultor Senior

Descripción del puesto: El Ingeniero Consultor Senior es un puesto de nivel experimentado para ingeniería de campo. El Ingeniero Consultor Senior interactúa con clientes de FM Global de alto riesgo dentro de las industrias de generación de energía, productos forestales: pulpa y papel, acero y aluminio, semiconductores, minería, química y

similares. Ingenieros experimentados utilizarán su experiencia para consultar con los clientes para proteger sus instalaciones contra averías mecánicas y eléctricas, incendios y muchos otros peligros naturales.

FM Global Mexico S.A de C.V 08/03/2020 – 03/28/2022

Segmento de industria: Aseguradora

Puesto: Consultant Engineer II

Descripción del puesto: El Ingeniero Consultor II (CEI) es un puesto de nivel intermedio para la ingeniería de campo. Inicialmente, las tareas serán de complejidad limitada y brindarán la oportunidad de aprender. Gradualmente comenzará a evaluar los riesgos en propiedades más grandes y complejas visitando las instalaciones del cliente y realizando evaluaciones que cuantifiquen con precisión las exposiciones previsibles a elementos físicos y humanos mientras trabaja con el equipo de administración del cliente.

FM Global Mexico S.A de C.V 15/07/2018 – 08/03/2020

Segmento de industria: Aseguradora

Puesto: Ingeniero Consultor I

Descripción de puesto: El Ingeniero Consultor I (CEI) es un puesto de nivel de entrada para ingeniería de campo. El CEI recibirá formación en las distintas fases del trabajo de ingeniería de oficina y de campo.

KBR Monterrey, S.A de C. V 14/02/2013 – 29/06/2018

Segmento de industria: Firma de ingeniería

Puesto: Ingeniero de Procesos Senior

Descripción de puesto: Bajo una dirección amplia, el ingeniero de procesos senior interpreta, organiza, ejecuta, coordina asignaciones, trabaja de forma independiente y puede liderar un equipo pequeño e interactuar directamente con el cliente. El titular utilizará sus habilidades y experiencia para desempeñar responsabilidades laborales dentro de las industrias de generación de energía, pulpa y papel, petróleo y gas, plantas de procesamiento de gas en tierra y mar, industrias químicas y similares.

Halliburton de Mexico 30/08/2011 – 01/02/2013

Segmento de industria: Energéticos

Puesto de trabajo: Ingeniero de Campo

Descripción de puesto: Bajo supervisión general, utiliza conocimientos y experiencia en cementación para desarrollar el diseño del trabajo de cementación para cumplir con los requisitos del cliente, incluidos cálculos preliminares del trabajo, ejecutar simulaciones por computadora, diseñar sistemas de fluidos, presentar solicitudes de pruebas de laboratorio y revisar y aprobar los resultados de las pruebas, realizar evaluaciones de riesgos, verificar que el diseño cumpla con los requisitos reglamentarios y proporcionar estimaciones de costos para la operación planificada.

Quimiproduetos de Mexico 23/04/2010 – 30/08/2011

Segmento de industria: Química

Puesto de trabajo: Ingeniero de Servicio técnico

Descripción de puesto: El ingeniero de campo de servicios técnicos se asocia con representantes de ventas para ejecutar planes de servicio en cuentas de distrito estratégicas y brindar a los clientes soporte para la resolución de problemas.

PRESENTACIONES Y CONFERENCIAS INVITADAS

Presentación en papel, “Papel de las Aseguradoras en los Proyectos Greenfield,”
23/10/2023 – 27/10/2023

ENTRENAMIENTO PROFESIONAL

Modelación Hidrológica con HEC-HMS

CIDHMA, Perú, 01/04/2024 – 01/05/2024

Descripción: Aplicación al tráfico de avenidas y embalses. Así como la modelación hidrológica de caudales máximos mediante hidrogramas unitarios utilizando el software HEC-HMS.

Modelación Hidráulica con FLO-2

CIDHMA, Perú, 01/04/2024 – 01/05/2024

Descripción: En este curso se aborda el uso y aplicación del programa FLO-2D aplicado al modelado hidráulico, proporcionando al estudiante la capacidad de analizar diagramas de flujo del modelo FLO-2D, simulación de flujos hiperconectados y manejo de la malla.

Modelación Hidráulica con iRIC

CIDHMA, Perú, 01/04/2024 – 01/05/2024

Descripción: En este curso se presentan los diferentes enfoques y soluciones que nos ofrece iRIC en Modelado Hidráulico. Al finalizar el curso, el estudiante tendrá la capacidad de gestionar operaciones y funciones básicas en iRIC, ejecutar simulaciones y generar mapas de peligros.

Modelación Hidráulica con HEC-RAS

CIDHMA, Perú, 01/04/2024 – 01/05/2024

Descripción: Este curso cubrió las metodologías hidráulicas de modelado bidimensional, desde la creación y modificación de parámetros de flujo estacionario, la modificación y corrección del modelo digital de elevación, hasta el análisis combinado de flujo unidimensional y bidimensional.

Modelación Hidráulica con IBER

CIDHMA, Perú, 01/04/2024 – 01/05/2024

Descripción: Este curso abarcó la simulación bidimensional de canales, (como consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de caminos con drenaje intenso o en general la zonificación del Dominio Público Hidráulico) un módulo de turbulencia y un transporte sólido por arrastre de fondo y en suspensión para cuantificación de procesos de erosión y sedimentación.

IDIOMAS

Inglés: Superior
Español: Nativo
Portugués: Intermedio
Francés: Básico

HABILIDADES COMPUTACIONALES

Programación: Matlab, Fortran, Visual Basic
Aplicaciones: Excel, Power Point, Word, Access, HEC-RAS, HEC-HMS, IBER, FLO-2D, iRIC

OTROS

Hidrología
Mitigación de Inundaciones
Ingeniería Química
Cambio Climático
Ingeniería de Sistemas Contra incendios
Modelación Hidrológica e Hidráulica

REFERENCIAS

Dr. Gerónimo Llerar, [PhD en Hidrogeología]
Universidad Autónoma de Chihuahua
Circuito Número I S/N, Nuevo Campus Universitario, Nte. 2, Chihuahua ,31125
Email: gllerar@uach.mx