ESTUDIO HIDRÁULICO Y ESTUDIO DE SOCAVACIÓN DEL CAÑO SECO EN EL SECTOR DENOMINADO *PUNTO CRÍTICO 3*, EN EL MUNICIPIO DE RESTREPO – META.

ESTUDIO HIDRÁULICO.



RESTREPO - META
DICIEMBRE 2023

TABLA DE CONTENIDO

1 ESTUDIO HIDRÁULICO. 4
1.1 Descripción del modelo. 5
1.2 Ecuaciones gobernantes. 5
1.2.1 Ecuación de conservación de la masa (Continuidad). 7
1.2.2 Ecuación de Momentum. 7
1.3 Implementación del modelo hidráulico. 8
1.4. Parámetros de resistencia de flujo: Coeficiente de Manning. 9
1.4.1. Determinación del coeficiente de rugosidad “n” de Manning. 10
1.5. Condiciones de frontera. 13
1.6. Calibración del modelo hidráulico. 16
1.7. Simulación hidráulica para el cauce. 16
1.7.1. Simulación hidráulica para el cauce – Resultados. 16
2 SOCAVACION. 25
2.1 Socavación local. 29
2.2 Desarrollo del análisis de socavación. 31
3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 36
8. BIBLIOGRAFÍA. 38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad “n”. 11
Tabla 2. Estimación del coeficiente de rugosidad “n” de Manning. 12
Tabla 3. Estimación del coeficiente de rugosidad “***n***” de Manning. 13
Tabla 4. Resumen general de resultados hidráulicos de la modelación del caudal para 500 años. . 24
Tabla 5. Factor de corrección por contracción del cauce μ. 28
Tabla 6. Coeficiente de corrección para el cálculo de socavación en estribos y espigones según Artamanov. 31
Tabla 7. Secciones transversales analizadas. 32
Tabla 8. Calculo de la socavación general, sección transversal 85. 33
Tabla 9. Determinación del perfil de socavación general - método Lischtvan - Lebediev y Local Método K. F. Artamonov, sección transversal 85. 34

Tabla 10. Resumen de la socavación general de la sección transversal 85. 36

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Condiciones de frontera adoptados para el modelo hidráulico actual en el Caño Seco. 14
Ilustración 2. Caudales para los periodos de retorno correspondientes para el Caño Seco. 15
Ilustración 3. Condiciones de análisis para caudal estático, régimen mixto. 15
Ilustración 4. Lamina de inundación para un periodo de retorno de cien (100) años. 17
Ilustración 5. Velocidad del flujo de agua para un periodo de retorno de cien (100) años. 18
Ilustración 6. Perfil de la lámina de inundación para un periodo de retorno de cien (100) años. 19
Ilustración 7. Lamina de inundación para un periodo de retorno de quinientos (500) años. 20
Ilustración 8. Velocidad del flujo de agua para un periodo de retorno de quinientos (500) años. 21
Ilustración 9. Perfil de la lámina de inundación para periodo de retorno de quinientos (500) años. . 22
Ilustración 10. Perfil de las láminas de inundación para periodo de cien (100) y quinientos (500) años. 23
Ilustración 11. Sección transversal 85. 32
Ilustración 12. Resultado de la modelación hidráulica, sección transversal 85. 33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Socavación General – Definición de variables. 26
Figura 2. Cálculo del ancho efectivo “Be” en puentes. 28
Figura 3. Patrones de flujo en un estribo. 29
Figura 4. Método de Artamanov. Interceptación de flujo por los estribos dentro del canal. 30

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Perfil de socavación general calculado para la sección transversal 85. 35

1 ESTUDIO HIDRÁULICO.

La hidráulica fluvial es la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los cuerpos de agua superficiales, sin importar la finalidad del proyecto, mostrando el cómo se debe intervenir dichos cauces para alcanzar el objeto de un proyecto determinado. Esta hidráulica combina conceptos de hidrología, hidráulica general, geomorfología, transporte de sedimentos y erosión en márgenes.

En el presente estudio se enseñan los resultados de las modelaciones hidráulicas del segmento de interés para los caudales obtenidos en el estudio hidrológico proyectados en los diferentes periodos de retorno, véase numeral 9.2 "***Caudal de máxima creciente***", bajo condiciones actuales según la dinámica fluvial, este componente se hace con el fin de desarrollar el proyecto que lleva por objeto "***Estudio hidrológico e hidráulico entorno a la socavación del caño seco en el sector denominado Punto Crítico 3, en el municipio de Restrepo – Meta***".

Este capítulo busca analizar las condiciones hidráulicas actuales del área en estudio y para este análisis se parte de la dinámica fluvial general del cauce y su comportamiento e influencia en el punto de estudio. Con fundamento en esto, se identifican las situaciones presentes que, en conjunto con las necesidades locales de las comunidades afectadas, permiten un diagnóstico acorde al contexto. Finalmente, se plantean alternativas de solución frente al diagnóstico realizado, tomando la alternativa más viable desde los criterios de funcionalidad, factibilidad económica y estabilidad.

Para el desarrollo de este ítem, se parte de la construcción de un modelo de terreno que describa apropiadamente la tipología actual del cauce, así, al introducir los caudales obtenidos en el estudio hidrológico desarrollado, se logre un modelo hidráulico que describa de manera acertada los diferentes fenómenos físicos que permitan comprender características propias de la dinámica fluvial sobre el cauce en estudio, y finalmente obtener parámetros hidráulicos en los tramos de análisis bajo las condiciones existentes.

Se evaluará las condiciones actuales del sector, planteando como hipótesis el evento máximo extraordinario a un periodo de 100 años de acuerdo a las recomendaciones dadas por el Manual de Drenajes para Carreteras y un periodo de 500 años de acuerdo a organismos normativos internacionales como Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (ASSTHO) y el departamento de transporte de Estados Unidos.

Con el propósito de establecer el comportamiento hidráulico del cauce en estudio bajo condiciones actuales, se implementó un modelo de análisis hidráulico mediante el software HEC-RAS 6.3.1.

Para la elaboración y desarrollo del modelo hidráulico, se contempla el uso del software de análisis hidráulico HEC-RAS 6.3.1. (Hydrologic Engineering Center-River Análisis System), que es desarrollado y distribuido por US Army Corps of Engineers, y corresponde a una actualización o nueva generación de los modelos HEC-2 y HEC-6. El software HEC-RAS 6.3.1. se fundamenta en un esquema de resolución unidimensional de las ecuaciones de Barré de Saint-Venant, con capacidad de modelar hidráulicamente flujos subcríticos, supercríticos y mixtos. La descripción del Modelo HEC-RAS 6.3.1, sus ecuaciones gobernantes y métodos de solución empleados para simular el flujo, se relacionan brevemente a continuación.

1.1 Descripción del modelo.

El modelo de análisis hidráulico HEC-RAS 6.3.1 es una herramienta de software de libre acceso y con características de cálculo robustas, que emplea en la evaluación de pérdidas por fricción la ecuación de Manning.

1.2 Ecuaciones gobernantes.

En el análisis de corrientes superficiales donde el flujo se mantiene confinado sobre el cauce, su representación puede obtenerse con buena aproximación a partir de un modelo de resolución unidimensional de las ecuaciones de Barré de Saint- Venant. En forma general las ecuaciones de conservación de masa y de momentum en un modelo unidimensional se expresan, según se relaciona, a continuación.

- Ecuación de conservación de masa (Continuidad):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

- Ecuación de Momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V\frac{\partial Q}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0$$

Donde A corresponde al área de sección transversal; Q al caudal total; t el tiempo; x la dirección principal de flujo (dirección longitudinal del canal); ql caudal unitario lateral; V velocidad media en la

dirección principal de flujo; g aceleración de la gravedad; z elevación de la superficie del flujo; Sf pendiente de fricción.

La evaluación de las pérdidas de energía por fricción en el modelo HEC-RAS 6.3.1, se realizan mediante el uso de la fórmula de Manning, siendo su representación matemática en sistema internacional de unidades la siguiente:

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

Donde Q corresponde al caudal total; A al área de sección transversal; n el coeficiente de rugosidad de Gauckler - Manning; R el radio hidráulico ($R = A/P$); P el perímetro mojado; Sf pendiente de fricción.

Las corrientes superficiales de cauce natural, normalmente desarrollan secciones compuestas donde se identifica un canal central y dos zonas de banca ubicadas una a izquierda y otra a derecha del canal principal. Dependiendo del grado de confinamiento de la corriente y la magnitud del caudal transportado estas zonas adyacentes pueden ser o no ocupadas por el flujo. Durante un evento de creciente, en la etapa inicial el flujo suele estar confinado al canal central, posteriormente en la medida que se incrementa el caudal transportado y se alcanzan niveles de desbordamiento sobre las bancas, esta funciona como una zona de almacenamiento. Una vez la capacidad de almacenamiento de las bancas es ocupada se genera una condición de flujo hacia aguas abajo.
Luego en la etapa de recesión de la creciente, al disminuir el caudal transportado y por consiguiente los niveles de flujo el caudal vuelve a concentrarse sobre el canal central. El modelo HEC-RAS 6.3.1., para efectos evaluar el comportamiento del flujo tanto en el canal central como en las bancas se distribuye la descarga de acuerdo con la función de transporte, K, siendo esta:

$$K = \frac{A^{5/3}}{nP^{2/3}}$$

En consecuencia, se definen las siguientes relaciones:

$$Q_c = \Phi Q$$

$$\Phi = \frac{K_c}{K_c + K_f}$$

Con fundamento en los anteriores supuestos, la solución completa de las ecuaciones de Barré de Saint-Venant, para una condición de flujo unidimensional puede ser expresada como se relaciona a continuación.

1.2.1 Ecuación de conservación de la masa (Continuidad).

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c}+\frac{\partial[(1-\Phi)Q]}{\partial x_f}=0$$

1.2.2 Ecuación de Momentum.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial(\Phi^2Q^2/A_c)}{\partial x_c}+\frac{\partial\left[(1-\Phi)^2Q^2/A_f\right]}{\partial x_f}+gA_c\left(\frac{\partial Z}{\partial x_c}+S_{fc}\right)+gA_f\left(\frac{\partial z}{\partial x_f}+S_{ff}\right)=0$$

Siendo:

$$S_{fc}=\frac{\Phi^2\mathrm{Q}^2n_c^2}{R_c^{4/3}A_c^2}$$

$$S_{ff}=\frac{(1-\Phi)^2\mathrm{Q}^2n_f^2}{R_f^{4/3}A_f^2}$$

Donde la variable Φ corresponde al porcentaje de distribución del flujo entre el canal y las bancas, de acuerdo a los coeficientes de transporte Kc y Kf; los subíndices c y f indican la correspondencia al canal y a las bancas respectivamente. Las ecuaciones gobernantes del modelo de análisis hidráulico relacionadas anteriormente, para su resolución en HEC-RAS 6.3.1, se aproximan mediante un esquema implícito de diferencias finitas y son solucionadas numéricamente utilizando un proceso iterativo fundamentado en técnicas de Newton – Raphson.

El cómputo de las variables hidráulicas de velocidad y profundidad, así como el correspondiente perfil de flujo se realiza mediante la resolución de la ecuación de energía entre secciones consecutivas utilizando el método iterativo del paso estándar. A continuación, se relaciona la representación matemática de la ecuación de energía.

$$Z_2+Y_2+\frac{\alpha_2V_2^2}{2g}=Z_1+Y_1+\frac{\alpha_1V_1^2}{2g}+h_e$$

Donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a las secciones aguas abajo y aguas arriba, respectivamente; Z corresponde a la elevación del fondo del cauce en el canal central; Y a la profundidad de flujo; V a la velocidad media; α al coeficiente de Coriolis; g a la aceleración de la gravedad; he a las pérdidas de energía. La pérdida de energía por fricción y contracción o expansión, entre dos secciones consecutivas, se evalúa mediante la siguiente ecuación:

$$h_e = L\overline{S}_f + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right|$$

$$L = \frac{L_{lob}\overline{Q}_{lob} + L_{ch}\overline{Q}_{ch} + L_{rob}\overline{Q}_{rob}}{\overline{Q}_{lob} + \overline{Q}_{ch} + \overline{Q}_{rob}}$$

Donde L es la longitud promedio ponderada del cauce; Sf la pendiente de fricción; C el coeficiente de pedidas por contracción o expansión. La longitud promedio ponderada del cauce se evalúa como:

Donde los subíndices lob, ch, rob hacen referencia a la banca izquierda, el canal central y la banca derecha, respectivamente.

1.3 Implementación del modelo hidráulico.

El análisis hidráulico de la corriente para el tramo en estudio, dígase, cuenca Caño Seco a la altura del ***Punto Crítico 3***, se realiza mediante el modelo y programa de cálculo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Análisis System) desarrollado y publicado por US Army Corps of Engineers., el cual constituye una actualización de los modelos HEC-2 y HEC-6.

Definido un modelo geométrico de los cauces y las estructuras hidráulicas que lo intervengan (a partir de secciones transversales), asignados los coeficientes de Manning tanto para el canal principal como para las bancas, habiendo suministrado datos de caudal y establecidas las condiciones de frontera apropiadas aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio, el programa HEC-RAS evalúa entre otros parámetros:

- Perfil de flujo longitudinal.
- Línea de Energía.
- Profundidad Crítica.
- Perfil de velocidad en cada sección transversal.
- Perdida de energía por fricción y por contracción o expansión.
- Tensión tangencial o esfuerzo de corte.

- Radio hidráulico.
- Profundidad hidráulica.

El Modelo HEC-RAS es un modelo de cálculo de flujo unidimensional, que para análisis de flujo estable emplea las ecuaciones de energía y momento incluyendo perdidas por fricción y por contracción o expansión del flujo. Las consideraciones para la aplicación del modelo son las siguientes:

- Flujo estable.
- El flujo es gradualmente variado (excepto en estructuras hidráulicas como puentes o alcantarillas. En estos sitios donde el flujo puede ser rápidamente variado se emplea la ecuación de momento o ecuaciones empíricas para realizar el cómputo.
- El flujo es unidimensional (solo se consideran las componentes de velocidad en la dirección del flujo).
- El cauce de la corriente presenta pendientes pequeñas.

Los cálculos hidráulicos a través de estructuras hidráulicas como puentes pueden ser realizados por los siguientes métodos:

- Ecuación de Energía (método de paso standard).
- Balance de Momento.
- Ecuación de Yarnell.
- Método FHWA WSPRO.

1.4. Parámetros de resistencia de flujo: Coeficiente de Manning.

La ecuación de Manning constituye una de las más utilizadas para análisis de flujo uniforme en canales abiertos, debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja.

$$V = \frac{1}{n} \times R_H^{2/3} \times S^{1/2}$$

Donde:

- V = Velocidad media, en m/s.
- RH = Es el radio hidráulico de la sección transversal.
- S = La pendiente de la línea de energía.
- n = [s.m1/3] Coeficiente de Manning y tiene la propiedad de permanecer constante para una determinada rugosidad, asumiendo el flujo como permanente, uniforme y turbulento rugoso. Su valor

varía dependiendo de las unidades de medidas utilizadas para las otras variables ligadas al dimensionamiento hidráulico.

El coeficiente de rugosidad de Manning se ve afectado por factores como:

a. Rugosidad superficial.

b. Vegetación.

c. Irregularidad del canal.

d. Alineamiento del canal.

e. Sedimentación y socavación.

f. Tamaño y forma del canal, entre otros.

En corriente con fondo granular, el coeficiente de resistencia al flujo presenta variación en función del nivel de ocupación del cauce y de la forma del mismo. El coeficiente de Manning puede ser expresado como:

$$n = n_g + n_f$$

Donde ng es el coeficiente de rugosidad debido al tamaño de grano de las partículas del fondo y nf es el coeficiente de rugosidad debido a las formas de fondo presentes en el cauce o lecho de la corriente. Para efectos de estimar ng, se emplea la ecuación planteada por Strickler's (1923):

$$n_g = \frac{(d_{50})^{1/6}}{21}$$

De acuerdo a literatura consultada, los coeficientes de Manning apropiados para corrientes naturales con ancho superficial mayor a 30.0 m varían de $0.025 \leq n \leq 0.060$. Para las modelaciones realizadas en el presente estudio, con fundamento en registro fotográfico, topografía general del área de estudio (caracterizada por presentar pendientes bajas) se establecen valores del coeficiente de Manning para modelación hidráulica bajo condiciones actuales de la siguiente forma:

1.4.1. Determinación del coeficiente de rugosidad "n" de Manning.

El coeficiente de Manning es un coeficiente que mide la rugosidad de los materiales de lecho y de las bancas de un cauce, ya sea natural o artificial y a lo largo de los años, diversos autores han definido diferentes fórmulas y métodos para encontrar su valor más aproximado en base a variables representativas del cauce, como lo son la rugosidad absoluta o la granulometría de los materiales del

lecho. Se estimaron valores de coeficiente de Manning para el tramo en estudio de acuerdo con el procedimiento desarrollado por Cowan (Chow, 1994).

Tabla 1. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad "n".

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Fuente: Ven Te Chow, Hidráulica de canales abiertos, 1994.

Tabla 2. Estimación del coeficiente de rugosidad "n" de Manning.

Condiciones del Canal		Descripción del factor	Valor recomendado	Valor adoptado		
Factor	Simbología			Banca izquierda	Canal principal	Banca derecha
Material del fondo del cauce	n0	Suelo fino, tierra	0.02	0.020	0.024	0.020
		Roca o corte en roca	0.025			
		Arena o grava fina	0.024			
		Grava gruesa	0.028			
Irregularidades del fondo del cauce, grado de irregularidades	n1	No hay irregularidades, suaves	0	0.010	0.000	0.010
		Irregularidades menores, menor	0.005			
		Irregularidades moderadas, moderado	0.010			
		Irregularidades severas, severo.	0.020			
Cambio de secciones trasversales	n2	Gradual	0.000	0.010	0.000	0.010
		Ocasional	0.005			
		Muchos cambios	0.010-0.015			
Obstrucciones a grandes bloques en el cauce	n3	Ninguno	0.000	0.010	0.010	0.010
		Menores	0.010-0.015			
		Apreciables	0.020-0.030			
		Severos	0.040-0.060			
Vegetación en el cauce	n4	Bajo	0.005-0.010	0.010	0.000	0.010
		Media	0.010-0.020			
		Alta	0.025-0.050			
		Muy alta.	0.050-0.100			
Meandros y trenzas	m5	Menores (Sinuosidad 1.0 a 1.2)	1	1.000	1.150	1.000
		Apreciables (Sinuosidad 1.2 a 1.5)	1.15			
		Severas (sinuosidad >1.5)	1.3			
Total (n=(n0+n1+n2+n3+n4)*m5				**0.06**	**0.039**	**0.06**

Fuente: Elaboración del autor, 2023.

Los valores teóricos y estimados se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2. Estos valores se adoptaron de apreciaciones cualitativas, teniendo como base el conocimiento previo de que la cuenca Caño Seco, a la altura del ***Punto Crítico 3***, no se encuentra canalizado en el transcurso que tiene este dentro del casco urbano del municipio de Restrepo y los registros fotográficos que se tienen del área de estudio.

Tabla 3. Estimación del coeficiente de rugosidad "***n***" de Manning.

Zona	Valor de Manning
Cauce	0.039
Bancas	0.06

Fuente: Elaboración del autor, 2023.

1.5. Condiciones de frontera.

Para efectos de establecer las condiciones de frontera, en primera instancia, es apropiado aproximar una clasificación del flujo en función del tipo de cauce y la pendiente longitudinal del mismo. Al estimar la pendiente longitudinal promedia de las distintas canalizaciones, se determinó que corresponden a pendientes bajas. Con fundamento en lo anterior y bajo la premisa de que a lo largo del canal se pueden encontrar algunos tramos con pendiente supercrítica y otros subcrítica, se establece como requisito de análisis considerar la condición de flujo mixto, lo cual requiere definir condiciones de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo (entrada y salida), del segmento de estudio.

En consideración a la información disponible para elaborar el modelo de análisis hidráulico, la condición de frontera más adecuada corresponde a la de profundidad normal, representada por la pendiente de fricción. Teniendo en cuenta que el análisis hidráulico se plantea para condición de flujo mixto, procedimentalmente se determina la pendiente media de la canalización y se establece como condición de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo. Seguido se realiza la evaluación hidráulica y mediante un proceso iterativo se ajustan las condiciones de frontera, de tal forma que las variables hidráulicas adopten valores razonables para las condiciones específicas del tramo de la corriente objeto de análisis.

Dentro de los datos de entrada al modelo se tiene:

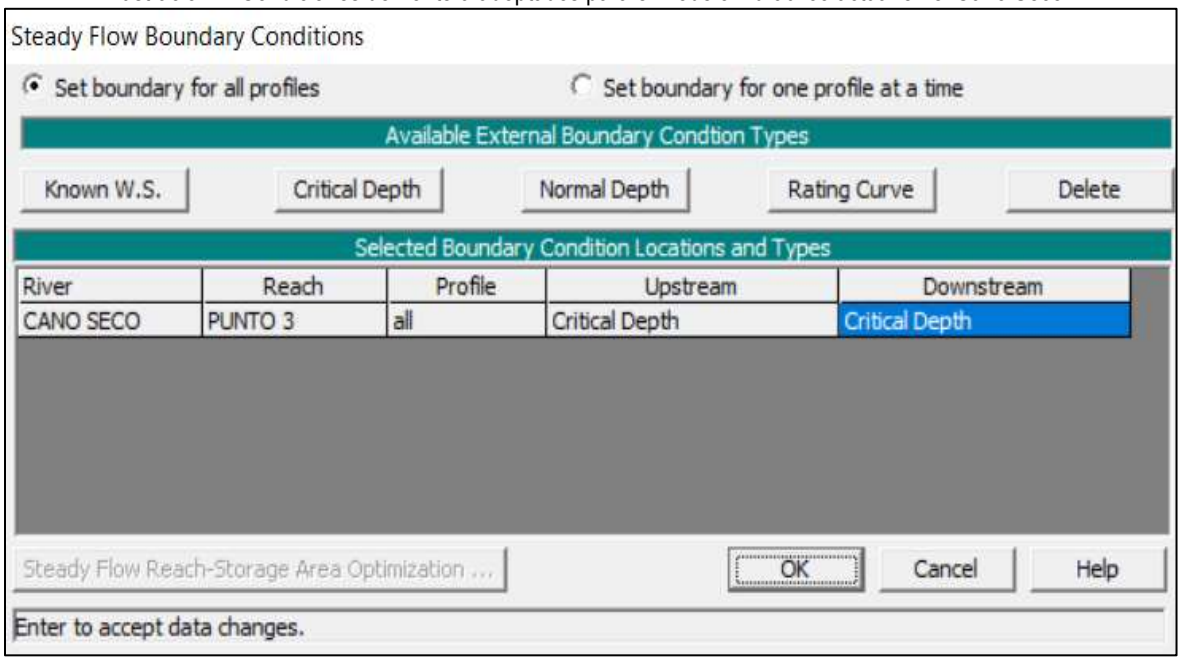
- ***Régimen del flujo***: El programa HEC-RAS permite calcular de manera simultánea flujo de tipo Mixto, es decir, considerándolo subcrítico o supercrítico.

- ***Condiciones de frontera***: Aguas arriba (Upstream) aguas abajo (Downstream) se ajustó con la opción "***Critical Depth***".

- ***Caudal***: Correspondiente a los presentados en el producto uno (1) estudio hidrológico, para los periodos de retorno de cien (100) años y quinientos (500) años.

- ***Coeficientes "n" de Manning***: Encontrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la r eferencia.**, para las bancas y el cauce principal.

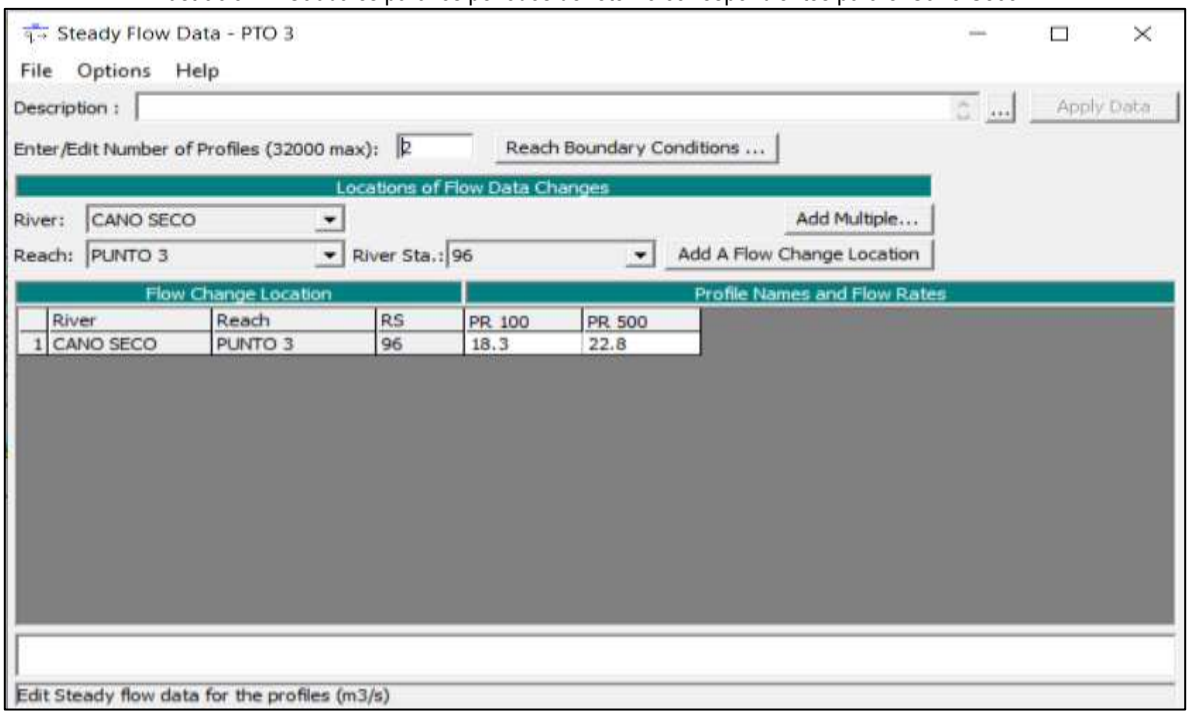
Ilustración 1. Condiciones de frontera adoptados para el modelo hidráulico actual en el Caño Seco.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

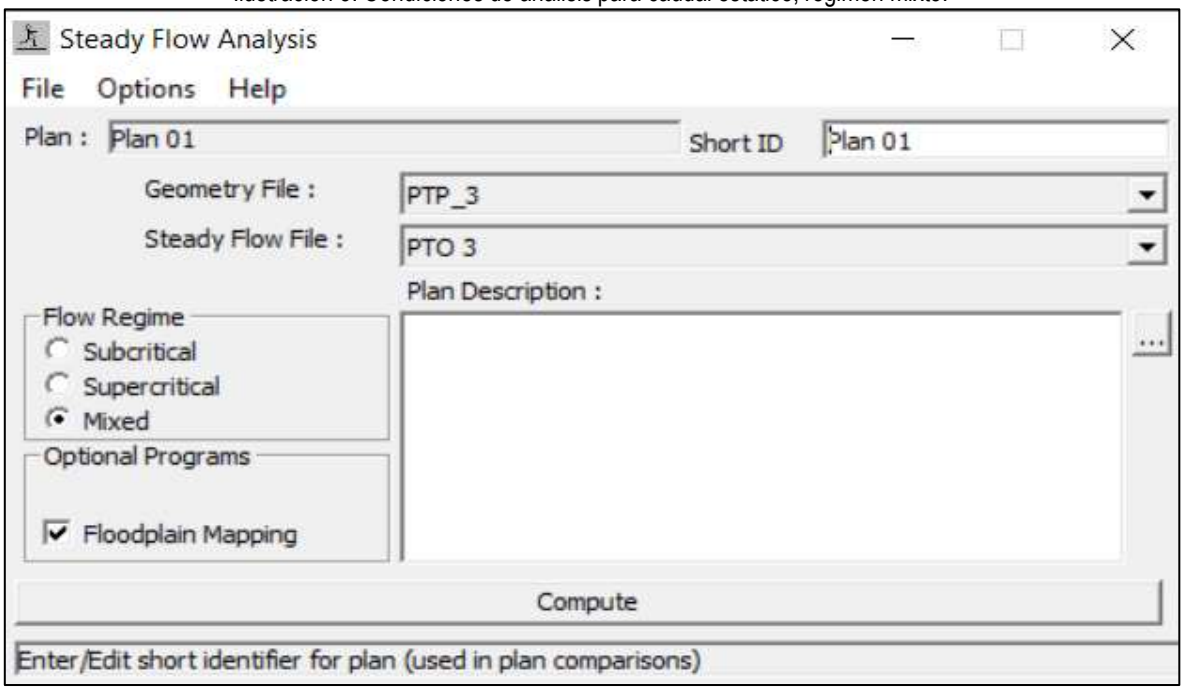
Además, como parámetros con los que se debe entrar a modelar en el software especializado, es necesario tener en cuenta los caudales para los periodos de retorno correspondientes, siendo estos los periodos de cien (100) años y quinientos (500) años.

Ilustración 2. Caudales para los periodos de retorno correspondientes para el Caño Seco.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

Ilustración 3. Condiciones de análisis para caudal estático, régimen mixto.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

1.6. Calibración del modelo hidráulico.

Entendiéndose la calibración como el proceso de comparar los resultados obtenidos en el modelo con respecto a mediciones en campo, sobre el prototipo, y de ser necesario la realización de ajuste de parámetros para lograr la mejor representación posible del fenómeno analizado, en el presente caso debido a la carencia de información de contraste no es posible realizar estrictamente dicho proceso. Sin embargo, si es factible realizar un proceso de "afinamiento" de los modelos hidráulicos, mediante la ponderación de los resultados de las variables profundidad de flujo, la velocidad media del flujo y en número de Froude, lo cual, permite establecer criterios para ajustar los coeficientes de rugosidad y las condiciones de frontera, dígase, aguas arriba y aguas abajo del segmento de estudio.

1.7. Simulación hidráulica para el cauce.

Realizada la implementación de los modelos de análisis hidráulico para el tramo en estudio, a continuación, se presenta la configuración en planta del modelo de análisis hidráulico implementado en HEC-RAS 6.3.1.

La simulación hidráulica se realizará en base al siguiente escenario:

- Simulación del cauce del Caño Seco a la altura del punto de interés ***Punto Crítico 3***, según la superficie del terreno disponible que fue levantada en labores de campo.

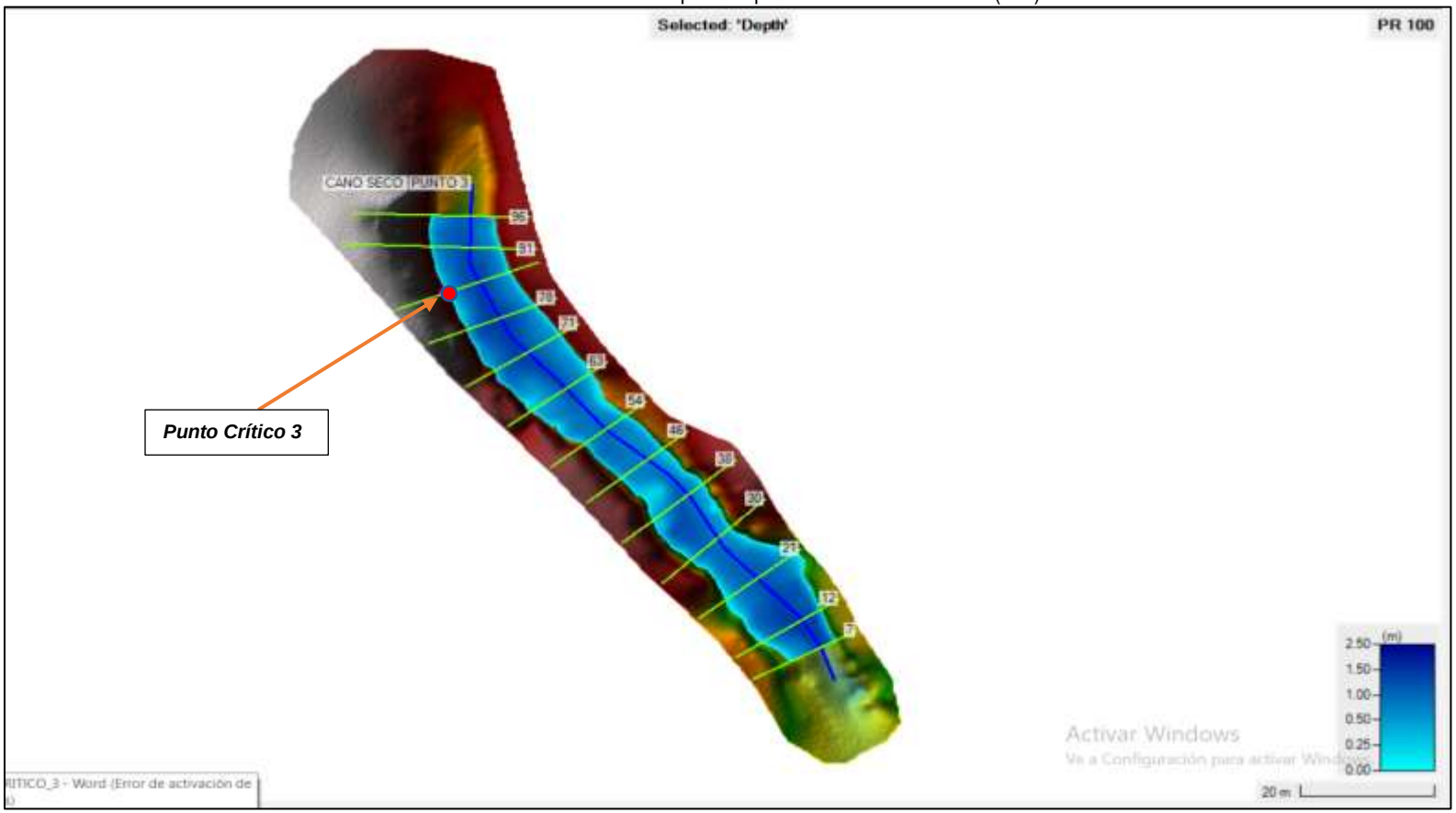
- Se realizó el modelamiento hidráulico para los periodos de retorno de cien (100) años y quinientos (500) años para las condiciones actuales. Las secciones y resultados se presentan a continuación.

1.7.1. Simulación hidráulica para el cauce – Resultados.

Nota: El sentido del flujo del agua es de izquierda a derecha.

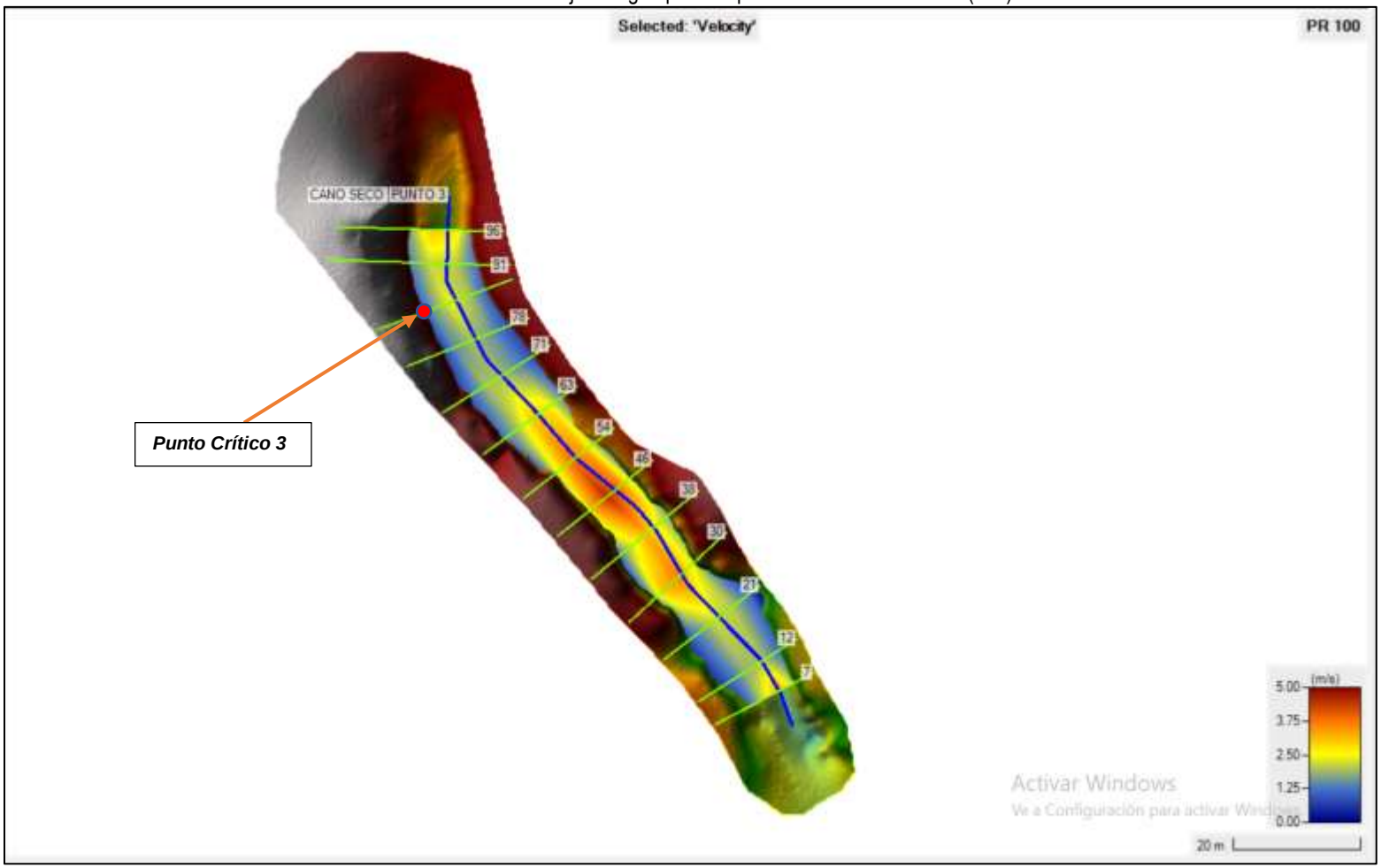
- Tiempo de retorno de cien (100) años.

Ilustración 4. Lamina de inundación para un periodo de retorno de cien (100) años.



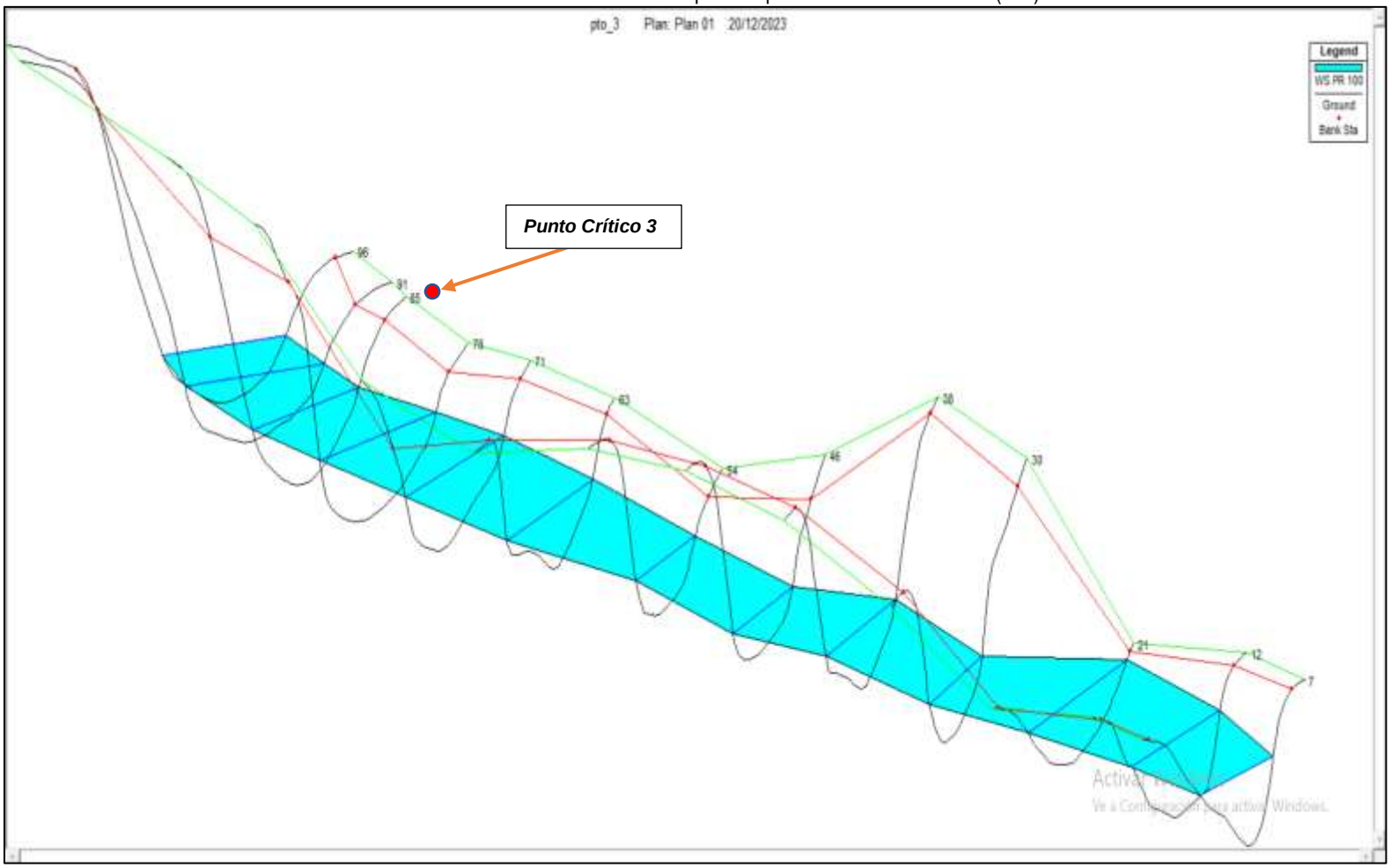
Fuente: Elaboración del autor, 2023.

Ilustración 5. Velocidad del flujo de agua para un periodo de retorno de cien (100) años.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

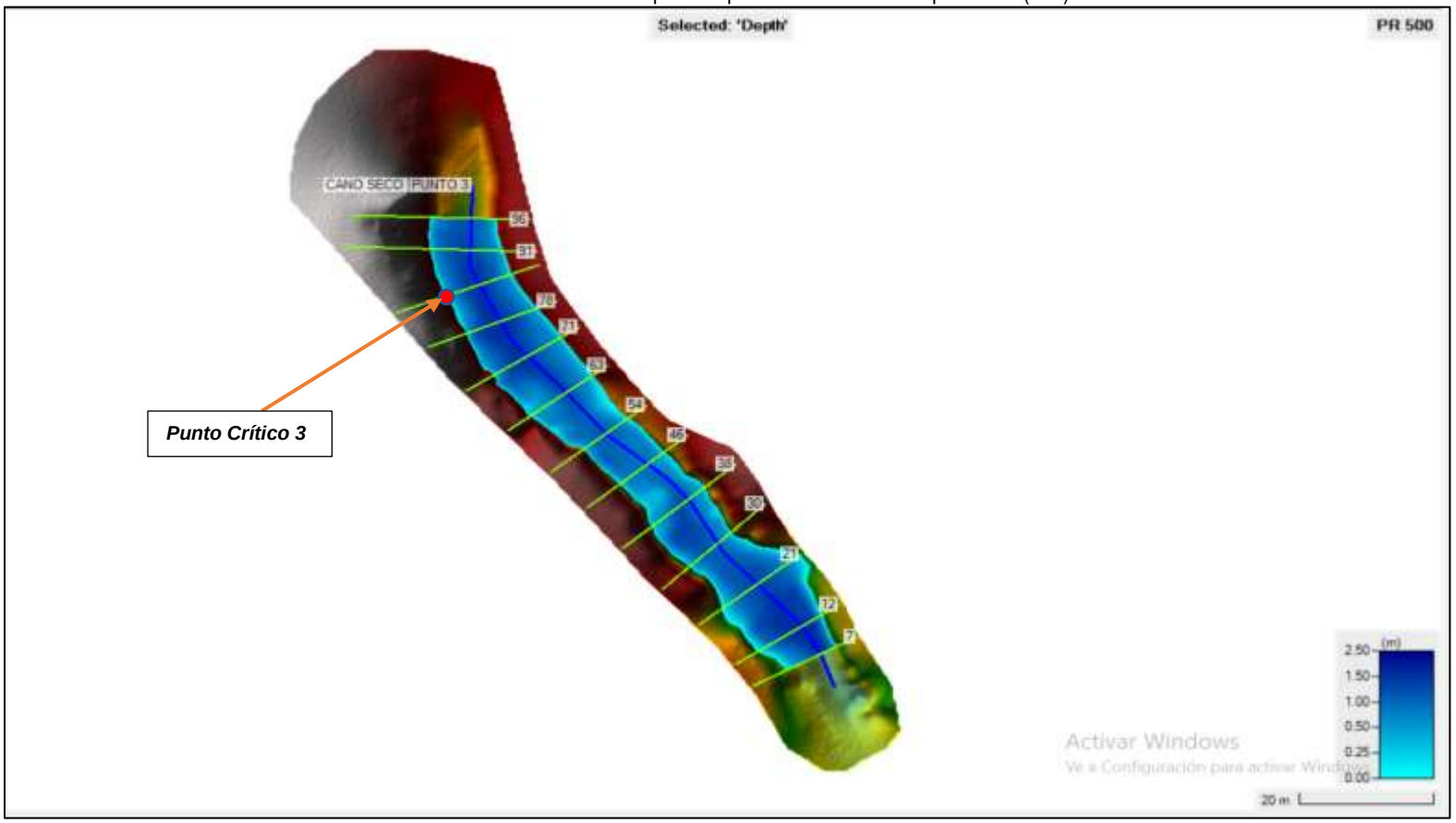
Ilustración 6. Perfil de la lámina de inundación para un periodo de retorno de cien (100) años.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

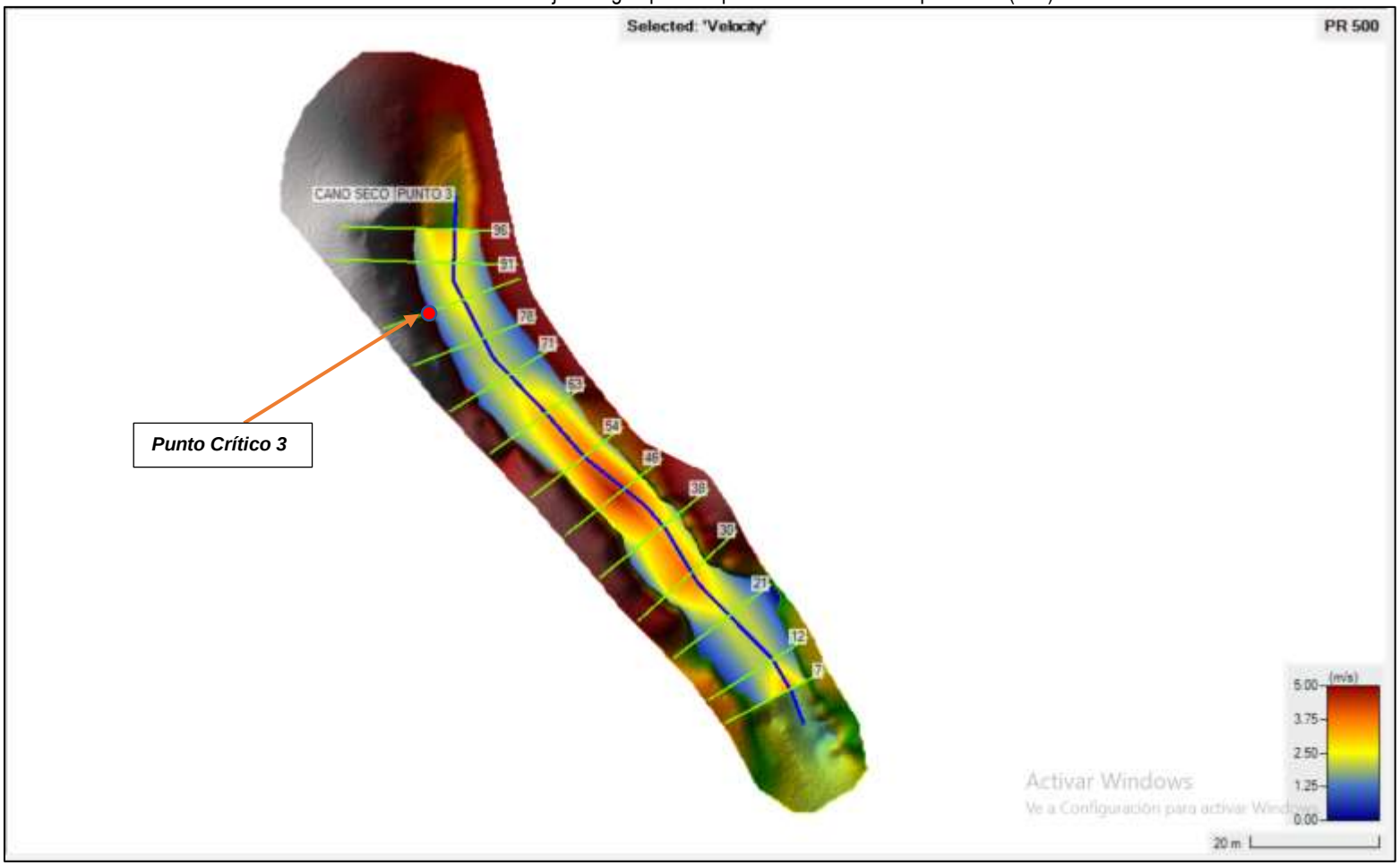
- Tiempo de retorno de quinientos (500) años.

Ilustración 7. Lamina de inundación para un periodo de retorno de quinientos (500) años.



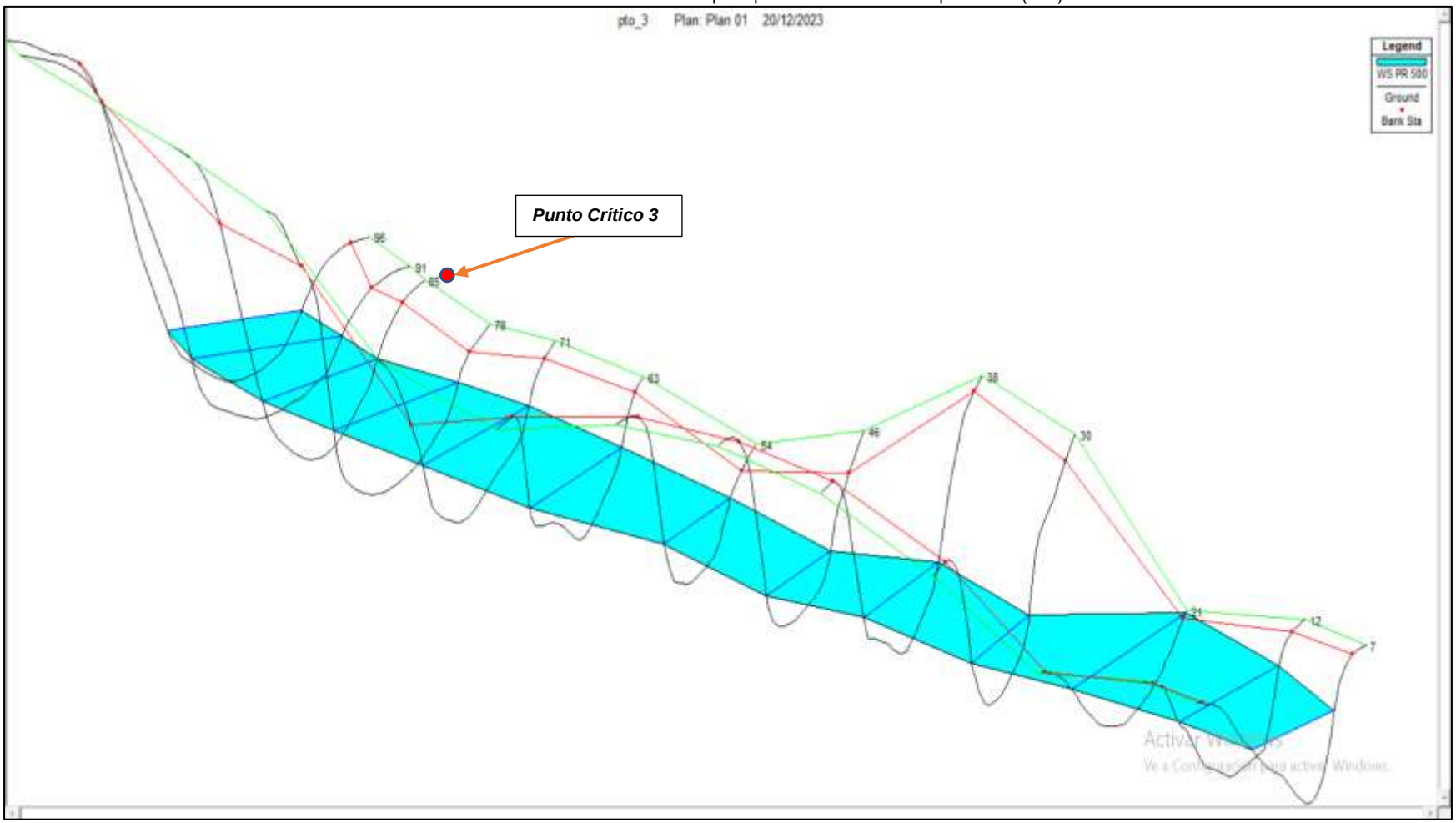
Fuente: Elaboración del autor, 2023.

Ilustración 8. Velocidad del flujo de agua para un periodo de retorno de quinientos (500) años.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

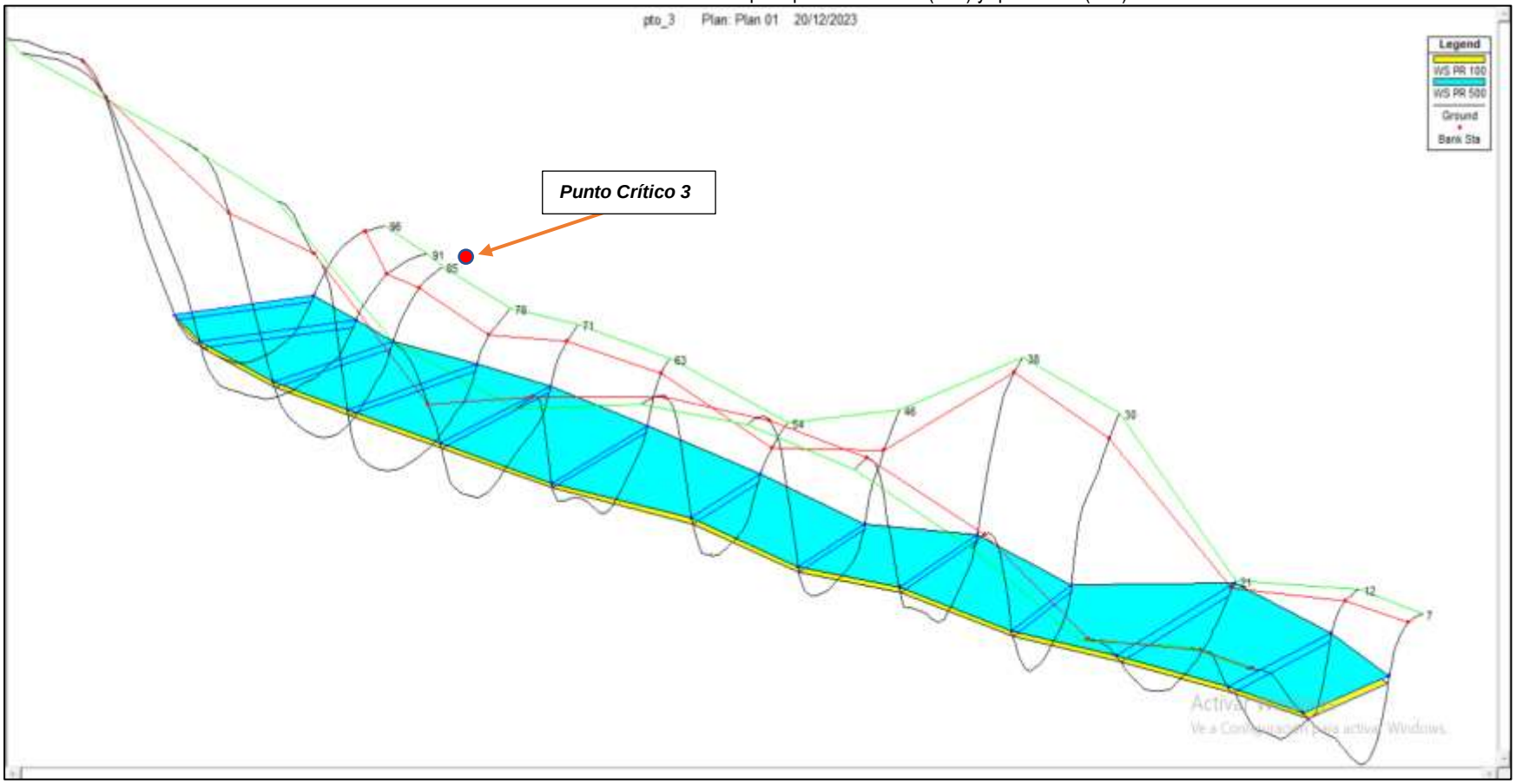
Ilustración 9. Perfil de la lámina de inundación para periodo de retorno de quinientos (500) años.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

- Tiempo de retorno de cien (100) y quinientos (500) años.

Ilustración 10. Perfil de las láminas de inundación para periodo de cien (100) y quinientos (500) años.



Fuente: Elaboración del autor, 2023.

Tabla 4. Resumen general de resultados hidráulicos de la modelación del caudal para 500 años.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: CANO SECO Reach: PUNTO 3 Profile: PR 500 Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
PUNTO 3	96	PR 500	22.80	475.42	476.61	476.61	477.02	0.016895	2.84	8.02	9.74	1.00
PUNTO 3	91	PR 500	22.80	475.31	476.67	476.42	476.89	0.007362	2.11	10.82	10.94	0.68
PUNTO 3	85	PR 500	22.80	475.11	476.61		476.85	0.007450	2.16	10.55	10.32	0.68
PUNTO 3	78	PR 500	22.80	475.06	476.63		476.79	0.004182	1.74	13.10	11.38	0.52
PUNTO 3	71	PR 500	22.80	475.06	476.58		476.75	0.005362	1.86	12.29	11.87	0.58
PUNTO 3	63	PR 500	22.80	475.03	476.29	476.29	476.66	0.017320	2.70	8.44	11.39	1.00
PUNTO 3	54	PR 500	22.80	474.78	475.88	475.99	476.45	0.024740	3.35	6.81	8.52	1.20
PUNTO 3	46	PR 500	22.80	474.44	475.30	475.56	476.16	0.046995	4.10	5.56	8.41	1.61
PUNTO 3	38	PR 500	22.80	474.21	475.48	475.48	475.89	0.017423	2.83	8.07	10.11	1.01
PUNTO 3	30	PR 500	22.80	474.00	475.12	475.22	475.70	0.024842	3.37	6.77	8.40	1.20
PUNTO 3	21	PR 500	22.80	473.84	475.20	474.91	475.37	0.006123	1.83	12.49	14.39	0.62
PUNTO 3	12	PR 500	22.80	473.50	475.16		475.31	0.004294	1.76	12.96	11.24	0.52
PUNTO 3	7	PR 500	22.80	473.22	474.79	474.79	475.24	0.017590	2.99	7.62	8.41	1.00

Total flow in cross section.

Fuente: Elaboración del autor, 2023.

2 SOCAVACION.

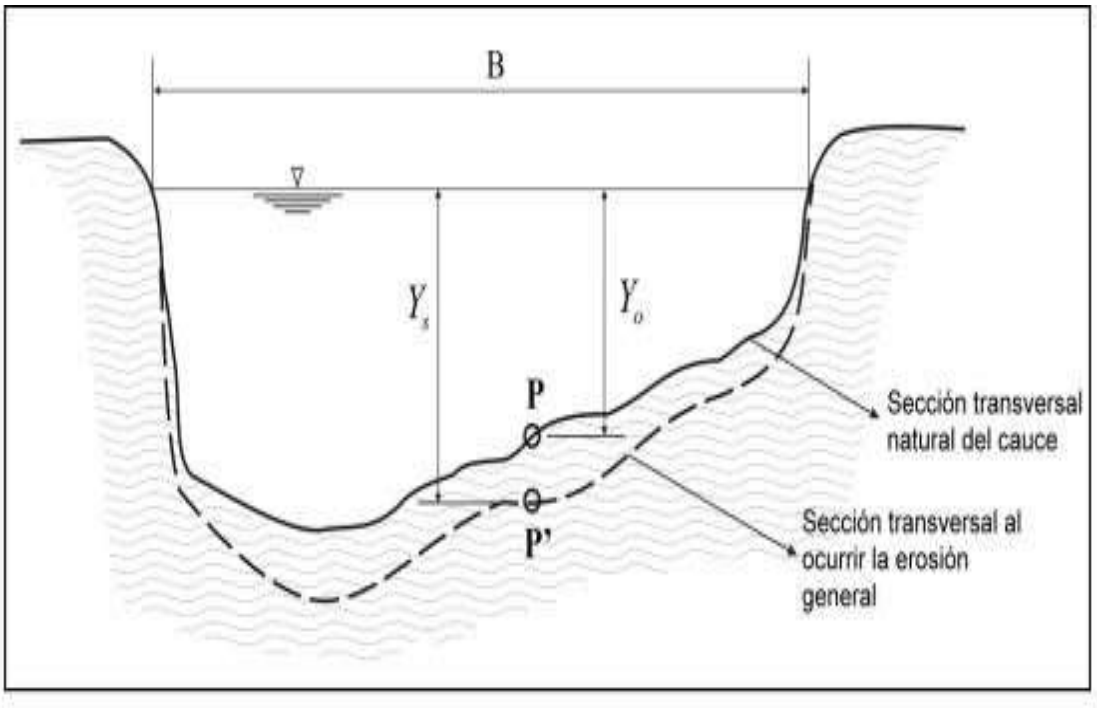
La socavación es la remoción de materiales del lecho de un cauce debido a la acción erosiva del flujo de agua alrededor de una estructura hidráulica. La socavación del fondo de un cauce definido es el producto del desequilibrio entre el aporte sólido que trae el agua a una cierta sección y la mayor cantidad de material que es removido por el agua en esa sección. Los materiales se socavan en diferentes formas: Suelos granulares sueltos se erosionan rápidamente mientras que los suelos arcillosos son más resistentes a la erosión. La profundidad máxima de socavación se alcanza en horas para suelos arenosos, en tanto que puede tardar días en suelos cohesivos, meses en piedras areniscas, años en piedras calizas, y siglos en rocas tipo granito. Es posible que varias crecientes se requieran para que se produzca máxima profundidad de socavación dependiendo del tipo de material[1]. Para un caso de estudio donde se pretenda construir un muro longitudinal varios estudios a nivel investigativo recomiendan que para estimar la socavación en muros longitudinales se pueda emplear la fórmula de LIschtvan – Levediev, pues la presencia de estas estructuras representa una disminución de la sección del cauce y, por lo tanto, implica un aumento de la velocidad de flujo, que es una de las condicione que realizo este auto al proponer la ecuación [2].

El método para estimar la socavación general (contracción), en este estudio es el método Lischtvan – Lebediev, que también se puede emplear para estimar la socavación por contracción en el caso que se vaya a proyectar como se mencionó anteriormente un muro longitudinal, por lo cual el efecto de la contracción no debe adicionarse a los valores de socavación obtenidos. El criterio propuesto por Lischtvan – Lebediev, se basa en la obtención de la condición de equilibrio entre la velocidad media real del flujo y la velocidad media máxima necesaria para no erosionar el material del fondo; La profundidad de socavación en cualquier punto de la sección transversal se obtiene al igualar las ecuaciones de la velocidad real y la velocidad erosiva. Dependiendo del material que conforma el lecho del río, que podría corresponder a suelos de tipo granular o cohesivos, para cada caso se propone una ecuación que permite hallar la profundidad de socavación.

[1] Socavación en Puentes, Parte IV, Capitulo 1 Conceptos Básicos Sobre Socavación, Universidad del Cauca. Ver: http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_PROCESOSFLUVIALES.pdf. Consultada el 10 de octubre de 2016.

[2] Borges, María. Socavación al pie de Muros longitudinales (Trabajo de grado). Tutor: José Eugenio Mora. Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela 2008. Pg. 61 – 93.

Figura 1. Socavación General – Definición de variables.



Fuente: Manual de drenaje INVIAS, 2011.

Para suelos granulares, se tiene la siguiente ecuación:

$$Ys = \left(\frac{a * Yo}{0.68 * ß * \mu * Ø * dm^{0.28}}\right)^{5/3}{}^{\frac{1}{1+Z}}$$

Donde:

- ***YS***: Profundidad del flujo después de ocurrida la socavación. Se mide desde el nivel del agua cuando pasa la creciente, hasta el nivel del fondo del cauce erosionado (m).

- ***Yo***: Profundidad inicial existente en una línea vertical predeterminada de la sección medida desde el nivel del agua cuando pasa la creciente, hasta el nivel del cauce antes del proceso de socavación (m).

- ***α***: Coeficiente de sección.

- ***Qd***: Caudal de diseño asociado al periodo de retorno, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

- ***Ym***: Profundidad media (m).

- ***A***: Área hidráulica (m²).

- ***Be***: Ancho efectivo de la superficie del agua en la sección transversal (m). Nota: Del ancho total se debe descontar el ancho de las pilas cuando el ángulo de incidencia de la corriente con respecto al eje de la pila es 0. En caso de que la corriente forme un ángulo con las pilas, este valor se debe ajustar.

- ***β***: Coeficiente de frecuencia. Este coeficiente toma en cuenta el periodo de retorno T comprendido entre 15 y 1500 años. Para obtener su valor se propone la siguiente expresión: β = 0.7929 + 0.0973 Ln (T).

- **μ:** Coeficiente de contracción. Este valor se toma de la Tabla 5, como una función de la velocidad media del flujo y de la distancia libre entre pilas cuando hay un puente.

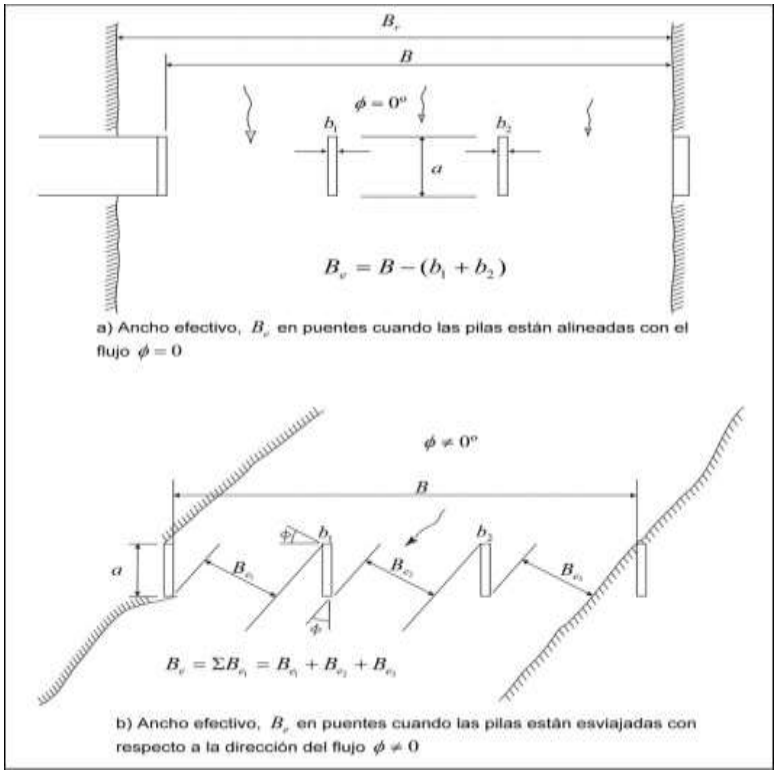
- ***φ***: Coeficiente de corrección por el efecto de la densidad del agua durante la creciente. Para agua clara (clear water) este valor es igual a 1.0. Si la creciente transporta sedimentos en suspensión (lived – bed), este coeficiente se calcula como: ϕ = - 0.54 + 1.5143 γas.

- ***γas***: Peso específico del agua más sedimento, en toneladas por metro cúbico (T/m³).

- ***dm***: Diámetro medio de las partículas del material granular (mm).

- ***Z***: Exponente variable que depende del diámetro medio de las partículas del material granular.

Figura 2. Cálculo del ancho efectivo "Be" en puentes.



Fuente: Manual de drenaje INVIAS, 2011.

Tabla 5. Factor de corrección por contracción del cauce μ.

V (m/s)	LONGITUD LIBRE ENTRE DOS PILAS O ESTRIBOS (m)												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
<1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.0	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.5	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.0	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.5	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
≥ 4.0	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

V = velocidad media en la sección transversal
μ = 1.0 si no hay obstáculos

Fuente: Manual de drenaje INVIAS, 2011.

Para suelos cohesivos, se tiene la siguiente ecuación:

$$Ys = \left(\frac{a * Yo}{0.60 * ß * \mu * Ø * Yd^{0.28}}\right)^{5/3\ \frac{1}{1+x}}$$

Dónde: Los parámetros de ***YS***, ***α***, ***Yo***, ***β***, ***μ***, ***φ*** se definen igual que para suelos granulares.

- **γd:** Peso volumétrico seco del material cohesivo, en toneladas por metro cúbico (T/m³).

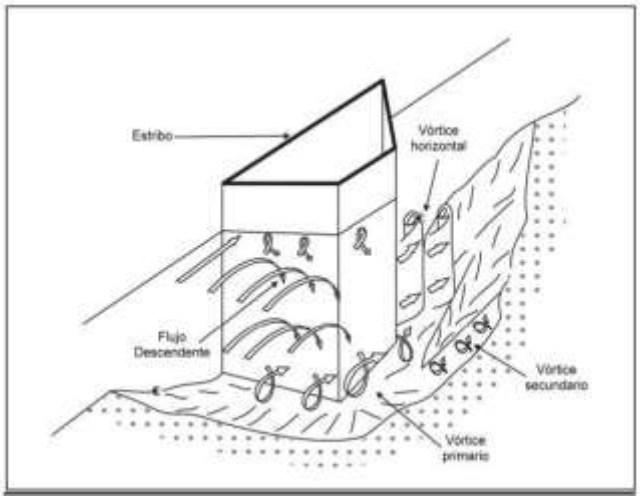
- ***X***: Exponente variable que depende del peso volumétrico seco del material cohesivo. 2 d γ d X = 0.892619 - 0.58073 γ.

2.1 Socavación local.

Las fórmulas de socavación en estribos también pueden ser empleadas para la estimación del fenómeno en muros longitudinales, pues existen similitudes geométricas entre ambos. Usualmente, cuando se diseña un muro longitudinal, la profundidad de cimentación del mismo se establece en base a la profundidad de socavación determinada con las ecuaciones de socavación local en estribos, puesto no existe una fórmula específica para muros aplicada en Colombia.

La socavación local en los estribos ocurre por la presencia de éstos en la sección hidráulica del río (planicie de inundación y cauce principal) y al presentarse la creciente de diseño se contrae la corriente y, por lo tanto, obstruyen el flujo, generando a su alrededor turbulencias que conducen a la formación de una fosa de socavación producida por un vórtice horizontal en el extremo aguas arriba, y desplazándose la fosa hacia aguas abajo causada por un vórtice vertical como se ilustra en la Figura 3.

Figura 3. Patrones de flujo en un estribo.



Fuente: INVIAS MANUAL, 2011.

Para este estudio se aplicó el método Armatanov, donde la profundidad de la socavación se expresa a partir de la siguiente ecuación:

$$Ds = Pa * Pq * Pr * Ho$$

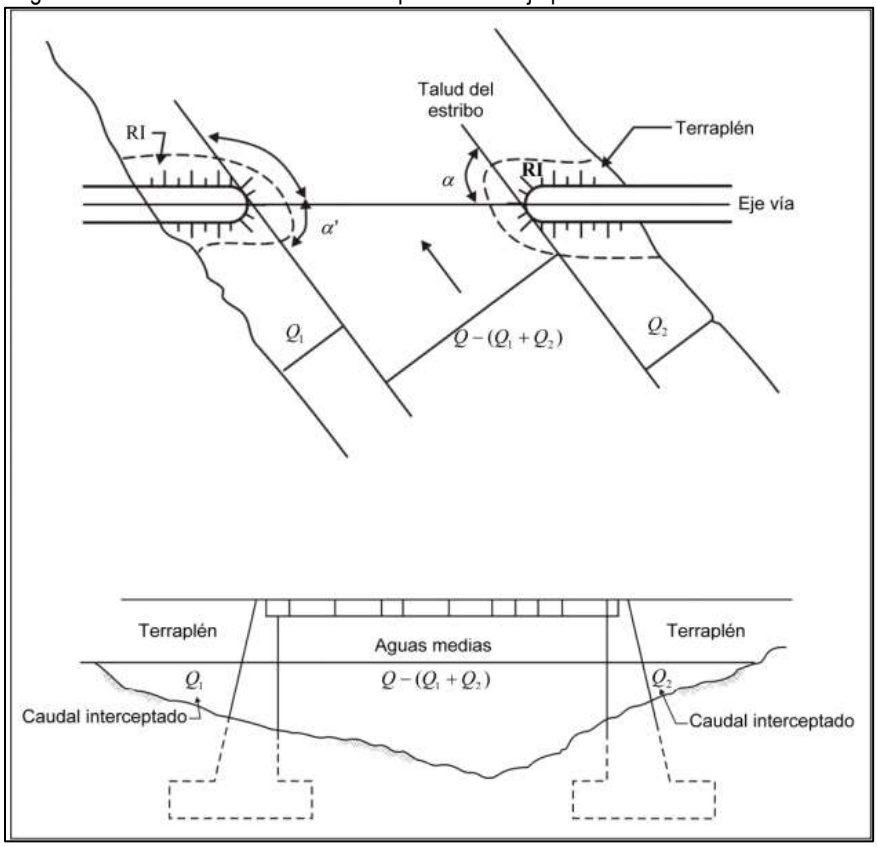
Donde:

- **Ds**: Socavación total al pie del estribo o espigón medida desde la superficie libre del agua, en metros (m).

- **Pα:** Coeficiente que depende del ángulo, α, que forma el eje de la obra con la dirección de la corriente (Tabla 6).

- **Pα:** Coeficiente que depende de la relación Q1/Q, siendo Q1 el caudal que teóricamente pasaría por el lugar ocupado por el estribo si éste no existiera, y Q el caudal que escurre por el río (Tabla 6).

Figura 4. Método de Artamanov. Interceptación de flujo por los estribos dentro del canal.



Fuente: INVIAS MANUAL, 2011.

Tabla 6. Coeficiente de corrección para el cálculo de socavación en estribos y espigones según Artamanov.

Coeficiente Pα, en función del ángulo α								
	α	20º	60º	90º	120º	150º		
	P_α	0.84	0.94	1.00	1.07	1.19		
Coeficiente P_q, en función de la relación de caudales								
Q_1/Q	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
P_q	2.00	2.65	3.22	3.45	3.67	3.87	4.06	4.20
Coeficiente P_R, en función del talud								
	Talud R	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	
	P_R	1.0	0.91	0.85	0.83	0.61	0.50	

Fuente: INVIAS MANUAL, 2011.

2.2 Desarrollo del análisis de socavación.

En el análisis hidráulico se busca determinar el grosor del perfil de la superficie del agua para la creciente de diseño, información a partir de la cual se establece para este estudio en particular las distribuciones del flujo y la velocidad para la estimación de la socavación potencial y con ello la cota de cimentación de la infraestructura existente, según corresponda.

Una vez obtenido el caudal de la máxima creciente para el periodo de retorno de 500 años, dígase ***22.8 m³/s***, se procede a realizar la modelación hidráulica, con las hipótesis adoptadas y los datos aportados por el levantamiento topográfico del segmento de estudio, siendo estos aproximadamente 134 metros de terreno, comprendidos aguas arriba y aguas arriba de donde se localiza el sitio de interés ***Punto Crítico 3***. Para la modelación se emplea el programa HEC RAS, y a partir de la geometría del cauce a estudiar y el caudal obtenido en HEC HMS para la cuenca de estudio, podemos obtener la extensión de la lámina de agua y la altura de la misma en el cauce.

Nota: Para poder complementar el estudio de socavación se necesitaba realizar un estudio de suelos que pudiera determinar la granulometría presente en el punto de interés. Al carecer del mismo, se optó por elegir un diámetro teórico de las partículas removibles que se encuentran en el lecho del cauce estudiado, dígase, cuenca Caño Seco.

A continuación, se presenta la sección transversal analizada para el estudio de socavación general:

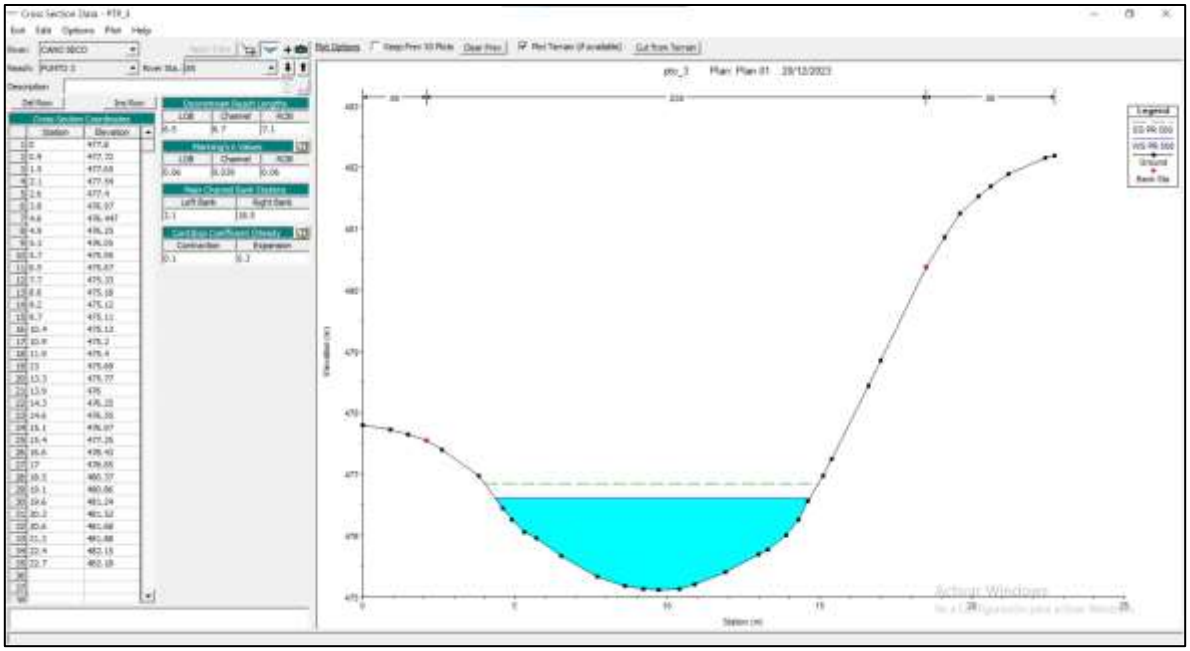
Tabla 7. Secciones transversales analizadas.

SECCIONES
85

Fuente: Elaboración del autor, 2023.

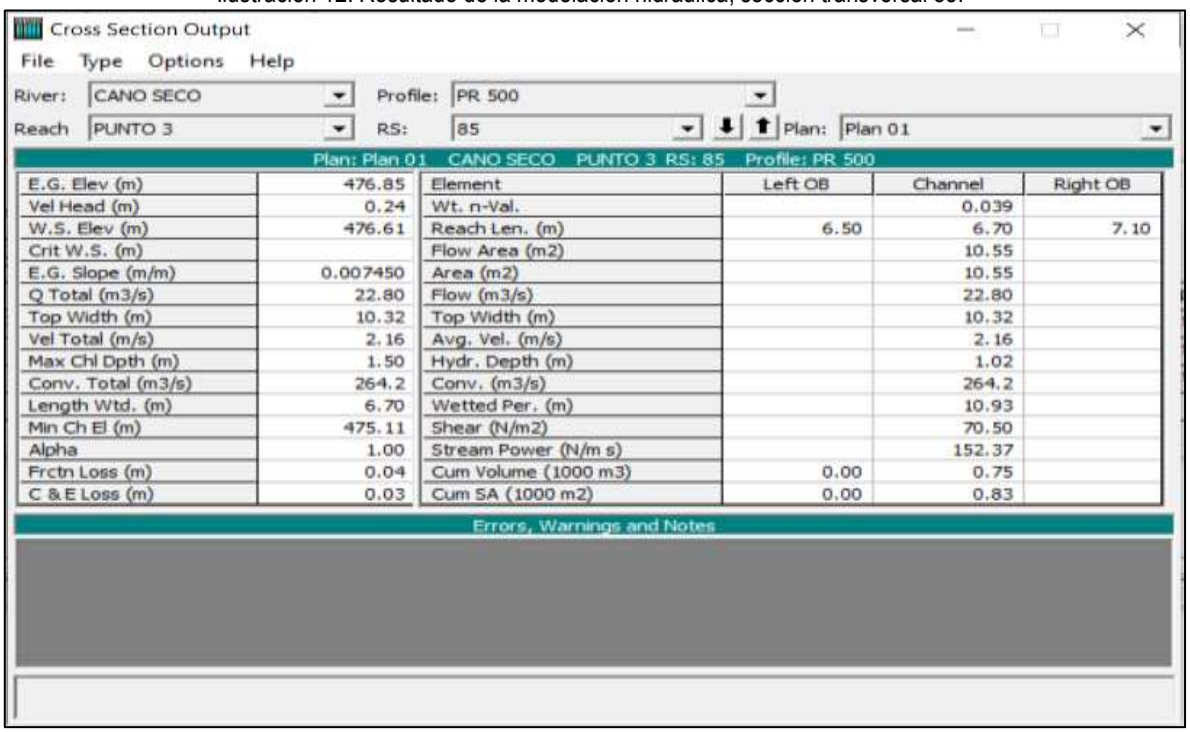
Habiendo seleccionado el segmento transversal a analizar, a continuación, se presentan los resultados de la socavación en este corte, pues es donde se localiza el ***Punto Crítico 3.***

Ilustración 11. Sección transversal 85.



Fuente: Elaboración del autor, 2023 y HEC RAS 6.3.1.

Ilustración 12. Resultado de la modelación hidráulica, sección transversal 85.



Fuente: Elaboración del autor, 2023 y HEC RAS 6.3.1.

Tabla 8. Calculo de la socavación general, sección transversal 85.

A.- Cálculo de la socavación general (aplica para contracción) en el cauce:			
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**OBSERVACION**
Qd = Caudal de diseño	22.80	m3/seg	Resultado de la modelaciónhidráulica Tr=500 años
Be = Ancho efectivo de la superficie de agua	10.00	m	
Yo = Tirante antes de la erosión	1.02	m	Resultado de la modelaciónhidráulica Tr=500 años
Vm = Velocidad media en la sección	2.16	m/seg	Resultado de la modelaciónhidráulica Tr=500 años
μ = Coeficiente de contracción. Ver tabla N° 22	1.00		Sin obstáculos
γ_d = Peso específico del suelo del cauce	1.20	Tn/m3	Resultado de ensayos (estudio geotécnico)
dm = Diámetro medio	25.00	mm	Resultado de ensayos (estudio geotécnico)
γ_{as}= Coeficiente de corrección	0.05	Tn/m3	Resultado de ensayos (estudio geotécnico)
ϕ= Coeficiente de corrección	0.62	0.616	live-bed
z = Exponente variable. Ver tabla Nº 2	0.319		

Tr = Periodo de retorno del gasto de diseño	500	años	
b = Coeficiente que depende de la frecuencia del caudal de diseño. Ver tabla Nº 3	1.05		
A= área de la sección hidráulica	10.56	m2	
Hm = Profundidad media de la sección	1.02	m	
a =	2.206		

Fuente: Elaboración del autor, 2023

Tabla 9. Determinación del perfil de socavación general - método Lischtvan - Lebediev y Local Método K. F. Artamonov, sección transversal 85.

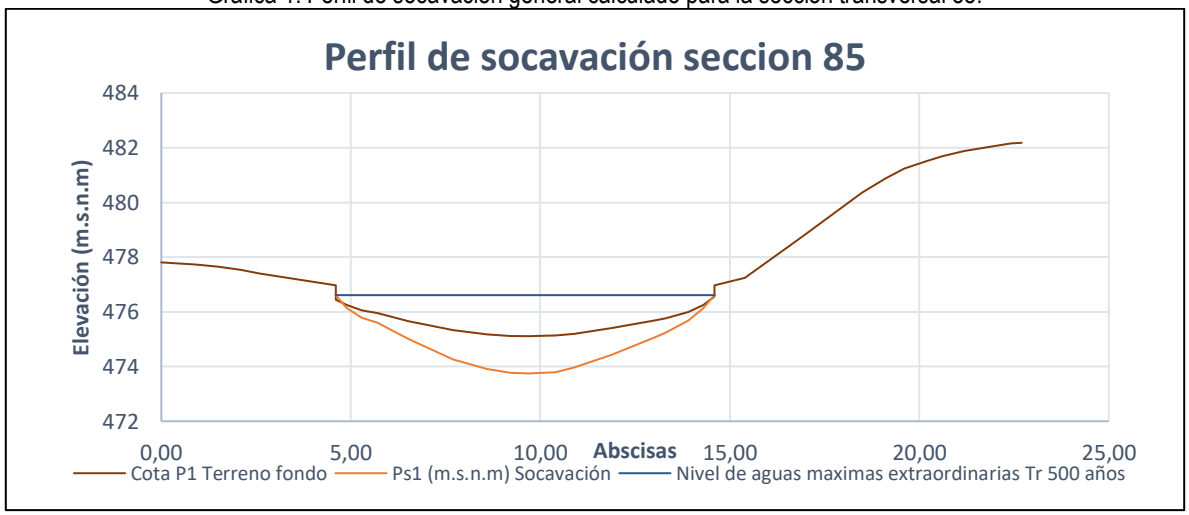
CAÑO SECO – PUNTO CRITICO 3							
Determinación del perfil de socavación general - método Lischtvan - Lebediev y Local Método K. F. Artamonov							
Nivel de aguas máximas extraordinarias Tr 500 años			476.61 m.s.n.m				
P1	**Cota P1 Terreno**	**Yo1 (m)**	**Ys1 (m)**	**Sg1 (m)**	**St1 (m)**	**Socavación total (m)**	**Ps1 (m.s.n.m) Socavación**
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
0.00	477.8						
0.90	477.72						
1.50	477.65						
2.10	477.54						
2.60	477.4						
4.60	476.97						
4.60	476.447						476.610
4.90	476.25	0.360	0.472	0.112	1.031	1.143	476.138
5.30	476.05	0.560	0.824	0.264	1.603	1.868	475.786
5.70	475.95	0.660	1.015	0.355	1.890	2.244	475.595
6.50	475.67	0.940	1.586	0.646	2.692	3.338	475.024
7.70	475.33	1.280	2.343	1.063	3.665	4.728	474.267
8.60	475.18	1.430	2.695	1.265	4.095	5.359	473.915
9.20	475.12	1.490	2.838	1.348	4.266	5.615	473.772
9.70	475.11	1.500	2.862	1.362	4.295	5.657	473.748
10.40	475.13	1.480	2.814	1.334	4.238	5.572	473.796
10.90	475.2	1.410	2.647	1.237	4.037	5.274	473.963
11.90	475.4	1.210	2.182	0.972	3.465	4.437	474.428
13.00	475.69	0.920	1.544	0.624	2.634	3.258	475.066
13.30	475.77	0.840	1.376	0.536	2.405	2.941	475.234
13.90	476	0.610	0.919	0.309	1.747	2.055	475.691
14.30	476.25	0.360	0.472	0.112	1.031	1.143	476.138

CAÑO SECO – PUNTO CRITICO 3							
Determinación del perfil de socavación general - método Lischtvan - Lebediev y Local Método K. F. Artamonov							
14.60	476.55						476.610
14.60	476.97						
15.40	477.25						
16.60	478.43						
17.00	478.85						
18.50	480.37						
19.10	480.86						
19.60	481.24						
20.20	481.52						
20.60	481.68						
21.20	481.88						
22.40	482.15						
22.70	482.18						

Fuente: Elaboración del autor, 2023

Tras la compilación de datos de la Tabla 8 y Tabla 9, ahora, se grafica el siguiente perfil de socavación general para la sección transversal 85.

Grafica 1. Perfil de socavación general calculado para la sección transversal 85.



Fuente: Elaboración del autor, 2023

De esta manera y gracias a la Grafica 1 se puede realizar el siguiente resumen de la socavación general encontrada en la sección transversal 85.

Tabla 10. Resumen de la socavación general de la sección transversal 85.

SECCIONES	Socavación general (m)		
	Mínima	Promedio	Máxima
85	0,11	0,77	1,36

Fuente: Elaboración del autor, 2023

3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A continuación, se citan y recogen las conclusiones y recomendaciones entorno al estudio hidráulico de la cuenca Caño Seco, a la altura del ***Punto Crítico 3***.

- En este trabajo se estimó la socavación del lecho en un segmento de la cuenca Caño Seco a la altura del ***Punto Crítico 3***, para la elaboración y promoción de estrategias de gestión del riesgo que puedan llegar a afectar a tanto a las comunidades como a las estructuras civiles que estén colindantes a esta zona cuando se presentan temporada de lluvias.

- La modelación hidráulica del cauce y los resultados contenidos se hizo teniendo como premisa un periodo de retorno máximo de 500 años, según lo requerido por las normativas internacionales como la Asociación Americana de Oficinales de Carreteras Estatales y Transportes (ASSTHO) y el departamento de transporte de Estados Unidos.

- El levantamiento topográfico del proyecto logró definir las curvas de nivel y el inicio de las curvas de batimetria lo cual que permitió generar un DTM y extraer de él los perfiles transversales que fueron utilizados en los resultados, y que, con la información de caudales, permitió visualizar las zonas de inundación del proyecto.

- Las modelaciones hidráulicas realizadas sobre los periodos de retorno de cien (100) años y quinientos (500) años, véase numeral 1.7.1 "***Simulación hidráulica para el cauce – Resultados***", y sus subsecuentes láminas de inundación, permiten concluir que el cauce de la cuenca Caño Seco NO presenta una inundación más allá de las márgenes que contienen el cuerpo de agua, es decir, no se prevé que el Caño Seco inunde o sobrepase su cauce natural en el segmento de terreno donde se levantó la información topográfica y por ende alcance o inunde el ***Punto Crítico 3***.

- La socavación general en la sección transversal 85, es decir, donde se localiza el ***Punto Crítico 3***, alcanzó un máximo de **1.40 metros (PR 500 años)**, por lo que será deber de las autoridades de gestión del riesgo del municipio actuar en consecuencia para evitar la

afectación de infraestructura aledaña a esta zona y ser punto de partida para el diseño de futuras obras de mitigación.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Manual de drenajes para carreteras. Capitulo dos, hidrología de drenaje superficial. Diciembre de 2009; COLOMBIA.

- ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA EL SECTOR HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA EL DIAMANTE, MEDIANTE MODELACIÓN CON HEC-HMS. Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2017 – COLOMBIA.

- ESTUDIO DE SOCAVACIÓN PARA UN SECTOR AGUAS ARRIBA DE LA BOCATOMA DE LA QUEBRADA PALMACHALA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VALPARAISO-ANTIOQUIA. Estudio, Chávez Henao Luis Alberto- Vergara Gonzales Yesenia. Enero de 2014.

- MANUAL DE DISEÑO Y FUENTE DE PEQUEÑAS PRESAS. Método NRCS. Segunda edición abril de 2011, URUGUAY.

- VEN TE CHOW, HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS. BOGOTÁ: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A, 1994.

- VEN TE CHOW, HIDROLOGÍA APLICADA. BOGOTÁ: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A, 1994.

- HUDSON, N., 1982. “CONSERVACIÓN DE SUELO” REVERTE, 335 PP.

- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. (COORD.), 1994. “RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE CUENCAS” MUNDI PRENSA –TRAGSA, 902 PP.

- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. (COORD.). 2003. “LA INGENIERÍA EN LOS PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN” GRUPO TRAGSA, 1045 PP.

- OCHOA RUBIO, T. (2017). Hidrología, Hidráulica y Socavación en puentes. Bogotá: ECOE.
- SOCAVACION AL PIE DE MUROS LONGITUDINALES. Trabajo de grado, Universidad De los Andes, Mérida, 2008 – Venezuela.

- SUÁREZ DÍAZ, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga - Colombia: UIS.

- SCHWAB, G.O. - FREVERT, R.K. - EDMINSTER, T.W. "INGENIERÍA DE CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUAS", ED. LIMUSA, 570 PP

- US ARMY CORPS OF ENGINEERS; (enero 2001). HEC-RAS, Technical Reference Manual. USA.

- VELEZ UPEGUI, J. J., BOTERO HERNÁNDEZ, B. A., PARRA TORO, J. C., ARISTIZÁBAL MURILLO, V. M., & MARULANDA AGUIRRE, A. (2013). Diseño Hidráulico e Hidrológico de obras de ingeniería para proyectos viales. Manizales: Universidad Nacional.