



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

**REVISIÓN DEL DISEÑO DE ESPIGONES PARA LA PROTECCIÓN DE MÁRGENES EN
CURVAS CON MODELOS NUMÉRICOS 1D Y 2D**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HUGO RUBÉN BRISEÑO GARCÍA

TUTOR:
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, México D.F. Junio de 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar
Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón
Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús
1^{er}. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.
2^{do}. Suplente: M.I. Franco Víctor

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

FIRMA

*Adquiere sabiduría, adquiere
inteligencia;
No te olvides ni te apartes de las
razones de mi boca;
No la dejes, y ella te guardará;
Amala, y te conservará.
Sabiduría ante todo; adquiere
sabiduría;
Y sobre todas tus posesiones
adquiere inteligencia.
Engrandécela, y ella te
engrandecerá;
Ella te honrará, cuando tú la
hayas abrazado.
Adorno de gracia dará a tu
cabeza;
Corona de hermosura te
entregará.*

Salmo 4: 5-9

A mi madre.

Gracias por todo el amor que me da, el cual es como un sol brillante que no deja de arder, nunca tendré como pagarle todo lo que ha hecho por mí.

LA AMO.

A mi padre.

Te agradezco por todas las enseñanzas, los consejos, las anécdotas de vida y apoyarme en los momentos difíciles. TE AMO.

A mi hermana.

Tú has sido uno de mis mayores ejemplos, a pesar las tempestades de la vida has salido adelante y no te has rendido. Eres mi hermanita hermosa y te agradezco el estar conmigo cuando te necesito. TE AMO

A mis Sobrinas.

Ustedes son la fuerza de mi corazón.

En ustedes está el futuro, en niñas como ustedes está la esperanza de un mundo mejor.

Gracias por todo su cariño, no me alcanzan las palabras para decirles cuánto

LAS AMO.

A mis familiares y amigos.

Gracias por formar parte de mi existencia, por compartir su tiempo y cariño conmigo. No son mencionados sus nombres, pero siempre los llevo en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

*Por ser mi segunda casa y brindarme una educación de calidad. Por ser
“ORGULLOSAMENTE UNAM”*

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez.

*Por aceptar ser mi tutor durante esta etapa, por las enseñanzas, apoyo para
lograr la culminación de este trabajo y sobre todo, por compartir sus
conocimientos conmigo.*

Al Ing. Teodolfo Martínez Toledano.

*Por todo el apoyo que me ha otorgado durante estos años, por brindarme su
amistad, confianza y conocimientos.*

A los sinodales y profesores.

*Gracias por compartir su conocimiento en las aulas, por su labor docente, la
cual es invaluable.*

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Por el apoyo económico otorgado para la realización de este posgrado

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. CRITERIOS DE DISEÑO DE ESPIGONES	3
II.1 <i>Criterio de la Universidad Estatal de Colorado</i>	3
II.2 <i>Criterio de la Estación de Experimentos en Cursos de Agua del Laboratorio de Hidráulica del Cuerpo de ingenieros de la Armada de los Estados Unidos</i>	11
II.3 <i>Criterio del Departamento de Transporte de los Estados Unidos</i>	16
II.4 <i>Recomendaciones generales de la FHWA en el manual “Highways in the river environment”</i>	21
II.5 <i>Criterio del Manual de Ingeniería de Ríos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Comisión Nacional del Agua</i>	23
III. CASO DE ESTUDIO. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA SOCAVACIÓN EN EL RÍO LA SABANA	35
IV. PROPUESTA DEL DISEÑO DE ESPIGONES EN LA MÁRGEN DE UNA CURVA DEL RÍO LA SABANA	43
V. REVISIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE UN MODELO 1D (HEC-RAS)	47
VI. REVISIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE UN MODELO 2D (IBER)	57

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
BIBLOGRAFÍA Y REFERENCIAS	83
ANEXO A. SECCIONES PARA CREAR LA GEOMETRÍA DEL RÍO LA SABANA EN EL MODELO 1D HEC-RAS	85
ANEXO B RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LAS SIMULACIONES EN EL MODELO NUMÉRICO 1D HEC-RAS	93
ANEXO C. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LAS SIMULACIONES EN EL MODELO NUMÉRICO 2D IBER	97
ANEXO D. IMÁGENES DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE EN EL MODELO IBER PARA EL TRAMO EN ESTUDIO	103

I. INTRODUCCIÓN

Para evitar la erosión de las márgenes de un río se pueden utilizar técnicas como la construcción de espigones, la cual ha permitido estabilizar las márgenes e incrementar el hábitat acuático (Davinroy *et al.* 1998).

Los espigones han sido usados alrededor del mundo como estructuras que también favorecen la navegación, mejoran el control de inundaciones y protegen las orillas de los ríos.

Un espigón es definido como una estructura de obstrucción lineal que se proyecta de la orilla de un cauce hacia el centro, alterando la velocidad y dirección del flujo. Puede ser permeable, para que una cierta cantidad de agua pase a través de él como un reductor de velocidad; o ser impermeable bloqueando todo el flujo.

Los espigones son fabricados de materiales permanentes como concreto, mampostería, tierra, roca, madera, gaviones y acero; o de materiales temporales tales como matorrales o maleza. Se pueden construir en ángulo recto con respecto la orilla o la corriente; o inclinados hacia aguas arriba o aguas abajo. Un efecto del espigón es disminuir la velocidad del flujo a lo largo del cauce, con lo cual, se reduce la capacidad de erosión en el río y en algunos casos se induce la sedimentación de partículas entre los espigones.

Aunque los espigones han resultado ser una alternativa viable a los métodos tradicionales, como revestimientos con la técnica Rip-Rap, no ha sido creada una guía de diseño hidráulica estándar; por lo que los diseños están basados en experiencia y juicio ingenieril dentro de un área geográfica específica (Copeland *et al.* 1983, Felizardo *et al.* 2006, Youngblood *et al.* 2012). Esto es debido principalmente al amplio rango de variables que afectan el desempeño o comportamiento y a la importancia de estas variables en aplicaciones específicas.

En general, entre los parámetros que afectan el diseño de espigones están: ancho, profundidad, velocidad y sinuosidad del canal; tamaño y velocidad de transporte de sedimentos; cohesión de las orillas del cauce; y el largo, ancho, perfil de la cresta, ángulo de orientación y espacio entre espigones.

Se requiere de la observación de las condiciones hidráulicas del río para una planeación y diseño efectivos, donde una inadecuada información hidrológica y del río puede originar errores. Esto es debido a que no se puede representar la información de las secciones del río por falta de instrumentación y otros recursos. Como alternativa, se puede experimentar en un laboratorio el fenómeno en la corriente.

Para obtener información sobre las secciones del río se puede recurrir a imágenes satelitales, en donde, las características físicas del prototipo sólo pueden ser replicadas, en cierta medida, mediante un modelo hidráulico; calibrándolo con información de las condiciones del sitio.

En este trabajo se realizó la revisión del diseño de un sistema de espigones mediante modelos numéricos en una y dos dimensiones (1D y 2D)

Para proteger la margen de una curva en el río la Sabana de una falla por socavación, la propuesta inicial de diseño se basó en una revisión de la literatura pertinente, en la cual se encuentran criterios de diseño desarrollados por diferentes autores e instituciones, de los cuales se tienen ecuaciones y recomendaciones basadas en la experiencia.

La configuración del sistema de espigones obtenida mediante la aplicación de los criterios de diseño se analizó con el software HEC-RAS, para el caso de la modelación unidimensional y con el modelo IBER, para el caso bidimensional.

Se analizaron también diferentes configuraciones de los espigones, esto con el fin de conocer si de los resultados obtenidos, el diseño generado con los criterios y recomendaciones de construcción de espigones fue el más apropiado para el funcionamiento hidráulico del cauce y en la disminución de la altura de socavación de la margen de la curva de estudio.

II. CRITERIOS DE DISEÑO DE ESPIGONES

II.1 Criterio de la Universidad Estatal de Colorado.

Este criterio está basado en el análisis de un modelo físico del Río Grande, ubicado en Nuevo México, Estados Unidos; el cual simula las características geométricas de dos curvas encontradas en el tramo de estudio: la curva Cochiti, ubicada aguas arriba y la curva San Felipe, aguas abajo (figura 2.1). Se generaron cuatro diferentes diseños de espigones y se probaron en el laboratorio para la topografía del lugar: 1) un diseño reductor de flujo-velocidad mínimos para la curva aguas arriba, 2) un diseño reductor de flujo-velocidad máximos para la curva aguas arriba, 3) un diseño reductor de flujo-velocidad mínimos para la curva aguas abajo, 4) un diseño reductor de flujo-velocidad máximos para la curva aguas abajo. El diseño de los espigones corresponde a las variaciones de flujo-velocidad en pruebas de laboratorio, en un modelo físico, con una geometría en la sección de forma trapecial y representando la configuración de las curvas en estudio. Se evaluaron seis configuraciones de prueba usando los cuatro diseños mencionados. Se midieron elevaciones de la superficie del agua, velocidades del flujo y el esfuerzo cortante en la frontera en los lugares específicos para cada configuración (Youngblood *et al.* 2012).

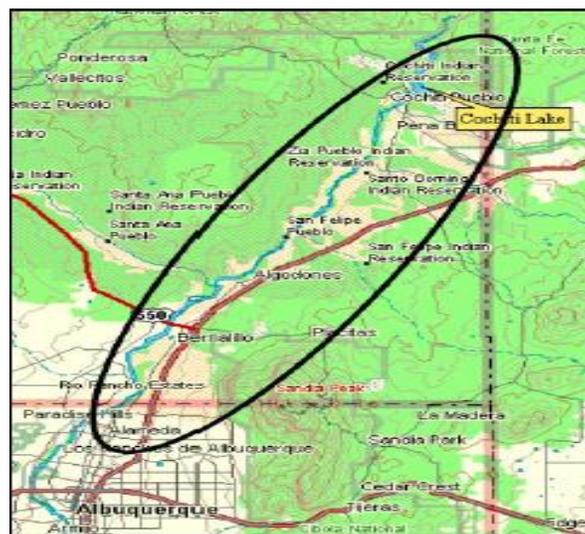


Figura 2.1 Tramo en estudio del Río Grande

Diseño de los espigones.

Los espigones fueron diseñados conforme a la topografía del lugar usando procedimientos similares a los usados para el diseño de espigones en un modelo prismático. Estas formas de diseño difieren en las variaciones de la geometría de la sección.

Diseño de espigones en geometría prismática.

La premisa del procedimiento es aquella en la cual la relación de separación y el porcentaje de área bloqueada gobiernan el diseño de los espigones. La relación de separación es definida como la longitud del arco entre los espigones dividida por la longitud de los espigones, la cual es calculada con la ecuación 2.1:

$$SR = \frac{L_{arc}}{L_w} \quad ec. 2.1$$

Donde:

SR = Relación de separación

L_{arc} = Longitud del arco entre espigones

L_w = Longitud del espigón

En la figura 2.2 se representan las variables de la ecuación 2.1.

La longitud de los espigones es el resultado de un cálculo de área de flujo bloqueado. Heintz (2002) menciona que la relación de separación es una herramienta útil para el diseño porque puede ser afín a la curvatura relativa de la curva, la cual es mostrada por la derivación final, ecuación 2.2. Esto es importante debido a que la curvatura relativa de la curva es afín a las velocidades de migración y a la geometría. Las longitudes de los espigones para diseños prismáticos fueron constantes en cada diseño debido a la geometría uniforme de la sección.

$$SR = R_C \frac{\theta_w}{L_r} \quad ec. 2.2$$

Donde:

R_c = Curvatura relativa

θ_w = Angulo entre espigones

L_r = Proporción de la longitud de la estructura

La curvatura relativa puede ser determinada usando la ecuación 2.3.

$$R_c = \frac{r}{TW} \quad \text{ec. 2.3}$$

Donde:

r = Radio de curvatura

TW = Ancho del canal en la superficie

La proporción de longitud de la estructura es descrita por la ecuación 2.4.

$$L_r = \frac{L_w}{TW} \quad \text{ec. 2.4}$$

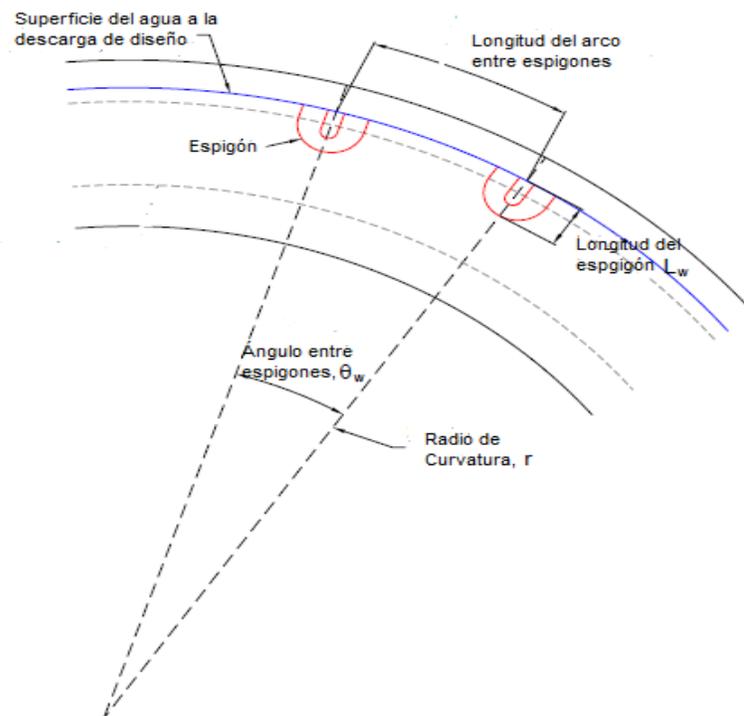


Figura 2.2 Descripción de las variables de la relación de separación (modificada por Heintz, 2002)

Cuando se diseñan espigones con ángulos en planta, diferentes de 90°, perpendiculares al flujo, la longitud proyectada del espigón es usada para definir la relación de separación, como se define en la ecuación 2.5. En la figura 2.3 se muestra un esquema de la longitud proyectada del espigón.

Los ángulos en planta incrementan de aguas arriba hacia aguas abajo mediante una línea tangencial dibujada a la orilla del río, como se presenta en la figura 2.4.

$$SR = \frac{L_{arc}}{L_{w,proj}} \quad ec. 2.5$$

Donde:

$L_{w,proj}$ = Longitud proyectada del espigón en la sección perpendicular al flujo

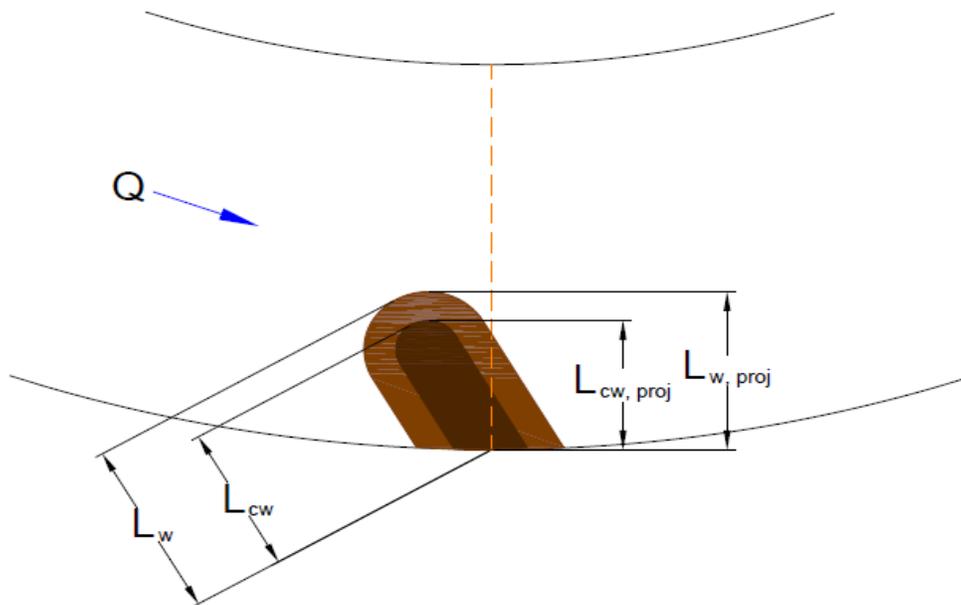


Figura 2.3 Vista en planta de la longitud proyectada del espigón

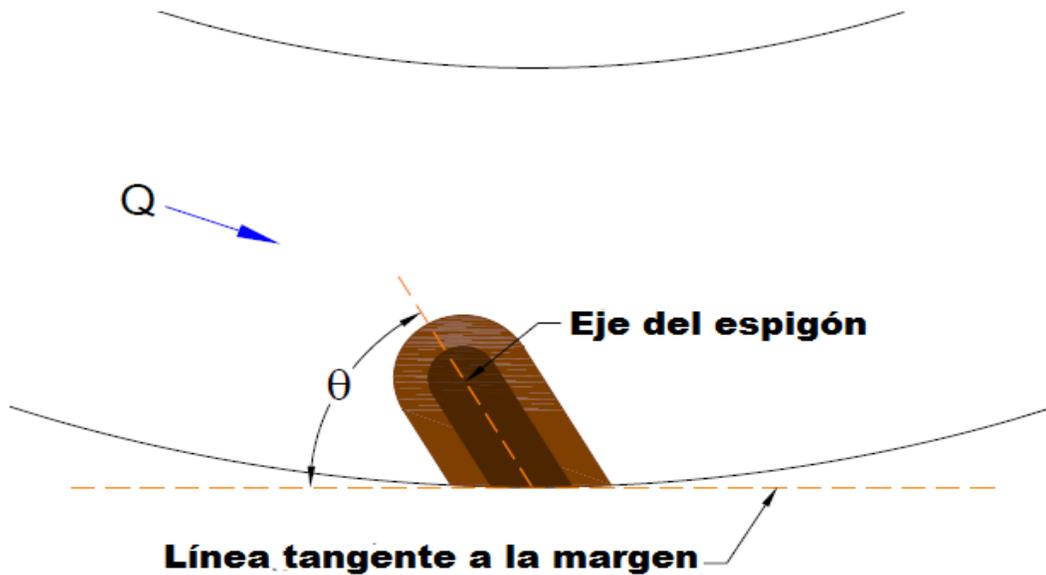


Figura 2.4 Ilustración del ángulo en planta del espigón y su incremento

El número de espigones requeridos para satisfacer la relación de separación puede ser determinado con la ecuación 2.6.

$$\text{Número de espigones} = \frac{L_B}{L_{arc}} \quad ec. 2.6$$

Donde:

L_B = Longitud de la curva

Se utiliza el número entero de espigones. Para determinar la localización de los espigones en la curva, la longitud de la curva no atribuida a la longitud del arco entre espigones, o longitud restante, es necesaria para que sea tomada en cuenta. La longitud restante es determinada usando la ecuación 2.7. La longitud restante es distribuida igualmente al inicio y al final de la curva.

$$L_{rem} = L_B - ((\text{Número de espigones} - 1)(L_{arc})) \quad ec. 2.7$$

Donde:

L_{rem} = Longitud restante

Para determinar los puntos de intersección de los espigones con la línea del gasto de diseño, se puede utilizar una relación fundamental entre la longitud de un arco y el radio que crea el arco para determinar el ángulo de compensación del inicio de la curva. Esta relación se muestra en la ecuación 2.8.

$$d\theta = \frac{S}{R} \quad \text{ec. 2.8}$$

Donde:

$d\theta$ = Ángulo de compensación (radianes)

S = Longitud del arco

R = Radio del arco

Diseño de espigones con la topografía del lugar.

Las variables y definiciones para espigones con la configuración de la topografía del lugar, es similar a la de una configuración prismática. Se hace una excepción en el procedimiento de diseño para definir las variaciones en la longitud de los espigones, debido a la variabilidad de la geometría a través de las curvas de un cauce natural, la longitud de cada espigón difiere para retener un porcentaje específico del flujo para un área bloqueada por una sección.

Para determinar la longitud del arco entre espigones (L_{arc}) como es definido por Heintz (2002), un solo valor para la longitud de los espigones es requerido. El resultado es un promedio de la longitud del espigón tomado como un promedio de espigones de una sección transversal ($\bar{L}_{xsweirav}$), que es determinado mediante el promedio de las longitudes proyectadas de los espigones perpendicularmente al flujo para una sección transversal representativa a través de la curva como resultado del porcentaje cumplido del criterio flujo-área bloqueada. $\bar{L}_{xsweirav}$; se usa en conjunto con una relación de separación (SR) para determinar la longitud del arco entre espigones como se muestra en la ecuación 2.9.

$$L_{arc} = SR (\bar{L}_{xsweirav}) \quad \text{ec. 2.9}$$

Donde:

$\bar{L}_{xswairav}$ = Promedio de la longitud del espigón tomado como un promedio de espigones de una sección I

El número de espigones requeridos para satisfacer el criterio de la relación de separación puede ser determinado con la ecuación 2.10, donde L_B es la longitud de la curva:

$$\text{Número de espigones} = \frac{L_B}{L_{arc}} \quad ec. 2.10$$

Se utiliza el número entero resultante para los espigones. Para determinar la posición de los espigones en la curva, la longitud de la curva no atribuida a la longitud del arco entre espigones es necesaria para que sea tomada en cuenta. La longitud restante (L_{rem}) es determinada usando la ecuación 2.11. La longitud restante es distribuida igualmente para el inicio y el final de la curva.

$$L_{rem} = L_B - ((\text{Número de espigones} - 1)(L_{arc})) \quad ec. 2.11$$

Para determinar los puntos de intersección de los espigones con la línea del gasto de diseño, la relación fundamental dada por la ecuación 2.12 es usada para obtener el ángulo de compensación, en radianes, a partir del inicio de la curva:

$$d\theta = \frac{L}{R} \quad ec. 2.12$$

Convirtiendo estos valores a grados, el diseñador es capaz de determinar las posiciones de cada espigón a través de la curva como se muestra en la figura 2.5. La sección perpendicular al flujo con puntos finales en las posiciones de los espigones y la línea del gasto de diseño en la orilla contraria son usadas para determinar el diseño final de las longitudes de los espigones basadas en el criterio de flujo-área bloqueada.

Cuando el ángulo en planta de un espigón es elegido no perpendicular al flujo (90°), el porcentaje de flujo-área bloqueado es basado en las profundidades del flujo y las variaciones de la sección transversal, o la longitud proyectada como se muestra en la figura 2.3.

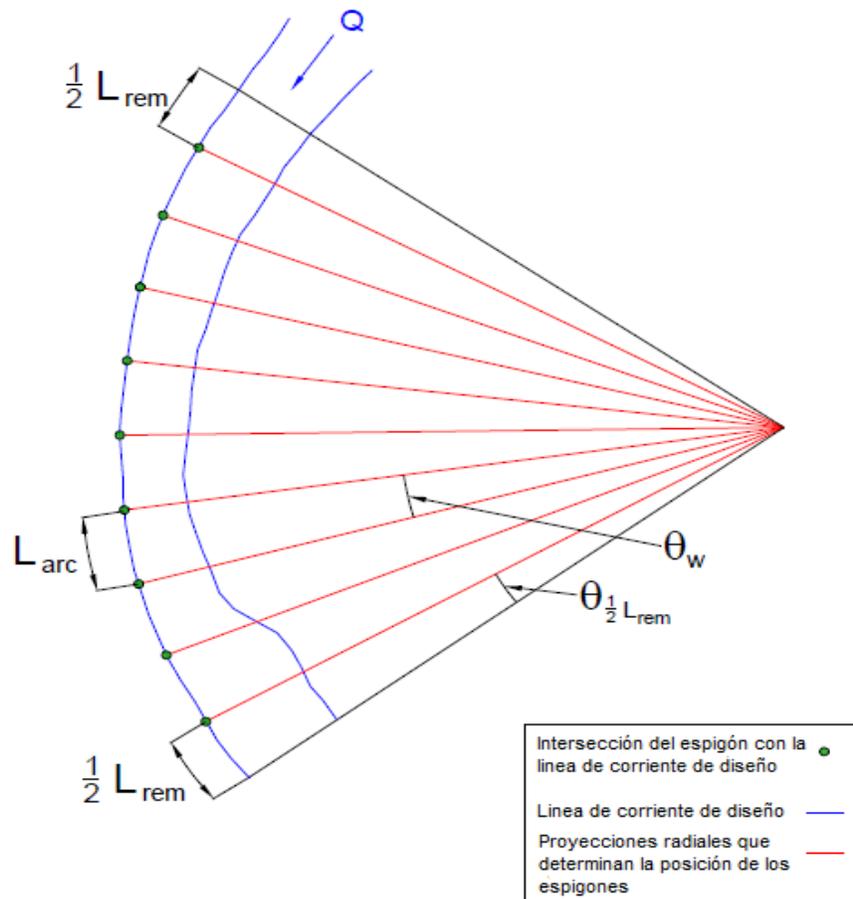


Figura 2.5 Posiciones de los espigones

II.2 Criterio de la Estación de Experimentos en Cursos de Agua del Laboratorio de Hidráulica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Disposición del sistema de espigones.

Ángulo del espigón respecto a la orilla del cauce.

La orientación de los espigones (la cual es generalmente definida por el ángulo entre la orilla del cauce, aguas abajo, y el eje del espigón) ha sido típicamente determinada por experiencia en áreas geográficas específicas y por juicio del ingeniero. Existe controversia en si los espigones deberían ser orientados con su eje en dirección aguas arriba o aguas abajo. Quienes proponen una orientación hacia aguas arriba, mencionan que el flujo es repelido de los espigones en esta dirección, mientras que el flujo es atraído hacia la orilla si se instalan los espigones hacia aguas abajo. Es más probable que ocurra sedimentación detrás de los espigones que están orientados hacia aguas arriba, así que se requiere de una menor protección en la orilla del cauce y en la cara aguas arriba del espigón.

Quienes prefieren una orientación hacia aguas abajo mencionan que la turbulencia y profundidad son menores al final del espigón cuando está orientado de esta manera. Sin embargo, es frecuentemente recomendado que los espigones sean alineados perpendicularmente a las líneas de flujo. Thomas y Watt (1913) concluyeron que se tiene una leve diferencia para diferentes alineaciones.

Franzius (1927) reportó que los espigones orientados hacia aguas arriba son mejores que los perpendiculares y que los orientados hacia aguas abajo con respecto a la orilla generan sedimentación entre espigones.

El agua fluyendo sobre espigones orientados aguas abajo y normales al eje es enviada directamente hacia la orilla, sumergiéndose los espigones con esta alineación, por lo cual es especialmente no recomendable.

Espacio entre espigones.

El espacio entre espigones ha sido generalmente asociado a la longitud efectiva (proyección perpendicular) del espigón, aunque la curvatura de la orilla, la velocidad del flujo y el ángulo de ataque son también factores importantes. La relación de la longitud del espigón y el espacio requerido para la protección de una orilla es menor que la requerida para canales de navegación, porque el propósito primario de la protección es mover la zona de erosión lejos de la orilla y no necesariamente crear una profundidad definida para el canal. Diferentes autores señalan el espaciado de los espigones como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Espacio entre espigones para protección de la orilla

Espacio	Tipo de orilla	Referencia	Comentario
1 L	Cóncava	Naciones Unidas (1953)	Práctica general
2 a 2.5 L	Convexa	Naciones Unidas (1953)	Práctica general
4 a 6 L	Cóncava	Richardson y Simons (1973)	Orilla necesita RIP-RAP
3L	Cóncava	Grant (1948)	
5.1 a 6.3 L	Recta	Álvarez	
2.5 a 4 L	Curveada	Álvarez	
2 a 2.5 L		CBIP (1956)	
1.5 L	Cóncava	Distrito de Los Ángeles	Proteger dique con RIP-RAP
2.0 L	Recta	Distrito de Los Ángeles	
2.5 L	Convexa	Distrito de Los Ángeles	
2 L		Neil (1973)	Si son 2 o más espigones
4 L		Neil (1973)	
3 a 5 L		Storm (1941)	

L= Unidades de longitud del espigón

Socavación local en espigones.

La acción intensa de vórtices se presenta en la punta del espigón. Vórtices intermitentes de menor intensidad ocurren a lo largo de las caras aguas abajo y aguas arriba del espigón. Esta turbulencia causa que los sedimentos sean suspendidos, y llega a facilitar que la corriente los transporte aguas abajo. La profundidad de socavación que se desarrolla alrededor de los espigones y el ángulo de reposo de los sedimentos son los principales factores que determinan la extensión de la erosión de la orilla en la vecindad del espigón (figuras 2.6 y 2.7). Entonces, es necesario realizar un estimado de la socavación anticipada en la nariz del espigón para proveer una profundidad del espigón más grande que la profundidad de socavación.

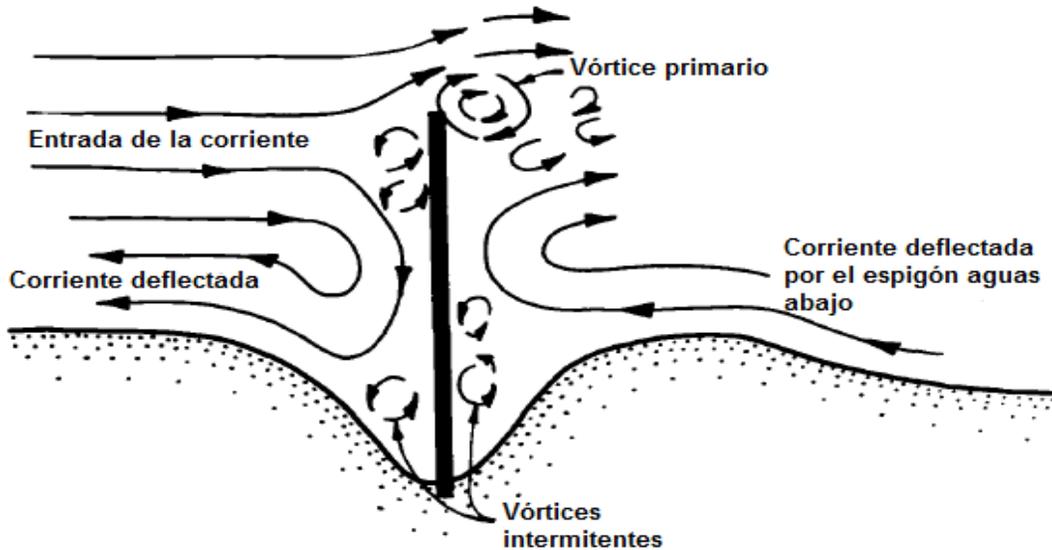


Figura 2.6. Patrones de flujo en el espigón

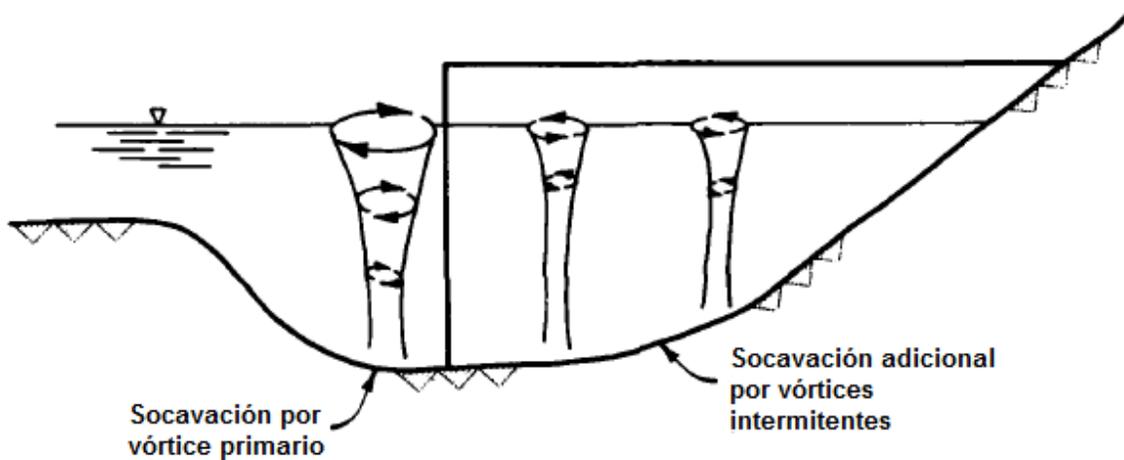


Figura 2.7. Perfil de socavación por vórtices a lo largo del espigón

Relación espacio-longitud.

La relación espacio-longitud es una función de la aproximación de velocidad y gasto, donde el índice de erosión mayor ocurre entre espigones, esto fue demostrado por Copeland (1983) mediante un modelo hidráulico en el cual el gasto se iba aumentando.

La efectividad del espigón para desviar el flujo lejos de la orilla decrece cuando la relación de espacio-longitud aumenta.

Cuando el patrón de circulación de la corriente principal es desviado hacia afuera del campo del espigón se desarrolla un remolino entre los espigones (figura 2.8). Este patrón es óptimo para proyectos de navegación debido a que se forma una profundidad continua en el canal que se mantiene a lo largo del campo de espigones.

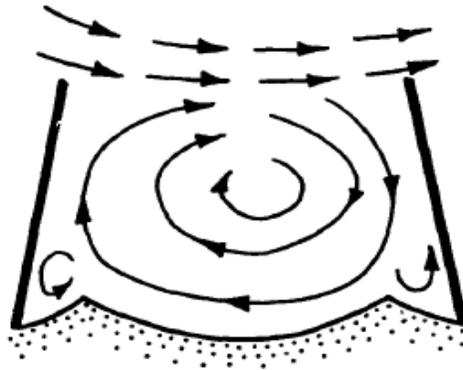


Figura 2.8 Corriente desviada hacia afuera del campo de espigones

Cuando se forma un sistema como el mostrado en la figura 2.9, aparece un segundo patrón de remolinos, pero la corriente es desviada hacia afuera del campo de espigones.

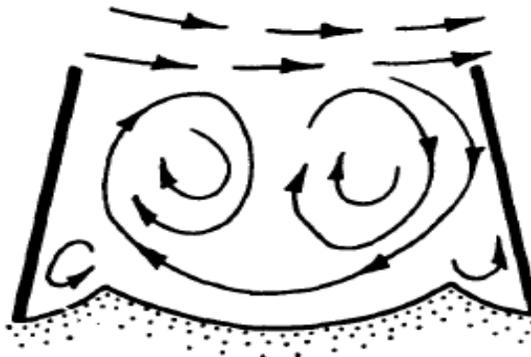


Figura 2.9 Segundo patrón de remolinos. Corriente desviada hacia afuera

Cuando la distancia entre espigones incrementa, se forma un patrón como el mostrado en la figura 2.10. La corriente es llevada hacia los espigones creando un remolino con mayor fuerza detrás del espigón y una mayor turbulencia a lo largo de la cara aguas arriba y en la nariz del espigón.

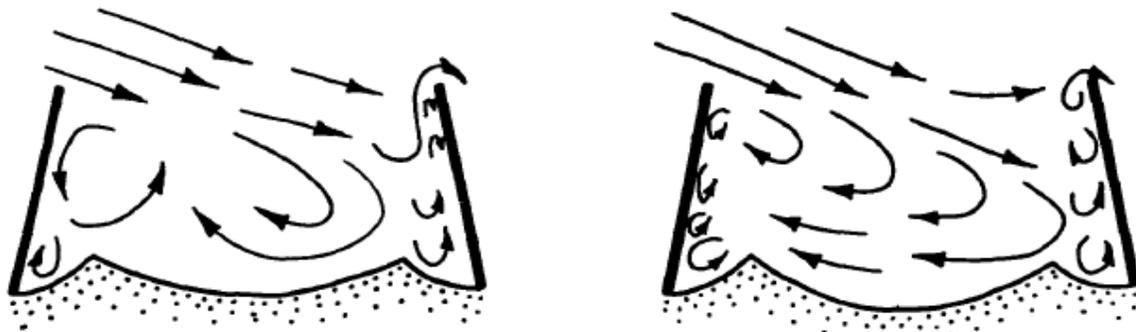


Figura 2.10. Corriente lanzada hacia el espigón

Si se presenta un patrón como el señalado en la figura 2.11, el flujo es desviado por el espigón aguas arriba hacia la orilla del cauce entre los espigones. El remolino se forma en ambos lados del flujo, con lo cual se provee cierta protección de la orilla. Pero, si el espacio entre espigones es considerable el remolino que se forma aguas abajo erosionará la orilla directamente. El patrón de flujo entre espigones es también dependiente del ángulo y velocidad de la aproximación de la corriente.



Figura 2.11 Flujo lanzado directamente a la orilla del cauce

Copeland (1983), señala que en su modelo la velocidad máxima contra la orilla en el campo de los espigones fue aproximadamente el 40% de la velocidad máxima medida contra la orilla en una curva cóncava similar protegida con RIP-RAP. Este porcentaje fue ligeramente menor cuando la relación de espacio-longitud estuvo cerca de 1.5 y ligeramente mayor cuando esta relación fue de 3.0.

La reducción de la profundidad y velocidad contra la orilla entre espigones puede necesitar una protección adicional de la orilla, dependiendo de las condiciones del sitio en específico.

II.3 Criterio del Departamento de Transporte de los Estados Unidos.

El criterio está basado en una investigación de laboratorio de estructuras tipo espigón dirigido por la FHWA (1983).

Permeabilidad.

La magnitud apropiada de la permeabilidad del espigón para un flujo dado o estabilización de la orilla es inversamente proporcional a la magnitud de la retención del flujo requerida para aminorar la erosión de la orilla, el nivel del flujo deseado y/o el radio de una curva del canal. Se recomienda que donde sea necesario proveer una reducción significativa en la velocidad del flujo, un control mayor del flujo, o donde el espigón se encuentra en una curva aguda, la permeabilidad del espigón no debería de exceder el 35%. Donde cada una de las variables es moderada la permeabilidad puede ser de más del 50%. En condiciones donde es necesaria sólo una leve reducción en la velocidad y donde una estabilización en la orilla sin una cantidad importante de control del flujo es necesaria, o en curvaturas leves, la permeabilidad efectiva del espigón puede ser mayor del 80%. Sin embargo, este último porcentaje de permeabilidad no es recomendado a menos que la experiencia en ciertos casos muestre que pueden ser efectivos.

Un criterio para la selección de la permeabilidad puede ser el del patrón de socavación causado por el flujo. Pruebas de laboratorio indican que a mayor permeabilidad del espigón, menor socavación aguas abajo de la punta del espigón. Si la permeabilidad del espigón aumenta, la socavación de la orilla disminuye ligeramente en tamaño, pero aumenta en altura.

Se ha determinado que la permeabilidad del espigón también impacta en la longitud que se protege de la orilla aguas abajo de la estructura. Un ángulo de expansión aguas abajo de la punta del espigón fue usada como una medida de la longitud de protección durante el experimento de laboratorio de la FHWA (1983). El ángulo de expansión fue definido como el ángulo entre un flujo tangente a la punta del espigón y a la línea entre la punta del espigón y un punto cerca de la orilla, donde el flujo se ha expandido para impactar en la orilla del cauce.

Esta medida de la longitud protegida del cauce ha sido usada para evitar incluir que la longitud proyectada del espigón sea paralela a la orilla del río en la misma medida de la longitud de la orilla proyectada.

Geometría.

La geometría de un sistema de espigones se conforma de diferentes componentes que producen que el sistema de espigones pueda ser variable. Estos componentes incluyen la extensión longitudinal del sistema, la orientación de cada espigón, longitud individual y espaciado entre espigones.

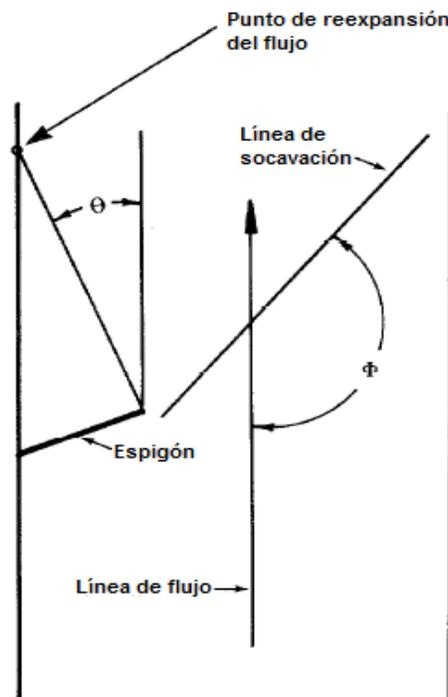
Longitud del espigón.

La longitud individual se refiere a la longitud perpendicular al flujo proyectada de cada espigón, reportada como un porcentaje del ancho de la superficie del canal. Los criterios disponibles para establecer la longitud del espigón difieren de un lugar específico a otro. Por ejemplo, Richardson y Simons (1974) recomiendan que la longitud máxima sea menor que el 15% de la distancia entre los hombros del cauce en tramos rectos y curvas de radio amplio. Entonces, la longitud apropiada para un espigón dependerá del comportamiento del flujo y el espigón mismo para un medio dado, como también la alineación de los espigones. Otro criterio considera la permeabilidad del espigón, los espigones que tienen una permeabilidad menor al 35% deben ser limitados a longitudes que no excedan el 15% del ancho del canal. Para espigones que tienen una permeabilidad del 80% se proyectan longitudes de más del 25% del ancho del canal. Entre estos valores de permeabilidad se pueden interpolar las relaciones.

Separación entre espigones

Para definir la separación entre espigones se utiliza un criterio que implica la longitud a proteger del canal, dividida por la longitud proyectada del espigón y un ángulo de expansión que fue definido como el ángulo entre un flujo tangente a la punta del espigón, una línea entre la punta del espigón y el punto en el canal donde el flujo se expande para impactar en la orilla del canal. La definición del ángulo de expansión y socavación se muestran en la figura 2.12.

Los resultados de laboratorio de una prueba hecha por el FHWA indican que para una permeabilidad dada del espigón, el ángulo de expansión aguas debajo de la punta del espigón varía sólo con la longitud del espigón. El ángulo de expansión es dependiente sólo de la permeabilidad y de la longitud del espigón en la dirección perpendicular al flujo; en comparación con la relación entre la longitud del canal entre la longitud del espigón que es dependiente en la longitud proyectada, paralela al canal. También el valor de la relación entre la longitud del canal y el espigón variará con el radio de la curva.



θ - Ángulo de expansión

ϕ - Ángulo de socavación

Figura 2.12. Definición del ángulo de expansión y ángulo de socavación

En muchos casos, la longitud de la orilla que debe ser protegida puede ser identificada a través de una inspección de campo. Si el canal está activamente erosionando, el límite aguas arriba de la erosión que afecta la orilla será identificado como la longitud a proteger.

Este límite suele ser complicado de definir debido a que la erosión va progresando en dirección aguas abajo, por lo que puede ser necesario realizar un análisis del patrón del flujo para determinar su comportamiento posterior y tomar las consideraciones pertinentes. Otro factor importante a considerar para la longitud de protección de la orilla es la longitud que será impactada por diferentes fuerzas, suficientes para causar el desprendimiento y transporte del material. Esto también implica el realizar un estudio del patrón del flujo.

Orientación del espigón

La orientación del espigón se refiere al ángulo de este con respecto a la orientación del flujo dentro del canal. Entonces, para definir la orientación del espigón es necesario conocer el comportamiento del flujo en diversas condiciones y de esta manera elegir el que sea más apropiado para el caso que se esté tratando. Regularmente se opta por una orientación que puede variar entre los 30° y 150°, sin embargo se recomienda una orientación mayor de 90° en este criterio.

Altura del espigón

La altura a la cual deben ser construidos los espigones es principalmente una función de la altura de la orilla que se desea proteger. Los factores que tienen influencia para considerar una altura apropiada son:

- a) El mecanismo que causa la erosión
- b) La altura de la orilla del río
- c) La cantidad de flujo considerada en el diseño
- d) El nivel del flujo en el cual las cargas sean un factor a considerar

El mecanismo de erosión es importante debido a que define la altura vertical en las regiones donde la orilla es impactada por la erosión y requieren protección. Por ejemplo, cuando la orilla es protegida contra la erosión a la altura de la plantilla, los espigones sólo necesitan ser lo suficientemente altos para proteger el pie de la orilla, por otra parte, si la erosión se presenta en la parte superior de la orilla, el espigón debe cubrir la altura total de la orilla.

Cuando se toma en cuenta la cantidad y el nivel del flujo, se deben prever las fuerzas que actúan sobre el espigón. En tiempos de avenidas los niveles aumentan pudiendo desbordar las orillas y, por lo tanto, sumergir el espigón totalmente; por lo que se deben tomar medidas para evitar la falla por los empujes ejercidos por el flujo. A continuación se mencionan algunas recomendaciones de la FHWA para determinar la altura del espigón:

- 1) La altura del espigón debe ser suficiente para proteger las regiones que son impactadas por el proceso de erosión.
- 2) Si el nivel del flujo de diseño es más bajo que el de la orilla del cauce, los espigones deben ser diseñados a una altura de no más de 1 metro (3 pies aproximadamente) por debajo del nivel del flujo de diseño.
- 3) Si el nivel del flujo de diseño es mayor que la altura de la orilla, los espigones deben ser diseñados a la altura de la orilla.
- 4) Los espigones permeables deben ser diseñados con una altura que permita que pasen materiales por la cresta de la estructura, como ramas de árboles y escombros que pueda transportar la corriente, de manera que no se queden obstruyendo el flujo en el área que cubre el espigón.
- 5) Siempre que sea posible, los espigones impermeables deben ser diseñados para sumergirse aproximadamente 1 metro (3 pies) cuando se presente la condición más desfavorable del nivel del flujo. Esto minimiza los impactos de la socavación local, la concentración del flujo en la punta del espigón y la magnitud de la deflexión del flujo.

II.4 Recomendaciones generales de la FHWA en el manual “Highways in the river environment” (1990)

Longitud de protección de la orilla

Un error común en la protección de las orillas es proveer una mayor protección hacia aguas arriba y no la suficiente hacia aguas abajo. La extensión de la protección debe ser evaluada usando una variedad de técnicas incluyendo métodos empíricos, reconocimiento en campo, evaluación de los rastros del flujo para diferentes niveles y la revisión de las fuerzas del flujo y la erosión para diferentes escenarios.

Longitud del espigón

Si la longitud del espigón aumenta: La profundidad de socavación aumenta, la magnitud de la concentración del flujo aumenta, la severidad de la deflexión del flujo aumenta y la longitud de protección de la orilla se incrementa.

La longitud proyectada para espigones impermeables se debe mantener menor que el 15% del ancho del canal.

La longitud proyectada para espigones permeables se debe mantener menor al 25% del ancho del canal. Sin embargo, este criterio depende de la magnitud de la permeabilidad del espigón. Los espigones que tienen una permeabilidad menor del 35% deberán ser limitados a longitudes que no excedan el 15% del ancho del flujo en el canal. Los espigones que tienen una permeabilidad del 80% pueden tener una longitud superior al 25% del ancho del canal en la superficie libre del agua.

Espacio entre espigones

El espacio entre espigones está en función de la longitud, ángulo y permeabilidad del espigón, también en función del grado de curvatura de la curva del cauce. La dirección y orientación del flujo del canal juegan un papel importante para determinar el espacio adecuado entre los espigones. Cuando se reduce el espacio entre espigones, debajo del espacio requerido para prevenir la erosión de la orilla entre espigones, resulta una reducción de la magnitud de la concentración del flujo y una socavación local en la punta del espigón.

Orientación de los espigones

El criterio principal para establecer el ángulo de los espigones dentro de un sistema es el de proveer al sistema una eficiencia tal que se minimicen al máximo los impactos negativos y se economice en la construcción.

Los espigones orientados aguas abajo producen un menor estrangulamiento del flujo que los orientados hacia aguas arriba.

Los espigones retardadores deben ser diseñados perpendiculares a la dirección del flujo.

Los espigones deflectores deben ser diseñados para proporcionar un flujo gradual alrededor de la curva. Esto se logra maximizando la eficiencia del flujo dentro de la curva mientras que se minimiza cualquier impacto negativo en la geometría del canal. Mientras sea menor el ángulo del espigón, se presenta un mejor control del flujo.

Altura del espigón

La altura del espigón debe ser suficiente para proteger las regiones donde se presentan los procesos de erosión activos.

Perfil de la cresta del espigón

Los espigones permeables deben ser diseñados con niveles de cresta menores a la altura de la orilla del cauce o con condiciones especiales que dictan una pendiente en la cresta de diseño.

Los espigones impermeables se diseñarán con una ligera caída hacia la punta del espigón, permitiendo diferentes cantidades de estrangulamiento del flujo, esto es particularmente importante en canales de ancho estrecho.

Forma de la punta o cabeza del espigón

Se recomienda una cabeza de forma recta. La cabeza o punta del espigón debe ser redondeada o desvanecida en la medida de lo posible. Esto minimiza la socavación local, la concentración y deflexión del flujo.

II.5 Criterio del Manual de Ingeniería de Ríos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Comisión Nacional del Agua

Los datos necesarios para el diseño de espigones son:

a) La topografía y batimetría del río en la zona por proteger. Abarcará todo el cauce y orillas. En ríos de planicie se cubrirán además 20 m a cada lado de las orillas y en cauces con orillas muy elevadas, hasta 10 m arriba de la elevación máxima del agua.

b) Secciones transversales a lo largo de las orillas que serán protegidas. La separación entre ellas puede variar entre 50 y 200 m dependiendo de las dimensiones del cauce. Fuera del agua cubrirán lo indicado en el inciso anterior, se prolongarán a lo largo del talud de la orilla y se extenderán sobre el fondo del río hasta una distancia de $\frac{1}{3}$ del ancho del cauce, como mínimo.

c) Características hidráulicas de la corriente. Normalmente se deben conocer: el gasto formativo y el gasto asociado a un periodo de retorno entre 50 y 100 años, la elevación de la superficie del agua correspondiente a esos gastos, así como las velocidades medias de los escurrimientos y, de ser posible, la velocidad del flujo a lo largo de las orillas por proteger.

Cuando el gasto formativo transporta la misma cantidad de sedimentos que el hidrograma anual, recibe el nombre de gasto dominante. Para obtenerlo conviene efectuar los cálculos utilizando fórmulas que tomen en cuenta el transporte total del fondo.

El gasto formativo se puede obtener en forma más sencilla ya que se ha observado que es aproximadamente igual al gasto máximo que escurre por el cauce principal, de los ríos de planicie, antes de desbordar. También se ha demostrado que está asociado a un periodo de retorno entre 1 y 4 años con promedio de 1.4.

d) Granulometría y peso específico de los materiales de fondo y orillas del cauce.

e) Materiales de construcción disponibles. Incluye la localización de bancos de roca y el peso específico del material de cada uno de ellos. Así como bancos de grava o boleo que puedan servir para rellenar gaviones.

Los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se diseña una protección con espigones son los siguientes:

Localización en planta

Para ubicar los espigones en planta, lo primero que se requiere es trazar el eje del río tal como quedará una vez que sea rectificadado, o bien el eje existente si sólo se van a proteger las orillas, sin efectuar ningún cambio a la geometría del río ni a la dirección de la corriente. Al terminar el trazo del eje del río se conoce el radio o radios que forman cada curva y la longitud de los tramos rectos.

Posteriormente se trazan dos líneas paralelas a ese eje y separadas entre sí a una distancia igual al ancho que tendrá el río una vez protegido. Dichas líneas se denominarán líneas extremas de defensa. Todos los espigones partirán de las márgenes y llegarán hasta una de esas dos líneas, por lo que la longitud final de cada espigón es función de la separación que existe entre cada una de esas líneas y su margen correspondiente. La separación entre las dos líneas extremas de defensa podrá ser igual al ancho estable del río, teniendo en cuenta el cambio de pendiente que se introduce cuando el tramo en estudio es rectificadado y además si el río va a ser navegable o no. Se entenderá por ancho estable el que tiene un tramo de río cuando en él no hay islas o bifurcaciones y las márgenes son sensiblemente paralelas. Si en el tramo en estudio no se tiene la condición señalada, el ancho estable se puede conocer observando fotografías aéreas de los tramos aguas arriba y abajo, hasta localizar una zona donde haya un solo cauce, siempre y cuando el material del fondo y orillas sea el mismo. Analíticamente el ancho estable se obtiene en función del gasto formativo, características físicas del material del fondo y orillas y de la pendiente del río. En caso de que se desee rectificadado un tramo de río o defender sus curvas y si las márgenes son arenosas o ligeramente limosas, los radios de curvatura r , medidos hasta el eje del río conviene que estén comprendidos entre los siguientes límites:

$$2B \leq r \leq 8B$$

ec. 2.15

Donde B es el ancho medio de la superficie libre en los tramos rectos.

Con la recomendación dada por la ecuación 2.15 se logra que las mayores profundidades siempre se encuentren cercanas a la orilla exterior de la curva y que en ésta no se formen islas o bancos de arena cercanos a la orilla cóncava.

Lo expresado por la ecuación 2.15 ha sido obtenido de la observación de ríos con anchos no mayores de 150 m. En grandes ríos se han observado curvas con relación r/B hasta de 20 que una vez protegidas se comportan satisfactoriamente; es decir, no hay bancos de arena en medio de las secciones de la curva, el canal más profundo se forma cerca de la orilla exterior y el sedimento tiende a acumularse sólo en la orilla interior.

Las relaciones r/B posiblemente dependan de los gastos líquidos y sólidos transportados por el río, los materiales y resistencia de la margen, velocidad del flujo y distribución anual de los gastos mencionados; sin embargo, la relación entre los parámetros señalados aún no ha sido establecida para una amplia gama de ríos.

Por lo anterior, cuando se desea proteger un tramo de río conviene conservar los radios de curvatura de las curvas por proteger, modificando aquellas cuyo r/B sea menor que 2. En cambio, cuando se desee efectuar una rectificación, se deben observar las curvas estables del río aguas abajo y arriba del tramo por rectificar, o de alguna corriente semejante que se encuentre cercana a la que está en estudio. Esto último presupone que los gastos, pendientes y materiales de ambas corrientes sean casi iguales o muy semejantes.

Si el radio de curvatura es menor que $2B$, la distancia entre los espigones decrece y desde el punto de vista económico llega a ser preferible construir un revestimiento marginal. En cambio si el radio es mayor que $8B$, el río puede llegar a formar un cauce con radio menor que el de la curvatura y consecuentemente no todos los espigones trabajarán eficientemente y la corriente podrá incidir, aguas debajo de la curva, en lugares no previstos y por tanto no protegidos.

Si una curva es trazada con varios radios de curvatura, el tamaño de dichos radios debe decrecer hacia aguas abajo. Si no se cumple con esta recomendación el flujo podrá separarse de la margen exterior, dando pauta a la formación de bancos de arena cercanos o adyacentes a la margen cóncava.

Cuando se protege una curva trazada con un único radio de curvatura y la margen exterior es uniforme, todos los espigones tendrán la misma longitud y ángulo de orientación y, por tanto, la separación entre ellos será la misma.

Si la margen es uniforme en una curva que se define con dos o más radios de curvatura, lo único que varía es la separación entre los espigones, la que es constante dentro de los segmentos con igual radio de curvatura. Esta separación será menor cuanto menor sea el radio, teniendo cuidado que ellos cumplan la recomendación dada por la ecuación 2.15.

Cuando no se efectúa ninguna rectificación sino que se desea proteger la margen actual de un río, la línea extrema de defensa deberá trazarse lo más uniforme y paralela posible a esa margen, cuidando que los radios de curvatura no crezcan hacia aguas abajo.

Téngase en cuenta que si se protege una única curva de un río se debe tener la certeza de que las márgenes de las curvas situadas aguas arriba no puedan ser erosionadas y por tanto, tener la seguridad de que la corriente incidirá aproximadamente con la misma dirección contra la margen protegida. Si esto último no ocurre, en pocos años el río escurrirá por otro sitio, abandonando completamente los espigones que fueron colocados. Por ello en ríos de planicie que son divagantes o que sufren erosión constantemente en sus curvas, se deben proteger tramos completos de río y no sólo una curva aislada; esto último se justifica únicamente como emergencia, cuando el río está erosionando una curva en la que hay una construcción importante, pero a sabiendas de que pasados dos o tres años, el río escurrirá por otro lado. Este proceder tiene el inconveniente de que nuevas erosiones se estarán presentando continuamente en otras curvas y aunque se protejan cuidadosamente, el río no es encauzado ni su cauce fijado permanentemente.

En ríos de planicie que corren sobre material aluvial, la longitud de los tramos rectos a_r , entre curvas, suele estar comprendida entre:

$$0B \leq a_r \leq 3B \quad ec.2.16$$

Se deben evitar tramos rectos con mayor longitud, ya que de existir se forman bancos de arena alternados y cerca de las márgenes que obligan al flujo a seguir una trayectoria senoidal. Los tramos rectos sólo existen en forma natural en las zonas de montaña o intermedia con márgenes rocosas o muy resistentes; por ejemplo, cuando el río corre a lo largo de una falla.

Debe tenerse en mente, al diseñar una rectificación, que nunca puede haber dos curvas seguidas cuyo sentido de giro sea el mismo. Ellas se presentan siempre en forma alternada.

Longitud de los espigones

La longitud total L de un espigón, queda definida por la longitud de trabajo, L_t que es aquella que está dentro del cauce y la longitud de empotramiento L_e que está embebida dentro de la margen.

$$L = L_t + L_e \quad ec.2.17$$

La longitud de trabajo de los espigones está dada por su distancia entre el cruce de la margen con la corona del espigón, y la línea extrema de defensa comentada en el inciso anterior, y normalmente debe estar comprendida entre los siguientes límites:

$$d \leq L_t \leq \frac{B}{4} \quad ec.2.18$$

Donde:

d = Tirante o profundidad del río, asociado al gasto formativo, en el sitio donde se construirá el espigón. En los ríos de planicie es igual a la distancia vertical entre la elevación de la margen y la elevación del fondo del río en el sitio donde se colocará el espigón.

Los espigones pueden empotrarse en la margen o bien terminar en contacto con ella; cuando esto último ocurre la $L_e = 0$. La máxima longitud de anclaje recomendada es igual a un cuarto de la longitud de trabajo: $0.25 L_t$. De esta manera la longitud máxima de un espigón llega a ser:

$$L = 1.25 L_t \quad \text{ec. 2.19}$$

Se ha mencionado que la longitud de trabajo puede ser seleccionada en forma independiente; sin embargo, también ya se ha indicado que todos los espigones deben de llegar a la línea extrema de defensa preseleccionada, por lo que en realidad dicha longitud depende de la posición de esa línea.

Para anclar o empotrar un espigón se requiere excavar una trinchera con ancho de plantilla igual al de la base del espigón, cuyo fondo debe tener la misma elevación que el fondo del río y cuya longitud es la que se seleccione sin sobrepasar la distancia de $0.25 L_t$; posteriormente dentro de la zanja hay que construir la parte del espigón que va en ella. Como el procedimiento indicado es costoso no conviene empotrar los espigones y sólo se justifica cuando no se puede permitir que falle ninguno de ellos. Esto último también se logra reduciendo la separación entre los espigones.

Cuando se terminan o se apoyan directamente los espigones contra la margen, algunos de ellos pueden ser flanqueados. Se ha observado que en no más del 4% de los espigones construidos ha ocurrido este fenómeno, siempre que se han respetado las recomendaciones dadas en las ecuaciones 2.20 y 2.24. Al fallar un espigón, la orilla se erosiona rápidamente frente a él y parte del flujo escurre entre el espigón y la orilla erosionada sin que esto repercuta en el buen funcionamiento de los ubicados inmediatamente aguas abajo. La reparación de esas fallas se lleva a cabo en el estiaje siguiente, formando el cuerpo del espigón desde la nueva orilla hasta el espigón fallado. Estas reparaciones, que son sencillas, tienen un costo menor que el que tendría si todos los espigones se hubieran empotrado. La falla descrita tiene lugar, generalmente, durante la primera o segunda época de avenidas, cuando aún no se han formado depósitos de arena entre los espigones, y por tanto, la orilla se encuentra menos protegida.

Por último, cabe mencionar que cuando este tipo de falla no pueda permitirse, porque haya construcciones importantes cercanas a la orilla del río, conviene reducir la separación entre espigones

Forma de los espigones en planta

La forma de los espigones en planta puede ser: recta, curvada hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, en L con el brazo también dirigido hacia aguas arriba o hacia aguas abajo y en T .

Los más usuales son los rectos por su facilidad constructiva y ser más económicos.

Los espigones con forma de L o T son los más costosos, ya que su parte extrema debe construirse en la zona más profunda del río.

La principal diferencia entre los espigones y los diques marginales consiste en que los primeros se interponen a las líneas de corriente, mientras que estas son paralelas a la cara exterior de los diques. Por ello, cuando las ramas extremas de los espigones en L o T tienen una longitud mayor L_t , se consideran más como diques marginales que como parte de un espigón.

Separación entre espigones

La distancia entre espigones está medida a lo largo de la margen entre los puntos medios de los arranques de cada espigón y depende de la longitud del espigón de aguas arriba y de su orientación, así como de la configuración de la margen.

Para calcular la separación entre dos espigones es necesario tener en cuenta la expansión teórica que sufre la corriente al pasar frente al extremo del espigón. Normalmente se considera que el ángulo de expansión β varía entre 9° y 11° . Dicho ángulo se mide en la punta del espigón, con respecto a la tangente a la línea extrema de defensa. En modelos hidráulicos se han observado ángulos de expansión hasta de 14° . Por tanto:

$$9^\circ \leq \beta \leq 14^\circ \qquad \text{ec. 2.20}$$

La práctica usual consiste en considerar como ángulo de expansión 9° cuando se desea obtener un diseño económico y 14° cuando se requiere un diseño más conservador.

Las fórmulas y recomendaciones que a continuación se presentan son válidas para $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, siendo α el ángulo de orientación del espigón.

Separación entre espigones cuando la margen es paralela a la línea extrema de defensa.

Cuando la línea extrema de defensa y la margen del río son sensiblemente paralelas, es decir, que la margen no tiene irregularidades ni entrantes ni salientes, las separaciones que se recomiendan entre espigones se indican adelante y son aplicables únicamente a espigones que son utilizados para defender las márgenes de un río. Si se construyen para reducir el ancho de la superficie libre del agua e incrementar la profundidad en ríos navegables, las separaciones son menores a las que aquí se indican.

Separación en tramos rectos, S_α

La separación entre espigones en un tramo recto, cuando la línea extrema de defensa y la margen son paralelas, está dada por la relación:

$$S_s = L_t \cos \alpha + L_t \frac{\text{sen} \alpha}{\tan \beta} \quad \text{ec. 2.21}$$

Que transformada se escribe como:

$$S_s = L_t \frac{\text{sen}(\alpha + \beta)}{\text{sen} \beta} \quad \text{ec. 2.22}$$

Al sustituir los valores de α y β señalados arriba, S_s varía entre los límites:

$$4L_t \leq S_s \leq 6.3L_t \quad \text{ec. 2.23}$$

Desde el punto de vista práctico y económico conviene que la separación inicial sea $S_s = 6L_t$. Si así separados se observa que la corriente ataca e inicia la erosión de la orilla cerca del punto de arranque de alguno de los espigones, se deberá construir un nuevo espigón intermedio aguas arriba de él, con lo que la separación entre los

espigones en esa zona, se reduce a $3L_t$; si por falta de observaciones o por la intensidad de la corriente durante una avenida falla uno de los espigones y queda separado de la orilla por ser esta erosionada, el espigón fallado se deberá prolongar hasta unirlo con la nueva orilla; esta acción conviene efectuarla en el estiaje siguiente.

El espigón intermedio entre un espigón fallado o por fallar y el siguiente aguas arriba, puede no necesariamente quedar a $3L_t$ de cada espigón, sino a $2L_t$ del espigón por proteger. Bajo estas circunstancias, la longitud de este nuevo espigón puede ser menor que la de los restantes.

Cuando en las márgenes de un tramo recto hay construcciones de importancia, la separación inicial entre espigones debe ser como máximo de $4L_t$.

Separación en curvas, S_c

La separación entre espigones ubicados en las márgenes exteriores de las curvas puede variar entre los siguientes límites:

$$2.5 L_t \leq S_c \leq 4L_t \quad \text{ec. 2.24}$$

En curvas, la separación entre espigones depende del radio de curvatura. A menor radio menor separación. En algunas curvas con radios menores de $1.5 B$ los espigones pueden llegar a quedar tan juntos y tan orientados hacia aguas abajo que, por economía, es preferible sustituirlos por un recubrimiento marginal.

Cuando una curva tiene un radio igual o mayor a 4 veces el ancho del río $4B$, la práctica usual consiste en colocar los espigones con una separación igual a $4L_t$. Si al proteger una curva siguiendo esta recomendación uno de ellos llega a fallar se efectúa la reparación ya mencionada en el apartado anterior y para mayor seguridad se podrá construir otro espigón aguas arriba del fallado, a una separación igual a $2L_t$.

Pendiente longitudinal, elevación y ancho de la cresta de los espigones

Los espigones pueden ser construidos con pendiente horizontal o teniendo una pendiente hacia el centro del río que puede llegar a ser de hasta 0.25.

Los espigones con cresta horizontal se construyen principalmente cuando se desea reducir artificialmente el ancho del río, por ejemplo, cuando se desea mejorar la navegación. En cambio, cuando el propósito, de los espigones consiste en proteger una margen o rectificar un tramo del río, la cresta del espigón debe tener una pendiente longitudinal de la margen hacia el extremo que se encuentra en el interior del río. En zonas intermedias o de montaña será igual a la elevación del agua que corresponde al gasto formativo.

Al seleccionar la pendiente longitudinal del espigón, conviene tener en mente lo siguiente:

a) Lograr que el extremo del espigón que se encuentra dentro del río quede a una elevación de unos 50 cm arriba del fondo del cauce. Esto es posible únicamente en ríos que casi no llevan agua en la época de estiaje.

b) Si el río es perenne, el extremo antes indicado debe quedar a la elevación que tiene el agua durante el momento de la construcción, la que conviene efectuar en época de estiaje, cuando las profundidades y velocidades de los escurrimientos son menores.

c) La pendiente longitudinal no debe de ser mayor que la que permita el manejo seguro del equipo de construcción.

Ángulo de orientación de cada espigón, con respecto al flujo

Los espigones pueden estar orientados hacia aguas abajo, hacia aguas arriba o ser perpendiculares a la dirección del flujo. Su orientación está dada por el ángulo α que forma el eje longitudinal del espigón con respecto a la tangente trazada a la línea extrema de defensa en el punto de unión con el espigón y medido hacia aguas abajo. El ángulo de orientación conviene que esté comprendido entre:

$$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad \text{ec. 2.25}$$

En curvas con márgenes uniformes se recomienda:

$$\alpha = 70^\circ \quad \text{ec. 2.26}$$

En curvas con márgenes irregulares conviene, en ocasiones, variar el ángulo de orientación de alguno de los espigones; esto ocurre sobre todo cuando una curva tiene un radio menor que $2B$. Se ha llegado a situaciones extremas en que el ángulo α ha sido de 30° . Cuando esto ha ocurrido, hubiera sido preferible proteger la margen con un recubrimiento marginal y no utilizar espigones, ya que estos últimos resultan más costosos.

Orientaciones con ángulos mayores de 90° requieren distancias menores entre espigones y por tanto, un mayor número de ellos para proteger la misma longitud del río. Experimentalmente se ha encontrado que espigones con orientaciones de 120° y con pendiente longitudinal en su corona, no trabajan satisfactoriamente y aún más, cuando un espigón falla, la erosión de la margen es mayor que la que se produce cuando los espigones tienen ángulos entre 60° y 70° .

Es importante destacar que los espigones con pendiente horizontal, sí se pueden orientar hacia aguas arriba formando un ángulo no mayor de 115° . Para ángulos iguales o mayores que 120° ya se comentó que no trabajan satisfactoriamente. Téngase en cuenta que el ángulo de orientación de los espigones repercute en la separación entre ellos.

Permeabilidad de los espigones

Los espigones pueden ser impermeables o permeables. Los primeros alejan de la orilla a las líneas de corriente con alta velocidad, mientras que los segundos reducen la velocidad del flujo por debajo de su límite erosivo. Estos últimos, cuando están bien diseñados, facilitan de inmediato la sedimentación de arena entre los espigones. Infortunadamente no existe un criterio confiable para determinar las pérdidas de carga producidas por espigones permeables, ni para cuantificar la reducción de la velocidad del flujo. Ello se determina experimentalmente en el sitio.

Los espigones permeables tienden con el tiempo a perder permeabilidad debido a toda la basura, ramas y troncos que llegan a detener. La mayoría de los espigones permeables se construyen con troncos de árbol y pilotes de madera formando una pantalla en la que dichos elementos no están juntos, aunque unidos con travesaños

de madera y en ocasiones con alambre. Usualmente, los espigones construidos con roca o gaviones no son totalmente impermeables al inicio de su vida útil; lo llegan a ser cuando sus huecos se rellenan con la arena y limo que transporta el agua.

Los espigones permeables deben llegar también a la línea extrema de defensa. Su separación entre ellos es menor que para los espigones impermeables y depende de la reducción de la velocidad que se obtenga con cada uno de ellos; generalmente están separados entre 10 a 50 m, independientemente de su longitud. Su corona es siempre horizontal longitudinalmente y siempre deben empotrarse. Además requieren de una observación y mantenimiento constante, ya que pueden ser destruidos por troncos y árboles que arrastre la corriente.

Erosión al pie del espigón en el extremo dentro de la corriente

La erosión más importante que se produce al pie de un espigón ocurre en el extremo que se encuentra dentro del agua. Cuando los espigones son construidos en ríos que casi no tienen escurrimiento durante la época de estiaje, no existe socavación durante su construcción. Si además se les da una pendiente longitudinal y su extremo final queda casi a la elevación del fondo, como se indicó en el apartado de pendiente longitudinal, elevación y ancho de la cresta, tampoco sufren erosiones durante su vida útil.

No ocurre lo mismo cuando son construidos en ríos que llevan agua todo el año, y aún la velocidad de la corriente en estiaje es elevada. Si ello ocurre, a medida que se construye el espigón se produce una socavación en un extremo y por tanto, al continuar la construcción también se tiene que ir llenando la depresión que se forma por efecto de esa erosión. Esto trae como consecuencia un incremento en el volumen de material de construcción, y por tanto, en el costo final de la obra. Si ello se desea evitar, conviene primero colocar una capa de grava o enrocamiento de unos 30 a 50 cm de espesor, cuyos elementos no sean arrastrados por la corriente, y que ocupe toda la base del futuro espigón.

III. CASO DE ESTUDIO. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA SOCAVACIÓN EN EL RÍO LA SABANA

El río la Sabana se localiza en el estado de Guerrero, es una corriente perenne que fluye de la parte sur-poniente de la Sierra Madre Occidental hasta llegar a la laguna de Tres Palos, ubicada en la parte norte del Aeropuerto Internacional de Acapulco, el tramo en estudio se muestra en la (figura 3.1). Este estado registra un rango de precipitación media de 1200 mm por año (INEGI, 2015).

Por el río La Sabana se conducen gastos altos debido a la amplitud de su cuneca, que en temporada de avenidas, afectan diversas zonas de Acapulco y que ocasionan severos daños debido al desbordamiento del río, inundando algunas comunidades. Aunque en diversos tramos del río se cuenta con obras de protección, estas resultan dañadas por socavación o son insuficientes para contener la avenida que circula por el cauce.

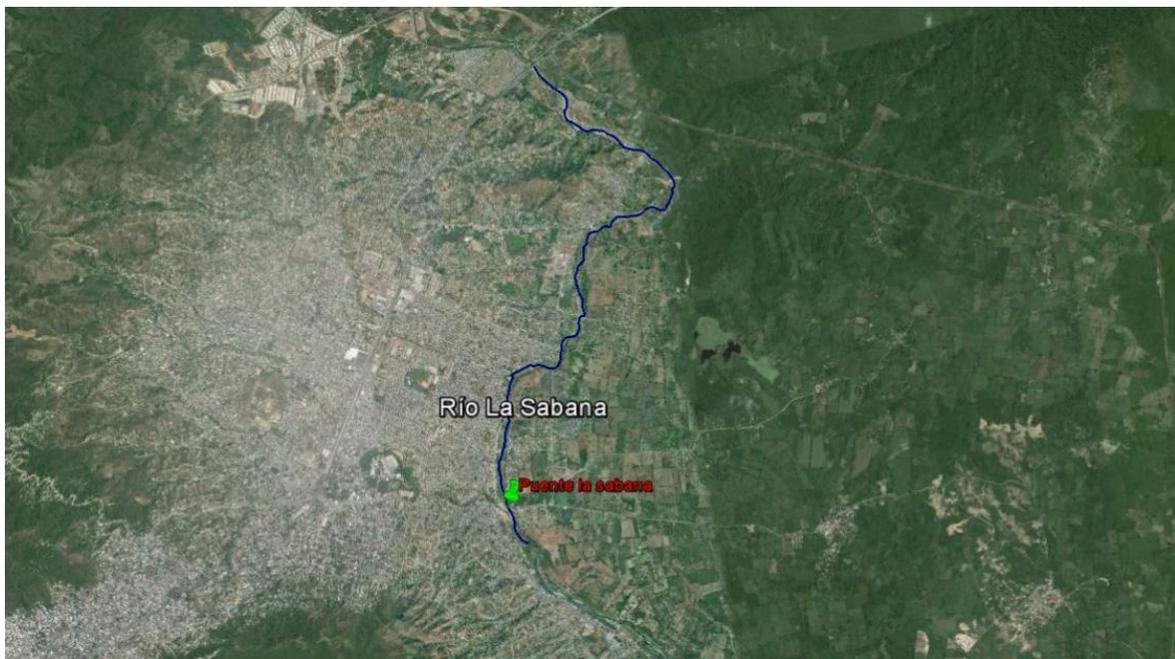


Figura 3.1 Río la Sabana

La laguna de Tres Palos regula las aportaciones que recibe del río La Sabana de los escurrimientos pluviales y las descargas se realizan en el sitio llamado Barra Vieja, que en temporada de huracanes, elevan su nivel generando inundaciones aguas arriba.

Uno de los principales problemas se presenta cuando la velocidad, el esfuerzo cortante del flujo y el transporte de sedimentos provocan la socavación de estructuras como los bordos de protección del cauce o la cimentación de los puentes que cruzan el río.

La socavación general es una disminución en el nivel del lecho debido a un aumento en la velocidad y el esfuerzo cortante del flujo. Estos aumentos ponen en movimiento las partículas del fondo y de las márgenes; que se encuentran en equilibrio.

Mediante el uso de relaciones empíricas o modelos físicos o computacionales es posible determinar la profundidad de socavación. En donde las relaciones empíricas y los modelos computacionales son aproximaciones numéricas que dan solución a las ecuaciones de continuidad y de transporte de sedimentos.

El II-UNAM realizó un estudio para el determinar la profundidad de socavación en el río La Sabana.

Se utilizaron los resultados obtenidos mediante una simulación hidráulica realizada en un modelo unidimensional con un gasto de diseño de $1,477.44 \text{ m}^3/\text{s}$ y en un modelo bidimensional con el hidrograma que se muestra en la figura 3.1. Coeficientes de Manning de 0.026 en la cubeta principal y de 0.05 en los hombros del cauce. La geometría de las secciones para el modelo unidimensional se presenta en el anexo A.

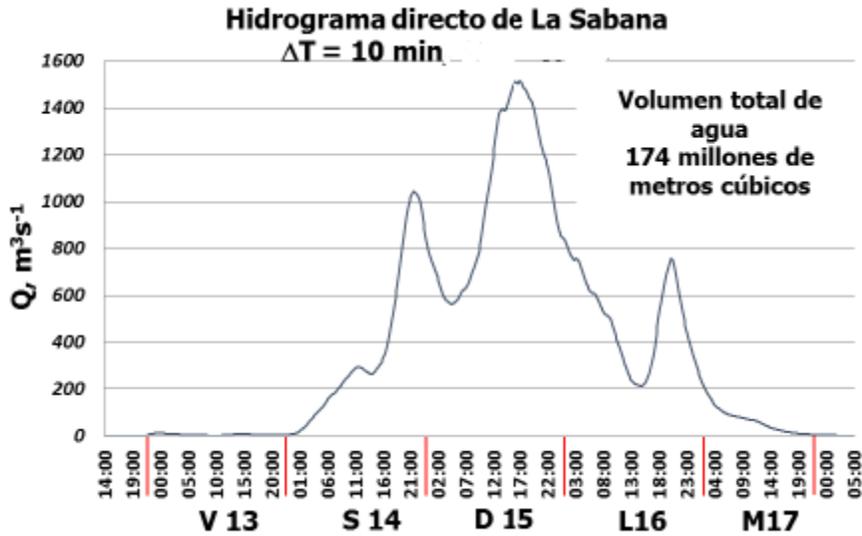


Figura 3.1 Hidrograma de salida en la cuenca del río la Sabana

Para el cálculo de la socavación, se utilizaron los datos de geotecnia mostrados en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Datos de geotecnia para el cálculo de la socavación

ESTRATO	SECCIÓN									
	2+827.676	4+246.837	5+344.772	5+990.338	6+977.913	7+788.610	9+022.910	10+288.197	10+831.512	
I	Material	Arena	Arena color café claro	Arena	Arena	Arcilla con arena	Arena fina	Arena con gravilla	Arcillas c/ grava color café claro	Arena arcillosa color café claro
	Profundidad	26.27 m	18.94 m	16.97 m	19.18 m	19.60 m	18.80 m	14.10 m	15.11 m	13.90 m
	Propiedad	D_{84} 0.00057 m	D_{84} 0.0041 m	D_{84} 0.0040 m	D_{84} 0.0040 m	γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.0040 m	D_{84} 0.0300 m	γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.00012 m
II	Material	Arena con poco limo	Arcilla arenosa color café claro	Arena con limo	Arena con limo	Arena	Arena con gravilla	Arcilla con poca arena y gravilla	Relleno	Arena c/gravilla color café claro
	Profundidad	25.07 m	15.34 m	12.57 m	13.40 m	18.70 m	15.80 m	11.70 m	13.31 m	10.30 m
	Propiedad	D_{84} 0.0007 m	γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.0004 m	D_{84} 0.00038 m	D_{84} 0.0041 m	D_{84} 0.0080 m	γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.0062 m	D_{84} 0.0045 m
III	Material	Roca disgregada	Arena c/gravillas color café claro	Arena		Arcilla con arena	Arena con arcilla	Arena c/gravilla y poca arcilla	Arcilla arenosa color café claro	Arena arcillosa color gris claro
	Profundidad	22.64 m	10.94 m	11.97 m		17.70 m	14.60 m	9.26 m	11.51 m	8.50 m
	Propiedad	D_{84} 0.0050 m	D_{84} 0.0017 m	D_{84} 0.0040 m		γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.0070 m	D_{84} 0.0100 m	γ_d 1,100 kg/m ³	D_{84} 0.0003 m
IV	Material	Roca disgregada	Arena c/gravillas color café claro			Arena	Arena con gravilla		Arena c/gravillas color café claro	Arena color café claro
	Profundidad	19.00 m	9.69 m			17.10 m	13.40 m		9.11 m	5.50 m
	Propiedad	D_{84} 0.0050 m	D_{84} 0.0009 m			D_{84} 0.0041 m	D_{84} 0.00820 m		D_{84} 0.00470 m	D_{84} 0.00110 m
V	Material					Arena con arcilla	Arena con gravilla		Arena color gris claro	Arena c/arcillosa color gris claro
	Profundidad					12.00 m	12.80 m		2.51 m	4.30 m
	Propiedad					D_{84} 0.0040 m	D_{84} 0.0090 m		D_{84} 0.0027 m	D_{84} 0.0031 m
VI	Material						Arena con gravilla		Arena c/gravillas color gris claro	
	Profundidad						9.80 m		1.31 m	
	Propiedad						D_{84} 0.010 m		D_{84} 0.0038 m	

Tabla 3.1 (continuación)

ESTRATO	SECCIÓN																
	12+834.279		13+981.284		15+185.166		16+306.866		17+087.654		18+073.658		20+052.725		21+049.892		
I	Material	Arena c/gravillas color café claro		Arena color café claro		Arena color café claro		Arena color café claro		Arena compacidad media		Arena compacidad media color café		Arena			
	Profundidad	8.91 m		8.39 m		2.72 m		-0.53 m		-0.78 m		1.50 m		-4.32 m		-2.21 m	
	Propiedad	D ₈₄	0.00180 m	D ₈₄	0.00280 m	D ₈₄	0.00310 m	D ₈₄	0.00071 m	D ₈₄	0.0010 m	D ₈₄	0.00600 m	D ₈₄	0.00100 m	D ₈₄	0.00057 m
II	Material	Arcillas color café claro		Arcilla arenosa color café claro		Arena c/gravillas color café claro		Arena fina color café claro		Limo arenoso color gris claro		Arena con limo		Arcilla arenosa color café claro		Arena con poco limo	
	Profundidad	5.11 m		5.39 m		0.32 m		-2.33 m		-5.58 m		-3.30 m		-6.12 m		-5.21 m	
	Propiedad	Y _d	1,100 kg/m ³	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.0035 m	D ₈₄	0.0020 m	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.0070 m	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.00070 m
III	Material	Arcillas c/gravilla color café claro		Arena color gris claro		Arcillas color café claro		c/gravillas color café claro		Arena compacidad alta		Arena color gris claro		Arena			
	Profundidad	1.31 m		3.59 m		-1.48 m		-4.13 m		-9.98 m		-9.12 m		-7.06 m			
	Propiedad	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.0018 m	Y _d	1,100 kg/m ³	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.0010 m			D ₈₄	0.00100 m	D ₈₄	0.00062 m
IV	Material	Arcilla arenosa color café claro		Arena arcillosa color gris claro		Arcilla limosa color gris claro		Arcillas limosa color gris claro				Arena arcillosa color gris claro					
	Profundidad	0.11 m		1.79 m		-5.88 m		-8.53 m				-11.12 m					
	Propiedad	Y _d	1,100 kg/m ³	Y _d	2,000 kg/m ³	Y _d	1,100 kg/m ³	Y _d	1,100 kg/m ³					D ₈₄	0.00100 m		
V	Material	Arcillas c/gravilla color gris claro		Arcilla color gris claro		Arena c/gravillas color café claro		Arena limosa color gris claro				Arcilla color gris claro					
	Profundidad	-1.09 m		-0.01 m		-8.28 m		-10.93 m				-12.92 m					
	Propiedad	Y _d	1,100 kg/m ³	Y _d	1,100 kg/m ³	D ₈₄	0.00011 m	Y _d	1,100 kg/m ³					Y _d	1,100 kg/m ³		
VI	Material					Arcillas color gris claro											
	Profundidad					-8.88 m											
	Propiedad					Y _d	1,100 kg/m ³										

El cálculo de la socavación se realizó empleando los siguientes criterios para ambos modelos:

-Fórmula general (Barbosa Gil, 2013)

$$h_s = k \frac{q^\omega}{D_50^\eta} \quad \text{ec. 3.1}$$

Donde los valores de los coeficientes k , ω y η se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Coeficientes k , ω y η para el cálculo de la socavación

Método	k	η	ω
Maza-Echavarría (1973)	0.365	0.157	0.784
Lischtvan-Lebediev (1959)	0.310	0.212	0.758
Laursen (1963)	0.210	0.285	0.857
Maza-García (1978)	0.209	0.304	0.870
Neil (1980)	0.320	0.200	0.798
Lacey (1930)	0.351	0.167	0.667
Blench (1939)	0.692	0.083	0.667

-Socavación máxima y promedio (Blodgett, 1986)

$$h_{sm\acute{a}x} = 6.5 D_{50}^{-0.115} \quad ec. 3.2$$

$$h_{sprom} = 1.42 D_{50}^{-0.115} \quad ec. 3.3$$

Para $D_{50} > 1.5$ mm (0.005 ft)

Donde:

D_{50} = Diámetro de la mediana de la curva granulométrica (ft)

$h_{sm\acute{a}x}$ = Estimación máxima de socavación (ft)

h_{sprom} = Estimación promedio de socavación (ft)

-Predicción de socavación general (Blench, 1969; Lu *et al.*, 2012)

$$h_s = 1.20 \left[\frac{q^{2/3}}{D_{50}^{1/6}} \right] \quad ec. 3.4$$

Para $0.06 < D_{50} \leq 2$ mm

$$h_s = 1.23 \left[\frac{q^{2/3}}{D_{50}^{1/12}} \right] \quad ec. 3.5$$

Para $D_{50} > 2$ mm

Con esta información y con los datos de velocidades y gastos unitarios del modelo unidimensional y bidimensional se calcularon las socavaciones.

En el presente trabajo únicamente se muestran los resultados de las secciones donde se presentó la mayor altura de socavación del estudio realizado por el II-UNAM. Estos resultados son el promedio de las alturas de socavación que se calcularon con los métodos descritos anteriormente.

Los resultados del cálculo de la altura de socavación promedio para el modelo unidimensional se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.3. Secciones con mayor altura de socavación promedio en el modelo unidimensional

Sección	Socavación	Ancho de superficie libre
	m	m
6+977.913	8.9	72
7+788.610	8.9	56
9+022.910	8.5	82
10+831.512	8.5	112
13+981.284	9.0	80

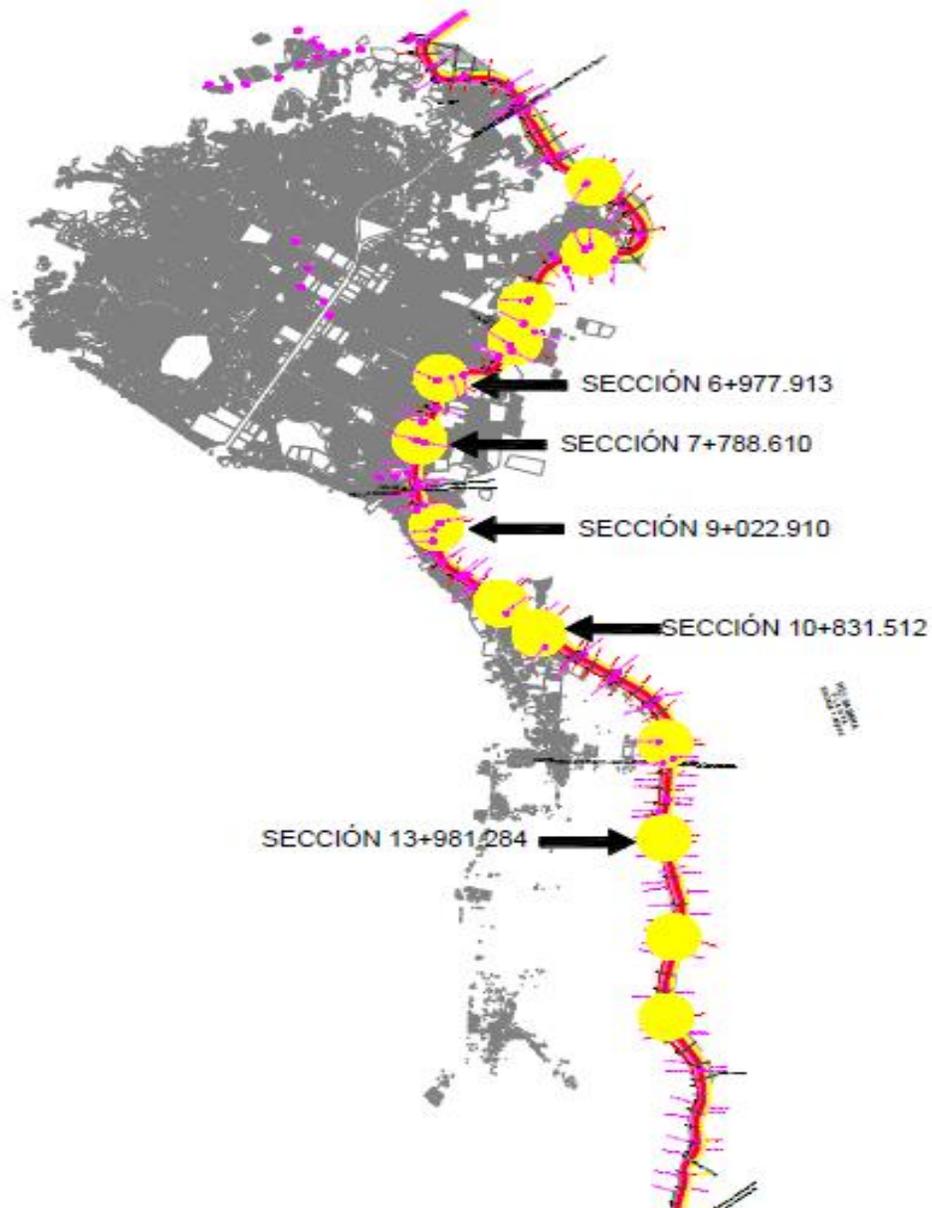


Figura 3.2 Secciones con mayor socavación

Para el modelo bidimensional el II-UNAM hizo un análisis de la socavación en el cual los cálculos se realizaron en tres en tres puntos de las secciones: en el centro, margen derecha y margen izquierda. La socavación en el centro correspondería a la socavación máxima, mientras que las de las márgenes corresponderían a la socavación general a la que estarían expuestas las estructuras de protección.

Los resultados de las secciones con mayor altura de socavación promedio para el modelo bidimensional en estos tres puntos se muestran a continuación:

Tabla 3.4. Promedio de los resultados de socavación, en m.

Sección	M. izquierda	Centro	M. derecha
6+977.913	9.0	17.1	12.6
7+788.610	8.1	12.7	2.2
9+022.910	8.1	7.7	5.6
10+831.512	10.1	11.6	11.5
13+981.284	10.3	10.3	8.0

Cabe mencionar que los valores promedio para la socavación oscilan entre los 8 m con el modelo unidimensional y 10 m con el modelo bidimensional. Se debe tener en consideración que en algunas secciones se presentan alturas de socavación de entre 10 y 12 m, que serán las que necesiten protección adicional.

Con los valores de la socavación en las diferentes secciones y las condiciones del flujo se puede determinar cuáles zonas son las más afectadas y por lo tanto, proponer en estas el diseño de espigones como medida de mitigación de la socavación; además de que estos valores son útiles para el diseño geométrico de las estructuras utilizando los criterios de diseño mencionados en el capítulo anterior.

Se hace la mención de que los resultados mostrados abarcan el análisis de un tramo del río la Sabana, el cual está comprendido desde el cruce del río con la autopista México-Acapulco (cadenamiento 0+000) a la salida a la laguna de tres palos (cadenamiento 20+000).

IV. PROPUESTA DEL DISEÑO DE ESPIGONES EN LA MARGEN DE UNA CURVA DEL RÍO LA SABANA

Mediante el uso de los criterios y datos de los capítulos anteriores, se estableció una propuesta de diseño de espigones para la protección de la margen derecha de una curva en el río la Sabana que se encuentra entre los cadenamientos 6+977.913 al 7+788.610 (figura 3.2).

Se eligió esta zona debido a que es una de las que presenta mayor altura de socavación; 8.9 m como resultado del análisis con un modelo unidimensional y de 12 m con un modelo bidimensional, según el estudio presentado en el capítulo 3. Esto representa una situación de vulnerabilidad para un sector de la población cuyas viviendas se encuentran ubicadas a pocos metros de la margen derecha del río, en caso de falla del talud debida a la erosión. Por ello se necesita crear un sistema de espigones que permita reducir la velocidad del flujo en esta zona y con ello evitar la falla por socavación.

El tramo de estudio de la curva (L_B) tiene 200m de longitud, la cual fue obtenida trazando el eje del río y una circunferencia aproximada a la curva de estudio con el uso de *Google Earth*, figura 4.1, teniéndose como resultado un radio de curvatura $r=290$ m y un ángulo de la curva $\theta= 38^\circ$. Con este radio de curvatura se cumple la condición de la ecuación 2.15.

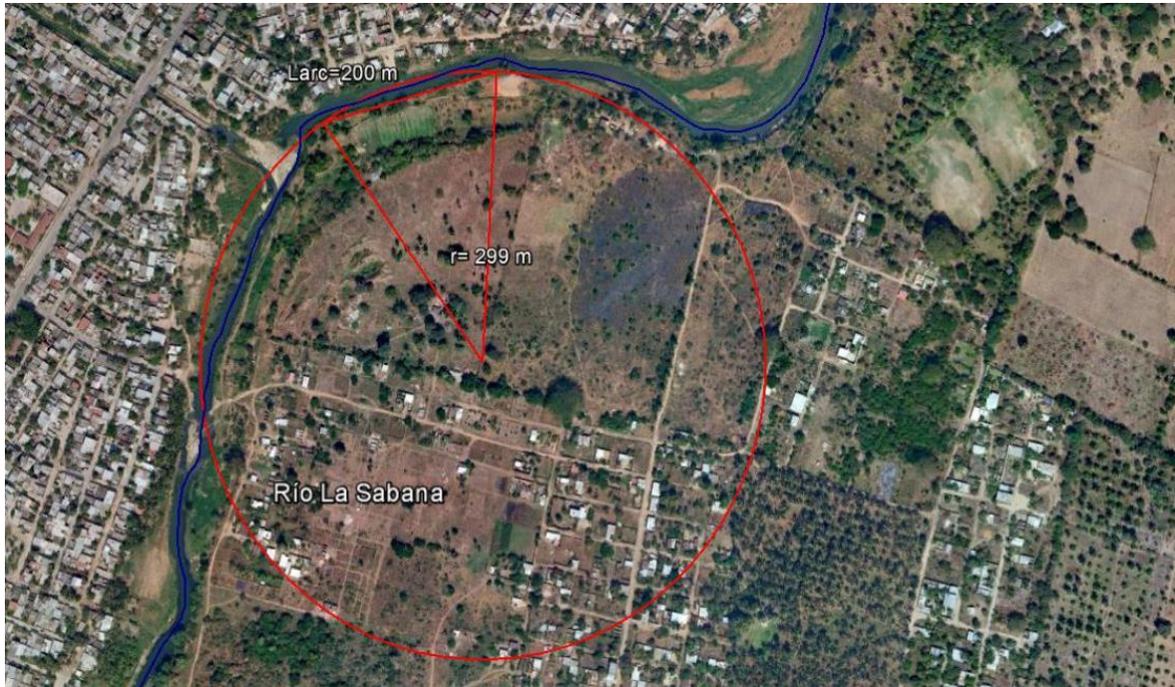


Figura 4.1 Tramo de la curva de estudio

Del análisis del capítulo 3, se tiene una superficie libre promedio de 72 m en el cadenamiento 6+977.913, aunque se debe tener en cuenta que la superficie libre de la sección se va reduciendo hasta llegar a 56 m en el cadenamiento 7+788.610. En este diseño se propone mantener una superficie libre constante de 70 m para el tramo de 200 m que comprende la curva en estudio. De esta manera la longitud de los espigones se mantendrá constante a través del tramo. Esto puede conllevar a que conforme el ancho del cauce se reduzca, se aumente la velocidad del flujo en la otra orilla, y con esto la socavación y cambio en la forma de la margen contraria en ese tramo; pero dadas las condiciones de la topografía y la nula urbanización en la margen izquierda se permitiría, con las medidas pertinentes, esta situación.

Teniendo como longitud de la superficie libre $TW=70$ m, se propone que la longitud de los espigones sea $L_w= 10$ m y de un material impermeable como concreto. Con esto se cumple la condición de la ecuación 2.18 y las recomendaciones señaladas en los criterios del capítulo 2, por ejemplo, que la longitud sea menor o igual al 15% del ancho de la superficie libre.

Si se propone una longitud de separación entre los espigones de 40m, cumpliendo con la condición de la ecuación 2.24, el ángulo entre espigones $\theta_w=8^\circ$. El número de espigones requeridos se obtiene utilizando las ecuaciones más apropiadas de la 2.1 a la 2.11.

-Curvatura relativa

$$R_c = \frac{r}{TW} = \frac{299}{70} = 4.27$$

-Proporción de longitud de la estructura

$$L_r = \frac{L_w}{TW} = \frac{10}{70} = 0.142$$

-Relación de separación

$$SR = R_c \frac{\theta_w}{L_r} = 4.27 \left(\frac{0.14}{0.142} \right) = 4.2$$

-Longitud del arco

$$L_{arc} = SR L_w = 4.2 (10) = 42 \text{ m}$$

-Número de espigones

$$\text{Número de espigones} = \frac{L_B}{L_{arc}} = \frac{200}{42} = 4.7$$

Se determina que el número de espigones utilizados para proteger el tramo de 200 m sea de 4 para evitar un estrangulamiento del flujo debido al estrechamiento del cauce y que con esto se incremente demasiado la velocidad aguas abajo.

Cada espigón con una longitud de 10 m y un ancho de 3 m, con una separación entre ellos de 40 m y un ángulo de ataque de 90° ; la altura del espigón queda determinada por la altura de socavación y cubre la altura total de la orilla, entonces:

-Longitud remanente

$$L_{rem} = L_B - ((\text{Número de espigones} - 1)(L_{arc})) = 200 - ((4 - 1)(40)) = 80 \text{ m}$$

A la longitud remanente se le debe restar el valor de los anchos de los espigones, que para este caso se propone de 3 m, entonces:

$$L_{remtotal} = L_{rem} - ((\text{Número de espigones})(\text{ancho del espigón}))$$

$$L_{remtotal} = 80 - ((4)(3)) = 68 \text{ m}$$

La longitud remanente debe considerarse aguas arriba y aguas abajo por lo que en ambos extremos se tendrá:

$$\frac{L_{remtotal}}{2} = 34 \text{ m}$$

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los espigones.



Figura 4.2 Ubicación de los espigones

V. REVISIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE UN MODELO 1D (HEC-RAS)

Para revisar el diseño de los espigones y obtener una simulación del comportamiento hidráulico del cauce, antes y una vez que se tienen construidos los espigones, es posible utilizar la herramienta *HEC-RAS*. Este software creado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers puede desarrollar un proceso de cálculo hidráulico unidimensional para un canal natural en flujo no permanente, por lo que, se utiliza para el cálculo hidráulico el hidrograma de la figura 3.1, coeficientes de Manning de 0.026 en la cubeta principal y de 0.05 en los hombros del cauce y las secciones del anexo A.

Debido a que las secciones del anexo A se encuentran numeradas con el cadenamiento 0+000 para la sección aguas abajo y con el cadenamiento 20+000 para la sección aguas arriba y el cálculo hidráulico en HEC-RAS se realiza de aguas abajo hacia aguas arriba; *la longitud de la curva se encuentra comprendida entre el cadenamiento 14+000 al 13+800 en este caso*. Esta longitud de la curva se encuentra entre los cadenamientos 6+977.913 y 7+788.610 del análisis mostrado en el capítulo 3. Por lo que las tablas y resultados mostrados con el uso del modelo HEC-RAS estarán considerados entre los cadenamientos 14+000 y 13+600, esto es para conocer el comportamiento hidráulico doscientos metros aguas abajo de la longitud de la curva, haciéndose notar que sólo se ha invertido la numeración de las secciones con respecto a las del análisis mostrado en el capítulo 3.

En todas las corridas del programa el cálculo hidráulico se realiza a través de todas las secciones del anexo A; se trabaja y se muestran los resultados únicamente en las secciones de interés.

Primero, se hizo el cálculo hidráulico del cauce sin espigones para conocer su comportamiento, en este caso se ordenó al programa que interpolara entre las secciones 14+000 y 13+800 (equivalentes a los 200 m de la longitud de la curva) a cada 10 m para obtener una mayor cantidad de datos entre secciones.

De esta manera se obtuvo la información necesaria para realizar el cálculo de la socavación con la fórmula general (ec. 3.1) y los coeficientes de Maza-Echeverría, Maza-García, Neill y Laurse y utilizando un $D_{50} = 0.06$. De los resultados se obtiene un promedio de todas las secciones para tener un promedio general en la longitud de la curva y los doscientos metros aguas abajo. Este software permite mostrar los resultados de gasto y superficie libre del agua dividiendo la sección, por lo que se optó por ordenarle que mostrara los gastos a mitad del canal y de esta manera poder conocer de una manera más acertada el gasto unitario.

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de la simulación hidráulica y el cálculo de la altura de socavación a cada 10 m dentro de los 200 m de la longitud de la curva, más los 200 m aguas abajo para conocer la socavación promedio en todo el tramo.

Tabla 5.1 Comportamiento hidráulico y altura de socavación sin espigones

Sin espigones						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	F _R	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	347.4	6.01	1.74	33.24	0.22672477	10.45	3.57	3.79	3.65	3.50	3.63
13+990	358	5.99	1.79	33.35	0.23362891	10.73	3.65	3.88	3.73	3.58	3.71
13+980	368.73	5.98	1.84	33.46	0.24035557	11.02	3.73	3.97	3.81	3.66	3.79
13+970	357.33	5.9	1.86	32.56	0.24460983	10.97	3.71	3.95	3.80	3.65	3.78
13+960	345.74	5.83	1.87	31.67	0.24739692	10.92	3.70	3.93	3.78	3.63	3.76
13+950	356.47	5.81	1.93	31.67	0.25577389	11.26	3.79	4.04	3.88	3.73	3.86
13+940	367.7	5.79	1.99	31.85	0.2641805	11.54	3.86	4.13	3.96	3.81	3.94
13+930	355.5	5.71	2.01	30.94	0.26869833	11.49	3.85	4.11	3.94	3.79	3.92
13+920	366.99	5.69	2.08	31.02	0.27854423	11.83	3.94	4.22	4.03	3.89	4.02
13+910	378.98	5.66	2.15	31.09	0.28868034	12.19	4.03	4.33	4.13	3.99	4.12
13+900	366.13	5.58	2.18	30.16	0.29479924	12.14	4.02	4.31	4.12	3.98	4.11
13+890	352.99	5.49	2.2	29.21	0.29993246	12.08	4.00	4.30	4.10	3.96	4.09
13+880	365.04	5.45	2.29	29.26	0.31334603	12.48	4.11	4.42	4.21	4.07	4.20
13+870	351.36	5.36	2.32	28.3	0.32010507	12.42	4.09	4.40	4.19	4.05	4.18
13+860	363.65	5.32	2.41	28.32	0.33377068	12.84	4.20	4.53	4.31	4.17	4.30
13+850	376.49	5.28	2.52	28.32	0.35032452	13.29	4.32	4.67	4.43	4.30	4.43
13+840	361.85	5.17	2.56	27.31	0.35965132	13.25	4.30	4.65	4.42	4.29	4.42
13+830	374.88	5.11	2.69	27.27	0.38012706	13.75	4.43	4.81	4.55	4.42	4.55
13+820	359.44	4.99	2.75	26.2	0.39325059	13.72	4.42	4.80	4.54	4.42	4.54
13+810	372.55	4.92	2.9	26.09	0.41764031	14.28	4.56	4.97	4.69	4.57	4.70
13+800	355.62	4.77	2.99	24.92	0.43731962	14.27	4.56	4.97	4.69	4.57	4.70
13+600	396.98	5.61	2.24	31.64	0.30210196	12.55	4.12	4.44	4.23	4.09	4.22
										Promedio	4.14

El promedio de altura de socavación en el tramo sin espigones es de 4.14 m.

Para diseñar los espigones y revisar su funcionamiento HEC-RAS cuenta con una herramienta que permite simular puentes; entonces para lograr crear los espigones en el modelo, se crea el estribo (abutment) del puente únicamente en la margen que se está estudiando, en este caso la margen derecha, sin pilas y sin el estribo de la otra margen esto se ejemplifica en la figura 5.1. Cabe recalcar que este software muestra los resultados de aguas abajo hacia aguas arriba; por lo que las figuras que se presentan a continuación muestran los espigones del lado izquierdo por la presentación de la interfaz del programa, pero realmente los espigones están en la

margen derecha; por lo que se debe de tener cuidado al utilizar este software con este fin. El programa permite diseñar los espigones con una longitud, un ancho y una separación entre ellos.

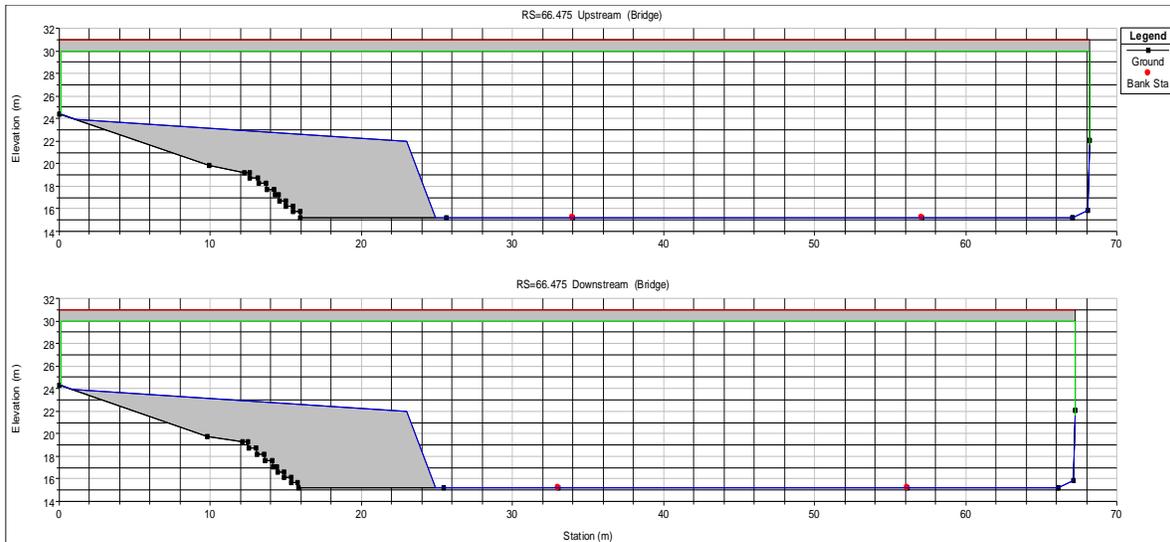


Figura 5.1 Diseño de un espigón en HEC-RAS

La figura 5.1 muestra las caras del espigón aguas arriba y aguas abajo. Cada espigón se diseña con las especificaciones requeridas a la distancia deseada uno por uno hasta tener el sistema de espigones como se muestra en la siguiente figura:

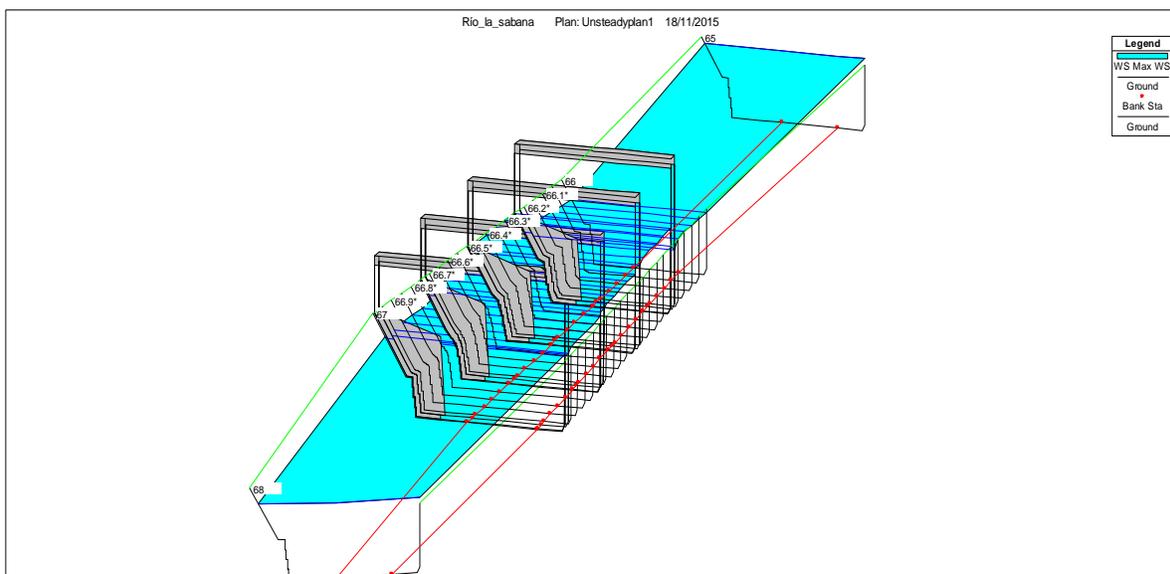


Figura 5.2 Sistema de espigones en el cauce visto de aguas abajo

Una vez que se diseñó el sistema de espigones y se introdujeron las condiciones hidráulicas del problema, se realizó la simulación hidráulica, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.2. Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 40 m de separación y una longitud del espigón de 10 m

Espigones a 40m longitud del espigón 10m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	F _R	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	347.15	6	1.74	33.19	0.22691363	10.46	3.58	3.79	3.66	3.50	3.63
13+990	256.59	5.95	1.3	33.2	0.17024401	7.73	2.82	2.91	2.87	2.70	2.83
13+980	264.33	5.94	1.33	33.34	0.17431926	7.93	2.88	2.98	2.93	2.76	2.89
13+970	256.19	5.88	1.34	32.48	0.17652373	7.89	2.87	2.96	2.92	2.75	2.87
13+960	247.93	5.81	1.35	31.62	0.1789092	7.84	2.85	2.95	2.91	2.73	2.86
13+950	255.7	5.81	1.39	31.75	0.18421021	8.05	2.91	3.02	2.97	2.80	2.92
13+940	372.88	6.16	1.82	33.17	0.23424374	11.24	3.78	4.03	3.87	3.72	3.85
13+930	360.88	6.08	1.84	32.28	0.23837077	11.18	3.77	4.02	3.86	3.71	3.84
13+920	372.53	6.07	1.9	32.38	0.2463464	11.50	3.85	4.12	3.95	3.80	3.93
13+910	384.7	6.05	1.96	32.48	0.25454545	11.84	3.94	4.22	4.04	3.89	4.02
13+900	372.08	5.97	1.98	31.57	0.25886002	11.79	3.93	4.20	4.02	3.88	4.01
13+890	367.87	6.4	1.76	32.6	0.22223356	11.28	3.80	4.05	3.89	3.74	3.87
13+880	380.42	6.39	1.82	32.71	0.22998945	11.63	3.89	4.16	3.98	3.83	3.96
13+870	367.4	6.31	1.83	31.81	0.23271446	11.55	3.87	4.13	3.96	3.81	3.94
13+860	380.29	6.29	1.89	31.91	0.24072625	11.92	3.96	4.24	4.06	3.92	4.04
13+850	393.86	6.28	1.96	32	0.24984071	12.31	4.06	4.37	4.16	4.02	4.15
13+840	361.74	5.17	2.56	27.31	0.35965132	13.25	4.30	4.65	4.42	4.29	4.41
13+830	374.77	5.11	2.69	27.27	0.38012706	13.74	4.43	4.81	4.55	4.42	4.55
13+820	359.33	4.99	2.75	26.2	0.39325059	13.71	4.42	4.80	4.54	4.42	4.54
13+810	372.43	4.92	2.9	26.09	0.41764031	14.27	4.56	4.97	4.69	4.57	4.70
13+800	355.38	4.76	2.99	24.92	0.43777875	14.26	4.56	4.96	4.68	4.57	4.69
13+600	396.74	5.61	2.24	31.64	0.30210196	12.54	4.12	4.44	4.23	4.09	4.22
										Promedio	3.85

Con esta configuración del sistema de espigones se tiene una socavación promedio en el tramo de 3.85 m. Esto representa una disminución en la altura de socavación de 29 cm, que demuestra que esta configuración favorece el mantenimiento de la margen.

Este resultado no representa una disminución considerable de la altura de socavación, pero teniendo en consideración que este software no está desarrollado para el diseño de espigones, se acepta el resultado.

Para hacer una comparación con una longitud diferente en los espigones y revisar los resultados anteriores, se simuló un sistema de espigones a 40 m de separación entre ellos y variando la longitud del espigón a 20 m. Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 40 m de separación y una longitud del espigón de 20 m

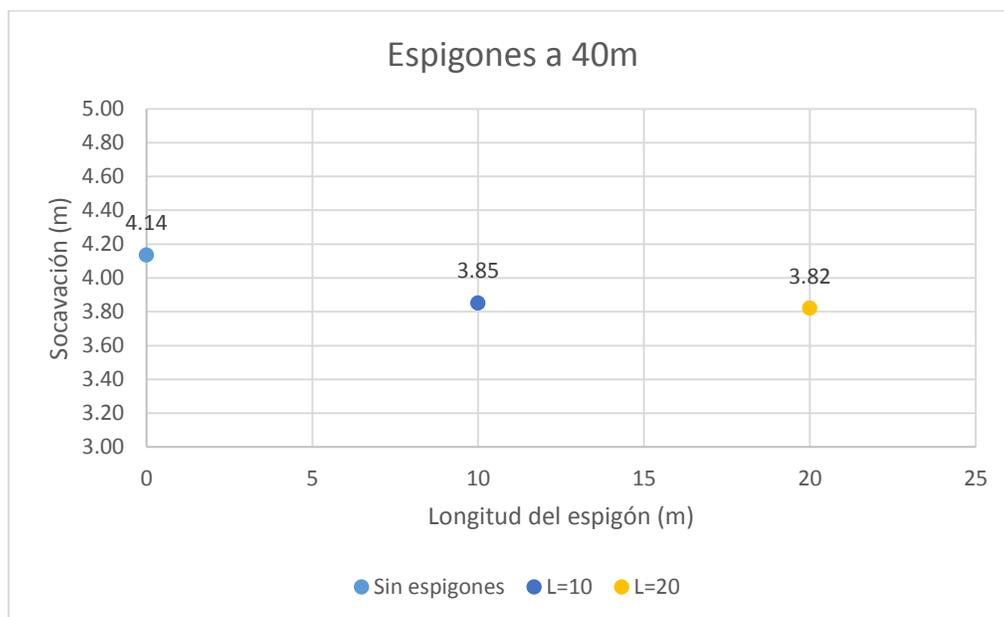
Espigones a 40m longitud del espigón 20m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	FR	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	346.75	5.96	1.76	33.08	0.23029075	10.48	3.58	3.80	3.66	3.51	3.64
13+990	286.5	5.94	1.45	33.17	0.19004732	8.64	3.08	3.21	3.14	2.97	3.10
13+980	295.13	5.93	1.49	33.3	0.19545459	8.86	3.14	3.28	3.20	3.04	3.17
13+970	286.03	5.87	1.5	32.43	0.19776943	8.82	3.13	3.27	3.19	3.02	3.15
13+960	276.78	5.8	1.51	31.56	0.20028569	8.77	3.11	3.25	3.18	3.01	3.14
13+950	285.45	5.79	1.56	31.69	0.20709627	9.01	3.18	3.33	3.25	3.08	3.21
13+940	293.8	5.71	1.63	31.57	0.21789964	9.31	3.26	3.42	3.33	3.17	3.30
13+930	284.08	5.64	1.64	30.69	0.22059276	9.26	3.25	3.41	3.32	3.15	3.28
13+920	293.36	5.63	1.69	30.81	0.22751994	9.52	3.32	3.49	3.39	3.23	3.36
13+910	303.07	5.61	1.75	30.92	0.23601716	9.80	3.40	3.58	3.47	3.31	3.44
13+900	292.87	5.54	1.76	30.03	0.23886073	9.75	3.39	3.57	3.46	3.30	3.43
13+890	357.89	5.8	2.03	30.36	0.26925824	11.79	3.93	4.20	4.02	3.88	4.01
13+880	370.14	5.78	2.1	30.44	0.2790245	12.16	4.02	4.32	4.12	3.98	4.11
13+870	356.72	5.69	2.13	29.51	0.28524	12.09	4.01	4.30	4.10	3.96	4.09
13+860	369.26	5.66	2.21	29.57	0.29673653	12.49	4.11	4.42	4.21	4.08	4.20
13+850	382.39	5.63	2.29	29.61	0.30829625	12.91	4.22	4.55	4.33	4.19	4.32
13+840	361.74	5.17	2.56	27.31	0.35965132	13.25	4.30	4.65	4.42	4.29	4.41
13+830	374.77	5.11	2.69	27.27	0.38012706	13.74	4.43	4.81	4.55	4.42	4.55
13+820	359.22	4.99	2.75	26.2	0.39325059	13.71	4.42	4.80	4.54	4.41	4.54
13+810	372.33	4.92	2.9	26.09	0.41764031	14.27	4.56	4.97	4.69	4.57	4.70
13+800	355.41	4.76	2.99	24.92	0.43777875	14.26	4.56	4.96	4.68	4.57	4.69
13+600	396.77	5.61	2.24	31.64	0.30210196	12.54	4.12	4.44	4.23	4.09	4.22
Promedio											3.82

Con una longitud del cada espigón de 20 m, se tiene una altura de socavación promedio en el tramo de 3.82 m. Esto significa una disminución de 32 cm, y una diferencia favorable de 3 cm contra los espigones de longitud de 10 m. Es evidente que conforme se aumenta la longitud de los espigones se aumenta la protección en la margen, pero se incumple la ecuación 2.18 y el criterio que indica que la longitud del espigón sea menor al 15% del ancho del cauce; además, hidráulicamente no es factible debido a que se estrecha el cauce, lo cual implica un aumento en la profundidad y velocidad del flujo.

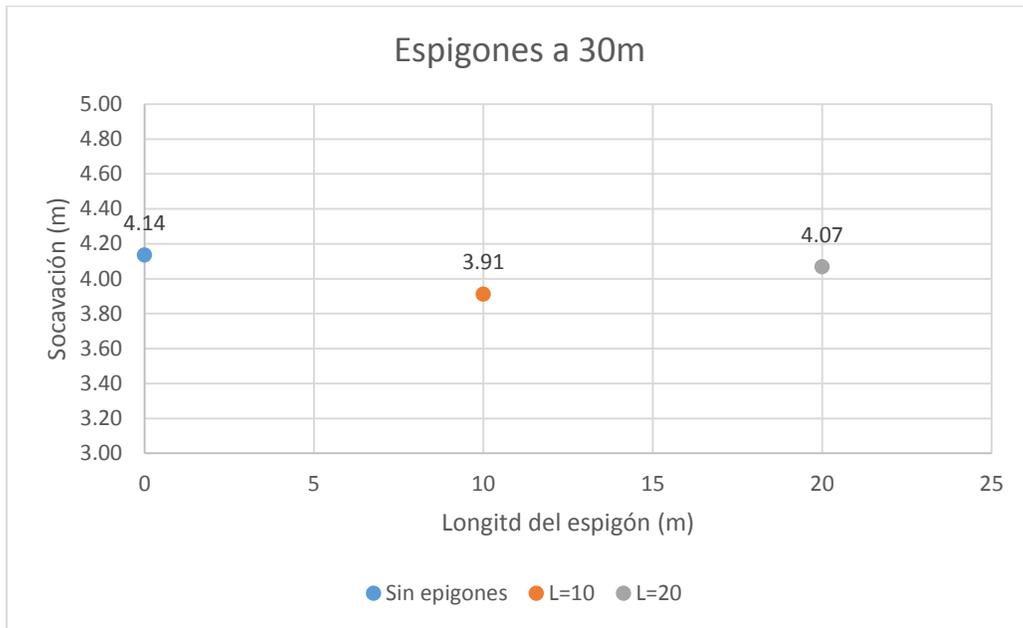
Para revisar el funcionamiento con otras longitudes de separación entre espigones, se probaron configuraciones a 20 y 30 m de separación, con longitudes de 10 y 20 m de cada espigón. Las tablas con los resultados de las simulaciones y las alturas de socavación se presentan en el anexo B.

A continuación se muestran las gráficas que resumen estos resultados. En cada grafica se observa la altura de socavación para una determinada separación entre espigones y diferentes longitudes del espigón; incluyendo la altura de socavación sin los espigones.

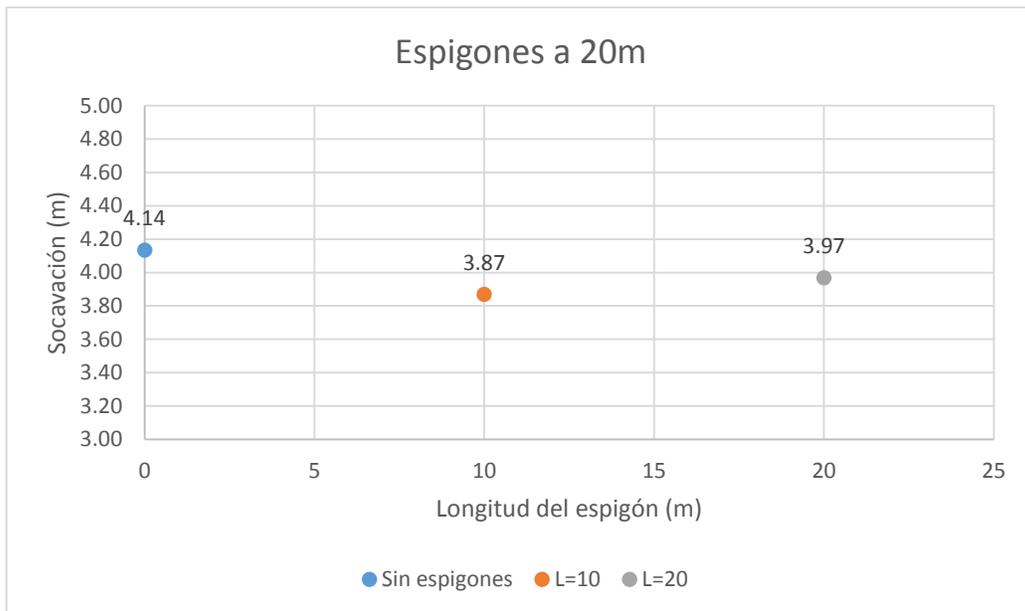
Gráfica 5.1. Espigones a 40 m de separación



Gráfica 5.2. Espigones a 30 m de separación



Gráfica 5.3. Espigones a 20 m de separación



De la revisión de las gráficas anteriores se tiene que la mejor configuración es en la que los espigones tienen una separación de 40 m entre ellos y una longitud de 10 m. Puesto que el sistema que contiene la longitud de los espigones de 20 m no es factible porque no se apega a las recomendaciones del capítulo 2; también se determina que con otras separaciones no se obtiene un mejor funcionamiento hidráulico que favorezca la disminución de la socavación, por lo que la revisión realizada con el modelo 1D, HEC-RAS, señala que el diseño del capítulo 4 es óptimo para la disminución de la socavación en la margen de la curva.

VI. REVISIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE UN MODELO 2D (IBER)

Iber es un modelo numérico de simulación bidimensional de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medio ambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas y el flujo de marea en estuarios. El modelo Iber consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros.

Debido a la imposibilidad de crear la geometría del cauce con los datos disponibles de las secciones con las que se realizó el análisis del capítulo 3 y la revisión del diseño del capítulo 5, para la simulación en un modelo 1D; y por la falta de datos para crear la geometría del cauce, se decidió simplificar las secciones naturales a secciones rectangulares, conservando la geometría de la curva en estudio. A continuación se enlistan las propiedades de la curva:

-Longitud de la curva: $L_B = 200 \text{ m}$

-Radio de curvatura: $r = 290 \text{ m}$

-Ángulo de la curva: $\theta = 38^\circ$

Con estos datos se creó en Auto-CAD la geometría de la curva. Cabe mencionar que como se discutió en el capítulo 3, las secciones que abarcan el tramo de estudio se reducen en el ancho de la superficie libre desde los 70m aguas arriba hasta 56m hacia aguas abajo. Para este caso, los datos de las posiciones en una sección transversal fueron determinados mediante el uso de un método de igual ancho de la superficie a lo largo del tramo.

Este método subdivide la descarga de diseño del ancho del canal en igual número de segmentos, donde el punto medio de cada segmento es tomado como un lugar de prueba y permite estimar el transporte del flujo bajo circunstancias naturales (Walker, 2009).

Entonces, se tomó la decisión de tener en todo el tramo de estudio un ancho del canal de 70m, constante. El tramo de estudio en este análisis consta de la curva de 200 m de longitud que se desea proteger más 100 m de canal recto aguas arriba y 100 m aguas abajo; esto es para conocer el impacto de los espigones en la hidrodinámica del tramo. A continuación se muestra una imagen de la geometría del tramo de estudio hecha en Auto-CAD.

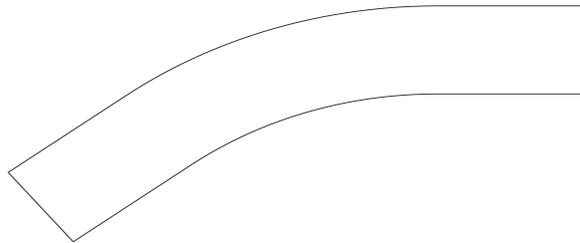


Figura 6.1 Representación de la geometría del tramo de estudio en Auto-CAD

De la figura 6.1, la entrada del flujo está en el lado derecho y la salida en el lado izquierdo, por lo que el sentido de la dirección del flujo es de derecha a izquierda en todas las simulaciones.

Una vez creada la geometría en Auto-CAD, se guardó el archivo en formato .dxf para ser utilizado en el modelo 2D. Importado el archivo .dxf, en el modelo Iber, se creó la geometría que requiere este software para establecer las condiciones hidráulicas en el modelo. Como condiciones hidráulicas que requiere el modelo numérico se introdujeron en él las que se enlistan enseguida:

Condición de entrada:

$$\text{Gasto pico: } Q_p = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$$

Condición de salida:

Salida tipo vertedero

Tiempo de simulación:

$$800 \text{ s}$$

Intervalo de tiempo:

$$\Delta_t = 10 \text{ s}$$

Además de las condiciones antes mencionadas, se eligieron otros factores como un tirante inicial de 0 m y condiciones de turbulencia para un modelo $K - \varepsilon$ de 0 en todos los casos. Ante la falta de datos, para este caso en particular, fue que se determinó usar las dos condiciones anteriores; esto se debe a que el programa puede trabajar con estas condiciones e iterarlas para estabilizar la simulación. En el caso de la condición de entrada y el tiempo de simulación, se simuló un gasto pico y no el hidrograma de la figura 3.1 debido al costo en el tiempo de simulación por la capacidad de cómputo del equipo con el que se realizó el presente trabajo.

El tiempo de simulación es grande cuando se manejan Modelos Digitales de Elevación o archivos .xyz, para crear la geometría, e hidrogramas de varios días como condición de frontera, razones por las que se hicieron las simplificaciones antes mencionadas a la simulación, tratando siempre de mantener cierto apego a las condiciones reales del problema. Con estas condiciones, el resultado será entonces la condición más desfavorable, o sea, que se presente un evento como el del hidrograma de la figura 3.1, con un gasto pico de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una vez que se introdujeron las condiciones hidráulicas y de frontera del problema se generó la malla con la que trabaja el modelo y se realizó la simulación del tramo en estudio, sin espigones.

Para el cálculo de la altura de socavación en el tramo de estudio se utilizaron los datos de la simulación hidráulica en el modelo numérico, la fórmula general para la socavación (ec. 3.1), los coeficientes de Maza-Echeverría, Maza-García, Neill y Lourse y un $D_{50}=0.06$. De los resultados se generó un promedio de altura en todo el tramo para la margen derecha, el centro y la margen izquierda del cauce.

El tramo de estudio se numeró de las secciones 14+100, aguas arriba, a la 13+700, aguas abajo. Teniéndose cinco secciones intermedias entre las antes mencionadas para conocer el comportamiento del flujo con la simulación; donde la curva de estudio está comprendida entre los cadenamientos 14+000 y 13+800.

Las secciones con las que se trabaja y los resultados de la simulación hidráulica en el modelo Iber para el tramo sin espigones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.1 Simulación hidráulica del tramo de estudio sin espigones

Estación	Sin espigones											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	5.43	3.94	21.43	0.5408	5.42	3.95	21.46	0.5425	5.43	3.94	21.43	0.5409
14+000	5.35	3.76	20.13	0.5191	5.27	4.07	21.51	0.5670	5.16	4.17	21.56	0.5863
13+955	5.32	3.68	19.64	0.5105	5.17	4.18	21.62	0.5868	4.95	4.43	21.98	0.6366
13+905	5.24	3.69	19.38	0.5154	5.06	4.27	21.66	0.6061	4.81	4.49	21.64	0.6554
13+855	5.11	3.84	19.63	0.5423	4.93	4.4	21.74	0.6334	4.69	4.58	21.51	0.6748
13+800	4.91	4.06	20	0.5857	4.8	4.52	21.77	0.6594	4.66	4.42	20.65	0.6541
13+700	4.43	4.64	20.6	0.7046	4.5	4.8	21.64	0.7237	4.4	4.61	20.31	0.7016

Para el cálculo de la altura de socavación en las márgenes y el centro del cauce; sin espigones, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 6.2 Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.28	7.07	6.48	6.47	6.58
14+000	5.97	6.70	6.17	6.14	6.24
13+955	5.86	6.56	6.05	6.01	6.12
13+905	5.80	6.48	5.98	5.94	6.05
13+855	5.86	6.55	6.04	6.00	6.11
13+800	5.94	6.66	6.13	6.10	6.21
13+700	6.08	6.83	6.28	6.26	6.36
				Promedio	6.24

Tabla 6.3 Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.28	7.08	6.49	6.48	6.58
14+000	6.29	7.10	6.50	6.49	6.60
13+955	6.32	7.13	6.53	6.52	6.62
13+905	6.33	7.14	6.54	6.53	6.63
13+855	6.35	7.16	6.56	6.55	6.65
13+800	6.35	7.17	6.56	6.56	6.66
13+700	6.32	7.13	6.53	6.53	6.63
				Promedio	6.63

Tabla 6.4 Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.28	7.07	6.48	6.47	6.58
14+000	6.31	7.11	6.51	6.51	6.61
13+955	6.40	7.23	6.61	6.62	6.72
13+905	6.32	7.13	6.53	6.53	6.63
13+855	6.29	7.10	6.50	6.49	6.60
13+800	6.10	6.85	6.29	6.27	6.38
13+700	6.02	6.75	6.21	6.18	6.29
				Promedio	6.54

A continuación se muestra una imagen que es resultado de la simulación del tramo en Iber, sin espigones. En estas imágenes el sentido del flujo es de arriba hacia abajo.

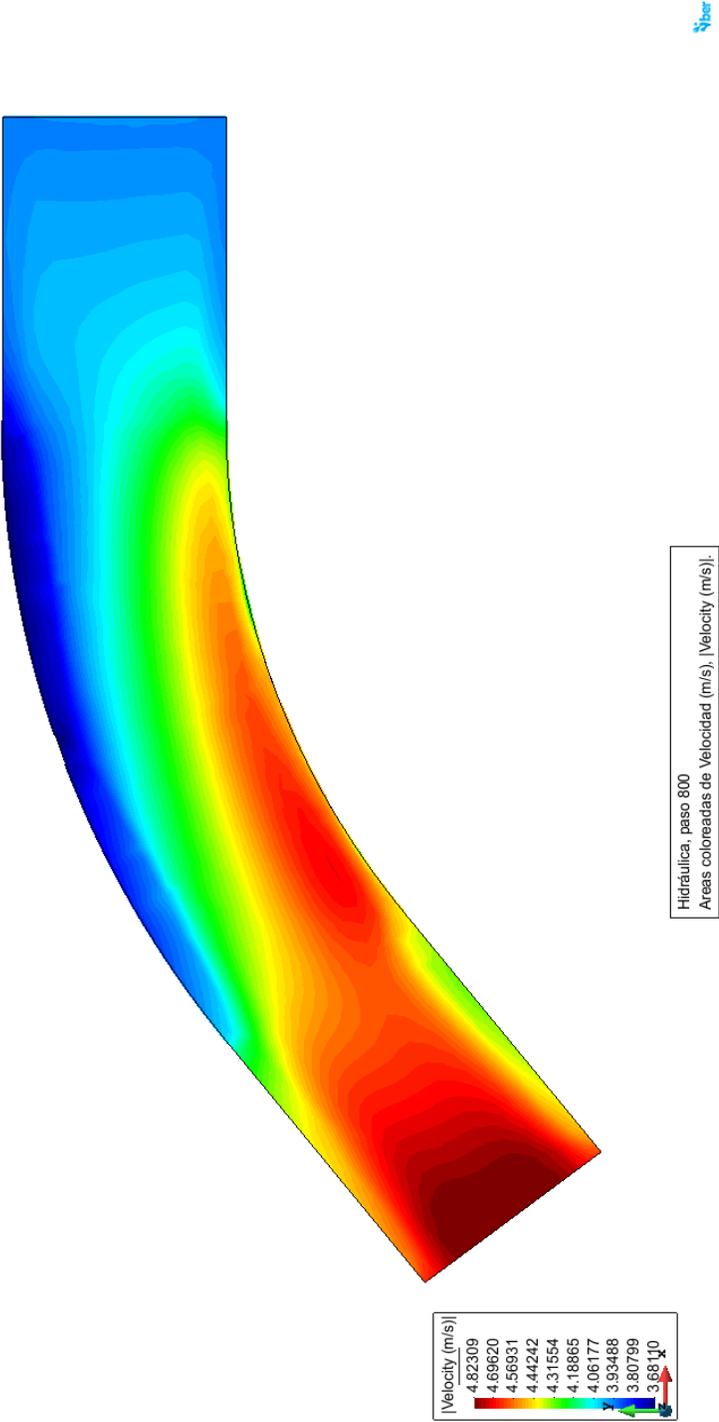


Figura 6.2 Velocidades a través del tramo en estudio en Iber

Teniendo los resultados de la simulación sin espigones, se procedió a realizar el cálculo con el sistema de espigones que se determinó en el capítulo 4, para conocer su funcionamiento. Este sistema de espigones se hizo de la misma manera en que se creó la geometría anterior, añadiendo en Auto-CAD los espigones con las condiciones de separación longitud y ancho determinados en el diseño del capítulo 4; como se muestra en la siguiente figura.

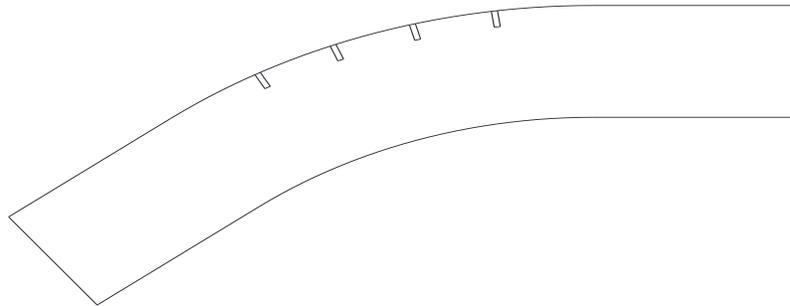


Figura 6.3 Representación de los espigones en el tramo a 40 m de distancia y 10 m de longitud

De la misma manera, se utilizaron las condiciones hidráulicas y de frontera señaladas anteriormente; por lo que, de la simulación para un sistema de espigones de 40 m de separación entre ellos, 10 m de longitud y 3 m de ancho de cada espigón se tiene el comportamiento hidráulico mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 6.5 Simulación hidráulica del tramo con espigones a 40 m y 10m de longitud

Estación	Espigones a 40m de separación y 10m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	6.22	3.45	21.48	0.4415	6.21	3.46	21.54	0.4437	6.22	3.45	21.5	0.4423
14+000	6.25	3.17	19.81	0.4094	6.12	3.56	21.86	0.4606	6.02	3.73	22.53	0.4858
13+955	5.28	0.96	5.07	0.1335	5.79	4.28	24.85	0.5687	5.54	4.65	25.8	0.6309
13+905	5.3	1.32	7	0.1829	5.14	5.32	27.38	0.7490	4.96	5.56	27.61	0.7977
13+855	5.01	1.45	7.29	0.2074	4.89	5.45	26.67	0.7868	4.52	6.12	27.69	0.9194
13+800	4.57	2.14	9.83	0.3208	4.31	6.02	26.02	0.9254	3.7	7.01	26.01	2.1638
13+700	4.05	3.83	15.55	0.6086	4.51	5.29	23.93	0.7954	4.63	5.01	23.23	0.7444

Para las alturas de socavación en la margen derecha, izquierda y centro del cauce en el tramo, con el sistema de espigones se tiene:

Tabla 6.6 Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.49	6.49	6.59
14+000	5.90	6.61	6.09	6.05	6.16
13+955	2.03	2.02	2.05	1.88	1.99
13+905	2.61	2.67	2.65	2.48	2.60
13+855	2.69	2.77	2.74	2.57	2.69
13+800	3.41	3.59	3.48	3.32	3.45
13+700	4.88	5.35	5.02	4.92	5.04
				Promedio	4.08

Tabla 6.7 Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.30	7.10	6.51	6.50	6.60
14+000	6.37	7.20	6.59	6.58	6.68
13+955	7.05	8.04	7.29	7.35	7.43
13+905	7.60	8.75	7.88	7.99	8.06
13+855	7.45	8.56	7.72	7.81	7.88
13+800	7.31	8.37	7.57	7.64	7.72
13+700	6.84	7.79	7.08	7.12	7.21
				Promedio	7.37

Tabla 6.8 Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.50	6.49	6.59
14+000	6.53	7.39	6.75	6.76	6.85
13+955	7.26	8.31	7.52	7.59	7.67
13+905	7.65	8.82	7.93	8.04	8.11
13+855	7.67	8.84	7.95	8.06	8.13
13+800	7.30	8.37	7.56	7.64	7.72
13+700	6.69	7.59	6.91	6.94	7.03
				Promedio	7.44

De los resultados de los dos análisis mostrados antes, se tienen alturas de socavación para el tramo de estudio: en la margen derecha, 6.24 m sin espigones y 4.08 m con el sistema de espigones; para el centro del cauce, 6.63 m sin espigones y 7.37 m con espigones; y para la margen izquierda: 6.54 m sin espigones y 7.44 m con el sistema de espigones. Estos datos representan una disminución de 2.16 m en la altura de socavación en la margen derecha, pero un aumento de 0.74 m en el centro y de 0.9 m en la margen izquierda.

Teniendo en cuenta que, debido a la topografía y urbanización del lugar, se puede permitir cierto aumento en la erosión de la margen contraria a la que se desea proteger, por lo que el diseño muestra ser favorable contra la erosión de la margen derecha.

La siguiente imagen muestra las velocidades obtenidas mediante la simulación en el modelo numérico 2D, con espigones a 40 m de separación y 10 m de longitud.

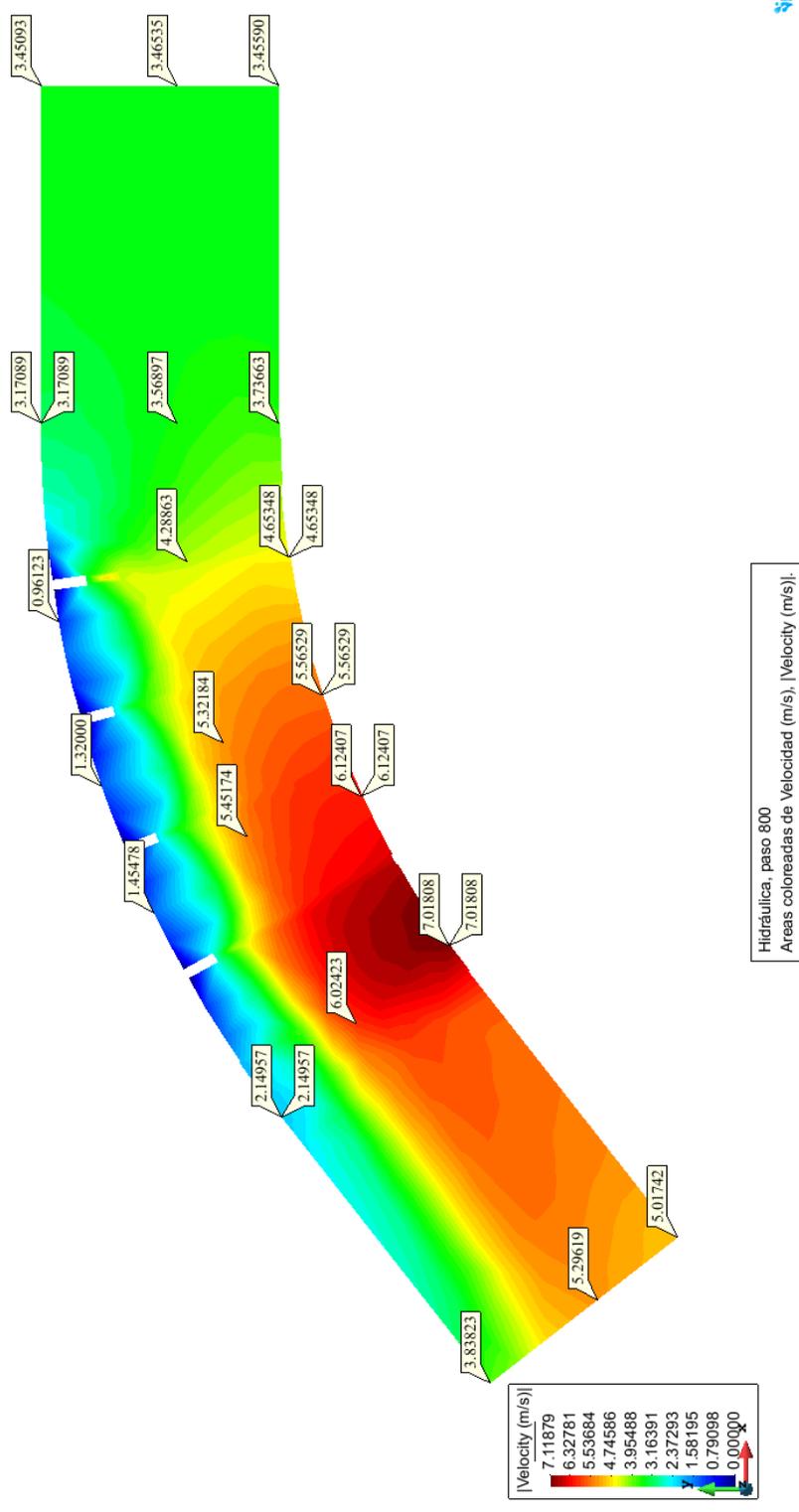


Figura 6.4 Velocidades del flujo y vista de los espigones a 40m y 10 m de longitud en Iber

Al igual que en la revisión del diseño con el modelo 1D, se realizó la simulación con espigones de 20 m de longitud y 40 m de separación para conocer el comportamiento que tiene el modelo bajo estas condiciones.

Los resultados de la simulación hidráulica y la altura de socavación se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 6.9 Simulación hidráulica del tramo con espigones a 40 m y 20m de longitud

Estación	Espigones a 40m de separación y 20m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	7.07	3.02	21.41	0.3633	7.05	3.04	21.49	0.3661	7.05	3.04	21.47	0.3655
14+000	7.03	2.73	19.25	0.3297	6.95	3.06	21.33	0.3710	6.85	3.28	22.54	0.4006
13+955	4.91	0.18	0.89	0.0262	5.45	5.97	32.59	0.8163	5.86	5.41	31.78	0.7142
13+905	5.58	0.89	4.97	0.1208	5.53	5.87	32.51	0.7966	4.83	6.69	32.34	0.9714
13+855	5.04	0.52	2.66	0.0749	4.71	6.68	31.52	0.9822	5.24	5.95	31.22	0.8301
13+800	3.94	0.46	1.83	0.0749	2.87	8.84	25.39	1.6658	3.1	8.57	26.59	1.5553
13+700	3.66	3.19	11.72	0.5331	4.59	5.27	24.23	0.7865	4.47	4.76	21.3	0.7189

Tabla 6.10 Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.27	7.07	6.48	6.47	6.57
14+000	5.77	6.44	5.95	5.90	6.02
13+955	0.52	0.44	0.51	0.42	0.47
13+905	2.00	1.98	2.02	1.85	1.96
13+855	1.22	1.15	1.23	1.08	1.17
13+800	0.91	0.83	0.91	0.79	0.86
13+700	3.91	4.18	4.00	3.86	3.99
				Promedio	3.01

Tabla 6.11 Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.50	6.49	6.59
14+000	6.25	7.04	6.46	6.45	6.55
13+955	8.72	10.19	9.06	9.27	9.31
13+905	8.70	10.16	9.04	9.25	9.29
13+855	8.49	9.89	8.82	9.01	9.05
13+800	7.17	8.20	7.42	7.49	7.57
13+700	6.91	7.87	7.15	7.19	7.28
				Promedio	7.95

Tabla 6.12 Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.28	7.08	6.49	6.48	6.59
14+000	6.53	7.39	6.75	6.76	6.86
13+955	8.55	9.96	8.88	9.07	9.12
13+905	8.66	10.12	9.00	9.21	9.25
13+855	8.43	9.81	8.75	8.94	8.98
13+800	7.43	8.53	7.70	7.79	7.86
13+700	6.25	7.04	6.45	6.44	6.54
				Promedio	7.88

En la siguiente imagen se muestran las velocidades obtenidas mediante la simulación en el modelo, con espigones a 40 m de separación y 20 m de longitud.

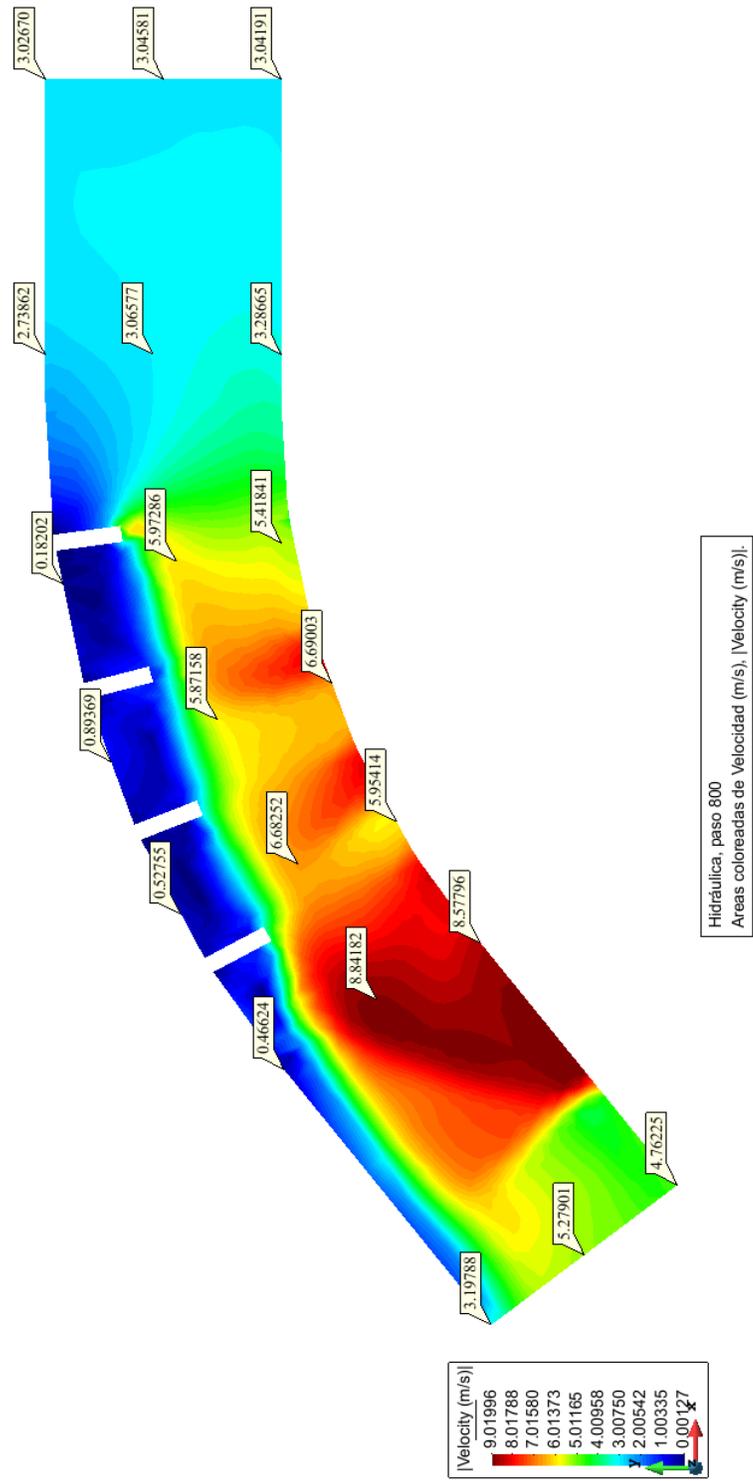


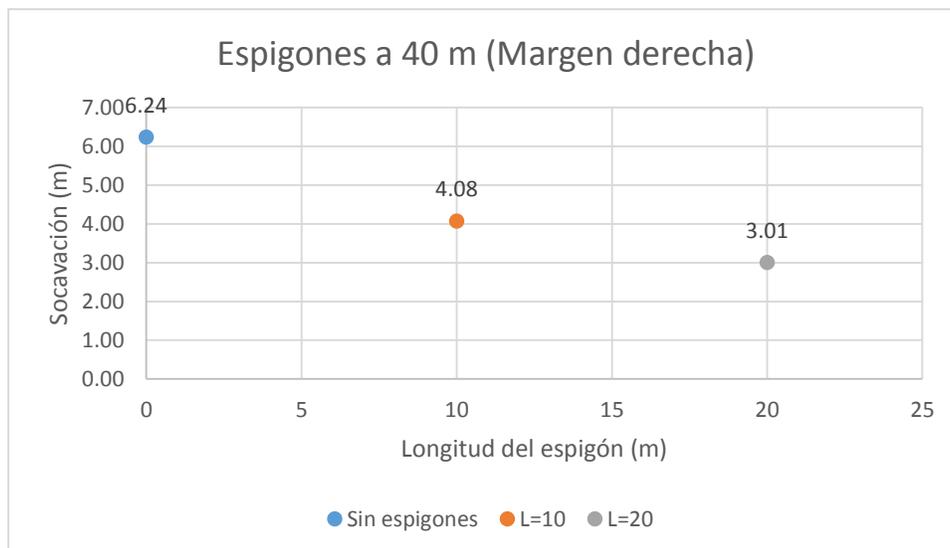
Figura 6.5 Velocidades con espigones a 40m de distancia y 20m de longitud

Con los resultados anteriores, se tienen alturas de socavación para el tramo de estudio: en la margen derecha, 6.24 m sin espigones y 3.01 m con el sistema de espigones; para el centro del cauce, 6.63 m sin espigones y 7.95 m con espigones; y para la margen izquierda: 6.54 m sin espigones y 7.88 m con el sistema de espigones. Estos datos representan una disminución de 3.23 m en la altura de socavación en la margen derecha, un aumento de 1.32 m en el centro y de 1.34 m en la margen izquierda. Los resultados muestran que con el sistema de espigones de 20 m de longitud se tiene una mayor disminución en la altura de socavación de la margen derecha que con el sistema de 10 m de longitud, pero también se incrementa la socavación al centro y en la margen izquierda, además de que se incumple lo establecido en la ecuación 2.18 y los criterios de diseño del capítulo 2.

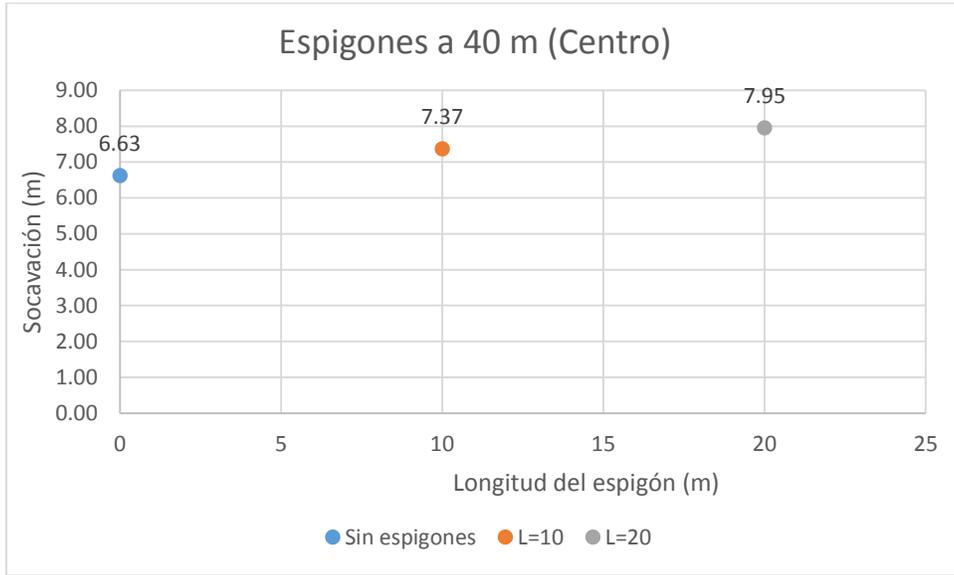
Para revisar el funcionamiento con otras longitudes de separación entre espigones, se probaron configuraciones a 20 y 30 m de separación, con longitudes de 10 y 20 m de cada espigón. Las tablas con los resultados de las simulaciones y las alturas de socavación se presentan en el anexo C.

A continuación se muestran las gráficas que resumen estos resultados. En cada grafica se observa la altura de socavación para una determinada separación entre espigones y diferentes longitudes del espigón; incluyendo la altura de socavación sin los espigones.

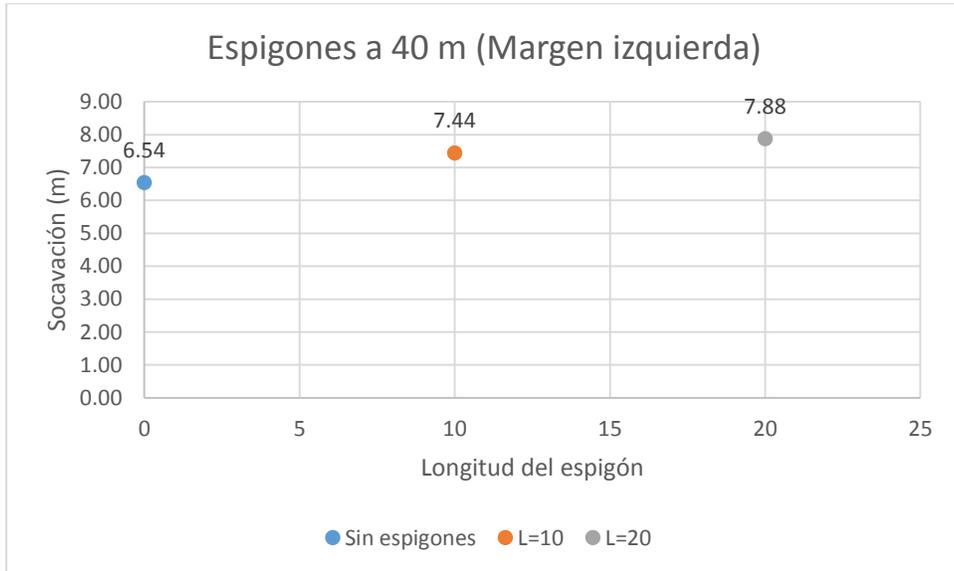
Gráfica 6.1 Altura de socavación en la margen derecha para espigones con separación de 40 m



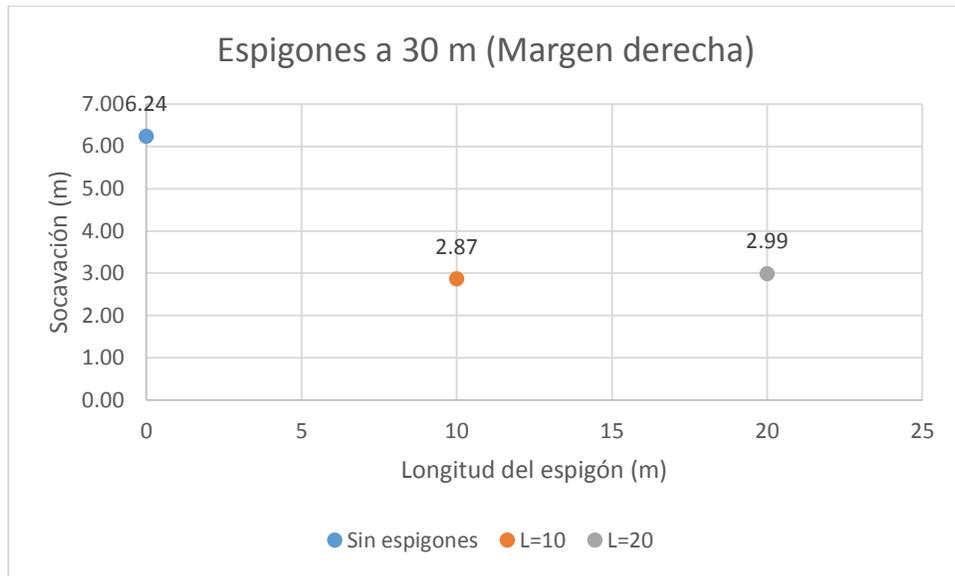
Gráfica 6.2 Altura de socavación en el centro para espigones con separación de 40 m



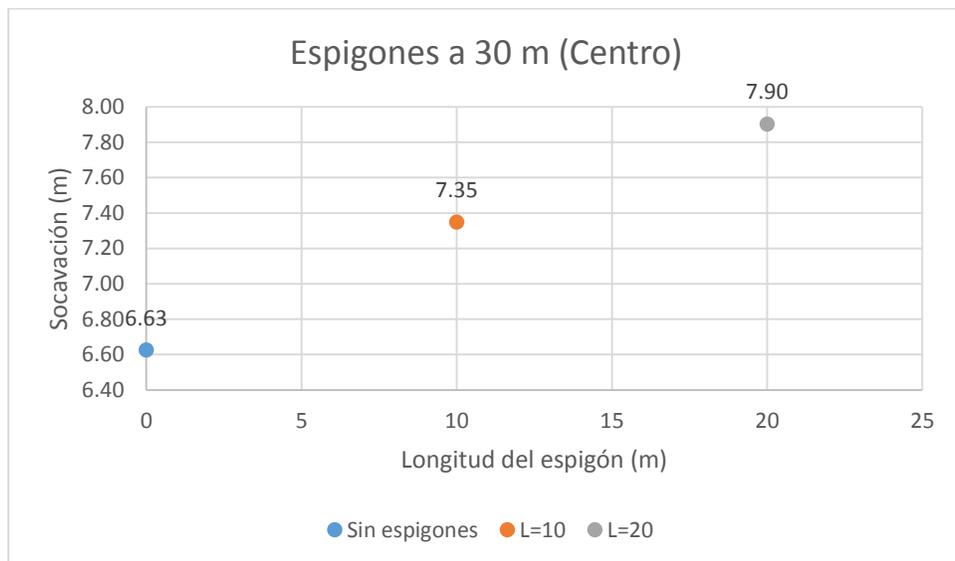
Gráfica 6.3 Altura de socavación en la margen izquierda para espigones con separación de 40 m



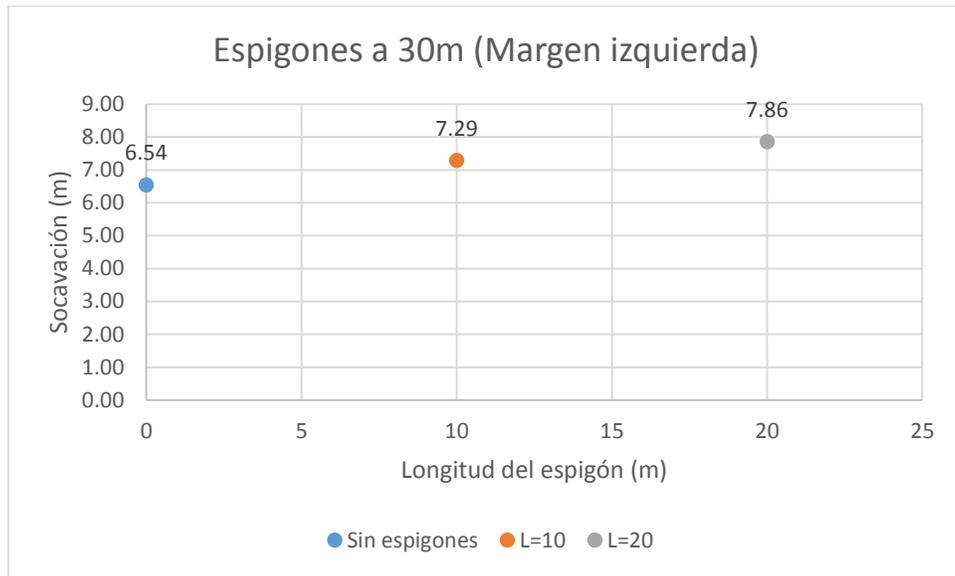
Gráfica 6.4 Altura de socavación en la margen derecha para espigones con separación de 30 m



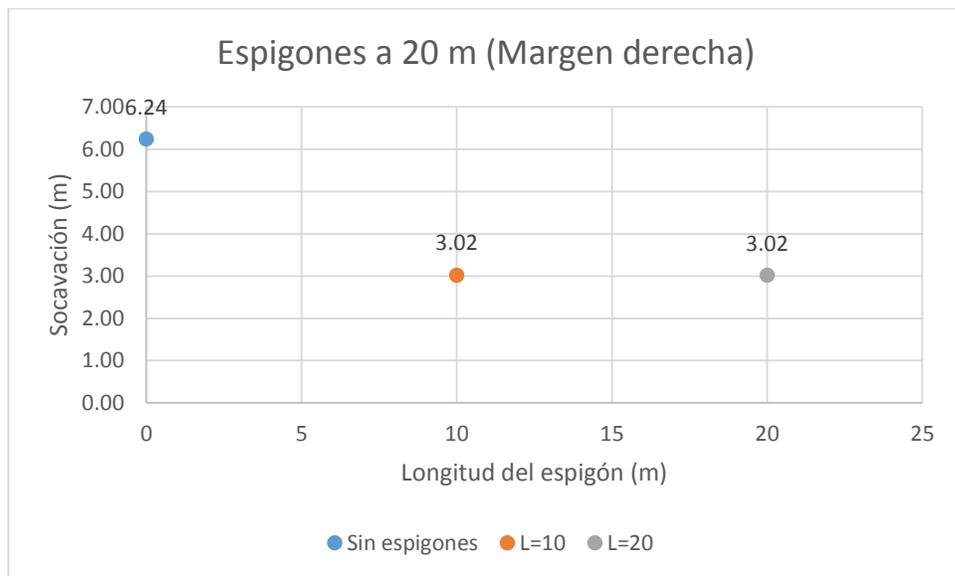
Gráfica 6.5 Altura de socavación en el centro para espigones con separación de 30 m



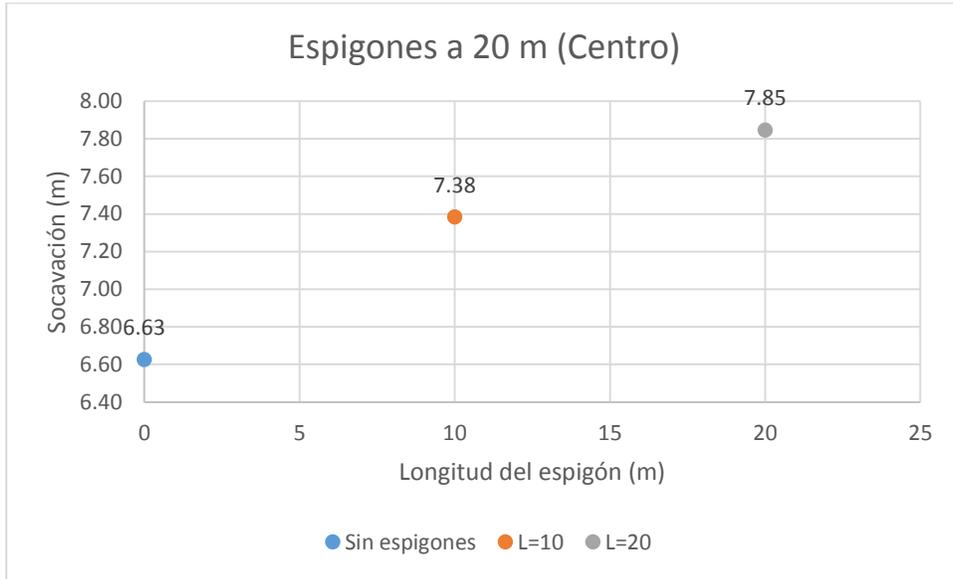
Gráfica 6.6 Altura de socavación en la margen izquierda para espigones con separación de 30 m



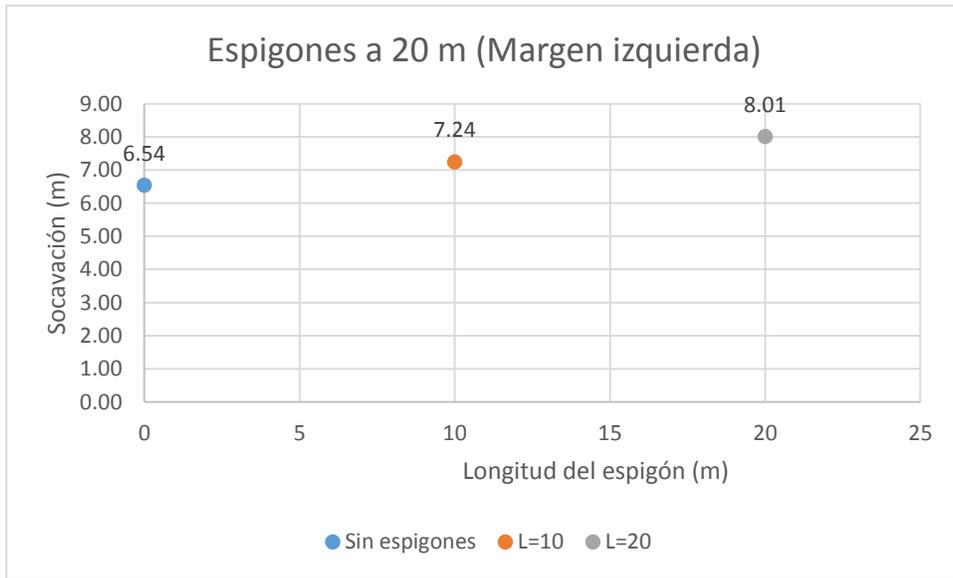
Gráfica 6.7 Altura de socavación en la margen derecha para espigones con separación de 20 m



Gráfica 6.8 Altura de socavación en el centro para espigones con separación de 20 m



Gráfica 6.9 Altura de socavación en la margen izquierda para espigones con separación de 20 m



En las siguientes imágenes se muestran las líneas de corriente que se pueden obtener con el modelo Iber a través del tramo de estudio; las cuales ejemplifican gráficamente el comportamiento del flujo y las turbulencias que se forman debido a la obstrucción de los espigones en la corriente. A continuación se presentan las imágenes del tramo sin espigones, a 40 m de separación y longitudes de los espigones de 10 y 20m; las configuraciones restantes se muestran en el anexo D.

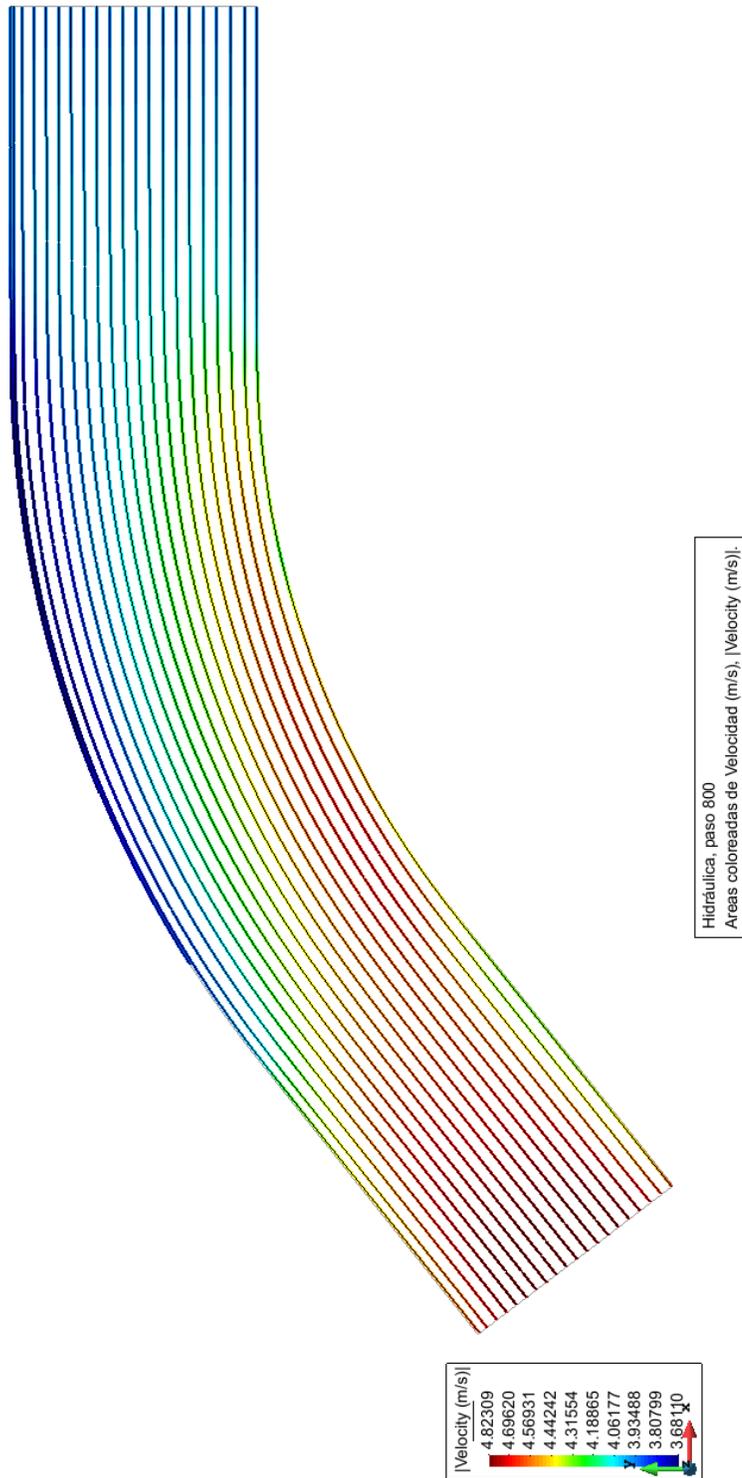


Figura 6.6 Líneas de corriente en el tramo de estudio, sin espigones

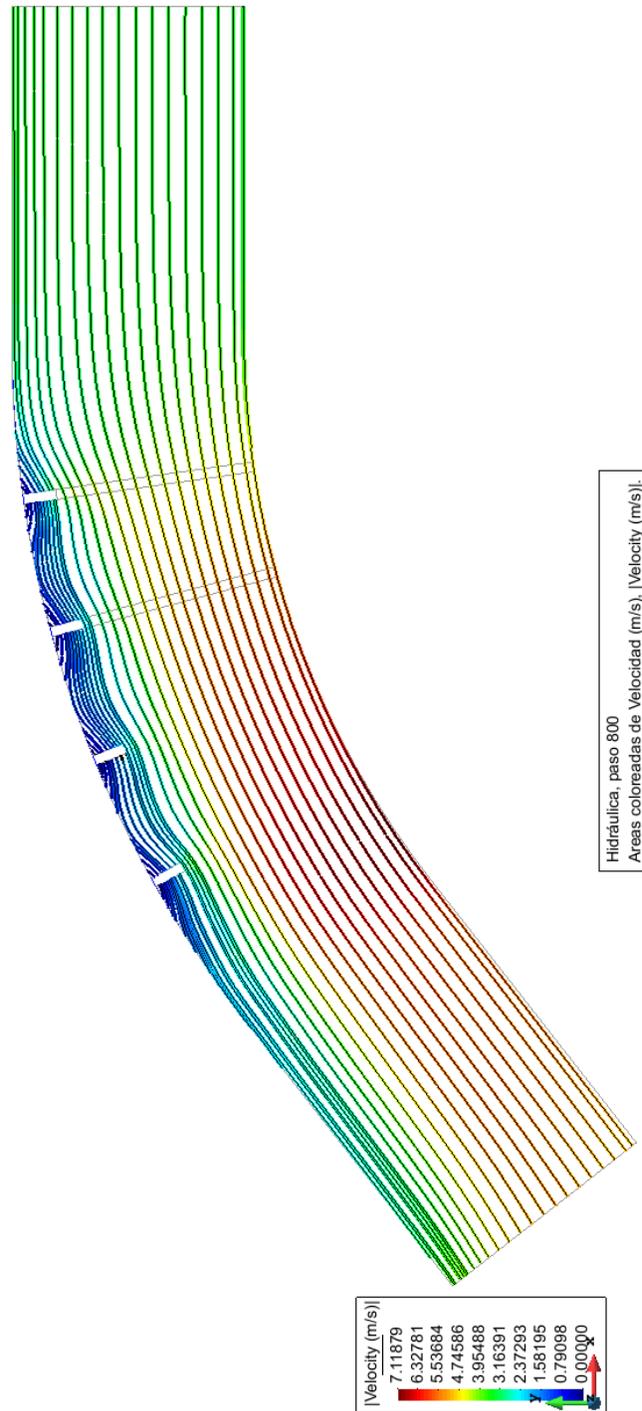


Figura 6.6 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 40 m de separación y longitud de 10 m

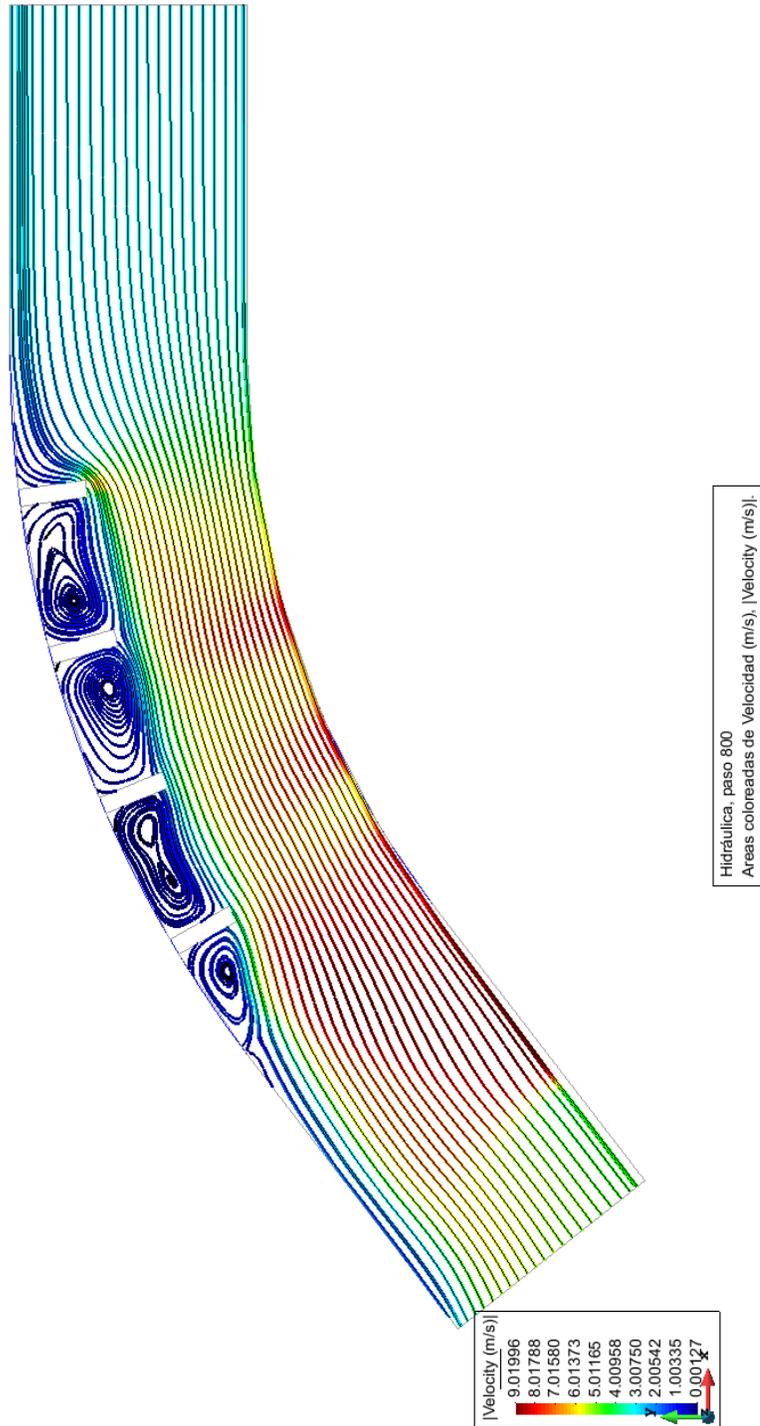


Figura 6.7 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 40 m de separación y longitud de 20 m

Como se puede ver en los resultados de las gráficas anteriores, el mejor funcionamiento con un sistema de espigones se obtiene cuando los espigones tienen una separación entre ellos de 30m, una longitud de 10 m y ancho de 3 m cada uno; siendo la altura de socavación para este caso de 2.87 m en la margen derecha, contra 6.24 m en la misma margen pero sin espigones.

Para el caso del diseño del capítulo 4, en el cual se tiene una configuración de los espigones a 40 m de separación entre ellos, 10 m de largo y 3m de ancho para cada espigón el resultado de la altura de socavación es de 4.08 m en la margen derecha, contra 6.24 m en el caso que no se tienen los espigones; teniendo en cuenta que la margen derecha es la que se desea defender; descartando la configuración con una separación de 20 m entre espigones por ser la más desfavorable.

Considerando los efectos de la socavación en el centro y margen izquierda del cauce se encuentra que también en el caso de la configuración de espigones con separación de 30 m entre sí y 10 m de largo se obtiene el mejor funcionamiento.

El resultado anterior no quiere decir que el diseño del capítulo 4 sea incorrecto, se debe recordar que el resultado para el número de espigones era de 4.7 espigones, por lo que, según el criterio de la Universidad de Colorado se toma el número entero inmediato, que en este caso sería 5 y con esta situación el sistema tendría una separación de 30 m entre espigones; pero debido al estrechamiento que sufre el cauce en el tramo de estudio y dado que para las simulaciones con este modelo numérico el canal se simplificó a una forma rectangular.

El diseño del capítulo 4 se considera el mejor ya que hidráulicamente el tener un menor número de espigones mejora la circulación del flujo en el cauce al evitar un estrangulamiento debido a la reducción en el ancho del canal, como se mencionó en capítulos anteriores y que no fue considerada dentro de las simulaciones.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la revisión del diseño de espigones, los modelos numéricos 1D y 2D demuestran ser herramientas útiles para conocer el comportamiento hidráulico de un cauce; y que junto con el uso de fórmulas para el cálculo de la altura de socavación, permiten obtener simulaciones del funcionamiento de una cierta configuración de un sistema de espigones y determinar si el diseño es apropiado para proteger la curva de una margen en un río.

Al utilizar los criterios y recomendaciones del capítulo 2, el diseñador debe tener en cuenta que estos son basados en experiencias de campo, juicio ingenieril.

En caso de disponer de un modelo físico del prototipo de interés; se necesitan tener en cuenta las condiciones reales del sitio que se está analizando para elegir las ecuaciones, relaciones y recomendaciones de diseño más convenientes a juicio del diseñador, según el aspecto que esté tratando, para obtener una configuración de los espigones óptima; hidráulica, constructiva y económicamente.

Cuando se realiza la revisión del diseño de los espigones en los modelos numéricos se puede presentar el caso en que no se tengan los datos y archivos necesarios para generar las condiciones reales, o que el costo en el tiempo de simulación de los modelos sea alto; como en el caso del presente, la simulación en el modelo Iber. Bajo estas circunstancias, se toman decisiones para realizar simplificaciones del problema, tratando de mantener en la medida de lo posible las condiciones reales del sitio de estudio. Al realizar simplificaciones se necesita tener en cuenta que el resultado se verá afectado en comparación con el caso real, por lo que se deben tomar las precauciones pertinentes.

Es importante mencionar que en el presente no se realizó un cálculo de transporte de sedimentos y sus efectos en la socavación; el cual es posible realizar en los dos modelos numéricos utilizados para el presente trabajo, debido a la falta de datos como sedimentogramas para dicho efecto.

El cálculo de la socavación entonces fue realizado mediante el uso de la fórmula general de Barbosa Gil (ec. 3.1), la suposición de un solo material en el fondo y márgenes del tramo de estudio, que según la tabla 3.1, es arcilla con arena en el primer estrato, por lo que se eligió un valor de $D_{50}=0.06$ uniforme en ese tramo y los resultados de las simulaciones hidráulicas en los modelos; sin considerar el análisis del transporte de sedimentos que ofrecen los dos softwares, lo cual también representa una variación en el resultado de la altura de socavación para la condición real.

En modelo unidimensional HEC-RAS se alteró la geometría de un puente para diseñar un espigón, ya que este modelo no considera dicho propósito; pero mediante las modificaciones pertinentes en la herramienta de diseño de puentes que ofrece el modelo puede realizarse la simulación asemejando un sistema de espigones.

Para realizar la revisión del diseño con HEC-RAS y conocer el comportamiento hidráulico del tramo de estudio, es necesario crear las secciones intermedias necesarias entre espigones para que el modelo pueda realizar la simulación; además de que la altura de la vía del puente y el estribo (abutment) de la margen contraria a la ubicación de los espigones no debe influir en el paso del flujo. Lo anterior se realiza para modelar el sistema y realizar la simulación.

Este modelo unidimensional realiza de una manera rápida las simulaciones, aun teniendo una geometría del cauce extensa y un hidrograma de varios días de duración, por lo que si se tienen los datos necesarios, la simulación es eficiente.

Al observar los resultados obtenidos en el desarrollo del capítulo 5, se encuentra que aunque el modelo HEC-RAS valida el diseño del capítulo 4, los resultados de la altura de socavación no muestran variaciones que pudieran parecer considerables, pero haciendo énfasis en que el modelo no fue hecho con el fin de simular espigones y que al realizar diversas simulaciones con diferentes configuraciones de espigones se pueden obtener datos, con los que el modelo puede ser útil para la revisión del diseño de espigones.

En el modelo bidimensional Iber se tiene que las principales dificultades para la simulación fueron: la falta de información de la geometría del cauce en un formato que pueda ser trabajado en el software y el costo del tiempo de cálculo para simular el hidrograma de la figura 3.1. Por lo que se realizaron las simplificaciones pertinentes para representar las condiciones reales, teniendo siempre en cuenta las variaciones en el resultado que dichas simplificaciones conllevan en comparación con el caso real de estudio.

El modelo Iber ofrece una mejor perspectiva de la altura de socavación al poder conocer el comportamiento hidráulico en la margen derecha e izquierda y al centro de una sección de estudio. Además de que se pueden visualizar los resultados, por ejemplo, de las velocidades o gastos específicos en el plano, se pueden conocer las líneas de corriente y ampliar gráficamente el panorama de la turbulencia del flujo en el tramo de estudio.

De los resultados obtenidos en el capítulo 6, y teniendo en cuenta la variación que se tiene entre las condiciones reales y las simplificaciones hechas, se verifica que el modelo Iber también valida el diseño del capítulo 4, con sus respectivas reservas y consideraciones, siendo que una configuración diferente a la obtenida en el diseño presentaba mejores condiciones contra la socavación, pero que no era la más factible, como fue interpretado en el respectivo capítulo; por lo que, se determina que mediante este modelo numérico es posible realizar una revisión del diseño de espigones.

Se concluye que atendiendo a las recomendaciones y manteniendo en la medida de lo posible las condiciones del problema real, cuando no es posible desarrollar un modelo físico y el ingeniero requiera de herramientas para tomar una decisión con respecto a la construcción de un sistema de espigones para la protección de los márgenes de una curva en un río, es posible realizar la revisión del diseño de los espigones mediante los modelos numéricos: 1D HEC-RAS y 2D Iber.

Estos modelos muestran resultados del comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones de diseño que ayudarán al diseñador a determinar si su diseño es óptimo para mejorar el problema de la socavación o comparar otras configuraciones y decidir cuál es la mejor alternativa para la protección de la margen de la curva de un río.

BIBLOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: Herramienta de simulación numérica de flujo en ríos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 30(1) pp. 1-10
- Copeland, Ronald R. (1983). Bank Protection Techniques Using Spur Dikes. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory
- Davinroy, R. D., Rapp, R.J. and Myhre R.E. (1998). Hydroacoustic Study of Fishes in Bendway Weir Fields of the Middle Mississippi River. Proceedings of the ASCE 1998 Wetlands Engineering and River Restoration Conference
- Federal Highways Administration (1990). Highways in the River Environment
- Felizardo, Jesse C., Harold N. Uyap and Wataru Sakurai (2006). Experiment on the Effective Arrangement of Spur Dikes as Countermeasure Against Bank Erosion Using Simplified River Model. PMO-Flood Control and Sabo Engineering Center, Department of Public Works and Highways and Japan International Cooperation Agency
- Maza Álvarez, José Antonio y García Flores, Manuel. Estabilización y Rectificación de Ríos. Capítulo 14 del Manual de Ingeniería en Ríos. Instituto de Ingeniería UNAM y Comisión Nacional del Agua
- Peter C. Klingeman, Scott M. Kehe, Yaw A. Owusu (1983) Streambank Erosion Protection and Channel Scour Manipulation Using Rockfill Dikes and Gabions. Water Resources Research Institute, Oregon State University
- Roger A. Kuhnle, Yafei Jia and Carlos V. Alonso (1999). Measured and simulated flow near spur dikes. US-China Workshop on Advanced Computational Modelling In Hydroscience and Engineering
- Scott A, Brown (1985). Desing of Spur-Type Streambank Stabilization Structures Federal Highway Administration

-W. Brunner, Gary (2010). HEC-RAS, River Analysis System User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC)

-W. Brunner, Gary (2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC)

-Walker K.G. (2009) Comparison of a Generalized Trapezoidal Hydraulic Model to a Native Topography Patterned Bed Surface Model of the Rio Grande. Colorado State University, Department of Civil and Environmental Engineering

- Youngblood, Natalie A., Ursic, Michael E., Cox, Amanda L., Thornton, Christopher I. and Abt, Steven R. (2012). Data Report for Completed Spur-Dike Configurations within the Native Topography Model. Colorado State University

-INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015)
<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gro/territorio/clima.aspx?tema=me&e=12>

ANEXO A. SECCIONES PARA CREAR LA GEOMETRÍA DEL RÍO LA SABANA EN EL MODELO 1D HEC-RAS

0+000		0+200		0+400		0+600		0+800		1+000	
X m	Elev. m										
0.00	4.83	0.00	3.83	0.00	4.83	0.00	4.83	0.00	4.83	0.00	4.83
9.57	-0.70	9.58	-1.70	9.57	-0.70	9.56	-0.69	9.57	-0.70	9.57	-0.69
16.63	-0.70	16.63	-1.70	16.63	-0.70	16.63	-0.69	16.63	-0.70	16.62	-0.69
16.65	-1.00	16.65	-2.00	16.65	-1.00	16.61	-0.99	16.65	-1.00	16.64	-0.99
59.68	-1.00	58.08	-2.00	61.57	-1.00	64.00	-0.99	63.07	-1.00	64.56	-0.99
59.70	-0.70	58.10	-1.70	61.59	-0.70	64.02	-0.69	63.09	-0.70	64.58	-0.69
66.74	-0.70	65.13	-1.70	68.62	-0.70	71.06	-0.69	70.12	-0.70	71.62	-0.69
77.18	5.33	75.57	4.33	79.06	5.33	81.50	5.34	80.56	5.33	82.06	5.33

1+100		1+200		1+300		1+600		1+800		2+100	
X m	Elev. m										
0.00	4.83	0.00	3.83	0.00	4.83	0.00	4.83	0.00	4.83	0.00	7.04
9.57	-0.70	8.84	-1.25	8.83	-0.25	9.36	-0.53	8.80	-0.25	10.90	1.24
16.63	-0.70	15.89	-1.25	15.89	-0.25	16.42	-0.53	15.85	-0.25	61.47	1.18
16.65	-1.00	15.91	-1.55	15.91	-0.55	16.42	-0.83	15.85	-0.55	73.44	7.54
59.68	-1.00	52.83	-1.55	52.81	-0.55	63.36	-0.83	62.79	-0.55		
59.70	-0.70	52.85	-1.25	52.83	-0.25	63.36	-0.53	62.79	-0.25		
66.74	-0.70	59.88	-1.25	59.88	-0.25	70.41	-0.53	69.84	-0.25		
77.18	5.33	69.53	4.32	69.56	5.34	80.07	5.05	79.50	5.33		

2+200		2+400		2+600		2+800		3+000		3+200	
X m	Elev. m										
0.00	6.84	0.00	6.80	0.00	6.71	0.00	8.35	0.00	8.78	0.00	8.65
9.71	1.68	9.67	1.66	9.67	1.57	8.49	3.80	9.56	3.65	9.47	3.58
59.63	1.74	59.84	1.67	60.25	1.57	33.74	3.80	34.93	3.65	53.29	3.58
70.16	7.34	70.42	7.30	70.84	7.20	56.52	3.18	53.41	3.65	53.31	3.88
						58.08	3.19	53.41	3.96	60.34	3.88
						68.63	8.85	60.46	3.96	69.47	9.15
								69.67	9.28		

3+400		3+600		3+800		4+000		4+200		4+400	
X	Elev.										
m											
0.00	8.98	0.00	9.08	0.00	10.06	0.00	9.54	0.00	9.70	0.00	9.76
9.28	4.01	10.06	3.70	1.32	9.36	0.31	9.37	9.47	4.64	8.19	5.03
62.56	3.86	69.48	4.26	2.41	9.36	1.40	9.37	76.74	4.86	15.24	5.03
62.58	4.16	69.49	4.65	11.89	4.30	10.87	4.31	76.76	5.21	15.26	4.73
69.62	4.16	76.54	4.65	70.98	4.33	68.18	4.26	83.79	5.21	120.87	4.95
78.83	9.48	85.07	9.58	71.00	4.63	68.20	4.64	92.89	10.43	130.81	10.25
				78.04	4.63	75.23	4.64				
				87.11	9.86	87.12	11.50				

4+600		4+800		5+000		5+200		5+400		5+600	
X	Elev.										
m											
0.00	10.10	0.00	10.23	0.00	10.53	0.00	10.83	0.00	11.34	0.00	11.39
8.03	5.47	8.00	5.61	8.23	5.79	8.51	5.92	8.54	6.42	8.67	6.39
15.08	5.47	15.06	5.61	15.28	5.79	15.56	5.92	15.59	6.42	15.72	6.39
15.10	5.17	15.08	5.28	15.30	5.49	15.58	5.66	15.61	6.12	15.74	6.09
118.63	5.20	85.38	5.24	85.13	5.54	106.82	5.80	120.49	6.08	120.21	6.30
128.73	10.60	91.88	5.24	91.63	5.54	106.87	5.83	131.26	11.84	130.64	11.89
130.46	10.60	91.89	6.24	91.65	6.54	113.37	5.83				
131.40	11.10	92.38	6.24	92.13	6.54	113.39	6.83				
		92.39	7.24	92.15	7.54	113.87	6.83				
		92.89	7.24	92.63	7.54	113.89	7.83				
		92.90	8.24	92.65	8.54	114.37	7.83				
		93.38	8.24	93.13	8.54	114.39	8.83				
		93.39	9.24	93.15	9.54	114.87	8.83				
		95.88	9.24	95.63	9.54	114.89	9.83				
		99.11	10.73								

5+800		6+000		6+200		6+400		6+600		6+800	
X	Elev.										
m											
0.00	11.58	0.00	11.70	0.00	11.88	0.00	11.97	0.00	12.28	0.00	12.37
8.72	6.55	9.41	6.66	9.53	6.78	9.66	6.79	9.59	7.14	9.97	7.06
15.78	6.55	109.77	6.47	93.26	6.66	104.57	6.71	20.33	7.13	79.30	7.14
15.80	6.25	109.79	6.77	93.28	6.96	104.59	7.01	103.00	7.17	79.32	7.44
118.98	6.49	116.83	6.77	100.32	6.96	111.62	7.01	103.02	7.47	86.36	7.44
130.33	12.57	126.31	12.20	109.79	12.38	121.10	12.43	110.06	7.47	95.85	12.87
								119.33	12.78		

7+000		7+200		7+400		7+500		7+700		8+200	
X	Elev.										
m											
0.00	12.48	0.00	12.78	0.00	13.16	0.00	13.08	0.00	13.50	0.00	13.61
2.14	11.50	2.60	11.57	2.63	11.93	2.41	11.97	3.03	12.09	16.87	8.13
5.14	11.50	5.64	11.57	5.66	11.93	5.41	11.97	6.02	12.09	22.40	8.14
5.16	10.50	5.66	10.57	5.68	10.93	5.43	10.97	6.06	11.09	110.17	8.12
5.64	10.50	6.14	10.57	6.16	10.93	5.91	10.97	6.56	11.09	110.19	8.42
5.66	9.50	6.16	9.57	6.18	9.93	5.93	9.97	6.58	10.09	117.36	8.42
6.14	9.50	6.64	9.57	6.66	9.93	6.41	9.97	7.06	10.09	134.87	14.11
6.16	8.50	6.66	8.57	6.68	8.93	6.43	8.97	7.08	9.09		
6.64	8.50	7.14	8.57	7.16	8.93	6.91	8.97	7.56	9.09		
6.66	7.50	7.16	7.57	7.18	7.93	6.93	7.97	7.58	8.09		
7.14	7.50	13.64	7.57	13.66	7.93	13.41	7.97	8.06	8.09		
13.14	7.50	67.61	7.49	67.99	7.90	64.67	8.06	14.06	8.09		
63.92	7.39	67.63	7.79	68.01	8.20	64.69	8.36	73.69	8.42		
63.94	7.69	74.67	7.79	75.04	8.20	71.73	8.36	73.71	8.72		
70.97	7.69	84.26	13.28	84.58	13.65	80.76	13.58	80.74	8.72		
80.21	12.98							89.88	14.00		

8+400		8+600		8+800		9+000		10+000	
X m	Elev. m								
0.00	13.85	0.00	14.09	0.00	14.33	0.00	14.57	0.00	15.34
16.50	8.49	16.87	8.61	16.50	8.97	16.87	9.09	14.64	10.58
22.40	8.38	22.40	8.62	22.40	8.86	23.05	9.10	23.83	10.58
110.17	8.36	110.17	8.60	110.17	8.84	104.82	9.08	23.85	10.28
110.19	8.66	110.19	8.90	110.19	9.14	104.84	9.38	97.78	9.98
117.36	8.66	117.36	8.90	117.36	9.14	112.00	9.38	97.80	10.28
134.87	14.35	134.87	14.59	134.87	14.83	129.52	15.07	106.28	10.28
								106.30	11.28
								106.78	11.28
								106.80	12.28
								107.28	12.28
								107.30	13.28
								107.78	13.28
								107.80	14.28
								110.83	14.28
								114.18	15.84

10+200		10+400		10+600		10+800		11+000		11+200	
X m	Elev. m										
0.00	15.58	0.00	15.82	0.00	15.80	0.00	16.04	0.00	16.28	0.00	16.47
14.64	10.82	14.64	11.06	13.83	11.30	13.83	11.54	13.84	11.78	13.68	12.02
23.83	10.82	23.83	11.06	23.02	11.30	23.02	11.54	23.03	11.78	22.87	12.02
23.85	10.52	23.85	10.76	23.04	11.00	23.04	11.24	23.05	11.48	22.89	11.72
97.78	10.22	97.80	10.76	96.99	11.00	86.99	11.24	87.00	11.48	86.84	11.72
97.80	10.52	106.28	10.76	105.47	11.00	95.47	11.24	95.48	11.48	95.32	11.72
106.28	10.52	106.30	11.76	105.49	12.00	95.49	12.24	95.50	12.48	95.34	12.72
106.30	11.52	106.78	11.76	105.97	12.00	95.97	12.24	95.98	12.48	95.82	12.72
106.78	11.52	106.80	12.76	105.99	13.00	95.99	13.24	96.00	13.48	95.84	13.72
106.80	12.52	107.28	12.76	106.47	13.00	96.47	13.24	96.48	13.48	96.32	13.72
107.28	12.52	107.30	13.76	106.49	14.00	96.49	14.24	96.50	14.48	96.34	14.72
107.30	13.52	107.78	13.76	106.97	14.00	96.97	14.24	96.98	14.48	96.82	14.72
107.78	13.52	107.80	14.76	106.99	15.00	96.99	15.24	97.00	15.48	96.84	15.72
107.80	14.52	110.83	14.76	110.02	15.00	100.02	15.24	100.03	15.48	99.87	15.72
110.83	14.52	114.18	16.32	112.81	16.30	102.82	16.54	102.82	16.78	102.57	16.98
114.18	16.08										

11+400		11+600		11+800		12+000		12+200		12+300	
X	Elev.										
m	m										
0.00	16.71	0.00	16.95	0.00	17.19	0.00	17.93	0.00	18.70	0.00	18.81
13.68	12.26	13.69	12.50	14.62	12.44	1.62	17.93	17.78	12.92	7.54	15.32
22.87	12.26	22.87	12.50	21.74	12.46	16.24	13.18	24.91	12.94	10.55	15.32
22.87	11.96	22.89	12.20	77.54	12.44	23.36	13.20	73.05	12.92	10.54	14.32
82.45	11.96	76.00	12.20	85.52	12.44	81.46	13.18	81.03	12.92	11.04	14.32
90.43	11.96	83.99	12.20	86.55	13.03	89.44	13.18	82.06	13.52	11.06	13.32
91.46	12.55	85.02	12.79	86.66	17.69	90.47	13.77	82.17	19.20	11.54	13.32
91.57	17.21	85.12	17.45			90.58	18.43			11.56	12.32
										12.04	12.32
										12.06	11.32
										22.54	11.32
										59.20	11.42
										69.20	11.42
										70.22	12.01
										70.33	17.70

12+800		13+000		13+200		13+300		13+400		13+600	
X	Elev.										
m	m										
0.00	19.42	0.00	20.31	0.00	20.07	0.00	20.43	0.00	22.09	0.00	22.51
3.92	17.69	4.79	18.15	4.80	17.91	4.72	18.24	8.12	18.38	8.44	18.60
6.42	17.69	7.29	18.15	7.30	17.91	7.22	18.24	10.62	18.38	10.92	18.60
6.44	16.69	7.29	17.15	7.32	16.91	7.24	17.24	10.64	17.38	10.94	17.60
6.92	16.69	7.79	17.15	7.80	16.91	7.72	17.24	11.12	17.38	11.42	17.60
6.94	15.69	7.79	16.15	7.82	15.91	7.74	16.24	11.14	16.38	11.44	16.60
7.42	15.69	8.29	16.15	8.30	15.91	8.22	16.24	11.62	16.38	11.92	16.60
7.44	14.69	8.29	15.15	8.32	14.91	8.24	15.24	11.64	15.38	11.94	15.60
7.92	14.69	8.79	15.15	8.80	14.91	8.72	15.24	12.12	15.38	12.42	15.60
7.94	13.69	8.79	14.15	8.82	13.91	8.74	14.24	12.14	14.38	12.44	14.60
18.42	13.69	19.29	14.15	19.30	13.91	19.22	14.24	22.62	14.38	22.94	14.60
47.30	13.69	49.11	14.15	47.75	13.91	44.31	14.24	53.05	14.36	55.39	14.60
57.29	13.69	59.10	14.15	57.75	13.91	54.31	14.24	63.04	14.36	65.39	14.60
58.31	14.28	60.12	14.74	58.77	14.50	55.33	14.83	64.06	14.95	66.41	15.19
58.42	19.97	60.24	20.84	58.88	20.60	55.44	20.93	64.18	21.05	66.52	21.29

13+800		14+000		14+200		14+300		14+400		14+600	
X	Elev.										
m	m										
0.00	23.60	0.00	25.20	0.00	24.58	0.00	26.53	0.00	25.21	0.00	26.02
9.10	19.38	13.19	19.08	11.34	19.32	15.22	19.44	12.17	19.56	13.41	19.80
11.60	19.38	15.69	19.08	13.82	19.32	17.72	19.44	14.67	19.56	15.91	19.80
11.62	18.38	15.71	18.08	13.84	18.32	17.74	18.44	14.69	18.56	15.91	18.80
12.10	18.38	16.19	18.08	14.32	18.32	18.22	18.44	15.17	18.56	16.41	18.80
12.12	17.38	16.21	17.08	14.34	17.32	18.24	17.44	15.19	17.56	16.41	17.80
12.60	17.38	16.69	17.08	14.82	17.32	18.72	17.44	15.67	17.56	16.91	17.80
12.62	16.38	16.71	16.08	14.84	16.32	18.74	16.44	15.69	16.56	16.91	16.80
13.10	16.38	17.19	16.08	15.32	16.32	19.22	16.44	16.17	16.56	17.41	16.80
13.12	15.38	17.21	15.08	15.34	15.32	19.24	15.44	16.19	15.56	17.41	15.80
23.60	15.38	27.69	15.08	25.84	15.32	29.72	15.44	26.67	15.56	27.91	15.80
47.61	15.38	66.54	15.08	55.90	15.32	63.24	15.44	64.56	15.56	63.50	15.80
57.60	15.38	76.54	15.08	65.89	15.32	73.23	15.44	74.55	15.56	73.50	15.80
58.62	15.97	77.55	15.67	66.91	15.90	74.25	16.03	75.57	16.15	74.52	16.39
58.74	22.07	77.67	22.16	67.03	22.40	74.36	22.52	75.68	22.64	74.64	22.88

14+800		15+000		15+400		15+600		15+800		16+000	
X	Elev.										
m	m										
0.00	24.57	0.00	25.59	0.00	23.75	0.00	24.14	0.00	24.57	0.00	24.92
9.77	20.05	11.48	20.27	21.51	16.76	21.51	17.15	21.53	17.57	21.51	17.93
12.27	20.05	13.98	20.27	27.72	16.76	32.70	17.15	32.72	17.57	32.70	17.93
12.29	19.05	13.98	19.27	89.24	16.76	81.02	17.15	83.13	17.57	82.29	17.93
12.77	19.05	14.48	19.27	96.40	16.76	91.50	17.15	93.63	17.57	92.79	17.93
12.79	18.05	14.50	18.27	119.41	24.25	91.52	18.15	93.65	18.57	92.81	18.93
13.27	18.05	14.98	18.27			91.50	17.15	94.13	18.57	93.29	18.93
13.29	17.05	15.00	17.27			91.52	18.15	94.15	19.57	93.31	19.93
13.77	17.05	15.48	17.27			92.00	18.15	94.63	19.57	93.79	19.93
13.79	16.05	15.50	16.27			92.02	19.15	94.65	20.57	93.81	20.93
24.27	16.05	25.98	16.27			92.50	19.15	95.13	20.57	94.29	20.93
57.06	16.06	74.14	16.27			92.52	20.15	95.15	21.57	94.31	21.93
61.92	16.05	78.98	16.27			93.00	20.15	97.63	21.57	96.79	21.93
83.71	23.13	100.77	23.35			93.02	21.15	105.13	25.07	104.27	25.42
		104.65	23.35			95.52	21.15				
		109.30	24.86			103.01	24.64				

16+200		16+400		16+600		16+800		17+000		17+200	
X	Elev.										
m	m										
0.00	25.32	0.00	24.48	0.00	24.88	0.00	25.28	0.00	25.68	0.00	25.19
21.51	18.33	17.69	18.73	17.70	19.13	17.69	19.53	17.70	19.93	14.96	20.33
32.70	18.33	24.88	18.73	23.26	19.13	23.25	19.53	23.24	19.93	20.51	20.33
84.38	18.33	87.18	18.73	91.78	19.13	95.09	19.53	96.95	19.93	107.88	20.33
94.88	18.33	94.37	18.73	98.97	19.13	102.28	19.53	104.14	19.93	115.07	20.33
94.90	19.33	113.60	24.98	118.21	25.38	121.51	25.78	123.37	26.18	131.56	25.69
95.38	19.33										
95.40	20.33										
95.88	20.33										
95.90	21.33										
96.38	21.33										
96.40	22.33										
98.88	22.33										
106.36	25.82										

17+400		17+600		17+800		18+000		18+200		18+400	
X	Elev.										
m	m										
0.00	25.59	0.00	25.99	0.00	26.39	0.00	26.79	0.00	26.71	0.00	27.31
14.96	20.73	14.96	21.13	14.96	21.53	14.96	21.93	13.48	22.33	13.48	22.93
20.52	20.73	20.50	21.13	20.51	21.53	20.48	21.93	19.04	22.33	19.04	22.93
99.11	20.73	93.74	21.13	93.73	21.53	95.11	21.93	86.13	22.33	91.98	22.99
106.30	20.73	100.93	21.13	100.92	21.53	102.30	21.93	93.32	22.33	99.17	23.00
122.79	26.09	117.42	26.49	117.41	26.89	118.80	27.29	108.34	27.21	113.97	27.81

18+600		18+800		19+000		19+400		19+600		19+800	
X	Elev.										
m	m										
0.00	27.51	0.00	27.79	0.00	28.19	0.00	29.29	0.00	29.69	0.00	30.09
13.48	23.13	13.10	23.53	13.10	23.93	14.03	24.73	14.03	25.13	14.03	25.53
19.04	23.13	18.65	23.53	18.66	23.93	21.21	24.73	21.21	25.13	21.21	25.53
112.16	23.10	100.75	23.53	98.96	23.93	87.12	24.73	87.12	25.13	82.51	25.53
117.72	23.10	106.27	23.53	104.51	23.93	92.60	24.73	92.62	25.13	88.01	25.53
132.79	28.00	120.92	28.29	119.15	28.69	92.62	25.73	92.64	26.13	88.03	26.53
						93.10	25.73	93.12	26.13	88.51	26.53
						93.12	26.73	93.14	27.13	88.53	27.53
						93.60	26.73	93.62	27.13	89.01	27.53
						93.62	27.73	93.64	28.13	89.03	28.53
						94.10	27.73	94.12	28.13	89.51	28.53
						94.12	28.73	94.14	29.13	89.53	29.53
						96.62	28.73	96.62	29.13	92.01	29.53
						98.89	29.79	98.89	30.19	94.28	30.59

20+000	
X	Elev.
m	m
0.00	30.98
15.54	25.93
20.13	25.93
105.91	25.93
111.41	25.93
111.43	26.93
111.91	26.93
111.93	27.93
112.91	28.93
112.93	29.93
115.41	29.93
118.74	31.48

ANEXO B. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LAS SIMULACIONES EN EL MODELO NUMÉRICO 1D HEC-RAS

B.1 Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 30 m de separación y una longitud del espigón de 10 m

Espigones a 30m longitud del espigon 10m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	FR	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	322.26	6.03	1.6	33.31	0.20813652	9.67	3.36	3.54	3.44	3.27	3.40
13+990	331.96	6	1.66	33.38	0.21648082	9.94	3.44	3.63	3.51	3.35	3.48
13+980	341.91	5.99	1.7	33.5	0.2218822	10.21	3.51	3.71	3.59	3.43	3.56
13+970	331.36	5.92	1.72	32.62	0.22581592	10.16	3.50	3.69	3.57	3.41	3.54
13+960	320.64	5.85	1.73	31.73	0.22848365	10.11	3.48	3.68	3.56	3.40	3.53
13+950	269.01	5.74	1.49	31.51	0.19866313	8.54	3.05	3.18	3.11	2.94	3.07
13+940	277.57	5.73	1.53	31.64	0.2041743	8.77	3.12	3.25	3.18	3.01	3.14
13+930	268.42	5.66	1.54	30.76	0.20677568	8.73	3.10	3.24	3.16	3.00	3.13
13+920	277.21	5.65	1.59	30.89	0.21367803	8.97	3.17	3.32	3.24	3.07	3.20
13+910	379.34	5.6	2.19	30.88	0.29562221	12.28	4.06	4.36	4.16	4.02	4.15
13+900	366.4	5.53	2.22	29.94	0.30156252	12.24	4.04	4.34	4.14	4.01	4.13
13+890	353.17	5.43	2.24	29	0.30706836	12.18	4.03	4.33	4.13	3.99	4.12
13+880	365.21	5.39	2.33	29.03	0.32058891	12.58	4.13	4.45	4.24	4.10	4.23
13+870	363.38	6.01	1.97	30.68	0.25669414	11.84	3.94	4.22	4.04	3.89	4.02
13+860	376.15	5.99	2.04	30.77	0.26625865	12.22	4.04	4.34	4.14	4.00	4.13
13+850	389.55	5.97	2.12	30.84	0.27716326	12.63	4.15	4.47	4.25	4.12	4.24
13+840	375.51	5.87	2.14	29.91	0.28215106	12.55	4.13	4.44	4.23	4.09	4.22
13+830	376.19	5.12	2.69	27.29	0.37975567	13.78	4.44	4.82	4.56	4.44	4.56
13+820	360.7	5	2.75	26.23	0.39285714	13.75	4.43	4.81	4.55	4.43	4.55
13+810	373.85	4.92	2.91	26.11	0.41908045	14.32	4.57	4.98	4.70	4.58	4.71
13+800	356.86	4.77	3	24.95	0.43878223	14.30	4.57	4.98	4.69	4.58	4.70
13+600	398.35	5.62	2.24	31.67	0.30183307	12.58	4.13	4.45	4.24	4.10	4.23
										Promedio	3.91

B.2 Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 30 m de separación y una longitud del espigón de 20 m

Espigones a 30m longitud del espigon 20m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	F _R	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	233.33	6	1.17	33.19	0.15257986	7.03	2.62	2.68	2.66	2.49	2.61
13+990	359.32	6.02	1.79	33.44	0.23304605	10.75	3.65	3.88	3.74	3.58	3.71
13+980	370.08	6	1.84	33.55	0.23995464	11.03	3.73	3.97	3.82	3.66	3.79
13+970	358.66	5.93	1.85	32.65	0.24267852	10.98	3.72	3.95	3.80	3.65	3.78
13+960	347.05	5.85	1.87	31.76	0.24697366	10.93	3.70	3.94	3.79	3.63	3.76
13+950	360.8	6.05	1.83	32.61	0.23766234	11.06	3.74	3.98	3.82	3.67	3.80
13+940	372.15	6.03	1.89	32.17	0.24586126	11.57	3.87	4.14	3.96	3.82	3.95
13+930	360.04	5.95	1.9	31.81	0.24881816	11.32	3.80	4.06	3.89	3.75	3.88
13+920	371.67	5.93	1.96	31.9	0.25710806	11.65	3.89	4.16	3.99	3.84	3.97
13+910	381.55	5.76	2.11	31.45	0.28083949	12.13	4.02	4.31	4.12	3.98	4.11
13+900	368.72	5.68	2.13	30.53	0.28549098	12.08	4.00	4.29	4.10	3.96	4.09
13+890	355.61	5.59	2.15	29.59	0.2904822	12.02	3.99	4.28	4.09	3.94	4.07
13+880	367.76	5.56	2.23	29.65	0.30210258	12.40	4.09	4.40	4.19	4.05	4.18
13+870	388.74	7.73	1.57	32	0.18038352	12.15	4.02	4.32	4.12	3.98	4.11
13+860	402.17	7.75	1.62	32	0.1858879	12.57	4.13	4.45	4.23	4.10	4.23
13+850	416.31	7.76	1.68	32	0.19264839	13.01	4.24	4.58	4.35	4.22	4.35
13+840	403.01	7.71	1.69	31	0.19442248	13.00	4.24	4.58	4.35	4.22	4.35
13+830	376.03	5.12	2.69	27.29	0.37975567	13.78	4.44	4.82	4.56	4.43	4.56
13+820	360.55	5	2.75	26.22	0.39285714	13.75	4.43	4.81	4.55	4.43	4.55
13+810	373.69	4.92	2.91	26.11	0.41908045	14.31	4.57	4.98	4.70	4.58	4.71
13+800	356.71	4.77	3	24.94	0.43878223	14.30	4.57	4.98	4.69	4.58	4.70
13+600	398.18	5.62	2.24	31.67	0.30183307	12.57	4.13	4.45	4.24	4.10	4.23
										Promedio	4.07

B.3 Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 20 m de separación y una longitud del espigón de 10 m

Espigones a 20m longitud del espigon 10m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m³/s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	F _R	q (m³/s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	325.44	6.17	1.56	33.8	0.20061758	9.63	3.35	3.53	3.42	3.26	3.39
13+990	334.76	6.14	1.61	33.86	0.20755283	9.89	3.42	3.61	3.50	3.34	3.47
13+980	344.81	6.13	1.66	33.98	0.21417305	10.15	3.49	3.69	3.57	3.41	3.54
13+970	334.37	6.06	1.67	33.1	0.2167041	10.10	3.48	3.68	3.56	3.40	3.53
13+960	322.74	5.92	1.71	31.98	0.22450304	10.09	3.48	3.67	3.55	3.40	3.52
13+950	332.77	5.9	1.76	32.09	0.23145876	10.37	3.55	3.76	3.63	3.48	3.60
13+940	342.93	5.89	1.81	32.2	0.23823627	10.65	3.63	3.85	3.71	3.56	3.69
13+930	296.15	5.78	1.64	31.18	0.21790485	9.50	3.32	3.48	3.39	3.22	3.35
13+920	305.81	5.76	1.7	31.29	0.22626878	9.77	3.39	3.57	3.46	3.30	3.43
13+910	315.9	5.75	1.75	31.4	0.2331262	10.06	3.47	3.66	3.54	3.39	3.52
13+900	303.43	5.52	1.84	29.95	0.25017001	10.13	3.49	3.69	3.56	3.41	3.54
13+890	292.62	5.44	1.85	29.05	0.25337236	10.07	3.47	3.67	3.55	3.39	3.52
13+880	302.77	5.42	1.92	29.14	0.26344414	10.39	3.56	3.77	3.64	3.48	3.61
13+870	357.77	5.7	2.13	29.54	0.28498968	12.11	4.01	4.30	4.11	3.97	4.10
13+860	370.34	5.67	2.21	29.6	0.29647475	12.51	4.12	4.43	4.22	4.08	4.21
13+850	383.51	5.64	2.29	29.65	0.30802282	12.93	4.22	4.56	4.33	4.20	4.33
13+840	369.85	5.58	2.3	28.82	0.31102672	12.83	4.20	4.53	4.30	4.17	4.30
13+830	383.35	5.55	2.4	28.85	0.3254256	13.29	4.31	4.67	4.43	4.30	4.43
13+820	368.44	5.44	2.43	27.87	0.33280802	13.22	4.30	4.65	4.41	4.28	4.41
13+810	373.43	4.92	2.91	26.11	0.41908045	14.30	4.57	4.97	4.69	4.58	4.70
13+800	356.46	4.77	3	24.94	0.43878223	14.29	4.57	4.97	4.69	4.57	4.70
13+600	397.92	5.62	2.24	31.66	0.30183307	12.57	4.13	4.45	4.23	4.10	4.23
										Promedio	3.87

B.4 Comportamiento hidráulico y altura de socavación con un sistema de espigones a 20 m de separación y una longitud del espigón de 20 m

Espigones a 20m longitud del espigon20m						Método para cálculo de la socavación (m)					
Estación	Q (m ³ /s)	y (m)	v (m/s)	T (m)	F _R	q (m ³ /s/m)	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+000	227.98	6.06	1.13	33.42	0.14663211	6.82	2.56	2.61	2.60	2.43	2.55
13+990	234.92	6.04	1.16	33.53	0.15077401	7.01	2.61	2.67	2.66	2.48	2.61
13+980	242.04	6.04	1.19	33.68	0.15467334	7.19	2.66	2.73	2.71	2.54	2.66
13+970	234.68	5.98	1.2	32.82	0.15675363	7.15	2.65	2.72	2.70	2.53	2.65
13+960	362.19	6.36	1.7	33.57	0.21533138	10.79	3.66	3.89	3.75	3.60	3.73
13+950	373.22	6.35	1.75	33.69	0.22183913	11.08	3.74	3.98	3.83	3.68	3.81
13+940	384.75	6.33	1.8	33.8	0.22853757	11.38	3.82	4.08	3.91	3.76	3.89
13+930	369.38	6.05	1.9	32.17	0.24675325	11.48	3.85	4.11	3.94	3.79	3.92
13+920	381.24	6.03	1.96	32.27	0.25496724	11.81	3.93	4.21	4.03	3.89	4.02
13+910	393.62	6.02	2.02	32.36	0.26299052	12.16	4.03	4.32	4.12	3.98	4.11
13+900	376.81	5.96	2.17	30.57	0.28393803	12.33	4.07	4.37	4.17	4.03	4.16
13+890	363.38	5.6	2.19	29.63	0.29562221	12.26	4.05	4.35	4.15	4.01	4.14
13+880	375.75	5.57	2.27	29.68	0.30724528	12.66	4.15	4.47	4.26	4.12	4.25
13+870	394.69	7.54	1.64	32	0.1907854	12.33	4.07	4.37	4.17	4.03	4.16
13+860	408.25	7.55	1.69	32	0.19647179	12.76	4.18	4.50	4.28	4.15	4.28
13+850	422.52	7.57	1.74	32	0.20201716	13.20	4.29	4.64	4.40	4.27	4.40
13+840	435.68	10.83	1.3	31	0.12618743	14.05	4.51	4.90	4.63	4.51	4.64
13+830	450.24	10.86	1.34	31	0.12989034	14.52	4.63	5.04	4.75	4.64	4.76
13+820	435.73	10.81	1.34	30	0.13019039	14.52	4.63	5.04	4.75	4.64	4.76
13+810	380.14	4.95	2.39	26.22	0.34314863	14.50	4.62	5.03	4.75	4.63	4.76
13+800	362.86	4.8	3.02	25.04	0.44032494	14.49	4.62	5.03	4.74	4.63	4.76
13+600	404.9	5.65	2.25	31.78	0.30237456	12.74	4.17	4.50	4.28	4.15	4.27
										Promedio	3.97

ANEXO C. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LAS SIMULACIONES EN EL MODELO NUMÉRICO 2D IBER

C.1 Espigones a 30 m de separación y 10 m de longitud

Simulación hidráulica del tramo

Estación	Espigones a 30m de separación y 10m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	6.04	3.54	21.41	0.4638	6.03	3.55	21.42	0.4616	6.03	3.54	21.41	0.4608
14+000	6.1	3.1	18.97	0.4018	5.96	3.58	21.35	0.4680	5.82	3.78	22.05	0.5006
13+955	4.98	0.3	1.52	0.0438	5.3	4.97	26.36	0.6890	5.09	5.11	26.07	0.7236
13+905	4.91	0.28	1.38	0.0405	4.88	5.54	27.08	0.8000	4.34	6.2	26.94	0.9503
13+855	4.78	0.21	1.01	0.0311	4.46	6.05	27.01	0.9150	4.39	6	26.38	0.9139
13+800	4.44	0.34	1.51	0.0516	4.41	5.77	25.5	0.8784	4.05	6.23	25.28	0.9884
13+700	4.09	3.67	15.06	0.5805	4.56	5.02	22.95	0.7514	4.54	4.79	21.82	0.7185

Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.27	7.07	6.48	6.47	6.57
14+000	5.70	6.36	5.88	5.83	5.94
13+955	0.79	0.71	0.78	0.67	0.74
13+905	0.73	0.65	0.73	0.62	0.68
13+855	0.57	0.50	0.57	0.47	0.53
13+800	0.78	0.70	0.78	0.67	0.73
13+700	4.76	5.20	4.89	4.78	4.91
				Promedio	2.87

Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.27	7.07	6.48	6.47	6.57
14+000	6.26	7.05	6.46	6.45	6.56
13+955	7.38	8.47	7.65	7.73	7.81
13+905	7.54	8.67	7.81	7.91	7.98
13+855	7.52	8.65	7.80	7.89	7.97
13+800	7.19	8.23	7.45	7.51	7.59
13+700	6.62	7.51	6.85	6.86	6.96
				Promedio	7.35

Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.27	7.07	6.48	6.47	6.57
14+000	6.42	7.25	6.63	6.63	6.73
13+955	7.32	8.39	7.58	7.66	7.74
13+905	7.51	8.63	7.78	7.88	7.95
13+855	7.39	8.47	7.65	7.74	7.81
13+800	7.14	8.17	7.39	7.46	7.54
13+700	6.36	7.18	6.58	6.57	6.67
				Promedio	7.29

C.2 Espigones a 30 m de separación y 20 m de longitud

Simulación hidráulica del tramo

Estación	Espigones a 30m de separación y 20m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	6.96	3.09	21.57	0.3745	6.96	3.1	21.58	0.3751	6.96	3.1	21.59	0.3753
14+000	7.02	2.67	18.76	0.3215	6.92	3.09	21.45	0.3760	6.77	3.38	22.91	0.4152
13+955	4.84	0.5	2.46	0.0736	5.52	5.99	33.09	0.8142	5.62	5.55	31.27	0.7477
13+905	5.26	0.3	1.59	0.0421	5.09	6.35	32.39	0.8996	4.11	7.66	31.55	1.2054
13+855	4.96	0.49	2.44	0.0704	4.71	6.67	31.45	0.9818	4.39	7.16	31.532	1.0908
13+800	3.71	0.65	2.44	0.1089	2.71	8.72	23.68	1.6903	3.06	8.7	26.64	1.5885
13+700	3.94	3.34	13.2	0.5377	4.6	5.24	24.15	0.7808	4.47	4.67	20.89	0.7059

Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.11	6.52	6.51	6.61
14+000	5.65	6.30	5.83	5.78	5.89
13+955	1.15	1.08	1.15	1.01	1.10
13+905	0.82	0.74	0.81	0.70	0.77
13+855	1.14	1.07	1.14	1.01	1.09
13+800	1.14	1.07	1.14	1.01	1.09
13+700	4.29	4.64	4.40	4.27	4.40
				Promedio	2.99

Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.12	6.52	6.51	6.61
14+000	6.28	7.08	6.49	6.48	6.58
13+955	8.82	10.32	9.17	9.39	9.43
13+905	8.68	10.13	9.01	9.22	9.26
13+855	8.48	9.87	8.80	8.99	9.04
13+800	6.79	7.71	7.02	7.05	7.14
13+700	6.89	7.85	7.13	7.17	7.26
				Promedio	7.90

Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.12	6.52	6.51	6.62
14+000	6.61	7.50	6.84	6.85	6.95
13+955	8.44	9.83	8.76	8.95	8.99
13+905	8.50	9.90	8.83	9.02	9.06
13+855	8.49	9.90	8.82	9.01	9.06
13+800	7.44	8.55	7.71	7.80	7.88
13+700	6.15	6.92	6.35	6.33	6.44
				Promedio	7.86

C.3 Espigones a 20 m de separación y 10 m de longitud

Simulación hidráulica del tramo

Estación	Espigones a 20m de separación y 10m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	6.08	3.52	21.48	0.4564	6.08	3.53	21.5	0.4576	6.08	3.53	21.48	0.4570
14+000	6.09	3.23	19.7	0.4181	6.01	3.56	21.44	0.4647	5.89	3.71	21.89	0.4883
13+955	5.06	0.6	3.05	0.0854	5.32	4.98	26.55	0.6893	5.18	5.07	26.33	0.7111
13+905	5.03	0.46	2.34	0.0661	4.93	5.5	27.15	0.7910	4.59	5.88	27	0.8764
13+855	4.56	0.23	1.08	0.0355	4.43	6.12	27.16	0.9277	3.95	6.6	26.13	1.0600
13+800	4.4	0.36	1.6	0.0554	4.33	5.96	25.83	0.9145	3.71	6.55	24.36	1.0853
13+700	4.07	3.55	14.47	0.5619	4.56	5.04	23.04	0.7535	4.51	4.74	21.4	0.7125

Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.49	6.49	6.59
14+000	5.87	6.57	6.06	6.02	6.13
13+955	1.36	1.30	1.37	1.22	1.31
13+905	1.11	1.03	1.11	0.97	1.05
13+855	0.60	0.53	0.60	0.50	0.56
13+800	0.82	0.74	0.82	0.70	0.77
13+700	4.61	5.03	4.74	4.62	4.75
				Promedio	3.02

Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.50	6.49	6.59
14+000	6.28	7.08	6.48	6.48	6.58
13+955	7.42	8.52	7.69	7.78	7.85
13+905	7.55	8.69	7.83	7.93	8.00
13+855	7.56	8.69	7.83	7.93	8.00
13+800	7.26	8.32	7.52	7.60	7.68
13+700	6.64	7.53	6.87	6.89	6.98
				Promedio	7.38

Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.29	7.09	6.49	6.49	6.59
14+000	6.38	7.20	6.59	6.59	6.69
13+955	7.37	8.46	7.64	7.72	7.80
13+905	7.52	8.65	7.79	7.89	7.96
13+855	7.33	8.40	7.59	7.67	7.75
13+800	6.94	7.91	7.18	7.22	7.31
13+700	6.27	7.06	6.47	6.47	6.57
				Promedio	7.24

C.4 Espigones a 20 m de separación y 20 m de longitud

Simulación hidráulica del tramo

Estación	Espigones a 20m de separación y 20m de longitud											
	Margen derecha				Centro				Margen izquierda			
	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R	y (m)	v (m/s)	q (m ² /s)	F _R
14+100	7.92	2.72	21.56	0.3088	7.91	2.72	21.58	0.3096	7.91	2.73	21.6	0.3099
14+000	7.98	2.33	18.68	0.2643	7.89	2.72	21.52	0.3096	7.79	2.94	22.97	0.3371
13+955	6.76	0.35	2.43	0.0441	7.09	4.65	33.03	0.5582	7.11	4.56	32.43	0.5461
13+905	7.14	0.26	1.88	0.0315	7.08	4.11	29.16	0.4940	6.57	5.41	35.63	0.6743
13+855	3.72	0.44	1.64	0.0732	3.36	8.81	29.89	1.5457	4.18	8.56	35.86	1.3360
13+800	3.82	0.59	2.27	0.0969	2.77	9.53	26.48	1.8256	2.24	10.47	23.49	2.2343
13+700	3.72	4	14.89	0.6618	4.72	5.15	24.36	0.7563	4.34	4.44	19.3	0.6810

Altura de socavación en la margen derecha del tramo de estudio, en metros

Estación	Margen derecha				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.11	6.51	6.51	6.61
14+000	5.63	6.28	5.81	5.75	5.87
13+955	1.14	1.06	1.14	1.00	1.09
13+905	0.93	0.85	0.93	0.80	0.88
13+855	0.84	0.76	0.83	0.72	0.79
13+800	1.08	1.00	1.08	0.95	1.03
13+700	4.72	5.15	4.85	4.74	4.86
				Promedio	3.02

Altura de socavación en el centro del cauce en el tramo de estudio, en metros

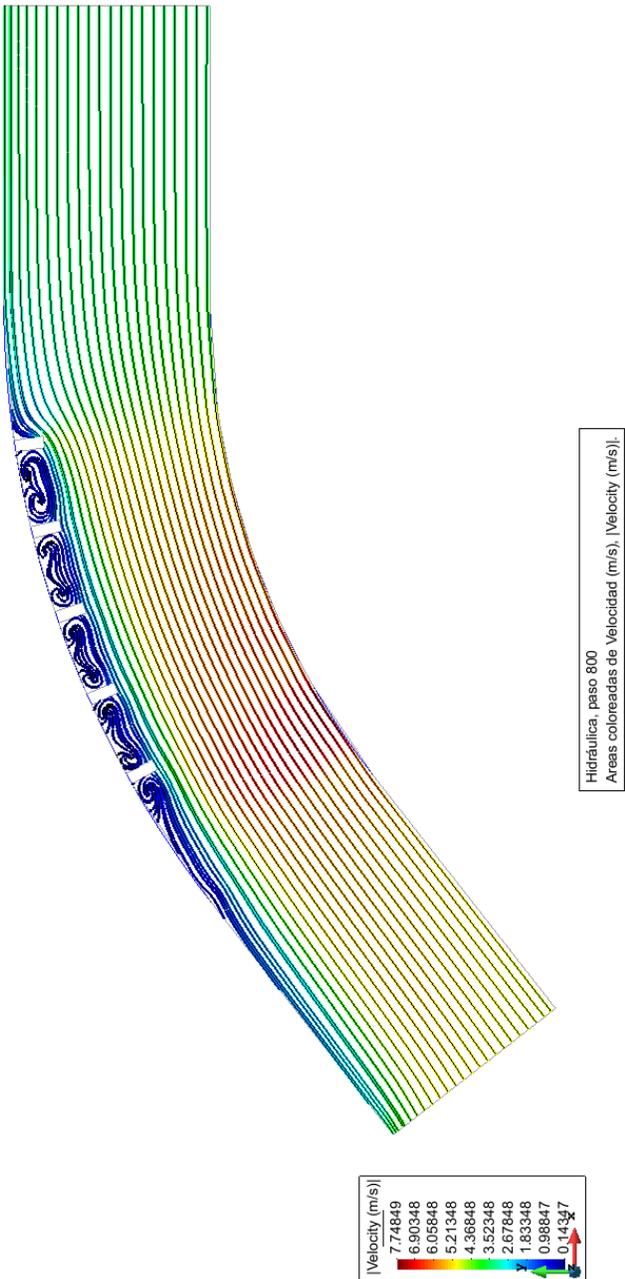
Estación	Centro				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.12	6.52	6.51	6.61
14+000	6.30	7.10	6.50	6.50	6.60
13+955	8.81	10.30	9.15	9.38	9.41
13+905	7.99	9.25	8.29	8.43	8.49
13+855	8.15	9.45	8.45	8.61	8.66
13+800	7.41	8.50	7.67	7.76	7.84
13+700	6.94	7.91	7.18	7.22	7.31
				Promedio	7.85

Altura de socavación en la margen izquierda del tramo de estudio, en metros

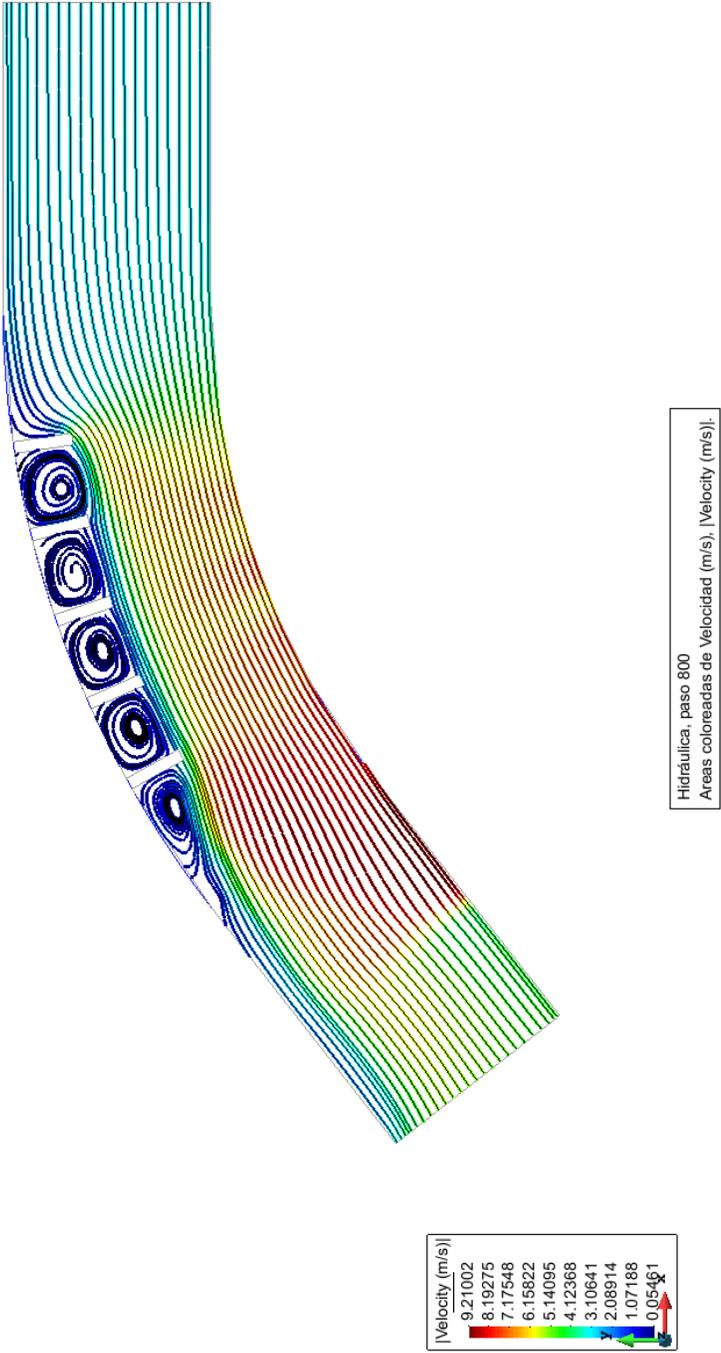
Estación	Margen izquierda				
	Maza-Echeverría	Maza-García	Neill	Laurse	Promedio
14+100	6.31	7.12	6.52	6.52	6.62
14+000	6.63	7.51	6.85	6.87	6.96
13+955	8.68	10.14	9.02	9.23	9.27
13+905	9.35	11.01	9.72	10.01	10.02
13+855	9.40	11.07	9.77	10.06	10.08
13+800	6.74	7.66	6.97	7.00	7.10
13+700	5.78	6.46	5.96	5.92	6.03
				Promedio	8.01

ANEXO D. IMÁGENES DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE EN EL MODELO IBER PARA EL TRAMO EN ESTUDIO

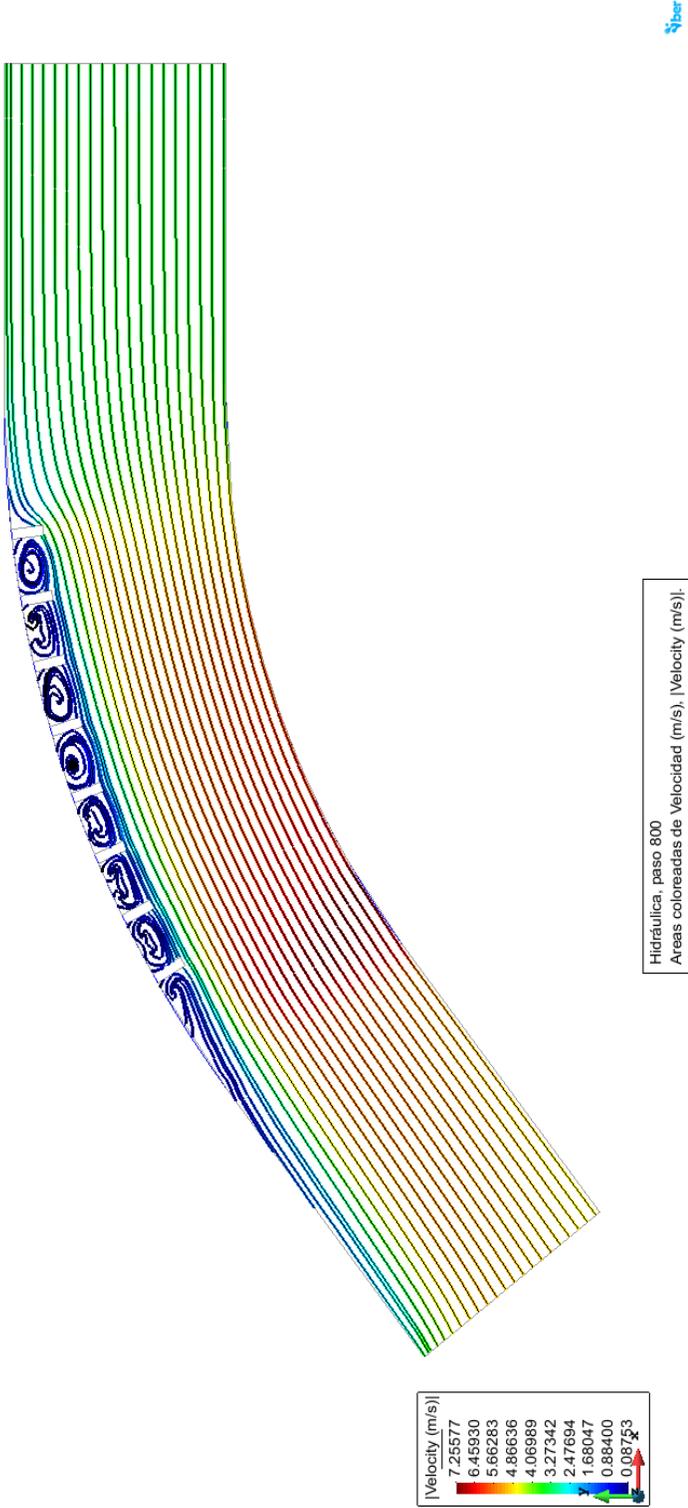
D.1 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 30 m de separación y longitud de 10 m



D.2 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 30 m de separación y longitud de 20 m



D.3 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 20 m de separación y longitud de 10 m



D.4 Líneas de corriente en el tramo de estudio, con espigones a 20 m de separación y longitud de 20 m

