

Evaluación de la socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland utilizando Iber 3.0.

ANTHONY RUIZ CHIPANA

EMAIL: anthonyruiz@upeu.edu.pe

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

MARCOS RUBEN GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ

EMAIL: marcosgr94@outlook.com

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

REYMUENDO JAULIS PALOMINO

EMAIL: reymundojaulis@upeu.edu.pe

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo determinar la influencia de la socavación general del puente y la socavación local de un pilar del puente afectado por un fluido. Para efectuar el estudio, se utilizaron imágenes satelitales AsterDem V3, de tamaño de celda de $1^\circ \times 1^\circ$ con un intervalo de 1 arcosegundo (30 m). Se elaboró el enmallado en Iber considerando que en los pilares sería de 0.50 m, en el río sería de 1.00 m y en los márgenes del río de 2.00 m, obteniendo datos de velocidad de aproximación, número de Froude y tirante. Se aplicaron los métodos de Lischtván-Levediev y Melville y Sutherland, obteniendo valores para la socavación general de 0.00 m y socavación local de 11.736 m en ambos pilares, respectivamente.

PALABRAS**CLAVES:**

Socavación general, Socavación local, Velocidad de aproximación, Tirante.

Evaluation of the general and local scour of the Salvador Bridge by the Lischtván - Levediev and Melville and Sutherland methods using Iber 3.0

ABSTRACT

The objective of the study was to determine the influence of the general scour of the bridge and the local scour of a bridge abutment affected by a fluid. To carry out the study, AsterDem V3 satellite images of $1^\circ \times 1^\circ$ cell size with an interval of 1 arc-second (30 m, discarding zeros with a 20-year data (MTC, 2016)). The netting in Iber was elaborated considering that in pillars it would be 0.50, in the river it would be 1m and in the river banks 2 m, obtaining data of approach velocity, Froude number, and scour. The Lischtván - Levediev and Melville and Sutherland methods were applied, obtaining values for the general scour of 0.00 m. and local scour of 11.736 m. in both pillars, respectively.

KEYWORDS

:

General scour, Local scour, Approach velocity, Tie rod

01 INTRODUCCIÓN

La socavación es un proceso natural causado por la erosión del agua en los cauces de ríos y canales. La socavación local implica la eliminación de sedimentos alrededor de elementos estructurales en el flujo del agua, lo que resulta en la disminución del nivel del lecho del río debido a la acción erosiva. Con el tiempo, esta erosión puede exponer las bases de los puentes. A medida que la socavación progresa, puede debilitar los cimientos de la estructura, lo que eventualmente puede llevar a su colapso. (Khwairakpam & Mazumdar, 2009)

Generalmente, la socavación es un proceso de larga duración, por lo que se producen fallos catastróficos en el puente. Según la estadística mundial, alrededor del 80 % de los fallos de los puentes se deben a la socavación (Ju, 2013). Por lo tanto, la estimación de la socavación alrededor de un pilar de puente es una práctica importante en la ingeniería.

Los tres mecanismos principales de la socavación local son: el aumento de las velocidades medias del flujo y de los gradientes de presión en las proximidades de la estructura, la creación de flujos secundarios en forma de vórtices y el aumento de la turbulencia en el campo de flujo local (Mehaladevi & Venkatesh, 2020). La socavación local se divide en dos regímenes de socavación diferentes que dependen de las condiciones del flujo y de los sedimentos aguas arriba de la estructura. La socavación en aguas claras se refiere a la socavación local que tiene lugar en condiciones en las que el sedimento no está en movimiento en un lecho plano, aguas arriba de la estructura. Si el sedimento aguas arriba de la estructura está en movimiento, la socavación local se denomina socavación de lecho vivo (Martín-Vi de et al., 2019).

Varias investigaciones han optado por estudios experimentales y estudios numéricos para comprender el mecanismo de la socavación, patrones y métodos para medir la profundidad de la socavación, considerando diferentes parámetros. La mayoría de los estudios se centran en la socavación local alrededor de un muelle o de grupos de muelles (Malik et al., 2021). También se dispone de algunas investigaciones que estudian el mecanismo de socavación y la profundidad alrededor del puente, muelle y estribos (Malik et al., 2021). Los datos necesarios para las investigaciones numéricas suelen obtenerse de estudios experimentales y de campo. Varios investigadores han utilizado diferentes herramientas de modelado como HEC-RAS, IBER, SSIIM y RANS (Bressan et al., 2011) para simular el patrón de socavación y calcular la profundidad de socavación. La estimación precisa de la profundidad de la socavación y la simulación del proceso de socavación son muy difíciles en un modelo a escala de laboratorio debido a la complejidad del fenómeno de la socavación y del campo de flujo (Perez et al., 2020).

En el presente estudio, se utilizó la herramienta computacional IBER para predecir la profundidad de socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland utilizando Iber 3.0.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para calcular la socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland, se utilizaron distintos materiales como imágenes satelitales, registros pluviométricos y la metodología para el análisis estadístico que se describe en el manual de hidrología, hidráulica y drenaje del MTC, manuales MODIPE, suelos FAO e imágenes NDVI.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de la zona de estudio sobre el río Huallaga se ubica en la parte central de Perú, entre los departamentos de Pasco y Huánuco (ver figura 1), la cual abarca dos regiones geográficas, con alturas que van desde los 551.27 m.s.n.m. hasta los 5686 m.s.n.m. en la zona de la cordillera de los Andes. Cuenta con una superficie de 14,467.427 km². Se ubica en las coordenadas 8° 55' 14.102" S y 76° 7' 18.815" O. La precipitación promedio aerea es de 94.54 mm, con climas que van desde fríos en las zonas altas hasta tropicales en la mayor parte de la cuenca.

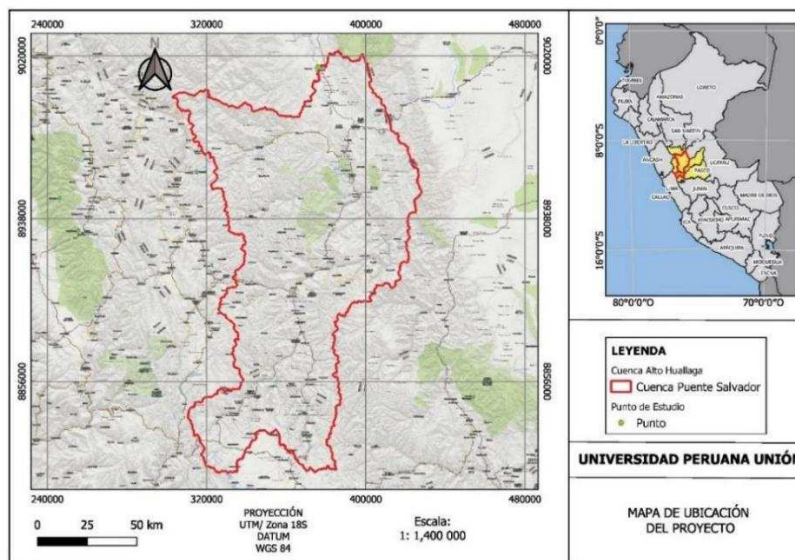


Figura 1. Plano de ubicación cuenca de estudio, región Pasco y Huánuco

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DEL PUENTE

Consiste en un puente continuo de 3 tramos, con una viga cajón de concreto postensado apoyada sobre 2 pilares intermedios de concreto armado y sobre estribos en ambos márgenes del río.

El puente tiene una longitud total de 300 m (una luz central de 160 m y tramos laterales de 70 m). El ancho del tablero es de 12.60 m y está distribuido en: calzada de 6.60 m, berma de 1.20 m, barrera tipo New Jersey de 0.40 m, ancho de vereda de 1.20 m y baranda de 0.20 m en cada vía.

Los estribos izquierdo y derecho son de concreto armado tipo cajón, y los pilares centrales también son de concreto armado, conformados por 2 columnas paralelas de 1.40 m de ancho con una separación de 1.60 m.

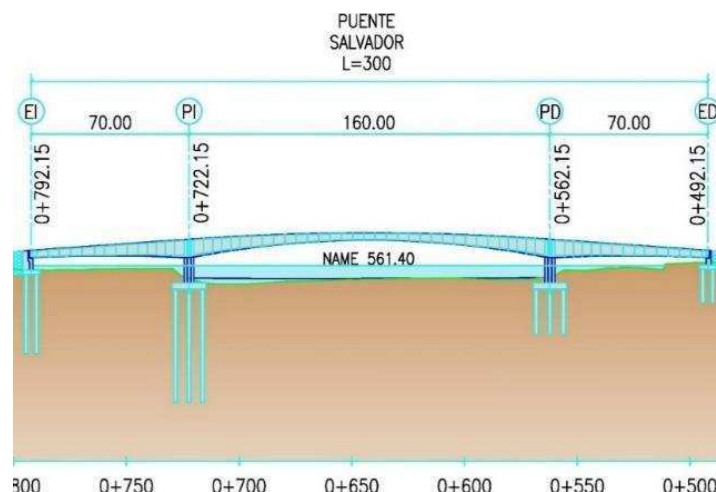


Figura 2. Características geométricas del puente Salvador Fuente: Consorcio HYC/MAB.

TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA

En esta investigación, se emplearon los datos topográficos y batimétricos proporcionados por el consorcio HYC/MAB. Estos datos fueron esenciales para analizar las características geográficas y batimétricas del puente Salvador, permitiendo un análisis detallado del terreno y del fondo del río.

La topografía se utilizó para mapear y analizar las elevaciones y depresiones del terreno. Así mismo, se utilizó en combinación con las imágenes satelitales para obtener el tipo de cobertura (vegetal, carreteras, estructuras, etc.). Estos datos ayudaron a la obtención de la rugosidad de la zona, mientras que la batimetría fue fundamental para determinar la profundidad y morfología del fondo del río. La recolección de estos datos se realizó utilizando un GPS diferencial de marca TRIMBLE R4 para la georreferenciación, una estación total marca LEICA TS06 y un recolector de datos TSC_02, lo que asegura una alta precisión y confiabilidad en los resultados obtenidos.

Se generaron curvas de nivel mayores cada 1.00 m y curvas de nivel menores cada 0.20 m, las cuales se utilizarán para la generación de las superficies en el software Iber.

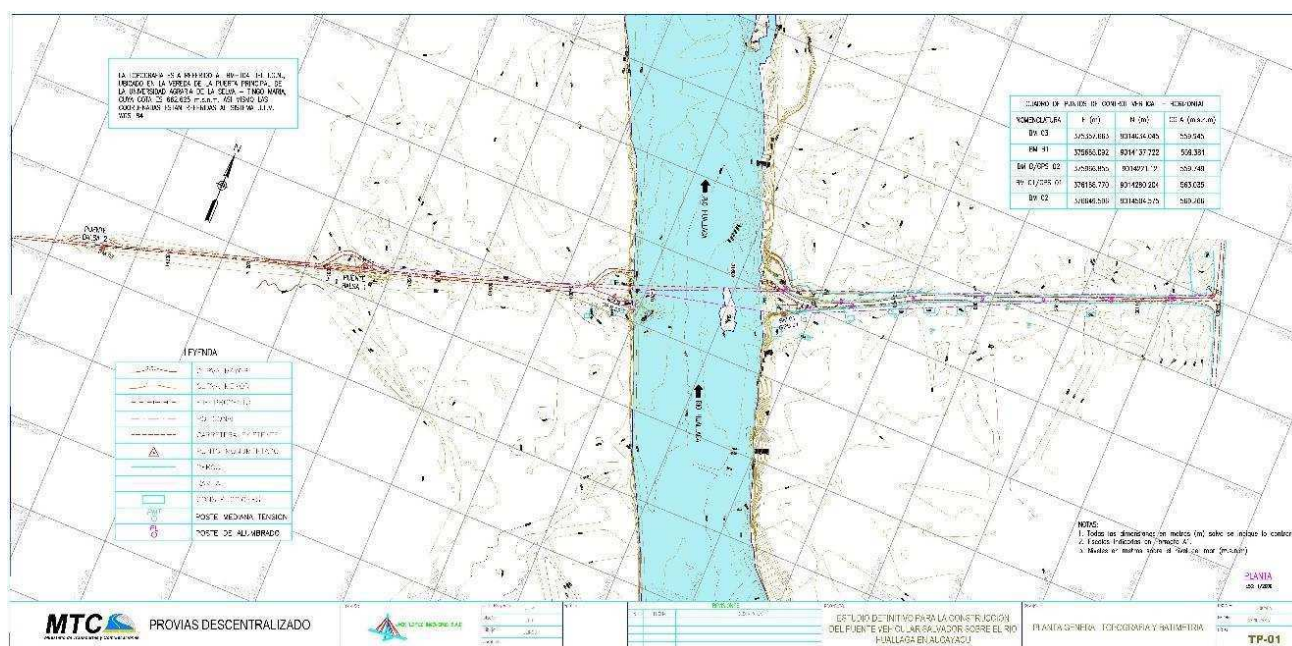


Figura 3. Topografía y Batimetría de la zona de estudio. Fuente: Consorcio HYC/MAB.

MATERIALES DEL CAUCE EN EL RIO HUALLAGA

ESTRIBO IZQUIERDO

Tabla 1. Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
0.00	0.50	Limos de baja compresibilidad, de color marrón grisáceo a gris, húmedos, ligeramente compactos, altamente plásticos, con algo de

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
		arena de grano medio a fino, que contienen raíces y fragmentos de materia orgánica. No se observan pátinas de oxidación. Clasificación: ML
0.50	1.00	Limo algo arenoso, de color marrón grisáceo a gris, húmedo, ligeramente compacto, moderadamente plástico, con arena de grano medio y algunas gravas. No se observan pátinas de oxidación. Clasificación: ML
1.00	1.50	Arcilla limosa, de color marrón grisáceo a gris, húmeda, ligeramente compacta, plástica, con arena de grano medio y algunas gravas. No se observan pátinas de oxidación. Clasificación: ML-CL
1.50	2.20	Limos de baja compresibilidad, de color marrón grisáceo a gris, húmedos, ligeramente compactos, altamente plásticos, con algo de arena de grano medio a fino. No se observan pátinas de oxidación. Clasificación: ML
2.20	25.00	Grava: Arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 5.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas. Clasificación: GP.

PILAR IZQUIERDO

Tabla 2. Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
0.00	0.60	Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 9.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas. Clasificación: GP
0.60	3.00	Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 8.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas. Clasificación: GP
3.00	28.00	Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a muy compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que oscila entre

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
		2.00 y 10 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas, andesitas, riolitas y andesitas porfíricas. Clasificación: GP

PILAR DERECHO

Tabla 3: Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
0.00	3.50	Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que oscila entre 6.50 y 10.00 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas. Clasificación Visual Manual: GP
3.50	27.00	Estratos decimétricos a centimétricos de limolitas de color pardo rojizo a bruno claro a gris bruno, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compactos a muy compactos, ligeramente plásticos, con un tamaño máximo que oscila entre 5.00 y 94.00 cm. RQD: < 25 - muy mala, 30 – mala, 87 – muy buena, 94 - excelente Clasificación: Limo arenitas lutaceas

ESTRIBO DERECHO

Tabla 4: Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
0.00	1.20	Arena limosa de color beige claro a gris amarillento, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, moderadamente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. Presenta fragmentos de raíces y algunas ramas. Clasificación: SM - SC
1.20	2.00	Arena arcillosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. No se observa la presencia de fragmentos de materia orgánica. Clasificación: CL-ML
2.00	3.00	Arcilla limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado húmedo, medianamente compacta a compacta, plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. Presenta algunos fragmentos de gravas. Clasificación: CL-ML

Profundidad		Descripción Petrográfica
Desde(m)	Hasta(m)	
3.00	4.00	Arena limosa con arcilla de color beige claro a gris claro, de grano fino, en estado húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arena. Clasificación: Areniscas limosas
2.20	16.20	Estratos decimétricos a centimétricos de areniscas de color gris claro a beige, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compactos a muy compactos, ligeramente plásticos, con un tamaño máximo que oscila entre los 8.50 y 90.00 cm. RQD: 26 - mala, 51 – regular, 83 - <muy buena Clasificación: Areniscas.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados del análisis granulométrico del material del cauce principal y de la llanura de inundación, a la altura del estribo izquierdo.

Tabla 5: Análisis granulométrico del material del cauce. Fuente: Consorcio HYC/MAB.

Zona	D95	D75	D50	D35	D15
Cauce Principal (mm)	64.6	38.0	15.8	8.0	0.5
Llanura (mm)	39.5	32.0	24.5	21.2	1.3
Diámetro medio en el cauce principal				Dmedio	17.08 mm
Diámetro medio en la llanura a la altura del estribo izquierdo				Dmedio	22.1 mm

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Se procesaron las imágenes satelitales ASTER DEM utilizando ArcGIS 10.4 para determinar los límites de la cuenca. En la delimitación, solo se consideró el cauce principal del río Huallaga y se descartaron los ríos tributarios con el fin de obtener el caudal del tributario principal. (ver figura 4) A partir del procesamiento de las imágenes satelitales, se obtuvieron los datos representados en la tabla 6.

Tabla 6: Parámetros Geomorfológicos de la cuenca Alto Huallaga obtenidas del ArcGIS 10.4.

Parámetros Geomorfológico	Simbología	Unidad	Cuencas SIG
Área	a	km ²	14467.427
Perímetro	P	km	1215.78
Longitud Axial	La	km	351.207
Ancho Promedio	Ap	km	41.193
Coeficiente de Compacidad	C	-	2.850
Factor de forma	F	-	0.117
Densidad de drenaje	D	km/km ²	0.272
Pendiente media de la Cuenca	Sc	m/m	0.455
Pendiente media longitud axial	S	%	1.508
Cota Máxima	Zmáx	m.s.n.m.	5065
Cota Mínima	Zmin	m.s.n.m.	551.272
Centroide (WGS84 UTM Zona 18S)			
X centroide	-	m	367211.273
Y centroide	-	m	8921226.539

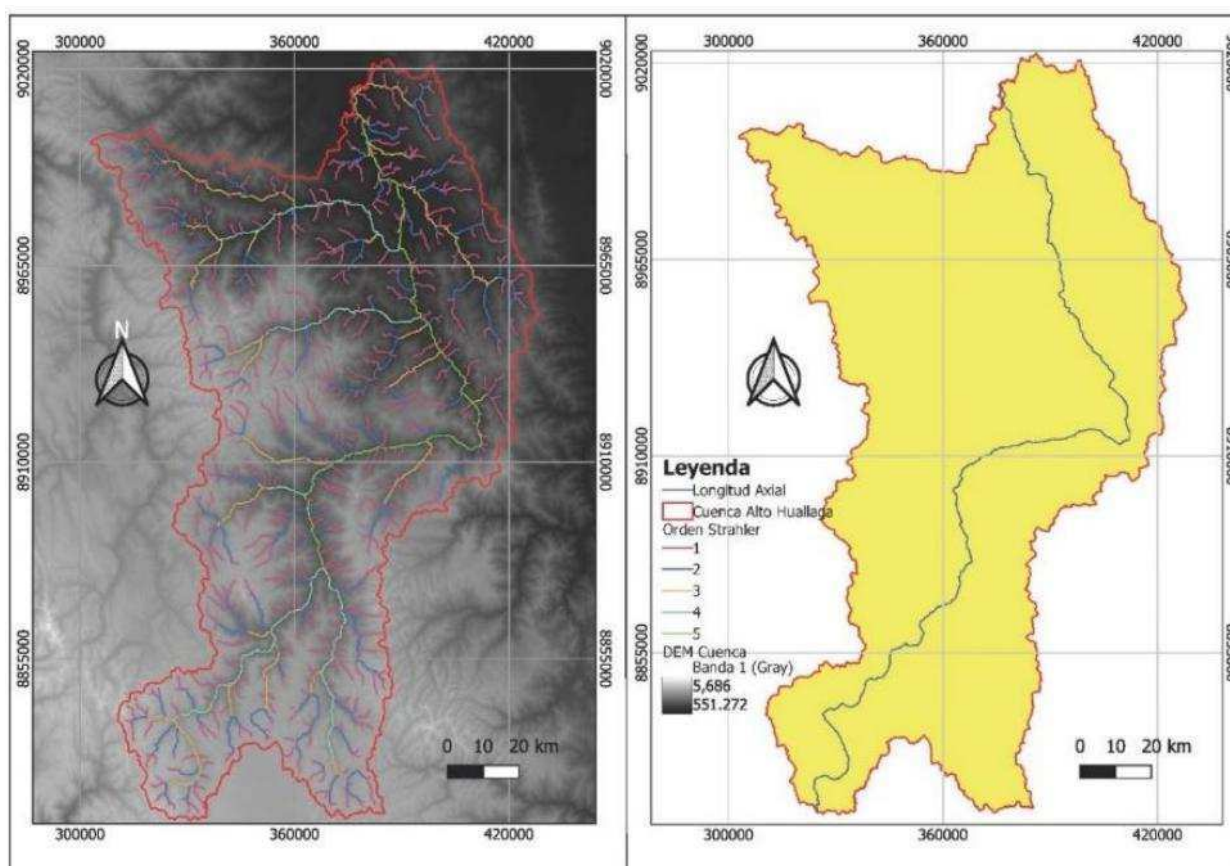


Figura 4. Izquierda: Modelo de elevación digital (DEM) con todos los aportantes. Esc. 1:1,200 000. Derecha: Cuenca sobre el río Huallaga, Pasco y Huánuco.

Entre los parámetros observamos pendientes pronunciadas, lo que indica un relieve accidentado; por lo tanto, el tiempo de concentración es menor. Para definir el tiempo de concentración, se revisó la bibliografía de los autores mencionados en el Manual de Hidrología e Hidráulica del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2016). Sin embargo, ninguna de las metodologías propuestas cumplía con los parámetros obtenidos, ya que el área de la cuenca es muy grande. Por ello, se optó por la metodología de Giandiotti, ya que esta se ajusta mejor a los datos obtenidos en la cuenca.

En la curva hipsométrica (ver figura 5), se observan cotas muy elevadas, superiores a 5500 m.s.n.m., con una pendiente del 45,50%. La curva muestra una tendencia a mantener pendientes de valores altos.

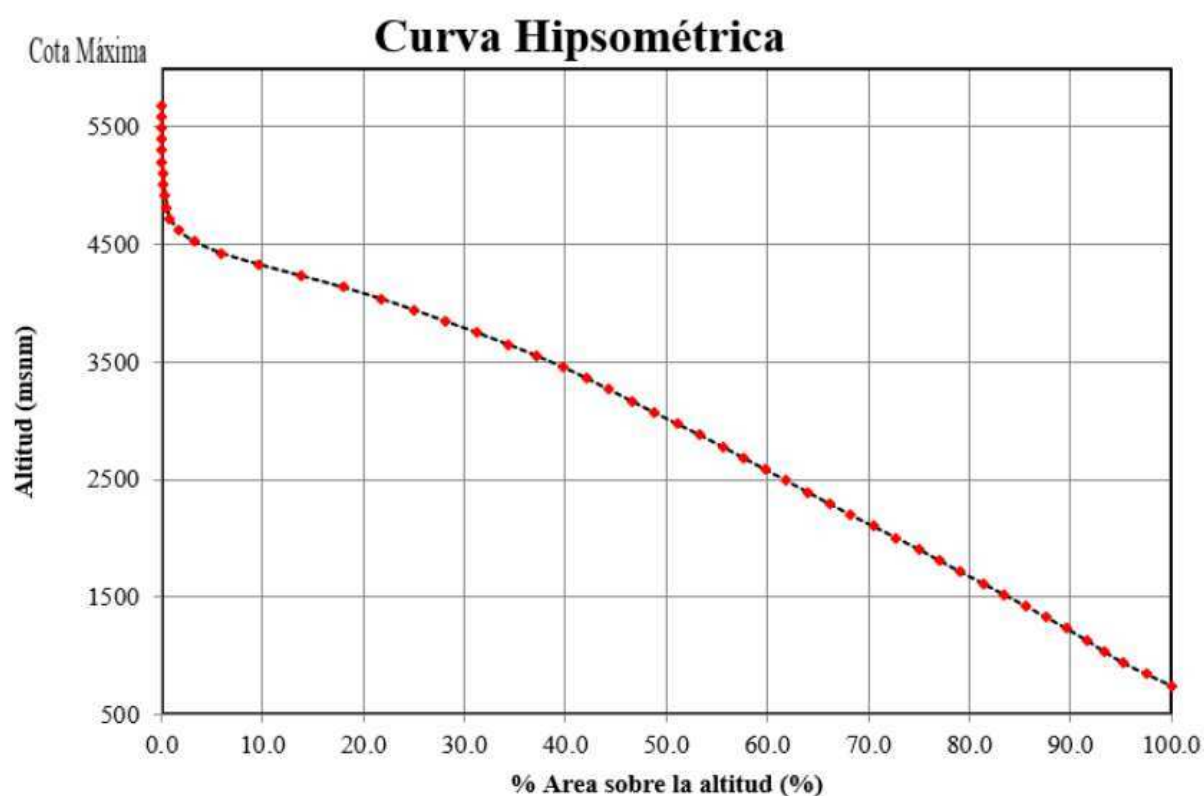


Figura 5. Curva hipsométrica de la cuenca Alto Huallaga la cual demuestra que es un río viejo.

ANÁLISIS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Se analizaron 13 estaciones pluviométricas: Aucayacu, Canchan, Carpish, Chaglla, Huánuco, Jacas Chico, Oxapampa, Pomabamba, San Rafael, Sihuas, Tingo María, Tulumayo y Yanahuanca. En la figura 6 se representan las estaciones mencionadas. Los datos se obtuvieron de la página web del ANA (SENAMHI), donde se seleccionaron datos de precipitaciones máximas de 24 horas. A partir de esto, se obtuvo el registro de precipitaciones máximas medidos en las estaciones del área de estudio, que se presenta en la tabla 7.

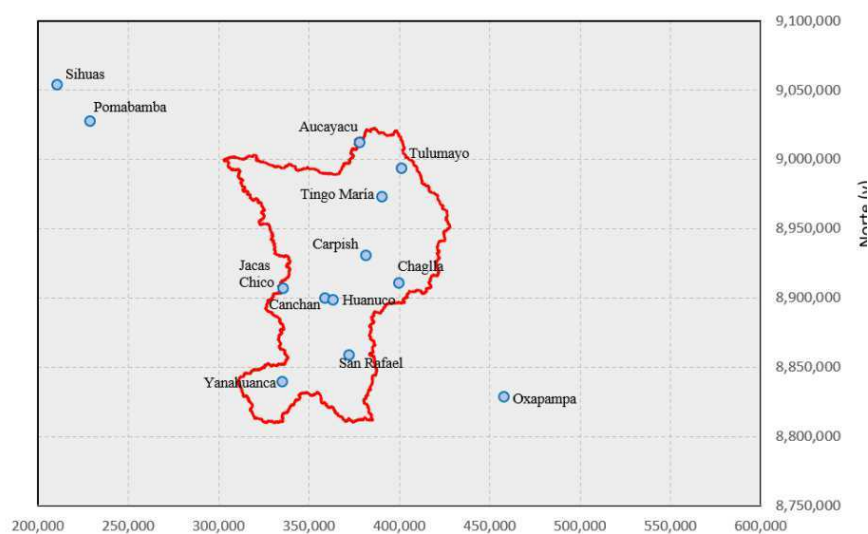


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca Alto Huallaga

Tabla 7. Precipitaciones máximas en 24 horas por año

Año	Aucayacu	Canchan	Carpish	Chaglla	Huánuco	Jacas Chico	La Divisoria	Oxapampa	Pomabamba	San Rafael	Sihuas	Tingo María	Tulumayo	Yanahuanca
1964								40.0			23.7			
1965					19.5			45.5			27.6			
1966					25.2			47.0			29.4	65.0		
1967					40.0						27.3	70.5		
1968					20.4					15.0	21.9	90.4	94.7	
1969					27.4					22.0	30.4	132.5	78.9	
1970					20.0			43.2		14.4	49.1	124.1	84.0	
1971					15.1			93.0		26.5		141.0	112.8	
1972					16.5			43.2			28.1	102.2	112.0	
1973					26.1					34.5	31.0	121.1	154.5	
1974					25.6			31.6			24.0	84.7	99.8	
1975	86.8				29.2	33.7		23.2		35.0	20.8	86.4	65.1	
1976	60.4					26.4		26.6			20.8	128.0	71.7	
1977	37.2				31.4			51.7			30.1	125.7	95.0	
1978	16.0				16.8	23.3		52.5		25.3	24.3	61.8	92.0	
1979						49.0				40.0	27.0	75.3	57.3	40.4
1980						22.4					26.6	81.4	88.0	37.4
1981						30.0						134.0	133.5	38.1
1982					42.9	19.7					24.1	99.7	116.7	19.6
1983						25.5					23.4	109.0	86.0	
1984						22.6					26.0	80.0	74.7	
1985						19.2					43.7	100.0	95.5	
1986	102.0				18.5	21.5							97.1	
1987					18.6							85.7	78.5	
1988					20.1	25.0						89.0		25.8
1989					27.4	21.3						94.4		16.7
1990		18.1			21.3	22.4			17.0			86.3		
1991	83.5	17.5			28.8	26.1			14.9			98.4		
1992	77.0				38.4	22.4			13.0		30.8	98.3		20.4
1993	75.3	27.3			18.0	28.0					32.4	104.0		
1994	131.4			25.5	24.0	26.0				38.5	52.5	149.2		2.6
1995	103.4	16.7	81.0	28.1	18.9		55.0		21.7	36.8	35.3	98.4		2.1
1996	136.5	17.7	52.7	20.4	17.1		26.0	55.0	22.4	22.8	26.9	78.0	102.9	21.0
1997	96.7	22.7	64.0	17.7	11.4	28.8	50.2	76.0	34.2		38.3	99.8	136.0	22.0
1998	95.0	24.8	57.2	20.4	27.5	41.5	49.2	60.0	25.6		46.9	156.0	113.3	37.7
1999	76.4	25.1	55.9	33.6	33.0	43.2	80.5		33.0	21.6	68.3	116.5	113.8	32.0
2000	102.0	28.1	56.2	41.5	20.3	36.4	92.6	63.0	34.8	25.1	25.2	88.5	96.6	19.2
2001	84.0	60.5	60.3	28.7	48.7	30.1	61.3	42.0		41.8	25.8	95.9	90.7	28.3
2002	87.0	29.6	81.0	24.6	27.2	24.2	82.0	40.0		29.9	25.0	123.1	103.5	18.2
2003	104.0	29.0	60.1	48.0	23.0	27.5	98.0	53.0	37.0			149.7	126.0	54.8
2004	93.2	33.2	48.9	45.0	17.6	29.8	85.0	62.0	32.5	29.6	34.4	80.0	102.4	23.4
2005	102.0	33.0	55.0	35.5	25.5	40.0	77.2	37.0			31.8	97.5	142.0	30.7
2006	96.0	31.6	54.2	41.5	28.0	42.7	128.0	41.0	28.3	28.8	27.7	108.0	118.6	22.5
2007	73.6	37.1	54.2	38.8	27.3	32.1	88.0		39.5	31.9	34.3	70.5	76.8	35.3
2008	95.0	29.6	77.3	32.8	33.1	39.0	88.0	38.0	35.1		23.6	95.8	68.3	23.3
2009	72.5	27.0	88.4	28.6	19.6	47.3	80.6	58.0	28.8	25.5	31.0	78.2	97.6	31.5
2010	74.5	28.6	45.4	49.2	22.6	36.9	114.3	46.0	32.0	25.1	23.3	69.9	108.5	31.3
2011	123.0	24.4	69.5	24.4	36.2	30.1	79.1	52.0	25.5	21.8	21.7	105.0	89.0	28.0
2012	87.2	23.7	67.7	40.8	30.7	40.8	85.8	60.0	36.0	33.5	34.6	103.7	80.0	33.0
2013	96.9	21.7	76.4	27.4	19.9	41.7	125.0	62.0	23.9		26.9	121.0	118.3	19.2
2014	73.8	27.4	61.7	35.0	24.8	38.3	100.0	56.1	36.6	25.7	32.6	148.0	95.0	19.2
2015	89.6	24.5	71.7	40.6	31.7	43.4	94.0		37.6	16.4	43.8	122.5	104.2	
2016	110.4		97.6		18.0		103.0	63.5	53.6		28.8	89.3		
2017	109.2	41.8	47.1	28.6	38.2	38.2	94.2	47.0	26.5	28.6	34.1	103.5	77.8	30.0
2018	91.5	20.8	66.2	28.6	22.9	26.7	122.8	56.5	30.8	32.7	31.4	143.2	81.4	
2019	94.0	19.3	54.0		23.7	29.0	99.3	50.1	44.8	29.3	39.8	72.1	70.1	25.7
2020	104.2	19.6	47.6	27.4	15.3	28.7			42.3				92.3	14.8
2021	89.2		47.4	39.0	32.9	32.3		43.0	34.0		25.0		72.9	22.3
2022	116.8	24.5	75.0	29.0	24.0	34.8		65.0	43.3	30.6	26.2	96.0	74.5	19.1
2023			64.7											
N° datos	37.0	29.0	29.0	27.0	51.0	43.0	25.0	34.0	28.0	28.0	49.0	54.0	46.0	33.0

Posteriormente, se ejecutó el software Hidroesta para calcular las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno, como se muestra en la tabla 8. Para cada distribución, se realizaron las pruebas de bondad de Smirnov-Kolmogorov.

Tabla 8. Registro de precipitaciones máximas de 24h para diferentes periodos de retorno.

Estación	Distribución	TR2	TR5	TR10	TR20	TR25	TR50	TR100	TR140	TR200	TR500
Aucayacu	Gamma 2 Parámetros	94.27	107.85	115.43	121.96	123.90	129.57	134.82	137.23	139.71	145.74
Canchan	LogNormal 2 Parámetros	25.97	32.90	37.24	41.24	42.49	46.26	49.95	51.71	53.57	58.32
Carpish	LogNormal 3 Parámetros	68.31	82.33	92.26	102.20	105.43	115.64	126.20	131.45	137.14	152.28
Chaglla	LogNormal 3 Parámetros	35.47	44.49	50.19	55.51	57.16	62.21	67.14	69.52	72.04	78.47
Huánuco	Gamma 3 Parámetros	27.35	35.38	40.34	44.85	46.23	50.38	54.32	56.18	58.12	62.92
Jacas Chico	LogNormal 2 Parámetros	34.32	42.53	47.60	52.22	53.65	57.97	62.14	64.14	66.23	71.54
Oxapampa	LogNormal 3 Parámetros	56.04	69.55	77.41	84.34	86.45	92.66	98.54	101.28	104.14	111.26
Pomabamba	Normal	35.71	44.51	49.12	52.93	54.04	57.21	60.07	61.36	62.68	65.85
San Rafael	Normal	31.83	38.59	42.13	45.04	45.90	48.33	50.52	51.52	52.52	54.95
Síhuas	LogNormal 3 Parámetros	32.01	40.74	47.93	55.87	58.60	67.71	77.80	83.08	88.96	105.50
Tingo María	LogNormal 2 Parámetros	112.67	136.92	151.61	164.93	169.04	181.33	193.15	198.76	204.63	219.48
Tulumayo	Gamma 3 Parámetros	106.63	128.35	141.15	152.49	155.94	166.12	175.72	180.19	184.81	196.22
Yanahuanca	Gamma 3 Parámetros	28.85	38.00	43.91	49.41	51.12	56.29	61.28	63.64	66.12	72.32

TORMENTA DE DISEÑO

A partir de las precipitaciones máximas de 24 horas, se dedujeron las precipitaciones máximas de diseño para duraciones menores a 24 horas y diferentes tiempos de retorno, utilizando el método de Dick y Peschke. (ver tabla 9).

Tabla 9. Intensidades (mm/h) para duraciones menores de 24 horas en diferentes periodos de retorno

Alto Huallaga											
Duración		Período de retorno (años)									
h	Min.	2	5	10	20	25	50	100	140	200	500
1.00	60.00	24.24	29.63	32.93	34.99	35.90	38.66	41.28	42.53	45.01	45.94
2.00	120.00	14.41	17.62	19.58	20.81	21.34	22.99	24.55	25.29	26.77	27.31
3.00	180.00	10.63	13.00	14.45	15.35	15.75	16.96	18.11	18.66	19.75	20.15
4.00	240.00	8.57	10.47	11.64	12.37	12.69	13.67	14.60	15.04	15.91	16.24
5.00	300.00	7.25	8.86	9.85	10.47	10.74	11.56	12.35	12.72	13.46	13.74
6.00	360.00	6.32	7.73	8.59	9.13	9.36	10.08	10.77	11.09	11.74	11.98

Alto Huallaga											
Duración		Período de retorno (años)									
7.00	420.00	5.63	6.88	7.65	8.13	8.34	8.98	9.59	9.88	10.46	10.67
8.00	480.00	5.10	6.23	6.92	7.36	7.55	8.13	8.68	8.94	9.46	9.66
9.00	540.00	4.66	5.70	6.34	6.73	6.91	7.44	7.95	8.18	8.66	8.84
10.00	600.00	4.31	5.27	5.86	6.22	6.38	6.87	7.34	7.56	8.00	8.17
11.00	660.00	4.01	4.90	5.45	5.79	5.94	6.40	6.83	7.04	7.45	7.61
12.00	720.00	3.76	4.60	5.11	5.43	5.57	6.00	6.40	6.60	6.98	7.12
13.00	780.00	3.54	4.33	4.81	5.11	5.24	5.65	6.03	6.21	6.57	6.71
14.00	840.00	3.35	4.09	4.55	4.83	4.96	5.34	5.70	5.88	6.22	6.35
15.00	900.00	3.18	3.89	4.32	4.59	4.71	5.07	5.42	5.58	5.91	6.03
16.00	960.00	3.03	3.70	4.12	4.37	4.49	4.83	5.16	5.32	5.63	5.74
17.00	1020.0	2.89	3.54	3.93	4.18	4.29	4.62	4.93	5.08	5.38	5.49
18.00	1080.00	2.77	3.39	3.77	4.00	4.11	4.42	4.72	4.87	5.15	5.26
19.00	1140.00	2.66	3.26	3.62	3.85	3.94	4.25	4.54	4.67	4.95	5.05
20.00	1200.00	2.56	3.13	3.48	3.70	3.80	4.09	4.37	4.50	4.76	4.86
21.00	1260.00	2.47	3.02	3.36	3.57	3.66	3.94	4.21	4.34	4.59	4.68
22.00	1320.00	2.39	2.92	3.24	3.44	3.53	3.81	4.06	4.19	4.43	4.52
23.00	1380.00	2.31	2.82	3.14	3.33	3.42	3.68	3.93	4.05	4.29	4.37
24.00	1440.00	2.24	2.73	3.04	3.23	3.31	3.57	3.81	3.92	4.15	4.24

03 RESULTADOS

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA

Las máximas avenidas del río Huallaga se han calculado a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas. Los caudales presentados corresponden a diferentes períodos de retorno.

Tabla 10. Máximos caudales obtenidos en HEC-HMS.

Periodo de retorno TR	Q máx. (m³/s)
500	8709.80
200	7656.50
140	7278.20
100	6936.70
50	6277.90
25	5675.70
20	5493.20
10	4959.40
5	4473.20
2	3898.80

Para los cálculos de socavación, se utiliza un caudal correspondiente a un período de retorno de 500 años. En consecuencia, el caudal hidráulico a emplear es: $Q_{500} = 8709.80 \text{ m}^3/\text{s}$.

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING CONSIDERADOS

Se utilizaron los siguientes números de Manning, obtenidos del procesamiento del polígono del puente en el software ArcMap, para delimitar mejor las diferentes superficies presentes en nuestro cauce. Se obtuvieron 15 números de Manning, que se detallan a continuación:

Tabla 11. Valores de Manning según Ven Te Chow.

ID	Descripción	"n"
1	Rio	0.032
2	Vía	0.018
3	Arboles sauces	0.15
4	Arbustos y Malezas densos	0.1
5	Arbustos y Malezas escasos	0.06
6	Áreas cultivadas con cultivos	0.04
7	Áreas cultivadas sin cultivo	0.03
8	Infraestructura	0.02
9	Pastizales altos	0.035
10	Pastizales bajos	0.03
11	Tierra con algo de vegetación	0.027
12	Tierra grava	0.025
13	Tierra nueva	0.018
14	Tierra recto y uniforme grava	0.025
15	Tierra sin vegetación	0.025

MODELO IBER (MODELO BIDIMENSIONAL)

La superficie generada a partir de las curvas de nivel constituirá nuestro polígono base para importarlo en Iber. Posteriormente, se asignarán las superficies a todo el polígono, sin omitir ninguna área, ya que es allí donde se realizará el modelado. A continuación, se procederá a ingresar los datos de entrada y salida del modelo.

Se ingresarán los caudales obtenidos del hidrograma para un período de retorno de 500 años y se seleccionará la zona de ingreso del fluido (ver figura 7). Luego, se considerarán los datos de salida, en los cuales se simulará que al salir el fluido se tendrá un régimen subcrítico (ver figura 8).

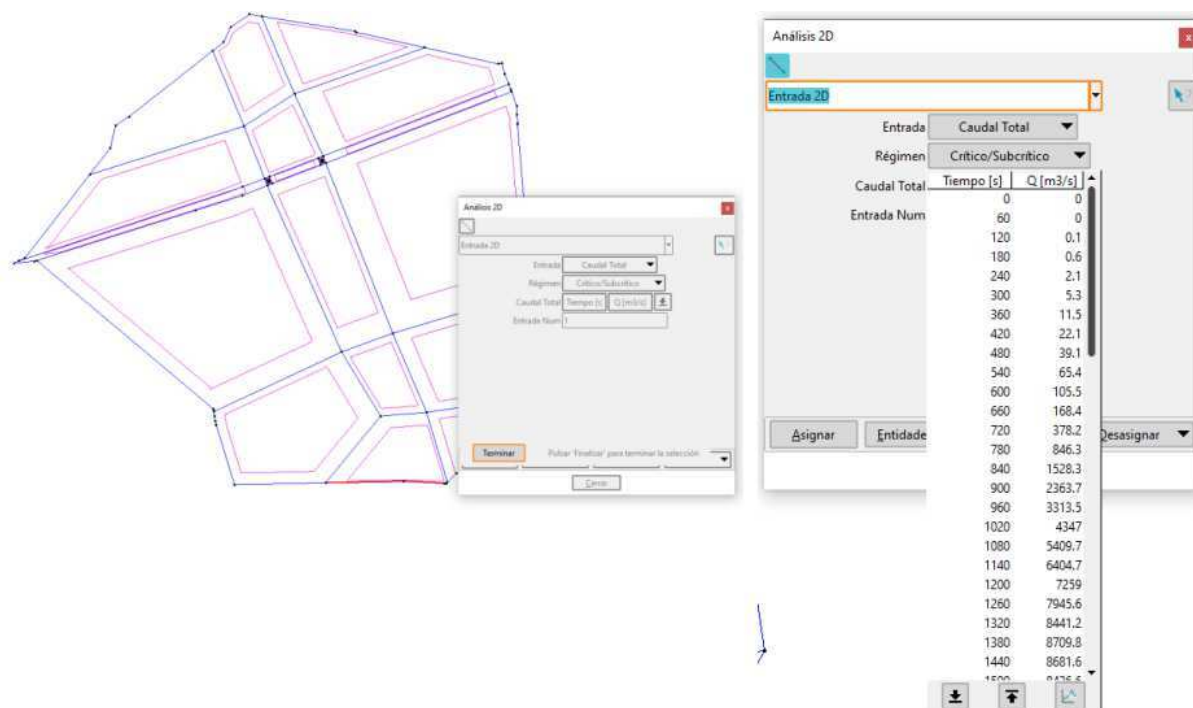


Figura 7. Datos de Entrada para el modelamiento en Iber.

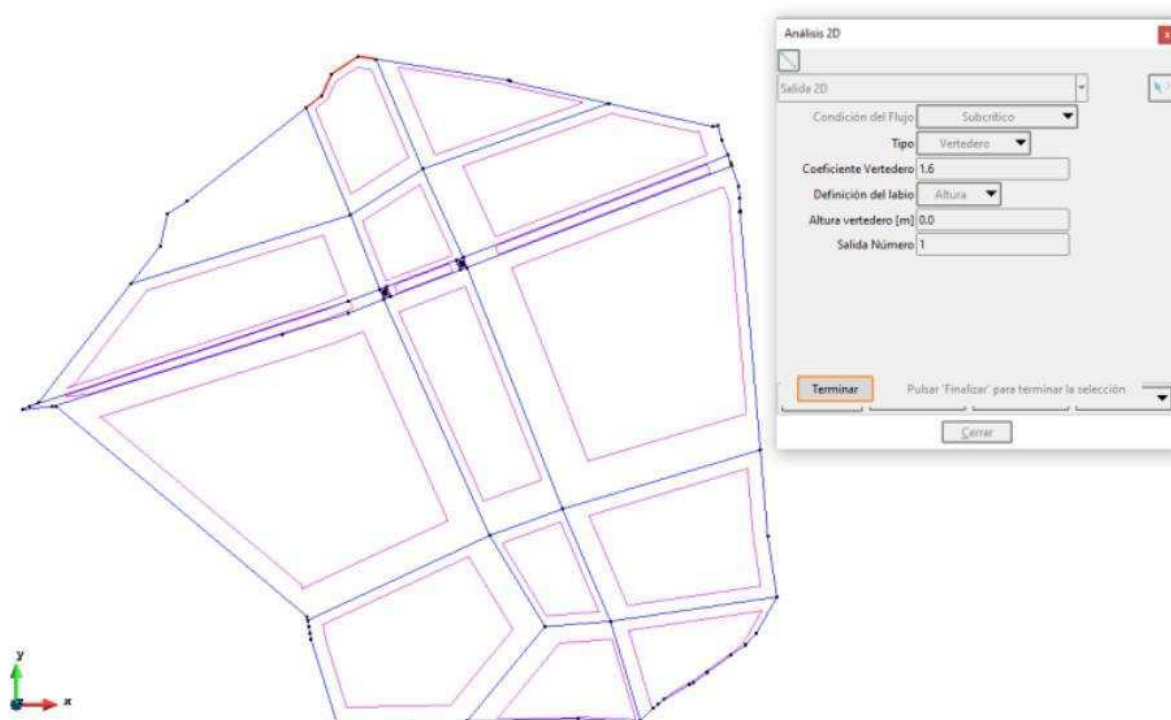


Figura 8. Datos de Salida para el modelamiento en Iber.

Para obtener los resultados del modelado, se consideraron los pilares de forma hueca, lo que permitió un procesamiento más rápido sin sacrificar la precisión de los resultados. Se emplearon tres

tamaños de malla: 0.5 m para el área de los pilares, 1.0 m para la zona del río y el eje de la vía, y 2.0 m en los márgenes del río.

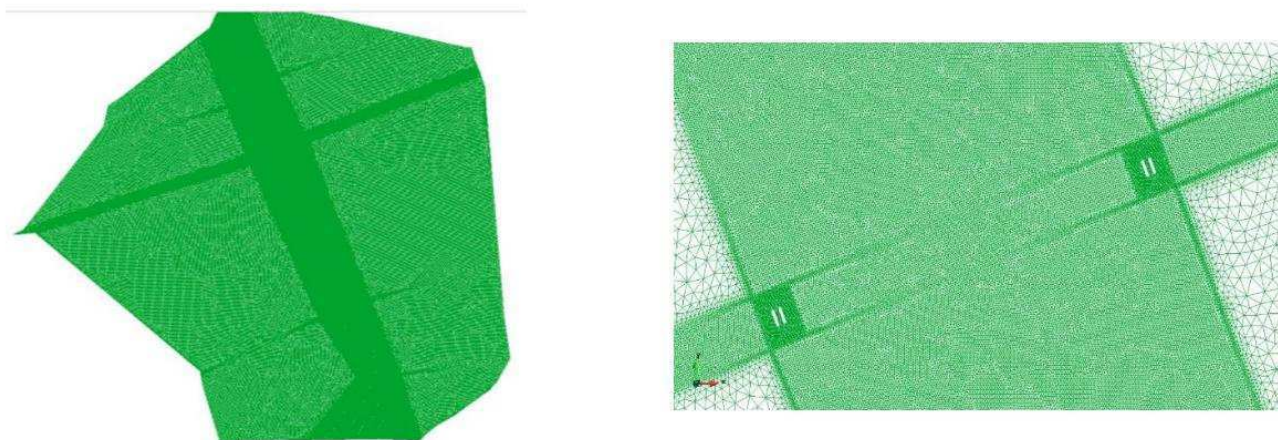


Figura 9. Malla generada para el modelamiento en Iber

Los valores de los números de Manning se deben introducir de acuerdo con Ven Te Chow, utilizando los datos de la Tabla 11.

A continuación, se debe ingresar la topografía del relieve del terreno generado a partir de la superficie de la zona de estudio. Esto permitirá obtener las cotas respectivas con referencia a la topografía en los informes generados.

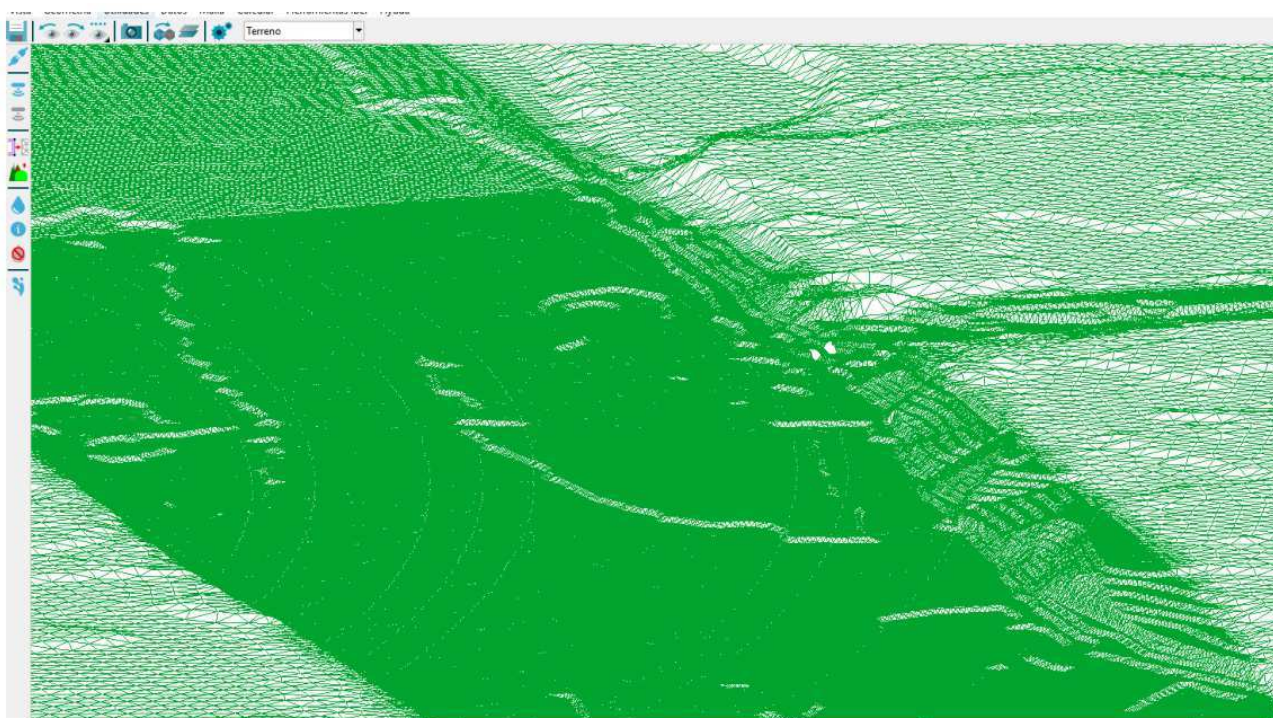


Figura 10: Topografía ingresada para el modelamiento en Iber

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en Iber, simulando un tiempo total de 4800 segundos y generando resultados cada 10 segundos para la visualización de los informes. A continuación, se presentan los resultados del modelado para el parámetro velocidad. Se observa que la velocidad fluctúa entre 2 m/s y 4 m/s, lo que indica una capacidad erosiva tanto para el cauce como para los pilares.



Figura 11. Resultados del parámetro velocidad del modelamiento en Iber.

SOCAVACIÓN GENERAL

Para el cálculo de socavación general se utilizó el método de Lischtván-Levediev para un periodo de retorno de 500 años, simulando el tiempo de 4800 segundos.

Tabla 12. Socavación general por el método de Lischtván-Levediev, usando hoja de Excel.

Parámetros Hidráulicos	Valor
Sección Transversal	1
Q (m ³ /s)	8709.8
A (m ²)	469.3313
V (m/s)	4.8748
Dm (mm)	17.08
Luz (mínima para μ)	67.05
Tiempo de Retorno (TR)	500
Peso específico muestra de agua (T/m ³)	1.8
μ	0.98094
α	0.7
β	1.06
φ	2.19
z	0.33
Prof. Socav. (ds) (m)	0.00

Esta sección se ubica aguas arriba del puente. De acuerdo con los resultados del modelado hidrodinámico, el fluido generará una socavación de 0.00 m en dicha sección para un caudal de 8709.80 m³/s, como se detalla en la Tabla 13.

Cabe mencionar que, según Gómez Cunya (2010), los valores positivos en los resultados del modelado indican socavación, mientras que los valores negativos indican sedimentación. En este caso, el valor de 0.00 m para la socavación en la sección aguas arriba del puente se asume como el nivel del cauce en las inmediaciones del pilar.

SOCAVACIÓN POR CONTRACCIÓN

Esta erosión se produce debido a la contracción del cauce provocada por la presencia del puente, lo que genera un aumento de la velocidad del flujo en los tramos estrechos. En la siguiente tabla, se presenta la contracción calculada para diferentes longitudes del puente.

Tabla 13. Socavación por Contracción, usando el Método de Laursen, usando hoja de Excel.

Parámetros Hidráulicos	Valor
Q1 (m ³ /s)	8709.8
Q2 (m ³ /s)	8709.8
B1 (m)	211.15
B2 (m)	189.39
h1	12.97
h2	12.74
k1	0.59
Hs	13.83
Hs-h2(Socavación en m)	1.10

SOCAVACIÓN LOCAL

Para determinar la socavación local, se empleó el método de Melville y Sutherland, tomando en cuenta el pilar que experimenta la mayor velocidad del flujo, ya que este generará un mayor grado de erosión debido a la acción del fluido. El cálculo de la socavación se realizó considerando un período de retorno de 500 años y una simulación de 4800 segundos.

Los parámetros utilizados son:

a = Ancho de la pila

K_f = Factor de corrección por la forma de la pila.

K_φ = Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo.

K_i = Factor de corrección por intensidad del flujo

K_h = Factor de corrección por profundidad del flujo

K_D = Factor de corrección por tamaño de sedimento

K_σ = Factor de corrección por gradación de sedimento

Tabla 14. Socavación local del pilar

Parámetros de cálculo para pilares	TR500
a = Ancho de la pila	1.4
K _f = Factor de corrección por la forma de la pila.	1.03
K _φ = Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo.	3.39
K _i = Factor de corrección por intensidad del flujo	2.40

Parámetros de cálculo para pilares	TR500
K_h = Factor de corrección por profundidad del flujo	1.00
K_D = Factor de corrección por tamaño de sedimento	1.00
K_G = Factor de corrección por gradación de sedimento	1.00
d_s = Profundidad de socavación local	11.736 m.

Se observa en la Tabla 14, que la profundidad de socavación en los pilares será de 11.736m.

05 CONCLUSIONES

- En relación con el primer objetivo, se determinó que, al utilizar un tamaño de celda de $1^\circ \times 1^\circ$ con un intervalo de 1 arcosegundo (30 m), fue necesario aplicar una corrección de forma NADIR (ortogonal) mediante el software ENVI. Esto permitió obtener la imagen más vertical del hexaedro al procesar el cuadrante Sur 09° - Oeste 76° de la zona de estudio. Este procedimiento proporcionó parámetros más calibrados de la cuenca de estudio.
- En relación con el segundo objetivo, se determinó la lluvia neta mediante el método del Hidrograma Unitario SCS. Esta lluvia neta depende de la Curva Número (CN), la cobertura vegetal y el tipo de suelo. El procesamiento de estos datos reveló que los caudales aumentan significativamente en la cuenca. Para un T20, el aumento es del 44.557%; para un T50, el aumento es del 65.207%; para un T100, el aumento es del 82.545%; y para un T500, el aumento es del 129.205%.
- En relación con el tercer objetivo, se analizaron los datos recabados de la topografía procesada, la obtención del número de Manning, la distribución de malla en la zona de estudio y el hidrograma para un T500 años. Se determinó que la socavación general no tiene un efecto erosivo, con un valor de 0.00 m. Sin embargo, en el caso de la socavación local, se genera una erosión de 11.736 m para ambos pilares.

06 REFERENCIAS

- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. Bressan, F., Ballio, F., & Armenio, V. (2011). Turbulence around a scoured bridge abutment. *Journal of Turbulence*, 12, 1–24.
<https://doi.org/10.1080/14685248.2010.534797>
- Chow, V. Te, & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- Ju, S. H. (2013). Determination of scoured bridge natural frequencies with soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 247–254.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.015>

- Khwairakpam, P., & Mazumdar, A.** (2009). Local Scour Around Hydraulic Structures. In International Journal of Recent Trends in Engineering (Vol. 1, Issue 6). <https://www.researchgate.net/publication/237472042>
- Malik, A., Singh, S. K., & Kumar, M.** (2021). Experimental analysis of scour under circular pier. Water Science and Technology: Water Supply, 21(1), 422–430. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.318>
- Martínez, Mongil, & del Río.** (2003). Pequeña guía de uso del modelo MODIPE.
- Martín-Vide, J. P., Capape, S., & Ferrer-Boix, C.** (2019). Transient scour and fill. The case of the Pilcomayo River. Journal of Hydrology, 576, 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.041>
- Mehaladevi, P., & Venkatesh, A.** (2020). Scour Around the Bridge Structure-Review. In Article in International Journal of Civil Engineering and Technology. <https://www.researchgate.net/publication/339999269>
- MTC.** (2016). MANUAL DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y DRENAJE. Ministerio de transportes y Comunicaciones.
- Perez, D. R., Yataco Manrique, G., & Hurtado, S. S.** (2020, September 30). Comparative Analysis of the Total Scour in the Pillars and Abutments of a Bridge, between a 1D and 2D Model. 2020 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias En Ingeniería, CONIITI 2020 - Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/CONIITI51147.2020.9240248>

Conflicto de intereses

Las autoras declaran que no existen conflictos de intereses en la realización de esta investigación.

ORCID de los autores

Anthony Ruiz Chipana <https://orcid.org/0009-0009-3346-8703>

Marcos Ruben Gutiérrez Rodríguez <https://orcid.org/0009-0002-2953-9002>

Reymundo Jaulis Palomino <https://orcid.org/0000-0003-1330-2801>