

Alternativas de protección contra socavación del cauce del río chotano en el emplazamiento del puente chota, Cochabamba, Cajamarca

Alternatives for Protection Against Undermining of the Cause of the Chotano River at the Chota Bridge Site, Cochabamba

Ever Manuel Rojas Gonzáles^{1*}  Edwin Núñez Bustamante ^{1*}  Luis Alberto Orbegoso Navarro¹ 

¹Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Ciudad Universitaria Colpamatara, 06120, Chota, Cajamarca, Perú.

*Autor de correspondencia [e-mail: aorbegoso@unach.edu.pe]

RESUMEN

La socavación en el cauce del río chotano, ha impedido la construcción del puente chota, limitando la conectividad entre diversos centros poblados de los distritos de Cochabamba y Cutervo; el objetivo fue determinar la mejor alternativa técnica de protección contra la socavación del cauce del río chotano en el emplazamiento del puente chota; la investigación ha sido aplicada y de nivel descriptivo. Los resultados evidenciaron que la profundidad de socavación para un tiempo de retorno de 500 años alcanza 3.52 m. en condiciones naturales y 3.22 m considerando la interacción con el puente. El diseño de muros de concreto en voladizo, combinado con enrocado, logró reducir la profundidad de socavación hasta 2.30 m, con factores de seguridad superiores a los mínimos requeridos. Por su parte, los gaviones complementados con colchones antisocavantes, alcanzaron profundidades entre 2.77 m y 3.00 m, mostrando también efectividad en la protección. Se concluye que la combinación de alternativas es la solución más eficiente: gaviones en tramos iniciales, muros de concreto con enrocado en tramos críticos y gaviones con colchón antisocavante en tramos finales; se propone que el diseño del puente tenga una luz de 23 m, una altura total del estribo de 11 m., con base de 7.60 m. para garantizar un gálibo mínimo de 1.5 m. por encima del nivel de tirante de agua correspondiente al tiempo de retorno de 140 años.

Palabras clave: Gaviones, muros en voladizo, enrocado en fondo del cauce.

ABSTRACT

The scouring of the Chotano River channel has hindered the construction of the Chota Bridge, limiting connectivity among various population centers in the districts of Cochabamba and Cutervo. The objective of this study was to determine the most suitable technical alternative for protecting against scour in the river channel at the proposed location of the Chota Bridge. The research was applied in nature and descriptive in scope. The results showed that the scour

depth for a return period of 500 years reaches 3.52 m under natural conditions and 3.22 m when considering the interaction with the bridge. The design of cantilevered concrete walls combined with riprap reduced the scour depth to 2.30 m, achieving safety factors above the minimum required. Meanwhile, gabions supplemented with scour-prevention mattresses reached depths between 2.77 m and 3.00 m, also proving effective in protection. It is concluded that the combination of alternatives represents the most efficient solution: gabions in the initial sections, concrete walls with riprap in the critical sections, and gabions with scour-prevention mattresses in the final sections. It is further proposed that the bridge design include a span of 23 m, a total abutment height of 11 m, and a base width of 7.60 m, ensuring a minimum clearance of 1.5 m above the water surface corresponding to the 140-year return period.

Keywords: Gabions, cantilever walls, riprap at riverbed.

INTRODUCCIÓN

Los puentes son las obras de mayor importancia en la construcción de una carretera ya que permiten mantener el flujo continuo de vehículos (Capacci & Biondini, 2020). Sin ellos, cruzar cuerpos de agua, como ríos o quebradas, se vuelve imposible. (Biswas & Banerjee, 2018). Por esta razón, es fundamental prestar especial atención a su diseño hidrológico e hidráulico, poniendo énfasis en aspectos críticos como la profundidad de socavación (Aureli et al., 2021). La socavación en los cauces de los ríos se refiere a la erosión y remoción de los materiales del lecho por la acción del flujo de agua (Príncipe, 2019). Este fenómeno puede clasificarse en socavación general, por contracción o local, siendo esta última la más dañina para los estribos de un puente (Wang et al., 2019). La socavación es uno de los factores que más impacta la estabilidad de puentes y pontones, llegando incluso a provocar su colapso (Rodríguez, 2019). Según, Moya (2017) la mayoría de colapsos de puentes no están relacionados con problemas estructurales, sino con temas hídricos. En Perú, durante la última década,

numerosos puentes y pontones han colapsado debido al aumento del caudal de los ríos y a los efectos de la socavación hidráulica, como lo documentan diversos medios de comunicación, entre ellos RPP (2020), Andina (2019) y TVPerú (2017). En la región de Cajamarca, en el año 2017 seis puentes fueron completamente destruidos y ocho más resultaron seriamente afectados como consecuencia del incremento del flujo de agua, la erosión, la socavación y la sedimentación en los cauces de los ríos. Estos eventos, originados por fuertes precipitaciones pluviales, también dejaron intransitables 916 kilómetros de carreteras (Cabral, 2017). Estas problemas podrían haberse prevenido mediante la implementación de alternativas adecuadas de protección contra la socavación en los cauces fluviales. La Gerencia Sub-Regional de Chota, planteó en el año 2020, la construcción del puente chota, en las cercanías del Centro Poblado Callacate, que une el Valle Callacate con la vía principal de la carretera Chiclayo, Cochabamba, Cutervo, Chota, con el objetivo de mejorar la salida de la

producción agrícola de este valle, hacia los centros de comercialización de la ciudad de Cochabamba y Cutervo. Sin embargo, intensas precipitaciones pluviales de los últimos años, según reportan Andina Radio (2021), el Instituto de Defensa Civil (INDECI, 2023), Municipalidad Distrital de Cochabamba (2023) y Hora trece (2024), han causado graves procesos de erosión y socavación en el cauce del río Chotano, afectando el emplazamiento del puente Chota, deteniendo su construcción. Esta situación ha dejado incomunicadas a diversas comunidades, como Sanicullo Alto, San Juan de la Lianga, Callacate Sahual, La Pauca, Yacancate, Cuguid, y El Rejo, privándolas de una vía de conexión directa entre Cochabamba y el Valle Callacate. En ese contexto el objetivo en este estudio fue analizar alternativas de protección contra la socavación en el cauce del río Chotano.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Ubicación.

El puente Chota se ubica geográficamente en las coordenadas UTM WGS84 17S 733511.32 m E, 9285607.49 m S, a 1639 msnm, distrito de Cochabamba, provincia de Chota, a 1,900 m de la ciudad de Cochabamba, tal como se muestra.

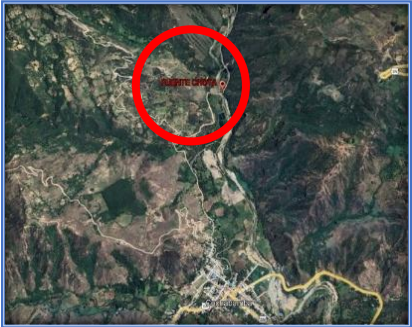


Figura 1. Ubicación del puente chota-vía interna Cochabamba – Cutervo.

Descripción del puente chota.

El puente fue visitado a inicios del año 2024, mostrando las características físicas siguientes:

Tabla 1. Características del puente Chota en distrito de Cochabamba, provincia de Chota.

Características del puente Chota	Detalles
Luz	20.00 m
Vehículo de diseño	HL-93
Carga peatonal	510 kg/cm ²
Ancho de calzada	6.00 m
Veredas	1.10 m x 0.20 m
Ancho total	8.20 m
Apoyos	Un apoyo fijo y un apoyo móvil



Figura 2. Visita y toma de datos básicos en el puente Chota

Coleta de datos.

Topo-batimetría.

Este procedimiento abarcó un tramo de 500 metros aguas arriba y 500 metros

aguas abajo del puente, con la finalidad de obtener mejor información sobre la geometría del cauce y elaborar planos detallados en el software Civil 3D 2022.

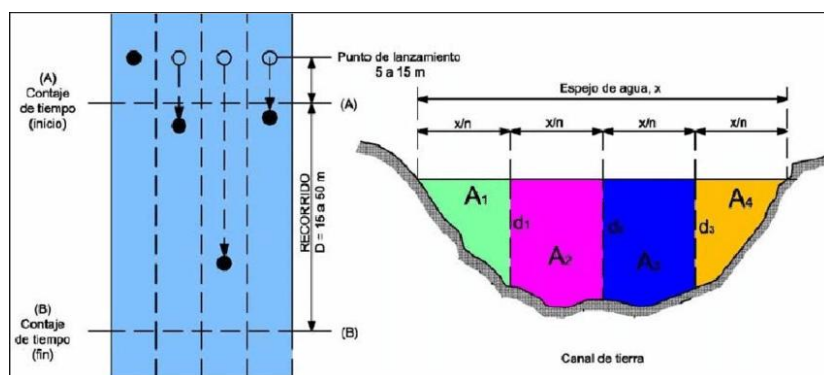


Figura 3. Representación gráfica de toma de puntos transversales.

Mecánica de suelos.

se realizó con el propósito de caracterizar los sedimentos del cauce y del suelo lateral del río Chotano en el emplazamiento del puente Chota.

Se tomaron muestras representativas del lecho y de las márgenes del río, aplicando normativas técnicas específicas como: NTP 339.127 contenido de humedad (INACAL, 2019), NTP 339.128 análisis granulométrico

(INACAL, 2019), NTP 339.129 límites de consistencia (INACAL, 2019) y NTP 339.171 corte directo (INACAL, 2017).

Ubicación de calicatas.

Se seleccionaron cinco (5) puntos representativos: uno aguas arriba y aguas abajo, otro en el emplazamiento del puente y dos (2) en el borde derecho e izquierdo del mismo emplazamiento.

Tabla 2. Calicatas a lo largo del lecho del río Chotano

Calicata	Este (m E)	Norte (m S)	Altura (msnm)
CA-01	733530.925	9285618.471	1635.90
CA-02	733518.176	9285609.219	1635.70
CA-03	733510.889	9285617.399	1635.60

Tabla 3. Calicatas en las márgenes derecha e izquierda del emplazamiento del puente Chota

Calicata	Este (m E)	Norte (m S)	Altura
CA-01	733525.482	9285633.06	1641.00
CA-02	733505.49	9285615.18	1639.85

Ensayos de laboratorio realizados

Se han realizado los siguientes ensayos de laboratorio:

NTP 339.127 Contenido de humedad (INACAL, 2019): Las muestras fueron pesadas antes y después de ser secadas en el horno a una temperatura controlada, determinando el porcentaje de humedad del suelo.

NTP 339.128 Análisis granulométrico (INACAL, 2019): En el laboratorio, las muestras se pasaron a través de un juego de tamices, y se registraron los pesos de los diferentes tamaños de partículas retenidas en cada malla.

NTP 339.129 Límites líquido y plástico (INACAL, 2019): Para el límite líquido, se

utilizó la copa Casagrande, saturando previamente las muestras durante un día. Para el límite plástico, se formaron rollitos de suelo hasta que mostraron quiebres de 3 mm.

NTP 339.171 Corte directo (INACAL, 2017): Las muestras inalteradas fueron colocadas en la caja de corte, donde se aplicó una carga normal y se realizó el corte en condiciones saturadas, siguiendo el protocolo establecido por la NTP 339.171.

Delimitación y parámetros morfométricos de la cuenca tributaria.

Tomando como referencia el puente chota, se delimitó la cuenca en ArcGis 10.8,



Figura 3. Delimitación de la cuenca del río chotano.

Parámetros morfométricos

Tabla 4. Parámetros morfométricos de la cuenca del río chotano.

Parámetros morfométricos	Cuenca del río Chotano
Área (km²)	583.43
Perímetro (km)	185.00
Coeficiente de compacidad	2.145
Altitud media (msnm)	2,697.52
Pendiente de la cuenca (m/m)	0.275
Longitud del máximo recorrido (km)	56.985
Pendiente del cauce principal (m/m)	0.039
Tiempo de concentración (minutos)	721.70
Coeficiente orográfico	0.0125

Estaciones meteorológicas

Dentro de la delimitación de la cuenca del río Chotano, se han encontrado tres estaciones meteorológicas que pertenecen al SENAMHI, utilizando de ellas, precipitaciones mensuales y máximas de 24 horas (Tabla 5).

Tabla 5. Estaciones meteorológicas del SENAMHI en Chota, Cajamarca

Denominación de la estación	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)
	WGS84 17S		
	Este (m E)	Norte (m S)	
Chota	760025.00 m E	9275705.00 m S	2468
Chotano Lajas	750035.00 m E	9274088.00 m S	2463
Cochabamba	733514.00 m E	9285384.00 m S	1653

Los años de información pluviométrica utilizada, ha sido de 43, 38 y de 52 años, respectivamente.

Precipitaciones máximas de 24 horas corregidas según recomendación de la OMM (Tablas 6, 7 y 8).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), recomienda aplicar un factor de amplificación de 1.13 a cada valor de precipitación máxima, debido a que se trata de datos correspondientes a mediciones diarias y no a registros continuos. Se han utilizado data de tres estaciones.

Tabla 6. Precipitaciones máximas registradas en 24 horas en la Estación Chota.

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
1971	50.20	56.73
1972	28.00	31.64
1973	36.60	41.36
1974	30.20	34.13
1975	62.00	70.06
1976	41.00	46.33
1977	34.00	38.42
1978	47.20	53.34
1979	34.80	39.32
1980	30.20	34.13
1981	35.00	39.55
1982	27.50	31.08
1993	32.50	36.73
1994	36.00	40.68

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
1995	28.30	31.98
1996	45.20	51.08
1997	74.30	83.96
1998	48.20	54.47
1999	35.60	40.23
2000	35.90	40.57
2001	47.00	53.11
2002	60.70	68.59
2003	57.00	64.41
2004	38.30	43.28
2005	61.80	69.83
2006	33.70	38.08
2007	59.10	66.78
2008	49.00	55.37
2009	54.20	61.25
2010	31.40	35.48
2011	44.10	49.83
2012	40.20	45.43
2013	46.80	52.88
2014	39.00	44.07
2015	37.80	42.71
2017	41.40	46.78
2018	52.70	59.55
2019	35.80	40.45
2020	38.20	43.17
2021	52.00	58.76
2022	49.60	56.05
2023	39.70	44.86
2024	61.80	69.83

Tabla 7. Precipitaciones máximas registradas en 24 horas en la Estación Chotano – Lajas.

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
1986	38.00	42.94
1987	34.00	38.42
1988	31.20	35.26
1990	43.30	48.93
1991	33.90	38.31
1992	37.80	42.71
1993	25.80	29.15
1994	31.80	35.93
1995	38.10	43.05
1996	31.10	35.14
1997	48.30	54.58
1998	69.10	78.08
1999	53.30	60.23
2000	35.40	40.00
2001	42.50	48.03
2002	39.50	44.64
2003	32.60	36.84
2004	43.30	48.93
2005	37.50	42.38
2006	42.40	47.91
2007	41.20	46.56
2008	49.00	55.37
2009	54.10	61.13
2010	57.70	65.20
2011	28.80	32.54
2012	48.50	54.81
2013	50.40	56.95
2014	40.00	45.20
2015	41.10	46.44
2016	37.50	42.38
2017	41.80	47.23
2018	46.50	52.55
2019	48.80	55.14
2020	59.50	67.24

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
2021	57.70	65.20
2022	51.00	57.63
2023	44.60	50.40

Tabla 8. Precipitaciones máximas registradas en 24 horas en la Estación Cochabamba.

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
1969	61.00	68.93
1970	31.00	35.03
1971	72.00	81.36
1972	34.00	38.42
1973	38.50	43.51
1974	60.00	67.80
1975	54.00	61.02
1976	43.00	48.59
1977	43.00	48.59
1978	29.00	32.77
1979	47.00	53.11
1980	39.00	44.07
1981	49.00	55.37
1982	40.00	45.20
1983	28.00	31.64
1987	35.00	39.55
1988	102.00	115.26
1989	67.20	75.94
1990	45.00	50.85
1991	34.00	38.42
1992	58.00	65.54
1993	48.60	54.92
1994	60.00	67.80

Factor de corrección		1.13
Año	PPmax 24 horas histórico	PPmax 24 horas corregido
1995	41.00	46.33
1996	83.00	93.79
1997	50.50	57.07
1998	45.00	50.85
1999	71.40	80.68
2000	83.00	93.79
2001	80.20	90.63
2002	80.50	90.97
2003	53.00	59.89
2004	46.70	52.77
2005	35.10	39.66
2006	42.60	48.14
2007	60.60	68.48
2008	102.20	115.49
2009	55.80	63.05
2010	82.20	92.89
2011	49.20	55.60
2012	74.40	84.07
2013	59.50	67.24
2014	42.40	47.91
2015	66.40	75.03
2016	51.50	58.20
2017	34.80	39.32
2018	44.20	49.95
2019	49.70	56.16
2022	36.40	41.13
2023	56.40	63.73

Prueba de bondad de ajuste Smirnov Kolmogorov

La data de cada estación meteorológica, ha sido sometido al análisis de frecuencias a través del análisis estadístico de la prueba

de bondad de ajuste de Smirnov Kolmogorov, utilizando el software HidroEsta v.2.0, escogiéndose para cada una de ellas, la función que menor valor calculado tiene respecto al teórico.

$$D = \max |Fo(xm) - F(xm)|$$

$$Fo(xm) = 1 - \frac{m}{n+1}$$

Donde:

Fo(xm) = probabilidad observada

F(xm) = probabilidad estimada o teórica

Caudales máximos en HEC – HMS.

A través del software HEC – HMS v 4.12, se han generado caudales máximos para períodos de retorno de 50, 140 y 500 años. El procedimiento incluyó el uso del método de pérdidas “Loss Method”: Curva Número (CN), en condiciones de humedad de la cuenca, seguido del método de transformación “SCS Unit Hydrograph” para convertir precipitación en escorrentía y obtener hidrogramas sintéticos.

Modelamiento hidráulico del puente chota.

Se llevará a cabo utilizando factores críticos de diseño como la longitud de contracción y expansión, así como el efecto del puente sobre el flujo. Se utilizará el software HEC RAS v 6.6.

Socavación general del lecho del cauce.

Para estimar la socavación general del cauce del río, se ha utilizado el criterio de Lischvan – Levediev. Este método asume que, el caudal y el ancho de la sección del río permanecen constantes durante el proceso erosivo. Los parámetros necesarios para su aplicación según el manual del MTC (2018) incluyen determinar el caudal

máximo, características de los sedimentos del lecho del río, perfil topográfico de las secciones del río, para poder aplicar:

$$Hs = \left[\frac{\alpha h^{5/3}}{0.60 \beta \mu \phi \gamma_s^{1.18}} \right]^{\frac{1}{1+x}}$$

Dónde:

Hs: profundidad de socavación (m)

H: tirante de agua (m).

γ : peso específico del sedimento T/m³.

β : coeficiente de frecuencia.

u: factor de contracción del cauce.

ϕ : factor de corrección por forma de transporte de sedimentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sedimentos fluviales identificados en calicatas.

El suelo de la calicata CA-01 corresponde a un suelo arcilloso de alta plasticidad con capacidad de carga admisible de 0.86 kg/cm² planteado para cimentación rectangular (zapatas) de 1.2 m de profundidad, mientras que, el suelo de la calicata CA-02 corresponde a un suelo limo arcilloso de baja plasticidad con capacidad de carga admisible de 1.49 kg/cm² para cimentación circular de 1.8 m de profundidad (Tabla 9 y 10). Así mismo, para cada uno de ellos se describe el perfil litológico encontrado, hasta una profundidad de 3.00 m (Figuras 4 y 5).

Tabla 9. Características físicas del sedimento fluvial en calicatas a lo largo del cauce del río.

	CA-01	CA-02	CA-03
Bolonería	0%	0%	0%
Grava	58.25%	55.68%	57.73%
Arena	38.45%	41.12%	38.92%
A. gruesa	8.58%	8.92%	8.23%
A. media	11.08%	11.62%	11.42%
A. fina	18.78%	20.58%	19.26%
Finos < N° 200	3.29%	3.19%	3.35%

Tabla 10. Características físicas – mecánicas en calicatas del borde del cauce del emplazamiento del puente.

	CA-01	CA-02
Humedad (%)	8.53	6.56
LL (%)	33.11	28.72
LP (%)	21.00	22.05
IP (%)	12.11	6.67
Clasificación (SUCS)	CL	CL-ML
Peso volumétrico natural (g/cm ³)	1.960	2.055
Cohesión (kg/cm ²)	0.301	0.112
Ángulo de fricción (°)	15.04	33.09
Profundidad de cimentación (m)	1.20	1.80
Ancho de cimentación (m)	1.20	1.50
Factor de seguridad	3.00	3.00
Capacidad de carga admisible (kg/cm ²)	0.86	1.49

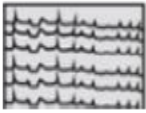
Profundidad (m)		Muestra	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN		Contenido de humedad	Limites de consistencia	
				Símbolo	Símbolo gráfico		L.L (%)	L.P (%)
0.40	0.10	S/M	Material orgánico de color maron , con bajo contenido de humedad y bajo humedad y bajo grado de compacidad.					
	0.20							
	0.30							
	0.40							
3.00	0.50	C-1	Estracto clasificado en el sistema"SUCS" Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	CL		8.53%	33.11	21.00
	0.60							
	0.70							
	0.80							
	0.90							
	1.00							
	1.10							
	1.20							
	1.30							
	2.80							
	3.00						IP	12.11

Figura 4. Perfil estratigráfico de la CA-01

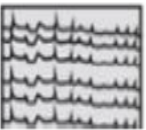
Profundidad (m)		Muestra	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN		Contenido de humedad	Limites de consistencia	
				Símbolo	Símbolo gráfico		L.L (%)	L.P (%)
0.40	0.10	S/M	Material orgánico de color maron , con bajo contenido de humedad y bajo humedad y bajo grado de compacidad.					
	0.20							
	0.30							
	0.40							
3.00	0.50	C-02	Estracto clasificado en el sistema"SUCS" Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos límpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plásticidad.	CL- ML		6.56%	28.72	22.05
	0.60							
	0.70							
	0.80							
	0.90							
	1.00							
	1.10							
	1.20							
	1.30							
	2.80							
	3.00						IP	6.67

Figura 5. Perfil estratigráfico de la CA-02

Distribución de probabilidad según prueba de bondad de ajuste.

Para cada estación meteorológica, la data de precipitaciones máximas de 24 horas, se

han ajustado a la mejor función de probabilidad, a partir de la cual se han estimado los caudales máximos (Tabla 13).

Tabla 13. Funciones de probabilidad a la que se ajustan los datos de las PP máximas 24 horas.

Estación	Distribución teórica de probabilidad	Estimación de Parámetros		
		Δ teórica	Δ tabular	¿se ajustan los datos?
Chota	Log-Pearson-Tipo III	0.0656	0.2074	SI
Chotano -Lajas	Gamma generalizada (3 Parámetros)	0.0529	0.2236	SI
Cochabamba	Log Normal 3 Parámetros	0.0511	0.1923	SI

Caudales máximos calculados y utilizados en el modelado de la socavación del puente chota (Tabla 14).

Mediante software HEC HMS v 6.6, se han estimado caudales máximos para distintos

períodos de retorno: 50, 140 y 500 años, conforme al Manual del MTC (2018), data que será utilizada para el modelamiento del puente, así como se presenta el hidrograma para $T_r = 500$ años (Figura 6).

Tabla 14. Caudales máximos obtenidos mediante HEC HMS, para diferentes tiempos de retorno para la cuenca del río chotano.

Periodo de retorno (Tr) años	Caudal máximo (m ³ /s)
50	428.40
140	520.50
500	640.50

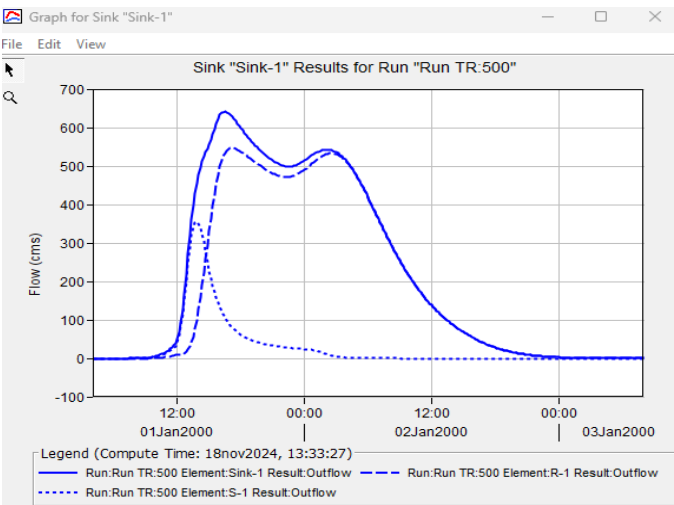


Figura 6. Hidrograma asociado al Tr= 500 años-cuenca río Chotano.

Socavación del cauce del río chotano en el emplazamiento del puente chota

La socavación calculada para un tiempo de retorno de 500 años, tanto condiciones naturales del cauce del río chotano como con su interacción con el puente, son de 3.52 y 3.22

m, respectivamente (Tabla 15); observándose que la profundidad disminuye ligeramente cuando se incluye el puente, lo que refleja un cambio en el flujo hidráulico y la capacidad de erosión del río, pero que, en ambos casos, compromete la estabilidad del puente (Figuras 7, 8).

Tabla 15. Socavación del cauce del río chotano, según Lischtván Levediev para Tr 500 años

Parámetros hidráulicos para determinar la profundidad de socavación	En el cauce natural	Con la interacción del puente
Sección Transversal	1020	1023.8
Caudal Q (m ³ /s)	640.5	640.5
h (m)	5.82	6.35
Ancho B (m)	24.36	23.04
Área hidráulica A (m ²)	114.96	122.54
Velocidad V (m/s)	3.79	3.97
Diámetro medio Dm (mm)	9	0
Luz (mínima para μ)	22	22
Tiempo de Retorno	500	500
Peso específico (agua más sedimentos Tn/m ³)	1.05	1.05
μ	0.93	0.93
α	1.5	1.4
β	1.06	1.06
φ	1.05	1.05
z	0.35	0.34
Hs (m)	9.34	9.57
Prof. Socav. (ds) (m)	3.52	3.22

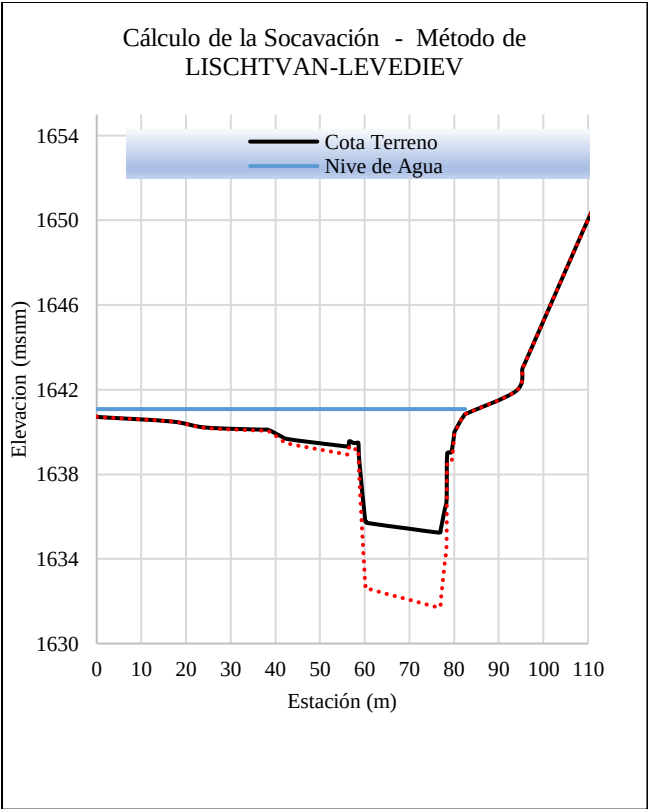


Figura 7. Socavación en el cauce natural

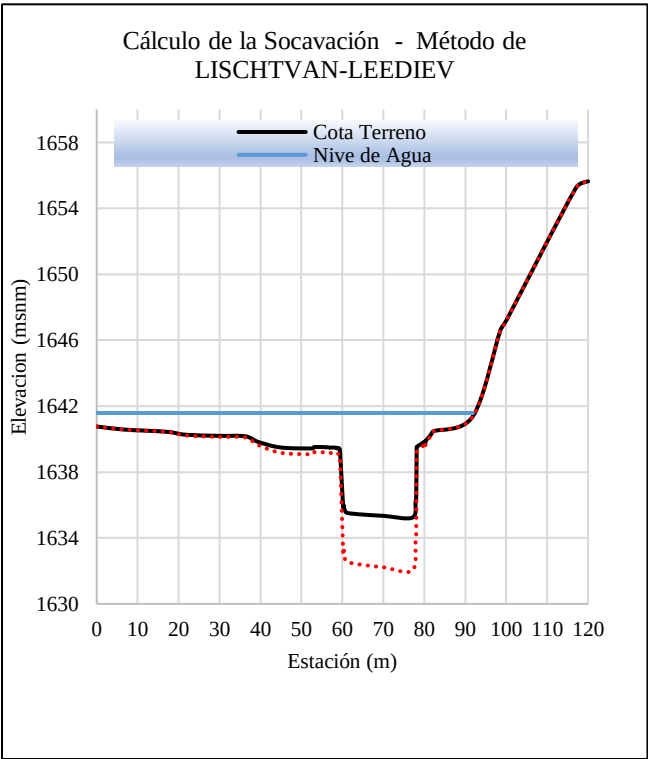


Figura 8. Socavación cauce natural-puente chota.

Niveles de agua y velocidades para diferentes tiempos de retorno.

Las Tabla 16 y 17, muestran niveles, velocidades y número de Froude de agua que se llegarían considerando tiempos de retorno de 140 y 500 años, tanto aguas arriba como aguas abajo del emplazamiento del puente chota. Para $Tr=140$ años, aguas arriba como abajo, los

niveles llegarían a 6.00 y 4.60 m., respectivamente; para $Tr= 500$ años, aguas arriba como abajo, los niveles llegarían a 7.00 y 4.60 m., respectivamente. En ambos períodos, el flujo se mantendría como subcrítico, a excepción del 1+800 Km, que presenta una condición de flujo crítico que no afectaría mayormente a la estructura, puesto que esta tiende a disiparse en su recorrido.

Tabla 16. Niveles de agua, velocidad y Foude aguas abajo para $Tr=140$ y 500 años

Aguas abajo		Altura del nivel de agua (HT)		Velocidad (m/s)	Froude
		Tr 140	Tr 500		
km	0 + 800	4.00	4.00	4.00	0.62
km	0 + 820	4.12	4.12	4.12	0.61
km	0 + 840	4.00	4.00	4.00	0.60
km	0 + 860	3.60	3.60	3.60	0.50
km	0 + 880	4.30	4.30	4.30	0.60
km	0 + 860	4.25	4.25	4.25	0.60
km	0 + 900	4.60	4.60	4.60	0.65
km	0 + 920	4.15	4.15	4.10	0.62
km	0 + 940	3.00	3.10	3.10	0.54
km	0 + 096	2.80	3.10	3.10	0.53
km	0 + 980	2.80	3.00	3.00	0.52
km	1 + 000	3.00	3.00	3.00	0.52
km	1 + 012	3.60	4.10	4.10	0.64

Tabla 17. Niveles de agua, velocidad y Froude aguas arriba para Tr=140 y 500 años.

Aguas arriba		Altura del nivel de agua en m (HT)		Velocidad (m/s)	Froude
		Tr 140	Tr 500		
km	1 + 026.8	6.00	7.00	3.87	0.52
km	1 + 040.0	5.80	6.68	3.74	0.51
km	1 + 060.0	5.40	6.32	3.71	0.53
km	1 + 080.0	5.00	5.90	3.78	0.55
km	1 + 100.0	4.80	5.67	3.22	0.47
km	1 + 120.0	4.50	5.37	3.19	0.49
km	1 + 140.0	4.40	5.28	3.57	0.57
km	1 + 160.0	4.30	5.22	4.14	0.68
km	1 + 180.0	4.30	5.08	6.95	1.43

**Alternativa de protección del
emplazamiento del puente Chota
mediante muros de concreto, aguas abajo
y arriba.**

En la Tabla 18, aguas abajo, se propone muros de contención de concreto de una altura media de 5.00 m. a lo largo del cauce

del río chotano; en la Tabla 19, aguas arriba, se proponen alturas por tramos entre los kilómetros 1+023.80 – 1+026.80, 1+040 – 1+060, 1+080 – 1+100 y 1+120 – 1+180, de 6.00, 5.80 y 5.00 m., respectivamente.

Tabla 18. Propuesta de muros en voladizo aguas abajo

Aguas abajo		Altura del nivel de agua (HT)	Sección del muro	Altura del muro (m)
km	0 + 800	4.00		
km	0 + 820	4.12		
km	0 + 840	4.00		
km	0 + 860	3.60	Km	
km	0 + 880	4.30	0+800	5.00

km	0 +	4.25	- km
	860		1+012
km	0 +	4.60	
	900		
km	0 +	4.15	
	920		
km	0 +	3.00	
	940		
km	0 +	2.80	
	096		
km	0 +	2.80	
	980		
km	1 +	3.00	
	000		
km	1 +	3.60	
	012		

Tabla 19. Propuesta de muros en voladizo aguas arriba.

	Aguas arriba	Altura del nivel de agua (HT)	Sección del muro	Altura del muro (m)
km	1 + 026.8	6.00	1+023.80 - 1+026.80	6.00
km	1 + 040.0	5.80	1+040-1+060	5.80
km	1 + 060.0	5.40		
km	1 + 080.0	5.00	1+080-1+100	5.00
km	1 + 100.0	4.80		
km	1 + 120.0	4.50	1+120-1+180	4.50
km	1 + 140.0	4.40		
km	1 + 160.0	4.30		
km	1 + 180.0	4.30		

De igual manera, para afianzar los diseños y, considerando todo el tramo del emplazamiento del puente chota, la Tabla 20, representa el Pre-dimensionamiento del muro en Voladizo indicando las profundidades de las zapatas (Figura 9); la Tabla 21 considera la socavación que se esperaría si no se tienen enrocado, la que

llegaría hasta 4.9 y 3.5 m. en dos tramos críticos; esta última condición, permite proponer una mejora, es decir, en la Tabla 22, se hace la propuesta de enrocado en el fondo del cauce, logrando reducir la socavación hasta en 80 cm aproximadamente, lo que permite rediseñar los cálculos de socavación sólo en

los tramos que lo requieran y los resultados son satisfactorios, ya que se logra reducir esta hasta 2.60 y 2.40 m., respectivamente

Tabla 20. Pre-dimensionamiento del muro en voladizo en el emplazamiento del puente chota

Dimensiones	0+800- 1+012	1+023.80- 1+026.8	1+040- 1+060	1+080- 1+100	1+120- 1+180
Tirante de agua (m)	5	6	5.80	5	4.5
Borde libre (m)	0.40	0.5	0.50	0.5	0.5
Espesor superior (m)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.4
Altura (m)	8.50	9.50	9.30	8.50	7.6
Base (m)	4.80	5.40	5.20	4.80	4.30
Punta (m)	1.10	1.30	1.30	1.10	1.00
Espesor (m)	1.10	1.20	1.20	1.10	0.90
Talón (m)	2.60	2.90	2.70	2.60	2.40
Profundidad de zapata (m)	1.10	1.30	1.30	1.10	1.00

Tabla 21. Socavación del muro en voladizo sin enrocado en el fondo del cauce.

Parámetros hidráulicos	0+800- 1+012	1+023.80- 1+026.8	1+040- 1+060	1+080- 1+100	1+120- 1+180
Tr	500	500	500	500.00	500
Q (m ³ /s)	640.50	640.5	640.5	640.5	640.50
h (m)	5.00	7.0	6.7	5.90	5.40
Be(m)	33.60	20.3	24.5	30.10	34.50
γd	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
Co. Contracción (μ)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
φ	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
α	1.30	1.2	1.1	1.1	1.12
β	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05

x	0.28	0.28	0.28	0.28	0.275
Hs (m)	7.77	11.56	9.98	8.48	7.62
Prof. Socav. (ds) (m)	2.77	4.56	3.28	2.58	2.22
Altura de seguridad (m)	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40
Profundidad de socavación (m)	3.10	4.90	3.60	3.00	2.60

Tabla 22. Socavación en el fondo del cauce con propuesta de enrocado.

Parámetros hidráulicos	Valor
Tr	500
Q (m ³ /s)	1069.1
h (m)	8.0
Be(m)	27.0
Dm (mm)	82.0
Co. Contracción (μ)	1.0
μ	1.0
α	1.2
β	1.05
x	0.28
Hs (m)	8.79
Prof. Socav. (ds) (m)	0.79

Tabla 23. Socavación del muro en voladizo con enrocado en el fondo del cauce (sólo en los tramos críticos).

Parámetros hidráulicos	0+800- 1+012	1+023.80- 1+026.8	1+040- 1+060	1+080- 1+100	1+120- 1+180
Tr	500	500	500	500	500
Q (m ³ /s)	640.5	640.5	640.5	640.5	640.50
h (m)	6.7	6.7	6.7	5.90	5.40
Be(m)	20.3	20.3	24.5	30.10	34.50
Dm (mm)	30.0	30	15		
Co.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Contracción (μ)					
φ	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
α	1.3	1.3	1.1	1.1	1.12
β	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05

x	0.31	0.31	0.33	0.28	0.275
Hs (m)	8.71	8.71	8.47	8.48	7.62
Prof. Socav.	2.01	2.01	1.77	2.58	2.22
(ds) (m)					
Altura de seguridad (m)	0.30	0.60	0.60	0.40	0.40
Profundidad de socavación (m)	2.30	2.60	2.40	3.00	2.60

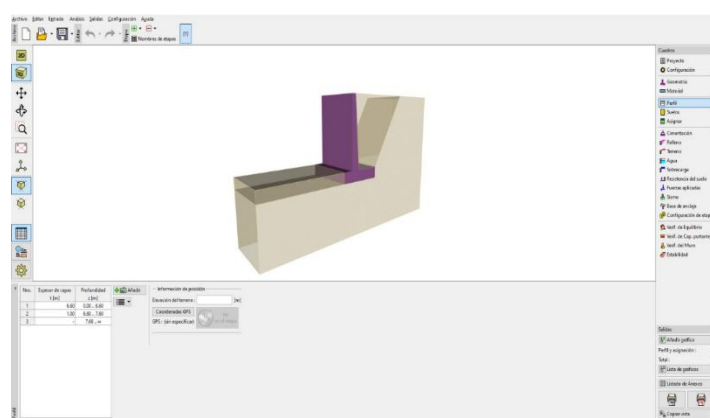


Figura 9. Propuesta de muro en voladizo.

Alternativa de protección del emplazamiento del puente Chota mediante gaviones, aguas abajo y arriba.

Del análisis de la data consignada en la Tabla 23, se especifica que, los gaviones presentan alturas de 5.50 m, 6.00 m, 6.50 m, 5.50 m y 5.00 m, respectivamente. Además, cuentan con colchones antisocavantes cuya longitud varía entre 4.20 m, 7.00 m, 5.00 m, 4.00 m y 3.50 m, según el tramo, y espesores que oscilan entre 0.40 m y 0.50 m. Las profundidades

de socavación correspondientes para estos tramos son de 2.77 m, 3.50 m, 3.50 m, 3.00 m y 3.00 m, garantizando así una adecuada protección del cauce frente a la erosión.

En la Tabla 24, se define que en todos los tramos se garantiza técnicamente, que, los gaviones presentan factores de seguridad frente al deslizamiento, volteo y seguridad global, según los tramos establecidos.

Tabla 23. Pre-dimensionamiento de gaviones, según tramos del emplazamiento del puente chota.

Dimensiones	0+800- 1+012	1+023.80- 1+026.8	1+040- 1+060	1+080- 1+100	1+120- 1+180
-------------	-----------------	----------------------	-----------------	-----------------	-----------------

Borde libre (m)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Altura de gavión (m)	5.50	6.00	6.50	5.50	5.00
Ancho de la base	3.00	3.50	3.50	3.00	3.00
Profundidad de socavación (m)	2.77	4.56	3.28	2.58	2.22
Longitud de colchón antisocavante (m)	4.20	7.00	5.00	4.00	3.50
Diámetro medio de roca (m)	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10
Espesor del colchón antisocavante (m)	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50

Tabla 24. Análisis de estabilidad de los gaviones

Factor de seguridad	0+800-1+012	1+023.80-1+026.8	1+040-1+060	1+080-1+100	1+120-1+180
Altura (m)	5.50	6.00	6.50	5.50	5.00
Deslizamiento (> 1.5)	3.32	1.67	4.39	4.25	3.25
Volteo (> 2.00)	11.12	5.66	1.58	1.68	10.13
FS tensión en la base izquierda	62.98	60.77	252.65	164.25	55.54
FS tensión en la base derecha			23.21	23.57	

FS global	2.42	1.69	1.58	1.63	2.36
-----------	------	------	------	------	------

Comparación de las alternativas de protección.

Considerando el tiempo de retorno de 140 años, como lo más propenso, se observa en la Tabla 25, que, respecto a los niveles de

agua, lo mejor, resultan ser los muros en voladizo; en cuanto a los gaviones, se detectan algunos inconvenientes en los tramos 1+023.8 al 1+026.80 y en el 1+040 al 1+060.

Tabla 25. Niveles de agua en cauce natural frente a alternativas técnicas.

Nivel de agua Tr 140 años (m)	0+800-1+012	1+023.80-1+026.8	1+040-1+060	1+080-1+100	1+120-1+180
En el lecho natural (m)	5.00	6.00	5.80	5.00	4.5
Altura del muro voladizo (m)	8.50	9.50	9.30	8.50	7.6
Altura del gavión (m)	5.50	6.00	6.50	5.50	5.00

En función a la socavación de protección de cada alternativa, en la Tabla 26, se puede rescatar, que, la mejor alternativa es el muro de contención con enrocado, pues este

protege mejor a los tramos críticos (1+023.8 al 1+026.80 y en el 1+040 al 1+060) de la alternativa con gaviones.

Tabla 26. Análisis de socavación con alternativas técnicas.

Profundidad de socavación Tr 500 años (m)	0+800-1+012	1+023.80-1+026.8	1+040-1+060	1+080-1+100	1+120-1+180
En el lecho natural (m)	3.52	3.22	3.22	3.52	3.52
Con muro de contención (m)	3.10	4.90	3.60	3.00	2.60
Con muro de contención +	2.30	2.60	2.40	3.00	2.60

enrocado en

el fondo (m)

Con gavión	2.77	4.56	3.28	2.58	2.22
------------	------	------	------	------	------

Finalmente, haciendo una comparación de eficiencias entre estas alternativas, se llega a la conclusión que una combinación de estas, por tramos preestablecidos, sería la mejor alternativa, tal como se expone en la Tabla 27.

Tabla 27. comparación de eficiencias entre estas alternativas de protección.

	0+800- 1+012	1+023.80-1+026.8	1+040-1+060	1+080- 1+100	1+120- 1+180
Propuesta seleccionada	Gavión	Muro de contención con enrocado en el fondo	Muro de contención con enrocado en el fondo	Gavión	Gavión
Socavación (m)	2.77	2.6	2.4	2.58	2.22
Eficiencia en la reducción de socavación (%)	21.31%	19.25%	25.47%	26.70%	36.93%

Dimensionamiento del puente chota.

Después del análisis de estas alternativas, el dimensionamiento del puente Chota tendría una luz de 23 m., una altura del tablero de 1641.6 m para asegurar un gálibo adecuado, evitando posibles obstrucciones durante eventos de crecida. Este ajuste se basó en el cálculo de la altura del tirante del agua, que para un tiempo de retorno (TR)

de 140 años resultó ser de 1640.09 m (Tabla 28). A este valor se añadió un gálibo mínimo de 1.5 m, obteniendo una altura bajo el tablero de 1641.59 m, redondeada a 1641.60 m. La altura total del estribo se definió en 11 m, con una base de 7.60 m (para detalles adicionales sobre las dimensiones del estribo, ver Figuras 10 y 11).

Tabla 28. Dimensionamiento del puente choto.

Parámetro	Valor
Luz libre del puente (m)	23
Concreto $f'c$ 280 kg/cm ²	280
Número de carriles	1
Ancho de calzada (m)	3.30
Separación entre vigas (m)	3.00
Vigas	0.65 m x 1.70 m
Losa (m)	0.20
Número de diafragmas	4
Vigas diafragmadas	0.30 m x 1.40 m

Altura del estribo (m)	11
Base del estribo (m)	7.60

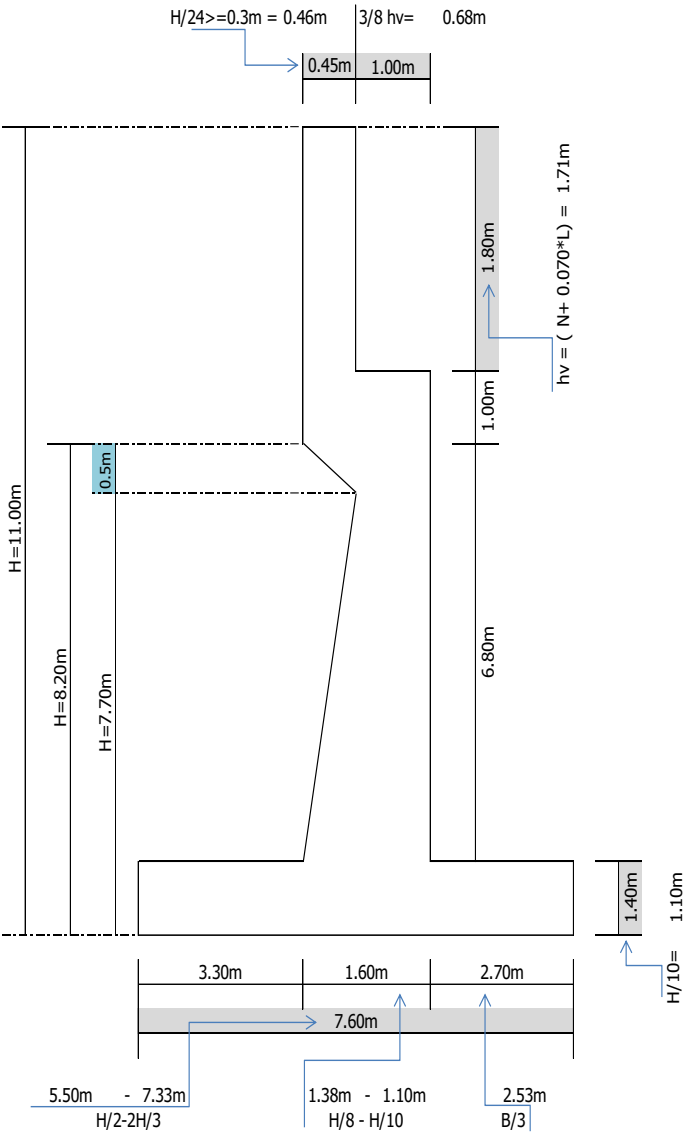


Figura 10. Pre-dimensionamiento del estribo.

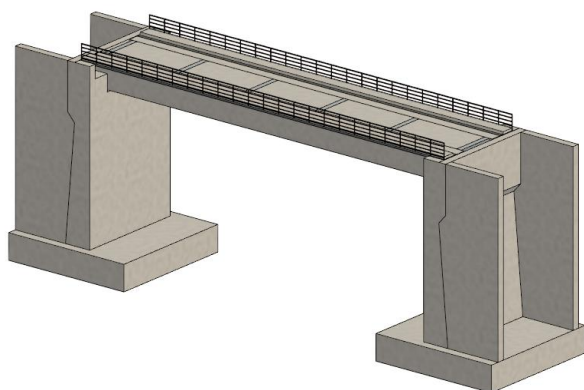


Figura 11. Vista 3D del puente chota

Conclusiones

La mejor alternativa corresponde a una combinación de técnicas de gaviones y muros de contención o voladizo.

Se propone un puente con luz de 23 m., una altura total del estribo de 11 m., con base de 7.60 m. para garantizar un gálibo mínimo de 1.5 m. por encima del nivel de tirante de agua correspondiente al tiempo de retorno de 140 años.

Financiamiento

Las autoras no recibieron financiamiento para la ejecución de la investigación.

Conflictos de intereses

No existe ningún tipo de interés con los contenidos del artículo científico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aureli, F., Mignosa, P., Prost, F., & Dazzi, S. (2021). Hydrological and Hydraulic Flood Hazard Modeling in Poorly Gauged Catchments: An Analysis in Northern Italy. *Hydrology*, 8(4), 149. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology8040149>
- Biswas, M., & Banerjee, P. (2018). Bridge construction and river channel

morphology— A comprehensive study of flow behavior and sediment size alteration of the River Chel, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(16), 1-23. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-018-3789-7>

- Capacci, L., & Biondini, F. (2020). Probabilistic life-cycle seismic resilience assessment of aging bridge networks considering infrastructure upgrading. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 659-675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1716258>

Cabral, E. (20 de marzo de 2017). Las terribles cifras del Niño costero. *Ojo Público*. <https://ojo-publico.com/401/las-terribles-cifras-del-nino-costero-nivel-nacional>

Hora Trece. (03 de octubre de 2024). *Cochabamba, Chota, Cajamarca ¿Queríamos lluvia? Torrencial lluvia sorprende a población de Cochabamba en la provincia de Chota*. Hora Trece: <https://web.facebook.com/watch/?v=1247458750034875>

- INDECI. (2023). *Reporte complementario N° 2571 - 9/3/2023/COEN - INDECI/ 18:40 Horas (Reporte N° 1). Inundación por desborde río en el distrito de Cochabamba*. Instituto de Defensa Civil (INDECI).
- Moya , V. (21 de marzo de 2017). Colapso puente en Perú importancia de socavación hidráulica. *iagua*. <https://n9.cl/0mek>
- Municipalidad Distrital de Cochabamba. (09 de marzo de 2023). *La Municipalidad Distrital de Cochabamba inicia trabajos de protección en el puente de Santa Isolina Bajo*. Gobierno del Perú: <https://www.gob.pe/institucion/municipalidad-distrital-de-cochabamba-inicia-trabajos-de-proteccion-en-el-puente-de-santa-isolina-bajo>
- MTC. (2018). *Manual de Puentes*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUAL%20DE%20PUENTES%20PDF.pdf
- Príncipe, J. C. (2019). *Evaluación de los puentes con socavación ubicados en la provincia de Yungay- Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad San Pedro]. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/11382>
- Rodríguez, J. (2019). *Socavación en lechos de ríos y fondos marinos*. [Trabajo de maestría, Universidad de Sevilla].
- RPP. (8 de febrero de 2020). Puente Victoria colapsa ante la vista de los habitantes por crecida del río en Junín [VIDEO]. *RPP*. <https://rpp.pe/peru/junin/junin-puente-victoria-colapsa-ante-la-vista-de-los-habitantes-por-crecida-del-río-tarma-video-noticia-1244530#:~:text=El%20puente%20Victoria%2C%20en%20el,registrado%20heridos%2C%20solo%20da%C3%B1os%20materiales>
- TvPerú noticias. (16 de marzo de 2017). Puente Solidaridad colapsó ante crecida del río Rímac. *TvPerú noticias*. <https://www.tvperu.gob.pe/noticias/locales/puente-solidaridad-colapso-ante-crecida-del-río-rimac>
- Wang, S., Wei, K., Shen, Z., & Xiang, Q. (2019). Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars. *Water*, 11(7), 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w11071515>.

Contribución de autoría

1. Neysi Ever Manuel Rojas Gonzáles: Concepción y elaboración del manuscrito.
2. Edwin Núñez Bustamante: Concepción y elaboración del manuscrito.
3. Luis Alberto Orbegoso Navarro: Análisis de datos

Recibido: 10-06-2025 Aceptado: 7-08-2025 Publicado:8-08-2025