



Análisis hidráulico de la socavación en puentes: Caso de estudio puente Arturo Sandez en Girón, Ecuador.

Hydraulic analysis of scour in bridges: Case study of Arturo Sandez bridge in Girón, Ecuador.

Leonardo Fernández Galarza ¹, José Alarcón Loor ², Jimmy Reyes Zambrano³

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, leo_f32@hotmail.com

² Pontificia Universidad Católica del Ecuador, jralarcon@pucesm.edu.ec

³ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, jlreyesz@pucesm.edu.ec

Received: 17/02/2025 | Accepted: 08/04/2025 | Publication date: 03/05/2025

DOI:<https://doi.org/10.20868/abe.2025.1.5452>

TITULARES

- Modelos Hidrológicos en HEC-HMS para la evaluación y segmentación de subcuencas vulnerables.
- Simulación Hidráulica en HEC-RAS para evaluar calados críticos en escenarios de diseño.
- Análisis CFD en ANSYS para determinar zonas de socavación crítica en infraestructuras de puentes.

HIGHLIGHTS

- Hydrological Models in HEC-HMS for the Evaluation and Segmentation of Vulnerable Sub-Basins.
- Hydraulic simulation in HEC-RAS to evaluate critical drafts in design scenarios.
- CFD analysis in ANSYS to determine critical scour zones in bridge infrastructure.

RESUMEN

Los efectos de daño a la infraestructura de un puente debido a la socavación pueden generar el desplome de estructuras, como se evidenció en el colapso del puente de la calle Arturo Sandez en Ecuador. El objetivo del estudio es analizar los efectos de la socavación en la infraestructura del puente y proponer medidas correctivas para prevenir colapsos. Mediante la combinación de modelización hidrológica, hidráulica y de interacción agua-estructura. A través de un RTK (Real-Time Kinematic), se logró una topografía a detalle esencial para predecir cambios geomorfológicos, a su vez el análisis hidrológico de la cuenca se subdividió en 5 subcuencas que fue simulado por el programa HEC-HMS. Para el estudio hidráulico se modeló en el software HEC-RAS se obtuvo un calado de 4.18 metros considerando un caudal de modelación de 76.90 m³/s en un escenario de 50 años. Para la interacción agua – estructura se realizó en el programa ANSYS CFD mediante volúmenes finitos, donde se determinó las zonas que fueron más afectadas por los efectos de la socavación sobre la infraestructura. Este artículo evidencia la importancia de la modelación numérica integrada para mitigar el riesgo de colapso de puentes en áreas vulnerables a la socavación fluvial y facilitado la implementación de las acciones correctivas con un modelo matemático como herramienta preventiva en la gestión de infraestructuras.

Palabras clave: *Modelación, geomorfológicos, puente, socavación, caudal, interacción agua – estructura, Ansys Cfd.*

ABSTRACT

The effects of damage to bridge infrastructure due to scour can lead to the collapse of structures, as evidenced by the collapse of the Arturo Sandez Street bridge in Ecuador. The objective of the study is to analyze the effects of scour on bridge infrastructure and propose corrective measures to prevent collapses. By combining hydrological, hydraulic and water-structure interaction modeling. Through a RTK (Real-Time Kinematic), a detailed topography essential for predicting geomorphological changes was achieved. In turn, the hydrological analysis of the basin was subdivided into 5 sub-basins that were simulated by the HEC-HMS program. For the hydraulic study, a depth of 4.18 meters was modeled in the HEC-RAS software, considering a modeling flow of 76.90 m³/s in a 50-year scenario. For the water-structure interaction, the ANSYS CFD program was used using finite volumes, where the areas that were most affected by the effects of scour on the infrastructure were determined. This article demonstrates the importance of integrated numerical modeling to mitigate the risk of bridge collapse in areas vulnerable to fluvial scour and facilitates the implementation of corrective actions with a mathematical model as a preventive tool in infrastructure management.

Keywords: *Modeling, geomorphologic, bridge, scour, flow, water-structure interaction, Ansys Cfd.*

1 INTRODUCCIÓN

Los colapsos de puentes suelen conllevar múltiples consecuencias, algunas de las cuales pueden ser catastróficas, la incomunicación de ciudades e incluso la pérdida de vidas (1,2). La investigación sobre el colapso de puentes en Estados Unidos señala que las causas relacionadas con factores hidráulicos son significativas. Estos factores incluyen la erosión de los sedimentos que rodean las cimentaciones

de los puentes, un fenómeno conocido como socavación, que se ha vuelto cada vez más preocupante (3). En Ecuador, la topografía se caracteriza principalmente por la presencia de altas montañas y ríos caudalosos, un estudio sobre el colapso de 72 puentes entre los años (2000-2022) se determinó que los fenómenos naturales, como las crecidas de ríos, socavaciones, avalanchas y sismos, son responsables del 50% del cual el 46% es por socavación y crecidas de ríos, así como

tenemos el colapso del puente Quimis y del puente Upano.

El otro 50% se atribuye a factores antrópicos, que incluyen colapsos debido a deficiencias en el diseño y la estructura, problemas en la construcción, sobrecargas, impactos y la falta de mantenimiento adecuado (4).

Este estudio presenta la interacción agua – estructura, del colapso en el año 2022 del puente de la calle Arturo Sandez con 41 años de servicio. La finalidad de esta investigación es identificar las causas hidráulicas y de socavación que llevaron al colapso del puente Sandez.

En abril del año 2021, el tablero del puente presento fisuras en la capa de rodadura y un leve asentamiento, lo que genero a que personal del Gad Municipal de Girón realice varias inspecciones y determine que existe una socavación en el estribo izquierdo, generando a que sea limitado el tráfico a solo vehículos livianos y paso peatonal (Figura 1).



Fig. 1: Asentamiento de calzada estribo izquierdo y restricción del tráfico vehicular pesado. Elaborado por: Autores.

Subsecuentemente el 20 de febrero de 2022, se produjo un colapso significativo en la infraestructura del puente Sandez, específicamente en el estribo izquierdo. Este evento fue consecuencia directa de procesos de socavación que debilitaron la integridad estructural del soporte. Lo que ocasionó que la superestructura del puente perdió su estabilidad

al no contar con los puntos de apoyo necesarios, este fallo estructural desencadenó una secuencia de eventos que culminaron en el colapso total de la superestructura. Finalmente, es relevante señalar que el estribo derecho del puente permaneció intacto (5,6) (Figura 2).



Fig. 2: Colapso del puente de la calle Arturo Sandez y Estribo derecho sin afecciones. Elaborado por: Autores.

Este documento aborda la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS, comenzando con la recopilación de datos geospaciales y datos climáticos para calcular el caudal de diseño (7,8). Posteriormente, se realiza la modelación hidráulica mediante el programa HEC-RAS, que se inicia con la obtención de datos hidrológicos (9), el periodo de diseño, la topografía del área (10), así como las características geotécnicas del cauce y sus márgenes, con el fin de determinar las propiedades físicas del flujo en la abscisa de análisis (11,12).

Finalmente, para analizar la interacción entre el agua-estructura, se utilizan los datos previamente recopilados y se emplea el software ANSYS CFD (13–15) para llevar a cabo un análisis mediante el método de volúmenes finitos (MVF) (16).

Este procedimiento implica la discretización detallada de la estructura del puente y del cauce circundante (17,18), con el fin de identificar las zonas estructurales más vulnerables que pueden ser afectadas por fenómenos de socavación y por el flujo de agua. A través de este análisis, se busca mapear las áreas críticas

donde la erosión puede comprometer la integridad estructural. El objetivo de este artículo es resaltar que los resultados derivados de este análisis numérico sugieren que la modelación computacional de estructuras que son propensas a colapsos representa una herramienta altamente efectiva para la mitigación de riesgos.

Este estudio permite no solo la identificación de puntos débiles en la estructura, sino también la anticipación y prevención de posibles fallas estructurales, facilitando así la implementación de medidas correctivas de manera oportuna y eficiente. La integración de estos análisis en el proceso de diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas es crucial para garantizar la seguridad y funcionalidad a largo plazo de las estructuras expuestas a condiciones hidrológicas adversas.

2 MÉTODOS

En el presente artículo se desarrollaron estudios técnicos integrados para analizar la socavación hidráulica del puente Arturo Sandez, abordando aspectos clave como la topografía, hidrología, hidráulica e interacción agua-estructura.

El estudio topográfico permitió obtener un modelo tridimensional preciso del terreno. A través del análisis hidrológico, se evaluó la dinámica de la cuenca hidrográfica, incluyendo caudales máximos, utilizando datos históricos para determinar las condiciones más desfavorables. El estudio hidráulico se centró en la modelación matemática del flujo del agua, identificando patrones de erosión y zonas vulnerables a la socavación en los estribos. Finalmente, se integraron estos resultados en un análisis de interacción agua-estructura, evaluando los efectos combinados del flujo hidráulico, detallado a continuación cada uno de estos estudios:

2.1 Topográfico

Se realizó un levantamiento topográfico in situ utilizando tecnología de posicionamiento de alta precisión, un sistema RTK (Real-Time Kinematic), con receptor geodésico GPS-GNSS ALPHA GEO L3 con precisión H: 3mm+0.8ppm V: 4mm+1ppm, que permite generar la topografía y crear las respectivas curvas de nivel, abarcando una extensión de 100 metros aguas arriba y aguas abajo del punto de interés, el cual está localizado como centro de gravedad del puente colapsado de la calle Arturo Sandez con coordenadas UTM WGS-84 ($y = 9650680$, $x = 706193$).

2.2 Hidrológico

Para el análisis de la cuenca de estudio, se utilizó en primera instancia el software ArcGIS para obtener las características morfométricas. La cartografía base empleada fue proporcionada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), asegurando así la precisión y relevancia de los datos geospaciales. Para la hidrometeorología se utilizan las ecuaciones de la estación de Santa Isabel M0032 y las precipitaciones máximas en 24 horas (1964-2011) de los anuarios del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), considerando un periodo de diseño de 50 años.

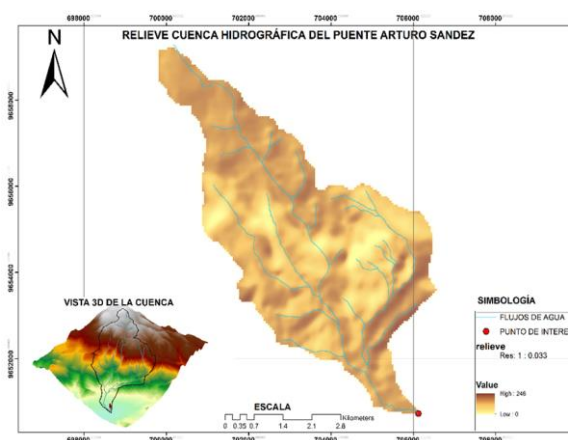


Fig. 3: Cuenca hidrográfica de aporte para el Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

Se aplicó el método del Soil Conservation Service (SCS) para tener una mayor precisión se subdividió la cuenca de aporte, para determinar el número de curva considerando condiciones de humedad clase II y con el programa Hec-Hms se obtiene el caudal máximo de diseño. Este enfoque integral facilita una evaluación hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación, asegurando que se consideren adecuadamente las variaciones en la infiltración y el escurrimiento superficial (Figura 3).

2.3 Hidráulico

Un análisis integral de las características morfométricas del río Chorro en la abscisa de interés. Este proceso inicial incluye una evaluación de la topografía y batimetría del afluente, abarcando una extensión de 100 metros tanto aguas arriba como aguas abajo del sitio de análisis. La implementación de un software diseñado para simular flujos unidimensionales, lo que facilita la modelación de la dinámica del agua en el río Chorro es HEC-RAS que determina la altura máxima de crecida en la sección transversal del afluente en diferentes escenarios de caudal, lo que permite evaluar adecuadamente la sección transversal de la infraestructura del puente Arturo Sandez que permanece intacta (estribo derecho) y áreas susceptibles a inundaciones (Figura 4).

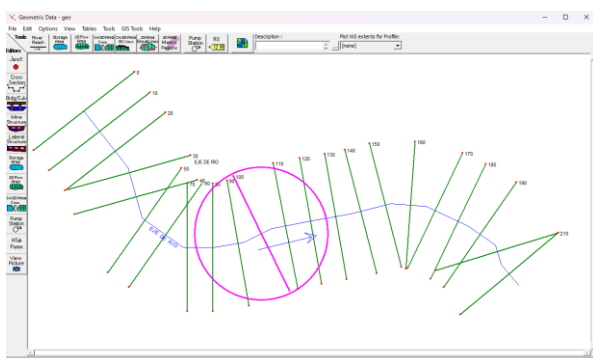


Fig. 4: Modelación hidráulica del Rio Chorro y del Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

2.3 Interacción agua-estructura

La geometría tanto del puente como del afluente fueron representadas mediante un detallado modelo bidimensional en el software Civil 3D, después el modelo fue exportado al programa de análisis de fluidos Ansys CFD (Computational Fluid Dynamics).

A continuación, se realizó la discretización del modelo matemático utilizando el método de volúmenes finitos, se lo realizó con una malla discretizada tipo tetraédricos de 500 mm, generando una totalidad de 75903 elementos, es un procedimiento fundamental en la simulación numérica que permite transformar las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del flujo en un dominio continuo en un sistema de ecuaciones algebraicas. Este método es útil para capturar la variabilidad del flujo y las interacciones entre el agua y las estructuras (Figura 5).

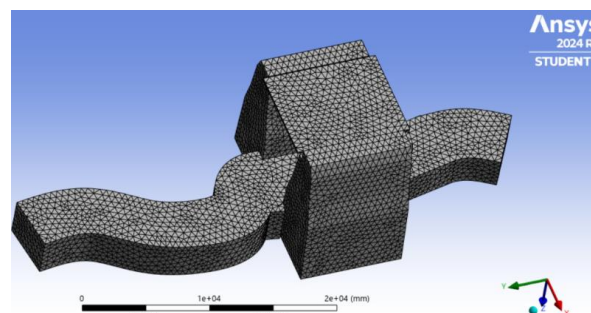


Fig. 5: Discretización del modelo matemático del afluente y del Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

La modelación se llevó a cabo considerando, las propiedades de los materiales “en el contexto de los estribos, se establece que la resistencia del hormigón ciclópeo es de 280 kgf/cm² bajo condiciones de compresión y de 33.6 kgf/cm² en condiciones de tracción” (5,18), la geometría del afluente, se considera un solo elemento con la superestructura y con la infraestructura, finalmente el caudal máximo de diseño determinando entrada, salida, paredes tipo

“canal” y la superficie libre. Son esenciales para comprender el comportamiento de la interacción entre el flujo del agua y los estribos (Figura 6).

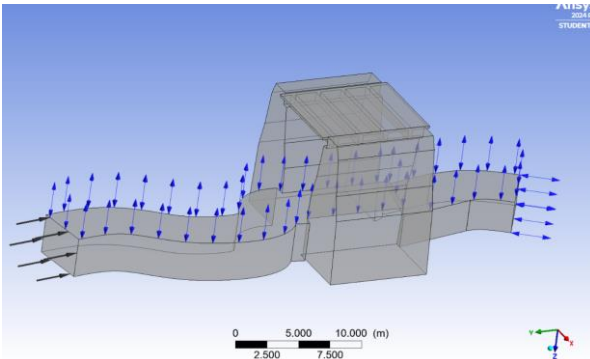


Fig. 6: Cargas y condiciones de borde del afluente y Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Topográfico

Los datos obtenidos fueron procesados utilizando el software Civil 3D, con el objetivo de generar curvas de nivel a intervalos de 50 centímetros y un perfil detallado del río Chorro cada 10 metros. El desnivel del cauce al fondo del lecho varía desde la abscisa 0+000 los 2094.40 m.s.n.m., a la abscisa 0+200 los 2082.98 m.s.n.m. generando un pendiente de 5.71%. El área total de levantamiento fue de 2.60 hectáreas (Figura 7).

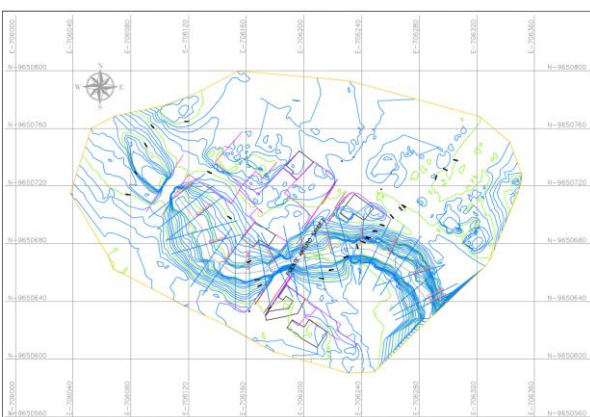


Fig. 7: Levantamiento topográfico del Río del Chorro. Elaborado por: Autores.

3.2 Hidrológico

La cuenca de aporte sobre el río Chorro, caracterizada por un relieve abrupto, con una superficie de 25.73 km² y un perímetro de 26.67 km, presenta una forma alargada según su factor de forma (Rf) de 0.23 (Figura 3). Provocando que la escorrentía acelere los tiempos de respuesta ante las lluvias, ya que el agua fluye rápidamente hacia el cauce principal. Lo que puede resultar en eventos de inundación durante lluvias intensas y lo que podría acelerar procesos erosivos de transporte de sedimentos hacia el río, afectando su estabilidad hidráulica y morfológica.

Las elevaciones en la cuenca varían desde una cota máxima de 3704.77 m.s.n.m. hasta una cota mínima de 2080.53 m.s.n.m., lo que resalta su relieve montañoso y afecta tanto el régimen de escorrentía, la pendiente alta puede generar una mayor erosión del suelo, afectando la calidad del agua y la estabilidad de los ecosistemas circundantes (Figura 8).

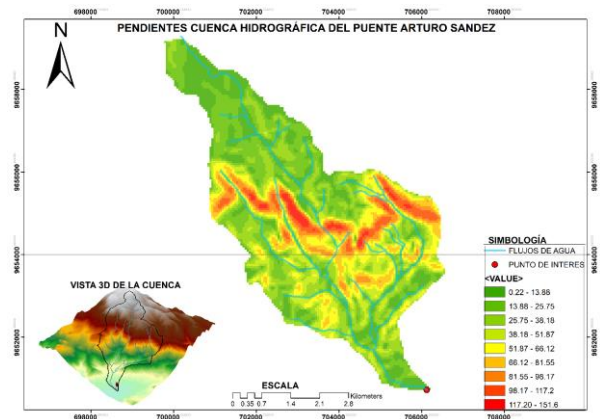


Fig. 8: Pendiente de la Cuenca de aporte del Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

La red hídrica principal tiene una longitud de 12.28 km, con una longitud total de la red hídrica de 41.79 km, lo que sugiere una red compleja que incluye afluentes menores que contribuyen al caudal general. La (figura 3, Tabla 1) representa las características morfométricas de la cuenca de aporte.

Tabla 1: Características Morfométricas de la Cuenca del río Chorro, aportantes del Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la superficie		
Área	km ²	25.73
Perímetro de la cuenca	km	26.67
Cotas		
Cota máxima	msnm	3704.77
Cota mínima	msnm	2080.53
Centroide (Wgs 1984 UTM Zone 17S)		
X centroide	m	703370.00
Y centroide	m	9654829.00
Z centroide	msnm	2968.88
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	27.96
De la Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	12.28
Longitud de la red hídrica	km	41.79
Pendiente Promedio de la Red Hídrica Principal	m/m	0.13
Forma		
Longitud Axial Cuenca	km	10.61
Factor de forma	Rf	0.23

La inclinación promedio del 27.96% de la cuenca tiene un impacto significativo en la cantidad de agua que se transporta a través de ella y que contribuye al afluente del Chorro. Este valor elevado de pendiente favorece un drenaje rápido, reduciendo el tiempo de concentración y aumentando el caudal pico durante eventos de precipitación intensa, lo que incrementa el volumen de escorrentía superficial y, por ende, la carga hidráulica del río. Este comportamiento hidrológico puede intensificar procesos erosivos y la socavación en áreas críticas de la cuenca (Figura 8).

El análisis hidrológico de la cuenca de aporte del río Chorro se ha dividido en cinco subcuencas, A, B, C, D y E, cada una presentan características distintas (figura 9).

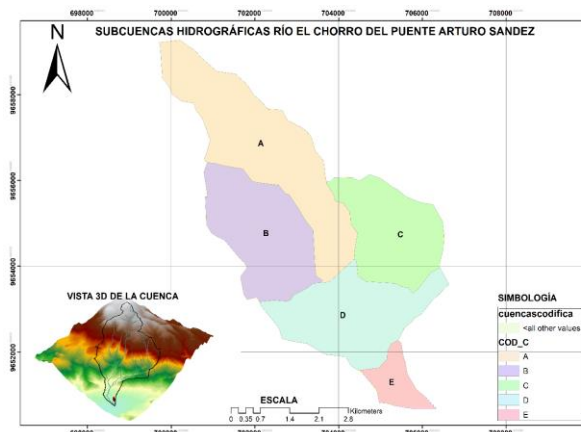


Fig. 9: Subcuencas hidrográficas del Río Chorro aportantes para el Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

La subcuenca A es la más grande, con un área de 8.39 km², y cuenta con la elevación máxima de 3704.77 m.s.n.m. y una elevación mínima de 2478.72 m.s.n.m. Su longitud de cauce es de 7.54 km y tiene una pendiente de 0.16 m/m, lo que sugiere un drenaje moderado.

La subcuenca B, de área 5.70 km², presenta una elevación máxima de 3565.97 m.s.n.m. y una mínima de 2482.72 m.s.n.m. Con una longitud de cauce de 4.21 km y una pendiente más pronunciada de 0.26 m/m, esta subcuenca podría experimentar un flujo de agua más rápido.

La subcuenca C tiene un área de 4.70 km², con una elevación máxima de 3416.96 m.s.n.m. y una mínima de 2394.69 m.s.n.m. Su longitud de cauce es de 4.36 km y su pendiente de 0.23 m/m indica un drenaje rápido.

La subcuenca D abarca 5.72 km² y presenta una elevación máxima de 3016.16 m.s.n.m. y una mínima de 2199.92 m.s.n.m. Con una longitud de cauce de 4.81 km y una pendiente de 0.17 m/m, esta subcuenca tiene un drenaje ligero, lo

que puede influir en la acumulación de escorrentía en el terreno.

Finalmente, la subcuenca E, la más pequeña con una superficie 1.22 km², presenta una elevación máxima de 2421.08 m.s.n.m. y una mínima de 2080.53 m.s.n.m. Su longitud de cauce es de 1.81 km y tiene una pendiente de 0.19 m/m, lo que sugiere un flujo moderado.

En el análisis realizado para determinar el caudal máximo, se empleó el método Soil Conservation Service (SCS). A continuación, se presentan los resultados donde se detalla el CN ponderado para cada subcuenca analizada (Figura 9).

- Cuenca A: CN Ponderado = 59
- Cuenca B: CN Ponderado = 64
- Cuenca C: CN Ponderado = 63
- Cuenca D: CN Ponderado = 68
- Cuenca E: CN Ponderado = 74

Un CN ponderado más bajo, como en la Cuenca A, sugiere una mayor capacidad de infiltración y menor escurrimiento, mientras que un CN ponderado más alto, como en la Cuenca E, indica una mayor propensión al escurrimiento superficial.

Se establece que el suelo de la cuenca es arenoso – arcilloso, perteneciendo en el grupo C con una ratio de infiltración de 1.3 mm/h. Para el tiempo de concentración (tc), se utiliza tres diferentes fórmulas empíricas para la obtención del promedio (Tabla 2).

Tabla 2: Tiempo de concentración subcuencas aportantes. Elaborado por: Autores.

Subcuenca	Rowe (h)	Kirpich (h)	Tonini (h)	Promedio (horas)	Tc (minutos)
A	0,63	0,63	0,79	0,69	41,13
B	0,34	0,34	0,58	0,42	25,21
C	0,36	0,36	0,58	0,43	25,93
D	0,44	0,44	0,71	0,53	31,83
E	0,20	0,20	0,47	0,29	17,33

La modelación hidrológica se realizó utilizando el software HEC-HMS, se analizó el comportamiento de cinco subcuencas y la

confluencia del afluente Chorro con sus ríos secundarios, siguiendo las directrices del manual de manejo. Los resultados obtenidos son los siguientes (Figura 10).

- Caudal: 76.9 m³/s
- Volumen de Escurrimiento: 36.48 mm

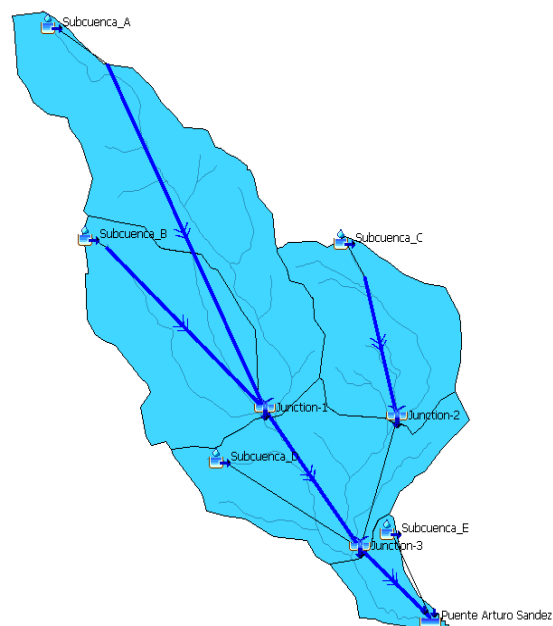


Fig. 10: Modelo Hidrológico de la cuenca del Río Chorro del Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

3.3 Hidráulico

Mediante la implementación del programa HEC-RAS, en conjunto con la integración de la topografía del área de estudio, donde se logró generar el perfil longitudinal del afluente, así como los perfiles transversales con una precisión espacial de cada 10 metros (Figura 11).

Permitiendo modelar de manera detallada las condiciones hidráulicas del flujo, considerando las características geomorfológicas específicas del cauce y obteniendo variaciones en el calado,

las velocidades del flujo y las secciones críticas del tramo analizado.

Con las condiciones de simulación de máxima crecida para 50 años en la abscisa 0+100 donde se encuentra ubicado la parte exterior de la estructura existente, se predice un calado de 4.18 metros, antes del achicamiento del río por el puente (Figura 11).

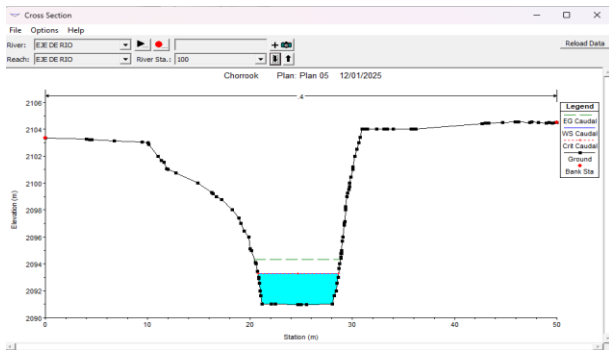


Fig. 11: Modelación hidráulica de la sección transversal existente de Puente Arturo Sandez. Elaborado por: Autores.

3.3 Interacción Agua - Estructura:

La influencia de la topografía del río Chorro es fundamental para entender el contacto directo entre el agua y la infraestructura del puente Arturo Sandez durante sus 41 años de servicio. Este artículo se centra en el análisis de los factores hidrológicos e hidráulicos que contribuyeron a la socavación del estribo izquierdo a la salida del agua del puente Sandez analizando dos estados.

3.3.1 Condiciones Normales

Se ha estimado un caudal de 3.10 m³/s que, al ser conducido a través del afluente Chorro, genera una velocidad de 4.7 m/s en el extremo izquierdo del estribo. Esta dinámica de flujo se traduce en una presión dinámica de 18638.8 pascales. Mediante formula empíricas (Melville – Coleman) se calcula la socavación de 3.45 cm en un área de 2 metros cuadrados generando un

volumen de socavación de 0.069 m³ en un tiempo de 0.02 segundos (Figura 12).

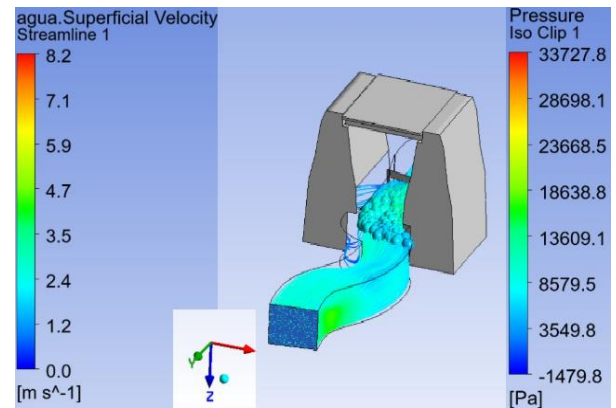


Fig. 12: Estado hidráulico normal, velocidad y presión. Elaborado por: Autores.

3.3.1 Condiciones Extremas

Se ha estimado un caudal de 76.9 m³/s que, al ser conducido a través del afluente Chorro, genera una velocidad de 51.6 m/s en el extremo izquierdo del estribo. Esta dinámica de flujo se traduce en una presión dinámica de 515664.5 pascales. Mediante formula empíricas (Melville – Coleman) se calcula la socavación de 2.33 m en un área de 2 metros cuadrados generando un volumen de socavación de 4.66 m³ en un tiempo de 0.05 segundos (Figura 13).

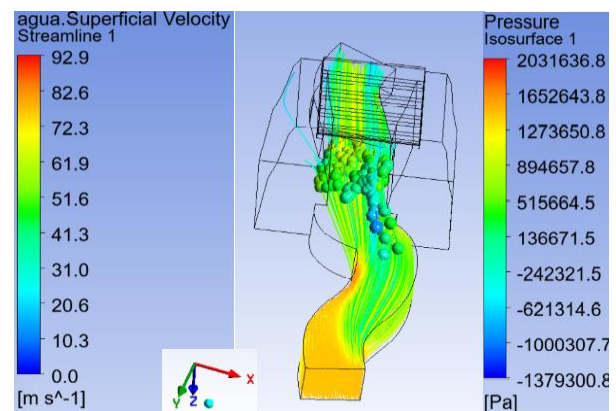


Fig. 13: Estado hidráulico extremo, velocidad y presión. Elaborado por: Autores.

Durante la primera etapa de socavación identificada en abril del año 2021 del puente Arturo Sandez, el análisis preliminar del modelo matemático hidráulico indica que se podrían haber tomado medidas paliativas para evitar su desplome. Los resultados de esta investigación constituyen una segunda aproximación al análisis numérico del colapso progresivo de la estructura. Dada la complejidad de los fenómenos involucrados, es recomendable llevar a cabo un estudio más exhaustivo que incluyan las variables como la dinámica del flujo en una longitud más amplia, las propiedades mecánicas del suelo y la respuesta estructural ante cargas hidráulicas esencial para desarrollar un modelo que refleje adecuadamente las condiciones reales.

4 CONCLUSIONES

El análisis topográfico e hidrológico del río Chorro revela un relieve abrupto y una cuenca con características morfométricas que favorecen una escorrentía rápida, lo que puede resultar en eventos de inundación durante lluvias intensas. Dicho análisis permite prevenir y diseñar estructuras con características específicas que contribuyan a mitigar problemas hidráulicos.

La dinámica del flujo, con caudales que alcanzan hasta 76.9 m³/s, genera presiones dinámicas que aceleran la socavación en el estribo izquierdo hasta 2.33 m, representando un riesgo considerable para la integridad estructural del puente.

El análisis matemático hidráulico aplicado mediante el método de volúmenes finitos sugiere que la implementación temprana de medidas atenuantes, como estructuras de protección contra socavación, disipadores de energía y revestimientos en los estribos, habría mitigado los procesos erosivos y reducir las cargas dinámicas inducidas por el flujo sobre los

elementos estructurales del puente. Donde permite identificar las áreas críticas de mayor vulnerabilidad, en el cual las condiciones hidráulicas extremas y la interacción agua - estructura comprometieron la estabilidad de la estructura.

La importancia de la implementación de un sistema de monitoreo continuo de parámetros hidráulicos, estructurales en tiempo real. Este sistema permitiría evaluar dinámicamente el comportamiento de las estructuras y de la cuenca, proporcionando datos cruciales para detectar anomalías, anticipar fallas estructurales y optimizar la toma de decisiones en la gestión y mantenimiento de la infraestructura.

El modelo matemático del puente Arturo Sandez demuestra que la geometría del afluente, combinada con el achicamiento de los estribos, generó un flujo concentrado hacia el extremo exterior del estribo izquierdo, intensificando las tensiones cortantes y provocando un proceso de socavación progresiva en su base. Este comportamiento hidráulico incrementó la velocidad del flujo y el transporte sedimentario, exponiendo el estribo izquierdo y comprometiendo su estabilidad estructural.

Los resultados obtenidos en esta investigación constituyen una segunda aproximación al análisis del colapso progresivo del puente Arturo Sandez, destacando la necesidad de incorporar una interacción integral entre agua, suelo y estructura. Este enfoque permite evaluar de manera más precisa los efectos combinados de la socavación.

5 REFERENCIAS

1. Rymysza J. Causes of the Morandi viaduct disaster in Genoa as a contribution to the design of pre-stressed structures. Roads

- and Bridges - Drogi i Mosty. 2020;19(1):5–25.
2. Xu X, Wang J, Wei J, Taciroglu E, Dai F, Peng W. A forensic investigation of the Taihe arch bridge collapse. *Eng Struct* [Internet]. 2018;176(June):881–91. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.011>
 3. Wardhana K, Hadipriono FC. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2003;17(3):144–50.
 4. Marín Guzmán CR, Maldonado Noboa JS. Estudio de las causas del colapso de puentes en Ecuador (2000-2022). *MQRInvestigar*. 2022;6(4):368–95.
 5. Fernández-Galarza L, Cajamarca-Zúñiga D. Análisis estructural por elementos finitos del colapso del puente Arturo Sandez en Girón, Ecuador = Finite element structural analysis of the Arturo Sandez bridge collapse in Giron, Ecuador. *Advances in Building Education* [Internet]. 31 de dezembro de 2023;7(3):9–22. Disponible em: <http://polired.upm.es/index.php/abe/article/view/5202>
 6. Cajamarca-Zúñiga D, Campos-Vivar D. Estado del conocimiento técnico y uso de la mampostería en Ecuador Deficiencia de los programas locales de educación superior en ciencias de la construcción = State of technical knowledge and use of masonry in Ecuador Shortcomings of local higher education programs in construction sciences. *Advances in Building Education*. 31 de agosto de 2023;7(2):41–51.
 7. Siqueira AR, Teixeira EK da C, Silva MA da. Integration of GIS and HEC-HMS for sustainable drainage structure modeling. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES* [Internet]. 19 de novembro de 2024;17(12):e12807. Disponible em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/12807>
 8. Jam-Jalloh SU, Liu J, Wang Y, Liu Y. Coupling WRF with HEC-HMS and WRF-Hydro for flood forecasting in typical mountainous catchments of northern China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 23 de setembro de 2024;24(9):3155–72.
 9. Arévalo M. BIOMONITOREO DE LA MICRO CUENCA DEL RÍO CHORRO UTILIZANDO A LOS MACROINVERTEBRADOS ACUATICOS COMO INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA. 2007.
 10. Monjardín S, Rangel J, Sanhouse A, Plata W, Rentería S, Mora Z. Statistical comparison analysis of different real-time kinematic methods for the development of photogrammetric products: CORS-RTK, CORS-RTK + PPK, RTK-DRTK2, and RTK + DRTK2 + GCP. *Open Geosciences*. 10 de janeiro de 2024;16(1).
 11. Mahmud S, Siddique A, Islam M, Khan M, Akter S, Ashraf M, et al. Flood Inundation Prediction for Bangali River Basin using HEC-HMS and HEC-RAS. *FLOOD INUNDATION PREDICTION FOR BANGALI RIVER BASIN USING HEC-HMS AND HEC-RAS* [Internet]. 2024. Disponible em: <https://www.researchgate.net/publication/387070091>
 12. Ramtin S, Kjeldsen T, Stamatak I, Rahi B. Optimisation of hardware setups for time-efficient HEC-RAS simulations. *Cambridge Prisms: Water* [Internet]. 16 de dezembro de 2024;2:e13. Disponible em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S275517762400011X/type/journal_article
 13. El-Hamamy W. COMPARISON AMONG NUMEROUS NUMERICAL ALTERNATIVES USING ANSYS ON OPEN CHANNEL CONFLUENCE [Internet]. 2019. Disponible em: <https://www.researchgate.net/publication/343350849>
 14. Isaacson J, Fu Y, Yuan C. Res b os2 and the CDF W mass measurement. *Physical Review D*. 10 de novembro de 2024;110(9).
 15. Quirola J, Bauer F, Jonker P, Levan A, Brandt W, Ravasio M, et al. New JWST

- redshifts for the host galaxies of CDF-S XT1 and XT2: understanding their nature [Internet]. 2024. Disponible em: <https://mast.stsci.edu/search/ui/#/jwst>
16. Mogollón F, Hernández D. Simulación numérica en ANSYS Fluent del flujo a través de una compuerta en un canal de laboratorio. Revista UIS Ingenierías [Internet]. 2024;23(3). Disponible em: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revis-tausingenierias/article/view/15219>
 17. Lavasani E, Balan A, Stamatini I, Alsharea A, Diac C. DESIGNING GEOMETRIES IN SOLIDWORKS FOR HEAT TRANSFER SIMULATIONS IN ANSYS [Internet]. Romanian Reports in Physics XX. 2024. Disponible em: <https://www.researchgate.net/publication/387403594>
 18. Yang Y, Kong F, Jiang Z, Mu Z. Developing Programs for Converting MIDAS GEN to ANSYS Models Based on Python. Buildings. 10 de noviembre de 2024;14(11).