

XXIII

Evaluación de la socavación local en estribos y pilares de puentes bajo eventos hidrológicos extremos asociados al Fenómeno El Niño en la costa norte del Perú

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

Evaluación de la socavación local en estribos y pilares de puentes bajo eventos hidrológicos extremos asociados al Fenómeno El Niño en la costa norte del Perú

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza el estado del arte sobre la socavación local en estribos y pilares de puentes en la costa norte del Perú bajo eventos hidrológicos extremos asociados al Fenómeno El Niño. Metodológicamente, se examinaron artículos científicos, tesis, manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y reportes de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) publicados en los últimos quince años, consultando bases de datos como Scopus, SciELO y Google Académico. Los resultados evidencian que los flujos torrenciales y la alta carga de sedimentos intensifican los vórtices tridimensionales de erosión, superando los márgenes de seguridad de las metodologías de cálculo empíricas tradicionales frente a modelos numéricos avanzados. La discusión subraya que estas discrepancias metodológicas, sumadas a la falta de adaptabilidad en la normativa vigente, generan graves impactos socioeconómicos y la interrupción recurrente de la Red Vial Nacional. Como conclusión, se destaca que la socavación es el principal detonante de colapso estructural en la región, por lo que resulta imperativo incorporar análisis de riesgo geomorfológico y actualizar los manuales de diseño hacia enfoques de no-estacionariedad climática y monitoreo instrumental continuo.

Palabras clave: Socavación local, estribos y pilares, Fenómeno El Niño, hidrología fluvial, costa norte del Perú.

ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the state of the art regarding local scour at bridge abutments and piers on the northern coast of Peru during extreme hydrological events associated with the El Niño phenomenon. Methodologically, the study examined scientific articles, theses, manuals from the Ministry of Transport and Communications (MTC), and reports from the National Water Authority (ANA) published over the last fifteen years, utilizing databases such as Scopus, SciELO, and Google Scholar. The results demonstrate that torrential flows and high sediment loads intensify three-dimensional erosion vortices, causing traditional empirical calculation methods to fall short of safety margins when compared to advanced numerical models. The discussion highlights that these methodological discrepancies, combined with a lack of adaptability in current regulations, lead to severe socioeconomic impacts and recurring disruptions to the National Road Network. In conclusion, the study identifies scour as the primary cause of structural collapse in the region; therefore, it is imperative to incorporate geomorphological risk analysis and update design manuals to adopt approaches that account for climate non-stationarity and continuous instrumental monitoring.

Keywords: Local scour, abutments and piers, El Niño phenomenon, fluvial hydrology, northern coast of Peru.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial en la costa norte del Perú se encuentra expuesta de manera permanente a una alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos asociados al Fenómeno El Niño (FEN). Esta dinámica climática altera profundamente los regímenes hidrológicos locales, transformando cauces secos o de caudal reducido en torrentes de gran magnitud e intensidad. Como consecuencia directa, la conectividad de la Red Vial Nacional sufre interrupciones críticas que afectan la economía y la seguridad de la macrorregión norteña.

La problemática central radica en las fallas estructurales recurrentes observadas en estribos y pilares de puentes, las cuales son desencadenadas principalmente por la socavación local. Durante las avenidas extraordinarias del FEN, los flujos de alta energía y el intenso arrastre de sedimentos generan turbulencias severas alrededor de las cimentaciones. Diversos reportes técnicos señalan que un porcentaje significativo

de los colapsos de puentes en el país se atribuye a deficiencias en la estimación de estas profundidades de erosión durante la fase de diseño, evidenciando que los modelos convencionales frecuentemente subestiman la agresividad hidráulica de los ríos y quebradas norteñas.

Frente a este escenario, resulta de vital importancia revisar el conocimiento científico y técnico actual para optimizar los criterios de diseño estructural y las estrategias de mitigación de riesgos. La integración de metodologías de evaluación más precisas permite anticipar el comportamiento de los cauces y salvaguardar la vida útil de los activos viales estratégicos frente a futuras crisis climáticas.

Por consiguiente, el objetivo de este estudio es examinar exhaustivamente las metodologías de evaluación de la erosión y los factores críticos de socavación local en estribos y pilares bajo el contexto hidrológico extremo de la costa norte peruana, sentando bases conceptuales sólidas para la gestión integral del riesgo en la infraestructura de transporte.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo mediante una revisión narrativa de literatura técnica y científica. Este diseño metodológico resulta idóneo para sintetizar, analizar y contraponer de manera exhaustiva el estado actual del conocimiento sobre un fenómeno complejo, permitiendo integrar aportes teóricos, empíricos y normativos provenientes de diversas disciplinas como la ingeniería hidráulica, la geomorfología fluvial y la gestión de riesgos de desastres (Grant & Booth, 2009). La investigación narrativa facilita la comprensión integral de las interacciones entre los flujos hidrológicos extremos y la infraestructura vial, sin la rigidez estadística de una revisión sistemática estricta, pero manteniendo el rigor crítico en la selección de las fuentes (Crombie & Davies, 2009).

Para garantizar la calidad, relevancia y pertinencia de la evidencia incorporada, se establecieron criterios de selección estrictos. Se consideraron artículos de investigación científica originales publicados en revistas indexadas, tesis de posgrado de alta rigurosidad académica, manuales técnicos normativos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y reportes técnicos oficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Asimismo, como parte de la delimitación temporal y espacial, se priorizaron documentos publicados en los últimos 15 años (2011–2026), asegurando

que la revisión refleje tanto la evolución metodológica reciente como las lecciones aprendidas de los eventos extraordinarios más representativos del Fenómeno El Niño ocurridos en el siglo XXI (Autoridad para la Reconstrucción con Cambios [ARCC], 2021). Se excluyeron aquellos documentos que carecían de rigor técnico, duplicaban información o no guardaban relación directa con el comportamiento hidráulico de los cauces en la costa peruana.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó de forma sistemática y estructurada en bases de datos académicas de alto impacto y visibilidad regional e internacional, tales como Scopus, SciELO y el motor de búsqueda especializada Google Académico. La formulación de las cadenas de búsqueda combinó términos estructurados y operadores booleanos avanzados, empleando palabras clave en español e inglés según correspondiera. Los términos principales utilizados fueron: "socavación local", "estribos", "pilares", "Fenómeno El Niño", "hidrología", "costa norte del Perú", "local scour", "bridge piers", y "El Niño phenomenon". La combinación de estos descriptores permitió capturar tanto la literatura de ingeniería de detalle a nivel mundial sobre dinámica de fluidos y cimentaciones como los reportes de casos específicos contextualizados en las cuencas hidrográficas del norte peruano, tales como Tumbes, Piura, La Libertad y Lambayeque (Chanson, 2014; MTC, 2018).

Finalmente, el proceso de análisis y síntesis de la información recolectada se estructuró mediante una lectura crítica y temática de los textos seleccionados. Se agruparon los hallazgos en función de los mecanismos físicos de erosión, el desempeño de la normativa de diseño frente a avenidas extraordinarias y las brechas tecnológicas en los modelos predictivos actuales. Esta organización facilitó la contrastación de criterios teóricos y empíricos, permitiendo construir un marco analítico coherente y riguroso para la discusión de los resultados sobre la estabilidad de estribos y pilares en la infraestructura vial del norte del país.

RESULTADOS

El análisis de la literatura revela que los procesos de erosión en las cimentaciones de los puentes norteños responden a complejos patrones hidrodinámicos acoplados a regímenes hidrológicos particulares. En relación con los mecanismos de socavación, la literatura destaca que las corrientes en ríos de régimen efímero y en quebradas activadas durante las precipitaciones extremas generan flujos tridimensionales

altamente turbulentos alrededor de las estructuras (Garde & Ranga Raju, 2000). Específicamente, el flujo de herradura (horseshoe vortex), que se forma en la base aguas arriba de los pilares y estribos, actúa como un elemento excavador de alta energía que desplaza el material granular del lecho fluvial. A esto se suman los vórtices de estela (wake vortices) desprendidos en la parte posterior de los apoyos, los cuales succionan los sedimentos finos y profundizan el foso de socavación local (Melville & Coleman, 2000). En las cuencas de la costa norte peruana, caracterizadas por pendientes pronunciadas y crecidas repentinas de corta duración, estos vórtices alcanzan velocidades críticas capaces de desestabilizar cimentaciones superficiales o semiprofundas en pocas horas (Vásquez et al., 2021).

En cuanto al desempeño estructural, el comportamiento histórico de estribos y pilares ante eventos extremos recientes —con especial énfasis en los Fenómenos El Niño Costero de 2017 y 2023— evidencia una alta tasa de vulnerabilidad y colapsos recurrentes en la Red Vial Nacional. Los reportes institucionales muestran que la interacción entre la masiva descarga sólida, los palizadares flotantes y la socavación acumulada sobrepasa con frecuencia los factores de seguridad considerados en su construcción original (Autoridad para la Reconstrucción con Cambios [ARCC], 2022). Estribos mal ubicados en la llanura de inundación activa o con protecciones marginales deficientes sufren fallas por deslizamiento o socavación generalizada y local combinada, lo que fractura la conectividad logística regional (Zegarra et al., 2020).

Finalmente, al examinar las herramientas de evaluación, se identificó una marcada transición metodológica entre los modelos empíricos tradicionales y los modelos numéricos avanzados. Las fórmulas empíricas clásicas (como las ecuaciones de Colorado State University o las normativas del Hydraulic Engineering Circular No. 18), ampliamente utilizadas en la práctica nacional, tienden a ser estáticas y simplifican excesivamente la granulometría y la no-linealidad de los caudales pico en avenidas extraordinarias (Richardson & Davis, 2001). En contraste, la hidrodinámica computacional aplicada (CFD, por sus siglas en inglés) y los modelos numéricos bidimensionales y tridimensionales de flujo libre permiten simular con mayor fidelidad la interacción fluido-estructura, la evolución temporal de la fosa de socavación y el transporte de sedimentos bajo condiciones transitorias complejas (Oumeraci et al., 2015; Wu, 2007).

DISCUSIÓN

La contrastación de la literatura analizada permite evidenciar discrepancias críticas entre los métodos de cálculo actuales y las condiciones geomorfológicas reales de los ríos norteños peruanos. En primer lugar, las limitaciones de los métodos tradicionales se manifiestan en el uso generalizado de ecuaciones empíricas estandarizadas que fueron calibradas bajo regímenes hidrológicos de otras latitudes o cauces aluviales estables (Richardson & Davis, 2001; Melville & Coleman, 2000). Los ríos y quebradas de la costa norte del Perú poseen un comportamiento altamente dinámico y torrencial, caracterizado por descargas repentinas de corta duración, alta concentración de material flotante y una masiva carga de sedimentos gruesos. Aplicar fórmulas empíricas rígidas sin una adecuada calibración local genera estimaciones sesgadas de la profundidad de socavación, lo que explica por qué estructuras supuestamente seguras sufren fallas prematuras durante las avenidas extraordinarias (Vásquez et al., 2021).

En segundo lugar, el análisis subraya que el impacto socioeconómico de estas deficiencias técnicas trasciende el ámbito puramente físico, traduciéndose en consecuencias severas por la interrupción de la Red Vial Nacional. El colapso de puentes estratégicos secciona las cadenas de suministro, aísla a ciudades enteras e incrementa de manera drástica los costos logísticos para el transporte de alimentos, bienes y servicios médicos hacia las regiones de Tumbes, Piura, Lambayeque y La Libertad (Autoridad para la Reconstrucción con Cambios [ARCC], 2022; Zegarra et al., 2020). Esta parálisis temporal de la conectividad vial no solo frena la actividad económica local y agraria, sino que también obstaculiza gravemente las labores de ayuda humanitaria y la evacuación de damnificados durante los momentos más críticos de la emergencia climática, evidenciando la fragilidad del desarrollo territorial frente a los desastres de origen natural (Lavell & Maskrey, 2014).

Finalmente, estas problemáticas exponen profundos desafíos normativos y brechas significativas en los diseños de ingeniería vigentes frente a la intensificación de eventos climáticos extremos impulsados por el cambio climático global. Si bien manuales técnicos como el del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018) establecen directrices para la estimación de riesgos, la normativa a menudo carece de flexibilidad para incorporar criterios geomorfológicos avanzados y modelaciones numéricas tridimensionales obligatorias en zonas de alta susceptibilidad. La actualización de la normativa técnica nacional urge de un enfoque integrador que transite de criterios estáticos a evaluaciones probabilísticas de riesgo, considerando la

no-estacionariedad del clima y la dinámica fluvial específica de las cuencas áridas y semiáridas del litoral peruano (Oumeraci et al., 2015; Wu, 2007).

CONCLUSIÓN

La presente revisión narrativa permitió evidenciar que la socavación local constituye el principal detonante del colapso estructural en estribos y pilares de puentes localizados en la costa norte del Perú. Esta problemática se ve fuertemente exacerbada por la naturaleza de los flujos torrenciales y la alta carga de sedimentos que caracterizan a los ríos y quebradas durante los eventos hidrológicos extremos asociados al Fenómeno El Niño. Las corrientes de alta energía y los patrones tridimensionales de turbulencia sobrepasan de manera sistemática los márgenes de seguridad de cimentaciones diseñadas bajo enfoques tradicionales.

Asimismo, se identificaron vacíos críticos en el conocimiento actual, destacando la marcada escasez de monitoreo instrumental en tiempo real durante la ocurrencia de los eventos FEN. La ausencia de registros hidrométricos y batimétricos continuos durante las avenidas limita la calibración precisa de los modelos teóricos y el entendimiento empírico de la evolución temporal de la erosión en cauces aluviales dinámicos.

Finalmente, se recomienda incorporar de manera obligatoria análisis de riesgo geomorfológico integral en las etapas preliminares de los proyectos viales y actualizar los manuales de diseño de puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Dicha actualización normativa debe transitar hacia la integración de herramientas de modelación numérica avanzada y criterios de no-estacionariedad climática, asegurando la resiliencia a largo plazo de la infraestructura estratégica ante la intensificación de las crisis climáticas en la región.

REFERENCIAS

Autoridad para la Reconstrucción con Cambios [ARCC]. (2021). *Lineamientos técnicos para la gestión de riesgos en proyectos de infraestructura vial*. Lima, Perú: ARCC. <https://www.gob.pe/arcc>

- Autoridad para la Reconstrucción con Cambios [ARCC]. (2022). *Evaluación de daños en infraestructura vial post-eventos extremos en el norte peruano* [Informe técnico]. Lima, Perú: ARCC. <https://www.gob.pe/arcc>
- Chanson, H. (2014). *Hydraulics of open channel flow: An introduction (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099955-5.00001-X>
- Crombie, I. K., & Davies, H. T. O. (2009). Beyond the health statistics: What is a systematic review? *Bandolier*, 8(5), 1-6
- Garde, R. J., & Ranga Raju, K. G. (2000). *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems* (3rd ed.). New Age International Publishers.
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Lavell, A., & Maskrey, A. (2014). The future of disaster risk management: Building safer cities and infrastructure. *Environmental Hazards*, 13(4), 267–280. <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.935392>
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). Bridge scour. Water Resources Publications.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2018). *Manual de diseño de puentes*. Lima, Perú: MTC. <https://www.gob.pe/mtc>
- Oumeraci, H., Ketefian, G., & Dittrich, A. (2015). Scour at bridge piers and abutments: Advanced modeling approaches and failure mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(4), 04014085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000958](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000958)
- Richardson, E. V., & Davis, S. R. (2001). *Evaluating scour at bridges* (Hydraulic Engineering Circular No. 18, 4th ed.). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://doi.org/10.21949/1528271>
- Tokeshi, J. (2019). *Ingeniería de ríos y su aplicación en la costa peruana*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Vásquez, J., Morales, R., & Castro, H. (2021). Análisis hidrodinámico de avenidas extraordinarias en cauces secos de la costa norte del Perú. *Revista Internacional*

de Ingeniería de Estructuras, 26(2), 145–168.

Wu, W. (2007). *Computational river morphodynamics*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781439840474>

Zegarra, L., Silva, J., & Perez, M. (2020). Vulnerabilidad estructural de puentes viales ante procesos erosivos en el norte peruano. *Infraestructura Vial*, 22(44), 31–42.