

XXXIV

**Diseño de infraestructura
de saneamiento resiliente
ante inundaciones por
el Fenómeno El Niño en
suelos arenosos**

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

Diseño de infraestructura de saneamiento resiliente ante inundaciones por el Fenómeno El Niño en suelos arenosos

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

RESUMEN

El presente capítulo analiza las estrategias y desafíos técnicos para el diseño de infraestructura de saneamiento resiliente en suelos arenosos, altamente vulnerables ante los efectos hidrológicos extremos del Fenómeno El Niño (FEN). A través de una revisión narrativa, se examina cómo la pérdida de capacidad portante, el riesgo de licuación y el ascenso del nivel freático comprometen la integridad estructural de las redes de alcantarillado, exigiendo una transición desde diseños convencionales hacia modelos probabilísticos de cambio climático. Se sistematizan criterios fundamentales de ingeniería que incluyen la estabilización geotécnica, la selección de materiales flexibles, la implementación de sistemas de anclaje para contrarrestar el empuje hidrostático y la integración de válvulas de retención para evitar el colapso por reflujo. El estudio destaca que la resiliencia operativa no depende de un componente único, sino de un diseño holístico que combine estanqueidad, redundancia y adaptabilidad. Finalmente, se enfatiza la necesidad urgente de actualizar los reglamentos técnicos locales y adoptar sistemas de monitoreo en tiempo real, garantizando así la sostenibilidad de los servicios básicos y la protección de la salud pública frente a la creciente incertidumbre climática.

Palabras clave: resiliencia, saneamiento, Fenómeno El Niño, suelos arenosos, infraestructura urbana.

INTRODUCCIÓN

El Fenómeno El Niño (FEN) representa una de las perturbaciones climáticas más disruptivas para la infraestructura urbana en las regiones costeras y áridas, especialmente en el contexto sudamericano. Este evento se caracteriza por alteraciones oceanográficas y atmosféricas que provocan precipitaciones intensas en periodos breves, superando drásticamente los umbrales de diseño de los sistemas de drenaje y alcantarillado convencionales. La irrupción repentina de grandes volúmenes de agua sobre entornos urbanos, diseñados bajo condiciones históricas de aridez, transforma rápidamente la funcionalidad de los servicios básicos, exponiendo la fragilidad de las ciudades ante la variabilidad climática extrema.

En este escenario, la problemática técnica se agudiza por las condiciones geotécnicas predominantes en muchas zonas de expansión urbana: los suelos arenosos. Estos suelos presentan una baja cohesión intrínseca y una alta permeabilidad, características que, ante eventos de saturación extrema, pierden rápidamente su capacidad portante. El riesgo crítico radica en los fenómenos de licuación y erosión subsuperficial, que comprometen la estabilidad estructural de las redes de tuberías y las cámaras de inspección. Cuando los niveles freáticos ascienden súbitamente debido a la infiltración masiva, las estructuras de saneamiento enterradas se ven sometidas a presiones hidrostáticas ascendentes que pueden inducir su flotación, desplazamiento o colapso, derivando en la fractura de los sistemas y la consecuente descarga incontrolada de aguas residuales en el entorno urbano.

La justificación de este análisis se fundamenta en la relevancia crítica de mantener la continuidad operativa de los servicios de saneamiento durante y después de los desastres. El colapso de la infraestructura sanitaria no solo implica una interrupción del servicio, sino que cataliza crisis de salud pública de gran escala al propiciar el contacto de la población con patógenos transportados por aguas servidas desbordadas, contaminando fuentes de agua y superficies urbanas. Por tanto, la resiliencia de estos sistemas es un componente estratégico del desarrollo urbano sostenible y de la seguridad sanitaria regional.

Ante este desafío, el presente artículo tiene como objetivo sistematizar los criterios de diseño y las tecnologías emergentes que permiten adaptar la infraestructura de saneamiento a condiciones de alta inestabilidad geotécnica e inundación. A través de una revisión narrativa, se pretende integrar conocimientos sobre estabilización de suelos, selección de materiales resistentes y estrategias de diseño adaptativo, con

el fin de proporcionar un marco técnico actualizado que fortalezca la capacidad de respuesta de la infraestructura urbana ante la recurrencia e intensidad creciente de los eventos asociados al Fenómeno El Niño.

METODOLOGÍA

Para alcanzar el objetivo de sistematizar los criterios de diseño y tecnologías resilientes, se empleó una metodología de revisión narrativa, la cual permite una aproximación crítica y holística a la literatura técnica existente, superando el enfoque puramente cuantitativo de las revisiones sistemáticas tradicionales (Green et al., 2024).

Estrategia de búsqueda

La identificación de las fuentes bibliográficas se realizó mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos multidisciplinarias y especializadas de alto impacto: Scopus y Web of Science (WoS). Asimismo, para capturar la producción académica regional sobre los efectos del Fenómeno El Niño (FEN) y las condiciones particulares del suelo en el contexto peruano y sudamericano, se consultó SciELO y diversos repositorios institucionales de ingeniería, tales como el repositorio de la Universidad Nacional Federico Villarreal y otras redes universitarias de ingeniería civil. Los términos de búsqueda combinaron descriptores como “resilience of sanitation infrastructure”, “sandy soil behavior”, “El Niño phenomenon impacts” y “geotechnical flood mitigation” mediante el uso de operadores booleanos (AND/OR).

Criterios de inclusión y exclusión

Para garantizar la vigencia y relevancia del estudio, se establecieron criterios estrictos de selección. En términos de temporalidad, se priorizaron publicaciones comprendidas en los últimos 15 años (2011-2026), debido a la rápida evolución de las normativas de ingeniería sanitaria y las nuevas evidencias sobre la intensificación del cambio climático. Los criterios de inclusión se centraron en: (1) manuscritos enfocados en ingeniería sanitaria y geotecnia aplicada; (2) estudios realizados en regiones climáticamente análogas a las zonas áridas o costeras afectadas por el FEN; y (3) publicaciones que abordaran explícitamente la interacción entre la infraestructura enterrada y la saturación de suelos arenosos. Se excluyeron documentos de carácter divulgativo sin sustento técnico, literatura gris que no cumpliera con estándares

de revisión por pares, y artículos cuyos resultados estuvieran desvinculados de la resiliencia estructural o la gestión de riesgos ante inundaciones.

Proceso de síntesis

La información recopilada fue sometida a un análisis cualitativo mediante un método de codificación temática, organizado en tres ejes estratégicos definidos según la complejidad del problema:

1. Estabilidad geotécnica: Se examinaron los modelos de comportamiento de suelos arenosos, incluyendo el fenómeno de licuación y las variaciones en la presión de poros bajo saturación extrema (Vargas & Quispe, 2024).
2. Resiliencia de materiales: Se categorizaron las propiedades de los materiales de construcción, analizando su rigidez, capacidad de deformación y respuesta ante fuerzas hidrostáticas y de flotación (Terzaghi et al., 2023).
3. Adaptabilidad del sistema: Se sintetizaron las soluciones de ingeniería para la mitigación, evaluando tanto la infraestructura convencional (anclajes, drenajes) como las soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua pluvial.

Este proceso permitió una triangulación de hallazgos, facilitando la identificación de consensos teóricos y brechas técnicas existentes en el diseño de infraestructura resiliente, alineándose con las recomendaciones actuales para la gestión de riesgos ante el FEN (CENEPRED, 2025).

RESULTADOS

El análisis de la literatura técnica revela que la vulnerabilidad de las infraestructuras de saneamiento en suelos arenosos, bajo el impacto del Fenómeno El Niño (FEN), es un problema multifactorial donde la interacción suelo-estructura es determinante.

Vulnerabilidad geotécnica Los suelos arenosos, caracterizados por su naturaleza granular y baja cohesión, exhiben una reducción crítica de su capacidad portante ante la infiltración masiva. La investigación demuestra que, bajo condiciones de saturación extrema, la presión de poros aumenta rápidamente, neutralizando la presión efectiva y desencadenando fenómenos de licuación. Un hallazgo relevante es el papel de la succión matricial en la estabilidad de las zanjas: en estado seco, la succión proporciona

una cohesión aparente que mantiene la estabilidad de las excavaciones, pero durante las lluvias intensas del FEN, la succión desaparece, provocando el colapso repentino de las paredes de las zanjas (Vargas & Quispe, 2024). Este comportamiento subraya la ineficacia de los métodos de compactación convencional sin una adecuada protección contra la infiltración profunda (Das & Sobhan, 2023).

Desempeño de materiales y componentes La evaluación comparativa entre sistemas de tuberías rígidas (concreto, arcilla) y flexibles (PVC, HDPE) bajo condiciones de inundación muestra resultados contrastantes. Mientras que las tuberías rígidas son propensas a fracturas ante los asentamientos diferenciales del suelo saturado, las tuberías flexibles presentan una mejor respuesta adaptativa a las deformaciones del terreno. No obstante, el desafío crítico en ambos sistemas es la flotación causada por el empuje hidrostático. La literatura enfatiza que, en suelos arenosos saturados, el peso muerto de la tubería es insuficiente para contrarrestar la fuerza de flotación (archimedeana), por lo que la implementación de sistemas de anclaje, como losas de hormigón o bloques de lastre, es imperativa para garantizar la estabilidad vertical del conducto (Mays, 2022).

Estrategias de diseño adaptativo La resiliencia operativa se logra mediante la integración de soluciones técnicas complementarias. El uso de geosintéticos, como geogrietas y geotextiles de separación, ha demostrado ser eficaz para mejorar la capacidad de soporte del suelo de fundación y mitigar la erosión subsuperficial alrededor de las estructuras. Para prevenir el colapso del sistema por el ingreso de agua pluvial, se destaca la instalación de válvulas de retención (check valves) en puntos estratégicos, las cuales actúan como barreras críticas contra el flujo inverso (backflow) del alcantarillado durante eventos de inundación.

Adicionalmente, el aislamiento de cámaras de inspección mediante juntas herméticas y tapas estancas es una práctica recomendada para prevenir la infiltración de agua saturada de sedimentos. Finalmente, la redundancia operativa, mediante el diseño de sistemas de alivio y redes de drenaje interconectadas, permite gestionar los picos de caudal pluvial que, de otro modo, sobrepasarían la capacidad de carga de la infraestructura sanitaria tradicional (ASCE, 2025). Estos hallazgos consolidan la necesidad de pasar de un enfoque de diseño estático a uno de ingeniería resiliente basada en la flexibilidad estructural.

DISCUSIÓN

La discusión sobre la resiliencia de la infraestructura de saneamiento en suelos arenosos obliga a una reevaluación profunda de los paradigmas de diseño civil. La evidencia analizada sugiere que las estrategias convencionales, fundamentadas exclusivamente en la extrapolación de periodos de retorno históricos, son insuficientes ante la naturaleza no estacionaria del cambio climático.

Intersección entre ingeniería y cambio climático Existe un consenso emergente en la literatura sobre la obsolescencia de los datos históricos para predecir la intensidad de las inundaciones asociadas al Fenómeno El Niño (FEN). La transición hacia diseños basados en escenarios probabilísticos de cambio climático representa un cambio de paradigma ineludible. Estudios recientes sugieren que la incertidumbre climática requiere modelos estocásticos que consideren la variabilidad extrema de las precipitaciones en cuencas áridas (Milly et al., 2023). Este enfoque probabilístico permite estimar no solo la frecuencia, sino la magnitud de los eventos disruptivos, permitiendo que las estructuras sanitarias absorban cargas hidrodinámicas superiores a las normativas vigentes, las cuales, en muchos casos, subestiman la vulnerabilidad de las zonas arenosas costeras.

Análisis costo-beneficio Un punto de debate recurrente es la percepción del costo adicional asociado a la construcción de infraestructura resiliente. Si bien la incorporación de sistemas de anclaje, materiales de alto rendimiento y geosintéticos incrementa la inversión de capital inicial en un 15% a 25%, este gasto debe contrastarse con el análisis de ciclo de vida y los costos de oportunidad. La literatura técnica subraya que el costo de la inacción es exponencialmente superior al considerar la reparación de redes colapsadas, el lucro cesante de los servicios y, fundamentalmente, la carga económica derivada de las crisis de salud pública (WaterAid, 2025). La mitigación de enfermedades diarreicas y brotes epidémicos post-inundación justifica, bajo cualquier métrica de salud pública, la inversión en una infraestructura que preserve la integridad del sistema de alcantarillado ante condiciones extremas.

Brechas de conocimiento A pesar de los avances técnicos, subsiste una brecha significativa: la ausencia de normativa local específica que vincule el comportamiento geotécnico de los suelos arenosos con la resiliencia ante eventos climáticos extremos. La mayoría de los reglamentos nacionales de construcción en regiones como la costa peruana aún prescriben estándares de cimentación basados en condiciones de carga estática, ignorando el fenómeno de pérdida de succión y licuación dinámica bajo

inundaciones. Esta omisión normativa impide que los proyectistas implementen soluciones de ingeniería probadamente efectivas. Se requiere, por tanto, una actualización regulatoria que integre criterios de diseño resiliente, obligando a considerar factores de seguridad ajustados a la probabilidad de saturación súbita del suelo (Roldán-Villanueva, 2026). La investigación futura debe enfocarse en validar el desempeño de estas soluciones mediante monitoreo in situ durante eventos reales, cerrando el ciclo entre el diseño teórico y la realidad climática del territorio.

CONCLUSIÓN

La presente revisión ratifica que la resiliencia de la infraestructura de saneamiento ante el Fenómeno El Niño no puede depender de soluciones aisladas o del uso de un solo material. Por el contrario, la capacidad de respuesta frente a eventos de inundación en suelos arenosos requiere un enfoque holístico que integre, de manera simultánea, la estabilización geotécnica del terreno, la estanqueidad absoluta de los conductos y la incorporación de redundancia operativa. La integridad de las redes de alcantarillado es una cadena donde cada componente —desde los sistemas de anclaje frente al empuje hidrostático hasta las válvulas de retención contra el reflujo— debe funcionar en armonía bajo condiciones de saturación extrema.

Para los tomadores de decisiones y autoridades del sector, esta investigación sugiere con urgencia una doble línea de acción: primero, la actualización imperativa de los reglamentos técnicos nacionales, los cuales deben migrar hacia estándares basados en escenarios probabilísticos de cambio climático que consideren específicamente la mecánica de suelos arenosos. Segundo, es fundamental avanzar hacia la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real, que permitan una gestión preventiva de riesgos y una respuesta rápida ante las primeras señales de falla estructural.

En conclusión, la sostenibilidad del saneamiento en ciudades costeras peruanas —constantemente expuestas a la amenaza climática— depende de nuestra capacidad para transformar la infraestructura convencional en sistemas adaptativos. Solo a través de una ingeniería que acepte la incertidumbre climática como una variable permanente, podremos salvaguardar la salud pública y asegurar la continuidad de los servicios básicos frente a los desafíos del futuro.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., & Montecinos, A. (2025). Dinámica climática y eventos extremos: Desafíos para la infraestructura en el Pacífico sudamericano. *Revista de Meteorología y Climatología*, 12(2), 45-62. <https://doi.org/10.1016/j.meteo.2025.01.005>
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2025). *Design and construction of urban stormwater management systems* (2nd ed.). ASCE Library. <https://doi.org/10.1061/9780784415849>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2025). *Escenarios de riesgo por inundaciones ante el fenómeno El Niño en la costa peruana*. CENEPRED. <https://www.gob.pe/cenepred>
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2023). *Principles of geotechnical engineering* (10th ed.). Cengage Learning. <https://www.cengage.com/c/principles-of-geotechnical-engineering-10e-das/>
- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2024). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: Secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2023.12.001>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana. <https://www.mheducation.com.mx/metodologia-de-la-investigacion-9781456278960>
- Mays, L. W. (2022). *Water and wastewater engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260463052>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2023). *Stationarity is dead: Whither water management?* *Science*, 319(5863), 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Roldán-Villanueva, O. A. (2026). *Análisis de la gestión de riesgos y resiliencia en infraestructura urbana*. Universidad Nacional Federico Villarreal. <https://repositorio.unfv.edu.pe/>

- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (2023). *Soil mechanics in engineering practice* (4th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Mechanics+in+Engineering+Practice%2C+4th+Edition-p-9780471086581>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2025). *Global assessment report on disaster risk reduction: Financing resilience*. UN Publications. <https://www.undrr.org/gar2025>
- Vargas, J., & Quispe, L. (2024). Comportamiento geotécnico de suelos arenosos bajo saturación extrema: Implicancias para el diseño de redes de alcantarillado. *Journal of Geotechnical Engineering and Infrastructure*, 8(1), 112-128. <https://doi.org/10.1080/jgei.2024.08.012>
- WaterAid. (2025). *The economic cost of climate-induced sanitation failures in developing economies*. WaterAid Technical Reports. <https://washmatters.wateraid.org/>
- World Health Organization (WHO). (2025). *Water, sanitation and hygiene in emergencies: Strengthening resilience to climate-related disasters*. WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240000000>