

HERRAMIENTAS PARA MEJORAR LAS RESILIENCIA DE LAS INFRAESTRUCTURAS FRENTE A LOS RIESGOS GEOLÓGICOS

Josep Ma. Caba ⁽¹⁾, Josep Farré ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de nuevos desarrollos de SOLUTIOMA jm.caba@solutioma.com;
josep.farre@solutioma.com;

RESUMEN

Las infraestructuras viarias, así como las ciudades y otros espacios con aglomeraciones humanas se ven sometidas a los efectos del cambio climático, afectándolas en muy diversos aspectos, entre ellos en el incremento de eventos meteorológicos extremos tanto en ocurrencia como en intensidad. Las directivas y estudios asociados a estas afectaciones requieren de una mayor resiliencia de las infraestructuras frente a estos eventos, por ende, a los riesgos geológicos gravitacionales (RGG) asociados. Es por ello por lo que los actuales gestores de estas infraestructuras requieren de servicios que les permitan la gestión de sus activos geotécnicos (AG) mostrándose como herramientas de alto valor añadido las actuaciones proactivas de cara a una prevención avanzada en la Mitigación de los RGG y programas de mantenimiento aplicados en estos Activos Geotécnicos y los sistemas implantados así como los sistemas de monitorización para un seguimiento a tiempo real y una alerta temprana que permite hacer más eficiente su gestión encomendada.

Palabras Clave: Resiliencia de infraestructura, Activos geotécnicos, Digitalización, Gestión predictiva de activos, Gestión del riesgo climático

1. INTRODUCCIÓN:

En las últimas décadas, el incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos ha puesto en evidencia la creciente fragilidad de muchas infraestructuras críticas, en especial aquellas que conforman las redes de transporte terrestre. El cambio climático ha generado escenarios de alta incertidumbre donde episodios de lluvias torrenciales, sequías prolongadas, deslizamientos de ladera o eventos térmicos extremos se han vuelto más recurrentes e impredecibles (IPCC, 2022). Este contexto impacta directamente en la funcionalidad, seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras, afectando no solo su integridad estructural, sino también la movilidad, la conectividad y la capacidad de recuperación social y económica tras una disrupción.

Dentro del sistema viario, los activos geotécnicos —tales como taludes, terraplenes, estructuras de contención, y elementos de protección frente a deslizamientos o caídas de rocas— se posicionan como algunos de los elementos más sensibles al impacto de estas amenazas naturales. Su exposición directa al entorno físico, junto con su carácter extensivo y su limitada visibilidad técnica en muchos planes de mantenimiento, los convierte en puntos críticos de vulnerabilidad. Diversos estudios (PIARC, 2023; UNECE, 2024) han documentado cómo fallos localizados en taludes o estructuras de tierra pueden desencadenar cortes de vías, colapsos parciales, afectaciones a la seguridad vial e incluso accidentes graves.

Históricamente, la gestión de estos activos se ha basado en modelos reactivos y correctivos, con inspecciones visuales periódicas, intervenciones tras incidentes y escaso uso de datos sistematizados. Esta estrategia resulta cada vez más insuficiente ante la necesidad de anticipar y reducir el riesgo en un entorno cambiante y complejo. En este contexto, la transformación digital y la adopción de herramientas tecnológicas avanzadas ofrecen nuevas oportunidades para optimizar la gestión de la infraestructura geotécnica. Sistemas como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) permiten la monitorización continua y remota de parámetros clave (humedad, presión intersticial, deformaciones, inclinaciones, aceleraciones, temperatura,...), facilitando la generación de alertas tempranas ante desviaciones respecto a umbrales de seguridad. Por su parte, plataformas SaaS (Software as a Service) proporcionan entornos digitales para la recopilación, visualización y análisis de datos en tiempo real, así como para la trazabilidad de actuaciones, inspecciones, históricos de comportamiento y modelos predictivos. A estas herramientas se suman tecnologías emergentes como la fotogrametría UAV, la sensórica IoT, los gemelos digitales o los modelos de inteligencia artificial aplicados a predicción de eventos.

El potencial de estas tecnologías ha sido reconocido por diversos marcos normativos y metodológicos. La guía FORESEE (CWA 17819:2021) introduce el concepto de resiliencia funcional como la capacidad de una infraestructura para mantener su nivel de servicio antes, durante y después de un evento disruptivo. El marco de pruebas de estrés propuesto por la UNECE (2024) sugiere metodologías basadas en la simulación de amenazas y la evaluación de la recuperación funcional. A su vez, los informes técnicos de PIARC (2022; 2023) recogen experiencias y casos de estudio que demuestran cómo la información geotécnica integrada y el monitoreo inteligente contribuyen a mejorar la gestión del riesgo. Por otro lado, el proyecto europeo ReCharged, liderado por Mitoulis et al. (2021), ha desarrollado marcos de evaluación digital y herramientas de planificación resiliente que podrían trasladarse a la realidad operativa de los activos geotécnicos (*A stress-testing framework for evaluating the resilience of critical transport systems*). A pesar de estos avances, sigue existiendo una brecha importante entre la disponibilidad de estas tecnologías y su integración efectiva en los sistemas de gestión de infraestructuras, especialmente en el ámbito de los activos geotécnicos. La limitada digitalización, la fragmentación de los datos, la falta de indicadores estandarizados y las barreras organizativas dificultan su aplicación sistemática.

En este artículo se propone la siguiente hipótesis científica: *la integración de tecnologías digitales —particularmente sistemas SCADA y plataformas SaaS— permite mejorar de forma significativa la resiliencia de los activos geotécnicos en infraestructuras viarias, al optimizar su monitorización, análisis y gestión frente a eventos extremos*. Para validar esta hipótesis, se ha realizado un análisis crítico de literatura científica, guías técnicas y experiencias internacionales, con el fin de trasladar dichos avances al campo específico de los activos geotécnicos en el contexto del cambio climático y la digitalización.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se basa en una revisión documental, comparativa y crítica de marcos metodológicos internacionales, artículos científicos y guías técnicas publicadas en los últimos años en el ámbito de la resiliencia de infraestructuras, con especial énfasis en la gestión de activos geotécnicos en entornos sometidos a condiciones climáticas adversas. El enfoque metodológico adoptado permite integrar conocimientos técnicos y propuestas

normativas existentes, con el objetivo de **trasladar soluciones digitales al campo específico de los taludes y estructuras de contención.**

La metodología se ha estructurado en tres fases principales:

2.1 Revisión bibliográfica dirigida

Se ha llevado a cabo una **búsqueda sistemática y dirigida** de literatura científica y técnica especializada, orientada a identificar aquellas contribuciones que abordan:

- La evaluación de la **resiliencia funcional** de infraestructuras críticas
- El impacto del **cambio climático** en activos viarios
- El uso de tecnologías digitales como medio de adaptación y gestión predictiva

Las fuentes clave consultadas incluyen:

- **PIARC (2022, 2023):** los informes técnicos del Comité Técnico 4.3 ofrecen una recopilación de casos reales de fallos en estructuras de tierra, sistemas de monitoreo, propuestas de mantenimiento y criterios de evaluación cuantitativa de la resiliencia (ej. uso de entropía informacional). Incluyen indicadores técnicos como tasa de deformación, estado del drenaje y accesibilidad tras eventos extremos.
- **UNECE (2024):** el marco de pruebas de estrés para sistemas de transporte interior propone un enfoque iterativo, basado en la identificación de funciones críticas del sistema, la simulación de escenarios disruptivos y la valoración de la capacidad de respuesta. Su estructura es compatible con la lógica de gestión del riesgo en activos geotécnicos.
- **Guía metodológica FORESEE (CWA 17819:2021):** desarrolla el concepto de "nivel de servicio mínimo" y presenta una lógica funcional centrada en mantener el rendimiento aceptable de infraestructuras durante y después de una interrupción. Su aplicabilidad a sistemas de taludes radica en su estructura modular y su integración con herramientas digitales.
- **Proyecto ReCharged:** artículos de Mitoulis et al. (2021), Argyroudis y otros autores abordan la modelización de la resiliencia en infraestructuras lineales interdependientes (transporte-energía), el uso de sensores, gemelos digitales y tecnologías emergentes (IA, IoT) para cuantificar la resiliencia funcional. Su orientación práctica lo convierte en un modelo exportable al sector geotécnico.

2.2 Adaptación de los marcos al ámbito de los activos geotécnicos

El siguiente paso consistió en **reinterpretar y adaptar estos marcos teóricos al campo específico de los activos geotécnicos**, centrándose en su vulnerabilidad estructural y funcional frente a eventos como:

- lluvias intensas
- deslizamientos superficiales y profundos
- caída de rocas y procesos de reptación
- alteraciones hidrogeológicas

La adaptación metodológica incluye:

- Identificación de **factores críticos de vulnerabilidad**, como la inclinación del talud, características geotécnicas del terreno, condiciones de saturación, presencia de vegetación, nivel freático y episodios históricos de inestabilidad.
- Aplicación de **sistemas SCADA** a la monitorización continua de variables clave (p. ej., presión intersticial, inclinación, deformación, temperatura, humedad, aceleraciones, apertura de grietas). La integración de sensores conectados permite generar alertas automáticas y alimentar plataformas de gestión.
- Inclusión de **datos obtenidos mediante inspecciones sistemáticas**, realizadas por equipos multidisciplinares que combinan ingeniería civil, geología, medio ambiente y modelado de datos.
- Uso de **plataformas SaaS** para centralizar, almacenar, analizar y visualizar datos en tiempo real. Estas plataformas permiten generar históricos comparables, establecer umbrales de seguridad dinámicos y facilitar la comunicación entre técnicos y gestores de infraestructura.
- Evaluación de la **resiliencia estructural y funcional** mediante el uso de indicadores como la entropía informacional (Shannon, 1948), tal y como se propone en PIARC (2023), con el objetivo de cuantificar el grado de equilibrio entre múltiples dimensiones (técnica, económica, social, ambiental y operativa).

2.3 Comparación entre enfoques y síntesis operativa

Finalmente, se realizó una **comparación entre los distintos marcos** y metodologías, con el objetivo de identificar:

- **Coincidencias y principios metodológicos comunes**, como la robustez del sistema, su redundancia, su capacidad de recuperación y su adaptabilidad a cambios de contexto.
- **Recomendaciones específicas aplicables a activos geotécnicos**, en aspectos como el diseño geométrico adaptativo, sistemas de drenaje inteligente, selección de materiales resilientes y monitoreo basado en datos.
- **Limitaciones prácticas detectadas** en los marcos analizados, entre las que destacan la escasa implementación de tecnologías digitales en el ciclo completo de vida de los activos, y la falta de integración entre datos geotécnicos y plataformas de gestión de activos.

Esta comparación ha servido de base para **proponer una síntesis metodológica operativa**, que será desarrollada en los apartados siguientes del artículo, junto con las propuestas y resultados derivados del análisis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis exhaustivo de la literatura técnica y científica ha permitido identificar un conjunto coherente de conceptos, metodologías y herramientas aplicables para mejorar la resiliencia de los activos geotécnicos y la afectación en la resiliencia de las infraestructuras adyacentes mediante tecnologías digitales. A partir del estudio de marcos metodológicos como PIARC (2023), FORESEE (2021), UNECE (2024) y las publicaciones del proyecto ReCharged, se han extraído patrones comunes, indicadores relevantes y propuestas replicables. Los resultados se estructuran en cinco bloques: conceptualización técnica de

la resiliencia funcional, tecnologías aplicadas, métricas e indicadores cuantificables, barreras para la implementación práctica y síntesis operativa.

3.1. Conceptualización técnica de la resiliencia en activos geotécnicos

La resiliencia funcional en activos geotécnicos y sus infraestructuras adyacentes se refiere a la capacidad de estas estructuras para mantener o recuperar su nivel de servicio tras eventos disruptivos, como deslizamientos de tierra, erosión o lluvias extremas. Esta resiliencia depende no solo de factores estructurales, sino también de la gestión anticipativa, la monitorización, la planificación integrada y las actuaciones mediante la aplicación de sistemas de mitigación del riesgo. Este concepto también implica una visión sistémica de la infraestructura, considerando su rol dentro del corredor logístico o de transporte, y su interdependencia con otras infraestructuras críticas.

Entre los factores clave se encuentran las condiciones geomorfológicas del entorno, la calidad del drenaje, la evolución de la vegetación, las actuaciones de estabilización y la composición de los materiales del terreno. La guía PIARC (2023) identifica fallos típicos asociados a eventos extremos: erosión superficial, colapsos por presión intersticial, saturación del suelo, licuefacción y desprendimientos de rocas. Muchos de estos eventos presentan síntomas medibles antes del fallo, lo que refuerza la necesidad de una vigilancia inteligente, con sistemas de alerta temprana y evaluación continua del riesgo.

3.2. Tecnologías digitales aplicables y su efectividad demostrada

La integración de tecnologías digitales ha transformado el diagnóstico, la supervisión y la gestión de activos geotécnicos. Tres grandes familias de herramientas se han identificado como clave:

- **Sistemas SCADA:** permiten la monitorización en tiempo real mediante sensores geotécnicos (inclinómetros, piezómetros, termómetros, celdas de carga, sensores de humedad y acelerómetros). El informe de TECNALIA, en el marco del proyecto ReCharged, evidenció que el uso de SCADA permitió reducir el tiempo de respuesta ante eventos de lluvias intensas de 8 horas a solo 2, activando planes de contingencia antes del colapso de un talud. Esta tecnología se vuelve especialmente relevante en zonas de acceso difícil o con estructuras críticas.
- **Plataformas SaaS:** integran múltiples fuentes de datos (históricos, GIS, monitoreo en tiempo real, datos expertos tomados manualmente por equipos multidisciplinares) y permiten análisis cualitativos y predictivos. En FORESEE se documentan plataformas que combinan visualización 3D, análisis de vulnerabilidad y generación de escenarios de riesgo a futuro, lo que facilita la toma de decisiones de mantenimiento y diseño adaptativo.
- **Tecnologías emergentes:** el uso combinado de drones (UAV), LiDAR móvil e interferometría radar (InSAR) ha permitido generar modelos de deformación actualizados, evaluando desplazamientos milimétricos en laderas potencialmente inestables. ReCharged presenta un caso aplicado en Epiro (Grecia) con éxito en la predicción de movimientos de ladera, integrando estos datos en sistemas de planificación territorial y de respuesta rápida.

3.3. Métricas e indicadores de resiliencia aplicables

Un hallazgo relevante ha sido la viabilidad de cuantificar la resiliencia mediante indicadores objetivos. Entre ellos:

- Entropía informacional de Shannon: mide el grado de equilibrio entre dimensiones técnicas, sociales, económicas y ambientales. Utilizada en PIARC como proxy de la capacidad adaptativa del sistema, esta métrica permite identificar desequilibrios y priorizar refuerzos.
- Tiempo de recuperación funcional: periodo entre el evento disruptivo y la restauración de un nivel aceptable de servicio. Su medición permite evaluar la eficiencia del sistema de gestión postevento.
- Pérdida de rendimiento acumulada: expresada como la integral del déficit funcional en el tiempo. Se visualiza en FORESEE mediante curvas de degradación y recuperación funcional.
- Umbral de disfuncionalidad crítica: define el punto en que la infraestructura deja de cumplir su función mínima operativa, siendo un indicador clave para definir escenarios de intervención urgente.

3.4. Barreras para la implementación práctica

Pese al alto potencial, la implementación práctica presenta obstáculos:

- Fragmentación institucional: ingenieros civiles, responsables TIC y personal de mantenimiento operan de forma disgregada, dificultando la integración sistémica de datos.
- Limitaciones presupuestarias: muchos organismos públicos tienen presupuestos orientados al mantenimiento correctivo, sin partidas específicas para sensorica o digitalización.
- Falta de estándares comunes: no existe aún una norma ampliamente aceptada para la interoperabilidad de datos geotécnicos, impidiendo comparar resultados entre regiones o agencias.
- Resistencia organizativa: las nuevas tecnologías requieren cambios culturales, formación técnica continua y rediseño de procesos. PIARC (2023) señala que la gestión del cambio es tan crítica como la propia tecnología.
- Mantenimiento y escalabilidad: los sistemas de sensores requieren calibración y revisión periódica, lo cual representa un reto logístico en áreas remotas o con baja densidad poblacional.
- Mecanismos contractuales inadecuados: muchas administraciones, pese a contar con herramientas como la compra pública de innovación, encuentran dificultades para establecer contratos estables y plurianuales para servicios como la captación de datos geotécnicos en streaming.

3.5. Síntesis operativa y proyecciones futuras

Como resultado del análisis, se propone una síntesis operativa adaptada al ciclo de vida de los activos geotécnicos, que combine:

- Vigilancia continua con sensores conectados a sistemas SCADA.
- Trazabilidad, interoperabilidad y predicción mediante plataformas SaaS.
- Evaluación funcional con indicadores cuantitativos integrados en mapas de riesgo dinámicos.
- Mantenimiento adaptativo y planificación basada en escenarios de cambio climático y presión sobre la infraestructura.

Esta propuesta se alinea con el marco conceptual desarrollado en ReCharged, que promueve un enfoque de resiliencia basada en datos (data-informed resilience

management). La digitalización permite reducir costes a largo plazo, priorizar activos vulnerables, justificar intervenciones ante la administración y fomentar la transparencia con la ciudadanía.

A continuación, se incorpora una infografía síntesis del enfoque basado en tecnologías emergentes para la mejora de la resiliencia a lo largo del ciclo de vida de las infraestructuras, tal como ha sido planteado por los autores del proyecto ReCharged:

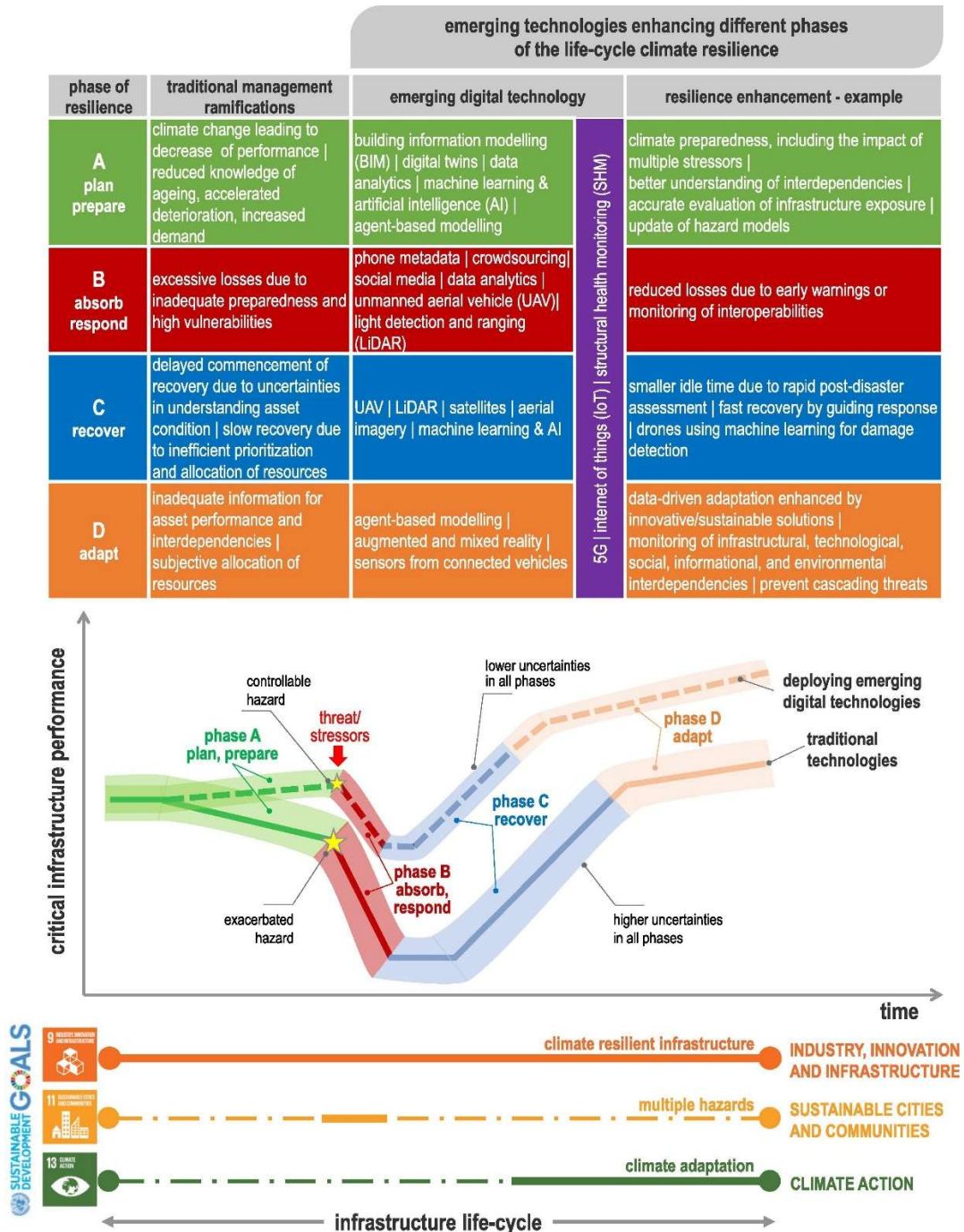


Figura 1: Tecnologías emergentes para la mejora de la resiliencia a lo largo del ciclo de vida de las infraestructuras, tal como ha sido planteado por los autores Mitoulis, Argyroudís et al. (2021) en el marco del proyecto ReCharged

4. CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido profundizar en el papel que pueden desempeñar las tecnologías digitales en la mejora de la resiliencia de las infraestructuras viarias, con especial atención a los activos geotécnicos. A partir del análisis crítico de marcos metodológicos internacionales, proyectos de referencia como ReCharged y diversas experiencias prácticas documentadas, se ha validado la hipótesis científica formulada: la integración de tecnologías como los sistemas SCADA y las plataformas SaaS contribuye de manera significativa a optimizar la monitorización, la anticipación del riesgo y la gestión de activos vulnerables frente a fenómenos climáticos extremos.

Los resultados permiten extraer varias conclusiones clave:

1. La resiliencia de los activos geotécnicos debe entenderse de forma funcional, dinámica y sistémica, considerando tanto sus condiciones físicas como su papel dentro de redes de transporte interdependientes. En este sentido, factores como el drenaje, la pendiente, el material del terreno o la cobertura vegetal deben integrarse en esquemas de evaluación continuada y no solo puntual.
2. La digitalización aplicada al ciclo de vida de estos activos habilita nuevas capacidades operativas. Los sistemas SCADA proporcionan información en tiempo real sobre variables críticas; las plataformas SaaS permiten visualizar, gestionar y anticipar comportamientos estructurales; y tecnologías como UAVs, LiDAR o sensores conectados facilitan el diagnóstico avanzado y la actualización constante de los modelos geotécnicos.
3. Existen métricas ya disponibles para cuantificar la resiliencia, como el tiempo de recuperación funcional, el umbral de disfuncionalidad crítica o la entropía informacional. Estas herramientas permiten priorizar intervenciones, justificar inversiones y mejorar la planificación del mantenimiento.
4. La implementación práctica requiere superar diversas barreras organizativas, técnicas y económicas. Entre ellas, destaca la fragmentación entre disciplinas, la falta de estándares interoperables, la resistencia institucional al cambio y la necesidad de inversión inicial en infraestructura digital. Superarlas requiere enfoques integrados, contratos innovadores y políticas públicas específicas.
5. Los marcos metodológicos internacionales ofrecen una base sólida para avanzar hacia una gestión basada en resiliencia, especialmente si se adaptan al contexto específico de los activos geotécnicos. La experiencia de proyectos como ReCharged demuestra que la aplicación de este enfoque no solo es viable, sino que genera beneficios tangibles en términos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

En conjunto, este trabajo propone un cambio de paradigma: pasar de una gestión correctiva y reactiva de los activos geotécnicos, a una gestión digital, predictiva y resiliente. Para ello, resulta esencial fomentar la colaboración interinstitucional, la formación técnica en nuevas tecnologías, el uso de datos interoperables y la incorporación progresiva de estas herramientas en los contratos de conservación y explotación.

Como líneas futuras de trabajo, se recomienda desarrollar pilotos en corredores vulnerables, establecer estándares de interoperabilidad para sensores y datos geotécnicos, e integrar estos enfoques en los planes de adaptación al cambio climático y de seguridad vial.

6. REFERENCIAS

- Argyroudis, S., Mitoulis, S., Hofer, L., & Hutchinson, B. (2022). *Road Infrastructure Resilience Assessment Framework (ReCharged Project)*. Retrieved from <https://www.infrastructuresilience.com/recharged/>
- Guía FORESEE (2021). **CWA 17819:2021**. *Guideline for improving the resilience of transport infrastructure to extreme weather events*. Brussels: CEN Workshop Agreement.
- Mitoulis, S. A., Argyroudis, S. A., & Kappos, A. J. (2021). *A stress-testing framework for evaluating the resilience of critical transport systems*. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102526. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102526>
- PIARC. (2022). *Resilience of Road Network to Climate Change: Technical Report 2022R44EN*. World Road Association. Retrieved from <https://www.piarc.org/>
- PIARC. (2023). *Increasing Resilience of Earth Structures against Natural Hazards: Technical Report 2023R54EN*. World Road Association.
- TECNALIA & ReCharged Project. (2023). *Digital tools and resilience strategies for critical infrastructure*. Retrieved from <https://www.infrastructuresilience.com/recharged/>
- UNECE. (2024). *Climate Resilience Framework for Inland Transport Systems – Guidelines and Methodology*. United Nations Economic Commission for Europe.
- Shannon, C. E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

