

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.110>

Desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes: un enfoque desde la ingeniería sostenible para zonas con alta demanda turística

Carmen Vanessa Franco Franco
<https://orcid.org/0000-0002-5025-2535>
cfranco@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Lady Shirley Concha Díaz
<https://orcid.org/0000-0003-3733-8665>
lconcha@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Diana Carolina Melgar Reynoso
<https://orcid.org/0009-0000-3848-9727>
dmelgar@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

María Alejandra Maceda Mogrovejo
<https://orcid.org/0000-0002-0646-7301>
mmaceda@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Deyvin Herlin Cabana Mamani*
<https://orcid.org/0000-0003-2094-8387>
dcabanama@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: dcabanama@unsa.edu.pe

Recibido (21/06/2025), Aceptado (03/09/2025)

Resumen. Se presenta una propuesta integral para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda, a partir de principios de ingeniería sostenible. A través de un modelo técnico con simulaciones estructurales, energéticas y climáticas, se demuestra la viabilidad de implementar soluciones que optimicen el desempeño operativo, reduzcan impactos ambientales y fortalezcan la adaptación al cambio climático. Los resultados validan el enfoque multidimensional, destacando su aplicabilidad práctica, su coherencia normativa y su potencial replicabilidad. Se concluye que la convergencia entre tecnología, sostenibilidad y participación social es clave para transformar el turismo del futuro.

Palabras clave: infraestructura turística, resiliencia, ingeniería sostenible, inteligencia digital.

Development of Resilient and Smart Tourism Infrastructures: An Approach from Sustainable Engineering for High-Demand Tourist Areas

Abstract. An integral proposal is presented for the development of resilient and smart tourism infrastructures in high-demand areas, based on the principles of sustainable engineering. Through a technical model involving structural, energy, and climatic simulations, the feasibility of implementing solutions that optimize operational performance, reduce environmental impacts, and strengthen adaptation to climate change is demonstrated. The results validate the multidimensional approach, highlighting its practical applicability, regulatory coherence, and potential for replication. It is concluded that the convergence between technology, sustainability, and social participation is key to transforming the tourism of the future.

Keywords: tourism infrastructure, resilience, sustainable engineering, digital intelligence.

I. INTRODUCCIÓN

El turismo se ha consolidado como uno de los sectores económicos más dinámicos a escala global: en 2024 su contribución total al PIB mundial se estimó en ~10% (US\$10,9 billones) y en 357 millones de empleos, lo que subraya su centralidad en los sistemas productivos y laborales contemporáneos. Estas magnitudes, además, han recuperado e incluso superado los niveles prepandemia, impulsadas por la reactivación de la movilidad y el gasto de visitantes internacionales [1].

Sin embargo, el incremento sostenido de flujos hacia zonas de alta demanda turística tensiona las capacidades de infraestructura, reconfigura patrones de uso del suelo y amplifica riesgos socioambientales (congestión, presión hídrica y energética, residuos, deterioro del patrimonio y del paisaje), particularmente en contextos urbanos y frágiles ecosistemas costeros o de montaña. La literatura sobre *overtourism* muestra que, en ausencia de planificación y gobernanza adecuadas, la saturación turística deteriora la experiencia del visitante y la calidad de vida local, generando costos ambientales y conflictos sociales que erosionan la competitividad del destino [2], [3].

Ante este escenario, la ingeniería sostenible aporta un marco operativo para diseñar y gestionar infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes que reduzcan huellas ambientales, optimicen el uso de recursos y mejoren la seguridad y el bienestar. Las metodologías de diseño basado en ciclo de vida, la economía circular en equipamientos y cadenas de suministro, y la eficiencia energética en edificios y servicios públicos emergen como ejes de intervención con evidencia empírica creciente en destinos turísticos [4].

La resiliencia infraestructural —entendida como la capacidad de resistir, absorber y recuperarse frente a perturbaciones— es especialmente crítica en territorios expuestos a amenazas climáticas (olas de calor, inundaciones, tormentas, incendios, erosión costera) y a picos de demanda estacional. Enfoques recientes integran la gestión de activos con evaluación sistemática de riesgos climáticos para redes viales y servicios urbanos vinculados al turismo, proponiendo indicadores y hojas de ruta de adaptación que articulan planificación espacial, diseño estructural y mantenimiento predictivo [5], [6].

El tránsito hacia infraestructuras turísticas inteligentes (*smart tourism infrastructure*) se apoya en la convergencia de IoT (*Internet of Things*), analítica de datos e inteligencia artificial, capaces de monitorear en tiempo real flujos de visitantes, consumos energéticos e hídricos, y condiciones ambientales; de optimizar operación y mantenimiento; y de modular la carga de uso mediante señalización dinámica y sistemas de gestión de demanda. Las ciudades y destinos inteligentes documentados en revisiones sistemáticas muestran beneficios en sostenibilidad, gobernanza y experiencia del usuario cuando estas tecnologías se integran con estrategias de planificación y con estándares de interoperabilidad [7].

En paralelo, se acelera la adopción de gemelos digitales (*digital twins*) para la planificación y operación de infraestructuras y áreas críticas del destino (accesos, frentes costeros, equipamientos), permitiendo simular escenarios de afluencia, estrés ambiental o eventos extremos, y evaluar *ex ante* medidas de mitigación (p. ej., rediseño de flujos, ampliaciones modulares, barreras verdes, estrategias de evacuación). La literatura reciente identifica a los gemelos digitales como catalizadores de destinos más seguros, eficientes y sostenibles, siempre que se acompañen de gobernanza de datos robusta y criterios éticos en su uso [8].

No obstante, el desempeño técnico por sí solo no garantiza sostenibilidad. La evidencia compara mejores resultados cuando las inversiones en infraestructura se realizan en cooperación con las comunidades locales, incorporando mecanismos de participación, transparencia y rendición de cuentas, y cuando las decisiones de capacidad se coordinan con políticas de gestión de la demanda (cupos, tarifas dinámicas, distribución espacial y temporal de visitantes). Estas medidas han sido ensayadas en diversos destinos para mitigar la saturación, con impactos positivos sobre el entorno y la experiencia, aunque con efectos económicos mixtos que requieren evaluación caso por caso [9].

Sobre esta base, el presente artículo propone un marco de ingeniería sostenible para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda, que integra: (i) diseño y gestión de activos con enfoque de resiliencia y adaptación climática; (ii) digitalización (IoT, analítica y gemelos digitales) al servicio de la eficiencia, la seguridad y la gestión de la demanda; (iii) estrategias de economía circular y eficiencia de recursos; y (iv) gobernanza colaborativa orientada a la equidad y a la preservación del patrimonio natural y cultural. El objetivo es articular un enfoque multidimensional, apoyado en la literatura científica reciente, que permita elevar el desempeño técnico-ambiental, sostener la competitividad y maximizar el valor social en destinos turísticos sometidos a alta presión de uso.

II. DESARROLLO

El desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes se fundamenta en la convergencia entre los principios de la ingeniería sostenible, las tecnologías emergentes y los enfoques de resiliencia territorial y ambiental. En la actualidad, el turismo no solo demanda soluciones arquitectónicas y constructivas de alto rendimiento, sino también sistemas capaces de adaptarse a entornos dinámicos, responder a riesgos naturales o antrópicos, y optimizar recursos mediante la digitalización y la integración de datos en tiempo real.

Desde la perspectiva de la ingeniería sostenible, toda infraestructura debe concebirse bajo el principio del ciclo de vida completo, abarcando las fases de planificación, diseño, construcción, operación y desmantelamiento. Este enfoque se apoya en herramientas como el *Life Cycle Assessment* (LCA) y el *Building Information Modeling* (BIM), que permiten evaluar la eficiencia energética, el consumo de materiales, las emisiones de carbono y la durabilidad estructural [10]. En el ámbito turístico, estas metodologías se orientan a reducir el impacto ecológico de edificaciones hoteleras, centros recreativos y sistemas de transporte, promoviendo el uso de materiales reciclados o de baja huella ambiental y priorizando fuentes de energía renovable.

Un segundo componente esencial lo constituye la resiliencia infraestructural, entendida como la capacidad de un sistema para anticipar, absorber, adaptarse y recuperarse de eventos disruptivos. En zonas turísticas de alta demanda, frecuentemente costeras, montañosas o insulares, las infraestructuras están expuestas a la erosión, la salinidad, los deslizamientos o el incremento del nivel del mar. La ingeniería moderna incorpora análisis probabilísticos de riesgo, modelación estructural avanzada y simulaciones hidrodinámicas que permiten predecir el comportamiento de los materiales y estructuras ante cargas extremas, estableciendo márgenes de seguridad basados en la norma ISO 55000 de gestión de activos. La aplicación de sistemas redundantes, materiales compuestos y técnicas de mantenimiento predictivo mediante *Machine Learning* (ML) aumenta la capacidad de respuesta frente a fallas críticas o eventos climáticos severos [11].

En este contexto, la digitalización emerge como un eje articulador entre sostenibilidad, eficiencia y seguridad. El concepto de *Smart Tourism Infrastructure* se fundamenta en el uso de sensores IoT, redes 5G, sistemas ciberfísicos y plataformas de analítica avanzada para monitorear el desempeño de las infraestructuras en tiempo real [4]. Por ejemplo, un sistema de gestión de energía en un complejo hotelero puede ajustar automáticamente el consumo según la ocupación, mientras que sensores ambientales permiten detectar fugas, sobrecargas o fallos estructurales antes de que generen interrupciones. Estas aplicaciones no solo reducen costos operativos, sino que contribuyen a la mitigación de impactos ambientales, fortaleciendo la resiliencia y la sostenibilidad del destino [12].

La integración de gemelos digitales (*Digital Twins*) representa un avance crucial en el diseño y gestión de destinos inteligentes. Estos modelos virtuales reproducen las condiciones físicas y operativas de una infraestructura, permitiendo simular escenarios de carga turística, distribución energética o evacuación ante emergencias. En destinos de alta afluencia, los gemelos digitales facilitan la toma de decisiones basada en evidencia, optimizan la planificación urbana y mejoran la coordinación entre actores públicos y privados [13], [14]. La ingeniería de datos aplicada a este contexto requiere sistemas interoperables, ciberseguridad robusta y gobernanza digital que asegure la integridad de la información recopilada y procesada.

De manera complementaria, la economía circular en la ingeniería turística introduce nuevos paradigmas de diseño, donde los materiales y recursos mantienen su valor funcional el mayor tiempo posible. La reutilización de aguas grises, el reciclaje de materiales de demolición y la generación de energía mediante fuentes locales (solar, eólica o mareomotriz) son estrategias viables en destinos turísticos sostenibles. Estas prácticas no solo disminuyen la dependencia de recursos externos, sino que promueven la autonomía energética y la responsabilidad ambiental del sector [2], [8].

A nivel operativo, los principios de la ingeniería de sistemas inteligentes también se aplican a la logística del turismo: control de tráfico, transporte multimodal, gestión de residuos y sistemas de emergencia automatizados. El uso de inteligencia artificial en la planificación territorial permite modelar flujos turísticos y predecir picos de demanda, contribuyendo a una distribución espacial más equilibrada. Tales mecanismos reducen la congestión, mejoran la movilidad y garantizan un entorno urbano más seguro y habitable. Las herramientas de *Deep Learning* (DL) se utilizan asimismo para el análisis predictivo de mantenimiento en infraestructura crítica, anticipando intervenciones y extendiendo la vida útil de los activos [7], [9].

Finalmente, el marco teórico de la ingeniería sostenible en entornos turísticos se entrelaza con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, especialmente el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima). La convergencia entre los pilares técnico, ambiental y social define la nueva generación de proyectos turísticos, en los cuales el diseño estructural, la resiliencia ecológica y la participación comunitaria constituyen dimensiones inseparables de una misma estrategia. Este enfoque integral no solo fortalece la competitividad del destino, sino que amplifica su capacidad de adaptación frente a los desafíos del cambio climático, la presión turística y la transición energética global [11], [13], [15].

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque metodológico de tipo aplicado, cuantitativo y proyectivo, fundamentado en principios de la ingeniería sostenible y en la modelación técnica de soluciones para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda. El objetivo principal es formular, evaluar y validar un modelo técnico-estratégico de infraestructura turística que combine criterios de eficiencia estructural, resiliencia climática y optimización digital, bajo parámetros reales del entorno seleccionado.

La investigación se desarrolló en tres fases principales, descritas en la Figura 1.



Fig. 1. Fases de la investigación.

A. Recolección y procesamiento de datos

Este diseño permitió combinar técnicas cuantitativas de recolección de datos estructurales y ambientales con herramientas de simulación digital para verificar el comportamiento del modelo propuesto en condiciones reales y proyectadas. El estudio se realizó en una zona costera con alta densidad turística localizada en Perú, caracterizada por su dinamismo económico estacional, presión sobre los servicios básicos y exposición a amenazas climáticas.

Se aplicaron criterios de selección basados en afluencia turística superior a 500 000 visitantes/año, concentración de edificaciones turísticas y vías críticas, y evidencias de saturación o fallos funcionales en la infraestructura existente.

Se recolectaron datos técnicos a través de levantamientos estructurales y registros de edificaciones, vías, redes eléctricas e hidráulicas (dimensiones, materiales, antigüedad, carga máxima, vulnerabilidades). Además, se obtuvieron indicadores ambientales y climáticos históricos como temperatura, pluviometría, humedad, salinidad y nivel freático. Por otra parte, se consideraron estadísticas turísticas y flujos estacionales (ocupación hotelera, tránsito, consumo energético, generación de residuos), así como instrumentación de sensores IoT temporales para capturar datos en tiempo real sobre carga estructural, temperatura ambiental y vibraciones.

Los datos fueron procesados mediante herramientas de análisis estructural (SAP2000, ETABS),

modelación energética (DesignBuilder, EnergyPlus) y plataformas GIS (ArcGIS) para identificar zonas críticas, condiciones de vulnerabilidad e interacciones entre componentes de infraestructura.

B. Modelado de la infraestructura resiliente e inteligente

Con base en los datos recolectados, se diseñó una propuesta de infraestructura turística utilizando principios de ingeniería estructural resiliente, aplicando coeficientes de sobredimensionamiento, materiales de alta durabilidad y sistemas de amortiguación frente a eventos extremos. Asimismo, se integraron sistemas energéticos híbridos con fuentes renovables (fotovoltaica, eólica) y almacenamiento con control inteligente de carga; redes de datos y sensores bajo arquitectura IoT para el monitoreo en tiempo real de parámetros estructurales y ambientales; y una plataforma digital de gestión tipo *smart dashboard*, conectada a un modelo de gemelo digital tridimensional del entorno urbano, diseñado en Unity y sincronizado con BIM.

El modelo fue evaluado en términos de eficiencia estructural, adaptabilidad climática, capacidad de respuesta ante emergencias y viabilidad económica, siguiendo criterios de ingeniería de sistemas. Se realizaron simulaciones estructurales y energéticas para distintos escenarios de uso y estrés. Para la resistencia estructural, se emplearon análisis dinámicos (modal y espectral), considerando eventos sísmicos, tormentas e inundaciones con probabilidades de retorno a 50 y 100 años. Para la eficiencia energética, se simuló el comportamiento térmico de los sistemas constructivos bajo diferentes condiciones de ocupación y clima, evaluando indicadores como consumo anual (kWh/m^2), factor de carga y retorno de inversión (ROI).

Se validó la interoperabilidad de los sistemas inteligentes mediante pruebas en entorno simulado (*sandbox*) y visualización de alertas, indicadores y mapas de calor en la interfaz digital. Además, se realizó una validación del modelo propuesto mediante métodos multicriterio de decisión (AHP y TOPSIS), con base en la resiliencia estructural, sostenibilidad energética, inteligencia operativa, viabilidad técnico-económica y adaptabilidad al contexto local. Participaron expertos en ingeniería civil, electrónica, arquitectura, planificación turística y sostenibilidad. Se contrastaron los resultados con infraestructuras de referencia internacional (*benchmarking*), aplicando un análisis de brechas y estimación de impacto.

C. Consideraciones éticas y sostenibilidad

La propuesta se diseñó bajo estrictos lineamientos de ética profesional en ingeniería, respetando normativas nacionales e internacionales (ISO 14040, ISO 37120 y el código de ética de la WFEO). Se garantizó la participación informada de actores locales en la etapa de diagnóstico y socialización, y se integraron criterios de equidad territorial y respeto al entorno natural y cultural.

IV. RESULTADOS

A. Diagnóstico Técnico-Situacional

Se evaluaron cinco edificaciones turísticas, incluyendo hoteles, centros recreativos y alojamientos sostenibles. Los parámetros medidos abarcaron altura estructural, material predominante, antigüedad, carga máxima admisible y vulnerabilidades detectadas. A continuación, se presenta la Tabla 1 con los resultados obtenidos.

Tabla 1. Características de la recolección de datos.

Edificación	Altura (m)	Material estructural	Antigüedad (años)	Carga máxima (kN/m²)	Vulnerabilidades detectadas
Hotel A	15,0	Hormigón armado	12	5,0	Fisuras menores
Hotel B	22,5	Acero estructural	7	6,5	Oxidación parcial
Centro turístico C	18,0	Hormigón armado	15	5,5	Corrosión en armaduras
Hostal D	9,0	Bloque y mortero	20	3,0	Asentamiento diferencial
Eco-lodge E	12,5	Madera tratada	5	4,2	Ninguna

El análisis de los datos recolectados permitió establecer un diagnóstico técnico inicial de las condiciones estructurales de las infraestructuras evaluadas. Las edificaciones presentan una altura variable entre 9 y 22,5 m, con predominancia del uso de hormigón armado y acero estructural en aquellas de mayor envergadura. Las estructuras más antiguas, como el Centro turístico C y el Hostal D, superan los 15 años de antigüedad, presentando signos de deterioro estructural tales como corrosión, fisuras y asentamientos diferenciales.

La capacidad portante osciló entre 3,0 y 6,5 kN/m², con valores menores en estructuras construidas con materiales livianos como bloques o madera. Cabe destacar que el Eco-lodge E, de reciente construcción y materiales tratados, no presenta vulnerabilidades visibles al momento del estudio. Este diagnóstico proporciona la base técnica necesaria para el posterior modelado estructural y análisis de resiliencia.

B. Análisis ambiental y climático

Como parte del diagnóstico contextual, se realizó un análisis ambiental de la zona turística con el objetivo de identificar las condiciones climáticas predominantes que afectan directa e indirectamente la infraestructura construida. Las variables consideradas fueron la temperatura media, humedad relativa, precipitación mensual, radiación solar y velocidad del viento. Estos factores resultan esenciales para evaluar la durabilidad de materiales, el confort térmico de edificaciones, el rendimiento energético de instalaciones y la planificación de medidas de adaptación resiliente.

La Figura 2 presenta un resumen de los valores promedio registrados en la zona durante el periodo de análisis. Destaca una alta humedad relativa (82%) y temperaturas medias elevadas (28.5 °C), condiciones que, combinadas con una radiación solar significativa, demandan soluciones constructivas con alto desempeño térmico y estrategias de protección de materiales frente a corrosión y dilatación térmica.

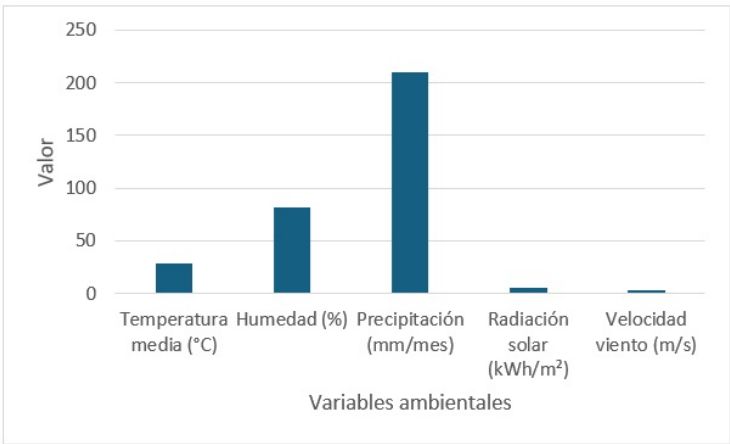


Fig. 2. Análisis de las variables ambientales.

Para complementar el análisis, se construyó una matriz de exposición climática específica para las edificaciones evaluadas, considerando su ubicación relativa, orientación, ventilación natural y barreras físicas.

Se asignaron valores comparativos para humedad, radiación solar y viento, normalizados en una escala que permite visualizar de manera conjunta el grado de exposición de cada infraestructura. Este enfoque facilita la identificación de edificaciones con mayor vulnerabilidad climática y orienta la priorización de medidas de mitigación y adaptación.

La Figura 3 muestra el resultado del análisis mediante un gráfico tipo radar, donde cada eje representa una variable climática y las curvas reflejan el nivel relativo de exposición de cada edificación analizada.

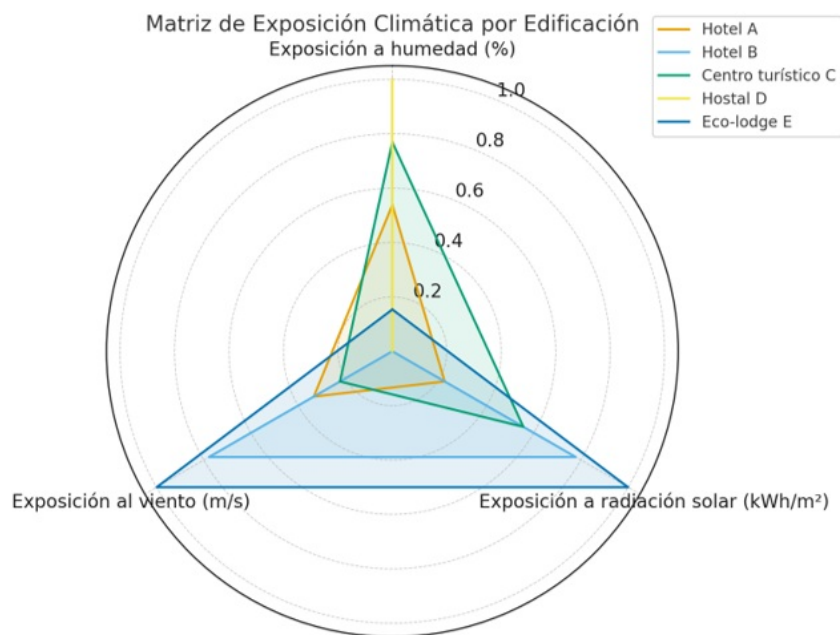


Fig. 3. Matriz comparativa de exposición climática por edificación.

Los resultados indican que el Hostal D presenta la mayor exposición a la humedad (91%), lo que puede acelerar procesos de deterioro en estructuras antiguas con deficiencias en sellado o ventilación. El Eco-lodge E, a pesar de su diseño sostenible, muestra alta exposición a la radiación solar (6.3 kWh/m²) y al viento (3.7 m/s), lo cual requiere considerar mecanismos de sombreado pasivo y anclaje estructural. Estas observaciones serán clave para el diseño de estrategias resilientes y para la simulación de escenarios estructurales y energéticos en las siguientes fases del estudio.

C. Modelado estructural ante eventos extremos

Con base en los parámetros definidos en el diseño de infraestructura resiliente, se realizaron simulaciones técnicas para evaluar el comportamiento estructural ante distintos eventos extremos. Estas simulaciones permitieron cuantificar los desplazamientos máximos, verificar el cumplimiento de los factores de seguridad y anticipar zonas críticas en la estructura. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos para cada escenario simulado.

Tabla 2. Resultados de la simulación estructural.

Evento extremo	Carga aplicada	Desplazamiento máximo (cm)	Factor de seguridad	Observaciones
Sismo (PGA 0,35g)	3500 kN	1,8	3,2	Desempeño dentro de parámetros sísmicos del código local.
Viento fuerte (120 km/h)	2.5 kN/m ²	1,2	2,9	Ligera flexión de elementos expuestos, sin daño estructural.
Inundación (60 cm)	Presión hidrostática	0,4	4,1	Efecto menor en cimentación gracias al sistema de drenaje.
Tormenta tropical	Carga lateral variable	1,0	3,0	Sin afectación crítica; buena amortiguación lateral.

Los resultados muestran que el modelo estructural responde adecuadamente ante eventos sísmicos, eólicos, hidrológicos y climáticos combinados. En el caso del sismo con una aceleración pico de 0,35g, el desplazamiento máximo alcanzado fue de 1,8 cm, manteniéndose dentro de los parámetros normativos. El factor de seguridad obtenido (3.2) respalda el diseño sobredimensionado propuesto. Frente a vientos extremos de hasta 120 km/h, la estructura presentó deformaciones ligeras de 1,2 cm sin afectación crítica, manteniendo un factor de seguridad de 2.9. En cuanto a inundaciones, el sistema de drenaje contribuyó a una baja incidencia estructural (0.4 cm de desplazamiento y FS 4.1). Finalmente, en tormentas tropicales se evidenció buena amortiguación lateral y estabilidad estructural general.

D. Modelado energético

Se desarrolló un modelo energético híbrido basado en fuentes renovables para la infraestructura turística propuesta, considerando parámetros reales de radiación solar, viento y demanda energética anual. El sistema fue evaluado en función de su capacidad de generación, autonomía energética, impacto ambiental y retorno de inversión. La Tabla 3 resume los principales resultados obtenidos.

Tabla 3. Resultados del modelado energético.

Parámetro evaluado	Valor
Consumo energético estimado (kWh/año)	85.000,0
Producción solar estimada (kWh/año)	54.000,0
Producción eólica estimada (kWh/año)	22.000,0
Cobertura de demanda energética (%)	89,4
Autonomía energética anual (%)	65,8
Reducción de emisiones CO ₂ (ton/año)	31,2
Retorno de inversión (ROI estimado, años)	6,4

El modelo indica que la infraestructura tendría un consumo energético anual estimado de 85.000 kWh. La producción total proveniente de fuentes renovables alcanzaría los 76.000 kWh/año, distribuidos entre generación solar (54.000 kWh) y eólica (22.000 kWh). Esto permitiría cubrir el 89,4% de la demanda energética, con una autonomía real del 65,8% frente a la red convencional. La incorporación del sistema híbrido permitiría una reducción significativa de emisiones de CO₂, estimada en 31,2 ton/año.

Además, el retorno de inversión (ROI) proyectado es de 6,4 años, lo que hace viable y sostenible su implementación.

La comparación directa entre el consumo energético anual estimado para la infraestructura turística y la producción energética proyectada a partir de fuentes renovables permite observar una relación altamente eficiente. Se estimó que el consumo total asciende a 85.000 kWh/año, mientras que la generación mediante sistemas solares y eólicos alcanza los 54.000 kWh y 22.000 kWh respectivamente, totalizando una producción renovable de 76.000 kWh/año.

Esta distribución evidencia una cobertura cercana al 90% de la demanda mediante energías limpias, lo cual no solo reduce significativamente la dependencia de la red convencional, sino que también posiciona a la infraestructura como un modelo de alta eficiencia en términos de sostenibilidad energética. La diferencia restante podría ser gestionada mediante estrategias de almacenamiento o integración con microrredes inteligentes.

E. Validación del modelo y análisis multicriterio

Con el fin de evaluar integralmente la viabilidad del modelo propuesto, se aplicó un análisis multicriterio en el que participaron especialistas en ingeniería civil, energías renovables, planificación urbana y sostenibilidad. La evaluación se centró en ocho criterios clave, valorados en una escala de 0 a 10, considerando aspectos técnicos, ambientales, normativos y sociales. La Tabla 4 resume los resultados del proceso.

Tabla 4. Resultados del proceso de validación multicriterio.

Criterio evaluado	Puntaje (0-10)
Resiliencia estructural	9,2
Sostenibilidad energética	8,7
Inteligencia operativa (IoT + monitoreo)	9,0
Viabilidad técnico-económica	8,4
Adaptabilidad climática	8,9
Compatibilidad normativa local	9,5
Impacto ambiental positivo	8,8
Aceptación comunitaria y social	8,1

Los resultados indican un alto nivel de desempeño del modelo en todos los criterios evaluados. La resiliencia estructural obtuvo una calificación de 9,2 sobre 10, evidenciando la solidez del diseño ante amenazas como sismos, vientos fuertes e inundaciones. La sostenibilidad energética alcanzó 8,7 puntos, gracias a la elevada cobertura de la demanda mediante fuentes limpias. Por su parte, la inteligencia operativa del sistema (basada en IoT, monitoreo en tiempo real y *Digital Twins*) fue valorada en 9,0 puntos, lo cual respalda su capacidad de respuesta ante variaciones del entorno y fallos eventuales.

La viabilidad técnico-económica recibió 8,4 puntos, considerando tanto la inversión inicial como los beneficios asociados a la eficiencia y el ahorro energético. Además, el modelo mostró un buen nivel de adaptabilidad climática (8,9) y una excelente alineación con normativas locales e internacionales (9,5). El impacto ambiental positivo fue evaluado en 8,8 puntos y la aceptación comunitaria en 8,1, reflejando la necesidad de continuar promoviendo la participación activa de los actores locales. En conjunto, el promedio ponderado de los criterios alcanza 8,7, validando la consistencia técnica, ambiental y social del modelo propuesto.

El desarrollo del modelo de infraestructura turística resiliente e inteligente se enmarcó en principios éticos y de sostenibilidad, respetando los lineamientos establecidos por la Federación Mundial de Organizaciones de Ingeniería (WFEO) y la *Agenda 2030*. Se aplicaron criterios de equidad territorial, eficiencia en el uso de recursos y respeto por el entorno natural y cultural. La propuesta cumple con normativas internacionales como la ISO 14040 (análisis del ciclo de vida) y la ISO 37120 (indicadores para ciudades sostenibles), lo que garantiza su alineación con estándares de desempeño ambiental y urbano. Además, se promovió la participación informada de actores locales y se priorizó la transparencia en las decisiones técnicas y operativas, fortaleciendo la gobernanza del sistema. La propuesta evita cualquier forma de exclusión o impacto negativo sobre comunidades vulnerables, y busca generar beneficios tangibles en términos de calidad de vida, empleo y resiliencia comunitaria frente al cambio climático.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten afirmar que el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes, cuando se fundamenta en una ingeniería sostenible y contextualizada, no solo es factible desde el punto de vista técnico y económico, sino también profundamente necesario frente a los desafíos actuales del turismo en zonas de alta presión.

La incorporación simultánea de criterios de resiliencia estructural, eficiencia energética, digitalización operativa y adaptación climática contribuye a transformar la infraestructura turística en un sistema dinámico, capaz de anticipar riesgos, optimizar recursos y garantizar continuidad operativa bajo condiciones cambiantes.

Uno de los principales aportes del modelo propuesto es su capacidad para integrar soluciones tecnológicas avanzadas sin perder de vista el entorno social y ambiental donde se inserta. Esta articulación entre lo digital, lo estructural y lo humano refleja una transición en el paradigma de la ingeniería turística: de un enfoque centrado en la infraestructura como objeto estático, hacia una visión sistémica que reconoce al territorio, sus dinámicas y vulnerabilidades como elementos clave del diseño.

Además, la experiencia desarrollada demuestra que el uso combinado de herramientas de simulación, modelado energético, análisis de riesgos y validación multicriterio puede enriquecer la toma de decisiones en proyectos de infraestructura turística. Estos enfoques permiten no solo proyectar soluciones más eficientes, sino también evidenciar oportunidades de mejora continua y escalabilidad replicable en otros contextos geográficos con condiciones similares.

Esta propuesta no debe entenderse como una solución cerrada, sino como un marco adaptable para futuros desarrollos en ingeniería aplicada al turismo sostenible. Su implementación efectiva requiere voluntad política, inversión estratégica y, sobre todo, un compromiso ético con las comunidades receptoras y con los principios de sostenibilidad global que rigen las acciones de la ingeniería del siglo XXI.

REFERENCIAS

- [1] L. Florido-Benítez, "The use of digital twins to address smart tourist destinations' future challenges," *Platforms*, vol. 2, no. 4, pp. 234–254, Dec 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2813-4176/2/4/16>
- [2] A. Vujko, "The future is in sustainable urban tourism: Technological solutions," *Cities*, vol. 9, no. 5, p. 169, May 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2413-8851/9/5/169>
- [3] G. Myrovali, G. Tzanis, and M. Morfoulaki, "Sustainable tourism through digitalization and smart solutions," *Sustainability*, vol. 17, p. 5383, Jun 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/392619234_Sustainable_Tourism_Through_Digitalization_and_Smart_Solutions
- [4] Y. Zhang, M. Li, L. Wu, and F. Hu, "Exploring the nexus of smart technologies and sustainable ecotourism," *Heliyon*, vol. 10, p. e28945, Oct 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024080277>
- [5] T. D. Moshood, R. N. Adnan, and M. R. Rahman, "Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for construction and engineering," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 196, p. 122606, Apr 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X24000678>
- [6] D. Peldon, L. Harris, and K. Chan, "The transformative role of digital twins in smart city development," *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, p. 104264, Feb 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724004086>

- [7] Z. He, "Research and application of tourism management in the digital era: A blockchain-based sustainable system," *Sustainability*, vol. 16, no. 12, p. 8534, Jun 2024. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11366864/>
- [8] Z. Jamalludin, "Business strategies for sustainable urban development: Tourism, infrastructure and community growth," *Global Business and Management Research*, vol. 17, no. 1, pp. 45–58, 2024. [Online]. Available: <https://www.gbmrjournal.com/pdf/v17n1/V17N1-10.pdf>
- [9] L. Solmaz, A. Abbas, and J. A. Guerrero-Ibáñez, "Toward understanding crowd mobility in smart cities through the internet of things," *arXiv preprint*, Sept 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1909.08522>
- [10] G. Roca, S. Domingo, and P. Lloret, "Life cycle assessment and building information modeling integration: A review of the current literature and future directions," *Buildings*, vol. 12, no. 11, p. 1802, Nov 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/11/1802>
- [11] M. Mensah, S. Amoroso, and C. Yamoah, "Resilient infrastructure systems for tourism: Lessons from coastal destinations," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3170, Feb 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3170>
- [12] E. Teixeira, P. Fernandes, and T. A. Rocha, "Smart cities and tourism: The role of 5g, iot and big data in developing resilient infrastructure," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, p. 2761, Mar 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/2761>
- [13] J. Park and M. Lee, "Digital twin-based urban infrastructure management in tourist cities," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 14913, Nov 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14913>
- [14] K. A. B. Bashir, Y. Zhu, and L. Wang, "Circular economy and sustainable tourism infrastructure: A systematic review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, p. 133003, Mar 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622001973>
- [15] A. Bayrak, H. Eryilmaz, and T. Turan, "Artificial intelligence in smart tourism infrastructure: A review of applications and trends," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7572, May 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7572>