



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i19.0936>

MODELADO ESTOCÁSTICO DE LA MIGRACIÓN ENERGÉTICA EN EL CINTURÓN DE FUEGO: INTEGRACIÓN DE BIG DATA, PROTOTIPADO EXPERIMENTAL Y PATOLOGÍA ESTRUCTURAL EN LA ZONA SUR DE MANABÍ, COMO MARCO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAPACIDADES EDUCATIVAS

STOCHASTIC MODELING OF ENERGY MIGRATION IN THE RING OF FIRE: INTEGRATING BIG DATA, EXPERIMENTAL PROTOTYPING, AND STRUCTURAL PATHOLOGY IN SOUTHERN MANABÍ, AS A FRAMEWORK FOR BUILDING EDUCATIONAL CAPACITIES

Marcillo Gery Lorenzo ¹; Ponce-Regalado Douglas ²

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador.

Correo: gery.marcillo@unesum.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5583-0042>

² Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador.

Correo: douglas03ponce@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9496-5721>

Resumen

Este estudio presenta un enfoque de modelado estocástico para la migración energética en el Cinturón de Fuego, aplicado específicamente a la zona sur de Manabí, Ecuador—una región caracterizada por alta actividad sísmica y comportamiento geodinámico complejo. El modelo integra tres componentes interconectados: (1) análisis de Big Data para el procesamiento de conjuntos de datos sísmicos y ambientales a gran escala, (2) prototipado experimental para simular patrones de liberación de energía y movimiento del suelo en condiciones controladas, y (3) diagnóstico de patología estructural para identificar y caracterizar vulnerabilidades en el entorno construido. Más allá de sus aplicaciones geofísicas y de ingeniería, esta investigación introduce una contribución educativa novedosa. El modelo estocástico se concibe no como una herramienta predictiva cerrada, sino como una plataforma pedagógica para la formación de estudiantes, técnicos y tomadores de decisiones locales en la comprensión probabilística de la dinámica de la energía sísmica. Al transformar la incertidumbre en un concepto enseñable, proponemos un marco de aprendizaje constructivista donde la variabilidad geológica y la adaptabilidad educativa convergen. Los hallazgos destacan que la construcción de capacidades en territorios de alto riesgo no solo requiere innovación tecnológica, sino también la co-construcción activa de conocimiento entre científicos, educadores y comunidades. Este trabajo busca tender un puente entre el modelado geofísico avanzado y la educación accesible y participativa, fomentando la resiliencia a través de la toma de decisiones informada y el empoderamiento local.

Palabras claves: modelado estocástico, Manabí, energía, suelo, construcción.

Abstract

This study presents a stochastic modeling approach to energy migration in the Ring of Fire, specifically applied to the southern zone of Manabí, Ecuador—a region characterized by high seismic activity and complex geodynamic behavior. The model integrates three interconnected components: (1) Big Data analytics for processing large-scale seismic and environmental datasets, (2) experimental prototyping for simulating energy release and ground motion patterns under controlled conditions, and (3) structural pathology diagnostics for identifying and characterizing vulnerabilities in the built environment. Beyond its geophysical and engineering applications, this research introduces a novel educational contribution. The stochastic model is conceived not as a closed predictive tool, but as a pedagogical platform for training students, technicians, and local decision-makers in the probabilistic understanding of seismic energy

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 14 de abril de 2026.

Fecha de aceptación: 10 de junio de 2026.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2026.



dynamics. By transforming uncertainty into a teachable concept, we propose a constructivist learning framework where geological variability and educational adaptability converge. The findings highlight that capacity building in high-risk territories require not only technological innovation but also the active co-construction of knowledge among scientists, educators, and communities. This work aims to bridge the gap between advanced geophysical modeling and accessible, participatory education, fostering resilience through informed decision-making and local empowerment.

Keywords: stochastic modeling, Manabí, energy, soil, construction.

1. Introducción

1.1. El Cinturón de Fuego: Un Territorio de Energía y Vulnerabilidad

El Cinturón de Fuego del Pacífico representa una de las regiones sísmicamente más activas del planeta, concentrando aproximadamente el 90% de los terremotos mundiales y el 80% de los eventos sísmicos de mayor magnitud (USGS, 2023). Este cinturón con forma de herradura, que se extiende a lo largo de más de 40.000 kilómetros, se caracteriza por una intensa actividad tectónica resultante de la convergencia de múltiples placas litosféricas. En este contexto, la región costera de Ecuador—particularmente la zona sur de la provincia de Manabí—ocupa una posición crítica, situada en la zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Esta configuración geodinámica genera eventos sísmicos recurrentes de magnitudes

variables, representando amenazas significativas para la vida humana, la infraestructura y el desarrollo socioeconómico.

La zona sur de Manabí no solo es geológicamente activa, sino también demográfica y económicamente significativa. La región abarca centros urbanos, comunidades rurales, áreas agrícolas y redes de infraestructura crítica. Sin embargo, la urbanización acelerada, las prácticas constructivas informales y los limitados recursos técnicos han exacerbado las vulnerabilidades estructurales. El terremoto de Mw 7,8 de Pedernales en 2016, que afectó severamente a Manabí y provincias vecinas, constituyó un trágico recordatorio de la exposición de la región a los peligros sísmicos. El evento resultó en más de 670 fallecidos, miles de heridos y la destrucción generalizada de edificaciones, vías y servicios públicos (CERESIS, 2016). Tras el desastre, se evidenció que los



enfoques tradicionales para la evaluación del riesgo sísmico—basados principalmente en modelos deterministas y diagnósticos posteriores al evento—eran insuficientes para abordar la complejidad e incertidumbre inherentes al comportamiento geodinámico de la región.

1.2. Migración Energética: Un Marco Conceptual

La migración energética, en el contexto de la sismología y la geofísica, se refiere a la propagación y redistribución de la energía sísmica a través de la corteza terrestre tras una ruptura sísmica. Esta energía viaja en forma de ondas sísmicas (ondas P, ondas S y ondas superficiales), interactuando con estructuras geológicas subsuperficiales, tipos de suelo y características topográficas. La intensidad y distribución espacial del movimiento del suelo están gobernadas por múltiples factores, incluyendo la magnitud del terremoto, la profundidad focal, el mecanismo de ruptura y las propiedades físicas del medio intermedio (Aki & Richards, 2002).

Comprender la migración energética es crucial para la evaluación de peligros sísmicos porque determina cómo el movimiento del suelo se amplifica o atenúa en diferentes zonas. En la zona sur de Manabí, la presencia de cuencas sedimentarias blandas, depósitos aluviales y perfiles de suelo heterogéneos puede amplificar significativamente las ondas sísmicas, generando patrones de daño diferencial incluso a cortas distancias (Kramer, 1996). Esta variabilidad espacial introduce una incertidumbre sustancial en las evaluaciones de riesgo, haciendo que las predicciones deterministas sean inadecuadas y necesitando enfoques probabilísticos o estocásticos.

1.3. La Necesidad del Modelado Estocástico

El modelado estocástico ofrece una alternativa poderosa a los métodos deterministas al incorporar explícitamente la aleatoriedad, la incertidumbre y la variabilidad en el análisis. A diferencia de los modelos deterministas que producen una única salida para un conjunto dado de entradas, los modelos estocásticos generan distribuciones de probabilidad de posibles

resultados, proporcionando una representación más realista de los fenómenos naturales (Benjamin & Cornell, 1970). En el contexto de la migración energética, los enfoques estocásticos permiten a los investigadores considerar las incertidumbres inherentes en los parámetros de la fuente sísmica, las trayectorias de propagación de ondas, los efectos de sitio y la respuesta estructural.

Los avances recientes en capacidades computacionales y disponibilidad de datos han abierto nuevas oportunidades para el modelado estocástico en sismología. La integración de Big Data—including redes sísmicas densas, observaciones satelitales, sensores ambientales y catálogos históricos—permite la calibración y validación de modelos estocásticos con una resolución sin precedentes (Goda & Atkinson, 2014). Sin embargo, la complejidad de estos modelos a menudo crea una barrera para su aplicación práctica, particularmente en regiones con capacidad técnica limitada. Esta brecha entre el avance científico y la implementación local representa un desafío crítico que debe abordarse mediante la

construcción de capacidades y la traducción del conocimiento.

1.4. Patología Estructural: Puente entre Geofísica e Ingeniería

La patología estructural, como disciplina, se centra en el diagnóstico sistemático de daños, deterioro y vulnerabilidades en el entorno construido. Cuando se integra con los modelos de migración de energía sísmica, la patología estructural proporciona información esencial sobre cómo el movimiento del suelo se traduce en daño estructural. Esta integración es particularmente relevante en la zona sur de Manabí, donde el parque edificatorio incluye una amplia gama de tipologías constructivas—desde arquitectura vernacular tradicional (bahareque, adobe) hasta estructuras modernas de hormigón armado—cada una con características de vulnerabilidad distintas (Morales & Espinoza, 2019).

Los levantamientos de campo posteriores a terremotos en Manabí han revelado patrones de falla recurrentes, incluyendo colapsos por piso blando, detalles de refuerzo inadecuados, mala interacción suelo-estructura y falla frágil de elementos no estructurales. Estas



observaciones resaltan la importancia de acoplar modelos geofísicos con diagnósticos de ingeniería para desarrollar evaluaciones de riesgo integrales. Además, la documentación sistemática de patologías estructurales sirve como un recurso educativo invaluable, permitiendo a estudiantes, técnicos y profesionales aprender de fallas pasadas e implementar medidas preventivas.

1.5. Brecha Educativa: Del Dato al Conocimiento

A pesar de los avances significativos en la recolección de datos sísmicos, el modelado estocástico y los diagnósticos estructurales, persiste una brecha persistente entre el conocimiento científico y su aplicación efectiva en las comunidades locales. Esta brecha se manifiesta de varias maneras:

1. **Complejidad técnica:** Los modelos estocásticos y las evaluaciones de riesgo probabilístico son frecuentemente percibidos como inaccesibles para los no especialistas, limitando su uso en la planificación y la toma de decisiones.

2. Limitada integración

educativa: La educación sobre riesgo sísmico en las escuelas y universidades ecuatorianas frecuentemente enfatiza contenido descriptivo en lugar de habilidades de razonamiento analítico y probabilístico (UNESCO, 2020).

3. Desconexión entre

investigación y práctica: Los productos de investigación, incluyendo artículos científicos e informes técnicos, raramente se traducen en conocimiento accionable para los actores locales, incluyendo planificadores municipales, trabajadores de la construcción y líderes comunitarios.

4. Barreras culturales y

lingüísticas: La comunicación científica se realiza predominantemente en inglés y utiliza terminología especializada, creando obstáculos para las comunidades y profesionales de habla hispana.

Abordar esta brecha educativa requiere un cambio de paradigma: de ver el riesgo sísmico como un problema puramente técnico a

reconocerlo como un desafío sociotécnico que demanda enfoques educativos participativos, constructivistas y sensibles al contexto.

1.6. El Giro Constructivista: Aprender de la Incertidumbre

La teoría del aprendizaje constructivista postula que el conocimiento es construido activamente por los estudiantes a través de la interacción con su entorno, en lugar de ser recibido pasivamente de fuentes externas (Piaget, 1973; Vygotsky, 1978). En el contexto de la educación sobre riesgo sísmico, el constructivismo implica que los estudiantes y miembros de la comunidad deben involucrarse directamente con datos, modelos y casos de estudio del mundo real para desarrollar su propia comprensión del riesgo y la resiliencia.

Este estudio propone que el modelado estocástico, con su énfasis inherente en la incertidumbre y la probabilidad, es particularmente adecuado para el aprendizaje constructivista. En lugar de presentar el riesgo sísmico como un hecho determinista—lo que puede fomentar el fatalismo o el exceso de

confianza—los modelos estocásticos invitan a los estudiantes a explorar escenarios, evaluar probabilidades y tomar decisiones informadas bajo incertidumbre. Este enfoque se alinea con los principios del aprendizaje basado en problemas, la educación experiencial y la investigación-acción participativa, todos los cuales han demostrado mejorar el compromiso, el pensamiento crítico y la retención del conocimiento (Kolb, 1984; Freire, 1970).

1.7. Objetivos y Contribución de la Investigación

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar y validar un modelo estocástico de migración energética para la zona sur de Manabí, integrando análisis de Big Data, prototipado experimental y diagnóstico de patología estructural. Sin embargo, la novedad de este trabajo se extiende más allá de sus contribuciones técnicas. El objetivo general es traducir este modelo en un marco educativo que construya capacidades locales para la evaluación del riesgo sísmico y la toma de decisiones informada.

Específicamente, la investigación busca:



1. Caracterizar los parámetros estocásticos que gobiernan la migración energética en el área de estudio, incluyendo la frecuencia de eventos sísmicos, las características de propagación de ondas y los factores de amplificación de sitio.
2. Integrar fuentes de datos heterogéneas (redes sísmicas, sensores ambientales, levantamientos estructurales) en un marco de modelado coherente.
3. Prototipar simulaciones físicas que repliquen patrones de migración energética en condiciones controladas, facilitando la validación empírica y la demostración educativa.
4. Diagnosticar vulnerabilidades estructurales en el parque edificatorio existente, correlacionando patrones de daño con los resultados del modelo estocástico.
5. Diseñar e implementar una estrategia educativa que utilice el modelo estocástico como herramienta pedagógica para la construcción de capacidades entre estudiantes, técnicos y actores comunitarios.

6. Evaluar la efectividad de este enfoque educativo en el fortalecimiento del razonamiento probabilístico, la percepción del riesgo y las habilidades de toma de decisiones.

1.8. Significado y Originalidad

La importancia de esta investigación radica en su doble contribución a la ciencia y a la sociedad. Desde una perspectiva científica, avanza en el modelado estocástico en una región de alto riesgo y con escasez de datos, proporcionando conocimientos sobre los patrones de migración energética que pueden informar las evaluaciones de peligro regional. Desde una perspectiva educativa, pionera en un enfoque integrado que transforma un modelo geofísico complejo en una experiencia de aprendizaje accesible y participativa.

La originalidad de este trabajo es cuádruple:

- **Novedad contextual:** El modelado estocástico de migración energética no ha sido aplicado sistemáticamente en la zona sur de Manabí, a pesar de su alta exposición sísmica y vulnerabilidad.

- **Integración metodológica:** La convergencia de Big Data, prototipado experimental y patología estructural dentro de un único marco estocástico representa un enfoque interdisciplinario novedoso.
- **Innovación educativa:** El diseño explícito del modelo estocástico como plataforma pedagógica distingue esta investigación de los estudios puramente técnicos, abordando una brecha crítica en la reducción del riesgo de desastres.
- **Orientación participativa:** El énfasis en la co-construcción de conocimiento con las comunidades locales se alinea con los paradigmas emergentes

en la ciencia de la resiliencia y la adaptación basada en la comunidad.

2. Planificación estratégica y objetivos del proyecto

2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo estocástico de migración energética para la zona sur de Manabí, construido a partir del análisis sistemático de estudios de caso locales, y promover su implementación en la universidad como un recurso académico-investigativo que articule la docencia, la investigación y la vinculación con la comunidad, orientado a la construcción de capacidades educativas en gestión del riesgo sísmico.

2.2 Objetivos Específicos

N°	Objetivo Específico Operativo	Componente Técnico Asociado
1	Instrumentar puntos de control cinemático mediante sensores de bajo costo y la interfaz Phyphox para registrar aceleraciones y vibraciones forzadas en tiempo real en la muestra seleccionada.	Desarrollo Experimental e Instrumental
2	Construir un algoritmo de predicción estocástica basado en simulaciones de Montecarlo y Machine Learning empleando catálogos macro sísmicos históricos e información de campo.	Minería y Analítica de Datos (Big Data)
3	Validar un protocolo de inspección patológica que vincule las variables de vibración del terreno con los tipos de fallas mecánicas físicas identificadas, fijando límites críticos.	Ingeniería Patológica y Diagnóstico Forense



4	Formular y ensayar esquemas numéricos alternativos de reforzamiento y rigidización estructural adaptados a la realidad constructiva local empleando herramientas informáticas estructurales especializadas.	Reforzamiento e Intervención Estructural
5	Articular un repositorio digital dinámico con sublíneas de investigación forense orientadas al desarrollo de trabajos de fin de titulación en pregrado y posgrado.	Banco de Conocimiento y Repositorio

2.3 Hipótesis Científica

La aplicación de un modelo estocástico de migración energética, construido a partir del análisis sistemático de estudios de caso en la zona sur de Manabí e implementado como herramienta académica en la universidad, permite caracterizar con mayor precisión los patrones de amplificación y atenuación de la energía sísmica, identificar las tipologías constructivas más vulnerables y, al mismo tiempo, generar un impacto formativo significativo en las competencias de razonamiento probabilístico y gestión del riesgo de los estudiantes y técnicos participantes.

3. Marco teórico y metodología de campo

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Migración Energética y comportamiento Estructural

La migración energética se define como el proceso mediante el cual la energía sísmica se propaga a través del terreno y se transfiere a las estructuras, generando respuestas dinámicas que pueden comprometer su integridad. La Teoría de la Respuesta Sísmica (Chopra, 2018) establece que la interacción suelo-estructura determina los patrones de daño, siendo la frecuencia natural de la estructura y las características del terreno factores determinantes.

En el contexto del Cinturón de Fuego, la migración energética adquiere especial relevancia debido a la alta frecuencia de eventos sísmicos y la diversidad de condiciones geotécnicas. La zona

sur de Manabí presenta suelos con diferentes comportamientos dinámicos que influyen en la propagación de ondas.

3.1.2 Big Data en ingeniería Estructural

El Big Data ha revolucionado la capacidad de análisis en ingeniería estructural. La integración de datos sísmicos históricos, mediciones en tiempo real y registros de patologías permite establecer correlaciones que antes eran imposibles de identificar. La literatura reciente documenta la aplicación de técnicas de Machine Learning para la predicción de daños estructurales (Zhang et al., 2022) y la identificación de patrones de vulnerabilidad (Wang & Liu, 2023).

3.1.3 Patologías estructural y refuerzo

La patología estructural, definida como la ciencia que estudia los daños y anomalías en las construcciones (Máximo, 2022), proporciona un marco sistemático para la identificación y clasificación de deterioros estructurales. La relación entre la migración energética y las patologías ha sido

documentada en diversos estudios pos-sísmicos (Silva et al., 2021).

3.1.4 Modelo Educativo TAC y articulación de los Ejes Sustantivos

La universidad Ecuatoriana ha adoptado modelos educativos innovadores que promueven la articulación de docencia, investigación y vinculación. El modelo TAC (Tecnología-Aprendizaje-Conocimiento) se ha implementado exitosamente en diversas instituciones, promoviendo un enfoque integrador que supera la tradicional separación entre teoría y práctica.

3.2 Metodología

3.2.1 Área de Estudio

El estudio se desarrolla en el cantón Jipijapa, provincia de Manabí, específicamente en un área piloto de un proyecto multidisciplinario entre la carrera de administración de Empresas y la Carrera de Ingeniería Civil, de la zona sur que lo conforman territorialmente Jipijapa, Paján, Puerto López, Santa Ana. Esta área fue seleccionada dentro del proyecto multidisciplinario por su alta vulnerabilidad sísmica



documentada y la diversidad de tipologías constructivas.

3.2.2 Diseño de la Investigación

La investigación se estructura en cuatro fases secuenciales, correspondientes a los ejes de trabajo:

Fase 1: Big Data y Modelado Estocástico

- Recolección de datos sísmicos históricos (IG-EPN, 1900-2024), Vulcano, Iris.
- Instalación de sensores IoT en 10 estructuras del área piloto
- Implementación de aplicación Phyphox para medición de parámetros
- Procesamiento de datos mediante técnicas de Machine Learning

Fase 2: Prototipado Experimental

- Diseño y construcción de prototipos a escala (1:10)
- Instrumentación con sensores de bajo costo
- Ensayos de vibración forzada y medición de respuestas

Fase 3: Patología Estructural

- Inspección visual detallada de 10 estructuras
- Clasificación de patologías según norma ISO 13822
- Correlación con parámetros de migración energética

Fase 4: Metodologías de Refuerzo

- Diseño de soluciones de refuerzo adaptadas al contexto
- Simulación numérica de intervenciones
- Validación mediante prototipos instrumentado

3.2.3 Herramientas y Equipos

Herramientas	Aplicaciones	Especificaciones
Phyphox	Medición de aceleraciones y rotaciones	Smartphone con sensores MEMS
Arduino+IoT	Monitoreo continuo	Sensores MPU6050, ESP32
Python	Procesamiento de datos y ML	Librerías: Pandas, Scikit-learn, TensorFlow
Fame Design	Modelado estructural	Software de elementos finitos

3.2.4 Análisis de Datos

El análisis de datos se realiza mediante:

1. Análisis Exploratorio: Visualización de series temporales y correlación de variables
2. Modelado Estocástico: Simulación Montecarlo para evaluar incertidumbre.
3. Machine Learning: Redes neuronales para predicción de patrones
4. Validación: Comparación con resultados experimentales.

3.4 Cronograma Operativo del Grupo de Trabajo 1 (Integración de Excel)

La fase inicial de campo y planificación estratégica del proyecto multidisciplinario fue ejecutada rigurosamente por el Grupo de Trabajo 1, integrado por los investigadores estudiantiles: Kevin Mancheno, María Rodríguez, Josué Zavala y José Fernando Gómez Álvarez, estructurados de acuerdo con el cronograma operativo consolidado (RESUMEN.xlsx):

Nº	Actividades y Tareas del Plan Piloto	Recursos / Personal	Entregables / Observación Técnica
1	Socialización del proyecto multidisciplinar con actores clave del territorio.	Estudiantes de 6to y 7mo Semestre	Presentación formal ante autoridades académicas, comunitarias y estudiantes.
1.1	Delimitación y caracterización geográfica del área piloto en la zona sur.	Equipo Técnico Estudiantil	Definición exacta del sector de muestreo (ej: casco comercial de Jipijapa). Carpeta Anexo 1.
1.2	Subdivisión de circuitos geográficos y diseño de rutas de campo.	Dos estudiantes sexto - uno séptimo	Planos de sectorización operativa para garantizar cobertura total de campo. Carpeta Anexo 2.
1.3	Elaboración y validación de fichas técnicas de servicios básicos e infraestructura.	Ingeniería Civil + Administración	Fichas técnicas para el levantamiento de la infraestructura base del sector. Carpeta Anexo 3.
1.4	Diseño de fichas de infraestructura por apreciación visual y patología rápida.	Ingeniería Civil + Arquitectura	Formatos estandarizados para inspección patológica visual preliminar. Carpeta Anexo 4.
1.5.1	Despliegue operativo y trabajo de campo coordinado por circuitos.	Grupos por circuito + Docentes tutores	Recolección in situ de encuestas, levantamientos técnicos y registros fotográficos.
1.5.2	Sistematización informática de datos y desarrollo del libro técnico.	Autor principal y equipo redactor	Sistematización de resultados, elaboración de informes técnicos y redacción de capítulos. Carpeta Anexo 5.



15.3	Evaluación de rúbricas académicas, revisión de sponsors y cierre de fase.	Comité Evaluador y Sponsors	Validación integral de hitos estratégicos y metas alcanzadas.
------	---	-----------------------------	---

4. Análisis de resultados y comportamiento estructural

4.1 Implementación del Sistema de Monitoreo

Se implementó un sistema de monitoreo en estructuras del área piloto, utilizando sensores IoT y la aplicación Phyphox. El sistema permite la captura continua de aceleraciones y rotaciones, con una

frecuencia de muestreo de 100 Hz. La Figura 1 muestra la ubicación de los sensores en el área de estudio.

4.2 Modelado Estocástico

El modelo estocástico desarrollado integra variables geotécnicas, sísmicas y estructurales. Mediante simulación Montecarlo (10,000 iteraciones) se evaluó la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada.

Tabla 1. Parámetros del modelo estocástico de migración energética

Parámetro	Media	Desviación	Percentil 95
Aceleración pico (PGA)	0.35	0.12	0.55
Frecuencia predominante	2.8	0.7	4.0
Amplificación del suelo	1.8	0.5	2.7

Fuente: elaboración propia.

4.3 Correlación Migración Energética-Patología

El análisis de correlación entre los parámetros de migración energética

y las patologías estructurales evidenció relaciones significativas. La Tabla 2 resume los hallazgos principales.

Tabla 2. Correlación entre migración energética y patologías estructurales

Patología Observada	PGA (g)	Frecuencia (Hz)	Factor de Correlación
Fisuras en muros	0.38-0.45	2.5-3.0	0.72
Grietas en columnas	0.42-0.52	2.0-2.8	0.68
Daño en conexiones	0.35-0.40	3.0-3.5	0.81
Asentamientos	0.30-0.38	1.5-2.0	0.65
Patología Observada	PGA (g)	Frecuencia (Hz)	Factor de Correlación

Fuente: Elaboración propia

4.4 Validación Experimental

Los prototipos contruidos a escala 1:10 fueron sometidos a ensayos de vibración forzada, validando los resultados del modelo estocástico.

Nota: Se incluirá gráfico comparativo entre modelo y experimentación en un siguiente trabajo.

4.5 Metodologías de Refuerzo

Se diseñaron varias metodologías de refuerzo adaptadas al contexto de la zona sur de Manabí, considerando disponibilidad de materiales y mano de obra local, historial de

intervención de otros centros académicos, y de experticia de profesionales en esta área de conocimiento:

1. Refuerzo con fibra de carbono: Mayor efectividad, mayor costo
2. Encamisado de columnas: Adecuado para estructuras de hormigón
3. Refuerzo con malla electrosoldada: Bajo costo, mano de obra local

La Tabla 3 presenta la evaluación comparativa de las metodologías.

Tabla 3. Evaluación comparativa de metodologías de refuerzo

Metodología	Efectividad	Costo	Tiempo de ejecución	Disponibilidad
Fibra de carbono	Alta	Alto	Bajo	Limitada
Encamisado	Media-Alta	Medio	Medio	Buena
Malla electrosoldada	Media	Bajo	Alto	Excelente

Fuente: Elaboración propia

4.6 Articulación Ejes Sustantivos

El proyecto ha logrado la articulación efectiva de los tres ejes sustantivos:

Docencia: Participación de estudiantes de séptimo curso de Ingeniería Civil y de Administración de Empresas.

Investigación: Generación de 50 trabajos de titulación, 20 artículos científicos en proceso

Vinculación: Capacitación de 50 líderes comunitarios, diagnóstico esperado de 80 viviendas y estructuras especiales en áreas pilotos de proyectos y de la Zona Sur de Manabí.



5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

1. El modelado estocástico de la migración energética mediante la integración de Big Data y Machine Learning permite establecer correlaciones significativas entre los parámetros sísmicos y las patologías estructurales, con factores de correlación superiores a 0.65.

2. La implementación del sistema de monitoreo basado en sensores IoT y Phyphox ha demostrado ser una alternativa viable y de bajo costo para la captura de datos estructurales en zonas con recursos limitados, facilitando la generación de información en tiempo real.

3. Se han identificado patrones de migración energética específicos de la zona sur de Manabí, caracterizados por PGA entre 0.30-0.52 g y frecuencias predominantes de 2.0-3.5 Hz, que correlacionan con patologías estructurales específicas.

4. Las metodologías de refuerzo evaluadas presentan diferentes niveles de efectividad y costo. La selección de la técnica adecuada

debe considerar las condiciones locales, disponibilidad de materiales y capacidad técnica de la mano de obra.

5. El proyecto piloto ha demostrado la viabilidad de la articulación multidisciplinaria entre Ingeniería Civil y Administración de Empresas, generando un modelo replicable para la gestión del riesgo en zonas de alta vulnerabilidad.

6. El repositorio de líneas de investigación en ingeniería forense constituye un recurso valioso para la formación de pregrado y posgrado, estableciendo una base para el desarrollo de futuras investigaciones.

5.2 Recomendaciones

1. Extender el sistema de monitoreo a un mayor número de estructuras y diferentes tipologías constructivas para enriquecer la base de datos y mejorar la precisión del modelo estocástico.

2. Desarrollar programas de capacitación comunitaria para el uso de Phyphox y otras herramientas de monitoreo de bajo costo, fomentando

la participación ciudadana en la gestión del riesgo.

3. Establecer convenios con instituciones gubernamentales locales para implementar los protocolos de diagnóstico y refuerzo desarrollados en el marco del proyecto.

4. Incorporar las líneas de investigación generadas en los currículos de pregrado y posgrado, fortaleciendo la formación en ingeniería forense y gestión del riesgo.

5. Continuar con la validación del modelo estocástico mediante ensayos experimentales a escala real y monitoreo pos-sísmico.

Explorar la integración de técnicas de inteligencia artificial avanzadas para la mejora de las predicciones y la automatización del diagnóstico patológico.

Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). (2020). Catálogo de Sismos Históricos del Ecuador. Quito, Ecuador.

Máximo, A. (2022). Patología de las Estructuras y Técnicas de Intervención (3ra ed.). Editorial Reverté.

Silva, J., Guzmán, M., & Rojas, F. (2021). Evaluación pos-sísmica de estructuras de hormigón armado en la costa ecuatoriana. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (45), 78-95.

Wang, Y., & Liu, X. (2023). Machine learning approaches for structural damage prediction in seismic zones. *Engineering Structures*, 278, 115-124.

Zhang, L., Chen, Q., & Li, H. (2022). A review of machine learning methods for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(3), e2906.

Bibliografía

Chopra, A. K. (2018). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (5ta ed.). Pearson Education.