

Impacto del evento El Niño 2023–2024 en la región insular ecuatoriana: respuesta pluviométrica en Galápagos

Impact of the 2023–2024 El Niño event on Ecuador's insular region: rainfall response in the Galápagos islands

Sandra Torres¹, Bruce Tumbaco², Enzo Loor³, Oscar Ayala⁴, Darwin Rosero⁵, Amparo Condor⁶, Luis Cáceres⁷, Miguel Flores⁸, Elena Ulcuango⁹, Nicole Pilco¹⁰, David Galarza¹¹

¹ Universidad Central del Ecuador, INAMHI. <https://orcid.org/0000-0003-3581-9086>

² Universidad Regional Amazónica Ikiam, INAMHI. <https://orcid.org/0000-0002-3558-2923>

³ Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí. <https://orcid.org/0009-0003-8081-5559>

⁴ INAMHI. <https://orcid.org/0000-0003-2038-8631>

⁵ INAMHI. <https://orcid.org/0009-0003-4037-5093>

⁶ INAMHI. <https://orcid.org/0000-0001-8455-5342>

⁷ INAMHI.

⁸ Escuela Politécnica Nacional. <https://orcid.org/0000-0002-7742-1247>

⁹ Universidad Central del Ecuador. <https://orcid.org/0009-0007-9520-9737>

¹⁰ Universidad Central del Ecuador. <https://orcid.org/0009-0002-8744-9283>

¹¹ INAMHI. <https://orcid.org/0009-0006-5327-5608>

Autor de correspondencia: jstorres@inamhi.gob.ec

DOI: <https://doi.org/10.63804/CIBEN.25.cter.e6>

Resumen

El presente estudio documenta la presencia y evolución del evento El Niño 2023–2024 en la región insular del Ecuador, a partir del análisis de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas M0221 (San Cristóbal – Galápagos), M0191 (Baltra) y M1236 (San Cristóbal – Aeropuerto), todas operadas por el INAMHI. Se integran observaciones convencionales y automáticas, junto con análisis espectral mediante transformada wavelet y series históricas desde 1964. Los resultados muestran un comportamiento anómalo de las precipitaciones en todas las estaciones, con acumulados mensuales significativamente superiores a la climatología normal (1981–2010) durante el primer trimestre de 2024, alcanzando máximos de 282 mm en febrero y 267,7 mm en marzo. A partir de mayo, se observa una transición hacia condiciones

más secas, coincidiendo con el debilitamiento de la señal ENSO. El análisis espectral revela una señal significativa en la banda de 2 a 8 años, coherente con la variabilidad asociada al ENSO. Este trabajo contribuye a la caracterización regional del ENSO en el Pacífico oriental y destaca la importancia de fortalecer el monitoreo climático en Galápagos, una región estratégica pero escasamente estudiada debido a su configuración geográfica aislada en el Ecuador. Los hallazgos son relevantes para mejorar la comprensión de los impactos del ENSO en Sudamérica y para fortalecer los sistemas de alerta temprana en zonas sensibles del Pacífico Sur.

Palabras clave: ENSO; Galápagos; Wavelet; Pacífico.

Abstract

This study documents the presence and evolution of the 2023–2024 El Niño event in Ecuador's insular region based on precipitation data from meteorological stations M0221 (San Cristóbal – Galápagos), M0191 (Baltra), and M1236 (San Cristóbal – Airport), all operated by INAMHI. Conventional and automatic observations are integrated with spectral analysis using the wavelet transform and historical series dating back to 1964. The results show anomalous rainfall behavior at all stations, with monthly totals significantly exceeding the normal climatology (1981–2010) during the first quarter of 2024, reaching maxima of 282 mm in February and 267.7 mm in March. From May onward, a transition toward drier conditions is observed, coinciding with the weakening of the ENSO signal. Spectral analysis reveals a significant signal in the 2–8-year band, consistent with variability associated with ENSO. This work contributes to the regional characterization of ENSO in the eastern Pacific and underscores the importance of strengthening climate monitoring in the Galápagos, a strategic yet sparsely studied region due to its isolated geographic setting on the Equator. The findings are relevant for improving understanding of ENSO impacts in South America and for bolstering early warning systems in sensitive areas of the South Pacific.

Keywords: ENSO; Galapagos; Wavelet; Pacific Ocean.

Introducción

Geográficamente, el archipiélago comprende aproximadamente 234 islas, islotes y rocas, con una superficie terrestre cercana a los 7985 km² y una línea costera de 1667 km, todo ello dentro de un área marina protegida de aproximadamente 138000 km² conocida como la Reserva Marina de las Galápagos, la mayoría de los cuales se formaron por la superposición de flujos de lava y ceniza volcánica sobre rocas preexistentes en la Plataforma de las Galápagos (Escobar et al., 2021). La génesis de estas islas se remonta a la era Cenozoica,

específicamente al Mioceno, se estima que las islas más antiguas emergieron del lecho marino hace aproximadamente 5 a 10 millones de años (Geist et al., 2014).

El fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) es un patrón climático recurrente en el Pacífico Tropical, que causa cambios en los patrones de temperatura, lluvia y viento a nivel global, y es un factor determinante en el comportamiento climático de Ecuador. En este contexto, el evento El Niño 2023–2024 se distinguió por lluvias intensas en las zonas bajas e intermedias de Santa Cruz y sequedad relativa en las partes altas, un patrón comparable a los episodios extremos de 1982–83, 1997–98 y 2015–16 (Tenelanda et al., 2025; Castrejón et al., 2025).

Estudios paleoclimáticos revelan fluctuaciones históricas en la temperatura superficial del mar (SST), con un enfriamiento de $\sim 2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el último máximo glacial y un calentamiento de $\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el MIS 5e (Lea et al., 2006). Estos cambios, vinculados a forzantes climáticos globales como los gases de efecto invernadero, muestran que la SST precede al volumen de hielo continental por $\sim 3\text{--}9\text{ kyr}$ (Lea et al., 2006). El calentamiento global reciente ($\sim 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde 1980) se superpone a la variabilidad de ENSO, alterando patrones de lluvia y dinámicas oceánicas, prolongando la estación seca, pero aumentando las precipitaciones $>40\%$ sin eventos extremos (Paltán et al., 2021).

La variabilidad de ENSO impacta directamente la biodiversidad endémica: El Niño perjudica a especies marinas como pingüinos (*Spheniscus mendiculus*) y cormoranes (*Phalacrocorax harrisi*), pero beneficia la reproducción de aves terrestres, mientras que La Niña invierte estos efectos (Dueñas et al., 2021). Eventos extremos como ENSO 2015–2016 provocaron fluctuaciones poblacionales drásticas en peces, mortalidad coral masiva y alteraciones comunitarias profundas (Rastoin et al., 2023). La interacción entre ENSO y el cambio climático global acelera la pérdida de biodiversidad nativa y facilita la invasión de especies exóticas, exigiendo la creación de áreas de conservación prioritarias (Escobar et al., 2021). Esta variabilidad climática resulta determinante para la dinámica ecológica y la resiliencia de especies clave en el archipiélago (Charney et al., 2021).

Los eventos de El Niño han aumentado en intensidad y frecuencia en las últimas dos décadas debido a SST más cálidas. Las proyecciones futuras sugieren un futuro generalmente más cálido y húmedo para Galápagos, con aumentos de precipitación entre un 20% y un 70% y un incremento de las temperaturas entre $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para 2050, lo que implicaría un aumento en la frecuencia e intensidad de ENSO (Paltán et al., 2021). A partir de este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo impactó el ENSO en las islas Galápagos durante el periodo 2023–2024?

Metodología

Área de Estudio y Estaciones Meteorológico Analizada

El estudio se desarrolló en el archipiélago de Galápagos, utilizando datos provenientes de tres estaciones meteorológicas operadas por la Red Nacional del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (Figura 1). La estación Baltra (código M0191), ubicada en la isla homónima (latitud: $-0,743833^\circ$, longitud: $-90,302194^\circ$, altitud: 6 m s.n.m.), y las estaciones San Cristóbal – Aeropuerto (código M1236) (latitud: $-0,908611^\circ$, longitud: $-89,616944^\circ$, altitud: 0 m s.n.m.) y San Cristóbal – Galápagos (código M0221) (latitud: $-0,904058^\circ$, longitud: $-89,614308^\circ$, altitud: 6 m s.n.m.), situadas en la isla San Cristóbal, constituyeron las fuentes primarias de información climática para el análisis.

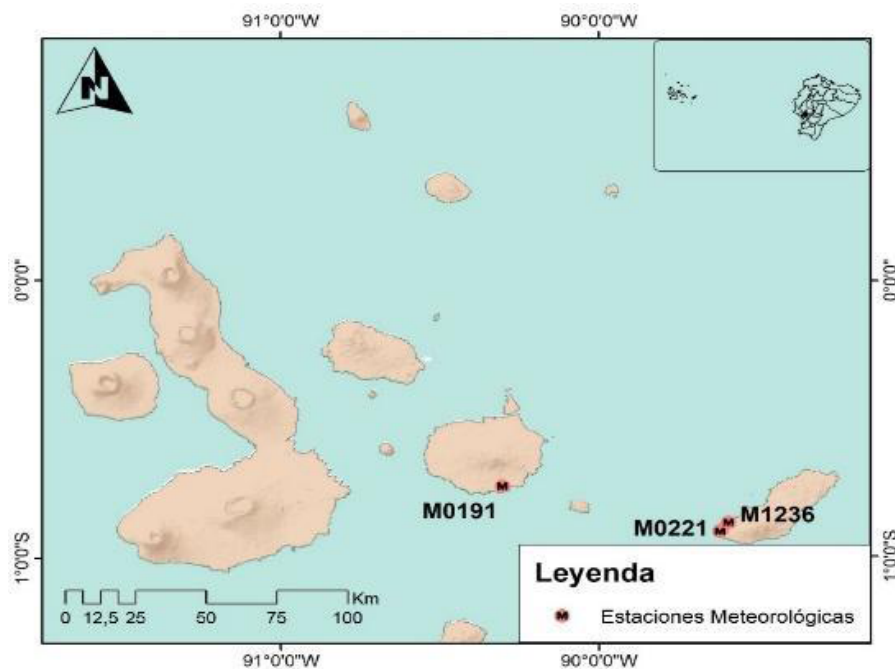


Figura 1: Ubicación de la estación de interés y estaciones con información histórica cercanas.

Fuente: Red de estaciones metrológicas INAMHI

Obtención de datos y procesamiento

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio provienen del Banco Nacional de Información Hidrometeorológica (BANADIH) del INAMHI y abarcan el período comprendido entre 2016 y 2025. No obstante, para los fines de esta investigación el análisis se restringió a los años 2023 y 2024, con el propósito de evaluar la variabilidad climática reciente

y su posible relación con fenómenos de escala interanual como el ENSO.

El procesamiento inicial se llevó a cabo en la plataforma digital de gestión hidrometeorológica del INAMHI, donde se seleccionaron las variables de interés: precipitación (PR), temperatura máxima (TM) y temperatura mínima (TMI). Posteriormente, los datos fueron depurados mediante la eliminación de valores faltantes o inconsistentes, y organizados en tres conjuntos independientes. Cada conjunto se estructuró en dos columnas una para las fechas y otra para la variable correspondiente (PR, TM o TMI), lo que facilitó el análisis posterior. El procesamiento estadístico y la modelación se realizaron en entornos reproducibles de JupyterHub, empleando los lenguajes Python y R. Esta plataforma multiusuario permitió integrar procedimientos de análisis estadístico, visualización gráfica y modelado temporal, asegurando la robustez y trazabilidad de los resultados. Para la detección de señales ENSO, se aplicó un análisis wavelet (Torrence & Compo, 1998) a cada estación meteorológica, con el objetivo de identificar patrones significativos en las escalas temporales relevantes. Este procedimiento permitió determinar la presencia o ausencia de forzantes asociados a ENSO durante el período 2023–2024, y en particular, establecer con mayor certeza la influencia de dicho fenómeno en las islas Galápagos.

Resultados y discusión

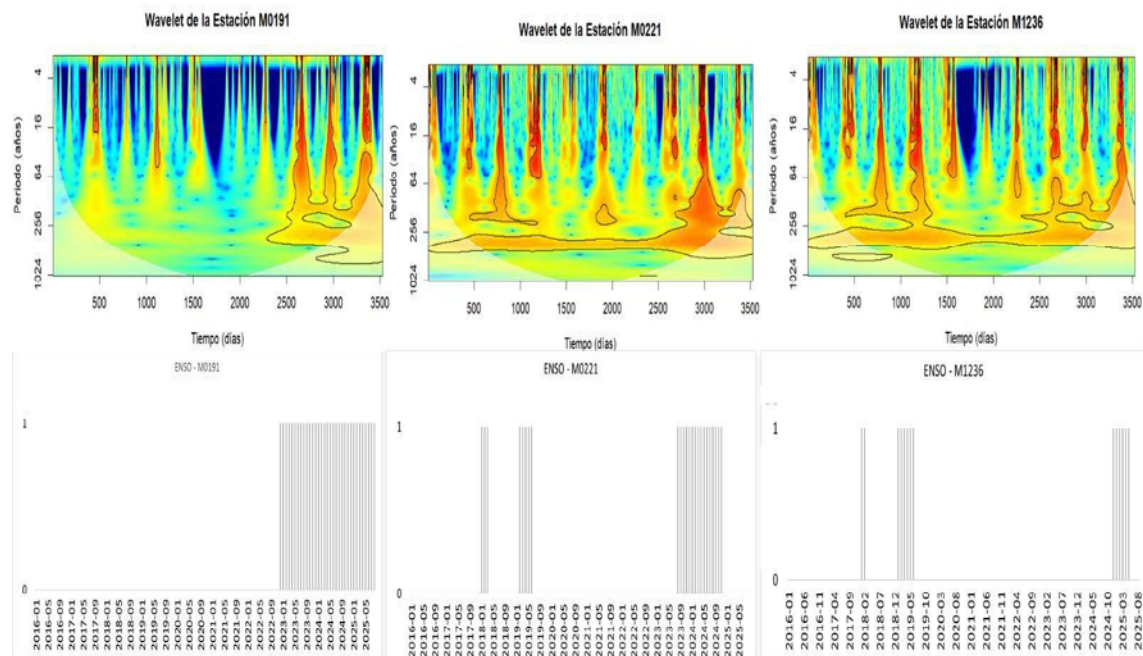


Figura 2. Mapas de calor y significancia ENSO de las estaciones M0191, M0221 y M1236

En el análisis mediante transformadas wavelet aplicado a las estaciones M0191 y M0221, se observan señales interanuales claras correspondientes al fenómeno ENSO (El Niño / La

Niña), especialmente en bandas de periodo aproximado de 2 a 8 años. Estas señales aparecen como picos de coherencia en los gráficos para esos años, lo que indica que la precipitación en dichas estaciones está fuertemente modulada por ENSO. En contraposición, la estación M1236 no muestra detección significativa de ENSO durante los años 2023 y 2024; en estos años los análisis wavelet no revelan coherencia marcada entre los índices ENSO y las precipitaciones en los periodos interanuales esperados.

Estos resultados coinciden con estudios previos en la costa del Ecuador, en los cuales se ha demostrado que ENSO ejerce una influencia notable sobre la variabilidad de la precipitación en estaciones costeras mediante análisis de coherencia wavelet. Por ejemplo, en periodos cálidos de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la coherencia ENSO-lluvia costera se eleva ($\approx 0,9$) en bandas de 2-8 años, mientras que en condiciones de PDO frío dicha coherencia se debilita a alrededor de 0,5.

La falta de detección en M1236 durante 2023-2024 podría explicarse por una combinación de factores climáticos y geográficos: quizá la estación está situada en una zona con menor sensibilidad a ENSO bajo ciertas condiciones de estiaje o sequía, o bien otras fluctuaciones climáticas regionales (como variaciones en la PDO y en la circulación atmosférica local) hayan interferido con la señal ENSO en ese intervalo.

Además, el intervalo 2023-2024 coincide con la severa crisis energética que vivió Ecuador (Tenelanda et al., 2025), causada por una prolongada sequía que redujo los niveles de embalses de las centrales hidroeléctricas, lo cual forzó racionamientos de electricidad de hasta 14 horas al día en algunas provincias. Esta situación subraya cómo una sequía extrema asociada probablemente a ENSO u otros factores climáticos interrelacionados puede tener impactos no solo hidrometeorológicos, sino también sociales y económicos, al comprometer la generación eléctrica y la infraestructura dependiente del recurso hídrico.

Conclusiones

El evento El Niño 2023-2024 alteró significativamente el régimen pluviométrico de Galápagos, registrando una anomalía positiva extrema en el primer trimestre de 2024 seguida de una transición abrupta a condiciones secas. El análisis wavelet confirmó la influencia de ENSO en la banda de 2-8 años para dos estaciones, aunque una tercera mostró una respuesta atenuada, evidenciando una heterogeneidad espacial en su impacto. Estos hallazgos, junto con la sequía continental concurrente que provocó una crisis energética, subrayan la alta sensibilidad regional a ENSO y la necesidad crítica de fortalecer el monitoreo y los sistemas de alerta temprana. Esta labor es esencial para proteger los ecosistemas únicos del archipiélago y aumentar la resiliencia socioeconómica ante la creciente variabilidad climática.

Referencias Bibliográficas

Castrejón, M., Pittman, J., Ramírez-González, J., & Defeo, O. (2024). An overview of social-ecological impacts of the El Niño-Southern Oscillation and climate change on Galapagos small-scale fisheries. *Ocean & Coastal Management*, 259, 107436. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107436>

Charney, N. D., Bastille-Rousseau, G., Yackulic, C. B., Blake, S., & Gibbs, J. P. (2021). A greener future for the Galapagos: forecasting ecosystem productivity by finding climate analogs in time. *Ecosphere*, 12(10). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3753>

Dueñas, A., Jiménez-Uzcátegui, G., & Bosker, T. (2021). The effects of climate change on wildlife biodiversity of the galapagos islands. *Climate Change Ecology*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100026>

Escobar-Camacho, D., Rosero, P., Castrejón, M., Mena, C. F., & Cuesta, F. (2021). Oceanic islands and climate: using a multi-criteria model of drivers of change to select key conservation areas in Galapagos. *Regional Environmental Change*, 21(2), 47. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01768-0>

Geist, D. J., Snell, H., Snell, H., Goddard, C., & Kurz, M. D. (2014). A Paleogeographic Model of the Galápagos Islands and Biogeographical and Evolutionary Implications (pp. 145–166). <https://doi.org/10.1002/9781118852538.ch8>

Lea, D. W., Pak, D. K., Belanger, C. L., Spero, H. J., Hall, M. A., & Shackleton, N. J. (2006). Paleoclimate history of Galápagos surface waters over the last 135,000yr. *Quaternary Science Reviews*, 25(11–12), 1152–1167. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.11.010>

Paltán, H. A., Benitez, F. L., Rosero, P., Escobar-Camacho, D., Cuesta, F., & Mena, C. F. (2021). Climate and sea surface trends in the Galapagos Islands. *Scientific Reports*, 11(1), 14465. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93870-w>

Rastoin-Laplane, E., Salinas-de-León, P., Goetze, J. S., Saunders, B. J., McKinley, S. J., Norris, C., Gosby, C., Mattingly, A., Garcia, R., & Harvey, E. S. (2023). Fluctuations of Galapagos mid-water and benthic reef fish populations during the 2015–16 ENSO. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 294, 108523. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108523>

Tenelanda, P., Turini, N., Orellana-Alvear, J., Maldonado, B. D., Bendix, J., & Célleri, R. (2025).

The diurnal cycle and event-scale precipitation characteristics in Galápagos at different alti-tudes during ENSO 2022-2024. *Erdkunde*, 79(1), 41–63. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2025.01.03>

Torrence, C., & Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. 79(1), 61–78. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)