

ARTICLE



REVISTA
COLETA CIENTÍFICA

Spatial and Seasonal Variability of Precipitation in Napo Province Using ERA5 Data (2000–2024)

Variabilidad espacial y estacional de la precipitación en la provincia de Napo mediante datos ERA5 (2000–2024)

Nancy Olaya Delgado

 <https://orcid.org/0000-0003-3921-7920>

Universidad de la Amazonia: Florencia, Amazónica, CO

E-mail: nancyolayva@uea.edu.ec

Informações do manuscrito

ARK: [24285/RCC.v09i18.228](https://doi.org/10.24285/RCC.v09i18.228)

ISSN: 2763-6496

Palabras-clave:

Amazonía ecuatoriana;
climatología;
estacionalidad;
precipitación;
reanálisis ERA5.

Keywords:

Ecuadorian Amazon;
climatology;
seasonality;
precipitation;
ERA5 reanalysis.

Abstract

The Andean–Amazonian relief makes precipitation difficult to represent in areas with sparse weather-station coverage. This study characterized the spatial and seasonal variability of precipitation in Napo Province, Ecuador, from 2000 to 2024 using ERA5 reanalysis. Daily totals from 17 grid cells at 0.25° located within the provincial boundary were processed to calculate monthly and seasonal climatologies, descriptive statistics, and the Walsh and Lawler Seasonality Index. Mean provincial annual precipitation was 3,451.45 mm, with a standard deviation of 407.60 mm and a coefficient of variation of 11.81%. The wettest year was 2018 (4,209.84 mm), whereas 2002 had the lowest total (2,810.53 mm). March–April–May was the wettest season (1,048.62 mm), while September–October–November was the least rainy (752.97 mm). The Seasonality Index was 0.139, indicating a highly uniform distribution of rainfall throughout the year. Spatially, annual averages ranged from 1,927.50 to 5,420.95 mm, revealing a gradient related to the transition between Andean slopes and Amazonian lowlands. The results provide a reproducible baseline for water and land management, although they should be interpreted considering reanalysis limitations over complex terrain.

Resumen

La heterogeneidad del relieve andino-amazónico dificulta la representación de la precipitación en zonas con baja densidad de estaciones meteorológicas. Este estudio caracterizó la variabilidad espacial y estacional de la precipitación en la provincia de Napo, Ecuador, durante 2000–2024, mediante el reanálisis ERA5. Se procesaron acumulados diarios en 17 celdas de 0,25° ubicadas dentro del límite provincial; posteriormente se calcularon climatologías mensuales y estacionales, estadísticos descriptivos y el Índice de Estacionalidad de Walsh y Lawler. La precipitación media anual provincial fue de 3.451,45 mm, con una desviación estándar de 407,60 mm y un coeficiente de variación de 11,81 %. El año 2018 presentó el mayor acumulado medio (4.209,84 mm), mientras que 2002 registró el menor (2.810,53 mm). La estación marzo–abril–mayo fue la más húmeda (1.048,62 mm) y septiembre–octubre–noviembre la menos lluviosa (752,97 mm). El índice de estacionalidad alcanzó 0,139, lo que indica una distribución muy uniforme de la lluvia a lo largo del año. Espacialmente, los promedios anuales variaron entre 1.927,50 y 5.420,95 mm, evidenciando un gradiente asociado a la transición entre las laderas andinas y las tierras bajas amazónicas. Los resultados aportan una línea base reproducible para la gestión hídrica y territorial, aunque deben interpretarse considerando las limitaciones del reanálisis en terrenos complejos.

1. Introducción

La precipitación regula la disponibilidad de agua, la recarga de acuíferos, la producción agrícola y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. En la Amazonía, además, interviene en el reciclaje regional de humedad y en la conectividad entre la cobertura forestal, la atmósfera y los sistemas fluviales. El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático advierte que el calentamiento global está intensificando el ciclo hidrológico y alterando la frecuencia y la magnitud de los extremos húmedos y secos (IPCC, 2021). Por ello, disponer de líneas base climáticas espacialmente consistentes es fundamental para distinguir la variabilidad natural de cambios de mayor duración.

La vertiente oriental de los Andes constituye una zona de transición en la que convergen circulación tropical, transporte de humedad amazónica, convección profunda y forzamiento orográfico. La elevación modifica el ascenso del aire húmedo y genera fuertes contrastes de precipitación en distancias relativamente cortas. Arias et al. (2021) destacan que el relieve andino produce gradientes hidroclimáticos complejos, mientras Poveda et al. (2020) señalan que la interacción entre sistemas convectivos y topografía favorece eventos de alto impacto en la transición Andes–Amazonía.

En Ecuador, la señal de El Niño–Oscilación del Sur no se manifiesta de manera uniforme. Los efectos dependen del tipo de evento, la fase del episodio y la altitud. Thielen et al. (2023) demostraron que las anomalías extremas de precipitación vinculadas a eventos El Niño presentan una distribución espacial diferenciada y que la señal puede alcanzar sectores andinos. En consecuencia, los promedios provinciales deben analizarse junto con su variabilidad interanual y su configuración espacial.

La provincia de Napo reúne condiciones particularmente apropiadas para este análisis. Su territorio se extiende desde laderas y valles de la Cordillera Oriental hasta ambientes de menor altitud en dirección amazónica. Esta configuración sostiene una red hidrográfica densa y ecosistemas de elevada biodiversidad, pero también incrementa la exposición a inundaciones, deslizamientos y alteraciones en la disponibilidad hídrica. La planificación de infraestructura, el manejo de cuencas y la gestión del riesgo requieren información climática continua y comparable.

Sin embargo, las redes de observación terrestre son limitadas en numerosos sectores andino-amazónicos. Las dificultades de acceso, mantenimiento y continuidad de las estaciones introducen vacíos que restringen la interpolación convencional. Los reanálisis atmosféricos integran observaciones y modelos físicos para producir campos continuos y homogéneos. ERA5, desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ofrece registros horarios globales con resolución de 0,25° y constituye una fuente ampliamente utilizada para estudios climáticos (Hersbach et al., 2020).

La utilidad de ERA5 no elimina la necesidad de cautela. Evaluaciones globales han identificado errores mayores en regiones tropicales y limitaciones en la magnitud de los extremos de precipitación (Lavers et al., 2022). La topografía suavizada de una celda de reanálisis tampoco representa todos los procesos locales, especialmente en gradientes montañosos. En este trabajo, ERA5 se emplea para caracterizar patrones regionales, no para sustituir mediciones de estación ni para estimar impactos a escala de comunidad.

El objetivo fue caracterizar la distribución espacial, la variabilidad interanual y la estacionalidad de la precipitación en la provincia de Napo durante 2000–2024 mediante datos ERA5. Específicamente, se estimaron estadísticos anuales, climatologías mensuales y estacionales, gradientes espaciales e Índice de Estacionalidad. La investigación se diferencia de análisis centrados en provincias vecinas al considerar el

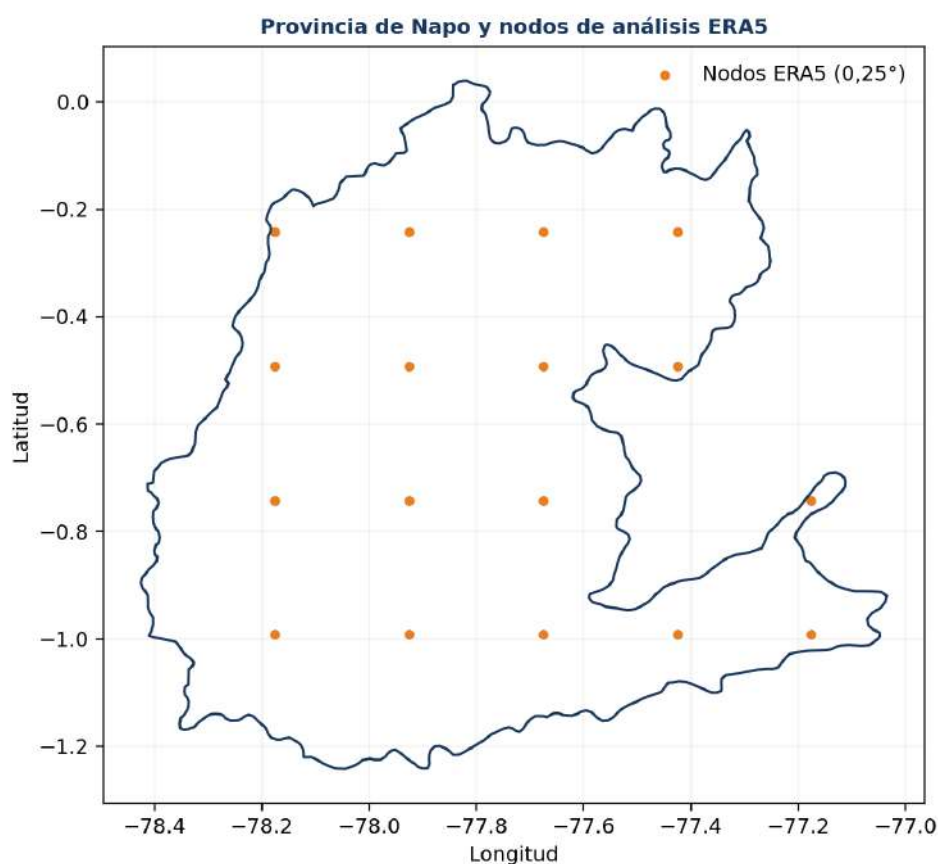
contraste interno de Napo y cerrar el período en 2024, en coherencia con una línea base disponible para esa fecha.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Napo se localiza en el centro-norte de la Amazonía ecuatoriana y tiene como capital a Tena. Limita con Sucumbíos al norte, Pastaza al sur, Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua al oeste, y Orellana al este. Su superficie es de aproximadamente 12.542,5 km² (Consortio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador [CONGOPE], 2024). La provincia comprende los cantones Tena, Archidona, Quijos, El Chaco y Carlos Julio Arosemena Tola, e incluye desde ambientes montañosos hasta tierras bajas amazónicas.

Figura 1. Provincia de Napo y nodos ERA5 incluidos en el análisis.



Nota. El límite administrativo procede de geoBoundaries y los puntos representan los centros de las celdas seleccionadas dentro del polígono provincial.

2.2. Fuente y selección de datos

Se utilizó precipitación total del reanálisis ERA5 para el período comprendido entre el 1 de enero de 2000 y el 31 de diciembre de 2024. ERA5 combina un sistema de asimilación de datos con el modelo atmosférico del ECMWF y produce campos globales consistentes (Hersbach et al., 2020). Los datos se consultaron mediante la interfaz histórica de Open-Meteo, especificando exclusivamente el modelo ERA5, resolución de 0,25°, zona horaria UTC y precipitación diaria acumulada. La interfaz funciona como vía de acceso y agregación; el producto climático de origen corresponde a ERA5 (Zippenfenig, 2023).

El límite provincial se obtuvo de geoBoundaries, una base abierta de divisiones político-administrativas (Runfola et al., 2020). Se generó una malla regular de 0,25° y se conservaron 17 centros de celda localizados dentro del polígono de Napo. La selección “nearest” evitó ajustes topográficos adicionales del punto solicitado. Cada serie incluyó 9.132 días y fue comprobada para verificar continuidad temporal y ausencia de valores nulos.

2.3. Procesamiento temporal y estadístico

Los acumulados diarios se sumaron por mes y por año para cada celda. Posteriormente se calculó el promedio espacial simple de las 17 celdas, de modo que cada celda tuviera el mismo peso en la síntesis provincial. Sobre la serie anual se estimaron media, mínimo, máximo, desviación estándar muestral y coeficiente de variación (CV). El CV se calculó como la razón entre la desviación estándar y la media, multiplicada por 100.

Para describir el ciclo intraanual se obtuvo la climatología mensual 2000–2024 y se agruparon los meses en cuatro estaciones climatológicas: DJF (diciembre–enero–febrero), MAM (marzo–abril–mayo), JJA (junio–julio–agosto) y SON (septiembre–octubre–noviembre). Dado que el objetivo fue climatológico, diciembre se combinó con enero y febrero a partir de los promedios mensuales de todo el período, sin asignar temporadas a un año hidrológico específico.

2.4. Índice de estacionalidad

La concentración anual de la lluvia se evaluó mediante el Índice de Estacionalidad de Walsh y Lawler (1981): $SI = (1/R) \sum |X_n - R/12|$, donde X_n es la precipitación media del mes n y R es la precipitación media anual. Valores bajos representan lluvia distribuida durante el año; valores crecientes indican concentración en menos meses. El indicador se interpretó junto con la curva mensual, evitando considerar por sí solo la ocurrencia de sequías o extremos diarios.

2.5. Representación espacial y control de calidad

La precipitación anual media y las climatologías estacionales se representaron mediante interpolación lineal entre los nodos ERA5 y recorte al límite provincial. Esta interpolación se utilizó únicamente para visualización; todos los estadísticos se calcularon directamente sobre las celdas originales. El procesamiento se realizó en Python con Pandas, NumPy y Matplotlib. Se verificaron unidades, fechas, número de observaciones y coherencia entre las sumas mensuales, estacionales y anuales.

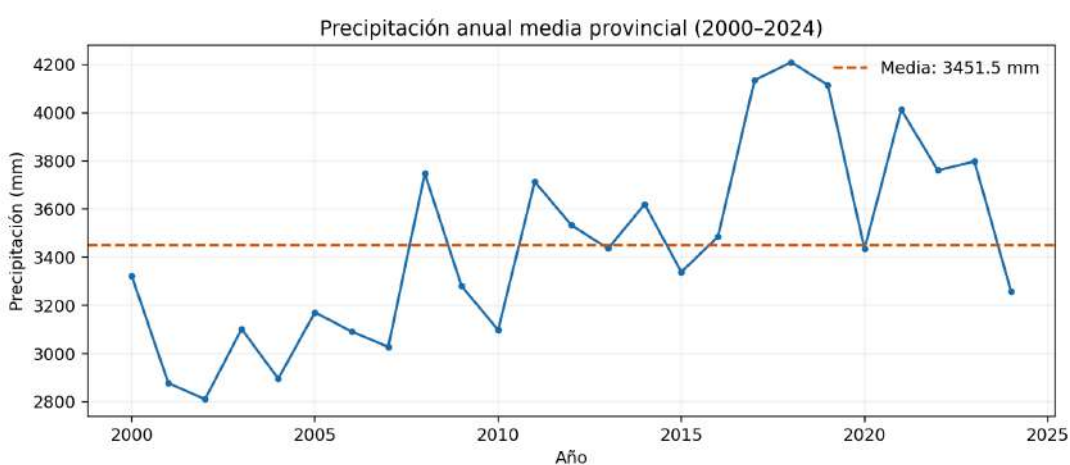
3. Resultados y discusión

3.1. Variabilidad interanual

La precipitación media anual de Napo alcanzó 3.451,45 mm durante 2000–2024. La desviación estándar fue de 407,60 mm y el coeficiente de variación de 11,81 %, lo cual indica una variabilidad interanual moderada en relación con el elevado volumen medio de lluvia. El menor promedio provincial correspondió a 2002, con 2.810,53 mm, y el mayor a 2018, con 4.209,84 mm. La diferencia entre ambos extremos fue de 1.399,31 mm.

Tabla 1. Estadísticos de la precipitación anual media provincial, 2000–2024.

Indicador	Valor
Media anual	3.451,45 mm
Mínimo anual	2.810,53 mm (2002)
Máximo anual	4.209,84 mm (2018)
Desviación estándar	407,60 mm
Coeficiente de variación	11,81 %

Figura 2. Serie de precipitación anual media provincial.

La alternancia de años por encima y por debajo del promedio confirma que un régimen húmedo permanente no implica estabilidad anual. La variabilidad puede responder a combinaciones de circulación amazónica, temperatura superficial del mar y forzantes de escala interanual. Arias et al. (2021) identifican a ENSO y a las anomalías de los océanos Pacífico y Atlántico como moduladores relevantes del hidroclima andino. No obstante, atribuir 2002 o 2018 a un mecanismo particular exigiría un análisis específico de teleconexiones, fuera del alcance de este estudio.

3.2. Ciclo mensual y estacionalidad

El ciclo mensual presentó máximos entre marzo y mayo. Marzo fue el mes más lluvioso, con 359,79 mm, seguido de abril (350,47 mm) y mayo (338,35 mm). El mínimo ocurrió en septiembre, con 183,34 mm, mientras agosto alcanzó 194,98 mm. Incluso durante el bimestre relativamente menos húmedo, los acumulados medios permanecieron elevados, lo que confirma la ausencia de una estación seca intensa a escala provincial.

Figura 3. Climatología mensual de la precipitación en Napo.

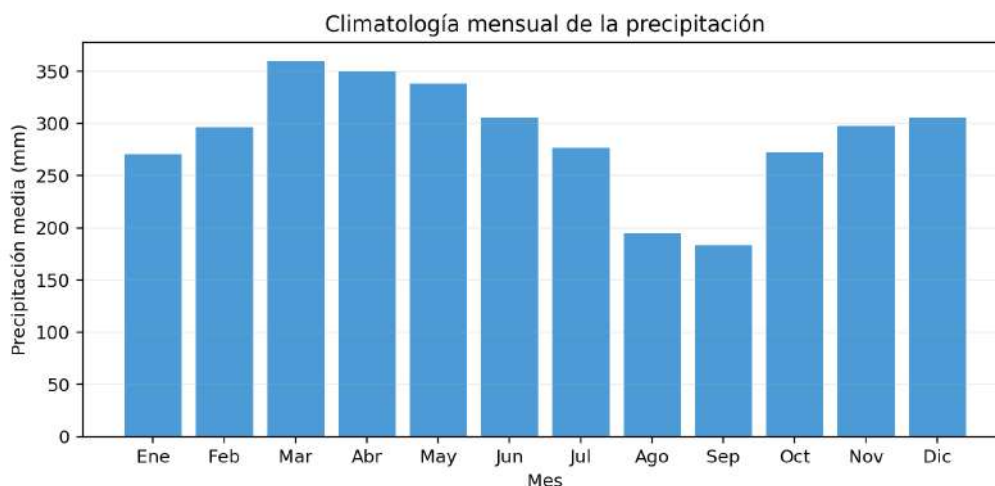


Tabla 2. Precipitación climatológica por estación.

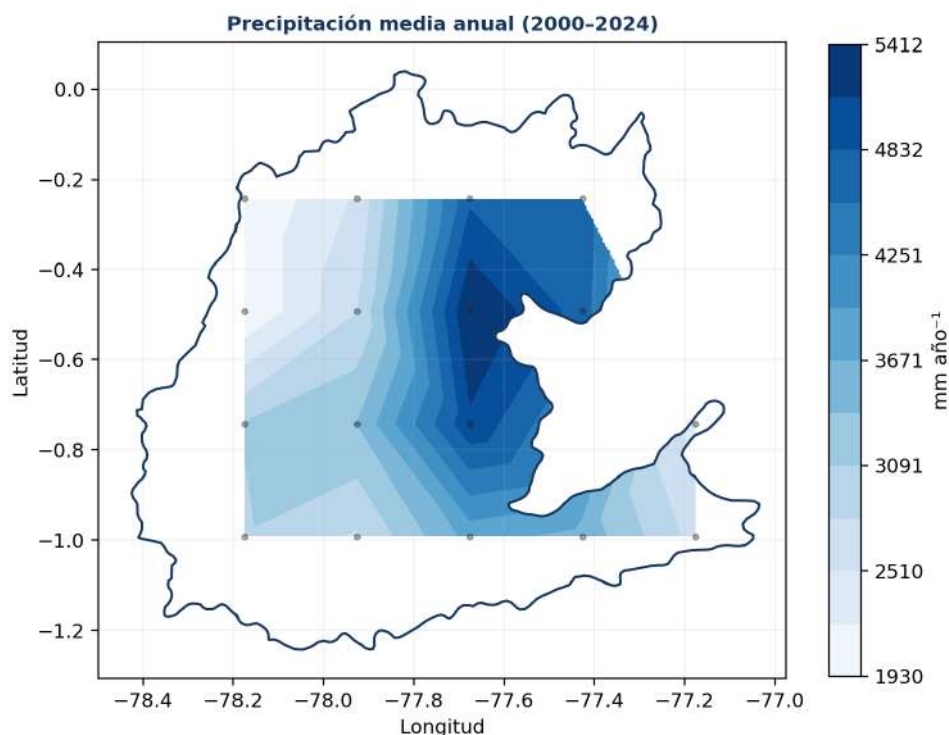
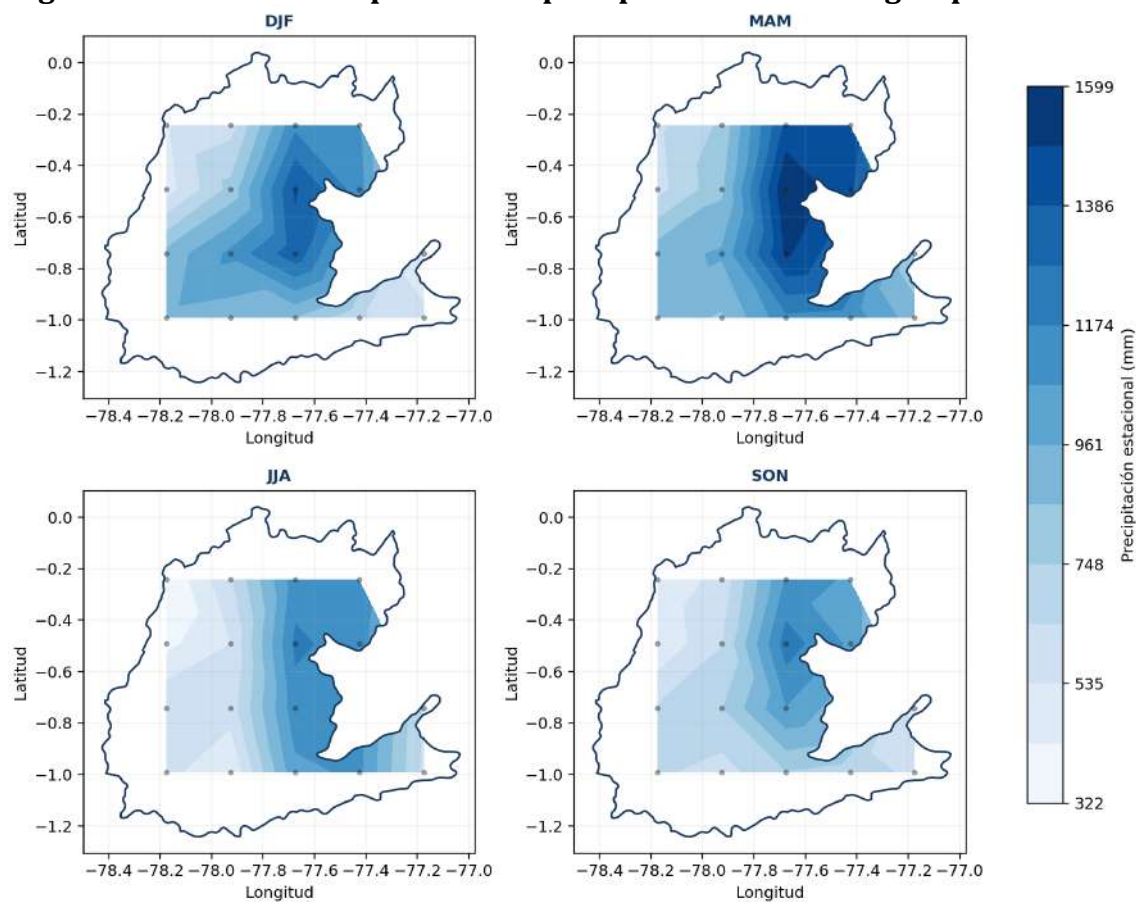
Estación	Meses	Precipitación media
DJF	Dic.-ene.-feb.	872,51 mm
MAM	Mar.-abr.-may.	1.048,62 mm
JJA	Jun.-jul.-ago.	777,36 mm
SON	Sep.-oct.-nov.	752,97 mm

MAM concentró el mayor acumulado, equivalente a 30,38 % de la precipitación anual media. SON fue la estación menos lluviosa, con 21,82 %, seguida de JJA. La diferencia entre MAM y SON fue de 295,65 mm. Esta configuración es coherente con la dinámica del norte tropical andino, donde la precipitación resulta de la convergencia de humedad, convección y modulación orográfica (Arias et al., 2021; Poveda et al., 2020).

El Índice de Estacionalidad fue 0,139. Según la clasificación de Walsh y Lawler (1981), el resultado corresponde a una precipitación distribuida de manera muy uniforme a lo largo del año. El valor es inferior al obtenido en zonas con una estación seca marcada y refuerza la lectura de la climatología mensual. Sin embargo, un promedio uniforme no excluye intervalos secos de corta duración ni eventos intensos, aspectos que requieren índices diarios específicos.

3.3. Distribución espacial

La precipitación anual media por celda varió entre 1.927,50 y 5.420,95 mm. Este rango muestra que el promedio provincial oculta contrastes internos importantes. Los mayores valores se concentraron en sectores vinculados a la transición orográfica, mientras los menores aparecieron en celdas donde la representación del relieve y la exposición al flujo húmedo fueron distintas. La persistencia del gradiente en las cuatro estaciones sugiere un control geográfico estable, aunque la magnitud cambió durante el ciclo anual.

Figura 4. Distribución espacial de la precipitación media anual, 2000–2024.**Figura 5. Distribución espacial de la precipitación climatológica por estación.**

El patrón concuerda con el papel de la Cordillera de los Andes como barrera y mecanismo de ascenso del aire húmedo. Poveda et al. (2020) describen diferencias entre precipitación convectiva y estratiforme en la transición Andes–Amazonía, mientras Arias et al. (2021) resaltan que los gradientes orográficos constituyen una de las principales fuentes de heterogeneidad hidroclimática. En Napo, donde la altitud cambia rápidamente, esta interacción es especialmente relevante para interpretar mapas de precipitación.

3.4. Alcances y limitaciones

ERA5 permitió construir una serie continua y espacialmente comparable para un territorio con cobertura instrumental desigual. Su principal fortaleza es la consistencia temporal del sistema de reanálisis, apropiada para climatologías regionales. No obstante, la resolución de 0,25° suaviza valles, crestas y gradientes locales; además, los modelos atmosféricos pueden representar de forma incompleta la convección tropical. Lavers et al. (2022) encontraron que los errores de precipitación de ERA5 son mayores en los trópicos y que los acumulados extremos pueden ser subestimados.

Los mapas interpolados no deben utilizarse como predicción puntual. La media espacial simple tampoco ponderó el área efectiva de cada celda en el borde provincial, por lo que sus cifras representan una síntesis de los centros seleccionados. Investigaciones posteriores deberían validar ERA5 con estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, comparar con productos satelitales como CHIRPS o IMERG, aplicar ponderación por área y examinar índices de extremos. Estas extensiones permitirían cuantificar sesgos y mejorar aplicaciones hidrológicas locales.

4. Conclusiones

La provincia de Napo presentó un régimen muy húmedo durante 2000–2024, con precipitación media anual de 3.451,45 mm y variabilidad interanual moderada (CV = 11,81 %). Los extremos anuales ocurrieron en 2002 y 2018, evidenciando diferencias sustanciales aun dentro de un clima con lluvias persistentes.

La mayor concentración climatológica ocurrió en MAM, con 1.048,62 mm, mientras SON registró el menor acumulado, con 752,97 mm. El Índice de Estacionalidad de 0,139 clasificó la distribución como muy uniforme durante el año. Por tanto, Napo no exhibe una estación seca bien definida a escala provincial, aunque agosto y septiembre constituyen el período relativamente menos lluvioso.

La variación espacial entre 1.927,50 y 5.420,95 mm anuales reveló un gradiente interno asociado a la transición andino-amazónica. ERA5 resultó útil para construir una línea base regional reproducible hasta 2024, pero la interpretación local exige validación con estaciones y productos de mayor resolución. Los resultados pueden apoyar la planificación hídrica, el ordenamiento territorial y la identificación preliminar de sectores que requieren monitoreo más detallado.

Referencias

- Arias, P. A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., & van Oevelen, P. J. (2021). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8, 505467. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.505467>
- Campozano, L., Ballari, D., Celleri, R., & Matovelle, C. (2020). Future meteorological droughts in Ecuador: Decreasing trends and associated spatio-temporal features derived from CMIP5 models. *Frontiers in Earth Science*, 8, 17. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00017>
- Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador. (2024). Provincia de Napo. <https://www.congope.gob.ec/provincia-de-napo/>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Junquas, C., Heredia, M. B., Condom, T., Ruiz-Hernández, J. C., Campozano, L., Dudhia, J., Espinoza, J. C., Menegoz, M., Rabatel, A., & Sicart, J. E. (2022). Regional climate modeling of the diurnal cycle of precipitation and associated atmospheric circulation patterns over an Andean glacier region (Antisana, Ecuador). *Climate Dynamics*, 58, 3075–3104. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06079-y>
- Lavers, D. A., Simmons, A., Vamborg, F., & Rodwell, M. J. (2022). An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748), 3152–3165. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H. A., & Kumar, T. V. L. (2021). Long-term spatiotemporal variation of droughts in the Amazon River Basin. *Water*, 13(3), 351. <https://doi.org/10.3390/w13030351>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High impact weather events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8, 162. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Runfola, D., Anderson, A., Baier, H., Crittenden, M., Dowker, E., Fuhrig, S., Goodman, S., Grimsley, G., Layko, R., Melville, G., Mulder, M., Oberman, R., Panganiban, G., Peck, A., Seitz, L., Shea, S., Slevin, H., Youngerman, R., & Hobbs, L. (2020). geoBoundaries: A global database of political administrative boundaries. *PLOS ONE*, 15(4), e0231866. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231866>
- Thielen, D. R., Ramoni-Perazzi, P., Zamora-Ledezma, E., Puche, M. L., Márquez, M., Quintero, J. I., & Arizapana-Almonacid, M. A. (2023). Effect of extreme El Niño events on the precipitation of Ecuador. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(4), 1507–1527. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1507-2023>



- Walsh, R. P. D., & Lawler, D. M. (1981). Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 36(7), 201–208. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1981.tb05400.x>
- Zippenfenig, P. (2023). Open-Meteo.com weather API [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7970649>