Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento Arquitectura y Construcción

“VALIDACIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN ERA5 EN EL PERIODO 2011-2021 EN EL PACÍFICO DE NICARAGUA”

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por:

Br. Henry Eduardo Loaisiga Hernández
Carnet: 2018-0815U

Br. Pedro Antonio Balladares Duarte
Carnet: 2017-0037U

Tutor:

Dr.-Ing. Jassy Danisse Rivera Solís

27 de febrero de 2026
Managua Nicaragua

Dedicatoria

A nuestros seres queridos, quienes han sido nuestro soporte y motivación en cada paso de este camino:

A nuestras familias, por su amor incondicional, por creer en nosotros incluso en los momentos más difíciles y por brindarnos la fortaleza necesaria para seguir adelante.
A nuestros amigos, por su apoyo constante, por esas palabras de aliento que iluminaron los días más complicados y por recordarnos siempre el valor de perseverar.
A nuestros profesores y mentores, por compartir su conocimiento, guiarnos con paciencia y despertar en nosotros la pasión por la investigación y el aprendizaje.
Y, especialmente, a Nicaragua, nuestra tierra querida, que, con su belleza y sus desafíos, nos inspiró a emprender este estudio con la esperanza de contribuir, aunque sea un poco, a su desarrollo y bienestar.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y lo dedicamos a todos aquellos que, de una u otra forma, han sido parte de esta historia. ¡Gracias!

Pedro Antonio Balladares Duarte

Henry Eduardo Loaisiga Hernández

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios**,** por darnos la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia para culminar este proyecto. Sin Su guía, nada de esto habría sido posible.

A nuestras familias, especialmente a nuestros padres, hermanos y seres queridos, por su apoyo incondicional, por creer en nosotros y por ser nuestra fuente de inspiración en los momentos más desafiantes. Su amor y aliento han sido el motor que nos ha impulsado a seguir adelante.

A nuestra tutora Dra. Jassy Danisse Rivera Solís, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación. Gracias por compartir su conocimiento, por corregir nuestros errores y por guiarnos con sabiduría en cada etapa de este proceso. Su compromiso ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

A las instituciones y organizaciones que facilitaron los datos y recursos necesarios para esta investigación, en especial al Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) por proporcionar los datos meteorológicos, y al Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF) por el acceso a los datos de ERA5. Sin su colaboración, este estudio no habría sido posible.

A nuestros profesores y mentores, quienes sembraron en nosotros la curiosidad por la ciencia y el deseo de aprender. Gracias por compartir su conocimiento y por motivarnos a explorar nuevos horizontes.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo, ya sea con sus consejos, su tiempo o su aliento. Cada pequeño gesto fue invaluable para nosotros.

Gracias a todos por ser parte de esta historia. Este logro es también suyo. ¡Gracias de corazón!

Pedro Antonio Balladares Duarte

Henry Eduardo Loaisiga Hernández

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo validar el conjunto de datos de precipitación del reanálisis ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF), para el período 2011–2021 en el Pacífico de Nicaragua. La validación se realizó comparando la precipitación de ERA5 con registros observados en estaciones meteorológicas (INETER), considerando la variabilidad espacial y temporal.

El análisis se efectuó en tres escalas temporales: diaria, mensual y anual. La consistencia de los registros observados se evaluó mediante el método de curva de doble masa. Las estaciones analizadas corresponden a: Aeropuerto (ACS), Rivas, Campos Azules, Nandaime, Monterrosa, León, Corinto y Chinandega, que se encuentran distribuidas a lo largo de la región del Pacífico de Nicaragua.

Para cada estala temporal se analizaron métricas de desempeño continuas como el sesgo (BIAS), Raíz del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (r), la Eficiencia de Nash – Stucliffe (NSE) y el Índice de concordancia de Willmott (d). En escala diaria, se incluyeron además tres métricas categóricas: Probabilidad de detección (POD), la Razón de falsas alarmas (FAR) y el Índice de éxito crítico (CSI).

En términos generales, los resultados muestran un desempeño más favorable a escala mensual, donde ERA5 reproduce de manera consistente el patrón temporal observado, aunque persisten diferencias en magnitud según la estación. En cambio, a escala diaria el desempeño es más limitado, debido a discrepancias en la ocurrencia e intensidad de eventos. En consecuencia, se recomienda el uso de ERA5 principalmente para análisis mensuales orientados a caracterización climática y, cuando se requieran magnitudes absolutas, aplicar corrección de sesgo y verificación adicional con registros locales.

Tabla de contenido

Resumen .....
1. Generalidades 2
1.1 Introducción 2
1.2 Antecedentes 4
1.3 Justificación 5
1.4 Objetivos 6
1.4.1 Objetivo general 6
1.4.2 Objetivos específicos 6
1.5 Descripción de área de estudio 7
1.5.1 Ubicación geográfica 7
1.5.2 Contexto climático 8
2. Marco teórico 10
2.1 Funcionamiento y características de ERA5 10
2.2 Utilización de ERA5 11
2.3 El acceso a los datos de ERA5 12
Asimismo, se expresa que 13
2.4 Marco conceptual 13
2.5 Enfoque específico en Nicaragua (2011-2021) 14
2.6 INETER 15
3. Diseño Metodológico 17
3.1 Descripción del universo de estudio 17
3.1.1 Población y muestra 17
3.1.2 Localización del área de estudio 18
3.2 Tipo de información requerida para el estudio 19
3.2.1 Datos observados 19
3.2.2 Datos modelados (ERA5) 19
3.3 Fuentes de datos 19
3.3.1 Fuentes de datos observados 19
3.3.2 Fuentes de datos modelados 19

3.4 Instrumentos para el procedimiento y el análisis de datos..... 19
3.4.1 Software y herramientas..... 19
3.4.2 Recolección de la información..... 20
3.5 Métodos de validación de datos de precipitación..... 21
3.5.1 Métricas estadísticas de error..... 21
3.5.1 Índices categóricos..... 23
4. Resultados e interpretación..... 26
4.1 Análisis de homogeneidad y consistencia..... 26
4.2 Estadística descriptiva..... 27
4.2.1 Análisis en escala diaria..... 28
4.2.2 Análisis en escala mensual..... 31
4.3 Evaluación en escala diaria..... 35
4.3.1 Métricas categóricas..... 36
4.4 Evaluación en escala mensual..... 38
4.5 Evaluación en escala anual..... 39
4.6 Utilidad práctica de ERA5 a partir de las métricas estadísticas..... 40
5. Conclusiones..... 43
6. Recomendaciones..... 46
Bibliografía..... 48
Anexos..... 51
Anexo A. Análisis anual estaciones meteorológicas in situ vs ERA5..... 51
Anexo B. Matriz de contingencia de estaciones meteorológicas..... 53
Anexo C. Precipitaciones anuales acumuladas de análisis de homogeneidad método doble masa..... 55
Anexo D. Comparativa gráfica por métrica y por estación..... 59

Índice de Tablas

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del Pacífico de Nicaragua 18
Tabla 2. Resultados de métricas estadísticas en escala diaria 35
Tabla 3. Resultados de métricas categóricas en escala diaria 37
Tabla 4. Resultados de métricas estadísticas en escala mensual 38
Tabla 5. Resultados de métricas estadísticas en escala anual 39

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de Nicaragua 7
Figura 2. Mapa de estaciones del Pacífico de Nicaragua 18
Figura 3. Curva de doble masa estaciones: Aeropuerto, Rivas, Nandaime y Campos Azules 26
Figura 4. Curva de doble masa estaciones: Monterrosa, León, Corinto, Chinandega 27
Figura 5. Serie diaria INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E1 – E6 28
Figura 6. Serie diaria INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E7 – E8 29
Figura 7. Diagrama de cajas Observaciones diarias vs ERA5 (2011–2021), sin datos atípicos 30
Figura 8. Diagrama de cajas Observaciones diarias vs ERA5 (2011–2021), con datos atípicos 31
Figura 9. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E1 – E2 31
Figura 10. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E3 – E5 32
Figura 11. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E6 – E8 33
Figura 12. Diagrama de cajas Observaciones mensuales vs ERA5 (2011–2021) con datos atípicos 34

Índice de Tablas en anexos

Tabla B. 1 Matriz de contingencia estación Aeropuerto ACS 53
Tabla B. 2 Matriz de contingencia estación Campos Azules 53
Tabla B. 3 Matriz de contingencia estación Chinandega 53
Tabla B. 4 Matriz de contingencia estación Corinto 53
Tabla B. 5 Matriz de contingencia estación León 53
Tabla B. 6 Matriz de contingencia estación Monterrosa 54
Tabla B. 7 Matriz de contingencia estación Nandaime 54
Tabla B. 8 Matriz de contingencia estación Rivas 54

Tabla C. 1 Precipitación anual acumulada de la estación meteorológica del Aeropuerto ACS 55
Tabla C. 2 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Campos Azules 55
Tabla C. 3 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Chinandega 56
Tabla C. 4 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Corinto 56
Tabla C. 5 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica León 57
Tabla C. 6 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Monterrosa 57
Tabla C. 7 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Nandaime 58
Tabla C. 8 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Rivas 58

Índice de Figuras en anexos

Figura A. 1 Estación meteorológica Aeropuerto ACS y Campos azules 51
Figura A. 2 Estación meteorológica Chinandega y Corinto 51
Figura A. 3 Estación meteorológica León y Monterrosa 52
Figura A. 4 Estación meteorológica Nandaime y Rivas 52

Figura D. 1 Sesgo diario (BIAS) en mm/día 59
Figura D. 2 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación diaria 59
Figura D. 3 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) diario 60
Figura D. 4 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) para precipitación diaria 60
Figura D. 5 Índice de concordancia (d) diario 61
Figura D. 6 Sesgo (BIAS) para precipitación mensual en mm/mes 61
Figura D. 7 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación mensual 62
Figura D. 8 Raíz del error cuadrático medio (RMSE) mensual 62
Figura D. 9 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) mensual 63
Figura D. 10 Índice de concordancia (d) mensual 63
Figura D. 11 Sesgo (BIAS) para precipitación anual en mm/año 64
Figura D. 12 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación anual 64
Figura D. 13 Raíz del error cuadrático medio (RMSE) anual 65
Figura D. 14 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) anual 65
Figura D. 15 Índice de concordancia (d) anual 66

CAPITULO 1
GENERALIDADES

1. Generalidades

1.1 Introducción

La precipitación es uno de los fenómenos climáticos más importantes para el desarrollo de las sociedades y los ecosistemas, ya que influye directamente en la disponibilidad de recursos hídricos, la agricultura, la generación de energía y la gestión de riesgos naturales (Hersbach, y otros, 2020). En regiones tropicales como Nicaragua, donde la variabilidad climática es alta y los eventos extremos, como sequías e inundaciones, son frecuentes, contar con datos precisos y confiables de precipitación es fundamental para la planificación y toma de decisiones (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2021). Sin embargo, en muchos países en desarrollo, la red de estaciones meteorológicas es limitada y los datos observados suelen presentar inconsistencias debido a problemas técnicos, falta de mantenimiento o interrupciones en la recopilación de información (Dourojeanni & Jouravlev, 2001).

En este contexto, el reanálisis climático ha surgido como una herramienta valiosa para complementar los datos observados. Entre ellos, el conjunto de datos ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (ECMWF), se ha posicionado como uno de los productos más completos y precisos a escala global. ERA5 combina observaciones satelitales y terrestres con modelos numéricos para ofrecer una reconstrucción detallada de las variables climáticas, incluida la precipitación, con una resolución temporal y espacial sin precedentes. No obstante, a pesar de su amplia utilización en estudios climáticos e hidrológicos, la precisión de ERA5 debe validarse en contextos locales, ya que su desempeño puede variar significativamente según las características geográficas y climáticas de cada región. (Hersbach, y otros, 2020)

Nicaragua, ubicada en el corazón de Centroamérica, presenta una gran diversidad climática, con zonas secas en el Pacífico, regiones húmedas en el Caribe y áreas montañosas que influyen en los patrones de precipitación. Esta complejidad geográfica y climática hace que la validación de ERA5 en el país sea particularmente relevante. Aunque estudios previos han evaluado el desempeño

de ERA5 en otras regiones tropicales, en Nicaragua no se ha realizado una validación exhaustiva de este conjunto de datos. Esta brecha de conocimiento limita la confiabilidad de los resultados obtenidos con ERA5 en aplicaciones locales.

Este estudio se centra en la validación del conjunto de datos de precipitación ERA5 en el Pacífico de Nicaragua entre 2011 y 2021, utilizando como referencia las observaciones de estaciones meteorológicas. Se propone una metodología que abarca la comparación estadística de los datos de ERA5 con estas observaciones, con el fin de identificar sesgos, errores sistemáticos y patrones espaciales y temporales.

Los hallazgos de este análisis no solo permiten comprender mejor las limitaciones y fortalezas de ERA5 en el contexto nicaragüense, sino que también ofrecen recomendaciones prácticas para su aplicación en estudios climáticos e hidrológicos. En este sentido, la validación de ERA5 en Nicaragua no solo tiene un carácter científico, sino también práctico. Los datos de precipitación son esenciales para la gestión de los recursos hídricos, la planificación agrícola y la prevención de desastres.

1.2 Antecedentes

A nivel regional se identifican algunos estudios que han investigado la precisión de diferentes productos satelitales. Gaitán y Biancari (2024) desarrollaron una base de datos de Precipitaciones Mensuales de la República Argentina (PMRAv1) que cubre el período 2000-2022, con una resolución espacial de 5 km, y utiliza una metodología de regresión de bosques aleatorios para combinar datos de pluviómetros y productos globales de precipitación por satélite. Su metodología permitió mejorar la estimación de precipitaciones mensuales al fusionar diversas fuentes de información. La validación con el 30% de los datos de pluviómetros mostró que PMRAv1 superó significativamente a los productos globales en parámetros como Error cuadrático medio, Error absoluto medio, Error de modelado y coeficiente de determinación, además de ser más estable en la predicción de valores mensuales.

En Nicaragua no se cuenta con estudios similares para ERA5, pero sí para otros productos del mismo tipo. Rivera y otros (2023) evaluaron el desempeño del conjunto de datos CHIRPS en 17 estaciones pluviométricas distribuidas en todo el país, aunque con una representación menor en la Costa Caribe que en las otras regiones. La validación se llevó a cabo en diferentes escalas temporales (diaria, pentadal, mensual y anual) utilizando diversas métricas de error y permitió detectar que la correlación entre este producto, que combina datos satelitales con datos in situ, es mayor a escala mensual.

La región del Pacífico de Nicaragua se caracteriza por un clima tropical con una estación seca (diciembre-abril) y una estación lluviosa (mayo-noviembre). La precipitación en esta zona está influenciada por la topografía, la cercanía al Océano Pacífico y los fenómenos climáticos antes mencionados. Estudios previos han destacado la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en esta región, lo que la convierte en un área desafiante para la validación de datos de reanálisis. (Gómez, y otros, 2021)

1.3 Justificación

Los datos de precipitación son esenciales para la agricultura, la gestión de los recursos hídricos, la prevención de desastres naturales y la investigación climática. Sin embargo, la precisión de estos datos puede variar significativamente según la región, debido a factores como la topografía, la cobertura terrestre y la densidad de las estaciones de observación. La ausencia de estudios específicos sobre ERA5 en Nicaragua, apartando los estudios globales o regionales (Stewart, Maurer, Stahl, & Joseph, 2021), también evidencia la necesidad de investigaciones de este tipo.

La validación de la precisión del conjunto de datos de precipitación ERA5 en Nicaragua es fundamental para mejorar la comprensión y la confiabilidad de los modelos climáticos, y esto es importante no solo para posibles aplicaciones de estos datos en el país, sino también para realimentar el desempeño de estos modelos.

La región del Pacífico es particularmente vulnerable a fenómenos climáticos extremos, que tienen un impacto directo en la economía y la sociedad. A pesar de la disponibilidad de datos satelitales como ERA5, es crucial validar su precisión mediante observaciones terrestres para garantizar su utilidad en aplicaciones locales. Este estudio busca llenar este vacío al comparar los datos de precipitación de ERA5 con observaciones de 8 estaciones terrestres en la región del Pacífico de Nicaragua.

La validación de ERA5 con observaciones terrestres no solo permite evaluar su precisión, sino también identificar posibles sesgos o limitaciones del conjunto de datos. Esto es especialmente relevante en regiones como Nicaragua, donde la infraestructura de observación meteorológica es limitada y los datos satelitales pueden ser una alternativa valiosa.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Validar la precisión del conjunto de datos de precipitación ERA5 durante el periodo 2011-2021 en el Pacífico de Nicaragua, utilizando observaciones terrestres como referencia.

1.4.2 Objetivos específicos

- Implementar el control de calidad de los datos de precipitación in situ, completando los datos faltantes y analizando la homogeneidad para garantizar la fiabilidad de la información climática en Nicaragua.
- Comparar estadísticamente los datos de ERA5 con las observaciones terrestres en escalas temporales diarias, mensuales y anuales para evaluar la precisión y la consistencia de ambos conjuntos de datos.
- Proponer recomendaciones para el uso de ERA5 en estudios climáticos e hidrológicos en Nicaragua.

1.5 Descripción de área de estudio

1.5.1 Ubicación geográfica

Nicaragua, ubicada en el istmo centroamericano, es el país más grande de América Central. Limita al norte con Honduras, al sur con Costa Rica, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. El área de estudio abarca todo el territorio nacional, desde las coordenadas aproximadas 10°45' N a 15°00' N de latitud y 83°10' O a 87°40' O de longitud.

Figura 1. Mapa de ubicación de Nicaragua



Fuente: (The Word Atlas, 2005)

En el presente documento se considerará la zona del Pacífico de Nicaragua como área de estudio. La región del Pacífico es la más pequeña de las tres grandes regiones geográficas de Nicaragua (Pacífico, Centro-Norte y Caribe). Se ubica en el occidente del país, limitando al oeste con el Océano Pacífico y al este con la cadena montañosa de los Macizos del Norte y Sur y la Depresión Lacustre (que incluye los Grandes Lagos).

Es una franja de tierra relativamente angosta que se extiende desde el Golfo de Fonseca (que comparte con Honduras y El Salvador) en el norte, hasta las inmediaciones del Lago Cocibolca (Lago de Nicaragua) y la frontera con Costa Rica en el sur.

1.5.2 Contexto climático

El clima del Pacífico de Nicaragua se clasifica como tropical seco o de sabana caracterizado por una marcada estacionalidad con dos periodos bien definidos: una larga estación seca y una intensa estación lluviosa. La estación seca, se extiende desde noviembre hasta abril. Durante estos meses, predominan los cielos despejados, la humedad relativa disminuye notablemente y las precipitaciones son escasas o nulas. Es un período de altas temperaturas, que suelen alcanzar su pico máximo en abril, antes de las primeras lluvias, y se ve influenciado por los vientos alisios del noreste que aportan un ambiente más fresco y ventoso, especialmente en las zonas costeras.

La estación lluviosa, abarca de mayo a octubre y está dominada por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este periodo se divide en dos fases: la "primera" o entrada de las lluvias en mayo-junio, y el llamado "canícula" o veranillo a mediados de julio y agosto, una breve pausa seca de unas dos a tres semanas. Las lluvias se manifiestan principalmente en forma de aguaceros torrenciales y cortos, típicamente al final de la tarde o noche, seguidos de cielos despejados por la mañana. La vegetación, que se había marchitado durante la sequía, se vuelve rápidamente exuberante y verde.

Este patrón climático está intrínsecamente ligado a la vocación agrícola de la región, ya que los suelos volcánicos fértiles dependen de estas lluvias para los cultivos de granos básicos, caña de azúcar y maní. Sin embargo, la región es altamente vulnerable a fenómenos climáticos extremos. Eventos como El Niño Oscilación Sur (ENOS) provocan sequías más intensas durante "El Niño", mermando la producción, mientras que "La Niña" o la influencia de sistemas de baja presión y huracanes en el Caribe (que indirectamente afectan al Pacífico) pueden generar lluvias excesivas, inundaciones y graves daños en la infraestructura y la agricultura.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2. Marco teórico

ERA5 es el reanálisis de quinta generación del ECMWF (Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo) que abarca el clima global de las últimas ocho décadas, con datos disponibles desde 1940 (León, 2024). Este reanálisis integra datos del modelo con observaciones de todo el mundo, creando un conjunto de datos globalmente completo y coherente, fundamentado en las leyes de la física. Este enfoque, conocido como asimilación de datos, se basa en el método empleado por los centros de predicción numérica del tiempo. Cada 12 horas en el ECMWF, se combina un pronóstico previo con nuevas observaciones disponibles de manera óptima para generar una mejor estimación del estado de la atmósfera, conocida como análisis, a partir de la cual se realiza una previsión actualizada y mejorada.

El control de calidad de los datos de precipitación del reanálisis ERA5 implica varios pasos y procedimientos para asegurar su precisión y fiabilidad.

2.1 Funcionamiento y características de ERA5

Los productos de reanálisis ERA5, generados por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio y disponibles de forma gratuita a nivel global, han suscitado el interés de la comunidad científica en diversas áreas donde la disponibilidad de datos climáticos históricos puede facilitar la toma de decisiones. Uno de estos campos es la radio propagación en sistemas de comunicaciones por satélite, en el cual la caracterización física de la atmósfera mediante sus parámetros meteorológicos permite cuantificar, ya sea de manera instantánea o a través de distribuciones estadísticas, la atenuación provocada por gases atmosféricos, especialmente el oxígeno y el vapor de agua, así como por nubes y lluvia. (Soria, 2022)

- Se recopilan observaciones meteorológicas de diversas fuentes.
- Se ejecuta un modelo meteorológico para simular la evolución de las variables atmosféricas.

- Se utilizan técnicas de asimilación de datos para combinar las observaciones con el modelo, ajustando las predicciones del modelo a las observaciones reales.
- Este proceso se repite para un período de tiempo extenso, creando un registro climático consistente y completo.
- Cobertura Global: Cubre todo el planeta.
- Alta Resolución Espacial: Ofrece datos con una resolución de 0.25 grados (aproximadamente 31 km).
- Alta Resolución Temporal: Proporciona datos horarios.
- Largo Periodo de Tiempo: Los datos están disponibles desde 1940 hasta la actualidad.
- Gran Cantidad de Variables: Incluye una amplia gama de variables atmosféricas, terrestres y oceánicas, como temperatura, precipitación, viento, humedad, radiación.
- Satélites meteorológicos: Proporcionan información sobre la temperatura, la humedad, la radiación y otras variables en diferentes niveles de la atmósfera.
- Radiosondas: Globos meteorológicos que llevan instrumentos para medir variables atmosféricas en altura.
- Boyas oceánicas: Recopilan datos sobre la temperatura del agua, el viento y las olas en los océanos.
- Aeronaves: Recopilan datos meteorológicos durante los vuelos.

2.2 Utilización de ERA5

ERA5 se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo:

- Investigación climática: Para estudiar el cambio climático, la variabilidad climática y los eventos extremos.
- Predicción del tiempo: Como base para la predicción meteorológica a corto y medio plazo.

- Gestión de recursos hídricos: Para evaluar la disponibilidad de agua y gestionar los recursos hídricos.
- Agricultura: Para monitorear las condiciones meteorológicas y optimizar las prácticas agrícolas.
- Energía: Para evaluar el potencial de las energías renovables, como la solar y la eólica.
- Seguros: Para evaluar los riesgos asociados a eventos meteorológicos extremos.

2.3 El acceso a los datos de ERA5

Según Soria (2022) los datos de ERA5 son de acceso libre y gratuito y se pueden descargar desde el archivo de datos del ECMWF (MARS) a través de su API web. También están disponibles en otras plataformas, como Google Cloud.

La precipitación es un componente importante del ciclo hidrológico y un factor determinante en diversas actividades socioeconómicas, como la agricultura, la gestión de los recursos hídricos y la prevención de desastres naturales. La disponibilidad de datos de precipitación precisos y confiables es esencial para la modelización climática, la predicción del tiempo y la toma de decisiones informadas.

En las últimas décadas, los conjuntos de datos de precipitación basados en reanálisis atmosféricos, como ERA5 del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF), han ganado popularidad debido a su cobertura global, resolución espacial y temporal, y consistencia a largo plazo. Sin embargo, es fundamental validar estos conjuntos de datos con observaciones in situ para evaluar su precisión y confiabilidad en regiones específicas.

Cabe recalcar que, dentro de los sustentos teóricos, los reanálisis atmosféricos: son reconstrucciones numéricas del estado pasado de la atmósfera, utilizando modelos meteorológicos y asimilando observaciones de diversas fuentes, como estaciones meteorológicas, satélites, radiosondas y boyas. ERA5 es la quinta

generación del reanálisis atmosférico global del ECMWF, que proporciona estimaciones de variables meteorológicas, incluyendo la precipitación, con una resolución espacial de 0.25 grados y una resolución temporal horaria.

Asimismo, se expresa que la validación de datos de precipitación implica la comparación de un conjunto de datos (en este caso, ERA5) con un conjunto de datos de referencia, generalmente observaciones in situ de estaciones meteorológicas. El objetivo es evaluar la precisión y confiabilidad del conjunto de datos que se está validando.

Los métodos de validación: Se utilizan diversas métricas estadísticas para evaluar la concordancia entre los datos de ERA5 y las observaciones. Estas métricas se pueden clasificar en:

Métricas continuas: evalúan la diferencia entre los valores pronosticados y observados, incluyendo el sesgo (BIAS), el error medio absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson (r).

Métricas categóricas: evalúan la capacidad del conjunto de datos para detectar la ocurrencia de precipitación, incluyendo la probabilidad de detección (POD), la tasa de falsas alarmas (FAR) y el índice de éxito crítico (CSI).

Escalas temporales: la validación puede realizarse en escalas temporales como diaria, mensual y anual para evaluar el rendimiento del conjunto de datos en distintos intervalos de tiempo.

2.4 Marco conceptual

- Precipitación: Cantidad de agua que cae a la superficie terrestre desde la atmósfera en forma líquida (lluvia, llovizna) o sólida (nieve, granizo).
- ERA5: Reanálisis atmosférico global de quinta generación del ECMWF.
- Estaciones Meteorológicas: Instalaciones terrestres que miden variables meteorológicas, incluyendo la precipitación.

- Sesgo (BIAS): Diferencia sistemática entre los valores pronosticados y observados.
- Error Medio Absoluto (MAE): Promedio de las diferencias absolutas entre los valores pronosticados y observados.
- Error Cuadrático Medio (RMSE): Raíz cuadrada del promedio de las diferencias cuadradas entre los valores pronosticados y observados.
- Coeficiente de Correlación de Pearson (r): Medida de la relación lineal entre dos variables.
- Probabilidad de Detección (POD): Proporción de eventos de precipitación observados que fueron correctamente pronosticados.
- Razón de Falsas Alarmas (FAR): Proporción de eventos de precipitación pronosticados que no ocurrieron en la realidad.
- Índice de Éxito Crítico (CSI): Medida que combina la POD y la FAR.

2.5 Enfoque específico en Nicaragua (2011-2021)

Esta sección se centrará en la relevancia de la validación de datos de precipitación en Nicaragua, considerando su contexto geográfico, climático y socioeconómico. Se abordarán los siguientes aspectos: (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2021)

- Clima de Nicaragua: Descripción de los patrones de precipitación en Nicaragua, incluyendo la variabilidad estacional y regional.
- Disponibilidad de Datos de Observación: Evaluación de la disponibilidad y calidad de los datos de precipitación de estaciones meteorológicas en Nicaragua durante el período 2011-2021.
- Impacto de la Precipitación en Nicaragua: Análisis de la importancia de la precipitación en sectores clave como la agricultura, la energía hidroeléctrica y la gestión de riesgos de desastres.

2.6 INETER

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) es una institución gubernamental de Nicaragua responsable de generar, gestionar y divulgar información científica especializada sobre el territorio nacional y los fenómenos que en él ocurren.

INETER es un organismo multidisciplinario que centraliza diversas áreas cruciales para el desarrollo y la seguridad del país. Sus funciones principales incluyen:

- Servicio Meteorológico Nacional: Pronóstico del tiempo y vigilancia climática. Emisión de avisos y alertas por condiciones meteorológicas peligrosas (lluvias intensas, sequías, frentes fríos, etc.).
- Vigilancia Geológica y Geofísica: Monitoreo permanente de la actividad sísmica y volcánica del país (Nicaragua forma parte del "Cinturón de Fuego del Pacífico"). Estudio de amenazas geológicas como deslizamientos de tierra y subsidencia del terreno.
- Estudios Geográficos y Cartografía: Elaboración y actualización de mapas oficiales del país (mapas topográficos, temáticos, atlas nacional). Manejo de Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Catastro Nacional: Administración del registro de la propiedad territorial (información sobre linderos, superficies y titularidad de las parcelas del país).
- Investigación Científica: Realiza estudios e investigaciones en las áreas de sismología, vulcanología, meteorología, climatología, hidrología y geografía.

CAPITULO 3
DISEÑO METODOLÓGICO

3. Diseño Metodológico

Este trabajo se enmarca en una investigación cuantitativa de tipo descriptivo y comparativo, cuyo objetivo principal es validar el conjunto de datos de precipitación del reanálisis ERA5 en la región del Pacífico de Nicaragua para el período 2011-2021.

El enfoque es sistémico, ya que integra múltiples componentes: datos observados, datos modelados, herramientas de análisis estadístico y software especializado. Además, se considera el contexto geográfico y climático de la región del Pacífico de Nicaragua, caracterizada por un clima tropical con una marcada estación seca y otra lluviosa.

3.1 Descripción del universo de estudio

3.1.1 Población y muestra

La población de estudio está conformada por los datos de precipitación diaria y mensual registrados en estaciones meteorológicas ubicadas en la región del Pacífico de Nicaragua, así como los datos de precipitación del reanálisis ERA5 para la misma región y período (2011-2021).

Las estaciones meteorológicas son instalaciones clave para la recolección y análisis de datos climáticos. La muestra incluirá los datos de precipitación de 8 estaciones meteorológicas representativas de la región del Pacífico, seleccionadas por su cobertura temporal completa y la longitud del registro. Estas estaciones están distribuidas de manera homogénea para capturar la variabilidad espacial de la precipitación en la zona. En la Tabla 1 se presentan las coordenadas y características de estas, mientras que su ubicación puede apreciarse en la Figura 2.

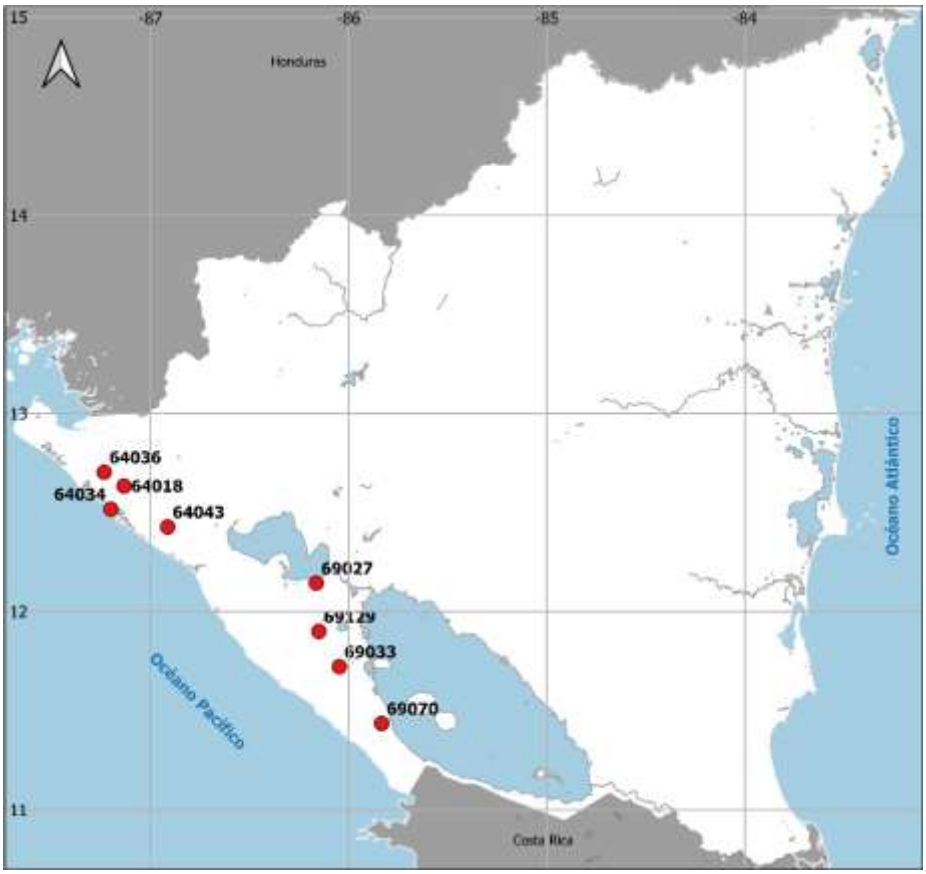
Tabla 1. Estaciones meteorológicas del Pacífico de Nicaragua

ID	Código	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Periodo
1	69027	Aeropuerto (A.C.S)	12.1433°	-86.1636°	64	2011-2021
2	69129	Campos Azules	11.8997°	-86.1497°	466	2011-2021
3	64018	Chinandega	12.6333°	-87.1333°	70	2011-2021
4	64034	Corinto	12.5167°	-87.2000°	4	2011-2021
5	64043	León	12.4267°	-86.9133°	73	2011-2021
6	64036	Monte Rosa	12.7033°	-87.2333°	40	2011-2021
7	69033	Nandaime	11.7217°	-86.0467°	97	2011-2021
8	69070	Rivas	11.4350°	-85.8333°	70	2011-2021

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Localización del área de estudio

Figura 2. Mapa de estaciones del Pacífico de Nicaragua



Fuente: Elaboración propia

3.2 Tipo de información requerida para el estudio

3.2.1 Datos observados

- Precipitación diaria (en mm) del período 2011-2021.
- Coordenadas geográficas (latitud, longitud) y elevación de las estaciones meteorológicas.
- Metadatos sobre la calidad y completitud de los datos.

3.2.2 Datos modelados (ERA5)

- Precipitación horaria (en mm) del mismo período.
- Datos espaciales en una grilla que cubra la región del Pacífico de Nicaragua.

3.3 Fuentes de datos

3.3.1 Fuentes de datos observados

Los datos de precipitación observada se obtuvieron a partir de los registros recopilados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), entidad responsable de la red meteorológica nacional.

3.3.2 Fuentes de datos modelados

Los datos de precipitación de ERA5 se obtuvieron de Copernicus Climate Data Store (Corpernius Climate Data Store, 2024), plataforma oficial que proporciona acceso gratuito a este conjunto de datos.

3.4 Instrumentos para el procedimiento y el análisis de datos.

3.4.1 Software y herramientas

- Python: Para descargar y procesar los datos de ERA5 a través de la API de CDS.
- Excel: Para organizar y limpiar los datos observados.
- QGIS o ArcGIS: Para visualizar la distribución espacial de las estaciones y los datos de ERA5.

3.4.2 Recolección de la información

Para los datos provenientes de las estaciones meteorológicas in situ se realizó el siguiente proceso:

- **Control de calidad de datos**

Para asegurar la completitud y la calidad de los datos, se realizó una revisión inicial que permitiera identificar visualmente registros anómalos o inconsistentes. Esto incluyó la detección de valores extremos y la revisión de las series temporales.

- **Análisis de consistencia**

La consistencia y homogeneidad se definen como las propiedades de una serie de datos climáticos que permiten constatar que las variaciones se deben únicamente a factores meteorológicos y climáticos naturales, excluyendo influencias no climáticas, también conocidas como heterogeneidades o rupturas. La identificación y corrección de estas rupturas son indispensables para asegurar que las conclusiones sobre el régimen de precipitación sean robustas y válidas.

Para el análisis de consistencia se utilizó el método de la curva de doble masa o de dobles acumulaciones, que permitió descartar la presencia de errores sistemáticos en cada estación. Este método consiste en comparar los acumulados de una estación con respecto a una estación patrón confiable y verificar la estabilidad de la pendiente en la curva resultante. Una pendiente constante indica homogeneidad y consistencia, mientras que cambios abruptos reflejan posibles problemas en los datos, como errores de medición, modificaciones en la instrumentación o cambios en la ubicación de la estación.

- **Incorporación de datos faltantes**

Las estaciones seleccionadas no presentaban datos faltantes en el periodo analizado, por lo que no fue necesario utilizar métodos de imputación de datos.

En el caso de los datos de ERA5, utilizando las coordenadas de cada estación meteorológica, se procedió a descargarlos seleccionando la celda más cercana al par de coordenadas indicado. Es importante mencionar que estos datos estaban disponibles con una resolución temporal horaria; es decir, para obtener los datos diarios fue necesario agruparlos en periodos de 24 horas, posteriormente en periodos mensuales y anuales, para construir la serie temporal necesaria para compararlos con sus homólogas in situ.

3.5 Métodos de validación de datos de precipitación

La validación de conjuntos de datos de precipitación consiste en comparar los valores estimados (en este caso, de ERA5) con las observaciones in situ de estaciones meteorológicas. Para ello, se utilizaron métricas estadísticas que permitieron cuantificar la precisión y el error de los datos.

3.5.1 Métricas estadísticas de error

Entre las métricas más comunes se encuentran:

- **Sesgo (BIAS):** Mide la diferencia sistemática entre los valores estimados y los observados.

$$BIAS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y} - yi)^2 \qquad \text{Ec. 1}$$

n: número total de observaciones en el conjunto de datos.
i: índice que identifica cada observación dentro del conjunto.
yi: Valor observado o medido en la realidad para la observación i.
$\hat{y}$: Valor estimado o predicho por el modelo para la observación i.

- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):** Cuantifica la magnitud del error entre los datos estimados y los observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(yi - \hat{y})^2} \qquad \text{Ec. 2}$$

n: número total de observaciones en el conjunto de datos.

i: índice que identifica cada observación dentro del conjunto.

yi: Valor observado o medido en la realidad para la observación i.

$\hat{y}$: Valor estimado o predicho por el modelo para la observación i.

- **Coeficiente de Correlación de Pearson (r):** Evalúa la relación lineal entre dos series de datos. Su valor está entre -1 y 1, donde 1 indica una correlación positiva perfecta.

$$\mathrm{r} = \frac{\sum(xi - \check{x})(yi - \check{y})}{\sqrt{(xi - \check{x})^2 \sum(yi - \check{y})^2}} \qquad \text{Ec. 3}$$

xi: Valor observado de la variable X en la posición i .

$\check{x}$: Media aritmética de todos los valores de la variable X.

yi: Valor observado o medido en la realidad para la observación i.

$\check{y}$: Media aritmética de todos los valores de la variable Y.

- **Índice de Concordancia de Wilmot (d):** Mide el grado de concordancia entre los valores estimados y observados, considerando tanto la magnitud como la dirección de las diferencias.

$$d = \frac{\sum(yi - \hat{y}i)^2}{\sum(|yi - \hat{y}i| + |\bar{y}i - \hat{y}i|)^2} \qquad \text{Ec. 4}$$

yi: Valor observado o medido en la realidad para la observación i.

$\hat{y}$: Valor estimado o predicho por el modelo para la observación i.

$\check{y}$: Media aritmética de todos los valores de la variable Y.

- **Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE):** se define como el coeficiente adimensional de eficiencia que mide la fracción de la varianza de la serie observada que es capturada por el modelo, comparando el error cuadrático del modelo con el error cuadrático de un predictor de referencia que utiliza la media observada.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(yi - \hat{y}i)^2}{\sum(yi - \bar{y}i)^2} \qquad \text{Ec. 5}$$

yi: Valor observado o medido en la realidad para la observación i.

$\hat{y}$: Valor estimado o predicho por el modelo para la observación i.

$\breve{y}$: Media aritmética de todos los valores de la variable Y.

3.5.1 Índices categóricos

Además, se utilizaron tres índices categóricos que permiten evaluar, a escala diaria, la capacidad del producto ERA5 para detectar eventos. Estos son: Probabilidad de Detección, Razón de Falsas Alarmas e Índice de Éxito Crítico. Para aplicar estos fue necesario seleccionar el valor de un umbral de precipitación diaria, por encima del cual se considera que "llovió", que para este caso se fijó en 3.5 mm (Funk y otros, 2015).

POD (Probabilidad de detección)

También conocida como tasa verdadera positiva o sensibilidad, mide la capacidad del sistema para detectar correctamente un evento cuando sí ocurre. Toma valores de 0 a 1, con 1 como el valor óptimo.

$$POD = \frac{A}{A + C} \qquad \text{Ec. 6}$$

POD = Probabilidad de detección

A = número de aciertos, es decir, los días en los que la precipitación fue mayor que el umbral y el producto pudo detectarla.

C = número de falsos positivos, es decir, los días en los que el producto detectó una precipitación mayor que el umbral cuando en realidad no ocurrió.

FAR (razón de falsas alarmas)

La proporción de veces en que el producto detectó eventos de precipitación superiores al umbral cuando no ocurrieron. Toma valores de 0 a 1, con 0 como valor óptimo.

$$FAR = \frac{C}{A + C} \qquad \text{Ec. 7}$$

FAR = Razón de falsas alarmas

CSI (índice de éxito crítico)

Es una medida general de la capacidad del producto para detectar eventos reales de precipitación, considerando tanto la tasa de aciertos como la de desaciertos.

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \qquad \text{Ec. 8}$$

CSI = Índice de Éxito Crítico

B = número de fallos, es decir, los días en los que sí ocurrió un evento de precipitación y el producto no lo detectó.

CAPITULO 4

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4. Resultados e interpretación

4.1 Análisis de homogeneidad y consistencia

El análisis de homogeneidad y consistencia mediante el método de doble masa, aplicado a las ocho estaciones meteorológicas, permitió obtener un panorama claro de la calidad de los registros. Al consolidar los resultados, se identificaron varios aspectos relevantes que fortalecen la confiabilidad de la red de observación.

En todos los casos, la suma acumulada de las precipitaciones anuales de la estación investigada se graficó frente a la suma acumulada de la precipitación anual de una estación patrón conformada por el promedio de las estaciones vecinas. De esta forma, se pudo constatar que, en todos los casos, el gráfico obtenido es una línea de pendiente constante y sin quiebres abruptos, lo que confirma la consistencia del registro utilizado. En las Figuras 3 y 4 se presenta la curva de doble masa para cada estación.

Figura 3. Curva de doble masa estaciones: Aeropuerto, Rivas, Nandaime y Campos Azules

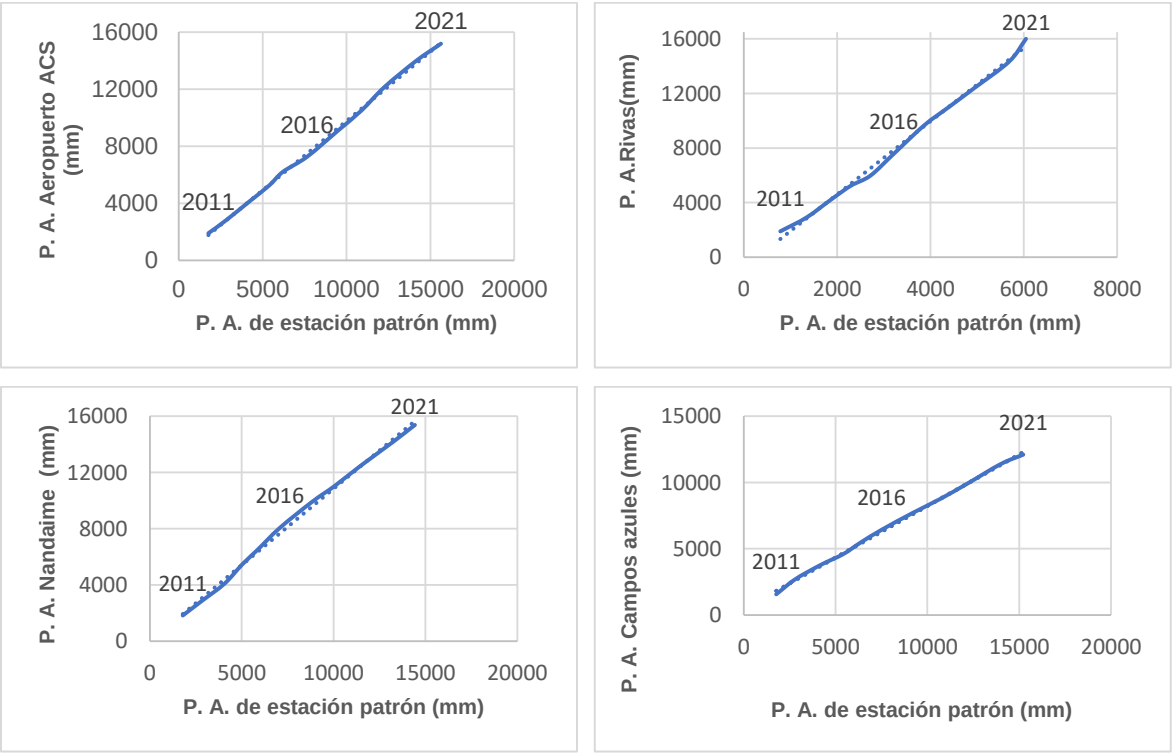
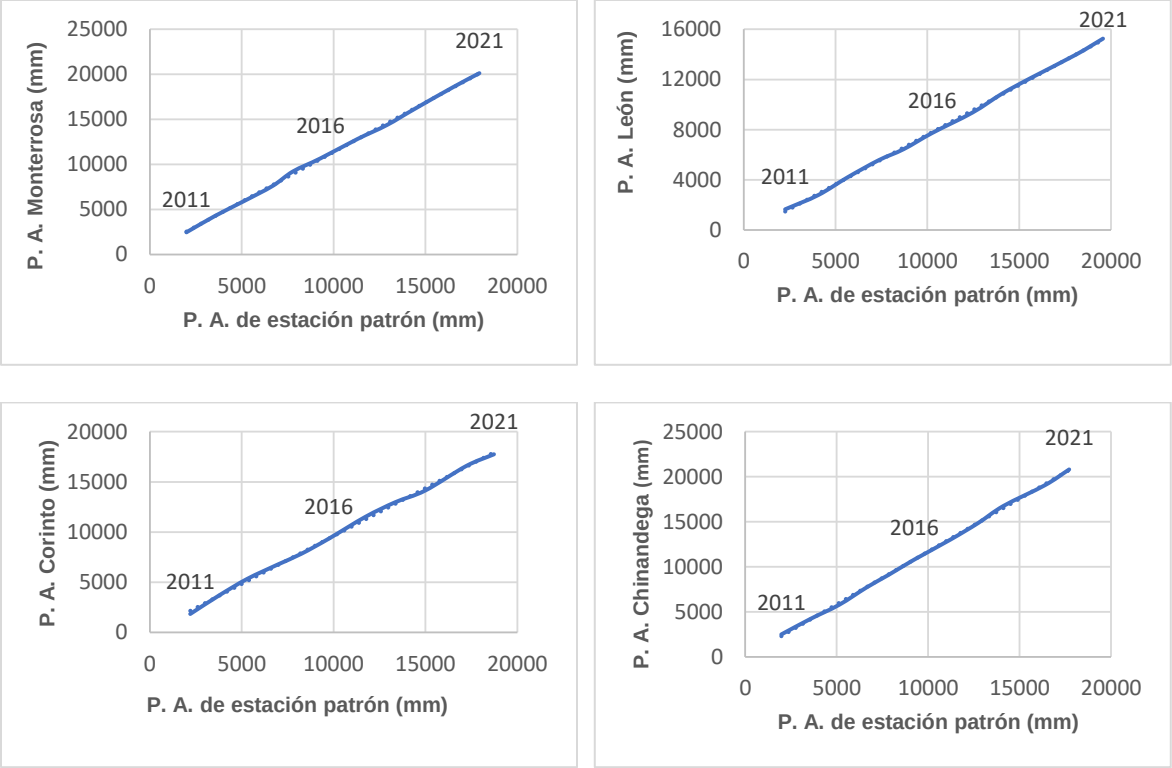


Figura 4. Curva de doble masa estaciones: Monterrosa, León, Corinto, Chinandega



La ausencia de rupturas o cambios de pendiente en las curvas acumuladas confirma que los registros no han sido afectados por factores externos como modificaciones en la instrumentación, cambios en la ubicación de las estaciones o errores sistemáticos de medición. Este hallazgo es de gran relevancia, ya que garantiza que las tendencias observadas en las series reflejan condiciones reales y no han sido influidas por artefactos derivados de inconsistencias en la toma de datos.

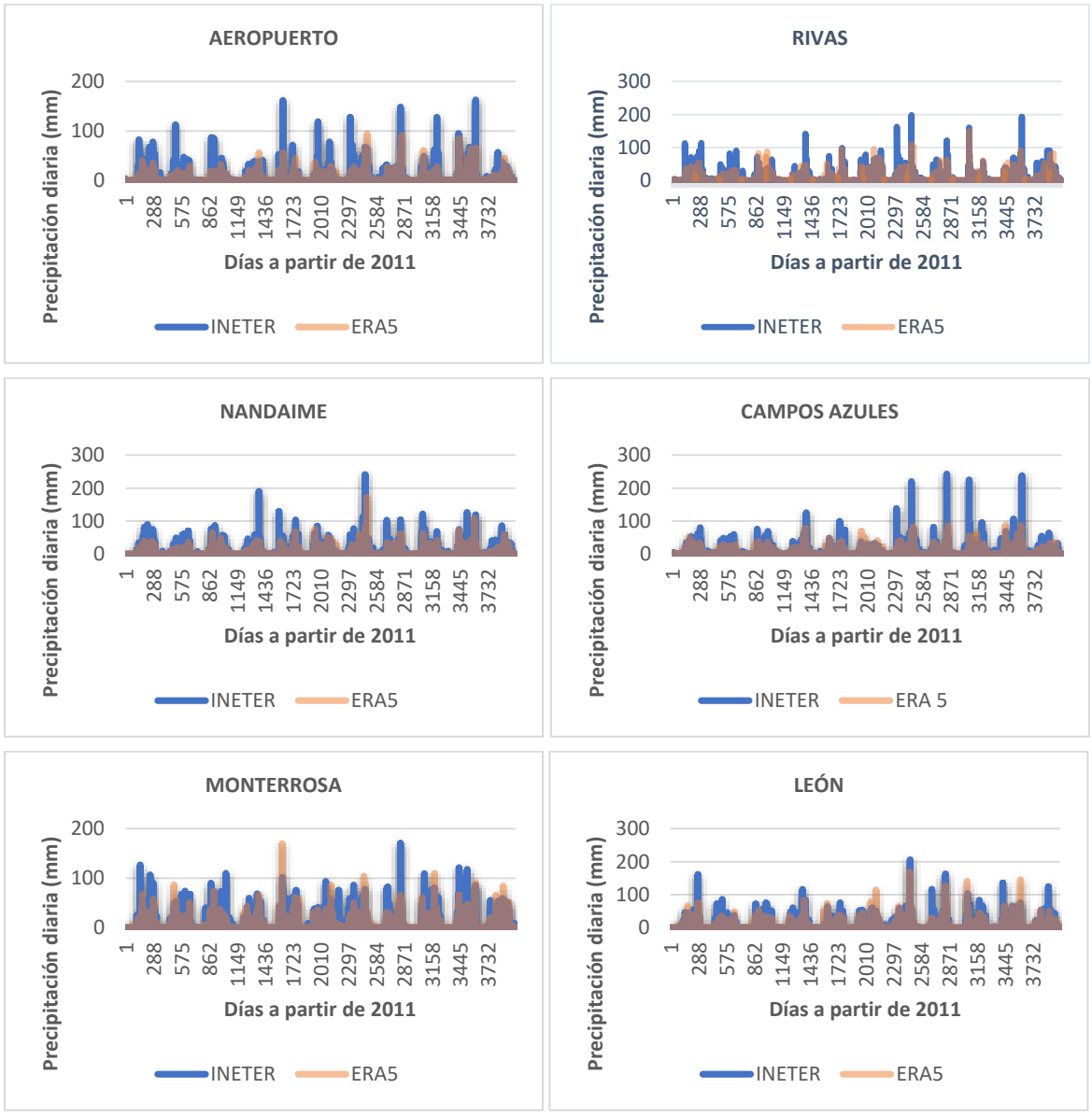
4.2 Estadística descriptiva

En este apartado se compararon visualmente las series temporales, tanto en escala diaria como en escala mensual, correspondientes a los datos observados en la estación administrada por INETER, frente a los datos extraídos de ERA5 para el punto más cercano a las coordenadas de la estación in situ.

4.2.1 Análisis en escala diaria

En la Figura 5 se presenta la superposición de las series diarias de precipitación correspondientes al periodo en análisis (a partir del 1 de enero de 2011 y hasta 2021), para las estaciones de Aeropuerto (E1), Rivas (E2), Nandaime (E3), Campos Azules (E4), Monterrosa (E5) y León (E6). Se evidencia un desfase en los picos, eventos extremos, y también en la mayoría de los casos ERA5 suele estar por debajo de lo registrado en la estación.

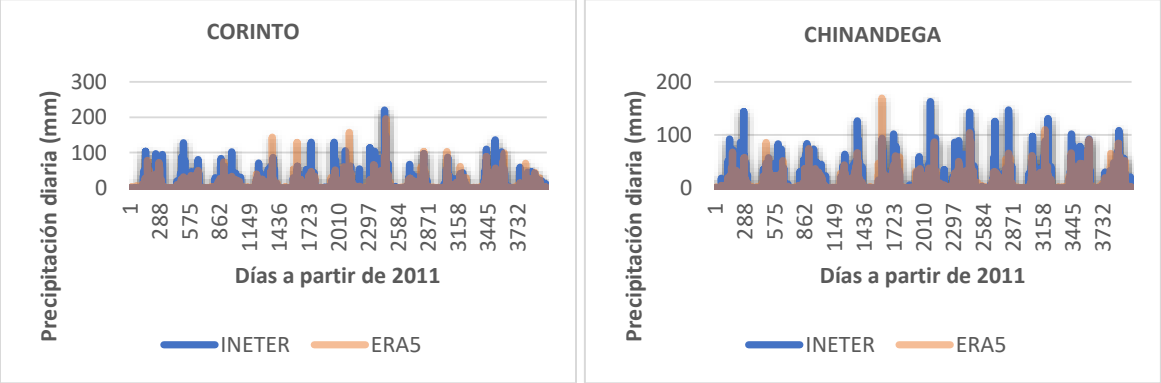
Figura 5. Serie diaria INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E1 – E6



Fuente: Elaboración propia

Lo mismo se puede deducir de la Figura 6, correspondiente a las estaciones de Corinto (E7) y Chinandega (E8). Solamente en casos puntuales, ERA5 registró precipitaciones mayores que las observadas como en las estaciones de Monterrosa y Chinandega, indicando una tendencia a la subestimación a escala diaria.

Figura 6. Serie diaria INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E7 – E8

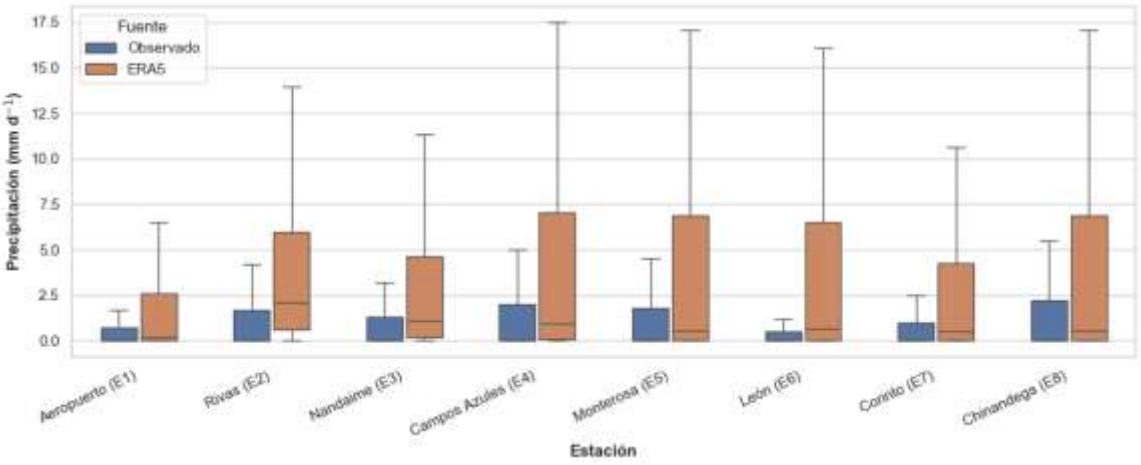


Fuente: Elaboración propia

Debido a que la serie de tiempo no permite evaluar la similitud entre las medidas de tendencia central, también se generaron diagramas de cajas y bigotes para los datos diarios y mensuales.

En la Figura 7 (diagrama de cajas sin datos atípicos), la exclusión de los valores extremos permite apreciar con mayor claridad la tendencia central y la dispersión típica de la precipitación entre estaciones. En general, se observa que la distribución de ERA5 presenta medianas y rangos intercuartílicos (IQR) mayores que los registros observados en la mayoría de las estaciones, lo que sugiere una sobreestimación sistemática de la precipitación “típica” por parte del reanálisis. Esta diferencia es más marcada en estaciones como Campos Azules (E4), Monterrosa (E5) y Chinandega (E8), donde ERA5 muestra una variabilidad interna más amplia (cajas más altas), mientras que la serie observada concentra valores bajos, lo cual es coherente con la alta frecuencia de meses con acumulados reducidos y/o la estacionalidad del régimen de lluvia.

Figura 7. Diagrama de cajas Observaciones diarias vs ERA5 (2011–2021), sin datos atípicos

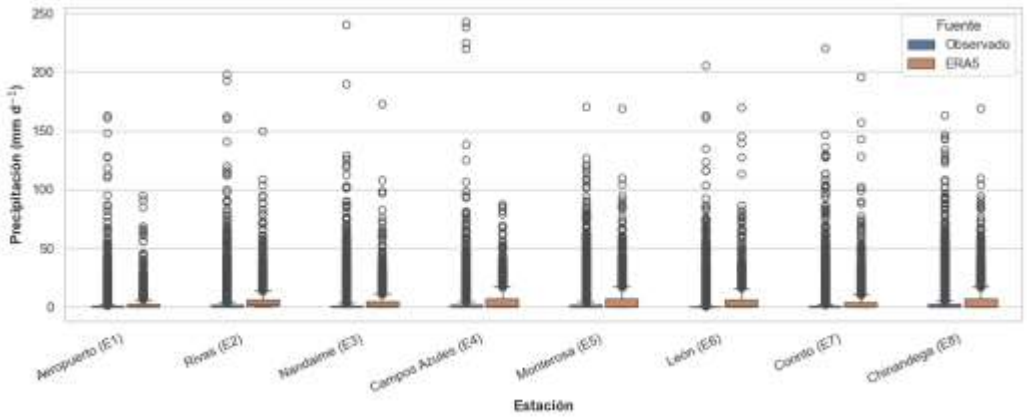


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 (diagrama de cajas con datos atípicos), al incorporar los extremos, se evidencia la naturaleza altamente asimétrica de la precipitación y la presencia de eventos intensos poco frecuentes, reflejados en una nube densa de valores atípicos y en bigotes que se extienden hacia acumulados elevados. Este comportamiento confirma que, aunque la comparación de estadísticos robustos (mediana e IQR) es útil para caracterizar el “comportamiento habitual”, una fracción importante de la señal hidrometeorológica está asociada a colas pesadas y a la ocurrencia de eventos extremos, que varían entre estaciones y pueden tener implicaciones directas en el análisis de riesgo.

En conjunto, ambos diagramas se complementan: el primero facilita la lectura comparativa de los patrones centrales entre ERA5 e INETER, y el segundo documenta la magnitud y frecuencia relativa de los extremos, destacando la necesidad de evaluar por separado métricas orientadas a la distribución central y métricas específicas de extremos para una validación más completa.

Figura 8. Diagrama de cajas Observaciones diarias vs ERA5 (2011–2021), con datos atípicos

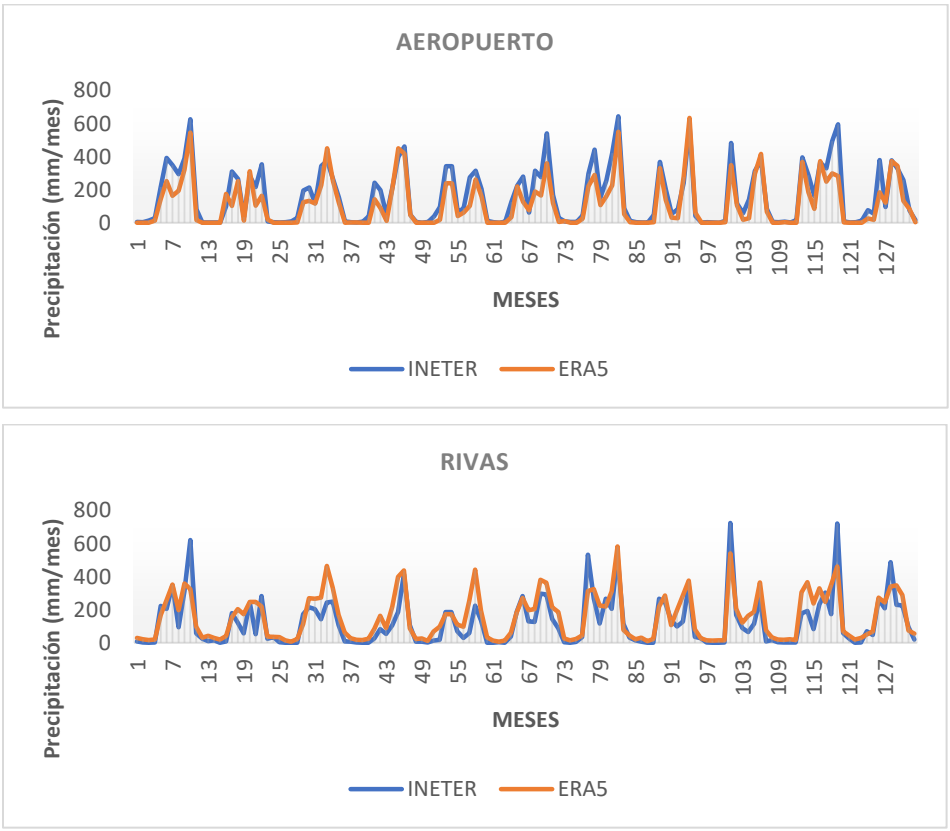


Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Análisis en escala mensual

En la Figura 9 se compara la precipitación mensual de ERA5 con los datos observados (INETER) para dos estaciones presentadas en el panel.

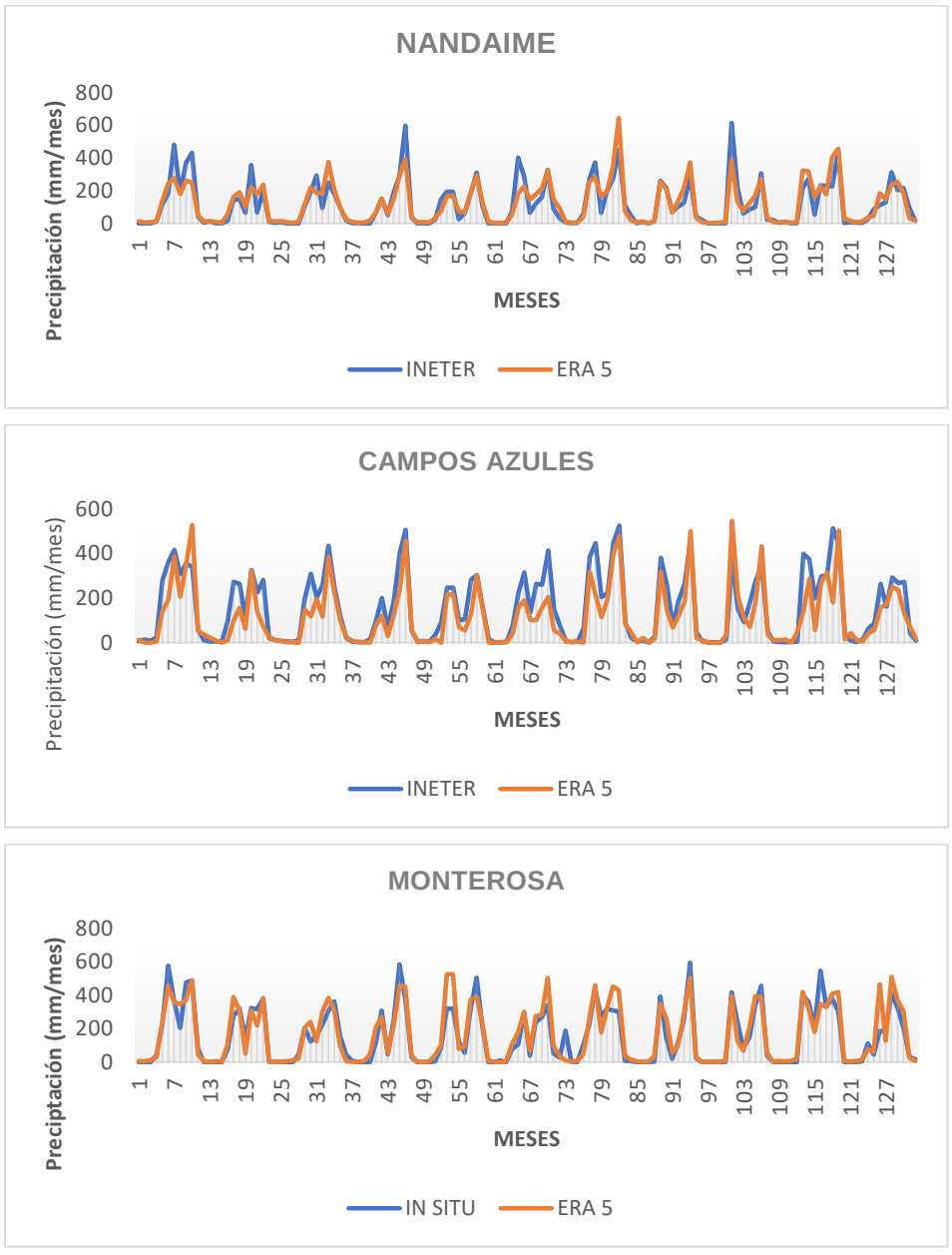
Figura 9. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E1 – E2



Fuente: Elaboración propia

En ambos casos se aprecia una alta coherencia del patrón temporal, con picos y periodos de baja precipitación que ocurren en meses similares, lo que indica que ERA5 reproduce adecuadamente la estacionalidad a escala mensual. Las diferencias se concentran principalmente en la magnitud de algunos máximos mensuales, donde el reanálisis puede suavizar o amplificar ciertos eventos respecto a las observaciones puntuales.

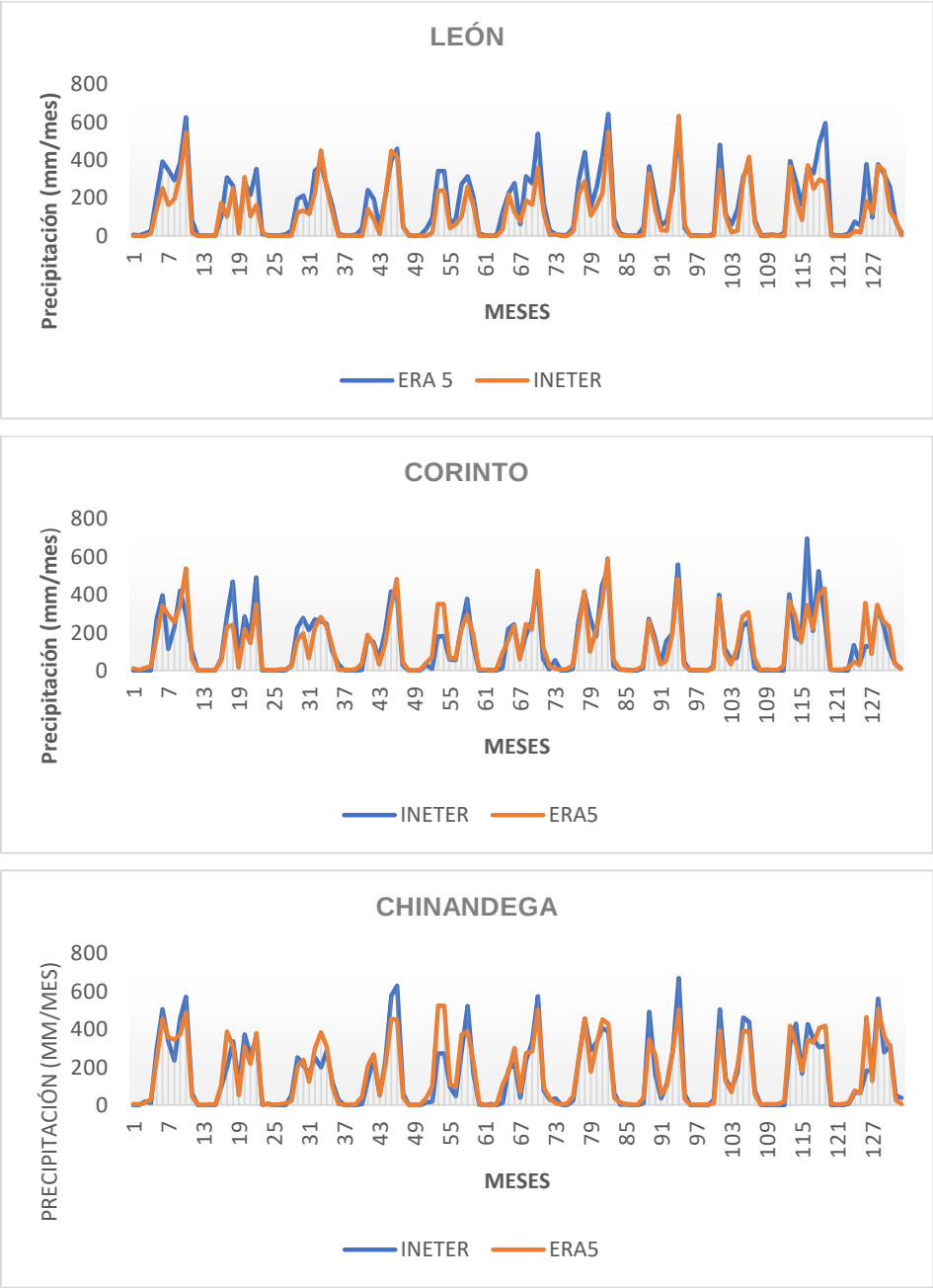
Figura 10. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E3 – E5



Fuente: Elaboración propia

Dado que este comportamiento se repite en el conjunto de estaciones analizadas, la comparación mensual se presenta de forma sintética por panel en las Figuras 10 y 11 para el resto de estaciones analizadas, complementándose con los diagramas de caja y métricas de error para evaluar discrepancias en la distribución y en los extremos.

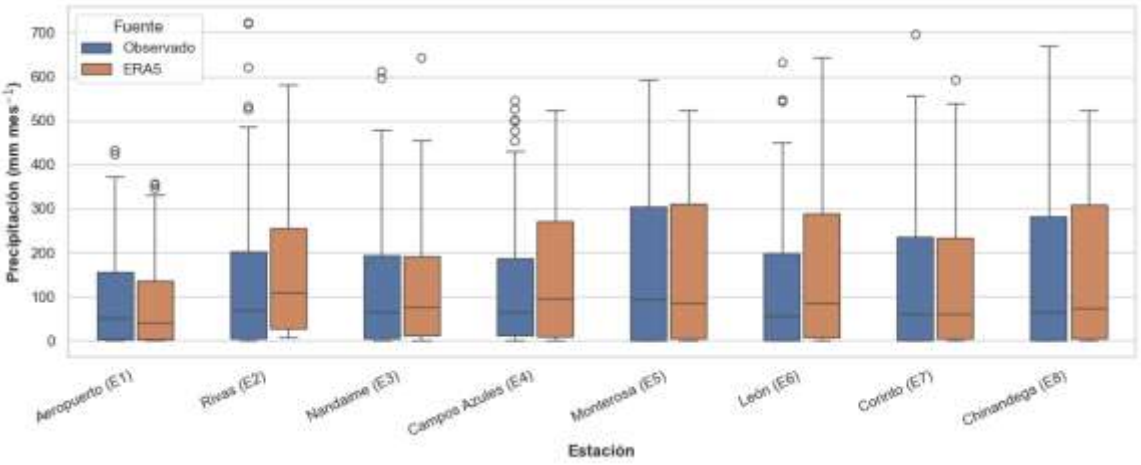
Figura 11. Serie mensual INETER vs ERA5 (2011–2021) para estaciones E6 – E8



Fuente: Elaboración propia

En síntesis, a escala mensual ERA5 reproduce de manera consistente el ciclo estacional observado en las ocho estaciones, lo que respalda su utilidad para describir la variabilidad temporal regional. Sin embargo, los diagramas de caja (Figura 12) evidencian diferencias en la distribución: en varias estaciones ERA5 presenta medianas y rangos intercuartílicos distintos a los observados, así como discrepancias en los máximos mensuales. Estas diferencias, esperables al comparar un reanálisis espacialmente promediado con mediciones puntuales, justifican complementar la evaluación mensual con métricas de error y con un análisis específico de extremos para valorar mejor el desempeño del producto.

Figura 12. Diagrama de cajas Observaciones mensuales vs ERA5 (2011–2021) con datos atípicos



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, no se incluyeron diagramas de caja a escala anual porque la serie disponible abarca únicamente 11 valores anuales por estación, lo que limita la robustez de cualquier comparación de distribuciones. No obstante, sí se realizó la evaluación mediante métricas continuas de desempeño (Sección 4.5) y, como referencia, en el Anexo A se presentan las series de tiempo anuales.

4.3 Evaluación en escala diaria

En la Tabla 2 se presenta el consolidado de las métricas cuantitativas de error evaluadas para cada una de las estaciones analizadas (ver gráficos de barras comparativos por métrica en el Anexo D). En escala diaria, las métricas confirman lo que ya se apreciaba en las series de tiempo y en los diagramas de caja: el desempeño de ERA5 es moderado y está fuertemente condicionado por la alta variabilidad diaria y la presencia de muchos días secos o de baja precipitación.

Tabla 2. Resultados de métricas estadísticas en escala diaria

ID	Estación	BIAS (mm)	r	RMSE (mm)	NSE	d
1	Aeropuerto (ACS)	0.39	0.49	8.93	0.22	0.56
2	Rivas	-1.08	0.46	11.61	0.13	0.63
3	Nandaime	-0.11	0.44	11.16	0.15	0.58
4	Campos Azules	-1.22	0.49	10.94	0.19	0.62
5	Monter rosa	-0.26	0.52	11.81	0.21	0.65
6	León	-1.35	0.55	10.83	0.44	0.70
7	Corinto	0.13	0.55	11.43	0.25	0.65
8	Chinandega	-0.09	0.56	11.81	0.28	0.65

Fuente : Elaboración propia

Los sesgos (BIAS) son en general pequeños en magnitud (≈ −1.35 a 0.39 mm), con tendencia a subestimar en la mayoría de las estaciones analizadas, y ligeras sobreestimaciones solamente en Aeropuerto y Corinto. Sin embargo, esta "cercanía" del sesgo medio no implica buena reproducción día a día: los RMSE se mantienen alrededor de 9 – 12 mm, lo que sugiere errores diarios importantes asociados a la amplitud de los eventos y al desajuste en la ocurrencia/intensidad; esto es coherente con los diagramas de cajas diarios, donde la dispersión y los extremos tienden a diferir entre ERA5 y lo observado. En la misma línea, los valores de NSE son bajos (0.13 – 0.44), lo que indica que, a escala diaria, ERA5 reproduce de forma limitada la variabilidad observada y, en varios casos, no mejora sustancialmente el desempeño frente a un predictor simple basado en el promedio. Este resultado es consistente con la naturaleza de la precipitación diaria: predominan muchos días secos o con lluvias débiles, intercalados con

pocos eventos intensos que concentran gran parte de la variabilidad; por ello, los desajustes en esos picos (en magnitud y/o en el momento) penalizan fuertemente el NSE.

Esta debilidad en la precisión temporal se confirma con el RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio), que presenta valores consistentemente altos (todos por encima de 8.9 mm/día). Errores de esta magnitud, superiores a los 10 mm/día en la mayoría de las estaciones, son significativos considerando los totales de precipitación típicos de la región, lo que implica que las estimaciones diarias de ERA5 pueden desviarse sustancialmente de la realidad. Finalmente, el índice de concordancia de Willmott (d), que varía entre 0.56 y 0.70, ofrece una perspectiva más matizada: si bien supera siempre al 0.5, confirmando que el modelo es mejor que una simple climatología, su valor moderado refuerza la conclusión de que su exactitud puntual es insuficiente. El mejor desempeño relativo en León (con el R^2 y D más altos) sugiere que el modelo podría funcionar mejor en ciertas áreas geográficas, pero su aplicabilidad para estudios hidrológicos detallados o manejo de recursos hídricos que dependan de datos diarios precisos es cuestionable.

Respecto al coeficiente de correlación de Pearson (r), es útil interpretarlo como una medida de si el producto captura el patrón temporal (subidas y bajadas) aunque se equivoque en magnitud; en ese sentido, los valores r (0.44–0.56) indican una relación media: ERA5 tiende a “moverse” de forma similar a las observaciones en muchos periodos (lo que se aprecia en las series), pero con discrepancias notables en picos y en días con lluvia débil. Con correlación media, la capacidad de corrección es limitada a escala diaria: es posible reducir sesgo y ajustar distribución, pero no “inventar” la sincronía de eventos cuando el modelo se equivoca en el día exacto o en la ocurrencia.

4.3.1 Métricas categóricas

Además de las métricas cuantitativas evaluadas, a escala diaria también se analizaron tres métricas categóricas como son la Probabilidad de Detección (POD), la Razón de Falsas Alarmas (FAR) y el Índice de Éxito Crítico (CSI). Los

resultados de estas tres métricas categóricas se presentan en la Tabla 3 para cada estación.

Tabla 3. Resultados de métricas categóricas en escala diaria

ID	Estación	POD	CSI	FAR
1	Aeropuerto (ACS)	0.607	0.353	0.543
2	Rivas	0.414	0.381	0.172
3	Nandaime	0.449	0.393	0.241
4	Campos Azules	0.767	0.381	0.569
5	Monte rosa	0.532	0.472	0.192
6	León	0.463	0.446	0.078
7	Corinto	0.521	0.446	0.244
8	Chinandega	0.561	0.504	0.168

Fuente : Elaboración propia

La Tabla 3 complementa lo observado en las series de tiempo, diagramas de caja y las métricas continuas a escala diaria, porque aquí no se evalúa “cuánto llueve”, sino si ERA5 detecta o no los días con evento de lluvia (según el umbral definido de 3.5 mm). En general, los valores de POD (0.41 – 0.77) indican que ERA5 logra identificar una parte importante de los eventos, pero no todos; por ejemplo, en Campos Azules el POD es alto (0.767), mientras que en Rivas es más bajo (0.414), lo que sugiere más eventos perdidos.

El CSI (0.35 – 0.50) muestra un desempeño intermedio: hay aciertos, pero también fallos y falsas alarmas, consistente con lo que se observa en las series diarias cuando los picos no siempre coinciden. Finalmente, el FAR varía bastante entre estaciones (0.08 – 0.57), lo que significa que en algunas estaciones ERA5 tiende a marcar lluvia cuando no se observa (por ejemplo, Aeropuerto y Campos Azules), mientras que en otras presenta menos falsas alarmas (como León). En conjunto, estos resultados ayudan a explicar por qué el desempeño diario es limitado: además de diferencias en magnitud, también hay discrepancias en la ocurrencia de eventos. En el Anexo B se presentan las tablas de contingencia que contienen la ocurrencia de eventos (> 3.5 mm) para cada estación.

4.4 Evaluación en escala mensual

En la Tabla 4 se presenta el consolidado de las métricas cuantitativas de error evaluadas a escala mensual (ver gráficos de barras comparativos por métrica en el Anexo D). Se puede apreciar que ERA5 reproduce bien el patrón temporal de la precipitación mensual observada: los valores de r son altos en todas las estaciones (0.85 – 0.93), lo que coincide con el análisis gráfico de las series mensuales, donde ambos conjuntos de datos tienden a subir y bajar en los mismos meses (estacionalidad similar). En la misma línea, los NSE (0.63 – 0.85) y el índice d (0.82 – 0.91) indican un desempeño general bueno a muy bueno en la variabilidad mensual, notablemente mejor que en la escala diaria, porque al agregar a mes se reduce el "ruido" de los eventos puntuales y los desfases día a día.

Tabla 4. Resultados de métricas estadísticas en escala mensual

ID	Estación	BIAS (mm)	r	RMSE (mm)	NSE	d
1	Aeropuerto (ACS)	-12.89	0.85	59.00	0.71	0.82
2	Rivas	32.84	0.86	82.64	0.69	0.85
3	Campos azules	37.52	0.88	81.26	0.63	0.87
4	Nandaime	3.11	0.89	62.94	0.79	0.87
5	Monte rosa	9.36	0.92	66.87	0.84	0.91
6	León	41.88	0.93	76.10	0.72	0.90
7	Corinto	-2.81	0.89	72.19	0.79	0.87
8	Chinandega	4.33	0.92	68.54	0.85	0.91

Fuente: Elaboración propia

Aun así, persisten diferencias en magnitud según la estación. El BIAS muestra que ERA5 tiende a sobreestimar los acumulados mensuales en varias estaciones (por ejemplo, León, Campos Azules y Rivas) y a subestimar en Aeropuerto y Corinto. Esto también se refleja en los RMSE (59 – 83 mm): los errores más altos suelen asociarse a meses lluviosos, cuando los acumulados son grandes. Es decir, ERA5 captura bien el "cuándo" llueve a nivel mensual, pero en algunos sitios todavía se desvía en "cuánto" llueve, lo cual es consistente con lo que se observa en las series de tiempo y en los diagramas de cajas mensuales.

4.5 Evaluación en escala anual

La precipitación anual de cada estación in situ se obtuvo mediante la agregación de datos diarios provenientes de los registros recopilados por INETER. La comparación se hizo punto a punto, es decir, extrayendo el punto más cercano a la ubicación de la estación en superficie del conjunto de datos ERA5. En el caso de ERA5, se contaba con registros horarios que se agregaron a escala anual para esta evaluación.

Posteriormente se aplicaron las ecuaciones 1 – 5 para obtener las métricas estadísticas que se presentan en la Tabla 5 (ver gráficos de barras comparativos por métrica en el Anexo D).

Tabla 5. Resultados de métricas estadísticas en escala anual

ID	Estación	BIAS (mm)	r	RMSE (mm)	NSE	d
1	Aeropuerto (ACS)	-140.97	0.84	213.32	0.31	0.81
2	Rivas	395.17	0.83	460.24	-0.25	0.72
3	Nandaime	39.55	0.76	224.61	0.38	0.82
4	Campos Azules	447.44	0.75	518.28	-1.14	0.76
5	Monte rosa	93.64	0.87	202.46	0.99	0.99
6	León	493.21	0.84	542.22	-3.60	0.78
7	Corinto	-49.04	0.77	269.38	0.57	0.80
8	Chinandega	31.51	0.77	210.25	0.57	0.77

Los resultados muestran un desempeño heterogéneo del producto al compararlo con los registros de las estaciones. En términos generales, los valores del coeficiente de correlación (r) se ubican entre 0.75 y 0.87, lo cual sugiere que el producto reproduce, en buena medida, la variabilidad temporal de la señal observada. Sin embargo, al analizar simultáneamente el sesgo (BIAS) y el error cuadrático medio (RMSE), se evidencia que en varias estaciones existen desviaciones sistemáticas importantes en magnitud, es decir, el producto puede seguir el comportamiento general de la serie, pero con niveles persistentemente por encima o por debajo de lo medido.

Las estaciones con mejor comportamiento relativo son Monterrosa y Nandaime. Monterrosa destaca porque presenta muy buen NSE (0.99) y d (0.99), además de una correlación alta (r = 0.87) y un RMSE relativamente bajo (~202 mm), lo que indica un ajuste muy cercano entre ambas series a escala anual. En Nandaime también se observa un desempeño aceptable (BIAS bajo, r = 0.76 y NSE = 0.38), aunque con mayor error que Monte rosa. En Corinto y Chinandega los sesgos son bajos (cercanos a cero o de pocas decenas de mm) y el ajuste es moderado (r = 0.77; NSE = 0.57; d ≈ 0.77 – 0.80), lo cual sugiere que ERA5 representa el nivel anual de manera razonable, pero aún puede fallar en algunos años con mayor o menor precipitación.

Por otro lado, los mayores problemas se presentan en Rivas, Campos Azules y León, donde el sesgo es positivo muy alto (395 – 493 mm) y el RMSE también es elevado (460 – 542 mm). Esto indica una sobreestimación persistente de la precipitación anual, que podría afectar cualquier aplicación que dependa de valores absolutos (por ejemplo, balances hídricos o dimensionamiento). Además, los NSE negativos en esas estaciones (Rivas, Campos Azules y León) muestran que, a escala anual, ERA5 puede resultar menos representativo que usar simplemente el promedio observado. Finalmente, el caso del Aeropuerto es distinto: aunque tiene buena correlación (r = 0.84) y D relativamente alto (0.81), el sesgo es marcadamente negativo (≈ −141 mm), lo que sugiere una subestimación sistemática que, en principio, podría corregirse con un ajuste de sesgo si la relación se mantiene estable.

4.6 Utilidad práctica de ERA5 a partir de las métricas estadísticas

Con base en la comparación entre ERA5 y los registros observados en las ocho estaciones analizadas, se puede afirmar que ERA5 es una fuente útil para describir el comportamiento general de la precipitación en la zona de estudio, especialmente cuando el análisis se realiza a escalas agregadas. Con base en los resultados diarios, mensuales y anuales, se proponen las siguientes recomendaciones para el uso de ERA5 en la zona de estudio:

1. **Escala mensual como uso principal.**

Se recomienda utilizar ERA5 a escala mensual para caracterizar la estacionalidad y la variabilidad temporal regional, ya que en esta escala el producto mostró una correspondencia más consistente con las observaciones.

2. **Uso diario con cautela.**

No se recomienda usar ERA5 diario “tal cual” para aplicaciones sensibles a eventos (drenaje pluvial, tormentas intensas, picos de escorrentía), porque el desempeño diario es más limitado y puede fallar en ocurrencia y magnitud de eventos.

3. **Aplicar corrección de sesgo si se usarán magnitudes.**

Cuando el estudio requiera valores absolutos (balances hídricos, insumos para modelos, estimaciones de aportes), se sugiere aplicar una corrección simple de sesgo (por estación y, de ser posible, por mes), especialmente en estaciones donde se observaron desviaciones sistemáticas.

4. **Extremos y diseño: validar por separado.**

Para análisis de extremos (percentiles altos, eventos extremos), se recomienda evaluar y, si corresponde, ajustar específicamente la cola alta (por ejemplo, con percentiles P95 – P99), ya que los errores en pocos eventos intensos pueden dominar métricas como RMSE y NSE.

CAPITULO 5
CONCLUSIONES

5. Conclusiones

- El control de calidad aplicado a los registros de las ocho estaciones indicó que las series son suficientemente consistentes para realizar la comparación con ERA5. En general, no se identificaron rupturas marcadas que invaliden el análisis; por tanto, las diferencias encontradas entre ERA5 y los datos observados se asocian principalmente al desempeño del reanálisis y a la representación espacial del fenómeno, más que a problemas evidentes en los registros.

- En la escala diaria, ERA5 muestra un desempeño limitado. Aunque el producto puede seguir parcialmente la variación de la señal observada, los errores diarios (RMSE) se mantienen elevados y los indicadores globales (como NSE e índice de concordancia) no reflejan un ajuste fuerte. Esto es coherente con lo observado en las series diarias y diagramas de caja: la precipitación presenta muchos días con valores bajos o cero y pocos eventos intensos, y los desacoples en esos eventos afectan de manera importante el desempeño del producto. En consecuencia, ERA5 no reproduce con precisión la ocurrencia e intensidad día a día en varias estaciones.

- Al agrupar los datos a escala mensual, el ajuste mejora de forma clara. Las series mensuales muestran una buena coherencia del patrón temporal (estacionalidad), reflejada en correlaciones altas y mejores valores de NSE y concordancia. Sin embargo, persisten diferencias en magnitud según la estación, evidenciadas por sesgos y RMSE mensuales, lo que indica que ERA5 puede representar bien el “cuándo” ocurre la temporada lluviosa, pero todavía presenta desviaciones en “cuánto” llueve en algunos sitios.

- La evaluación anual debe interpretarse con cautela debido al tamaño muestral reducido (11 valores anuales por estación). Aun así, se observa que el desempeño anual es heterogéneo: algunas estaciones presentan errores moderados, mientras que en otras el sesgo es grande y el NSE puede ser bajo o incluso negativo, lo que indica una pobre representación de los acumulados

anuales. En estas estaciones, usar ERA5 sin ajustes puede conducir a sobreestimaciones o subestimaciones importantes.

- El desempeño de ERA5 no es uniforme entre estaciones. En algunas (por ejemplo, Nandaime y Monterrosa) se obtuvieron indicadores relativamente mejores en escalas agregadas, mientras que en otras (como Rivas, Campos Azules y León) se observaron sesgos y errores más altos. Esto sugiere que la representatividad de ERA5 depende de condiciones locales y de la diferencia entre una celda de reanálisis (promedio espacial) y una medición puntual.

- Con base en el análisis en las tres escalas temporales, la escala mensual fue la que mostró el mejor desempeño. Por ello, se recomienda usar ERA5 en estudios que requieran series mensuales para caracterizar la estacionalidad y la variabilidad temporal, especialmente en análisis exploratorios o de contexto donde se necesita una serie continua. Además, ERA5 tiene la ventaja de contar con datos disponibles desde enero de 1940.

- No se recomienda el uso directo de ERA5 a escala diaria en aplicaciones sensibles a eventos (drenaje pluvial, tormentas intensas o alertas), debido a su capacidad limitada para reproducir con precisión la ocurrencia y la intensidad día a día. En aplicaciones a escala mensual, cuando se requieran magnitudes absolutas (por ejemplo, acumulados para balances o insumos de modelos), se considera necesario aplicar una corrección de sesgo por estación y, de ser posible, por mes, antes de utilizar los datos.

CAPITULO 6
RECOMENDACIONES

6. Recomendaciones

- Ampliar la red de estaciones meteorológicas en la región del Pacífico de Nicaragua**,** especialmente en zonas con baja densidad de observación, con el fin de mejorar la representatividad espacial y fortalecer futuros procesos de validación de productos de reanálisis como ERA5.
- Implementar procedimientos estandarizados de control de calidad y depuración de datos en las instituciones responsables del monitoreo climático, de manera que las series observadas mantengan niveles adecuados de homogeneidad y consistencia para su uso en investigaciones científicas.
- Incorporar métodos estadísticos adicionales (como análisis de sesgo estacional) para complementar los indicadores utilizados y obtener una evaluación más robusta del comportamiento de ERA5 frente a los datos observados, tanto en la región del Pacífico como en otras regiones de Nicaragua.
- Fortalecer la integración entre datos observados y productos de reanálisis en estudios hidrometeorológicos, aprovechando las ventajas de ERA5 en zonas con escasez de información, pero siempre manteniendo procesos rigurosos de verificación y ajuste.
- Desarrollar investigaciones complementarias que analicen la influencia de factores topográficos, estacionales y sinópticos en las discrepancias entre ERA5 y las observaciones, con el fin de comprender mejor las limitaciones del reanálisis en regiones complejas.
- Incorporar los resultados de esta validación en la toma de decisiones locales, especialmente en sectores como gestión del riesgo, agricultura y planificación territorial, donde la información climática precisa es fundamental.
- Es conveniente que Nicaragua facilite el acceso a datos pluviométricos completos, continuos y depurados, de manera que futuras evaluaciones puedan mejorar la calibración y precisión de productos de reanálisis como ERA5.

Bibliografía

Bibliografía

Corpernius Climate Data Store. (2024). *Corpernius Climate Data Store*. Obtenido de https://cds.climate.copernicus.eu/

Dourojeanni, A., & Jouravlev, A. (2001). *Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua.* Naciones Unidas/CEPAL.

Gómez, V. L., Monserrat, R. S., Lanuza, O. R., Herrera, A. H., Benavidez, K. L., & Rodríguez, J. T. (2021). Evolución de la temperatura y precipitación en cuatro estaciones meteorológicas, ubicadas en la región Norcentral de Nicaragua, Centroamérica. *Revista Científica de FAREM-Estelí: Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano, 10*(38), 202. doi:https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11952

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., . . . Bechtold, P. (2020). The ERA5 global reanalysis. *RMets Royal Meteorogical Society, 146*(730), 1999-2049. doi:https://doi.org/10.1002/qj.3803

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2021). *Informe Climático Anual de Nicaragua.* Obtenido de https://www.ineter.gob.ni/

Juan J.Gaitan, L. B. (2024). *Nueva base de datos de precipitaciones mensuales de la República Argentina (PMRAv1), 2000-2022.* Repositorio institucional de la UNLP. Obtenido de https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/175062

León, F. M. (2024). Una poderosa herramienta suministrada por Copernicus-ECMWF: el explorador de ERA5. *METEORED España*. doi:https://www.tiempo.com/ram/poderosa-herramienta-ecmwf-era5-explorador.html

OCHA. (2017). País azotado por fenómenos climáticos extremos. *reliefweb*. doi:https://reliefweb.int/report/nicaragua/pa-s-azotado-por-fen-menos-clim-ticos-extremos

Rivera Solís, J. D., Ojeda Olivares, E., & Chamorro Blandón, F. E. (2023). Validation of chirps gauge--satellite based rainfall dataset over Nicaragua, 2011-2021. *NEXO Revista científica*, 63-64. Obtenido de https://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexo/article/view/920/915

Soria, G. S. (2022). Reanalisis Climatologico ERA5: Una revisión sobre su uso en el cálculo de atenuación atmoferica en sistemas de comunicaciones satelitales. *Laboratorio de Radiocomunicaciones (LRC), 22*(1), 145 - 159. doi:file:///C:/Users/LENOVO%20T470/Downloads/REANALISIS_CLIMATOLOGICO_ERA5_UNA_REVISION_SOBRE_S.pdf

Stewart, I. T., Maurer, E. P., Stahl, K., & Joseph, K. (2021). Recent evidence for warmer and drier growing seasons in climate sensitive regions of Central America from multiple global datasets. *International Journal Of Climatology, 42*(3), 1399-1417. doi:https://doi.org/10.1002/joc.7310

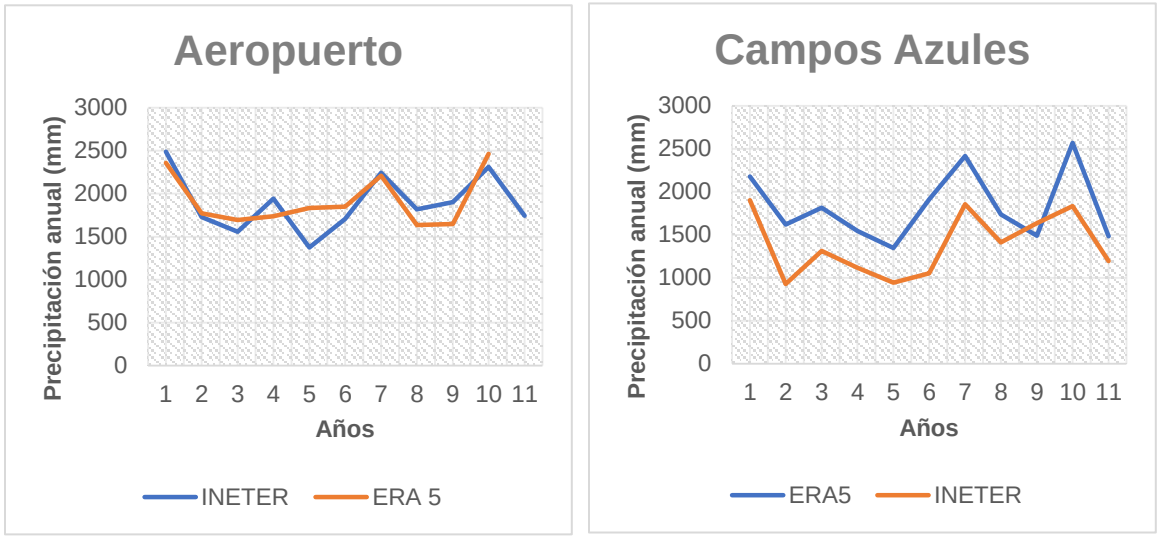
The Word Atlas. (2005). Mapa Fisico de Nicaragua. *thewordatlas.net*. doi:https://www.theworldatlas.net/es/nicaragua/

ANEXOS

Anexos

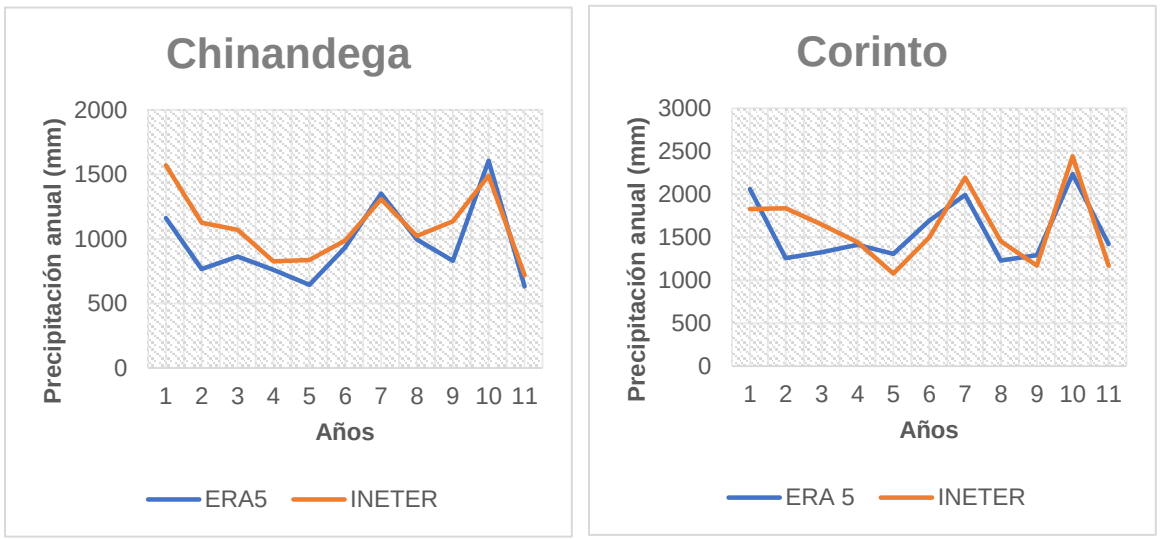
Anexo A. Análisis anual estaciones meteorológicas in situ vs ERA5

Figura A. 1 Estación meteorológica Aeropuerto ACS y Campos azules



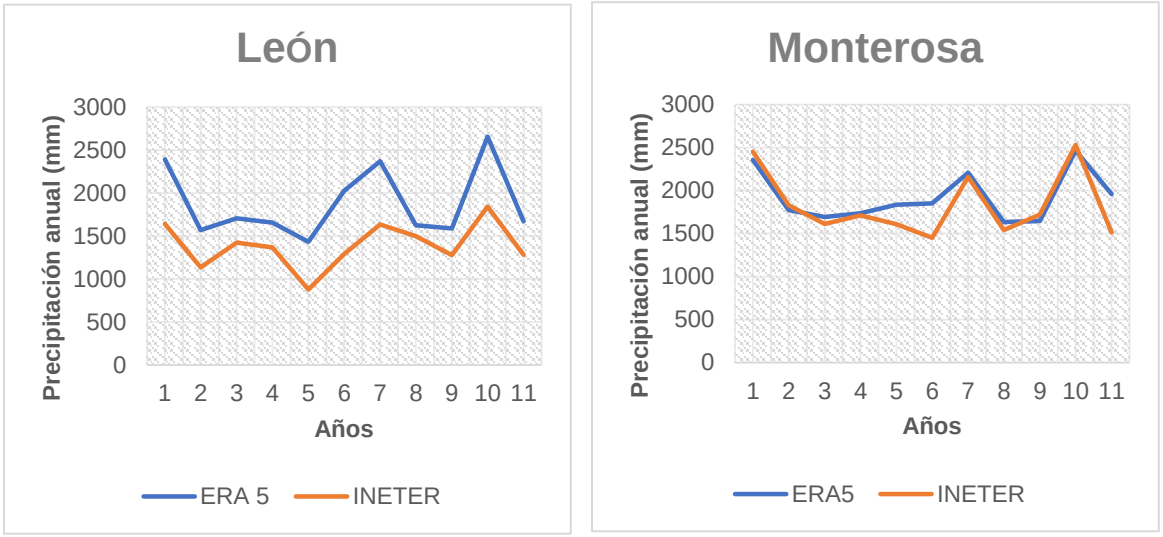
Fuente: Elaboración propia

Figura A. 2 Estación meteorológica Chinandega y Corinto



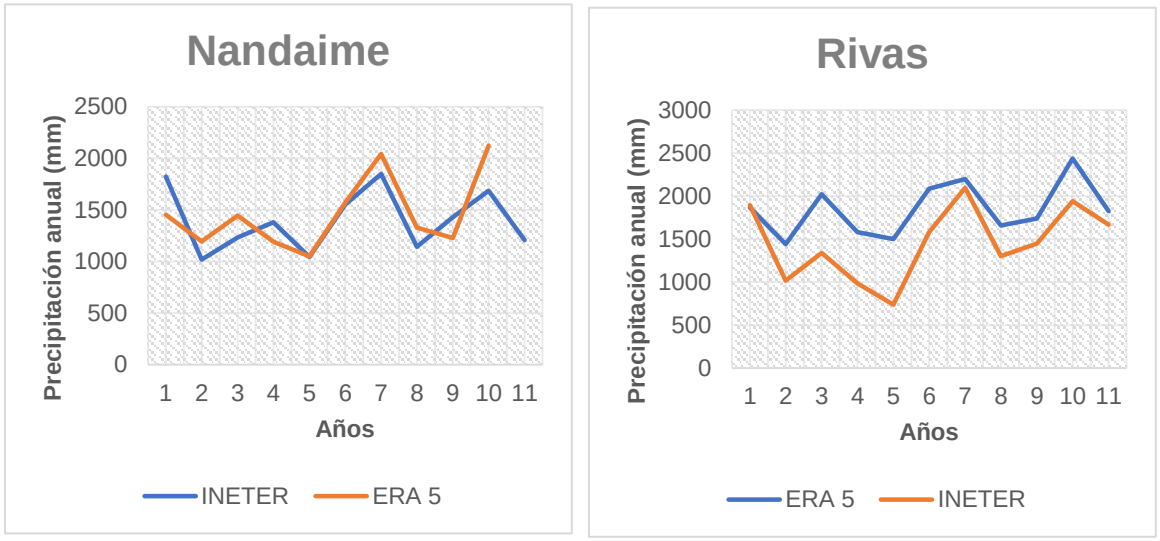
Fuente: Elaboración propia

Figura A. 3 Estación meteorológica León y Monterosa



Fuente: Elaboración propia

Figura A. 4 Estación meteorológica Nandaime y Rivas



Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Matriz de contingencia de estaciones meteorológicas

Tabla B. 1 Matriz de contingencia estación Aeropuerto ACS

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	396	256
In situ no evento	471	2895

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 2 Matriz de contingencia estación Campos Azules

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	614	187
In situ no evento	812	2405

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 3 Matriz de contingencia estación Chinandega

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	737	577
In situ no evento	149	2553

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 4 Matriz de contingencia estación Corinto

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	586	539
In situ no evento	189	2703

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 5 Matriz de contingencia estación León

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	626	725
In situ no evento	53	2613

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 6 Matriz de contingencia estación Monterrosa

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	699	616
In situ no evento	166	2537

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 7 Matriz de contingencia estación Nandaime

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	555	682
In situ no evento	176	2604

Fuente: Elaboración propia

Tabla B. 8 Matriz de contingencia estación Rivas

	ERA5 evento	ERA5 no evento
In situ evento	624	885
In situ no evento	130	2379

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Precipitaciones anuales acumuladas de análisis de homogeneidad método doble masa

Tabla C. 1 Precipitación anual acumulada de la estación meteorológica del Aeropuerto ACS

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación ACS (mm)	Anual acumulada estación ACS (mm)
1771.25	1771.25	1569.7	1569.7
1031.15	2802.40	1126	2695.7
1366.70	4169.10	1070.4	3766.1
1243.05	5412.15	825.6	4591.7
909.95	6322.10	836.7	5428.4
1169.85	7491.95	986.9	6415.3
1744.70	9236.65	1309	7724.3
1454.45	10691.10	1022.9	8747.2
1455.16	12146.26	1136.2	9883.4
1836.60	13982.86	1490.8	11374.2
1237.62	15220.48	719.2	12093.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla C. 2 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Campos Azules

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Campos Azules (mm)	Anual acumulada estación Campos Azules (mm)
1766.95	1766.95	1901.4	1901.4
1075.45	2842.40	929.1	2830.5
1380.70	4223.10	1311.4	4141.9
1176.75	5399.85	1118	5259.9
806.50	6206.35	943.2	6203.1
1434.70	7641.05	1050.8	7253.9
1864.90	9505.95	1855.8	9109.7
1399.50	10905.45	1411	10520.7
1362.11	12267.56	1634.1	12154.8
1889.80	14157.36	1833	13987.8
1472.80	15630.16	1195.94	15183.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla C. 3 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Chinandega

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Chinandega (mm)	Anual acumulada estación Chinandega (mm)
1974.03	1974.03	2487.9	2487.9
1599.13	3573.17	1728.4	4216.3
1560.93	5134.10	1556.8	5773.1
1507.37	6641.47	1942.5	7715.6
1187.10	7828.57	1373	9088.6
1411.33	9239.90	1704.9	10793.5
1995.23	11235.13	2242.6	13036.1
1496.47	12731.60	1819.4	14855.5
1388.14	14119.74	1901.4	16756.9
2270.73	16390.47	2309.7	19066.6
1321.13	17711.60	1743.1	20809.7

Fuente : Elaboración propia

Tabla C. 4 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Corinto

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Corinto (mm)	Anual acumulada estación Corinto (mm)
2194.03	2194.03	1827.9	1827.9
1563.23	3757.27	1836.1	3664
1530.40	5287.67	1648.4	5312.4
1673.67	6961.33	1443.6	6756
1286.03	8247.37	1076.2	7832.2
1481.57	9728.93	1494.2	9326.4
2011.80	11740.73	2192.9	11519.3
1619.27	13360.00	1451	12970.3
1632.47	14992.47	1168.4	14138.7
2227.07	17219.54	2440.7	16579.4
1511.93	18731.47	1170.7	17750.1

Fuente : Elaboración propia

Tabla C. 5 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica León

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación León (mm)	Anual acumulada estación León (mm)
2256.30	2256.30	1641.1	1641.1
1797.53	4053.83	1133.2	2774.3
1605.87	5659.70	1422	4196.3
1698.83	7358.53	1368.1	5564.4
1352.53	8711.07	876.7	6441.1
1550.00	10261.07	1288.9	7730
2198.23	12459.30	1633.6	9363.6
1603.63	14062.93	1497.9	10861.5
1596.53	15659.47	1276.21	12137.71
2427.23	18086.70	1840.2	13977.91
1475.73	19562.43	1279.3	15257.21

Fuente : Elaboración propia

Tabla C. 6 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Monterrosa

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Monterrosa (mm)	Anual acumulada estación Monterrosa (mm)
1985.63	1985.63	2453.1	2453.1
1565.90	3551.53	1828.1	4281.2
1542.40	5093.93	1612.4	5893.6
1584.73	6678.67	1710.4	7604
1108.63	7787.30	1608.4	9212.4
1496.00	9283.30	1450.9	10663.3
2023.03	11306.33	2159.2	12822.5
1589.43	12895.77	1540.5	14363
1448.67	14344.44	1719.8	16082.8
2196.87	16541.30	2531.3	18614.1
1397.70	17939.00	1513.4	20127.5

Fuente : Elaboración propia

Tabla C. 7 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Nandaime

Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Nandaime (mm)	Anual acumulada estación Nandaime (mm)
1787.97	1787.97	1823.7	1823.7
1024.27	2812.23	1020.1	2843.8
1240.40	4052.63	1232.7	4076.5
976.33	5028.97	1380.8	5457.3
838.73	5867.70	1043.8	6501.1
1206.07	7073.77	1551.4	8052.5
1753.67	8827.43	1849.04	9901.54
1245.00	10072.43	1143.2	11044.74
1406.10	11478.53	1429.2	12473.94
1754.40	13232.93	1685.2	14159.14
1193.81	14426.75	15982.84	30141.98

Fuente : Elaboración propia

Tabla C. 8 Precipitaciones anuales acumuladas en la estación meteorológica Rivas

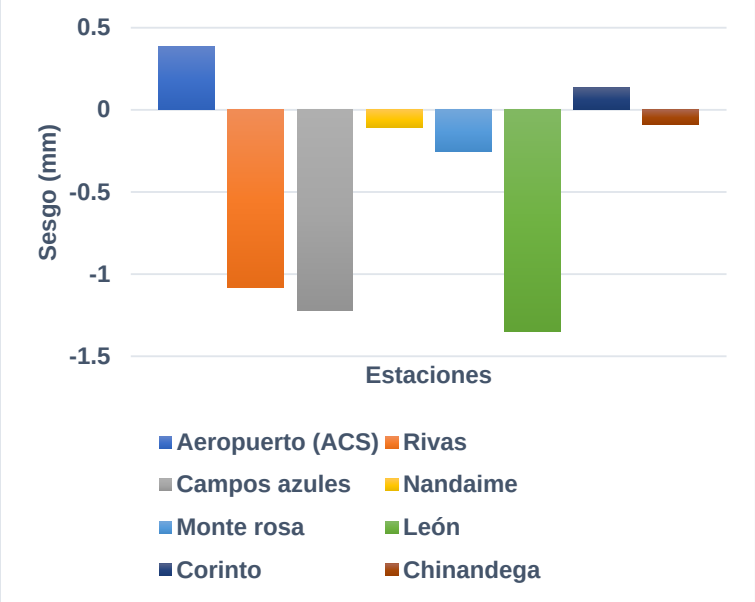
Estación patrón (mm)	Anual acumulada estación patrón (mm)	Estación Rivas (mm)	Anual acumulada estación Rivas (mm)
784.85	784.85	1892.8	1892.8
563.00	1347.85	1017.7	2910.5
535.20	1883.05	1339.4	4249.9
412.80	2295.85	985.4	5235.3
418.35	2714.20	736.3	5971.6
493.45	3207.65	1580.5	7552.1
654.50	3862.15	2096.2	9648.3
511.45	4373.60	1301.1	10949.4
568.10	4941.70	1448	12397.4
745.40	5687.10	1939.4	14336.8
359.60	6046.70	1666.3	16003.1

Fuente : Elaboración propia

Anexo D. Comparativa gráfica por métrica y por estación

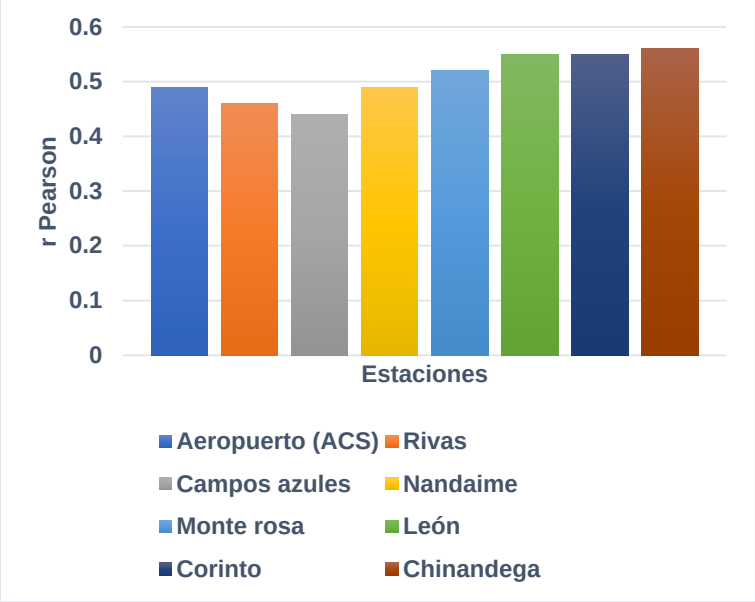
- **Comparativa métrica en escala diario**

Figura D. 1 Sesgo diario (BIAS) en mm/día



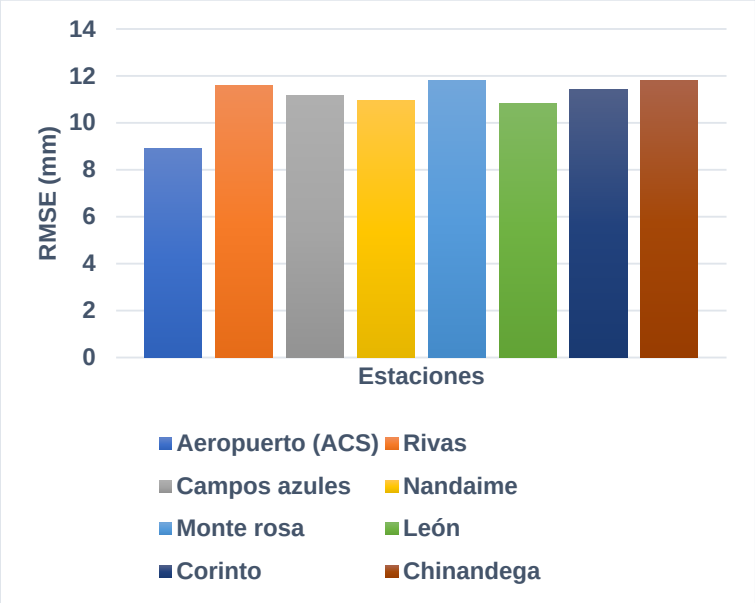
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 2 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación diaria



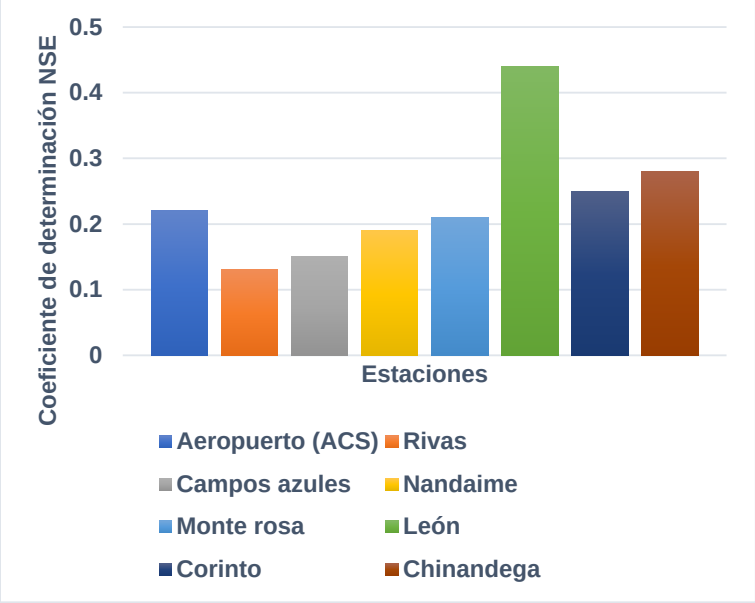
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 3 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) diario



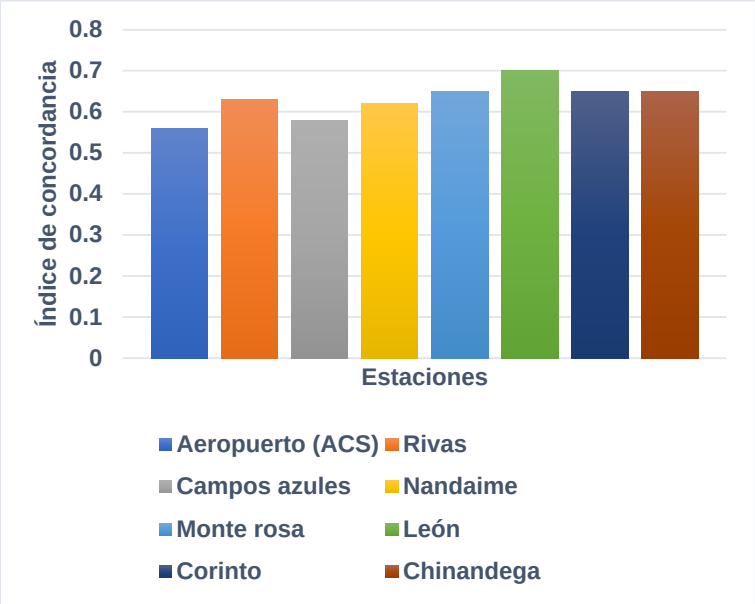
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 4 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) para precipitación diaria



Fuente : Elaboración propia

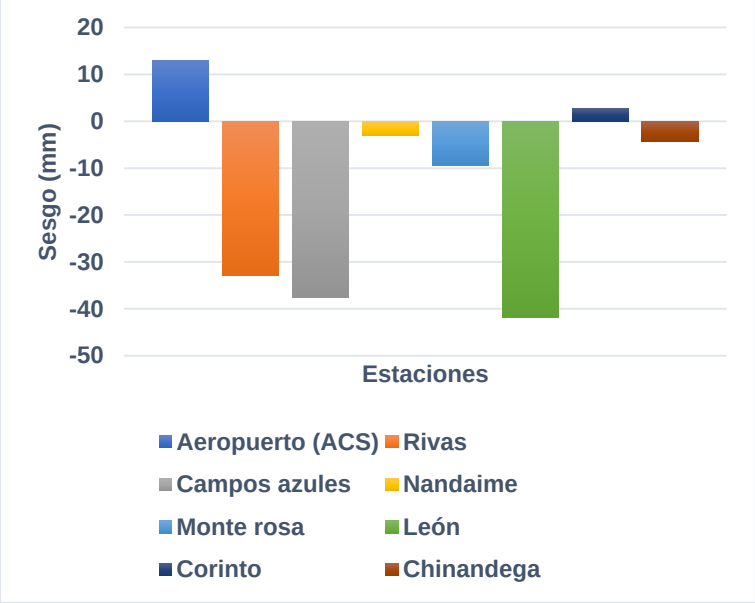
Figura D. 5 Índice de concordancia (d) diario



Fuente: Elaboración propia

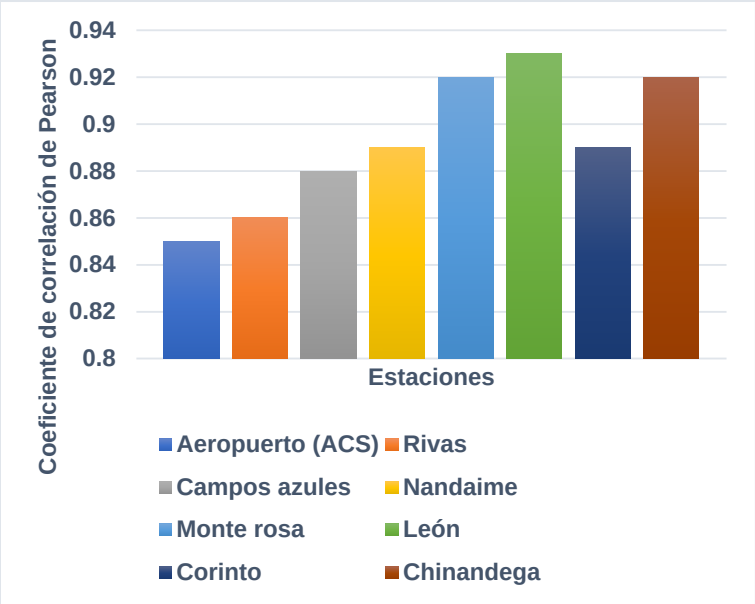
- **Comparativa métrica en escala mensual**

Figura D. 6 Sesgo (BIAS) para precipitación mensual en mm/mes



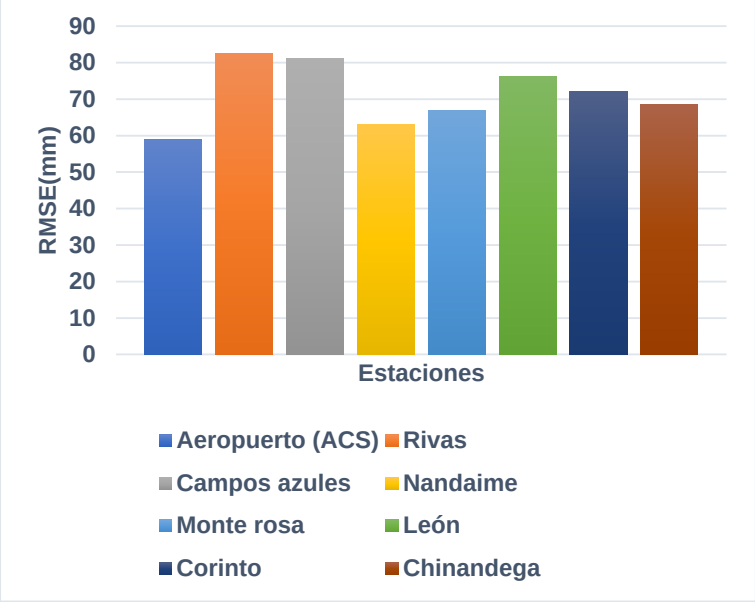
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 7 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación mensual



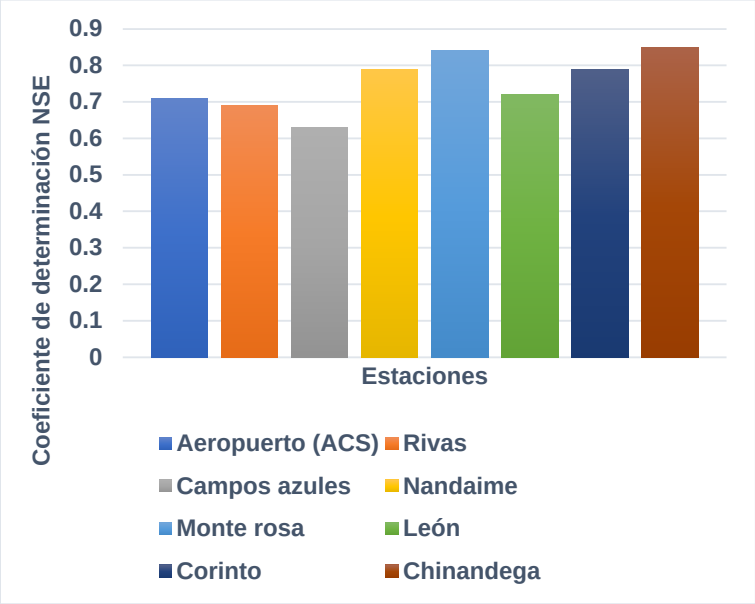
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 8 Raíz del error cuadrático medio (RMSE) mensual



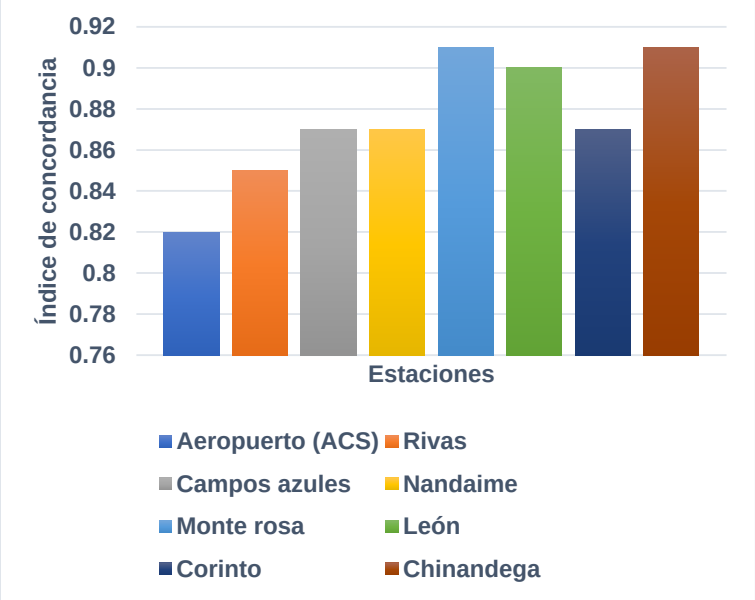
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 9 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) mensual



Fuente : Elaboración propia

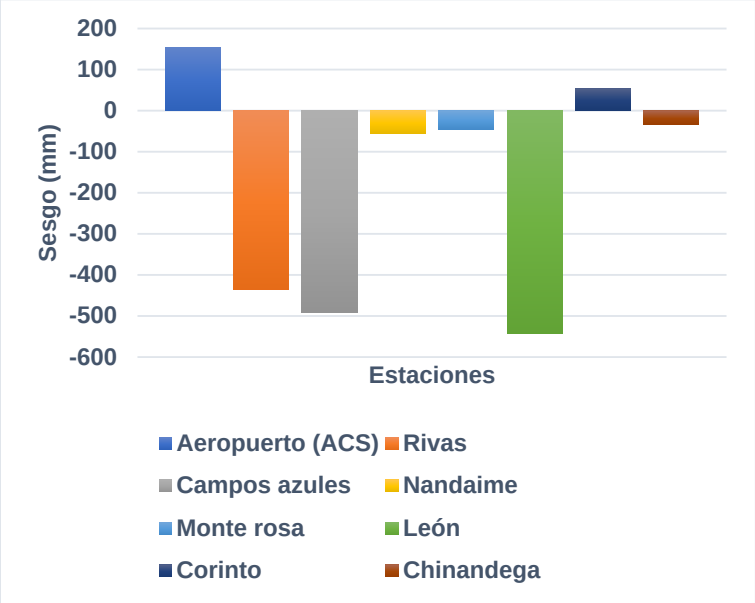
Figura D. 10 Índice de concordancia (d) mensual



Fuente : Elaboración propia

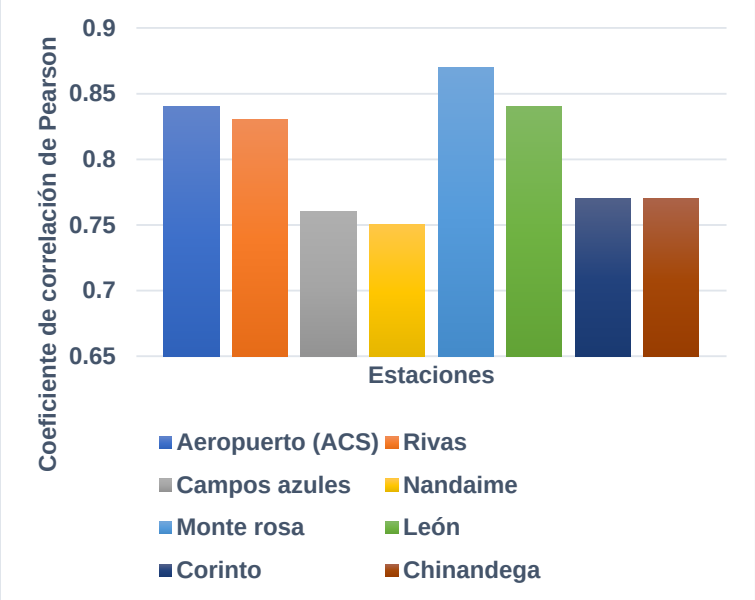
- **Comparativa métrica en escala anual**

Figura D. 11 Sesgo (BIAS) para precipitación anual en mm/año



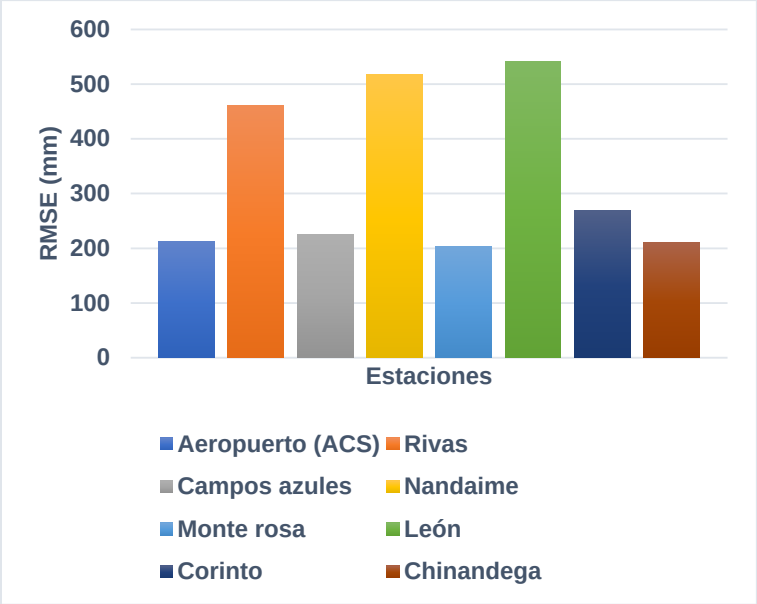
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 12 Coeficiente de correlación de Pearson (r) para precipitación anual



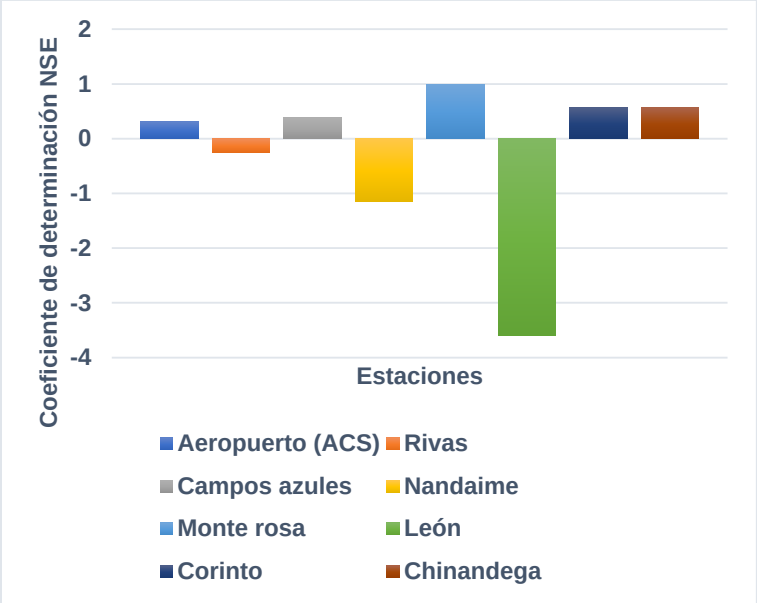
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 13 Raíz del error cuadrático medio (RMSE) anual



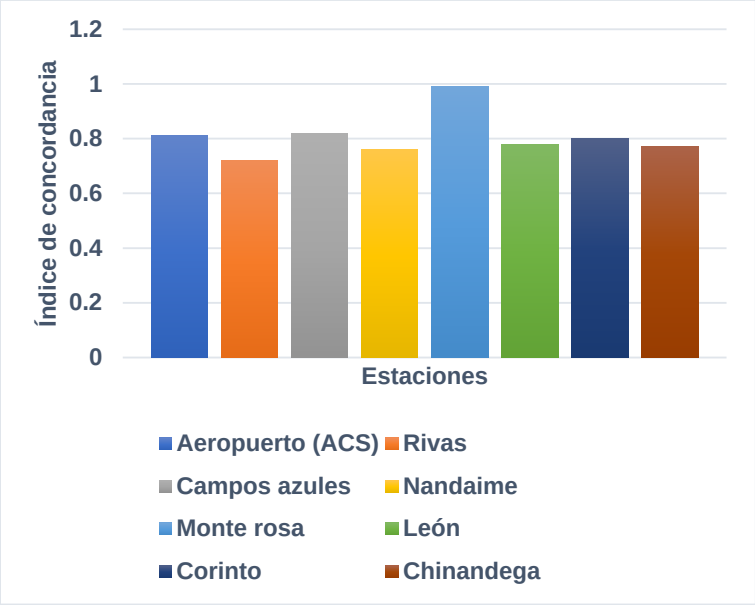
Fuente : Elaboración propia

Figura D. 14 Coeficiente de Nash Stucliffe Efficiency (NSE) anual



Fuente : Elaboración propia

Figura D. 15 Índice de concordancia (d) anual



Fuente : Elaboración propia