



Ajuste de datos de NASA POWER con regresión histórica y comparación porcentual en estaciones climáticas de CONAGUA

Adjustment of NASA POWER data using historical regression and percentage comparison at CONAGUA weather stations

Gerardo Andrés Reyes Abrego¹ , María del Mar Navarro Farfán²  , Sonia Tatiana Sánchez Quispe² , Salvador García Espinosa¹ 

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Economía, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria C.P. 58030, Morelia, Michoacán.

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria C.P. 58030, Morelia, Michoacán.

Resumen

Los datos climáticos son insumos fundamentales para la modelación de procesos hidrológicos, agrícolas y climáticos; no obstante, su calidad varía según la fuente, lo que introduce errores. En este estudio se compararon datos de temperatura y precipitación de estaciones de la CONAGUA con datos satelitales de NASA POWER, mediante diferencia porcentual y regresión lineal. Se planteó la hipótesis de que las diferencias porcentuales entre ambas fuentes se mantienen constantes en el tiempo, permitiendo estimar variables en regiones de baja cobertura. De 34 estaciones, 11 cumplieron con un umbral de error inferior al 25% evaluado con MAE, RMSE y MAPE. La temperatura presentó menor error, mientras la precipitación mostró desempeños similares. La diferencia porcentual puede ser una alternativa viable ante ausencia de datos.

Palabras clave: Estaciones climáticas, NASA POWER, Diferencias porcentuales, Regresión, MAPE.

Abstract

Climatic data are fundamental inputs for the modeling of hydrological, agricultural, and climatic processes; however, their quality varies by source, introducing uncertainty. This study compared temperature and precipitation data from CONAGUA meteorological stations with satellite-derived data from NASA POWER using percentage difference and linear regression. We hypothesized that percentage differences between both sources remain constant over time, enabling the estimation of variables in regions with limited observational coverage. Of 34 stations, 11 met an error threshold below 25%, assessed using MAE, RMSE, and MAPE. Temperature exhibited lower error levels, whereas precipitation showed comparable performance across sources. Percentage difference analysis may represent a viable alternative in the absence of ground-based data.

Keywords: Weather stations, NASA POWER, Percentage differences, Regression, MAPE.

Introducción

Los datos climáticos son fundamentales para modelar procesos en varias disciplinas dedicadas a su gestión, mantenimiento, sustentabilidad, sus reacciones, interacciones, patrones y procesos (Fick y Hijmans, 2017; Karger *et al.*, 2017). Para ello, se requieren de datos y estos provienen principalmente de estaciones meteorológicas, sensores satelitales o modelos climáticos procesados, cada uno con métodos específicos de recolección, procesamiento y validación que pueden generar incertidumbre, sesgos y errores. Por ello, es crucial entender las limitaciones de cada fuente y realizar procesos de comparación y validación para garantizar su fiabilidad.

Actualmente, la información meteorológica e hidrológica de diversas fuentes climáticas enfrenta retos signifi-

cativos en su recolección, procesamiento y difusión. La escasez de datos limita la capacidad para generar proyec-

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

Autor para correspondencia

María del Mar Navarro Farfán

maria.navarro@umich.mx

Como citar

Reyes Abrego GA, Navarro Farfán MM, Sánchez Quispe ST, García Espinosa S (2026). Ajuste de datos de NASA POWER con regresión histórica y comparación porcentual en estaciones climáticas de CONAGUA. *Ciencia Nicolaita* 97:1-8. doi:[10.35830/cn.vi97.890](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.890)

ciones confiables, gestionar riesgos hidrometeorológicos y diseñar estrategias de adaptación (Valencia-Gonzalez *et al.*, 2022; Villanueva *et al.*, 2010). Entre las principales causas de esta problemática se encuentran la insuficiencia de estaciones meteorológicas en áreas remotas, fallos operativos, reemplazo de personal técnico, obsolescencia tecnológica y la discontinuidad en los registros históricos (ASF, 2025; Carrara *et al.*, 2023; DOF, 2020; Valencia-Gonzalez *et al.*, 2022). Para abordar estas limitaciones, se han implementado tecnologías satelitales, algoritmos avanzados para modelos climáticos, modernización de los sistemas de captura de datos y colaboraciones entre instituciones académicas, organismos internacionales y entidades gubernamentales (IPCC, 2023). La falta de datos climáticos confiables puede comprometer la planificación agrícola, la gestión de recursos hídricos y la respuesta oportuna a eventos extremos, como inundaciones y sequías (Valencia-Gonzalez *et al.*, 2022).

Ante este escenario, la cuantificación metódica de errores mediante métricas como el Error Absoluto Medio (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) emerge como estrategia clave para validar fuentes alternativas (Armstrong y Collopy, 1992; Chen *et al.*, 2017; Loew *et al.*, 2017; Monteiro *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2011). Específicamente en México, la Red de CONAGUA enfrenta vacíos temporales que limitan estudios hidrológicos y agrícolas, mientras fuentes abiertas como NASA POWER ofrecen cobertura global, pero requieren ajustes locales (NASA, 2025). Por ello, este estudio propone una metodología de corrección porcentual basada en diferencias interanuales, postulando la hipótesis que las discrepancias entre NASA POWER y observaciones terrestres mantienen patrones temporales estables. El objetivo general es estimar datos faltantes de 2017 en estaciones CONAGUA mediante corrección de registros satelitales usando diferencias porcentuales de 2007, con cuatro objetivos específicos: (1) cuantificar diferencias intersectoriales en 2007, (2) extrapolarlas a 2017, (3) validar la precisión con estaciones completas. Este enfoque podría optimizar el uso de datos abiertos en zonas con monitoreo insuficiente, mejorando modelos de disponibilidad hídrica y resiliencia climática.

Materiales y métodos

Se recopilaron datos climatológicos crudos correspondientes al año 2017, provenientes de estaciones ubicadas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo y en un radio de 20 km fuera del perímetro. A partir del Servicio Meteorológico Nacional, disponible en la plataforma oficial

de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025a, 2025b), se identificaron inicialmente 46 estaciones climatológicas operativas. Tras evaluar la integridad y continuidad de las series de tiempo, se descartaron 12 estaciones debido a registros incompletos o series insuficientes, conservándose 34 estaciones con información adecuada del año 2017 fue seleccionado como periodo de referencia, ya que presentó disponibilidad completa y homogénea en todas las estaciones, lo que permitió su uso como conjunto de verificación:

La diferencia porcentual entre los datos observados y los datos satelitales de NASA POWER se calculó de manera mensual mediante la ecuación 1. Se consideraron erróneos los meses donde esta diferencia superó el 100%. Las estaciones con más de tres meses erróneos se descartaron por inconsistencia, reduciendo el conjunto a 16 estaciones válidas. Esto fue realizado para evitar que los errores fueran mayores al momento de analizarlos completamente y solo tener un 25% de error en caso que lo hubiese. Para validar la metodología, el año del 2017 se usó como referencia (todas las estaciones disponibles), aplicándose la comparación porcentual como modelo de entrenamiento.

Ecuación 1:

$$\text{Diferencia porcentual} = \left(\frac{\text{Valor}_{\text{NASA POWER}} - \text{Valor}_{\text{CONAGUA}}}{\text{Valor}_{\text{CONAGUA}}} \right) * 100$$

Posteriormente, los valores mensuales de NASA POWER correspondientes al periodo 1977-2017 se compararon con los registros de las estaciones mediante la ecuación 1. Las diferencias obtenidas se ajustaron utilizando los datos de NASA POWER del 2017 mediante la fórmula de corrección de la ecuación 2 y los valores resultantes se contrastaron con los datos observados del mismo año. El filtrado se aplicó con el fin de limitar la propagación de errores y asegurar que las discrepancias globales no superaran un umbral aceptable del 25%. Este enfoque se comparó con un modelo alternativo de regresión lineal aplicando a las series históricas, en el cual los datos faltantes fueron sustituidos por la media.

Ecuación 2

$$X_{2023} = X_{\text{NASA } 2023} * \left(1 + \frac{\Delta\% 2017}{100} \right)$$

Ambos métodos se evaluaron mediante métricas estándar: error absoluto (E. ABS), error absoluto medio (MAE - Mean Absolute Error) para promediar errores absolutos de todas las estaciones, reflejando la desviación promedio global, raíz del error cuadrático medio (RMSE - Root Mean

Squared Error) ponderando errores cuadráticos, siendo más sensible a valores atípicos y error porcentual absoluto medio (MAPE - Mean Absolute Percentage Error), utilizada para generalizar el porcentaje de cada estación realizando el promedio total. Estas métricas permitieron cuantificar las discrepancias entre valores observados y estimados, proporcionando una evaluación complementaria de la magnitud absoluta del error y de su relevancia relativa respecto a valores observados. En conjunto, estas métricas ofrecen perspectivas complementarias, mientras que el MAE y RMSE priorizan magnitudes absolutas.

Resultados

Criterios de selección y clasificación de estaciones climáticas

En este estudio se evaluaron 34 estaciones del Meteorológico Nacional (SMN) de CONAGUA, aplicando un proceso de filtrado basado en la detección de valores atípicos de precipitación mediante la ecuación 1 (Tabla 1). Se des-

cartaron aquellas estaciones que presentaron más de tres meses con diferencias superiores al 100% respecto a los valores esperados o un error total (E.T.), definido como la suma de los meses con diferencias iguales o superiores al 100%, mayor al 25% del periodo analizado. Como resultado, 23 estaciones (67.65%) fueron excluidas por inconsistencias significativas en sus registros. Por ejemplo, la estación 16250 (Huandacareo) presentó once meses con discrepancias críticas, mientras que la estación 16105 (Quirio) mantuvo diferencias inferiores al 100% con un error total de 2.4%. Diez estaciones adicionales fueron aceptadas al presentar discrepancias moderadas (29.41%), consideradas tolerables para el análisis comparativo.

Los resultados muestran variaciones significativas en la calidad de los registros entre las estaciones, indicando que los errores no se presentan de forma uniforme. Estas diferencias pueden originarse por limitaciones instrumentales, así como por la variabilidad espacial afectando a las variables analizadas. Por ello, el filtrado aplicado permitió minimizar la influencia de valores extremos que podría afectar la calibración del modelo.

Tabla 1. Evaluación de datos por estación Meteorológica de CONAGUA

No	100%	>100%	E. T.	Estación	Nombre	No	100%	>100%	E. T.	Estación	Nombre
1	0	1	1	11010	Cerano	18	5	0	5	16096	Presa Malpaís
2	4	0	4	11047	Moroleón	19	2	0	2	16104	Puruándiro
3	2	0	2	11060	Salvatierra	20	0	0	0	16105	Quirio
4	3	0	3	11076	Presa Solís	21	2	5	7	16109	San Diego Curupatzco
5	5	0	5	11156	El Dormido	22	2	2	4	16114	San Miguel Del Monte
6	2	2	4	11158	Piñicuar	23	3	2	5	16118	Santa Fe
7	3	1	4	16016	Carrillo Puerto	24	3	2	5	16119	Santa Rita
8	0	4	4	16022	Coíntzio	25	2	4	6	16136	Tzitzio
9	4	1	5	16027	Cuitzeo	26	2	1	3	16145	Zinapécuaro
10	2	6	8	16045	El Temazcal	27	4	1	5	16146	Zirahuén
11	2	1	3	16050	Huaniqueo	28	7	1	8	16199	San Miguel Curinhuato
12	3	0	3	16052	Huingo	29	0	6	6	16234	Galeana
13	2	2	4	16055	Jesús Del Monte	30	4	2	6	16235	Huajúmbaro
14	2	3	5	16080	Morelia (OBS)	31	7	1	8	16241	Tafetán
15	0	2	2023	2	Morelia	32	3	8	11	16250	Huandacareo
16	4	1	5	16087	Pátzcuaro	33	3	2	5	16255	Ucareo
17	1	0	1	16091	Álvaro Obregón (DGE)	34	2	1	3	16512	El Colegio

No = Numero, 100% = valores que presentan el 100%, >100% = valores mayores al 100%, Estación = número de estación, Nombre = nombre de la estación, E. T. = Error Total (Suma de los porcentajes). En Naranja se presentan valores que superan al 25% o más de 4 meses mayores al 100%, Amarillo representa estaciones que tienen menos del 25% o menos de 3 meses con valores mayores al 100%, verde representa los valores que no superan el 100%.

Validación de estimación comparativa de métodos

Precipitación

Los resultados de la validación de los modelos de estimación de precipitación muestran comportamientos diferenciados entre los métodos de diferencia porcentual y regresión lineal, aplicados mediante la ecuación 2, para precipitación y temperatura (**Tabla 2**). En términos promedio, el error absoluto medio (MAE) presenta valores similares entre ambos métodos (110.65 mm para diferencia porcentual y 113.90 mm para regresión), lo que indica una precisión global comparable. Sin embargo, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), métrica más sensible a valores extremos, resulta menor en el modelo de regresión (133.94 mm en regresión frente a 145.07 mm en diferencia porcentual), lo que evidencia una mejor capacidad para atenuar desviaciones atípicas. Este comportamiento se confirma al analizar estaciones individuales. En Huaniqueo, por ejemplo, el método porcentual presenta un error absoluto de 267.84 mm (MAPE de 7.3%). En contraste, en la estación Presa Solís la regresión incrementa el error respecto al método porcentual, evidenciando que el desempeño depende de las condiciones locales de precipitación.

Aunque el MAPE promedio favorece ligeramente al método de diferencia porcentual (14.30% frente a

15.43%), el análisis por estación revela comportamientos heterogéneos. En Zinapécuaro, la diferencia porcentual mantiene errores mínimos (MAPE de 0.2%), mientras que en la estación El Colegio la regresión introduce discrepancias mayores, alcanzando un error absoluto de 224.03 mm (MAPE de 33.6%) frente a 8.14 mm (MAPE de 1%) del método porcentual.

El método porcentual supone estabilidad temporal en las diferencias entre fuentes, condición que puede modificarse ante la variabilidad climática interanual o cambios en los sistemas de medición. La aplicación de ambos métodos requiere validación local previa y sus resultados deben interpretarse considerando la calidad y continuidad de las series históricas disponibles, evitando su generalización fuera del contexto analizado.

Temperatura

Los resultados de la validación de la estimación térmica, evidencian un mejor desempeño de regresión respecto al método de la diferencia porcentual (**Tabla 3**). En términos globales, la regresión reduce el error absoluto medio (MAE) de 1.10 °C a 0.50 °C, lo que representa una disminución del 54.05%. De manera similar, la raíz del error cuadrático (RMSE) se reduce de 1.32 °C a 0.64 °C, indicando no solo una mejora en la precisión promedio, sino

Tabla 2. Comparación de métodos de estimación de precipitación por estación (2007-2017)

Nombre	2017	Precipitación							
		Diferencia Porcentual				Regresión			
		2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerrano	702.80	782.18	79.38	6300.99	0.11	749.38	46.58	2170.04	0.066
Salvatierra	790.88	765.21	25.67	658.82	0.03	825.61	34.73	1206.49	0.044
Presa Solís	748.67	711.55	37.12	1378.14	0.05	974.42	225.75	50962.16	0.302
Huaniqueo	940.87	673.03	267.84	71736.95	0.28	1009.10	68.23	4655.52	0.073
Huingo	781.58	701.77	79.81	6368.96	0.10	949.44	167.86	28177.08	0.215
Morelia	691.26	779.21	87.95	7735.24	0.13	879.72	188.46	35516.23	0.273
Álvaro Obregon	606.08	794.12	188.04	35360.49	0.31	651.55	45.47	2067.44	0.075
Puruándiro	1091.35	824.23	267.12	71352.29	0.24	980.98	110.37	12180.93	0.101
Quirio	591.31	766.02	174.71	30523.56	0.30	652.07	60.76	3691.45	0.103
Zinapécuaro	727.29	725.95	1.34	1.78	0.00	807.97	80.68	6508.70	0.111
El Colegio	667.71	675.85	8.14	66.28	0.01	891.74	224.03	50188.40	0.336
			MAE	110.65			MAE	113.90	
			RMSE	145.07			RMSE	133.94	
			MAPE	14.30			MAPE	15.43	

Nombre = Nombre de la estación, 2017 = valor del 2017, 2007 = valor del 2007, E. ABS = Error Absoluto, E. ^2 = Error Cuadrático, % MAPE = Error Porcentual Absoluto por estación, MAE = Error Absoluto Medio, RMSE = Raíz del Error Cuadrático Medio, MAPE = Error Porcentual Absoluto Medio.

Tabla 3. Comparación de métodos de estimación de temperatura por estación (2007-2017)

Nombre	2017	Temperatura							
		Diferencia Porcentual				Regresión			
		2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerrano	18.44	17.81	0.631	0.40	0.03	17.86	0.58	0.34	0.03
Salvatierra	19.26	16.97	2.290	5.24	0.12	19.64	0.38	0.15	0.02
Presa Solís	19.58	16.90	2.671	7.13	0.14	20.23	0.65	0.42	0.03
Huaniqueo	18.96	17.76	1.195	1.43	0.06	19.05	0.09	0.01	0.00
Huingo	17.31	16.59	0.718	0.52	0.04	17.59	0.28	0.08	0.02
Morelia	18.95	18.32	0.629	0.40	0.03	19.35	0.40	0.16	0.02
Álvaro Obregon	19.20	18.02	1.182	1.40	0.06	20.29	1.09	1.20	0.06
Puruándiro	18.60	19.40	0.792	0.63	0.04	18.76	0.15	0.02	0.01
Quirio	18.03	17.70	0.337	0.11	0.02	18.48	0.44	0.20	0.02
Zinapécuaro	17.56	16.20	1.356	1.84	0.08	18.96	1.40	1.95	0.08
El Colegio	17.00	17.33	0.340	0.12	0.02	17.04	0.04	0.00	0.00
			MAE	1.10			MAE	0.50	
			RMSE	1.32			RMSE	0.64	
			MAPE	5.88			MAPE	0.03	

Nombre = Nombre de la estación, 2017 = valor del 2017, 2007 = valor del 2007, E. ABS = Error Absoluto, E. ^2 = Error Cuadrático, % MAPE = Error Porcentual Absoluto por estación, MAE = Error Absoluto Medio, RMSE = Raíz del Error Cuadrático Medio, MAPE = Error Porcentual Absoluto Medio.

también una mayor capacidad para atenuar desviaciones extremas. Asimismo, el error porcentual absoluto medio (MAPE) disminuye de 5.88% a 0.03%, lo que refleja discrepancias relativas mínimas al aplicar el modelo de regresión.

A nivel individual, la mayoría de las estaciones presentan la misma tendencia. Por ejemplo, en Salvatierra el error absoluto se reduce de 2.29 °C a 0.38 °C, mientras que en Huaniqueo disminuye de 1.19 °C a 0.09 °C. Sin embargo, estaciones como Álvaro Obregón y Zinapécuaro mantienen errores absolutos superiores a 1 °C bajo ambos enfoques, lo que indica que persisten limitaciones asociadas a condiciones locales. Destaca además que ocho estaciones presentan errores inferiores a 0.5 °C bajo regresión, umbral considerado climáticamente relevante en estudios de variabilidad y cambio climático.

Desde una perspectiva física, estas mejoras sugieren que la regresión captura de manera más eficiente la relación entre datos satelitales y observados, reduciendo la influencia de sesgos sistemáticos locales. Sin embargo, el desempeño del método depende de la estabilidad temporal de la relación entre ambas fuentes de datos, la cual puede verse afectada por cambios instrumentales o por variabilidad climática interanual. Por ello, aunque la regresión muestra ventajas claras en este análisis, su aplicación requiere validaciones locales previas y una evaluación con-

tinua de la calidad de las series empleadas para evitar extrapolaciones fuera del contexto analizado.

Estos hallazgos sugieren que la regresión captura más eficientemente las dinámicas térmicas, minimizando los sesgos sistemáticos como errores aleatorios. La consistencia de mejoras refuerza la robustez del método para aplicaciones operativas. En síntesis, mientras la diferencia porcentual muestra limitaciones para modelar anomalías térmicas, el enfoque de regresión demuestra precisión suficiente para su implementación en redes de monitoreo climático.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan patrones consistentes con la literatura científica internacional respecto a la validación de datos climáticos y satelitales. La heterogeneidad observada entre las estaciones meteorológicas (67.65%) de exclusión por inconsistencias severas confirma lo que Valencia-Gonzalez *et al.* (2022) menciona en sus hallazgos sobre la problemática generalizada en la calidad de datos de redes meteorológicas nacionales. Esta situación es particularmente relevante considerando que la baja densidad de estaciones meteorológicas y los altos porcentajes de valores climáticos archivados dificultan el

monitoreo climático en la mayoría de lugares del mundo (Carrara *et al.*, 2023; Deichmann y Eklundh, 1991).

La superioridad del método de regresión para la estimación de temperatura (reducción del MAE en 54.5% y MAPE en 99.5) concuerda con las observaciones de Carranza *et al.* (2003), quienes demostraron que el sistema meteorológico satelital NASA POWER, es una herramienta eficaz para obtener estimaciones del índice de temperatura-humedad bajo condiciones en Brasil (Carrara *et al.*, 2023). Sin embargo, esta convergencia de resultados sugiere que las dinámicas térmicas presentan patrones espaciotemporales valores más estables y predecibles que las variables pluviométricas.

Por otro lado, el comportamiento heterogéneo observado en la estimación de precipitación presenta limitaciones que requieren más estudios sobre el comportamiento de esta variable. Existen algunas contradicciones en cuanto al desempeño de la regresión sobre las estaciones, donde en Huaniqueo mostro unas mejoras sustanciales mientras que en la estación Presa Solís presento un mal desempeño. Estos resultados en cuanto a variabilidad espacial están ampliamente registrados en muchos artículos como el de Marzouk (2021), el cual en su trabajo concluye que los datos de NASA POWER son confiables con los datos de temperatura, mientras que para la humedad relativa tiene una inexactitud leve, pero para los valores de precipitación son muy exagerados en Al Dakhiliyah, Oman.

La Cuenca de Cuitzeo esta caracterizada por tener muchas gradientes altitudinales y presentar microclimas en toda su área. Esto podría influir en los modelos de diferencia porcentual y regresión al tener una heterogeneidad climática específica del lugar donde se encuentra la toma de datos, presente en las estaciones climáticas, sugiriendo que la topografía local, los patrones de circulación atmosférica y los microclimas influyen significativamente en la confiabilidad de las correcciones propuestas.

Los hallazgos en este estudio son consistentes con trabajos similares sobre validación de datos satelitales. Investigadores como Monteiro *et al.* (2018), evaluaron los datos meteorológicos del NASA POWER en Brasil, concordando que los datos de temperatura varían menos que los de precipitación usando errores cuadráticos medios (RMSE) y error medio relativo (RME), concluyendo que los datos de NASA POWER pueden utilizarse para actividades agrícolas debido al gran tamaño del pixel, utilizarlo para escalas mayores a nivel regional o nacional y no a escalas muy reducidas. También, Loew *et al.* (2017) destaca varios métodos de validación documentando similitudes y diferencias incluyendo métricas. Esto respalda la metodología realizada en este trabajo.

La consistencia de estos resultados a través de varias

regiones en el mundo, hace suponer que los patrones identificados pueden tener aplicabilidad más amplia y que los resultados en cuanto a precipitación y temperatura son consistentes en muchas regiones.

Permanecen aspectos metodológicos que requieren investigación adicional. La estabilidad temporal de las diferencias porcentuales, fundamental para la hipótesis planteada, requiere validación con series de tiempo más extensas que abarquen variabilidad climática interanual y multidecadal. Adicionalmente, la influencia de eventos climáticos extremos (sequías, huracanes, fenómenos El Niño/La Niña) en la precisión de ambos métodos no fue evaluada sistemáticamente.

La representatividad espacial de las correcciones propuestas constituye otra limitación importante. La extrapolación de las correcciones a áreas sin estaciones meteorológicas requiere considerar la variabilidad topográfica, los gradientes de temperatura y precipitación y las características de uso de suelo, aspectos que no fueron incorporados en el modelo actual.

La metodología propuesta tiene particular relevancia para el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) y la Red de Estaciones Meteorológicas Automatizadas (REMA) de CONAGUA, donde la sistematización de procedimientos de relleno de datos podría mejorar la disponibilidad de información climática para modelos hidrológicos operativos.

La implementación de técnicas de aprendizaje automático o la integración de inteligencia artificial podrían ayudar a identificar patrones espaciotemporales en las correcciones y mejorar la precisión de ambos métodos o integrar más. También, La integración de múltiples fuentes satelitales (NASA POWER, ERA5-Land, CHIRPS) mediante ensambles probabilísticos representa otra línea de investigación prometedora para reducir incertidumbres y mejorar la robustez de las estimaciones en regiones con monitoreo insuficiente. Finalmente, la validación de la metodología propuesta en otras cuencas hidrográficas mexicanas con características climáticas contrastantes, permitiría evaluar la generalización de los hallazgos y desarrollar protocolos estandarizados para la corrección de datos satelitales a nivel nacional.

Conclusiones

Los resultados demuestran que la selección rigurosa de estaciones climáticas mediante criterios de error (error total >25% o >3 meses >100%) es fundamental para garantizar la calidad de los datos. Se descartaron el 67.65% de estaciones por inconsistencias severas como Huandacareo.

Para la estimación de precipitación, si bien ambos métodos muestran precisión global comparable, la regresión reduce el RMSE en 7.7%, evidenciando mayor eficacia frente a valores extremos. Sin embargo, su desempeño es espacialmente heterogéneo, mejorando sustancialmente en Huaniqueo (MAPE 7.3% vs 28%) pero amplificando errores en Presa Solís. En contraste, para temperatura, la regresión presenta superioridad indiscutible, reduciendo MAE en 54.5% (0.50 °C vs 1.10 °C) y MAPE en 99.5%, logrando en 8 de 11 estaciones errores <0.5°C (umbral climáticamente relevante). Estos hallazgos implican que la validación estricta de estaciones es primordial para análisis confiables. La regresión es óptima para modelado térmico. La diferencia porcentual puede ser una alternativa viable ante la ausencia de datos climáticos en zonas si acceso a estaciones. Finalmente, la elección de métodos de precipitación debe considerar la variabilidad espacial local, priorizando regresión en zonas con alta irregularidad pluviométrica y diferencia porcentual donde predomina estabilidad interanual.

Agradecimientos

Agradecemos al Sistema Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA) por los datos de estaciones en la cuenca de Cuitzeo, a National Aeronautics and Space Administration Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA POWER), por la información satelital modelada y al Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero mediante la beca otorgada para la realización de este trabajo.

Referencias

Armstrong JS, Collopy F (1992). Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International Journal of Forecasting* 8(1):69-80. doi:[10.1016/0169-2070\(92\)90008-W](https://doi.org/10.1016/0169-2070(92)90008-W)

ASF (2025). Informe General Ejecutivo: Cuenta Pública 2023. Auditoría Superior de la Federación. https://www.asf.gob.mx/Section/58_Informes_de_auditoria [consultado el 15 de Julio del 2025]

Carrara ER, Lopes PS, Reis ACZ, Silva JX, Dias LCdCM, Schultz ÉB, Marques DBD, da Silva DA, Veroneze R, Andrade RG, Peixoto MGCD (2023) NASA POWER satellite meteorological system is a good tool for obtaining estimates of the temperature-humidity index under Brazilian conditions compared to INMET weather stations data. *International Journal of Biometeorology* 67(7):1273–1277. doi:[10.1007/s00484-023-02493-5](https://doi.org/10.1007/s00484-023-02493-5)

Chen C, Twycross J, Garibaldi JM (2017). A new accuracy measure based on bounded relative error for time series forecasting. *PloS one* 12(3):e0174202. doi:[10.1371/journal.pone.0174202](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174202)

CONAGUA (2025a). Información Estadística Climatológica. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica> [consultado el 14 de Julio del 2025]

CONAGUA (2025b). Normales Climatológicas por Estado. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado> [consultado el 21 de Julio del 2025].

Deichmann U, Eklundh L (1991). Global digital datasets for land degradation studies: a GIS approach. GRID Case Study Series No. 4. Global Environmental Monitoring System (GEMS), United Nations Environment Programme. *Nairobi* <https://web.nypl.org/research/research-catalog/bib/hb990078024240203941>

DOF (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0 [consultado el 15 de marzo del 2025].

Fick SE, Hijmans RJ (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12):4302-4315. doi:[10.1002/joc.5086](https://doi.org/10.1002/joc.5086)

Karger DN, Conrad O, Böhner J, Kawohl T, Kreft H, Soria-Auza RW, Zimmermann NE, Linder HP, Kessler M (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4(1):170122. doi:[10.1038/sdata.2017.122](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122)

Loew A, Bell W, Brocca L, Bulgin CE, Burdanowitz J, Calbet X, Donner RV, Ghent D, Gruber A, Kaminski T, Kinzel J, Klepp C, Lambert J-C, Schaepman-Strub G, Schröder M, Verhoelst T (2017) Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics* 55(3):779–817. doi:[10.1002/2017RG000562](https://doi.org/10.1002/2017RG000562)

Marzouk OA (2021). Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements. *Heliyon* 7(3):e06625. doi:[10.1016/j.heliyon.2021.e06625](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06625)

Monteiro LA, Sentelhas PC, Pedra GU (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology* 38(3):1571-1581. doi:[10.1002/joc.5282](https://doi.org/10.1002/joc.5282)

NASA (2025). “POWERing the Future of Energy, Infrastructure, and Agroclimatology” NASA POWER. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [consultado el 21 de julio del 2025].

Valencia-Gonzalez JN, Arteaga-Ramírez R, Vasquez-Peña MA, Quevedo-Nolasco A (2022). Relleno de datos diarios faltantes en registros de series climatológicas temporales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(4). doi:[10.29312/remexca.v13i4.2514](https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2514)

Villanueva DJ, Cerano PJ, Estrada ÁJ, Morán M R, Constante GV (2010). Precipitación y gasto reconstruido en la cuenca baja del río Nazas. *Revista mexicana de ciencias forestales* 1(1):25-37. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322010000100004&script=s-ci_arttext

Wei L-Y, Chen T-L, Ho T-H (2011). A hybrid model based on adaptive-network-based fuzzy inference system to forecast Taiwan stock market. *Expert Systems with Applications* 38(11):13625-13631. doi:10.1016/j.eswa.2011.04.127