

Análisis de las precipitaciones estimadas por IMERG-GPM respecto a nueve estaciones climatológicas en la Zona Metropolitana Colima-Villa de Álvarez, México

Samir Josué Figueroa Avalos¹, Dora Angélica Correa Fuentes¹, Jesús López de la Cruz²,
María del Pilar Ramírez Rivera¹, Ignacio Barajas Ávalos¹.

¹ Tecnológico Nacional de México Campus Colima.

² Universidad de Colima.

Resumen

La ciudad conurbada Colima-Villa de Álvarez en los últimos años ha presentado problemáticas en materia de inundaciones, y en ocasiones los registros de precipitación no son los adecuados para realizar estudios hidrológicos certeros. Recientemente, se ha mejorado en la obtención de las estimaciones de lluvia de manera indirecta como lo es la misión de Medición Global de Precipitación (GPM), a través del algoritmo de IMERG. El objetivo de esta investigación es determinar si existen correlaciones positivas entre la estimación obtenida por GPM respecto a las mediciones por estaciones climatológicas. La información fue evaluada por de diferentes medidas estadísticas para el periodo 2010 a 2015. Se determinó que los resultados mostraron correlaciones positivas entre los registros satelitales y las estaciones climatológicas, sin embargo, algunas mediciones indican que los registros satelitales deben ser corregidos antes de utilizarse.

Abstract

The Colima-Villa de Alvarez suburban city in recent years has presented problems in terms of flooding, and sometimes the precipitation records are not the most adequate to carry out accurate hydrological studies. Recently, there has been improvement in obtaining rainfall estimates indirectly, such as the Global Precipitation Measurement (GPM) mission, through the IMERG algorithm. The objective of this research is to determine if there are positive correlations between the estimate obtained by GPM to the measurements by weather stations. The information was evaluated by different statistical measures for the period 2010 to 2015. The results showed positive correlations between the satellite records and the weather stations. However, some measurements indicate that the satellite records must fit before being used.

Palabras clave: Precipitación, producto satelital, GPM, estación climatológica, correlación.

Keywords: Precipitation, satelital product, GPM, weather station, correlation.

1. INTRODUCCIÓN

Mundialmente, el 95% de los desastres que afectan a las poblaciones son de origen hídrico, tales como las inundaciones, huracanes y tormentas (Sedano-Cruz et al., 2012). En el estado de Colima, la temporada con mayores precipitaciones es entre los meses de mayo y noviembre, por lo tanto, existe mayor concurrencia de ciclones tropicales de altas categorías (Padilla Lozoya & de la Parra Arellano, 2015). En este caso, es fundamental conocer la variabilidad de la precipitación, tanto temporal como espacial, y así, generar estudios hidrológicos que incentiven la creación de estrategias para el control y mitigación de inundaciones, asimismo en la gestión de los recursos hídricos (Duarte et al., 2022).

Frecuentemente, algunas zonas de la ciudad conurbada Colima-Villa de Álvarez tienden a inundarse. Las precipitaciones que causan estos estragos se producen al norte de la ciudad, lo que provoca grandes escorrentías que afectan al sector socioeconómico. Gaspari et al. (2007) define las escorrentías como el agua

generada por lluvias que escurre de manera superficial sobre el suelo. De modo que, es necesario alcanzar mejores mediciones, y entender el comportamiento de la precipitación para aminorar las pérdidas económicas, y, sobre todo, las humanas (Brizuela et al., 2015). Para comprender el comportamiento de la precipitación es imprescindible obtener datos fiables, es decir, datos con alta resolución y buena calidad (Carrascal Carrasco et al., 2010).

Sin embargo, las mediciones que se realizan con pluviómetros convencionales pueden presentar problemáticas, tales como; datos faltantes, estaciones pluviométricas mal distribuidas o simplemente son insuficientes. Ponce de León (2019) menciona que en Colima persiste esta problemática, por lo que le resta certeza a los estudios hidrológicos que se generan con información que se tiene al alcance, puesto que, en muchas ocasiones, se tiene que inferir datos faltantes en un registro utilizando información de otra estación que está a kilómetros de distancia.

Es importante aprovechar al máximo las fuentes de información disponibles, es decir, utilizar los diferentes tipos de mediciones de precipitación, sean directas e indirectas. Desgraciadamente, la precisión de las mediciones por modelos satelitales presenta una amplia variabilidad. Esto se debe en gran medida a que las mediciones de la precipitación no son directas, asimismo, influye la propia variabilidad de los parámetros de la naturaleza; espacial y temporal (Gavilan et al., 2019). No obstante, la información obtenida por observaciones puntuales podrá ser útil para remover errores sistemáticos de datos menos precisos de radares y satélites, con la finalidad de estimar precipitaciones en áreas donde carece la cobertura de pluviómetros (Ramos Fernández, 2013).

Uno de estos productos de libre disposición más conocidos es la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés), siendo un proyecto internacional entre la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA, por sus siglas en inglés), la cual fue diseñada para proporcionar mejores estimaciones de la precipitación en los trópicos, y estuvo en operación desde diciembre de 1997 hasta abril de 2015 (Huffman & Bolvin, 2018).

En febrero de 2014 surge la Medición Global de Precipitación (GPM, por sus siglas en inglés), el cual le dio seguimiento a la generación de productos satelitales para estimar la precipitación (Hou et al., 2014). La obtención de las estimaciones es a través de un algoritmo junto con la combinación de Recuperaciones de Multisatélites Integradas para GPM (IMERG, por sus siglas en inglés), el cual se encarga de fusionar e interpolar la información captada de los sensores de microondas con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (10 km x 10 km aproximadamente), y una frecuencia de muestreo de 30 minutos (Huffman et al., 2019). Con base en estos productos, en las últimas décadas se ha logrado mejorar el desarrollo de tecnologías capaces de estimar precipitaciones de manera indirecta.

Si bien en el estado de Colima no se han implementado análisis de este tipo, existen precedentes exitosos. A nivel Latinoamérica, está el caso de estudio de Duarte et al. (2022) en Brasil, el cual tiene como objetivo evaluar las estimaciones de precipitación por día, mes y año, realizadas con el producto satelital (IMERG-GPM) en conjunto con la información observada de las estaciones pluviométricas; con la finalidad de comparar la información y realizar una distribución espacial de la lluvia. Asimismo, se encuentran investigaciones como la de Rodríguez-González et al. (2018), que realizan una cuantificación espacial y temporal de la precipitación en la región del estado de Zacatecas (México), en los meses de junio a septiembre (meses más lluviosos) sobre el

periodo de 2001 a 2010 utilizando registros de precipitación de pluviómetros y el satélite (TRMM) para obtener más información en la zona de estudio.

Por lo tanto, la finalidad de esta investigación es determinar si existen correlaciones positivas entre la precipitación estimada por mediciones satelitales respecto a las obtenidas de manera terrestre en la zona metropolitana de Colima, con la finalidad de que las variables puedan influir positivamente en mejores distribuciones de precipitación sobre la región al incluir más información.

2. METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio

La zona metropolitana de Colima-Villa de Álvarez está comprendida por los municipios de Colima, Comala, Coquimatlán, Cuauhtémoc y Villa de Álvarez; estos, en conjunto mantienen una extensión territorial de 2275.40 km². Las coordenadas para la zona de estudio se encuentran en 19°26', 19°07' latitud y -103°52', -103°33' longitud, esta superficie se debe a las estaciones pluviométricas que existen en la zona (Figura 1). En la región, el clima principalmente es cálido subhúmedo, manteniendo un promedio de temperatura anual de 25.6°C, con lluvias en verano, siendo una precipitación promedio anual de 962.3 mm aproximadamente (INEGI, 2017).

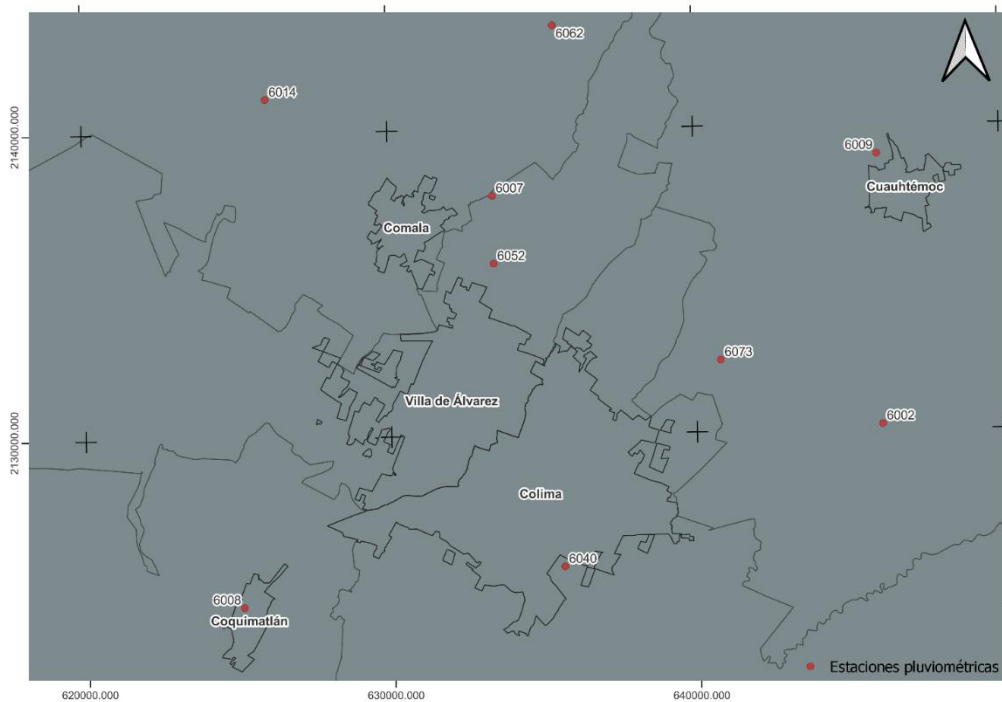


Figura 1. Localización de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia en Software QGIS.

2.2 Registros de estaciones pluviométricas terrestres

Se obtuvieron registros mensuales de precipitación de estaciones pluviométricas que están integradas en la base de datos de CLICOM (Clima Computarizado) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el cual trabaja en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Datos climáticos CLICOM, disponibles en <http://clicom-mex.cicese.mx/>). En la base de datos se registran características climatológicas como temperatura, precipitación y evaporación, pero para efectos de esta investigación solo se analiza la precipitación. Se eligieron nueve estaciones climáticas, las cuales se encuentran distribuidas en la Zona Metropolitana de Colima-Villa de Álvarez bajo el periodo de 2010 al 2015 (Tabla 1).

Para conocer la confiabilidad de la información, se realizó un control de calidad de los datos. Este control se basó en verificar que no existan valores negativos en la precipitación, y que las estaciones pluviométricas tengan registros mayores al 90% de información dentro del periodo de estudio.

Tabla 1. Estaciones utilizadas para la estimación de la precipitación

Clave	Estación pluviométrica	Longitud	Latitud	Elevación (m)	Promedio anual de precipitación (mm)
6062	Cofradía de Suchitlán	-103.71W	19.38N	860	1646.78
6009	Cuauhtémoc	-103.61W	19.34N	922	1353.27
6007	Comala	-103.73W	19.33N	735	1246.40
6052	E.T.A. 254 Comala	-103.73W	19.31N	706	1113.42
6073	Trapiche	-103.66W	19.28N	663	1082.83
6002	Buenavista	-103.61W	19.26N	622	1297.52
6040	Colima DGE	-103.71W	19.22N	500	986.08
6008	Coquimatlán	-103.81W	19.21N	354	938.58
6014	Peñitas	-103.8W	19.36N	637	1109.28

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de CLICOM

2.3 Registros de precipitación satelital

La precipitación estimada de manera satelital fue obtenida por el algoritmo de 3IMERGM v06 desarrollado por el proyecto Medición Global de Precipitación (GPM). Este algoritmo de nivel tres, está diseñado para fusionar la información de varios satélites en un conjunto de datos para una mejor observación de la precipitación (Huffman & Bolvin, 2019).

Para la recopilación de información, se seleccionaron las mismas coordenadas geográficas de las nueve estaciones pluviométricas en el mismo periodo de tiempo. Asimismo, la tasa de precipitación para el análisis fue en milímetros por mes, ya que es la misma unidad de las estaciones pluviométricas. A través de estos parámetros, se podrán comparar las mediciones de precipitación. Esta información se encuentra disponible en (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

2.4 Validación de las estimaciones de precipitación

Se evaluaron los registros de precipitación obtenidos de forma satelital respecto a los datos de pluviómetros, bajo los mismos parámetros; espacial y temporal.

Se emplearon siete medidas estadísticas para evaluar el desempeño de los productos de precipitación satelital, y se clasificaron de acuerdo con su función.

El coeficiente de correlación de Pearson (CC); se encarga de medir la concordancia lineal entre la estimación satelital y la obtenida a través de los pluviómetros (Duarte et al., 2022); el coeficiente va de $-1 \leq CC \leq 1$, donde 1 es una correlación positiva perfecta (Ecuación 1).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (P_p - \bar{P}_p) \cdot (P_s - \bar{P}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_p - \bar{P}_p)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_s - \bar{P}_s)^2}} \quad (1)$$

Donde n es el número de la muestra; P_s representa la estimación de la lluvia satelital; P_p representa la precipitación de la estación observada; y \bar{P}_p o \bar{P}_s indica la media de cada variable descrita.

El coeficiente de determinación (R^2) se utiliza para describir qué tan adecuado es el modelo generado a partir de las variables comparadas (Lujano Laura et al., 2015); y los resultados se pueden clasificar como muy bueno >0.95 , bueno $0.85-0.95$, satisfactorio de $0.65-0.85$ e insatisfactorio de <0.65 (Andersen et al., 2001) (Ecuación 2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_s - \bar{P}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (P_p - \bar{P}_p)^2} \quad (2)$$

Métricas absolutas como el error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés) (Ecuación 3) y raíz del error medio al cuadrado (RMSE, por sus siglas en inglés) (Ecuación 4) evalúan el total de la concordancia entre las estimaciones satelitales respecto a las terrestres, es decir, mientras que MAE define la diferencia absoluta entre las dos variables (Duarte et al., 2022), la RMSE calcula la magnitud del error de las mediciones satelitales respecto a las pluviométricas haciendo un énfasis en los valores extremos (Rodríguez-González et al., 2018). Las dos métricas, al medir el error, los resultados deberán estar cercanos a cero para considerarse buenos estimadores (Lujano Laura et al., 2015).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_s - P_p|}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_s - P_p)^2}{n}} \quad (4)$$

El error medio (ME, por sus siglas en inglés) (Ecuación 5) y el sesgo porcentual (BIAS) (Ecuación 6) expone en magnitud la existencia de errores sistemáticos. El ME se encarga de obtener en simple medida la diferencia promedio entre ambas variables (Rodríguez-González et al., 2018), y el BIAS estima de manera porcentual la diferencia media entre la estimación satelital y la observada en pluviómetros. Los valores del ME y BIAS deben ser cercanos a cero para indicar valores perfectos, la ventaja del BIAS es señalar que, si el valor resultante es negativo, quiere decir que existe una subestimación de la precipitación satelital, de lo contrario, si es positivo, indica una sobreestimación (Guachamín et al., 2019).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_s - P_p)}{n} \quad (5)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_s - P_p)}{\sum_{i=1}^n (P_p)} \cdot 100 \quad (6)$$

Finalmente, se utilizará la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés) (Ecuación 7) la cual se encarga de medir la variabilidad de los datos pluviométricos comparando la varianza de los datos de satélite (Alabar et al., 2021). Generalmente, este indicador se emplea para la evaluación de modelos hidrológicos (McCuen et al., 2006), asimismo, los criterios para clasificar los resultados van desde muy bueno con 0.90, bueno desde 0.80 a 0.90, aceptable de 0.80 a 0.65 e insatisfactorio menor a 0.65, estos criterios son considerados por Ritter & Muñoz-Carpena (2013).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_s - P_p)^2}{\sum_{i=1}^n (P_p - \bar{P}_p)^2} \quad (7)$$

2.5 Interpolación de la información de precipitación

La información obtenida por las estaciones climatológicas fue interpolada con el objetivo de conocer la distribución espacial anual de la lluvia manteniendo la misma resolución espacial de las obtenidas del satélite GPM. La interpolación fue realizada en el software QGIS, utilizando el método de Kriging ordinario. La función de este método es establecer los valores que fueron interpolados entre los puntos próximos o cercanos (también llamado vecino cercano), lo cual permite mantener una escala más homogénea, es decir, uniformizada. (Haile et al., 2013)

3. RESULTADOS

3.1 Validación de las estimaciones de precipitación

Para representar de manera gráfica la relación entre la estimación satelital y los registros pluviométricos, se realizaron dos diagramas de dispersión. Los diagramas muestran las estaciones que alcanzaron valores más altos y bajos sobre los coeficientes de correlación (CC) y de determinación (R²). La estación E.T.A. 254 Comala (6052) es la que muestra el valor más bajo, alcanzando una correlación de 0.84 y un coeficiente de determinación de 0.71 (Figura 2), mientras que, la estación Colima DGE (6040) obtuvo una correlación de 0.95 y un coeficiente de determinación de 0.90 (Figura 3).

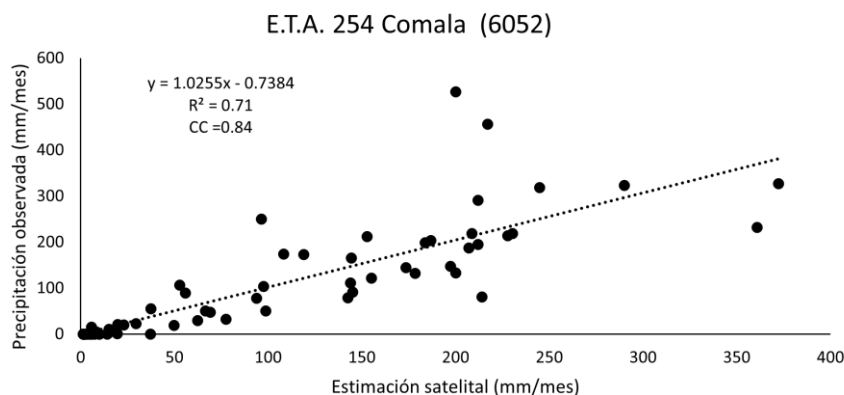


Figura 2. Diagrama de dispersión de la precipitación mensual en el periodo 2010 a 2015 de la estación terrestre (6052). Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

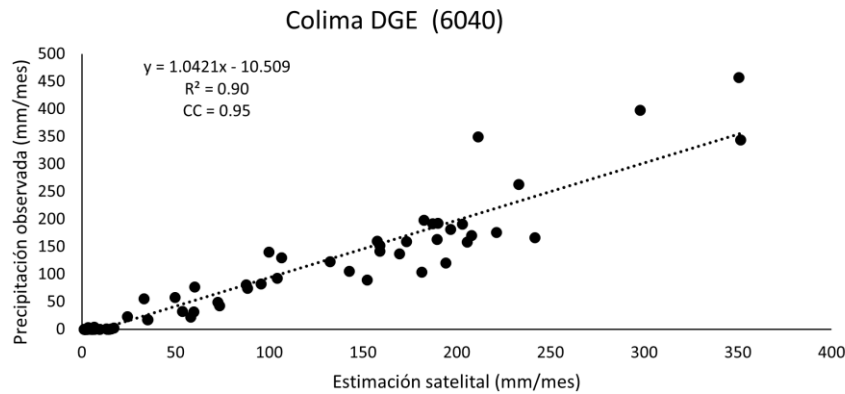


Figura 3. Diagrama de dispersión de la precipitación mensual en el periodo 2010 a 2015 de la estación terrestre (6040). Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

Se observa de manera general que los valores obtenidos por las medidas estadísticas mantienen buena correlación entre lo estimado por el algoritmo satelital y lo observado en las estaciones pluviométricas, asimismo, para el coeficiente de determinación (Tabla 2).

Tabla 2. Valores estadísticos de las estimaciones de lluvia entre ambas variables

Medidas Estadísticas	Estaciones pluviométricas por clave								
	6062	6009	6007	6052	6073	6002	6040	6008	6014
CC	0.91	0.88	0.89	0.84	0.94	0.94	0.95	0.90	0.93
R2	0.83	0.78	0.80	0.71	0.89	0.89	0.90	0.81	0.87
MAE (mm)	61.10	42.90	37.86	33.59	23.66	34.99	20.79	28.79	25.68
RMSE (mm)	103.32	78.32	65.04	62.73	38.67	58.09	33.84	47.38	40.36
ME (mm)	-46.04	-22.28	-12.67	-1.59	-1.08	-18.97	6.76	13.12	1.31
BIAS (%)	-33.55	-19.75	-12.20	-1.72	-1.19	-17.54	8.23	16.77	1.42
NSE	0.63	0.71	0.76	0.71	0.88	0.81	0.89	0.79	0.87

Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

Caso contrario con métricas como MAE y RMSE, las cuales muestran que existe alta variabilidad para los registros de precipitación obtenidos. Los valores resultantes de MAE varían desde 20.79 mm hasta 61.10 mm, mientras que, la RMSE que mantiene una sensibilidad a los errores más grandes, varía desde 33.84 mm hasta los 103.32 mm. Una vez más, la estación Colima DGE (6040) es la que mantiene valores más cercanos a lo ideal.

Con base a los indicadores del error medio ME y al sesgo porcentual BIAS, se puede observar que en seis de nueve estimaciones satelitales se tiende a subestimar las precipitaciones observadas por pluviómetros. El error medio presenta valores que van desde -46.04 mm en la estación Cofradía de Suchitlán (6062) hasta 13.12 mm en la estación Coquimatlán (6008). Asimismo, el sesgo porcentual varía desde -33.55% a 16.77%, respectivamente en las mismas estaciones pluviométricas. Estas mediciones se pueden apreciar de manera gráfica en las series de tiempo de cada estación; la estimación satelital queda por debajo de los datos observados (Figura 4).

Finalmente, la eficiencia de Nash-Sutcliffe para las estimaciones de precipitación obtuvo buenos resultados según los criterios de Ritter & Muñoz-Carpena (2013). Solo la estación Cofradía de Suchitlán (6062) obtuvo

valores menores a 0.65, es decir, valores insatisfactorios, el resto obtuvo valores que se clasifican en criterios que van desde lo aceptable hasta lo bueno, siendo la estación Colima DGE (6040) la que mejor valor aceptable obtuvo.

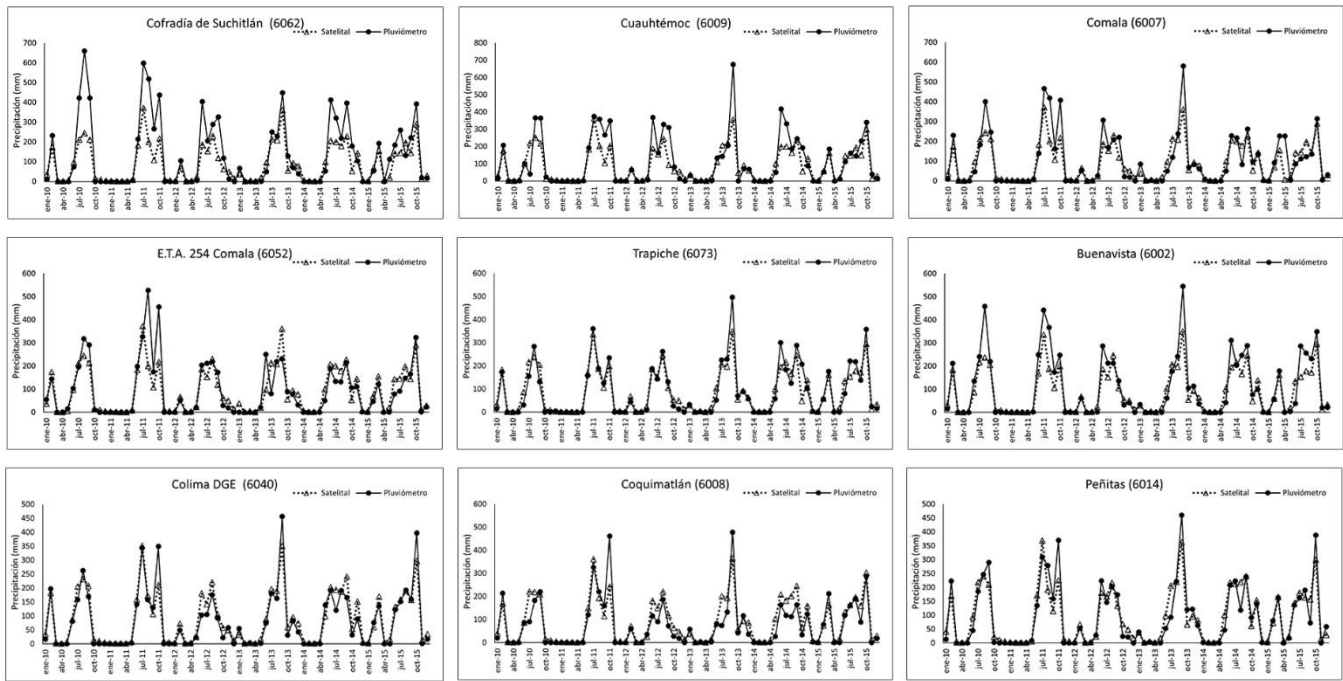


Figura 4. Series de tiempo de la precipitación mensual estimada por GPM y estaciones terrestres en el periodo 2010 a 2015.
Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

3.2 Interpolación de la información de precipitación.

La distribución espacial anual de la lluvia para las estaciones climatológicas se puede observar en la Figura 5, mientras que la estimada por el GPM en la Figura 6. En la región, es posible observar la distribución de la lluvia; el gradiente nos muestra valores desde 923.09 mm hasta 1755.09 mm. Sin embargo, los valores de estimación por satélite son menores a lo observado, los cuales van desde 1060.02 mm hasta 1133.17 mm, que indica una subestimación de la precipitación.

Por lo tanto, el producto satelital no pudo reproducir el patrón espacial de la variabilidad de la precipitación registrada por las estaciones, esto puede deberse a dos razones: primero, el algoritmo subestima la precipitación registrada por las estaciones terrestres, y esto genera que el gradiente de precipitación tenga valores más bajos; segundo, el área captada por el satélite cubre más de una estación, es decir, la estimación satelital generada a través de la superficie captada no causa una diferencia significativa a la distribución de las estaciones pluviométricas.

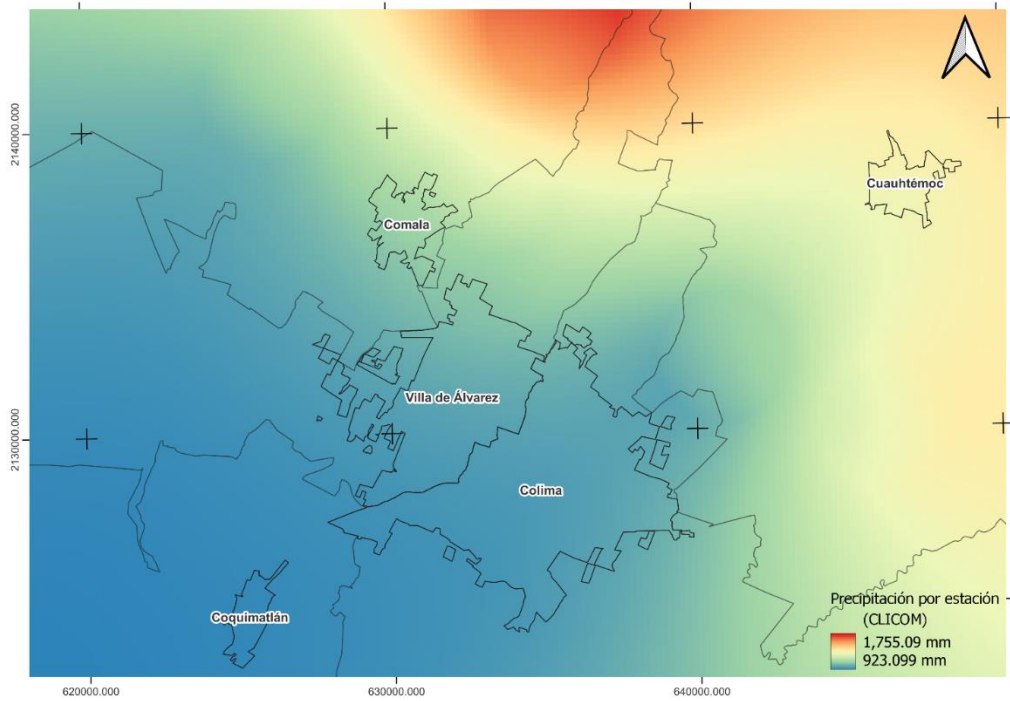


Figura 5. Distribución espacial de la precipitación con datos de estaciones para el periodo 2010 a 2015.
Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

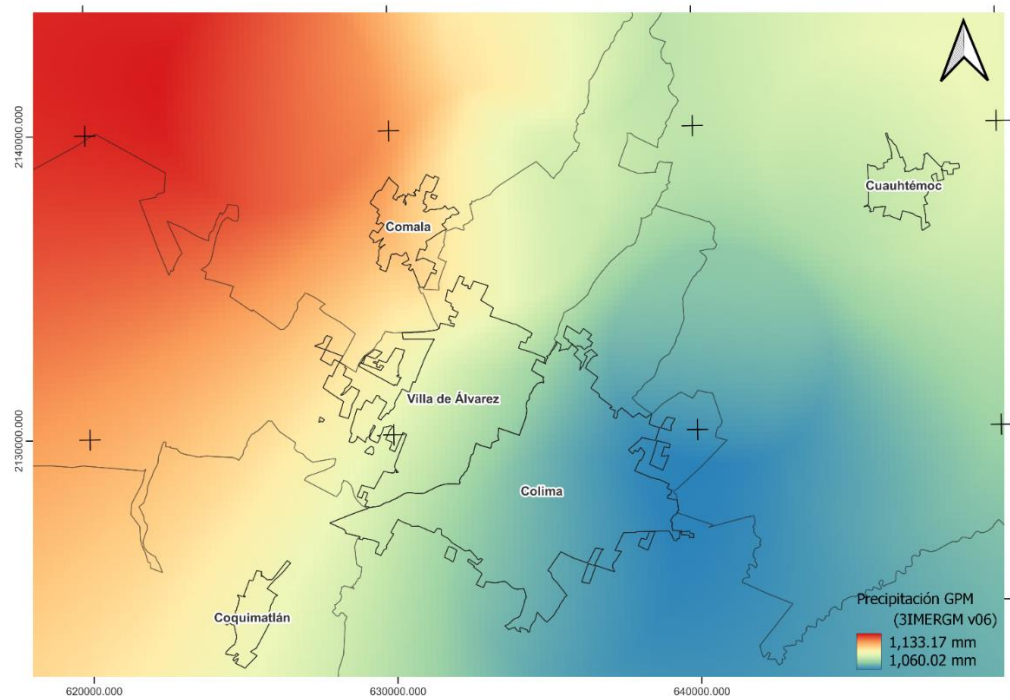


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación con datos de satélite para el periodo 2010 a 2015.
Fuente: Elaboración propia con base en los registros obtenidos por la estimación de IMERG y CLICOM.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los valores obtenidos a través de las mediciones estadísticas, como lo es el coeficiente de correlación, han sido bastante similares a los reportados por Duarte et al. (2022) en su estudio bajo la escala mensual en Brasil. Asimismo, el coeficiente de determinación fue similar a los resultados encontrados por Lujano Laura et al. (2015), los cuales se sitúan en satisfactorios y buenos, respetando el criterio de Andersen et al. (2001).

Métricas estadísticas como lo son el MAE, en su gran mayoría se obtienen valores muy similares a los expuestos por Duarte et al. (2022), y, en mediciones como lo es RMSE, donde cuantifica el error para valores extremos, no se encuentran diferencias significativas al trabajo de Rodríguez-González et al. (2018).

Sin embargo, en mediciones como lo son el ME y BIAS se tiene una clara diferencia a los resultados. En las investigaciones de Duarte et al. (2022) y Rodríguez-González et al. (2018); se destaca que los valores captados por GPM son mayores que los observados en las estaciones, es decir, se sobrestima la precipitación registrada de forma directa, caso contrario a esta investigación, donde se subestima la precipitación de las estaciones.

Adicionalmente, es importante destacar que, a pesar de que la mayoría de las estimaciones por el algoritmo de IMERG se tienden a estar por debajo de la precipitación observada, se puede visualizar que consigue un patrón similar a la variabilidad estacional, es decir, se aprecia en las series de tiempo de cada estación que el algoritmo consigue un patrón congruente a los registros observados durante la temporada de lluvias.

En relación con la eficiencia de Nash-Sutcliffe el estudio no encontró diferencias significativas con base en los resultados expuestos por Duarte et al. (2022), y en esta investigación, la mayoría de los resultados caen en los criterios aceptables y bueno.

Mediante lo investigado, se identificó que el algoritmo 3IMERGM en su sexta versión desarrollado por la misión GPM posee grandes bases de datos para la estimación de precipitaciones. De esta manera fue posible hacer una comparación de sus estimaciones respecto a los registros observados de estaciones climatológicas en una escala mensual a través del periodo 2010 a 2015 en la Zona Metropolitana Colima-Villa de Álvarez.

Los resultados obtenidos de los indicadores estadísticos demuestran que existe gran relación entre el producto satelital y la información de estaciones, estos se pueden apreciar en los coeficientes de correlación los cuales son altos. Además, se observa que la distribución temporal de la lluvia para el área de estudio mantiene patrones semejantes, es decir, representa de manera adecuada la ocurrencia de lluvia que registra las estaciones.

A pesar de que existen valores elevados en la correlación, no se puede dejar de lado la variabilidad que existe; las estimaciones obtenidas por el algoritmo deberán ser corregidas por ecuaciones para un ajuste antes de su utilización.

Los productos satelitales mantienen grandes virtudes para la aplicación de estudios hidrológicos; la libre disponibilidad de los registros, la captura de estimaciones de precipitación de manera indirecta para zonas donde carecen registros pluviométricos, la obtención de datos sin pérdida de información. Es necesario que se sigan mejorando estas tecnologías para generar información más precisa.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada económicamente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Al cuerpo académico que integran el área de posgrado del Tecnológico Nacional de México; campus Colima, y en especial al Dr. Santiago Arceo Díaz por su guía y dedicación.

REFERENCIAS

- [1] Alabar, D. F., Solís, J. M., Valdiviezo Corte, M. B., & Hurtado, R. H. (2021). Validación de las precipitaciones estimadas por TRMM y GPM en 6 estaciones de las provincias de Jujuy y Salta (Argentina). *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 14(2), 45-57. http://www.fca.unju.edu.ar/media/revista_articulo/Revista_Cientifica_FCA_Volumen
- [2] Andersen, J., Refsgaard, J. C., & Jensen, K. H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin — model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247(3-4), 200-214. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00384-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00384-5)
- [3] Brizuela, A. B., Nosetto, D. M., Aguirre, C. A., & Bressan, M. P. (2015). Comparación de datos de precipitación estimada por Trmm con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina. *UD y la Geomática*, (10), 18-26. <https://doi.org/10.14483/23448407.7919>
- [4] Carbajal Carrasco, M., Yarlequé, C., Posadas, A., Silvestre, E., Mejía, A., & Quiroz, R. (2010). Reconstrucción de datos faltantes de precipitación pluvial diaria mediante la Transformada Wavelet. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 2(1), 76-88. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2011_vol02/art7.pdf
- [5] Duarte, L. V., Martins Formiga, K. T., & Figueiredo Costa, V. A. (2022). Analysis of the IMERG-GPM Precipitation Product Analysis in Brazilian Midwestern Basins Considering Different Time and Spatial Scales. *Water*, 14(16), 2472. <https://doi.org/10.3390/w14162472>
- [6] Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, XXXIX(1), 21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837653003>
- [7] Gavilan, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019, Julio). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos de pluviómetros. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(1), 105 - 115. <https://doi.org/10.24215/16699513e011>
- [8] Guachamín, W., Páez-Bimos, S., & Horna, N. (2019, 01 31). Evaluación de productos IMERG Vo3 y TMPA V7 en la detección de crecidas caso de estudio cuenca del río Cañar. *Revista Politécnica*, 42(2), 1-17. <https://doi.org/10.33333/rp.vol42n2.942>
- [9] Haile, A. T., Habib, E., Elsaadani, M., & Rientjes, T. (2013, 04 21). Inter-comparison of satellite rainfall products for representing rainfall diurnal cycle over the Nile basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.012>
- [10] Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American meteorological Society*, 95(5), 701-722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- [11] Huffman, G. J., & Bolvin, D. T. (2018, April 26). *Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis Data Set Documentation*. NASA Global Precipitation Measurement Mission. Retrieved November 3, 2022, from https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/3B4XRT_doc_V7_180426.pdf
- [12] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., & Xie, P. (2019). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06*. NASA Global Precipitation Measurement (GPM). https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG_ATBD_Vo6.pdf
- [13] INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Colima 2017*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2_017/702825092061.pdf
- [14] Lujano Laura, E., Felipe Obando, O. G., Lujano Laura, A., & Quispe Aragón, J. P. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 17(2), 221-228. <https://doi.org/10.18271/RIA.2015.116>
- [15] McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 597-602. [10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))

- [16] Padilla Lozoya, R., & de la Parra Arellano, M. (2015). Sistematización de la recurrencia de amenazas naturales y desastres en el estado de Colima, México. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, XXI(2), 143-165. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31639208008>
- [17] Ponce de León, C. (2019). *Análisis del sistema hidrológico del río Colima en el marco del proyecto EWIN*. Universidad de Colima. https://www.researchgate.net/publication/350005793_ANALISIS_DEL_SISTEMA_HIDROLOGICO_DEL_RIO_COLIMA_EN_EL_MARCO_DEL_PROYECTO_EWIN
- [18] Ramos Fernández, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida*. Universitat Politècnica de Valencia. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/27548>
- [19] Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013, Febrero 14). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- [20] Rodríguez-González, B., Pineda-Martínez, L. F., & Guerra-Cobián, V. H. (2018, Octubre-Diciembre). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIX(4), 1-12. <http://dx.doi.org/10.22201/ffi.25940732e.2018.19n4.031>
- [21] Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar*, Y., & Ávila-Díaz, Á. (2012, Febrero 13). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Semillas*, 1(46/47), 47-53. https://www.researchgate.net/publication/281015880_Variabilidad_climatica_cambio_climatico_y_gestion_integrada_del_riesgo_de_inundaciones_en_Colombia

Correo de autor de correspondencia: sfigueroaa15@gmail.com, dora.correa@colima.tecnm.mx