

Evaluation of the SPI with high-resolution datasets in historical and future climate in central Mexico

Evaluación del índice de precipitación estandarizado (SPI) con datos de alta resolución en clima histórico y futuro en el centro de México

Juan Alberto Velázquez-Zapata

¹Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - El Colegio de San Luis A.C. Parque Macul núm. 155, Fracc. Colinas del Parque, San Luis Potosí, C. P. 78294, MÉXICO.

*Corresponding author: alberto.velazquez@colsan.edu.mx, tel. (444) 811 01 01 ext. 5301.

Abstract

Introduction: Drought monitoring needs good quality meteorological data, but records frequently face problems. Therefore, satellite precipitation datasets are an alternative.

Objective: Evaluation of three high-resolution datasets (compared with observed precipitation) to capture wet and dry periods. In addition, the influence of the selection of the dataset to downscale future climate simulations is evaluated in the estimation of drought indicators.

Methodology: Precipitation products (NOAA, CHIRPS and PERSIANN-CDR) were compared with observations from seven meteorological stations (1983-2013). The 12-month standard precipitation index (SPI) was selected to evaluate drought conditions. Also, precipitation estimates from CanESM2 were downscaled and bias-corrected with each dataset.

Results: The annual precipitation cycle is well capture, but underestimation is noted. The datasets have a good correlation, but less variability. Regarding the SPI, results show good correlation, but extremely dry events are generally underestimated with CHIRPS and PERSIANN-CDR. The NOAA dataset performs better in terms of categorical scores, especially for wet events. Similar median values were found in the drought indicators in future; however, the datasets lead to less variability than observations, especially in the drought frequency indicator.

Study limitations: Limited number of good quality meteorological records.

Originality: Selected precipitation datasets are tested under different climatic conditions for the first time in Mexico. Also, the influence of the reference precipitation dataset for bias correction is evaluated on future drought projections.

Conclusions: Precipitation products should be tested before their use in monitoring droughts in the historical period, as well as in estimating droughts with future projections.

Keywords: drought, standard precipitation index, CHIRPS, PERSIANN-CDR, climate change.

Resumen

Introducción: El monitoreo de la sequía necesita datos meteorológicos de buena calidad, pero los registros suelen presentar problemas. Por ello, las bases de datos de precipitación estimadas con percepción satelital son una alternativa.

Objetivo: Evaluar tres bases de datos de precipitación de alta resolución para identificar los periodos húmedos y secos, y determinar la influencia de la selección de datos en la reducción de la escala de simulaciones climáticas en el futuro para la estimación de indicadores de sequía.

Metodología: Los productos de precipitación (NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR) se compararon con las observaciones de siete estaciones meteorológicas (1983-2013). Se seleccionó el índice de precipitación estandarizado (SPI) de 12 meses para evaluar las condiciones de sequía. Las estimaciones de precipitación de CanESM2 se redujeron de escala y el sesgo se corrigió con cada base de datos.

Resultados: El ciclo anual de precipitaciones se simuló de manera adecuada, aunque con subestimación. Las bases de datos tuvieron buena correlación y poca variabilidad. En cuanto al SPI, los resultados mostraron buena correlación, pero los fenómenos extremadamente secos se subestimaron con CHIRPS y PERSIANN-CDR. NOAA presentó mejores resultados, especialmente para los periodos húmedos. Se encontraron valores medianos similares en los indicadores de sequía a futuro; sin embargo, las bases de datos mostraron menor variabilidad que las observaciones, especialmente en el indicador de frecuencia de sequía.

Limitaciones del estudio: Limitados registros meteorológicos de buena calidad.

Originalidad: Se evaluaron las bases de datos de precipitación seleccionadas en distintas condiciones climáticas, y se determinó su influencia al ser usadas como precipitación de referencia para la corrección de sesgos en las proyecciones futuras de sequía.

Conclusiones: Los productos de precipitación se deben probar antes de su uso en el monitoreo de sequías en el periodo histórico, así como en la estimación de sequías con proyecciones futuras.

Palabras clave: sequía, índice de precipitación estandarizado, CHIRPS, PERSIANN-CDR, cambio climático.

Introduction

Drought is a prolonged dry period, compared with the historical precipitation, that can have an impact on the hydrological balance, and cause social and environmental problems. Mexico has been affected by severe droughts in recent years. Dobler-Morales and Bocco (2021) point out that the 2011-2012 drought is considered an extreme event for its severity and extension, as it covered 70 % of the country. In addition, authors claim that Mexico's population is highly vulnerable to drought effects, especially the crop farmers highly dependent on rainfall, but also marginalized urban population with low access to water infrastructure. After such extreme event, the Mexican government implemented the "National Program Against Drought" which includes a preventive approach that seeks to monitor and forecast drought conditions (Arreguín-Cortés et al., 2016). The National Water Service observes conditions of shortage or excess of precipitation with the Mexican Drought Monitor (MDM), which is constructed by several indices in layers blended through a Geographic Information System (Lobato-Sánchez, 2016). The MDM is an online tool that displays current and historical drought conditions in the country at biweekly intervals (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2023).

For drought monitoring, good quality precipitation data is required (Lobato-Sánchez, 2016); however, as in many countries of the world, Mexican historical meteorological records present several problems. For instance, the study of Livneh et al. (2015) noted a sharp decline of the Mexican station density since 2000, particularly after 2006. In addition, the authors identified northern Mexico as an area of low station density. To fill the gap of reliable meteorological observations, the ability of precipitation products (i.e. interpolated observations and satellite estimations) to perform drought monitoring (in different countries and climatic type zones) have been evaluated.

Hinge et al. (2021) conducted a meta-analysis of these studies, and authors identified two main datasets in literature: CHIRPS (Climate Hazards Group infrared precipitation with station data) and PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks - Climate Data Record). Such datasets are preferred due to their long-term data record. The studies used the standard precipitation index (SPI) to estimate meteorological drought, and authors identified the dependence of performance on factors such as the climatic type and the length of the data record. They also suggest that future work should focus on identifying the best climatological condition under which each dataset performs best.

Introducción

La sequía es un periodo seco prolongado, comparado con la precipitación histórica, que puede tener un impacto en el balance hidrológico, y causar problemas sociales y ambientales. México se ha visto afectado por sequías severas en los últimos años. Dobler-Morales y Bocco (2021) señalan que la sequía de 2011-2012 es considerada un evento extremo por su severidad y extensión, ya que abarcó 70 % del territorio nacional. Además, estos autores afirman que la población de México es altamente vulnerable a los efectos de la sequía, especialmente los agricultores dependientes de las lluvias y la población urbana marginada con bajo acceso a infraestructura hidráulica. Después de este evento, el gobierno mexicano implementó el "Programa Nacional Contra la Sequía", el cual incluye un enfoque preventivo que busca monitorear y pronosticar las condiciones de sequía (Arreguín-Cortés et al., 2016). La Comisión Nacional del Agua detecta las condiciones de escasez o exceso de precipitación con el Monitor de Sequía en México (MSM), conformado por varios índices en capas de un Sistema de Información Geográfica (Lobato-Sánchez, 2016). El MSM es una herramienta en línea que muestra las condiciones actuales e históricas de sequía en el país con una periodicidad quincenal (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2023).

Para el monitoreo de sequías, se requieren datos de precipitación de buena calidad (Lobato-Sánchez, 2016); sin embargo, como en muchos países del mundo, los registros meteorológicos históricos mexicanos presentan varios problemas. Por ejemplo, en el estudio de Livneh et al. (2015) se observó una fuerte disminución de estaciones meteorológicas desde 2000, en particular después de 2006, y determinaron que el norte de México es una zona con baja densidad de estaciones. Para llenar el vacío de observaciones meteorológicas fiables, se han evaluado productos de precipitación (es decir, observaciones interpoladas y estimaciones por satélite) con la finalidad de realizar el monitoreo de la sequía en diferentes países y climas.

Hinge et al. (2021) realizaron un metaanálisis de dichos estudios e identificaron dos bases de datos principales en la bibliografía: CHIRPS (*Climate Hazards Group infrared precipitation with station data*) y PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks – Climate Data Record*), los cuales se distinguen debido a su registro de datos a largo plazo. Los estudios utilizaron el índice de precipitación estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) para estimar la sequía meteorológica. Asimismo, los autores identificaron la dependencia del rendimiento a factores como el tipo de clima y la longitud del registro de la base de datos. También sugieren que los trabajos futuros se centren en identificar las mejores

Rivera et al. (2019) evaluated the ability of the CHIRPS dataset to identify drought periods compared with rain gauge data in Argentina. The SPI was computed for several timescales (1, 3, and 6 months) for the period 1987-2016. The evaluation was based in the correlation coefficient and the mean absolute error. Results show that, in arid and semiarid regions, the precipitation dataset adequately reproduces the frequency of wet and dry periods on time scales larger than one month.

The ability of the CHIRPS dataset to detect droughts was also evaluated in the Mekong River for the 1981-2016 period (Guo et al., 2017). The evaluation was conducted in terms of correlation, several error metrics, and drought indicators of occurrence, intensity and area. Results show a better performance of the dataset to reproduce the 3-month SPI than the 12-month SPI; in addition, the drought events were well detected in terms of temporal evolution, occurrence and distribution.

Zambrano et al. (2017) compared two precipitation datasets, CHIRPS and PERSIANN-CDR, with *in situ* observations in the evaluation of the SPI at several time scales (1, 3 and 6 months) for different climatic regions in Chile. The authors found, based in RMSE and correlation, that better results on SPI were observed in regions with a superior fit in the precipitation, and argue that the precipitation products should be calibrated to adjust for the overestimation and underestimation.

Most of the studies that evaluate CHIRPS and PERSIANN-CDR for drought monitoring were conducted in Asian countries, and few research in this topic has been carried out in Mexico (Hinge et al., 2021). de Jesús et al. (2016) evaluated the Tropical Multi-Precipitation Analysis (TMPA 3B42) product for its ability to reproduce the SPI computed with a 15-year record of observations from three meteorological stations located in different climatic regions. The results show a low correlation in the SPI time series, and the authors identified the short length of the record and the poor agreement in the rainfall estimates as the main cause of poor performance. However, authors claim that the use of the selected dataset can be used to detect severe drought periods.

Several studies have reported an increase in the severity and frequency of drought events worldwide (Spinoni et al., 2014). Stahle et al. (2009), argue that climate experiments indicate that Mexico will experience dryer conditions in the 21st century due to global warming, with the potential convergence of natural and anthropogenic droughts. In this regard, the study of Spinoni et al. (2020) evaluated the changes in drought indicators based on climate simulations from the Coordinated Regional Climate Downscaling

condiciones climatológicas en las que cada base de datos genera los mejores resultados.

Rivera et al. (2019) evaluaron la capacidad de CHIRPS para identificar períodos de sequía en comparación con datos pluviométricos en Argentina. El SPI fue calculado para varias escalas de tiempo (1, 3 y 6 meses) en el período 1987-2016. La evaluación se basó en el coeficiente de correlación (R) y el error medio absoluto. Los resultados mostraron que, en las regiones áridas y semiáridas, la base de datos de precipitación reproduce adecuadamente la frecuencia de los períodos húmedos y secos en escalas de tiempo superiores a un mes.

Guo et al. (2017) estimaron la capacidad de CHIRPS para detectar sequías en el río Mekong durante el período 1981-2016. La evaluación se realizó en función de la correlación, varias métricas de error e indicadores de sequías de ocurrencia, intensidad y área afectada. Los resultados mostraron un mejor rendimiento de la base de datos cuando se evalúa el SPI de 3 meses que el de 12 meses; además, los episodios de sequía se detectaron correctamente en términos de evolución temporal, ocurrencia y distribución.

Zambrano et al. (2017) compararon dos bases de datos de precipitación, CHIRPS y PERSIANN-CDR, con observaciones *in situ* para la evaluación del SPI en varias escalas de tiempo (1, 3 y 6 meses) en diferentes regiones climáticas de Chile. Basados en el error cuadrático medio y en la correlación, los autores observaron mejores resultados del SPI en regiones con un mayor ajuste en la precipitación, y argumentan que los productos de precipitación se deben calibrar para ajustar la sobreestimación y subestimación.

La mayoría de los estudios que evalúan CHIRPS y PERSIANN-CDR en el monitoreo de sequías se han realizado en países asiáticos, y pocas investigaciones se han llevado a cabo en México (Hinge et al., 2021). de Jesús et al. (2016) evaluaron el producto *Tropical Multi-Precipitation Analysis* (TMPA 3B42) por su capacidad para reproducir el SPI calculado con un registro de 15 años de observaciones de tres estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones climáticas. Los resultados mostraron una correlación mínima en las series temporales del SPI, y los autores identificaron la breve duración del registro y la escasa concordancia en las estimaciones de precipitación como la principal causa del mal desempeño; sin embargo, afirman que los datos seleccionados pueden servir para detectar períodos de sequía graves.

Diversos estudios han reportado un incremento en la severidad y frecuencia de eventos de sequía a nivel mundial (Spinoni et al., 2014). Stahle et al. (2009) argumentan que las simulaciones climáticas indican que México experimentará condiciones más secas en el

Experiment (CORDEX) for the period 2071-2100 versus the period 1981-2010. The results identified red spots of future meteorological droughts, that is, areas that show a robust increase in drought frequency and severity, including coastal North America, most of Mexico and northern Central America.

The use of climate simulations from Global Climate Models (GCM) should be downscaled and bias corrected for their use in shorter scales (Velázquez-Zapata, 2019). Hinge et al. (2021) claim that in the estimation of historical SPI, bias correction methods (such as quantile mapping) should be applied to precipitation products before calculating SPI to improve its performance. Considering the above, the objectives of the present study were to evaluate three high-resolution precipitation datasets to capture the annual cycle and trend, and to reproduce SPI values and drought indicators from seven meteorological stations located in central Mexico. Also, to determine the influence of the precipitation products used as a reference point for the statistical correction of climate simulations in the evaluation of precipitation change between the reference period and the future, and the estimation of drought indicators for the period 2040-2100.

The study area is the Low Panuco River, which was selected because this region presents various climatic types. The Panuco River Basin is one of the most important basins in Mexico for its extension (96986 km²) and runoff (20329 hm³.year⁻¹) (Pedrozo-Acuña et al., 2015). The basin is divided in two main regions: the Moctezuma River Basin and the Tampaon River Basin (del Ángel-González & Domínguez-Mora, 2015). The first originates from the Tula River (State of Hidalgo) and flows from Mexico City to the northeast. The second has its headwater in the Santa María River, and it flows from west to east in the states of Guanajuato and San Luis Potosí. The confluence of the Moctezuma and the Tampaon River takes the name of Panuco River. A few kilometers before the river discharges into the Gulf of Mexico, the Panuco River receives the contribution of the Tamesi River (state of Tamaulipas) from northwest.

Materials and methods

Study area and precipitation datasets

Figure 1 shows the Low Panuco River Basin. The Panuco River basin area has a variety of climatic regions, as a result of the topographic variation in the Sierra Madre Oriental mountain chain (Velázquez-Zapata & Troin, 2020). The western region has an arid climate, the central region has temperate climate, and the eastern region has a tropical climate (Peel et al., 2007). Table 1 shows the meteorological stations, the type of climate and the average annual precipitation in the

siglo XXI debido al calentamiento global, con la potencial convergencia de sequías naturales y antropogénicas. En este sentido, Spinoni et al. (2020) evaluaron los cambios en los indicadores de sequías con base en simulaciones climáticas del *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) para el periodo 2071-2100 vs 1981-2010. Los resultados exhibieron focos rojos de futuras sequías meteorológicas; es decir, zonas que muestran un fuerte aumento de frecuencia e intensidad de sequías, incluyendo la costa de Norteamérica, la mayor parte de México y el norte de Centroamérica.

El uso de simulaciones climáticas procedentes de modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés) deben ser redimensionados y el sesgo debe ser corregido para su uso en escalas espaciales más pequeñas (Velázquez-Zapata, 2019). Hinge et al. (2021) afirman que en la estimación del SPI histórico se deben aplicar métodos de corrección del sesgo (como el mapeo de cuantiles) a los productos de precipitación antes de calcular el SPI para mejorar su rendimiento. Considerando lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron evaluar tres bases de datos de precipitación de alta resolución para capturar el ciclo anual y la tendencia, y reproducir los valores del SPI y los indicadores de sequía de siete estaciones meteorológicas ubicadas en el centro de México. Asimismo, determinar la influencia de los productos de precipitación utilizados como punto de referencia para la corrección estadística de simulaciones climáticas en la evaluación del cambio de precipitación entre el periodo de referencia y el futuro, y en la estimación de los indicadores de sequía para el periodo 2040-2100.

El área de estudio fue el río Pánuco bajo, el cual se seleccionó debido a que en esta cuenca se presentan diversos tipos de climas. La cuenca del río Pánuco es una de las más importantes de México por su extensión (96986 km²) y escurrimiento (20329 hm³.year⁻¹) (Pedrozo-Acuña et al., 2015). La cuenca se divide en dos regiones principales: la cuenca del río Moctezuma y la cuenca del río Tampaón (del Ángel-González & Domínguez-Mora, 2015). La primera se origina en el río Tula (estado de Hidalgo) y fluye desde la Ciudad de México hacia el noreste. La segunda tiene su cabecera en el río Santa María, y fluye de oeste a este en los estados de Guanajuato y San Luis Potosí. La confluencia del río Moctezuma con el Tampaón toma el nombre de río Pánuco. Unos kilómetros antes de desembocar en el Golfo de México, el río Pánuco recibe la aportación del río Tamesí (estado de Tamaulipas) desde el noroeste.

Materiales y métodos

Área de estudio y datos de precipitación

La Figura 1 muestra la cuenca baja del río Pánuco. El área de esta cuenca presenta varias regiones climáticas,

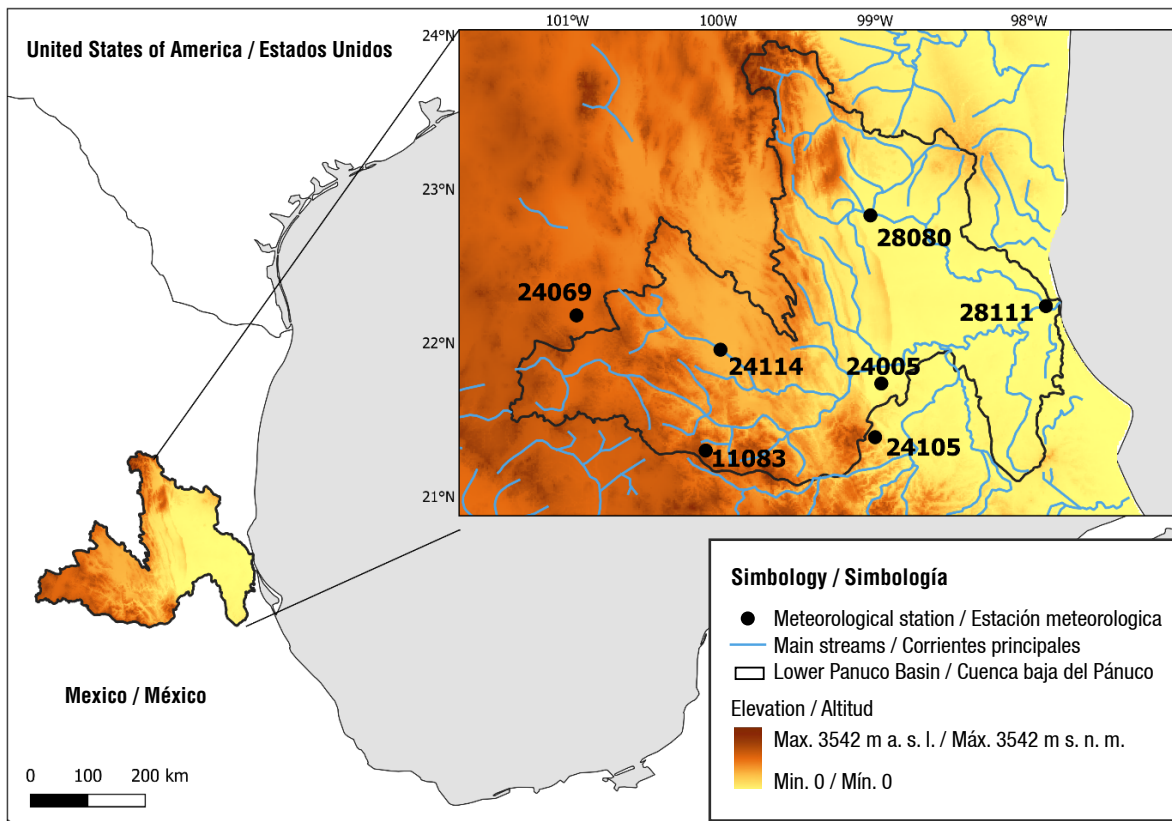


Figure 1. Study Area and location of the meteorological stations.
Figura 1. Área de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas.

Table 1. Meteorological stations and mean annual precipitation for the period 1983-2013 in the Panuco River basin.
Cuadro 1. Estaciones meteorológicas y precipitación media anual para el periodo 1983-2013 en la cuenca del río Pánuco.

ID/ Número de estación	Name/ Nombre	Climate type/ Tipo de clima	Elevation (m)/ Altitud (m)	Mean annual precipitation (mm)/ Precipitación media anual (mm)
24069	San Luis Potosí	BsK	1870	387
11083	Xichu	CwA	1318	558
24114	Rioverde	CwA	991	500
24105	Xilitla	Af	676	2 673
24005	Ballesmi	Af	45	1 513
28080	Rio Frio	Aw	60	1 058
28111	Tampico	Aw	3	1 157

period 1983-2013, which ranges from 387 mm in the arid region to 2 673 mm in the tropical region.

Meteorological data were obtained from four datasets: meteorological stations and three high resolution datasets. The observed monthly precipitation was taken from seven stations of the SMN, hereinafter called SMN data. Table 2 shows the selected high-resolution datasets: NOAA data were retrieved from the database

como resultado de la variación topográfica de la Sierra Madre Oriental (Velázquez-Zapata & Troin, 2020). La región occidental tiene clima árido, la central presenta clima templado y la oriental cuenta con clima tropical (Peel et al., 2007). El Cuadro 1 muestra las estaciones meteorológicas, el tipo de clima y la precipitación media anual en el periodo 1983-2013, la cual oscila entre 387 mm en la región árida y 2 673 mm en la región tropical.

Table 2. Selected high-resolution precipitation datasets.
Cuadro 2. Selección de datos de precipitaciones de alta resolución.

ID/ Identificador	Name/ Nombre del producto	Resolution/ Resolución	URL
SMN	Meteorological stations/ Estaciones meteorológicas		https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica
NOAA	A spatially comprehensive, meteorological data set for Mexico, the U.S., and southern Canada	0.0625°	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/livneh-gridded-precipitation-and-other-meteorological-variables-continental-us-mexico
CHIRPS	The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations	0.05°	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
PERSIANN-CDR	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks	0.25°	https://chrsdata.eng.uci.edu/
Climate simulations/ Simulaciones climáticas	Canadian Earth System Model (CanESM2)	2.8125°	https://climate-modelling.canada.ca/climatemodeldata/cgcm4/CanESM2/index.shtml

proposed by Livneh et al. (2015) which consists of observed daily precipitation gridded to a $1/16^\circ$. For Mexico, precipitation data were provided by the SMN, and the methodology for developing the data includes orthographic precipitation adjustment. Funk et al. (2015) proposed the CHIRPS data. The methodology to create the precipitation estimates combines satellite precipitation measurements and ground station data to produce precipitation time series and perform trend analysis and seasonal drought monitoring with 0.05° resolution on a monthly time interval.

PERSIANN-CDR data were retrieved on a monthly time interval (Nguyen et al., 2018). This dataset was built with an artificial neural network methodology based on satellite estimates and adjusted for precipitation climatology. All datasets were obtained for the period 1983-2013, and were analyzed on a monthly interval NOAA data were aggregated monthly, therefore; all datasets in this study were analyzed on a monthly interval. To compare the precipitation gridded data with observations, the closest gridded point to each weather station (with Euclidean distance) was selected and considered as a proxy station (Ghorbanian et al., 2022).

In addition, climate simulations were retrieved from the second generation Canadian Earth System Model (Arora et al., 2011) under the Representative Concentration Pathway rcp8.5, which considers a scenario of high greenhouse emission in the next decades. The five members ensemble precipitation simulations were obtained for the historical period 1983-2013 and the future period 2040-2100.

Los datos meteorológicos se obtuvieron a partir de cuatro tipos de datos: estaciones meteorológicas y tres bases de datos de alta resolución. La precipitación mensual observada se tomó de siete estaciones del SMN, en lo sucesivo denominados datos SMN. En el Cuadro 2 se muestran los datos de alta resolución seleccionados. Los datos de NOAA se extrajeron de la base de datos propuesta por Livneh et al. (2015), la cual consiste en la precipitación diaria observada en una malla a un $1/16^\circ$. Para realizar la interpolación en el territorio de México, los datos de precipitación los proporcionó el SMN, y la metodología incluye un ajuste de la precipitación ortográfica. Funk et al. (2015) presentaron los datos de CHIRPS. La metodología para crear estas estimaciones de precipitación combinan mediciones de precipitación por satélite y datos de estaciones terrestres para producir series temporales, y realizar análisis de tendencias y monitoreo estacional de sequías con resolución de 0.05° en un intervalo de tiempo mensual.

Los datos de PERSIANN-CDR se recuperaron en un intervalo de tiempo mensual (Nguyen et al., 2018). Esta base de datos se construyó con una metodología de redes neuronales artificiales con datos de precipitación de estimaciones satelitales y ajustada con la climatología. Todas las bases de datos se obtuvieron para el período 1983-2013 y se analizaron en un intervalo mensual. Para comparar los datos reticulares de precipitación estimada en las bases de datos con las observaciones, se seleccionó el punto reticular más cercano a cada estación meteorológica (con la distancia euclidiana) y se consideró como estación *proxy* (Ghorbanian et al., 2022).

Precipitation simulations were downscaled and bias-corrected with the method proposed by Mpelasoka and Chiew (2009). This method establishes, in a first step, a relationship (correction factors) between the simulated and the observed precipitation in the historical period (*ref*) at different percentiles (Equation 1). In a second step, correction factors were applied to precipitation outputs in future periods (*fut*, Equation 2):

$$P_{corr}^{ref} = P_{sim}^{ref} \left(\frac{P_{obs(m,q)}^{ref}}{P_{sim(m,q)}^{ref}} \right) \quad (1)$$

$$P_{corr}^{fut} = P_{sim}^{fut} \left(\frac{P_{obs(m,q)}^{ref}}{P_{sim(m,q)}^{ref}} \right) \quad (2)$$

where P_{corr} is the bias-corrected precipitation. The indexes correspond to percentile (q), month (m), raw climate simulations (sim) and observations (obs) or another meteorological dataset used in this study. The bias correction method is applied on a monthly basis, and it was carried out for each meteorological (and proxy) station, so for each one of them, five climate simulations were obtained, that allowed to evaluate the natural variability of the climate (Muerth et al., 2013).

Standard precipitation index and evaluation methods

The SPI analyses the wet and dry cycles as an indicator of drought periods and is based on the evaluation of the probability of precipitation at different timescales (McKee et al, 1993). The SPI computation requires precipitation time-series, which are fitted to a probability distribution, so the mean SPI is zero (Edwards & MacKee, 1997). Therefore, positive (negative) SPI values indicate greater (less) values than the median precipitation (World Meteorological Organization [WMO], 2012). The classification of wet and dry periods, based on the SPI, is shown in Table 3.

In this work, the SPI was computed with the 12-month accumulation period. The use of SPI-12 reflects long-term precipitation anomalies that affect groundwater, streamflow and reservoir storage (WMO, 2012). The drought periods were evaluated with SPI values obtained with the precipitation datasets described in Table 2 based in the methodology described by Spinoni et al. (2020). These authors who define the start of a drought event when the SPI value falls below -1, for at least two consecutive months, and it ends when the SPI value turns positive. The authors also define the following indicators:

1. Drought frequency, defined as the number of drought events on a given period.
2. Drought severity, estimated as the sum of all months between the start and the end of the event.

Las simulaciones climáticas del *Canadian Earth System Model* de segunda generación (Arora et al., 2011) se recuperaron considerando la Trayectoria de Concentración Representativa rcp8.5, la cual contempla un escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero en las próximas décadas. Las simulaciones de precipitación consisten en un conjunto de cinco miembros para el periodo histórico 1983-2013 y el futuro 2040-2100, las cuales se redujeron de escala y se les corrigió el sesgo con el método propuesto por Mpelasoka y Chiew (2009). Este método establece, en un primer paso, una relación (factores de corrección) entre la precipitación simulada y la observada en el periodo histórico (*ref*) en diferentes percentiles (Ecuación 1). En un segundo paso, los factores de corrección se aplican a los resultados de precipitación en periodos futuros (*fut*, Ecuación 2):

$$P_{corr}^{ref} = P_{sim}^{ref} \left(\frac{P_{obs(m,q)}^{ref}}{P_{sim(m,q)}^{ref}} \right) \quad (1)$$

$$P_{corr}^{fut} = P_{sim}^{fut} \left(\frac{P_{obs(m,q)}^{ref}}{P_{sim(m,q)}^{ref}} \right) \quad (2)$$

donde P_{corr} es la precipitación con corrección de sesgo. Los índices corresponden a percentil (q), mes (m), simulaciones climáticas brutas (sim) y observaciones (obs), u otros datos meteorológicos utilizados en este estudio. El método de corrección de sesgo se aplica mensualmente y se llevó a cabo para cada estación meteorológica (y *proxy*), de modo que para cada una se obtuvieron cinco simulaciones climáticas, las cuales permitieron evaluar la variabilidad natural del clima (Muerth et al., 2013).

Índice de precipitación estandarizado y métodos de evaluación

El SPI analiza los ciclos húmedos y secos como indicador de los periodos de sequía, y se basa en la evaluación de la probabilidad de precipitación en diferentes escalas temporales (McKee et al, 1993). El cálculo del SPI requiere series temporales de precipitación, que se ajustan a una distribución de probabilidad, por lo que el SPI medio es cero (Edwards & MacKee, 1997). Por lo tanto, los valores positivos (negativos) del SPI indican valores mayores (menores) que la precipitación media (World Meteorological Organization [WMO], 2012). En el Cuadro 3 se puede apreciar la clasificación de los periodos húmedos y secos en función del SPI.

En este estudio, el SPI se calculó con el período de acumulación de 12 meses. El uso de SPI-12 refleja las anomalías de precipitación a largo plazo que afectan a las aguas subterráneas, el caudal de los ríos y el almacenamiento en los embalses (WMO, 2012). Los periodos de sequía se evaluaron con los valores del SPI obtenidos con los datos de precipitación descritos en

Table 3. Standard precipitation index values.
Cuadro 3. Valores del índice de precipitación estandarizado.

Values / Valores	Classification / Clasificación
2.0 and more + / 2.0 o más	Extremely wet / Extremadamente húmedo
1.5 to 1.99	Very wet / Muy húmedo
1.0 to 1.49	Moderately wet / Moderadamente húmedo
-0.99 to 0.99	Near normal / Casi normal
-1.0 to -1.49	Moderately dry / Moderadamente seco
-1.5 to -1.99	Severely dry / Muy seco
-2 and less - / 2 o menos	Extremely dry / Extremadamente seco

Source: World Meteorological Organization (WMO, 2012).

Fuente: World Meteorological Organization (WMO, 2012).

Evaluation metrics

The gridded precipitation was compared with the observed precipitation in terms of their correlation, the root-mean-square difference, and their standard deviations through the Taylor Diagram that summarizes the degree of correspondence between the two fields (Taylor, 2001).

The correlation coefficient R , between the variables x and y which are defined in N discrete points is calculated as:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

where \bar{x} , \bar{y} and σ_x , σ_y are the means and the standard deviations of the variables respectively. The correlation coefficient reaches a maximum value of 1. RMSE is determined with the following equation:

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(x_n - \bar{x}) - (y_n - \bar{y})]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

RMSE approaches to zero when the fields are more alike. The Taylor diagram uses the relationship between the statistical quantities R , $RMSE$ and σ_x , σ_y to represent the association between the variables with a single point.

The precipitation datasets were also compared in terms of variability using the coefficient of variance (CV) which is defined as the ratio of the standard deviation to the mean. The trend in the datasets was evaluated and compared with the Sens's slope, which estimates the slope of the trend using the following equation:

$$\beta = \text{median} \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad (5)$$

where x_j , x_k are the values of the variable in the given years j and k ($j > k$). A positive (negative) value of β indicates an increasing (decreasing) trend in the time series (Kubiak-Wójcicka et al., 2021)

el Cuadro 2, basándose en la metodología descrita por Spinoni et al. (2020). Estos autores definen el inicio de un evento de sequía cuando el valor del SPI cae por debajo de -1 durante al menos dos meses consecutivos, y finaliza cuando el valor del SPI se vuelve positivo. Los autores también describen los siguientes indicadores:

1. Frecuencia de sequía: número de episodios de sequía en un periodo determinado.
2. Intensidad de sequía: suma de todos los meses entre el inicio y el final del episodio.

Métricas de evaluación

La precipitación en malla se comparó con la precipitación observada en términos de su correlación, la raíz del error cuadrático medio centrado (RMSE, por sus siglas en inglés) y desviaciones estándar mediante el diagrama de Taylor, el cual resume el grado de correspondencia entre dos campos (Taylor, 2001).

El coeficiente de correlación R , entre las variables x e y que se definen en N puntos discretos, se calcula como:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

donde \bar{x} , \bar{y} y σ_x , σ_y son las medias y las desviaciones estándar de las variables, respectivamente. El R alcanza un valor máximo de 1. Por su parte, el RMSE se determina con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(x_n - \bar{x}) - (y_n - \bar{y})]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

El RMSE se aproxima a cero cuando los campos son más parecidos. El diagrama de Taylor utiliza la relación entre las cantidades estadísticas R , $RMSE$ y σ_x , σ_y para representar la asociación entre las variables con un punto único.

Los datos de precipitaciones también se compararon en términos de variabilidad mediante el coeficiente de

Finally, the gridded datasets were compared to the observations in terms of their ability to detect the occurrence of the wet and dry periods. The scores are based in the comparison of forecasted events and observed events (Table 4).

The categorical scores are the probability of detection (*POD*), the false alarm ratio (*FAR*) and the critical success index (*CSI*) computed with the following equations:

$$POD = \frac{a}{(a+c)} \tag{6}$$

$$FAR = \frac{b}{(a+b)} \tag{7}$$

$$CSI = \frac{a}{(a+b+c)} \tag{8}$$

The *POD* shows the ability of the precipitation dataset to capture the SPI value computed with observations (perfect score 1), *FAR* indicates the incorrect detection of the SPI value (perfect score = 0) and *CSI* is the overall fraction of SPI correctly detected (perfect score = 1, no skill = 0) (Ghorbanian et al., 2022; Ghelli, 2009). A SPI value obtained with a given dataset (forecasted) is considered detected if it falls in the same range of the SPI obtained with observed precipitation (according with table 3).

Results and discussion

The observed precipitation records are homogeneous, based on the Helmert test (Campos-Aranda, 1988). The selected gridded precipitation datasets were compared with observations on their ability to capture the annual cycle for the period 1983-2013. Figure 2a shows the variability in the observed precipitation among the meteorological stations as they have different climate types. In general, the annual cycle has two peaks in July and September, with a decrease in August that corresponds to the midsummer drought (MSD). As mentioned by Magaña et al. (1999), the MSD does not correspond to a real period of drought but rather to a decrease in the amount of rain. The gridded precipitation datasets (Figure 2b to 2d) also capture the MSD and have a good overall representation of the annual cycle.

Precipitation varies between models and stations. Proxy stations located in dry and temperate climates (stations

varianza (*CV*), que se define como la relación entre la desviación típica y media. La tendencia de los datos se evaluó y comparó con la pendiente de Sen (*Sen's slope*), la cual estima la pendiente de la tendencia mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \text{mediana} \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \tag{5}$$

donde x_j, x_k son los valores de la variable en los años señalados j y k ($j > k$). Un valor positivo (negativo) de β indica una tendencia creciente (decreciente) en la serie temporal (Kubiak-Wójcicka et al., 2021).

Por último, los datos reticulares se compararon con las observaciones en términos de capacidad para detectar la aparición de períodos húmedos y secos. Las puntuaciones se basan en la comparación de fenómenos pronosticados y observados (Cuadro 4).

Las puntuaciones por categorías son probabilidad de detección (*POD*, por sus siglas en inglés), índice de falsas alarmas (*FAR*, por sus siglas en inglés) e índice de éxito crítico (*CSI*, por sus siglas en inglés), y se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$POD = \frac{a}{(a+c)} \tag{6}$$

$$FAR = \frac{b}{(a+b)} \tag{7}$$

$$CSI = \frac{a}{(a+b+c)} \tag{8}$$

POD muestra la capacidad de los datos de precipitación para capturar el valor del SPI calculado con las observaciones (puntuación perfecta = 1), *FAR* indica la detección incorrecta del SPI (puntuación perfecta = 0) y *CSI* es la fracción global del SPI detectado correctamente (puntuación perfecta = 1, ninguna habilidad = 0) (Ghorbanian et al., 2022; Ghelli, 2009). Un valor del SPI obtenido con datos determinados (pronosticado) se considera detectado si cae en el mismo rango que el SPI obtenido con la precipitación observada (de acuerdo con el Cuadro 3).

Resultados y discusión

Los registros de la precipitación observada son homogéneos, según la prueba de Helmert (Campos-

Table 4. Contingency table.

Cuadro 4. Cuadro de contingencias.

Forecast/Pronóstico	Event observed/Evento observado	
	Yes/Si	No
Yes/Si	Hit (a)/ Acierto (a)	False alarm (b)/ Falsa alarma (b)
No	Miss (c)/ Fallo (c)	Correct not event (d)/ Correcto sin evento (d)

Source: Ghelli (2009).

Fuente: Ghelli (2009).

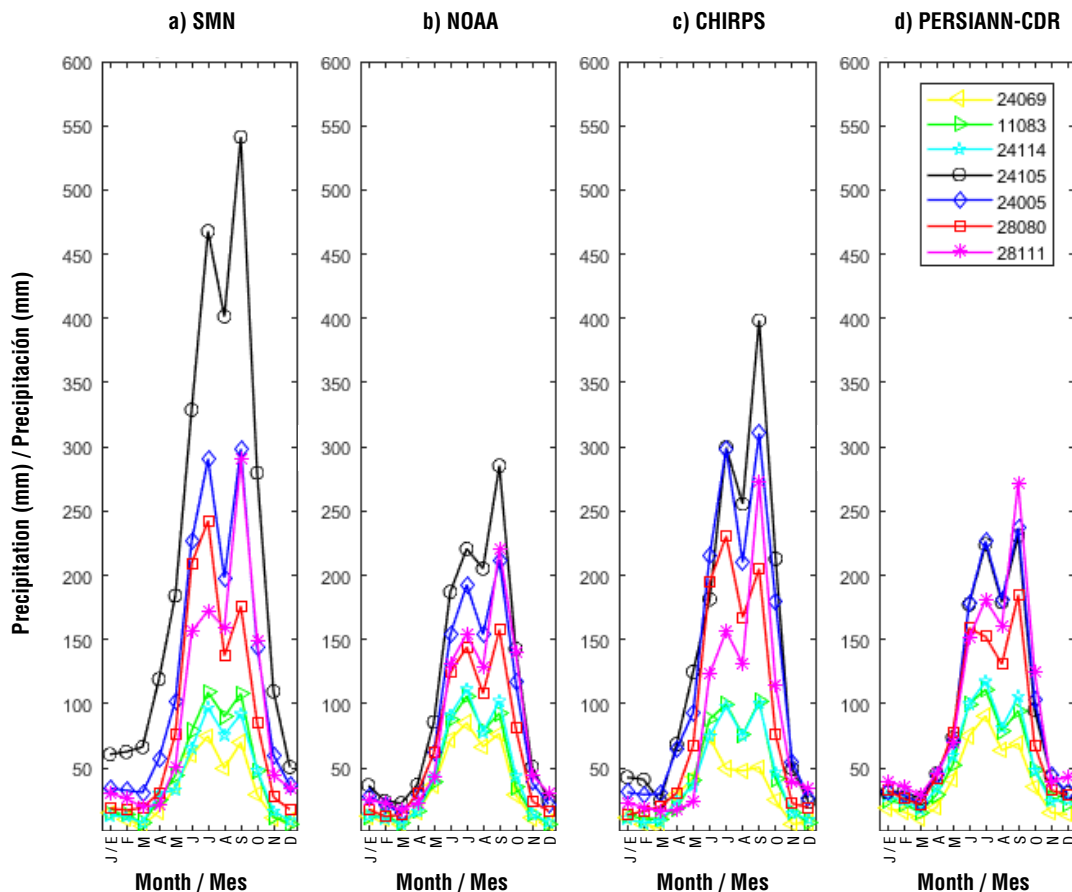


Figure 2. Annual cycle of precipitation obtained with the selected datasets for the period 1983-2013.
Figura 2. Ciclo anual de precipitaciones obtenido con los datos seleccionados para el periodo 1983-2013.

24069, 11083 and 24114) have a good representation of the amount of precipitation. The differences, with respect to the NMS data, are 3 and -5 % for NOAA and CHIRPS data, respectively. The difference evaluated with the PERSIANN-CDR data is about 22 %. The proxy stations located in the humid tropical climate type (24005, 28080 and 28111) show an underestimation of precipitation of approximately -24, -16 and -27 %, with NOAA, CHIRPS and PERSIANN-CDR data, respectively. The largest underestimation is observed in the humid mountainous climate type (station 24105), with values ranging from -50 to -60 %.

Figure 3 shows the Taylor Diagram that evidences the statistical relationship between the precipitation datasets. In general, NOAA data presents the best correlation with SMN data (0.94). CHIRPS data and PERSIANN-CDR data present correlation coefficients of the order of 0.9 and 0.85, respectively. The standard deviation is well represented at stations 24069, 11083 and 24114. For example, at station 24069 the standard deviation obtained with observations is 41.6 mm, and the value of the resulting statistic with NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data is 46.8,

Aranda, 1988). Los datos de precipitación en malla seleccionados se compararon con las observaciones en cuanto a su capacidad para capturar el ciclo anual para el periodo 1983-2013. En la Figura 2a se muestra la variabilidad de la precipitación observada entre las estaciones meteorológicas, ya que tienen diferentes tipos de clima. En general, el ciclo anual tiene dos picos, en julio y septiembre, con un declive en agosto que corresponde a la sequía interestival (SIE). Como mencionan Magaña et al. (1999), la SIE no representa a un periodo real de sequía, sino a una disminución de la cantidad de lluvia. Los datos de precipitación en malla (Figura 2b a 2d) también captan la SIE y tienen una representación global adecuada del ciclo anual.

La precipitación varía según los modelos y las estaciones. Las estaciones *proxy* situadas en climas secos y templados (estaciones 24069, 11083 y 24114) tienen buena representación de la cantidad de precipitación. Las diferencias, con respecto a los datos del SMN, son del 3 y -5 % para los datos de NOAA y CHIRPS, respectivamente. La diferencia evaluada con los datos PERSIANN-CDR es de aproximadamente 22 %. Las estaciones *proxy* situadas en el tipo de

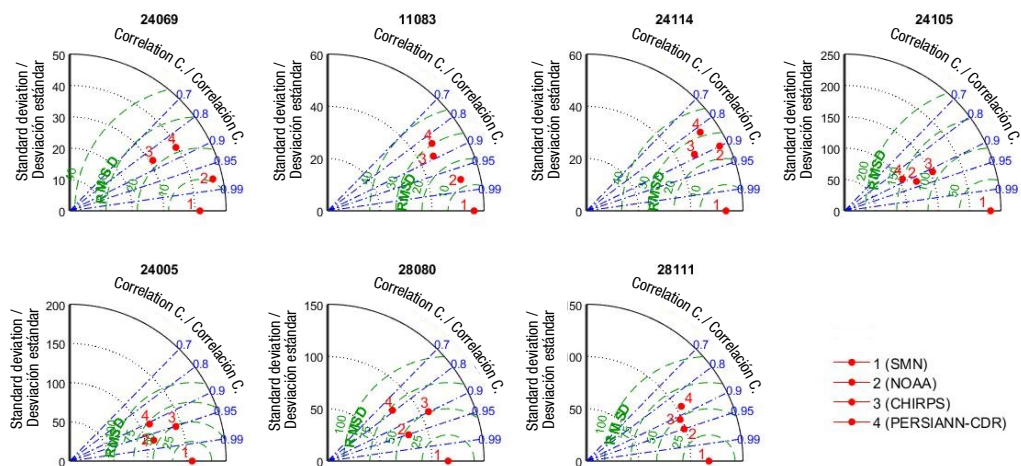


Figure 3. Taylor diagrams obtained with the selected datasets for the period 1983-2013.

Figura 3. Diagramas de Taylor obtenidos con datos seleccionados para el periodo 1983-2013.

31.0 and 39.4 mm respectively. On the other hand, the difference is greater in stations with a humid climate type. For instance, at station 24105, the value of the standard deviation is 233.54 mm, while the statistic is 124, 154 and 105 mm for NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data respectively. This result indicates the lower variability of the selected precipitation datasets compared to observations. Regarding the RMSE, in general, PERSIANN-CDR data shows the largest errors and NOAA data the smaller ones.

The differences in the variability of the data can also be seen in Figure 4a which shows the CV, so SMN data has the higher variability compared with the other datasets. In addition, Figure 4b shows the trend of the time series with the Sen's slope (calculated on an annual basis). In general, SMN data shows no trend with a median value of 0.2 %, while NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data have median values of the Sen's slope of -5.5, -2.3 and -4.6 %, respectively. The greater decrease trend was reported in station 24105 with SMN data (-23 %) and NOAA data (-19 %).

The SPI-12 computed with the four datasets and the frequency of the results are shown in Figure 5 and Figure 6 for station 24069 and 24005 respectively. These Figures show that the observed dry and wet periods (based on SMN data) occur at different moments among the stations. For instance, the wet period in 1994 at station 24005 is a normal period at station 24069, and the observed dry periods in 2000-2001 and 2011-2013 at station 24069 are normal periods at station 24005.

In general, Figure 5a shows a good agreement between the values obtained with the observations and the precipitation data, but some differences lead to a different classification. The observations classify the

clima tropical húmedo (24005, 28080 y 28111) muestran una subestimación de la precipitación de aproximadamente -24, -16 y -27 %, con los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. La mayor subestimación se observa en el tipo de clima montañoso húmedo (estación 24105), con valores que oscilan entre -50 y -60 %.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de Taylor, el cual evidencia la relación estadística entre los datos de precipitación. En general, los datos de NOAA presentan la mejor correlación con los datos SMN (0.94). Los datos de CHIRPS y PERSIANN-CDR presentan valores de R del orden de 0.9 y 0.85, respectivamente. La desviación estándar está bien representada en las estaciones 24069, 11083 y 24114. Por ejemplo, en la estación 24069, la desviación estándar obtenida con las observaciones es de 41.6 mm, y el valor de la estadística resultante con los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR es de 46.8, 31.0 y 39.4 mm, respectivamente. Por otro lado, la diferencia es mayor en las estaciones con un tipo de clima húmedo. En la estación 24105, el valor de la desviación estándar es de 233.54 mm, mientras que el valor de esta estadística es de 124, 154 y 105 mm para datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. Este resultado evidencia la menor variabilidad de los datos de precipitación seleccionados en comparación con las observaciones. En cuanto al RMSE, en general, los datos de PERSIANN-CDR muestran los mayores errores, y los de NOAA los menores.

En la Figura 4a también se muestran las diferencias en la variabilidad dado que los datos del SMN presentan un mayor CV en comparación con los demás datos. En la Figura 4b se observa la tendencia de la serie temporal con la pendiente de Sen (calculada sobre una base anual). En general, los datos del SMN no muestran ninguna

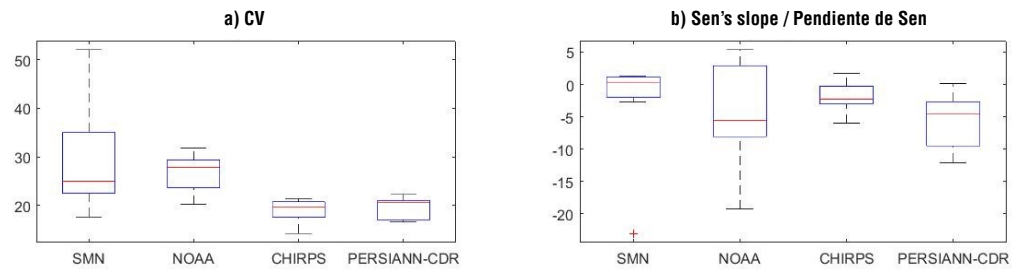


Figure 4. Coefficient of variance and Sen's slope. Each boxplot is constructed with the results from the seven meteorological (or proxy) stations, and each box ranges from the 0.25th to 0.75th percentile, with the center line being the median.
Figura 4. Coeficiente de variación y pendiente de Sen. Cada diagrama de caja se construyó con los resultados de siete estaciones meteorológicas (o proxy), y cada caja osciló entre el percentil 25 y el 75, siendo la línea central la mediana.

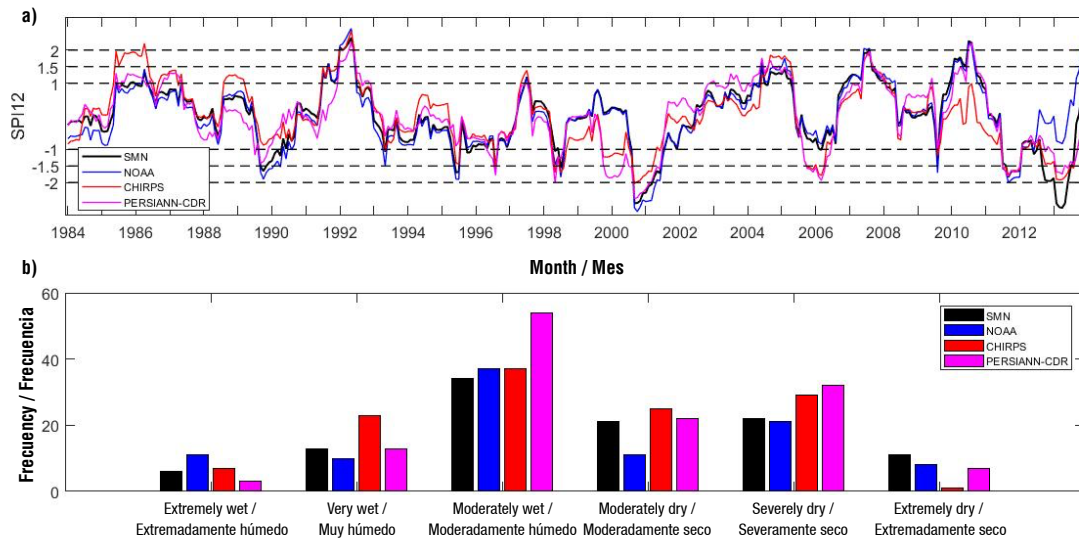


Figure 5. Standardized 12-month precipitation index (SPI-12) (a) and frequency (b) of results for station 24069.
Figura 5. Índice de precipitación estandarizado de 12 meses (SPI-12) (a) y frecuencia (b) de los resultados para la estación 24069.

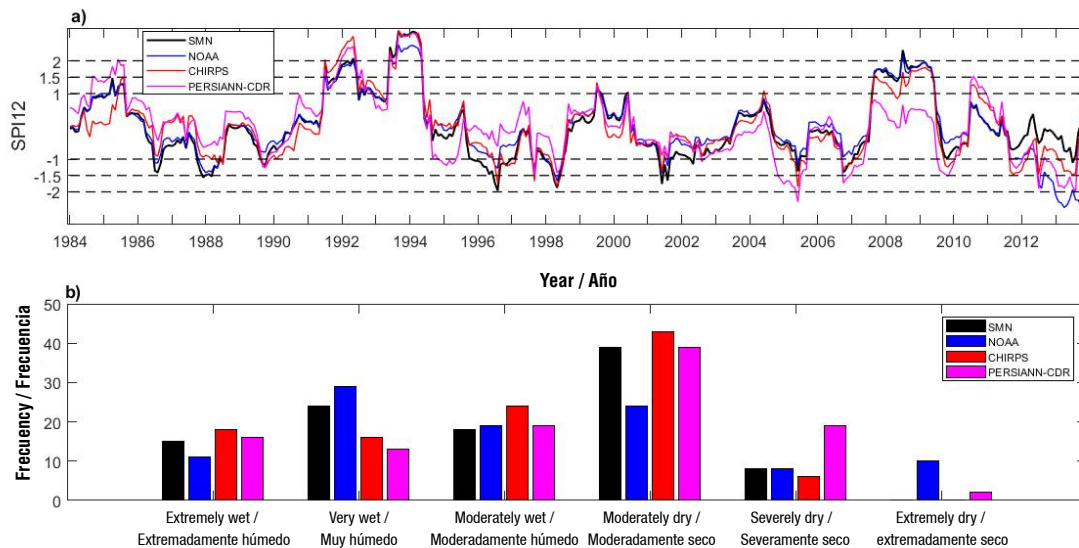


Figure 6. Standardized 12-month precipitation index (SPI-12) (a) and frequency (b) of results for station 24005.
Figura 6. Índice de precipitación estandarizado de 12 meses (SPI-12) (a) y frecuencia (b) de los resultados para la estación 24005.

1985-1986 period as moderately wet, while the CHIRPS data identify this period as extremely wet. Similarly, the observations define the 2006 period as near normal, while the SPI-12 obtained with NOAA and CHIRPS data classifies this year as severely dry. In general, NOAA data show good agreement with the SMN data, except for the period 2012 and 2013. The difference in SPI evaluated with the datasets is also evident in the frequency of events (Figure 5b). In this figure, a high frequency of very wet events can be observed with CHIRPS, and moderately wet with PERSIANN-CDR. On the other hand, the results show a low frequency of moderately dry events with NOAA, and extremely dry events with CHIRPS.

Table 5 shows the correlation coefficient calculated with SPI-12 between the observations (SMN data) and the other data sets. At station 24069, the correlation coefficients are 0.92, 0.83 and 0.84, for NOAA, CHIRPS and PERSIANN-CDR data, respectively. These results agree with those presented in the literature for SPI-12. Guo et al. (2017) report an R of 0.85 with CHIRPS, while Wei et al. (2019) show values of 0.84 and 0.95, for CHIRPS and PERSIANN-CDR, respectively, and Alijanian et al. (2019) obtained an R of 0.35 with PERSIANN-CDR. Hinge et al. (2021) mention that the performance of precipitation products in SPI evaluation depends, to a large extent, on the climatology of the site.

Similarly, Figure 6a shows the differences in the computation of wet and dry periods with the selected datasets for station 24005. For instance, the 1996-1997 dry period identified with observations is not well captured with CHIRPS data nor PERSIANN-CDR data, as these datasets identify this period as near normal. Another case is the 2012-2013 normal period which is reported as a dry period with the other datasets. Similarly, the dry period between 2007 and 2009 is not reported with PERSIANN-CDR data. The correlation coefficients for the SPI values obtained between SMN data and the other datasets are 0.89, 0.92 and 0.77 for NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data respectively. The differences in the frequency of the events are shown in Figure 6b. For example, NOAA

tendencia, con un valor mediano de 0.2 %, mientras que los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR tienen valores medianos de -5.5, -2.3 y -4.6 %, respectivamente. La mayor tendencia a la baja se registró en la estación 24105 con datos del SMN (-23 %) y NOAA (-19 %).

El SPI-12 calculado con las cuatro bases de datos y la frecuencia de los resultados se presentan en la Figura 5 y la Figura 6 para las estaciones 24069 y 24005, respectivamente. Estas figuras muestran que los periodos secos y húmedos observados (basados en datos del SMN) ocurren en diferentes momentos entre las estaciones. Por ejemplo, el periodo húmedo de 1994 en la estación 24005 es un periodo normal en la estación 24069, y los periodos secos observados en 2000-2001 y 2011-2013 en la estación 24069 son periodos normales en la estación 24005.

En general, la Figura 5a muestra una buena concordancia entre los valores obtenidos con las observaciones y los datos de precipitaciones, pero algunas diferencias conducen a una clasificación diferente. Las observaciones clasifican el periodo 1985-1986 como moderadamente húmedo, mientras que los datos de CHIRPS identifican este periodo como extremadamente húmedo. Del mismo modo, las observaciones definen el periodo 2006 como casi normal, mientras que el SPI-12 obtenido con datos de NOAA y CHIRPS clasifica este año como severamente seco. En general, los datos de NOAA muestran una buena concordancia con los datos del SMN, excepto para el periodo 2012 y 2013. La diferencia en el SPI evaluado con las bases de datos también es evidente en la frecuencia de los eventos (Figura 5b). En esta figura se puede observar una frecuencia elevada de eventos muy húmedos con CHIRPS, y moderadamente húmedos con PERSIANN-CDR. Por otro lado, los resultados muestran una frecuencia baja de eventos moderadamente secos con NOAA, y eventos extremadamente secos con CHIRPS.

El Cuadro 5 muestra el valor de R calculado con el SPI-12 entre las observaciones (datos del SMN) y las demás bases de datos. En la estación 24069, los R son 0.92, 0.83 y 0.84, para los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. Estos resultados coinciden con los presentados en la literatura para

Table 5. Correlation coefficients between Sistema Meteorológico Nacional (SMN) data and the other datasets.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre los datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y las demás bases de datos.

Station/Estación	NOAA	CHIRPS	PERSIANN-CDR
24069	0.92	0.83	0.85
11083	0.98	0.62	0.52
24114	0.80	0.83	0.77
24105	0.69	0.82	0.77
24005	0.89	0.92	0.77
28080	0.94	0.77	0.34

data shows a high frequency of very wet events and low frequency of moderately dry events. On the other hand, extremely dry events were not reported with SMN data, but with NOAA data and PERSIANN-CDR data.

Figure 7 shows the frequency of wet and dry events evaluated for the meteorological and proxy stations. For extremely wet events (Figure 7a), the median values of the boxplots are close to that obtained with SMN data; however, NOAA data shows less variability. The median of the very wet events (Figure 7b) is similar among the datasets, but the moderately wet events (Figure 7c) identified with PERSIANN-CDR data are low in number (median value of 24) compared to the other datasets (33-35 events).

For moderately wet and moderately dry events, gridded precipitation datasets show greater variability compared with observations (SMN data). In the latter case, NOAA data shows a smaller median value (24 events) than the other datasets (about 34 events). For severely dry events (Figure 7e), CHIRPS data presents a lower median value than SMN data. Finally, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data underestimate extremely dry events (Figure 7f). In other words, the selected gridded precipitation datasets would not correctly reflect the dry conditions in the analyzed period, despite the good correlation coefficient (Table 5).

Figure 8 shows the ability of the datasets to detect the occurrence of wet and dry events with the scores presented in Equations 6 to 8. In this figure, dry events

SPI-12. Guo et al. (2017) reportan un R de 0.85 con CHIRPS, mientras que Wei et al. (2019) muestran valores de 0.84 y 0.95, para CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente, y Alijanian et al. (2019) obtuvieron un R de 0.35 con PERSIANN-CDR. Hinge et al. (2021) mencionan que el rendimiento de los productos de precipitación en la evaluación del SPI depende, en gran medida, de la climatología del lugar.

Del mismo modo, en la Figura 6a se muestran las diferencias en el cálculo de los periodos húmedos y secos con los datos seleccionados para la estación 24005. El periodo seco de 1996-1997 identificado con las observaciones no se registra correctamente con datos de CHIRPS ni con PERSIANN-CDR, ya que estos datos identifican este periodo como casi normal. Otro caso es el periodo normal de 2012-2013, que las demás bases de datos señalan como periodo seco. Del mismo modo, el periodo seco entre 2007 y 2009 no se registra con datos de PERSIANN-CDR. Los valores de R del SPI obtenido entre los datos del SMN y las otras bases de datos son 0.89, 0.92 y 0.77, para NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. Las diferencias en la frecuencia de los eventos se muestran en la Figura 6b. Los datos de NOAA muestran una frecuencia elevada de eventos muy húmedos y una frecuencia baja de eventos moderadamente secos. Por otro lado, no se registraron eventos extremadamente secos con datos del SMN, pero sí con NOAA y PERSIANN-CDR.

En la Figura 7 se muestra la frecuencia de los episodios húmedos y secos evaluados de las estaciones meteorológicas y *proxys*. Para los eventos

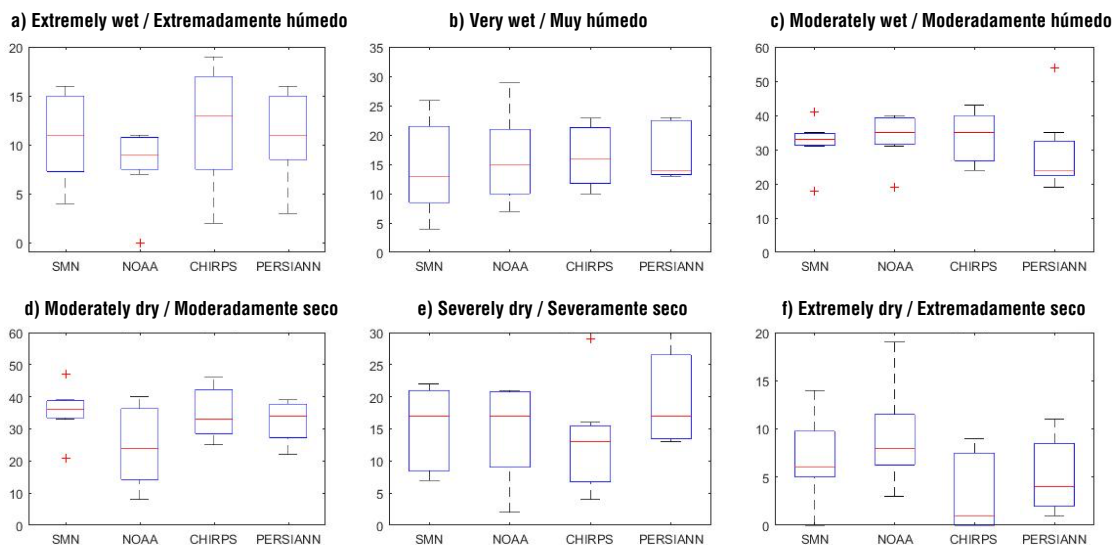


Figure 7. Frequencies of wet (upper panels) and dry (down panels) events computed with the selected datasets. Each boxplot is constructed with the results for the seven meteorological (or proxy) stations.

Figura 7. Frecuencia de episodios húmedos (paneles superiores) y secos (paneles inferiores) calculada con las bases de datos seleccionadas. Cada diagrama de caja se construyó con los resultados de las siete estaciones meteorológicas (o *proxys*).

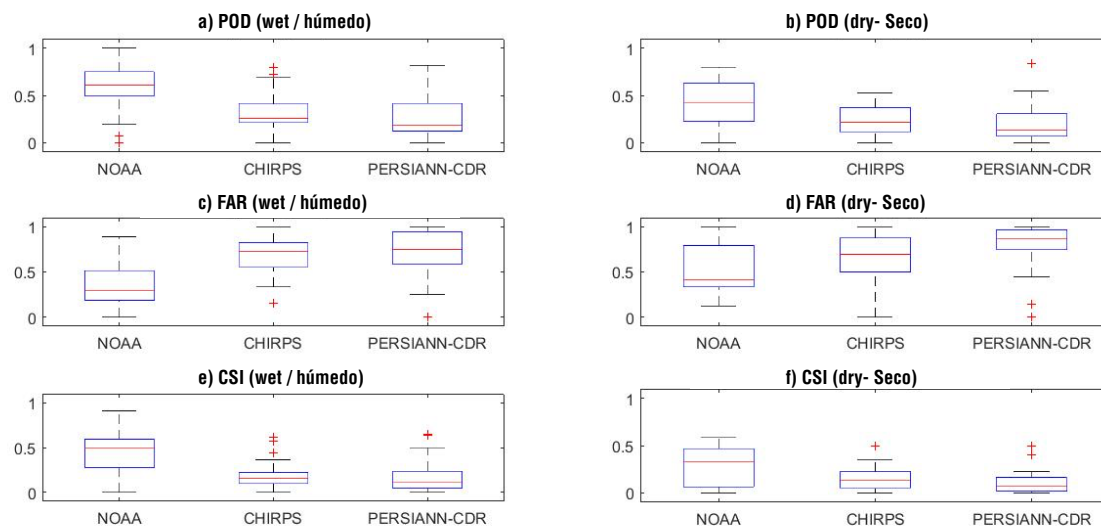


Figure 8. Results of the Probability of Detection (POD), the False Alarm Ratio (FAR) and the Critical Success Index (CSI) for wet events (left panels) and dry events (right panels). Each boxplot is calculated with 21 values corresponding to the results of seven meteorological (or proxy) stations and the three types of wet (or dry) events according to Table 3.

Figura 8. Resultados de probabilidad de detección (POD), índice de falsas alarmas (FAR) e índice de éxito crítico (CSI) para fenómenos húmedos (paneles de la izquierda) y fenómenos secos (paneles de la derecha). Cada diagrama de caja se calculó con 21 valores correspondientes a los resultados de siete estaciones meteorológicas (o *proxy*) y tres tipos de fenómenos húmedos (o secos) de acuerdo con el Cuadro 3.

include the three categories: moderately, severely and extremely dry, and similarly for wet events. In general, this figure shows that NOAA data performs best, compared with CHIRPS data and PERSIANN-CDR data. For instance, for wet events, the median value of POD is 0.61, 0.26 and 0.19 for NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data, respectively. Similarly, for dry events the median POD value is 0.43, 0.21 and 0.14 for NOAA data, CHIRPS data and PERSIANN-CDR data respectively. The median value of the FAR score is higher for CHIRPS data and PERSIANN-CDR data than for NOAA data in both wet and dry events; however, NOAA data presents a better result in wet events (0.3) than in dry events (0.4). The worst result in FAR was obtained with PERSIANN-CDR data, so the median value of the score is 0.75 and 0.87 for wet and dry events respectively. The CSI score shows similar results, so NOAA data has the best overall performance to correctly detect a given event (i.e., relative to SMN data), especially in the wet period.

Figure 9 shows the boxplots corresponding to the drought indicators in the period 1983-2013. From this figure, we can see that the median of the drought frequency indicator is very similar among the selected precipitation datasets (five to six events), except for CHIRPS data, that presents seven events. In addition, NOAA data shows a larger range of events (from one to eight). The median value of the mean drought severity ranges from 13 (CHIRPS data) to 16 months (NOAA

extremadamente húmedos (Figura 7a), los valores de la mediana de los diagramas de caja se aproximan a los obtenidos con los datos del SMN; sin embargo, los datos de NOAA muestran una menor variabilidad. La mediana de los eventos muy húmedos (Figura 7b) es similar entre las bases de datos, pero los eventos moderadamente húmedos (Figura 7c) identificados con los datos de PERSIANN-CDR son poco numerosos (valor mediano de 24) en comparación con otras bases de datos (33-35 eventos).

En el caso de los eventos moderadamente húmedos y secos, las bases de datos reticulares de precipitaciones muestran una mayor variabilidad en comparación con las observaciones (datos del SMN). Los datos de NOAA muestran un valor mediano menor (24 eventos) a las otras bases de datos (alrededor de 34 eventos). Para los eventos severamente secos (Figura 7e), los datos de CHIRPS presentan un valor mediano menor que los datos del SMN. Por último, los datos de CHIRPS y PERSIANN-CDR subestiman los eventos extremadamente secos (Figura 7f). En otras palabras, las bases de datos de precipitación reticulares seleccionados no reflejarían correctamente las condiciones secas en el periodo analizado, a pesar de la buena correlación (Cuadro 5).

La Figura 8 muestra la capacidad de los datos para detectar la aparición de episodios húmedos y secos con las métricas presentadas en las Ecuaciones 6 a 8. En

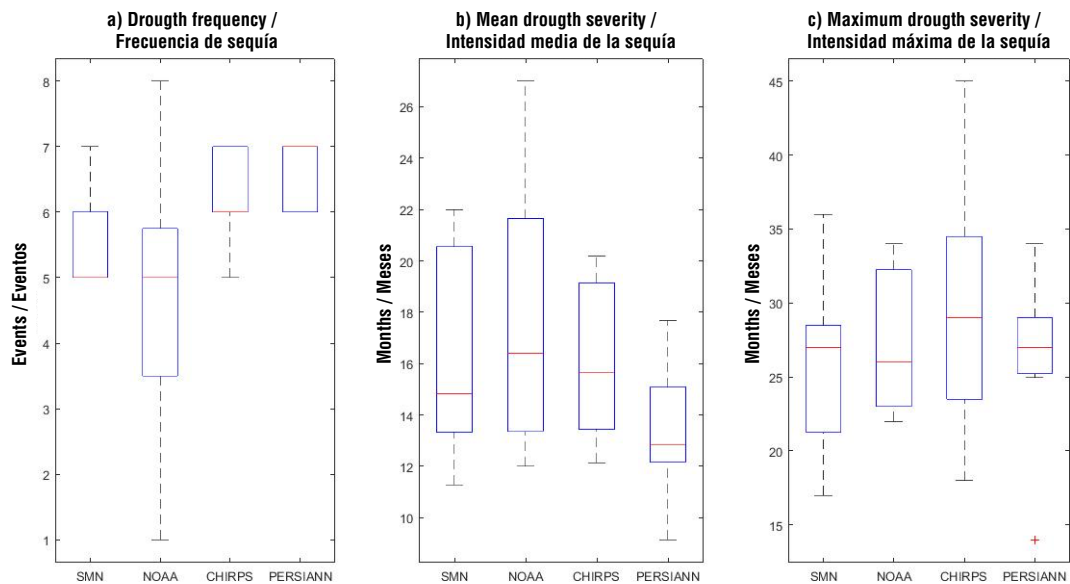


Figure 9. Drought indicators in the period 1983-2013. Each boxplot is built with the results of the seven meteorological (or proxy) stations.

Figura 9. Indicadores de sequía en el periodo 1983-2013. Cada diagrama de caja se construyó con los resultados de siete estaciones meteorológicas (o proxy).

data), and the maximum drought severity ranges from 26 (NOAA data) to 29 months (CHIRPS data). Overall, all datasets show similar median indicators, but the range of the results is different among them, especially in the case of PERSIANN-CDR data which has the least variability in the severity indicators, that is, this dataset would underestimate or overestimate the number of months that a given drought would last. Similar results are reported in literature. For instance, Alijanian et al. (2019) observed, in a study conducted in Iran, differences in the number of total months with drought conditions, and in the maximum duration of the drought between PERSIANN-CDR and the gauge stations.

Figures 10 and 11 show the annual cycles of precipitation in historical and future periods and the projected changes in precipitation computed for station 24069 and station 24005 respectively. The climate simulations were bias corrected by using each precipitation dataset as a benchmark. From this figure, we can see that, in the historical period, the annual cycle is well represented in both stations, but not with CHIRPS data in station 24069. In addition, some differences can be noted in the amount of precipitation (relative to SMN data); for example, at station 24069, NOAA data and CHIRPS data show a higher precipitation than SMN data, while at station 24005 the opposite occurs.

In future periods, the precipitation peaks are projected to change; for instance, the June peak decreases,

esta figura, los eventos secos incluyen tres categorías: moderada, severa y extremadamente secos, y de forma similar para los eventos húmedos. En general, la Figura 8 muestra que los datos de NOAA presentan los mejores resultados, en comparación con los de CHIRPS y PERSIANN-CDR. Para los fenómenos húmedos, el valor medio de *POD* es de 0.61, 0.26 y 0.19, para los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. Del mismo modo, para los eventos secos, el valor medio de *POD* es de 0.43, 0.21 y 0.14, para los datos de NOAA, CHIRPS y PERSIANN-CDR, respectivamente. El valor mediano de la puntuación *FAR* es mayor con los datos de CHIRPS y PERSIANN-CDR, que con los datos de NOAA, tanto en eventos húmedos como secos; sin embargo, los datos de NOAA presentan un mejor resultado en eventos húmedos (0.3) que en eventos secos (0.4). El peor resultado en *FAR* se obtuvo con los datos de PERSIANN-CDR, por lo que el valor medio es de 0.75 y 0.87, para eventos húmedos y secos, respectivamente. *CSI* muestra resultados similares, por lo que los datos de NOAA tienen el mejor rendimiento global para detectar correctamente un evento determinado (con respecto a los datos del SMN), especialmente en el periodo húmedo.

En la Figura 9 se muestran los diagramas de caja correspondientes a los indicadores de sequía en el periodo 1983-2013. De esta figura se desprende que la mediana del indicador de frecuencia de sequía es muy similar entre las bases de datos de precipitación (de cinco a seis eventos), excepto en el caso de los datos de CHIRPS, que presentan siete eventos. Además, los datos de NOAA muestran un mayor rango de eventos (de uno

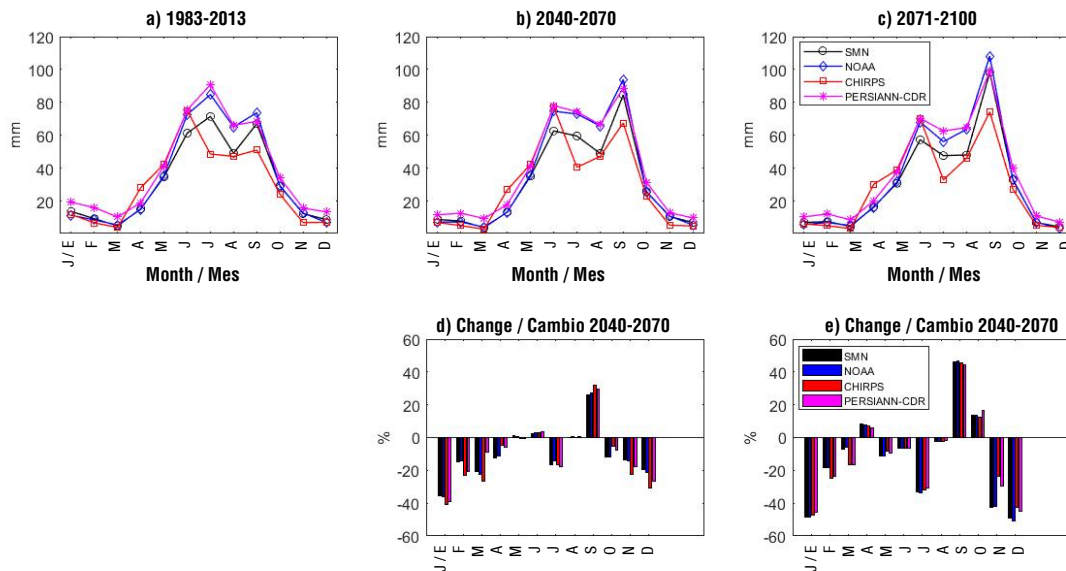


Figure 10. Annual cycles of precipitation for station 24069 in the historical period (a), the near future period 2040-2070 (b), and the far future period 2071-2100 (c), and the projected changes in precipitation between the historical and the future periods (d and e).

Figura 10. Ciclos anuales de precipitación de la estación 24069 en el periodo histórico (a), el periodo futuro cercano 2040-2070 (b), el periodo futuro lejano 2071-2100 (c), y los cambios proyectados en la precipitación entre los periodos histórico y futuro (d y e).

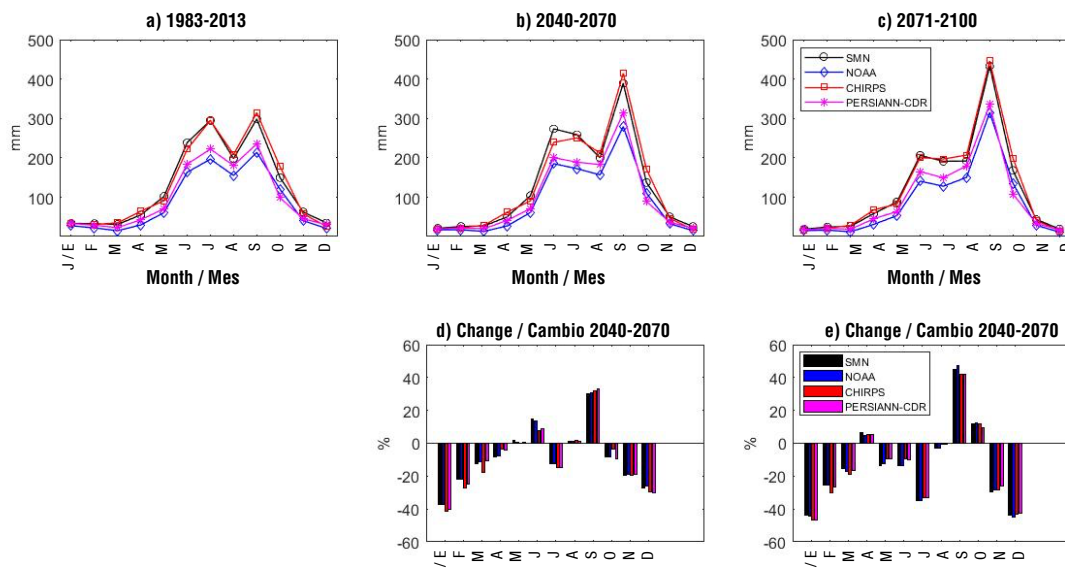


Figure 11. Annual cycles of precipitation for station 24005 in the historical period (a), the near future period 2040-2070 (b), and the far future period 2071-2100 (c), and the projected changes in precipitation between the historical and the future periods (d and e).

Figura 11. Ciclos anuales de precipitación de la estación 24005 en el periodo histórico (a), el periodo futuro cercano 2040-2070 (b), el periodo futuro lejano 2071-2100 (c), y los cambios proyectados en la precipitación entre los periodos histórico y futuro (d y e).

and the September peak increases in both stations, especially in the far future period (Figures 10c and 11c). The change in precipitation (Figures 10d and 11d) shows that, for most of the months, the simulations project a decrease, (especially in the dry months); for example, de change in January is about -38 and -47 %

a ocho). El valor mediano de intensidad media de sequía oscila entre 13 (datos de CHIRPS) y 16 meses (datos de NOAA), y la intensidad máxima de sequía oscila entre 26 (datos de NOAA) y 29 meses (datos de CHIRPS). En general, todas las bases de datos muestran indicadores medios similares, pero el rango de resultados es

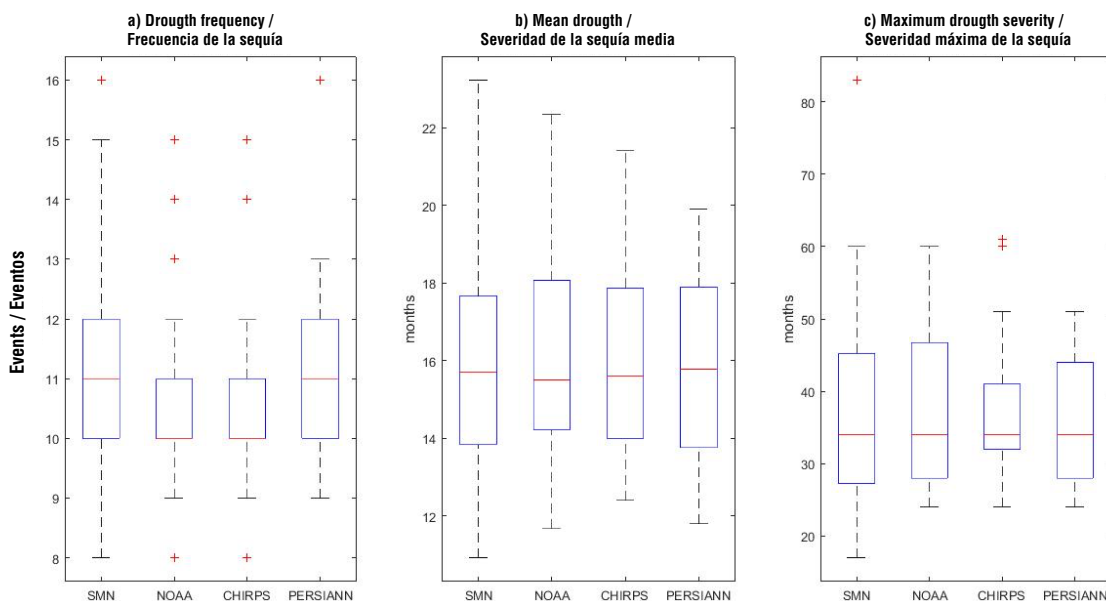


Figure 12. Drought indicators calculated for the period 2040-2100. Each boxplot is constructed with 35 results corresponding to the seven meteorological (or proxy) stations and the five climate simulations.

Figura 12. Indicadores de sequía calculados para el periodo 2040-2100. Cada diagrama de caja se construyó con 35 resultados correspondientes a las siete estaciones meteorológicas (o proxy) y a las cinco simulaciones climáticas.

for the near and the far future respectively. The most important increase is projected in September, around 28 % in the near future, and around 46 % in the far future. The changes in precipitation among the datasets are very similar, despite the difference in annual cycles. Drought indicators were evaluated over the entire period 2040-2100 with the bias-corrected precipitation time series (Figure 12).

Drought indicators were evaluated for the entire 2040-2100 period with the bias corrected precipitations time-series and the results are presented in Figure 12. The median value in the indicators is similar among datasets; for example, the drought frequency is 10-11 events, the mean drought severity is approximately 16 months, and the maximum drought severity is about 35 months. The main difference is identified in the variability of the results, so NOAA data and CHIRPS data show a narrow boxplot in the indicators of drought frequency and maximum drought severity. On the other hand, climate simulations project that the arid climate type station 24069 would have the largest frequency of drought events, while the humid climate type station 24005 would experience the events with the highest drought severity.

Conclusions

Precipitation products should be evaluated in terms of the annual cycle representation and the amount and the variability of the precipitation. The results could differ between the climatic conditions of each study area.

diferente entre ellos, especialmente en el caso de los datos de PERSIANN-CDR. Estos datos presentan menor variabilidad en los indicadores de severidad; es decir, este producto subestimaría o sobrestimaría el número de meses que duraría una sequía determinada. En la literatura se observan resultados similares. Alijanian et al. (2019) obtuvieron, en un estudio realizado en Irán, diferencias en el número de meses con condiciones de sequía y en la duración máxima de la sequía entre PERSIANN-CDR y los datos de las estaciones de medición.

Las Figuras 10 y 11 muestran los ciclos anuales de precipitación en periodos históricos y futuros, y los cambios previstos en la precipitación calculados para la estación 24069 y la 24005, respectivamente. Las simulaciones climáticas se corrigieron utilizando cada base de datos de precipitación como referencia. En el periodo histórico, el ciclo anual está bien representado en ambas estaciones, menos con los datos de CHIRPS en la estación 24069. Asimismo, se observan algunas diferencias en la cantidad de precipitación (en relación con los datos del SMN). En la estación 24069, los datos de NOAA y CHIRPS muestran una precipitación mayor que los datos del SMN, mientras que en la estación 24005 ocurre lo contrario.

En periodos futuros, se proyecta que los picos de precipitación cambien. El pico de junio disminuye y el de septiembre aumenta en ambas estaciones, especialmente en el periodo futuro lejano (Figuras 10c y 11c). El cambio en la precipitación muestra que, en la mayoría de los meses, las simulaciones proyectan

The evaluation of the SPI obtained with precipitation products with the correlation coefficient is the most used in this type of study, but this statistic does not show the real performance of the forecast, therefore, the analysis with categorical scores is recommended.

Precipitation datasets show less variability than observations in historical period, which can affect the estimation of drought indicators when used to downscale and bias correct precipitation simulations in future period.

The NOAA Livneh dataset obtained the best results in terms of statistics and in reproducing the wet and dry periods, however, this database has the limitation of data availability (until 2013), and the spatial domain is restricted to North America. In contrast, the CHIRPS dataset is constantly updated, and the spatial domain is global.

Precipitation products can be used as an alternative when observed data are not available, but it is necessary to consider several products for monitoring droughts in the historical period, as well as in the estimation of droughts with future projections in order to evaluate the uncertainty.

Acknowledgments

The author thanks the research groups that made the precipitation datasets available.

End of English version

References / Referencias

- Alijanian, M., Rakhshandehroo, G. R., Mishra, A., & Dehghani, M. (2019). Evaluation of remotely sensed precipitation estimates using PERSIANN-CDR and MSWEP for spatio-temporal drought assessment over Iran. *Journal of Hydrology*, 579, 124189. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124189>
- Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., Kharin, V.V., Lee, W. G., & Merryfield, W. J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5). <https://doi.org/10.1029/2010GL046270>
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., Ortega-Gaucin, D., & Ibañez-Hernández, Ó. (2016). La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 63-76. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500063
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universitaria Potosina.

una disminución, especialmente en los meses secos (Figuras 10d y 11d). Por ejemplo, el cambio en enero es de aproximadamente -38 y -47 % para el futuro cercano y lejano, respectivamente. El aumento más importante se proyecta en septiembre, en torno al 28 % en el futuro próximo y al 46 % en el futuro lejano. Los cambios en las precipitaciones entre las bases de datos son muy similares, a pesar de las diferencias en los ciclos anuales. Los indicadores de sequía se evaluaron en todo el periodo 2040-2100 con las series temporales de precipitaciones con corrección de sesgo (Figura 12).

El valor medio de los indicadores es similar entre las bases de datos. La frecuencia de sequía es de 10-11 episodios, la severidad media es de aproximadamente 16 meses y la severidad máxima es de unos 35 meses. La principal diferencia se identifica en la variabilidad de los resultados, donde los datos de NOAA y CHIRPS muestran un diagrama de caja estrecho en los indicadores de frecuencia de sequía y severidad máxima de sequía. Por otra parte, las simulaciones climáticas proyectan que la estación 24069, con clima árido, presentaría la mayor frecuencia de episodios de sequía, mientras que la estación 24005, con clima húmedo, experimentaría los episodios de intensidad máxima de sequía.

Conclusiones

Los productos de precipitación se deben evaluar en función de la representación del ciclo anual, así como de la cantidad y variabilidad de las precipitaciones. Los resultados podrían diferir según las condiciones climáticas de cada zona de estudio.

La evaluación del SPI obtenido con productos de precipitación mediante el coeficiente de correlación es la más utilizada en este tipo de estudios, pero no muestra el rendimiento real de la predicción, por lo que se recomienda el análisis con métricas categóricas.

En el periodo histórico, las bases de datos de precipitación muestran menos variabilidad que las observaciones, lo cual puede afectar a la estimación de los indicadores de sequía cuando se utilizan para reducir la escala y corregir el sesgo de las simulaciones de precipitación en el periodo futuro.

Los datos de NOAA generaron los mejores resultados en términos estadísticos, y en la reproducción de los periodos húmedos y secos; sin embargo, esta base de datos tiene las desventajas de la disponibilidad de datos (hasta 2013) y el ámbito espacial, ya que se limita a Norteamérica. En cambio, los datos de CHIRPS se actualizan constantemente y el dominio espacial es mundial.

Los productos de precipitación se pueden utilizar como alternativa cuando no se cuenta con datos observados,

- De Jesús, A., Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., & Alcocer Yamanaka, V. H. (2016). The use of TRMM 3B42 product for drought monitoring in Mexico. *Water*, 8(8), 325. <https://doi.org/10.3390/w8080325>
- Del Ángel-González, M., & Domínguez-Mora, R. (2015). Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización. *GEOS*, 35(2), 1-26. <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos95-2/PANUCO.pdf>
- Dobler-Morales, C., & Bocco, G. (2021). Social and environmental dimensions of drought in Mexico: An integrative review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102067>
- Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Department of Atmospheric Science, Colorado State University.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Ghelli, A. (2009). *Verification of categorical predictands*. 4IWVM - Tutorial Session. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Verification%20of%20Categorical%20Predictands.pdf>
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S., & Duan, Z. (2022). Performance evaluation of six gridded precipitation products throughout Iran using ground observations over the last two decades (2000–2020). *Remote Sensing*, 14(15), 3783. <https://doi.org/10.3390/rs14153783>
- Guo, H., Bao, A., Liu, T., Ndayisaba, F., He, D., Kurban, A., & De Maeyer, P. (2017). Meteorological drought analysis in the Lower Mekong Basin using satellite-based long-term CHIRPS product. *Sustainability*, 9(6), 901. <https://doi.org/10.3390/su9060901>
- Hinge, G., Mohamed, M. M., Long, D., & Hamouda, M. A. (2021). Meta-analysis in using satellite precipitation products for drought monitoring: lessons learnt and way forward. *Remote Sensing*, 13(21), 4353. <https://doi.org/10.3390/rs13214353>
- Kubiak-Wójcicka, K., Pilarska, A., & Kamiński, D. (2021). The analysis of long-term trends in the meteorological and hydrological drought occurrences using non-parametric methods - case study of the catchment of the upper Noteć River (Central Poland). *Atmosphere*, 12(9), 1098. <https://doi.org/10.3390/atmos12091098>
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D. R., & Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950-2013. *Scientific data*, 2(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.42>
- Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 197-211. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1278>
- pero para estimar la incertidumbre, es necesario usar varios productos para el monitoreo de las sequías en el periodo histórico, así como en la estimación de las sequías con proyecciones futuras.

Agradecimientos

El autor agradece a los grupos de investigación por haber facilitado las bases de datos de precipitaciones.

Fin de la versión en español

- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183. <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Mpelasoka, F. S., & Chiew, F. H. (2009). Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), 1168-1183. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1045.1>
- Muerth, M. J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J. A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., & Turcotte, R. (2013). On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189-1204. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H., & Thorstensen, A. R. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5801-5816. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón, J. P., Arganis-Juárez, M., Domínguez-Mora, R., & González Villareal, F. J. (2015). Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México. *Journal of Flood Risk Management*, 8(2), 177-192. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12067>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Rivera, J. A., Hinrichs, S., & Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS dataset to assess wet and dry conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/8413964>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2023). Monitor de sequía en México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

- Spinoni, J., Barbosa, P., Buchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., ... & Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data. *Journal of Climate*, 33(9), 3635-3661. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1>
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792-2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Villanueva-Diaz, J., Fye, F. K., Burnette, D. J., Griffin, D., Acuña-Soto, R., Seager, R., & Heim, R. (2009). Early 21st-century drought in Mexico. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(11), 89-90. <https://doi.org/10.1029/2009EO110001>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Velázquez-Zapata, J. A. (2019). Comparing meteorological data sets in the evaluation of climate change impact on hydrological indicators: a case study on a Mexican Basin. *Water*, 11(10), 2110. <https://doi.org/10.3390/w11102110>
- Velázquez-Zapata, J. A., & Troin, M. (2020). Uncertainty in the evaluation of climate change impacts over two Mexican Catchments. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 1-36. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-01>
- Wei, L., Jiang, S., Ren, L., Yuan, F., & Zhang, L. (2019). Performance of two long-term satellite-based and GPCP 8.0 precipitation products for drought monitoring over the Yellow River Basin in China. *Sustainability*, 11(18), 4969. <https://doi.org/10.3390/su11184969>
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Standardized precipitation index user guide*. World Meteorological Organization. Chair, Publications Board. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768
- Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., & Lagos, O. (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*, 186, 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.006>