



Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica

Precipitation variability analysis in the State of Zacatecas, México, by utilizing satellite information and gauges

Rodríguez-González Baudelio
Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
Correo: baudebrg@uaz.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4737-2621>

Pineda-Martínez Luis Felipe
Universidad Autónoma de Zacatecas
Correo: lpineda@uaz.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-0803-5625>

Guerra-Cobián Víctor Hugo
Universidad Autónoma de Nuevo León
Centro Internacional de Agua
Correo: victor.guerracb@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6193-100X>

Resumen

El estado de Zacatecas presenta una distribución estacional de las lluvias que provoca impacto negativo en la ganadería, agricultura y sistemas de abastecimiento de agua público-urbano, que se ha intensificado en la última década. Los registros de lluvia en esta región son escasos debido a la baja densidad de estaciones pluviométricas y por diversos factores no climáticos; especialmente los asociados en la medición de la observación. El objetivo de este estudio fue realizar una cuantificación espacial y temporal de la precipitación en la región del estado de Zacatecas. El análisis de las lluvias se realizó para los meses de verano de junio a septiembre durante el periodo de 2001 a 2010, usando diversas fuentes de registros climáticos de lluvia, pluviómetros y satelitales, para incluir mayor información en la zona de estudio. Con el desarrollo de la tecnología de sensores de satélites y su aplicación, se puede obtener en tiempo casi-real una estimación de la lluvia a escala global, por lo que en regiones donde los registros de lluvia obtenidos por métodos convencionales y que tienen ciertas limitaciones, resulta ampliamente significativa. Para obtener la variabilidad de las precipitaciones, se realizó un reanálisis utilizando un análisis estadístico multivariado en mallas regulares de precipitaciones para cada fuente. La zona de estudio presentó, en general, menor precipitación debido a que está situada entre las cuencas interiores del Centro-Norte y el Altiplano. Los resultados mostraron una correlación positiva entre los datos observados y de satélite. El análisis temporal de las precipitaciones mostró tanto periodos más húmedos como periodos más secos, que puede ser una expresión de mayor variabilidad climática.

Descriptores: Variabilidad de la precipitación, teledetección de lluvia, método de Kriging, datos en malla, reanálisis.

Abstract

The state of Zacatecas presents a seasonal distribution of rainfall that causes the negative impact on livestock, agricultural systems and public-urban water supply, which has intensified in the last decade. Rainfall records in this region are small due to the low density of climatic stations and non-climatic factors; especially those associated with the measurement of observation. The objective of this study was carried out a spatial and temporal quantification of precipitation in the region of the state of Zacatecas. The rainfall analysis was conducted for the summer months of June to September during the period from 2001 to 2010, using various precipitation data sources, rain gauges and satellite, to include more detailed information in the study area. With the development of satellite transmission systems, it can have a global extension, as far as the problems and limitations are concerned, it is broadly significant. To obtain the variability of precipitation, a re-analysis was performed using a multivariate statistical analysis in regular grids for each source. The study area generally presented less precipitation due to its location between the interior basins of the Center-North, such as the Altiplano. The results showed a positive correlation between the observed and satellite data. The temporal analysis of the precipitation showed both wetter periods and drier periods, which could be an expression of greater climatic variability.

Keywords: Precipitation variability, rain sensing, Kriging method, gridded data, reanalysis.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación espacial de la lluvia se ha realizado bajo diferentes enfoques dependiendo de la aplicación, información disponible y precisión requerida. El principio básico de la mayoría de los métodos de estimación por medio de interpolaciones es transformar los valores puntuales de la precipitación, a través de ponderadores espaciales para representar la distribución de la precipitación sobre una superficie (Íñiguez *et al.*, 2011).

Dentro del Estado de Zacatecas, existen áreas en donde la densidad de estaciones pluviométricas es muy baja. La falta de datos en gran parte de la región dificulta el desarrollo de aplicaciones, la verificación de los pronósticos numéricos y la calibración de pronósticos probabilísticos que tienen la potencialidad de mejorar la calidad del producto final que se ofrece a los usuarios (Ruiz, 2009).

Las mediciones directas e indirectas de la lluvia cubren un amplio rango de escalas, desde observaciones puntuales hasta agregaciones espaciales de radar y satélite. Cada técnica de medida tiene diferentes ventajas y limitaciones, por lo que es razonable hacer uso de diferentes tipos de mediciones para aprovechar al máximo todas las fuentes de información disponibles. Así, las lecturas de pluviómetros se pueden usar para remover errores sistemáticos de datos regionales menos precisos de radares y satélites; los cuales a su vez, se pueden utilizar para estimar lluvias en áreas donde no hay pluviómetros disponibles (Ramos, 2013).

En los últimos años se ha desarrollado la tecnología de sensores de satélites y su aplicación con el fin de obtener en tiempo casi-real una estimación de la lluvia a escala global (Huffman, 2010). Uno de estos productos es el Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) que es una misión conjunta entre EEUU y Japón para monitorear la precipitación tropical y subtropical y estimar su calor latente asociado (Huffman, 2013). Además, se encuentra la información proporcionada por datos de reanálisis que es un conjunto de datos atmosféricos, hidrológicos y de superficie terrestre. El Reanálisis Regional para América del Norte (NARR) es una fuente de datos útil para el dominio norteamericano, y se basa en un Modelo de Circulación Global con una dinámica consistente de alta resolución y frecuencia a largo plazo (Messinger *et al.*, 2006; Bukovsky & Karoly, 2007). Por lo que el objetivo principal de este trabajo fue realizar un análisis de las lluvias de verano en la región del centro y norte de México usando diversas fuentes de registros climáticos, esto, bajo la hipótesis que la incorporación de otros registros de lluvia ayudará a evitar los problemas de la distribución heterogénea de

la información basada en registros puntuales (estaciones climáticas) al incluir mayor información en regiones sin registros *in situ*.

MÉTODOS Y MATERIALES

ZONA DE ESTUDIO

El estado de Zacatecas tiene una extensión de 75,284 Km², se localiza al norte 25° 07'; al sur 21° 01' de latitud norte; al este 100° 43'; al oeste 104° 22' de longitud oeste (Figura 1). En esta región el clima es principalmente seco, con una temperatura media anual de 16°C y variaciones promedio de 35°C máxima y 6°C mínima; la precipitación pluvial media anual es de 510 mm, con una máxima de 910 mm y una mínima de 324 mm (García, 1964; García & Corral, 2004). Para tener una mejor estimación de la precipitación, se seleccionó un dominio (20°, 26° Latitud; -105°, -100° Longitud) que comprende al Estado de Zacatecas y sus alrededores, esto con la finalidad de involucrar la mayoría de las estaciones climatológicas que cubran la totalidad de la región.

LLUVIA DE LA RED PLUVIOMÉTRICA

Los registros meteorológicos se obtienen de la red de estaciones integradas en la base de CLICOM (Clima Computarizado) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que a su vez, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Datos climáticos CLICOM, disponibles en <http://clicom-mex.cicese.mx/>). Se consideraron las 760 estaciones de los 9 estados comprendidos en la zona de estudio durante el periodo de 2001 a 2010, de las cuales solo 84 estaciones se localizan dentro del Estado de Zacatecas. La base de datos es de registros diarios de parámetros climáticos que incluyen la temperatura máxima y mínima, así como precipitación. Como parte de la exploración de la información a trabajar se elaboró un gráfico de la precipitación que permitiera determinar la estacionalidad de las lluvias que se presentan en la zona de estudio, las cuales se concentran prácticamente en el periodo de junio a septiembre (Figura 2).

La estacionalidad de las lluvias de la zona de estudio, permitió definir un periodo lluvioso considerado como verano de Junio a Septiembre (JJAS) debido al mayor impacto que tiene para la estimación de la precipitación anual. De cada estación se extrajeron los datos de precipitación, la cual se acumuló a nivel mensual mediante un código desarrollado en MatLab (MathWorks, Inc., 2005). Debido al problema de inconsistencia en el registro de la

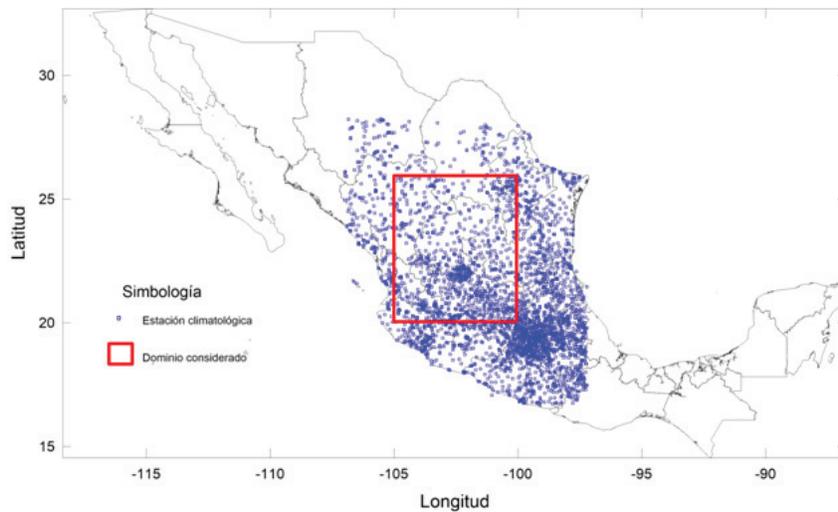


Figura 1. Localización del dominio considerado (recuadro interior) en la estimación de la precipitación y densidad de estaciones CLICOM

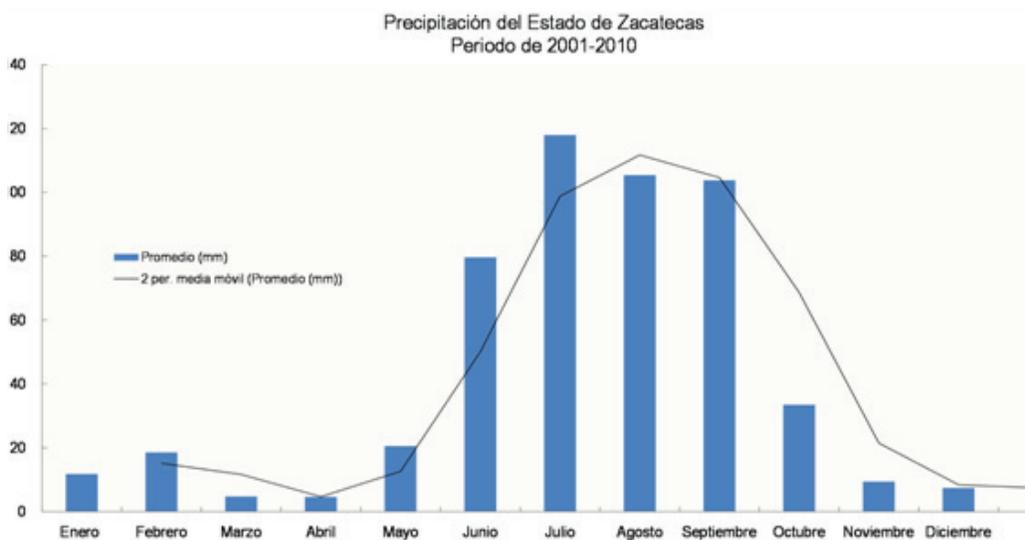


Figura 2. Precipitación pluvial acumulada mensual promedio

información de lluvias dentro de CLICOM, se determinó realizar un control de calidad a la información. Este control de calidad consistió en la eliminación de los valores negativos de la precipitación y eliminación de estaciones con menos de 80% de registro de información dentro del periodo de estudio.

Para evitar el problema de la baja densidad de estaciones en algunas regiones y alta variación de los registros en las series de tiempo, se realizó una interpolación de los datos (Figura 3). Los datos de precipitación se convirtieron a una malla con una resolución espacial de $1/4^\circ$ (~28 km) utilizando el software Surfer, por medio del método de interpolación de Kriging Ordinario. Este método asigna valores interpolados entre puntos más cercanos (vecino más cercano) y permite uniformizar

escalas a través de secuencias de escalado: “*upscaling*” y “*downscaling*” (Haile, 2013). La interpolación generada en campos de lluvia de los pluviómetros se realizó con la misma resolución utilizada en los productos de satélite (tamaño de pixel de $1/4^\circ$).

DATOS DE LLUVIA ESTIMADA POR SATÉLITE

El proyecto TRMM fue la primera misión satelital dedicada a estimar la lluvia tropical y subtropical, fue puesta en órbita el 27 de Noviembre de 1997, y nació de la colaboración conjunta entre la NASA y la Agencia Espacial Japonesa (Huffman, 2010). La lluvia tropical desempeña un papel crítico en la circulación atmosférica, ya que libera grandes cantidades de calor latente. Ade-

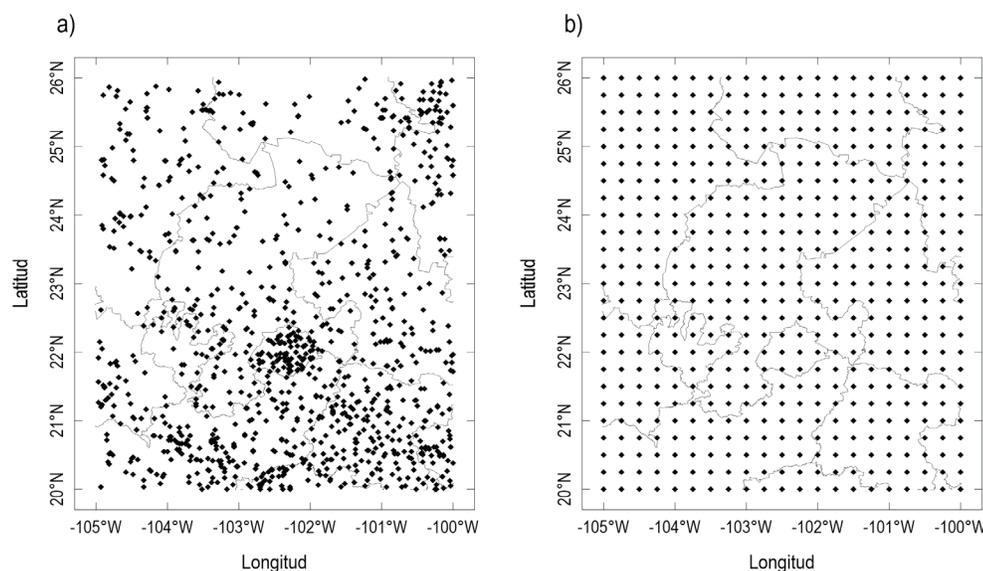


Figura 3. Interpolación de la información, a) datos de las estaciones CLICOM, b) datos CLICOM convertidos en una malla con resolución espacial de $1/4^\circ$

más, dos terceras partes de la lluvia a nivel global ocurren en el trópico. Los instrumentos de medición de las precipitaciones de TRMM incluyen: un radar de precipitación (PR), un radar de escaneo electrónico que opera a 13.8 GHz, TRMM Microwave Imagen (TMI), un radiómetro de microondas pasivo de nueve canales; y también la fracción visible y el infrarrojo (VIRS) de cinco canales (Huffman, 2013).

En esta investigación se emplearon los datos de la versión más reciente (TRMM_3B43(V7)), donde el propósito es estimar mejor la tasa de precipitación (mm/hr) (NASA/GSFC, 2010 <http://mirador.gsfc.nasa.gov>).

Las estimaciones reticulares presentan una resolución temporal mensual y una resolución espacial de $1/4^\circ$; con una cobertura espacial que se extiende desde 50 grados al sur de la latitud y 50 grados norte. Los datos se almacenan en el formato jerárquico de datos (HDF), que incluye tanto el núcleo y los metadatos específicos del producto.

DATOS DE LLUVIA ESTIMADA POR RE-ANÁLISIS REGIONAL PARA AMÉRICA DEL NORTE

El Reanálisis Regional para Norte América (NARR, por sus siglas en inglés) es un análisis de mesoescala homogéneo de largo plazo, realizado a partir del modelo global ETA de la NCEP y el sistema de asimilación de datos EDAS. Su dominio cubre Norteamérica y océanos adyacentes. Los componentes esenciales del sistema utilizado para generar NARR son los límites laterales y de los datos utilizados para el reanálisis global del Centro

Nacional de Predicción del Medio Ambiente en conjunto con el Departamento de Energía NCEP-DOE, el NCEP modelo ETA y de su sistema de asimilación de datos, una versión reciente del modelo de la superficie terrestre NOAH y el uso de numerosos conjuntos de datos adicionales ha mejorado en comparación con los de reanálisis globales. En particular, NARR ha asimilado con éxito las observaciones de alta calidad y detalladas en el análisis atmosférico. Por consiguiente, el forzamiento de la componente de modelo de la superficie terrestre del sistema es más preciso que en los reanálisis anteriores, de modo que proporciona un análisis mejorado de la hidrología de la superficie terrestre y de la interacción suelo-atmósfera (Bukovsky & Karoly, 2007). El nuevo análisis regional se produce a altas resoluciones espaciales y temporales (32 km, 45 capas, y cada 3 horas), y asimila las precipitaciones, a diferencia de los reanálisis de sus contrapartes globales (National Centers for Environmental Prediction, 2005, disponibles en <http://rda.ucar.edu/dataset/ds608.0/>).

VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA ESTIMADA POR TRMM Y NAAR

Para la manipulación y visualización de datos de lluvia estimados por TRMM y NAAR, se utilizó el Sistema de Visualización y Análisis de Rejilla (GRADS, por sus siglas en inglés) un software desarrollado por el Centro para Estudios del sistema Suelo-Océano-Atmósfera de la Universidad de Maryland en los Estados Unidos. Este sistema de librerías de código libre, es una herra-

mienta que facilita el acceso, manipulación y visualización de datos vinculados a una representación abstracta de la tierra. GRADS utiliza un entorno de datos de 5-dimensiones: las cuatro dimensiones convencionales (longitud, latitud, nivel vertical y el tiempo), además de una quinta dimensión opcional para rejillas que generalmente está implantada, pero diseñada para ser utilizada en conjunto con otros datos. Las agrupaciones se colocan en el espacio 5-D por el uso de un archivo de descriptor de datos; el cual maneja mallas que son regulares, no linealmente espaciados, Gaussianas, o de resolución variable. Debido a estos, los valores asignados a los diferentes grupos de datos pueden ser superpuestos gráficamente, con un registro correcto, espacial y temporal.

REANÁLISIS DEL ESTADO DE ZACATECAS (REZ)

Una vez que las mallas de CLICOM, TRMM y NARR se han configurado en el mismo dominio con igual resolución, se efectuó el siguiente procedimiento con las tres mallas para lograr establecer un nuevo Reanálisis de registros meteorológicos en esa malla (Ecuación 1). El procedimiento que se siguió se muestra en el esquema de la Figura 4.

$$E_{i,j} = \sum_{i=1, j=1}^{n,m} C f_C + T f_T + N f_N \quad (1)$$

donde:

$E_{i,j}$ = es el valor del REZ para el punto (i,j)

C = malla regular de CLICOM

T = malla regular de TRMM

N = malla regular de NARR

f_C, f_T y f_N = factores de peso para cada fuente obtenidos con análisis multivariado

Para el cálculo de los factores de peso de cada malla se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP),

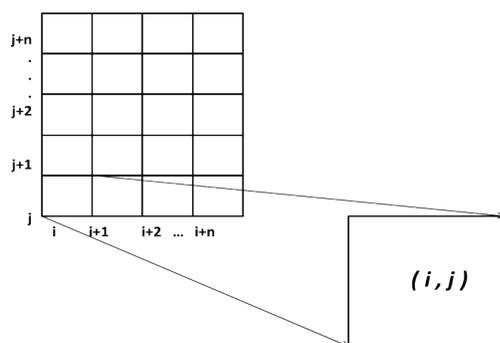


Figura 4. Esquema de REZ para cada dato de CLICOM, TRMM y NARR

que es una de las técnicas de análisis estadístico multivariado de mayor aplicación en los últimos tiempos (López, 1994; Alfaro & Soley, 2009). Esta técnica permitió transformar una serie de registros correlacionados, en otra serie de variables con correlación mutua nula. A su vez, estas nuevas coordenadas tienen la propiedad de minimizar la varianza remanente, lo que permite detectar y diferenciar entre cada una de ellas. Los datos originales son una combinación lineal de los componentes principales en los que los factores de peso se calculan de los vectores y valores propios. Además, los componentes que más contribuyen a “explicar” la varianza total son los primeros, mientras que los últimos solo “explican” una fracción menor, ya que por lo general estas se asocian con ruido no correlacionado (López, 1994).

VALIDACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN

Para validar la base de registros combinada se realizaron los análisis de correlación de datos observados contra los registros del REZ. También se calcularon dos estadísticos de forma puntual para ver la calidad del ajuste, por lo que se seleccionaron diez estaciones para realizar un proceso de validación (Figura 5). Estas estaciones fueron las que contaban con un mayor número de registros en el periodo considerado, así como su distribución dentro de la zona de estudio para asegurar una mejor repartición de la validación dentro de la malla. Los estadísticos elegidos son:

Sesgo: Evalúa la diferencia promedio entre la precipitación estimada por el REZ (PR) y la estimada por los pluviómetros (PP), siendo n el número de estaciones:

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{R_{xi}} - P_{P_{xi}}) \quad (2)$$

Raíz del error medio al cuadrado: RMSE (por sus siglas en inglés) evalúa el error de las estimaciones del REZ en comparación con las de los pluviómetros con un énfasis en valores extremos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{R_{xi}} - P_{P_{xi}})^2} \quad (3)$$

Adicionalmente, con el fin de conocer la variabilidad de las precipitaciones se calculó el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) utilizando los datos del REZ. Es un índice sencillo que solo necesi-

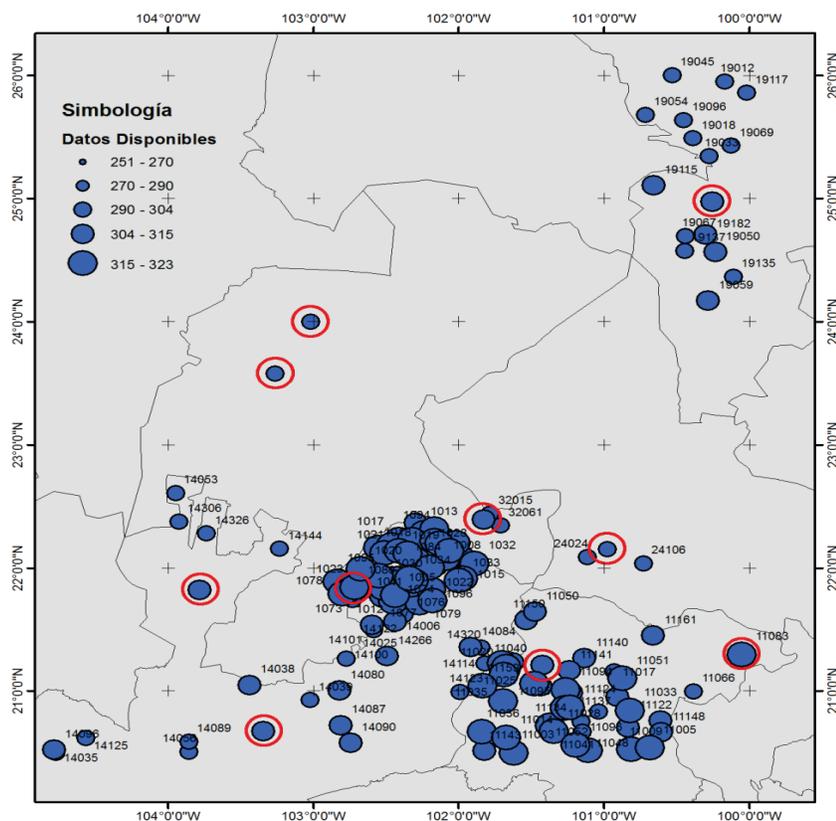


Figura 5. Localización de las diez estaciones seleccionadas para la validación

ta como variable la precipitación frente a otros índices más complicados y que despliegan una gran cantidad de variables, aunque por ello es necesario una buena calidad de las series de datos registrados que se van a utilizar (Hayes *et al.*, 1999). El SPI mide cuánto se desvía la precipitación actual respecto al promedio de largo registro para la escala de tiempo decidida. Para ello, los registros se ajustan a una distribución de probabilidad gamma y luego se obtiene el valor que tendría la misma probabilidad en una distribución normal de media cero y varianza uno, estos valores corresponden al SPI (Hayes, 2007).

RESULTADOS

VALIDACIÓN DE LOS REGISTROS METEOROLÓGICOS

Para obtener una medida de la aproximación de la información, se realizó un proceso de validación cruzada de los registros contra CLICOM. La Figura 6 muestra un diagrama de dispersión para los datos globales de todo el periodo de estudio en la combinación de las diferentes fuentes de información. Se puede observar que, en forma general, los datos muestran una buena

correlación respecto a los registros observados. De la correlación entre la red de pluviómetros CLICOM, y el algoritmo TRMM_3B43(V7) se aprecia una correlación ligeramente superior contra NARR. Esto debido a la naturaleza de cada una de las fuentes de información. Mientras que la información satelital representa una estimación espacial de la lluvia basada en sensores remotos, los datos NARR son resultado de una interpolación dinámica basada en modelos globales de circulación (Mesinger *et al.*, 2006; Tian *et al.*, 2007).

En la tabla 1 se muestran los resultados del RMSE y del Sesgo de las estaciones seleccionadas para la validación de los datos obtenidos en el REZ.

El valor de RMSE obtenido muestra que el error varía desde 41.9 mm en la estación 19182 hasta 93.9 mm en la estación 14066 de la región más lluviosa en la zona de estudio. En cuanto al Sesgo, se tiene una diferencia promedio de -7.6 para la estación 14066 y 23.2 de la estación 19182 de la región con menor cantidad de lluvia.

SERIES DE TIEMPO DE LA PRECIPITACIÓN

Las series de tiempo de la precipitación de verano (JJAS) de los datos globales de todo el dominio se mues-

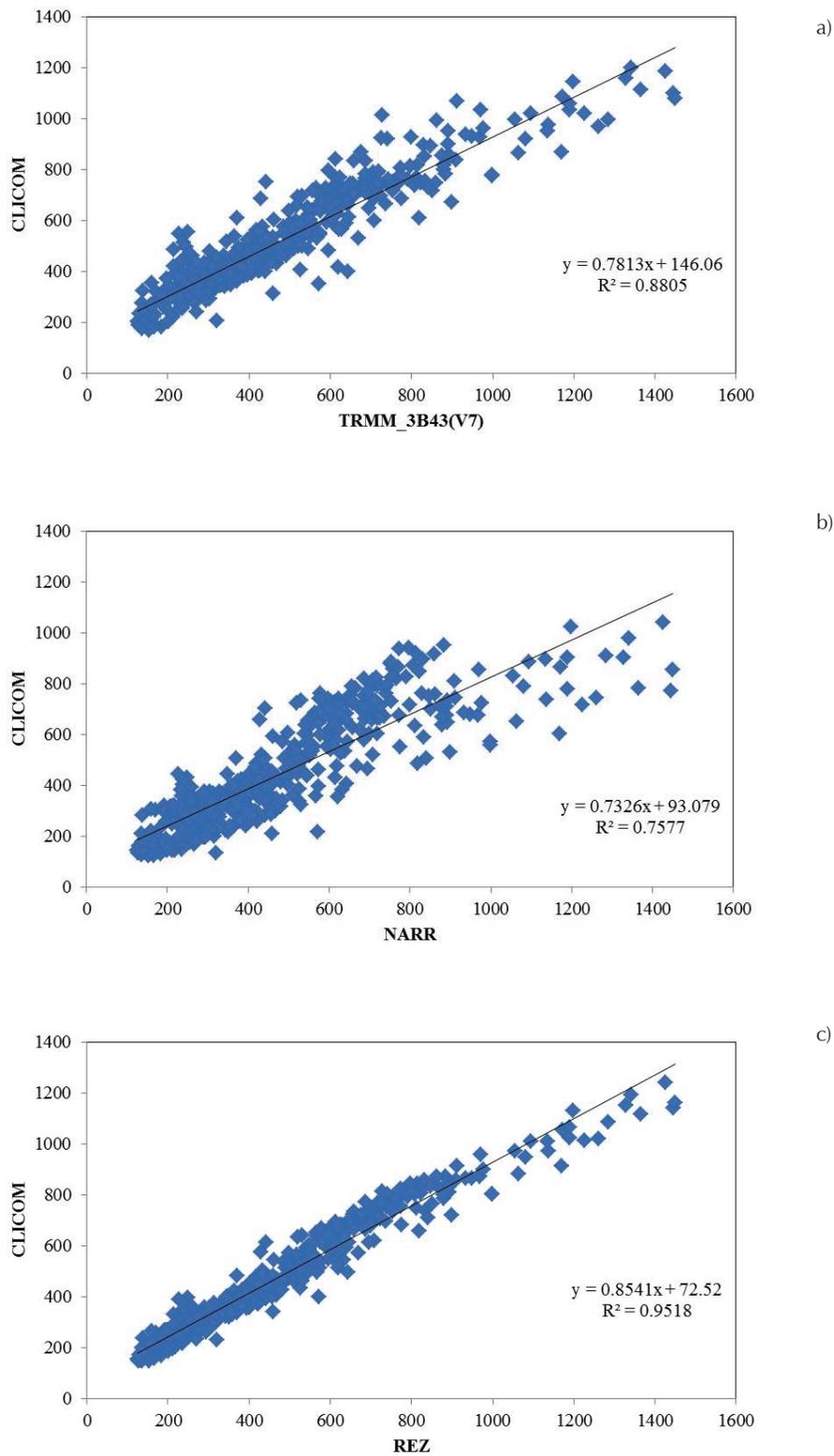


Figura 6. Diagramas de dispersión de la precipitación acumulada de JJAS en el periodo 2001 a 2010, a) CLICOM vs TRMM_3B43 (V7), b) CLICOM vs NARR y c) CLICOM vs REZ

Tabla 1. Valores de los estadísticos RMSE y Sesgo de los datos del REZ

ID_Estación	1090	11066	11095	14023	14066	19182	24069	32024	32038	32046
RMSE (mm)	60.8	53.1	71.3	59.2	93.9	41.9	50.2	42.3	48.4	55.5
Sesgo (mm)	13.3	2.4	-6.9	37.7	-7.6	23.2	3.6	7.9	14.1	0.3

tran en la Figura 7. Se puede observar que todas las fuentes de información de lluvia siguen el mismo patrón de variabilidad estacional e interanual. Es decir, el mismo patrón consistente de veranos húmedos o secos en todas las bases de datos. Los registros de satélite (TRMM) están siempre por encima de los demás registros, esto puede indicar dos cosas: primero, que el algoritmo usado para el cálculo de agua precipitable está sobrestimando la lluvia; o segundo, puede representar una mejor estimación por encima de CLICOM debido a una mayor cobertura de registro, es decir, sobre un análisis continuo en el espacio. Por el contrario, los datos de reanálisis (NARR) muestran una subestimación sistemática de la precipitación. Esta subestimación puede ser por la asimilación de datos dentro de NARR (Mesinger *et al.*, 2006), aunque espacialmente muestra patrones de distribución muy cercanos a los registros CLICOM.

DISTRIBUCIÓN DE LLUVIAS DE VERANO

Se obtuvieron las mallas regulares de precipitación acumulada mensual para todo el periodo de estudio en el dominio establecido. Cada malla se generó bajo el mismo esquema espacial y en la misma resolución para

cada fuente de información. Esto permitió, además de unir la información, hacer una comparación entre mallas. El análisis de la lluvia definida como verano JJAS, muestra la distribución de la precipitación en un gradiente de la región suroeste hacia el norte y noreste (Figura 8). Consistente a lo encontrado por diversos autores que han analizado la lluvia del norte de México en relación con el moznón (Cavazos & Hastenrath, 1990; Adams & Comrie, 1997; Englehart & Douglas, 2002; Higgins *et al.*, 2006).

La Figura 8 muestra los datos de precipitación promedio de verano. Las regiones que presentan valores más bajos en precipitación coinciden con la región semi-árida del altiplano en Zacatecas y San Luis Potosí. En contraste, los veranos más lluviosos se presentan en las regiones adyacentes a la costa oriental del Pacífico, justo en la región del impacto del monzón al inicio del verano (Higgins *et al.*, 2006). Es interesante notar que la estimación de TRMM de la lluvia de verano muestra una mayor aproximación a los datos CLICOM. Por otro lado, NARR es bueno en la estimación de la distribución espacial, pero subestima los valores altos de la precipitación. Precisamente esto ha sido discutido por Huffman *et al.* (1997); donde muestra que los datos estimados de la lluvia tanto por satélite como por reanálisis

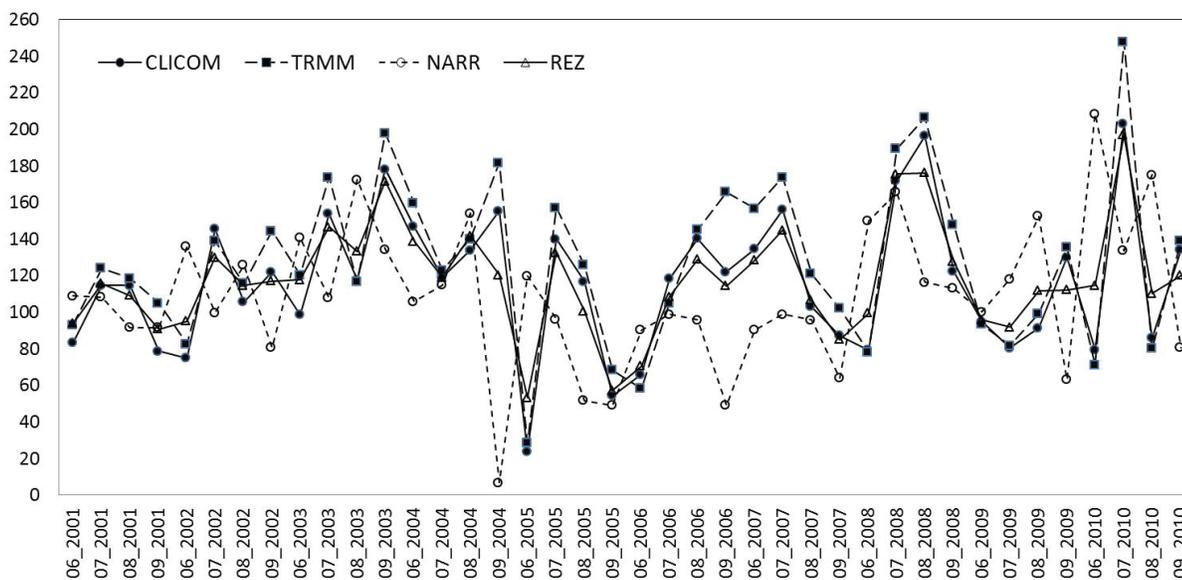


Figura 7. Series de tiempo del promedio de la precipitación acumulada mensual global de todo el dominio (mm) en el periodo 2001 a 2010

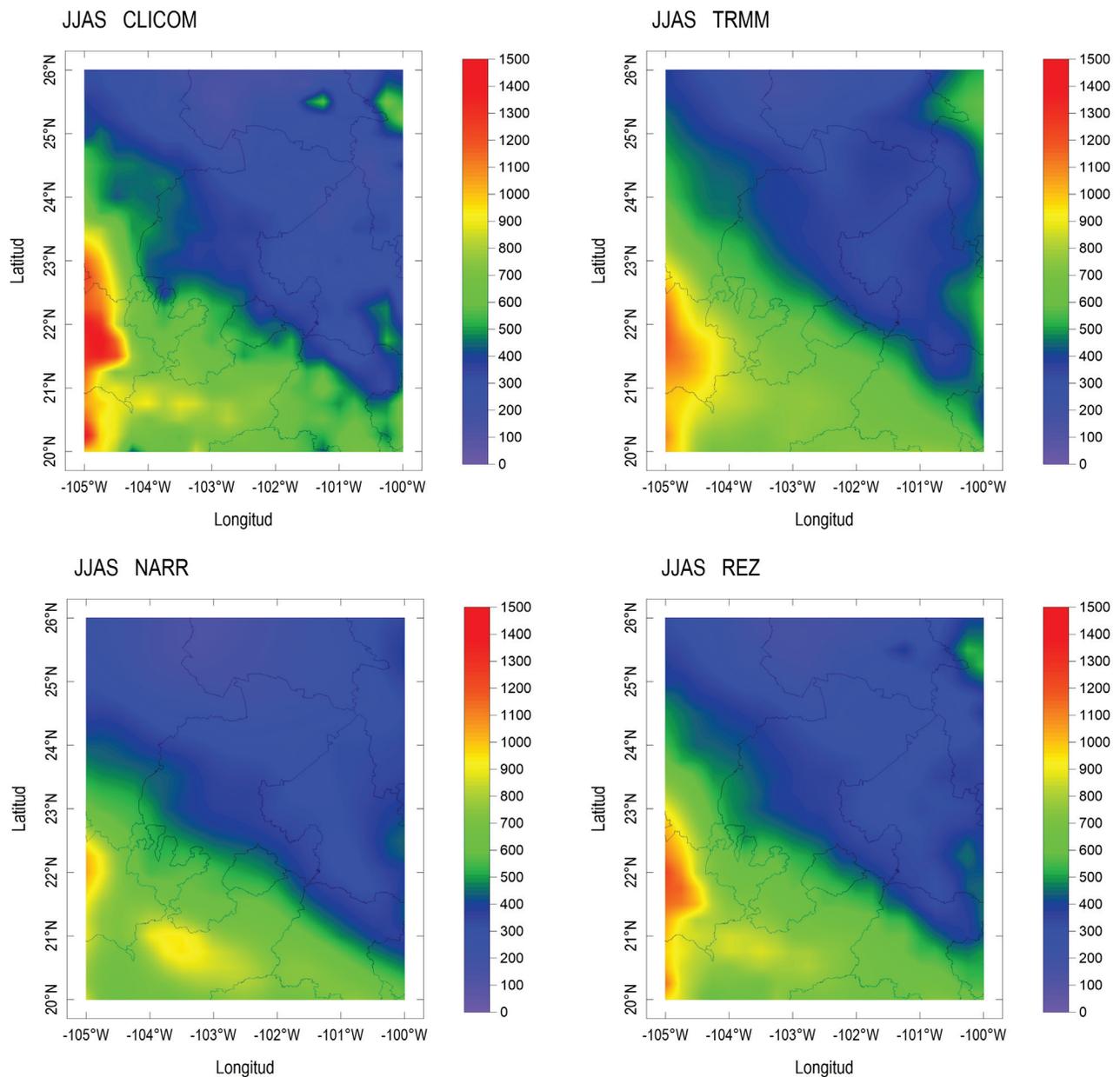


Figura 8. Mallas regulares del promedio de precipitación acumulada (mm) de la lluvia estacional en el periodo 2001 a 2010

(NARR o NCEP) aportan mayormente a la “forma” de la lluvia, y en este caso, se aprovecha la inclusión de datos CLICOM para corregir en amplitud. De esta forma el REZ mejora en gran medida la distribución espacial de la información de precipitación. La información obtenida en cada una de las fuentes de registros meteorológicos, permitió observar la distribución de la lluvia en el área de estudio a una escala más local, la cual muestra que aún se tiene un patrón de ocurrencia de lluvias definido.

VARIABILIDAD DE LAS PRECIPITACIONES

En cuanto a la variabilidad de las precipitaciones, se obtuvo el índice estandarizado de precipitación SPI para un período de 4 meses (SPI4) utilizando los datos del REZ (Figura 9), el cual muestra los periodos secos y de humedad de la región. Se distinguen periodos secos generalizados que oscilan entre los meses de junio y julio, que prolonga la estación estival hasta el mes de septiembre. A esta frecuencia, hay que añadir su intensi-

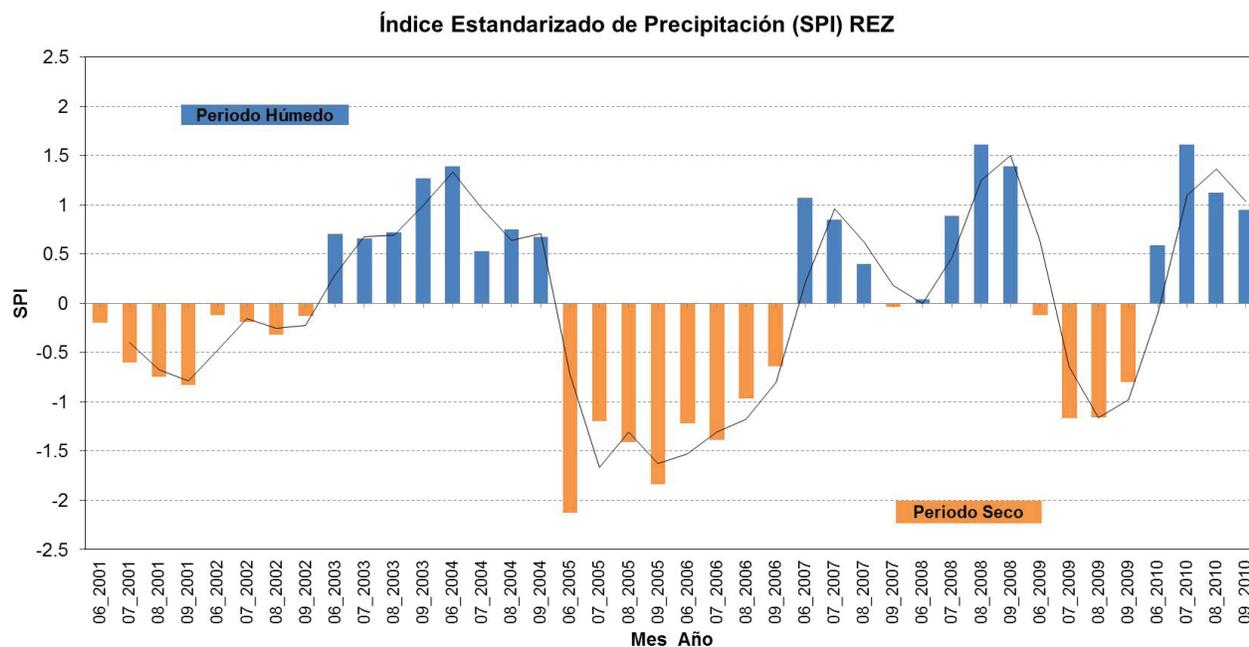


Figura 9. Índice de precipitación estandarizada SPI4, basado en los datos obtenidos del REZ

dad, ya que en uno de estos periodos secos adquiere la categoría de moderadamente seco.

Dentro de los periodos húmedos se observa que la duración se va reduciendo y por el contrario su intensidad va en aumento llegando a la categoría de muy húmedo.

En la Figura 9 se muestran los resultados para el SPI4, de los meses de verano (JJAS). Es interesante notar que existen periodos definidos tanto de veranos húmedos y veranos secos. Es decir, durante cada intervalo dominan factores que definen los periodos y poco se observan veranos intercalados anualmente, incluso meses de un mismo año con déficit (o exceso) de lluvia. Esto indica que las lluvias estacionales en el verano responden a esos mismos factores de manera general en todo el dominio. Dentro de esos factores se ha mostrado que El Niño juega un papel muy importante en las lluvias de verano del norte de México (Méndez & Magaña, 2010).

El impacto en las lluvias en todo México tienen una conexión directa o indirecta con el fenómeno de El Niño y sus diferentes fases combinado con otros factores de gran escala como la Oscilación Décadal del Pacífico y la Oscilación Multidecadal del Atlántico, en menor proporción (Méndez & Magaña, 2010). Por otro lado, la región del Altiplano, muestra características que pueden influir directamente en la distribución de la precipitación. Es decir, adicional a la elevación del terreno (arriba de los 2000 m) se encuentran delimitadas por dos principales formaciones montañosas la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental. Esto genera una

región mayormente aislada a los flujos de humedad tanto del Pacífico como de Atlántico. Con una mayor entrada de humedad en verano, esta región está condicionada a que exista una intensificación de la actividad ciclónica en ambas cuencas oceánicas para el transporte de humedad hacia el continente (Raga *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del algoritmo TRMM_3B43(V7) y NARR para esta región son bastante buenos, lo cual permitió implementar otra fuente de información en el área de estudio, TRMM_3B43(V7) contribuyó con la mejora de los datos en la parte espacial, en cuanto NARR añade la parte dinámica de las precipitaciones y junto con los datos de la red pluviométrica de CLICOM, permitieron generar una base de datos más confiable.

En la información que se obtuvo en cada una de las fuentes de registros meteorológicos, se observó la distribución de la lluvia en el área de estudio a una escala más local, la cual muestra que aún se tiene un patrón de ocurrencia de lluvias definido. Solo para el año 2009 se tuvo una disminución de la precipitación que probablemente fue ocasionada por los efectos del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en su fase fría (La Niña).

La zona de estudio está situada entre las cuencas interiores del Centro-Norte como el Altiplano, que presentan, en general, menor precipitación y su aridez se debe a su situación respecto a la zona de alta presión

subtropical y a la orientación general de las barreras geográficas que la limitan; sin embargo, los resultados muestran que cada vez se presentan años con más períodos húmedos, pero también más periodos secos, es decir, con el tiempo los extremos se comienzan a distanciar, esto puede ser una expresión de mayor variabilidad climática.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto SEP-CONACYT CB-2011-01- 168011.

REFERENCIAS

- Adams, D.K., Comrie, A.C. (1997). The North American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2197-2213. DOI:10.1175/1520-0477(1997)078<2197:TNAM>2.0.CO;2
- Alfaro, E.J., Soley F.J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16 (1), 60-75.
- Bukovsky, M.S., Karoly, D.J. (2007). A brief evaluation of precipitation from the North American Regional Reanalysis. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4), 837-846. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM595.1>
- Cavazos, T. y Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377-386. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370100405>
- Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE [en línea] [fecha de consulta: 31 de marzo de 2014]. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Englehart, P.J., Douglas, A.V. (2002). Mexico's summer rainfall patterns: An analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera*, 15(3), 147-164.
- García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (No. 551.59 G37).
- García, G.M. y Corral, J.A.R. (2004). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (Periodo 1961-2003).
- Haile, A.T., Habib, E., Elsaadani, M., Rientjes, T. (2013). 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. DOI: 10.1016/j.jag.2012.08.012
- Hayes, M., Svoboda, M., Wilhite, D.A., Vanyarkho, O. (1999). Monitoring the 1996 drought using SPI. *Bulletin of American Meteorological Society*, 80(3), 429-438. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2)
- Hayes, M.J. Drought Indices. [en línea] <http://www.civil.utah.edu/~cv5450/swwsi/indices.htm>. Feature Article from *Intermountain West Climate*, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0471743984.vse8593>
- Higgins, W., Ahijevych D., Amador, J., Barros, A. (2006). The NAME 2004 field campaign and modeling strategy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1), 79. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-87-1-79>
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Schneider, U. (1997). The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1), 5-20. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2)
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin E.J. (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). In *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Springer Netherlands, 3-22. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1
- Huffman, G.J. y Bolvin, D.T. (2013). TRMM and other data precipitation data set documentation. NASA, Greenbelt, USA, 1-40.
- Íñiguez, CoM., Ojeda, W., Díaz, C., Mamadou, K., Mercado, R. (2011). Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(1), 57-69.
- López, C., González, E., Goyret, J. (1994). Análisis por componentes principales de datos pluviométricos. a) Aplicación a la detección de datos anómalos. *Estadística (Journal of the Inter-American Statistical Institute)*, 46, 146-147.
- MathWorks (2005), Inc. MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7 (9).
- Méndez, M. y Magaña V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over México and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran P.C., Ebisuzaki, W., Shi, W. (2006). North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 343-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-87-3-343>
- NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA, NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) 2010. [en línea] [fecha de consulta: 18 de junio de 2014]. Disponible en: <http://mirador.gsfc.nasa.gov>
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2005, updated monthly. NCEP North American Regional Reanalysis (NARR). Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory [en línea] [fecha de consulta: 02 de septiembre de 2014]. Disponible en: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds608.0/>
- Raga, G.B., Bracamontes, B., Farfán, L.M., Romero, R. (2013). Landfalling tropical cyclones on the Pacific coast of Mexico: 1850-

2010. *Atmósfera*, 26(2). 209-220. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71072-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71072-5)
- Ramos, L.I.A. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida*. Tesis doctoral, Editorial Universitat Politècnica de Valencia. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/Thesis/10251/27548>
- Ruiz, J. y Saulo, C., Kalnay, E. (2009). Comparison of methods used to generate probabilistic quantitative precipitation forecasts over South America. *Weather and Forecasting*, 24(1), 319-336. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2008WAF2007098.1>
- Tian, Y., Peters, C.D., Choudhury, B.J., Garcia, M. (2007). Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6). 1165-1183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JHM859.1>