



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO



· Teoría y Praxis 33 · 2024 ·

· ISSN 1870 1582 · DOI 10.22403/UQROOMX/TyP33/06 ·



Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo  
DESARROLLO SUSTENTABLE  
DIVISIÓN ACADÉMICA

## Índice estandarizado de precipitación (SPI) para evaluar la sequía meteorológica en Tulum, Quintana Roo

### *Standardized Precipitation Index (SPI) to evaluate meteorological drought in Tulum, Quintana Roo*

Gerardo Daniel López Montejó<sup>1\*</sup>  
María Luisa Hernández Aguilar<sup>1</sup>  
Norma Angélica Oropeza García<sup>1</sup>  
Bonnie Lucía Campos Cámara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

<sup>2</sup>División de Ciencias Políticas y Económicas, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

\*Autor de correspondencia: lmontejo@uqroo.edu.mx

Editor encargado: Dr. Oscar Frausto Martínez

Editora invitada: Dra. Ana Cecilia Travieso Bello

Recibido: 30 de agosto de 2024 - Aceptado: 30 de septiembre de 2024

#### Resumen

Este estudio analiza la sequía en el municipio de Tulum, Quintana Roo, utilizando el Índice estandarizado de precipitación (SPI), desarrollado por McKee y colaboradores (1993,1995), que es ampliamente utilizado en el monitoreo de la sequía debido a su simplicidad y eficacia para analizar periodos húmedos y secos. Se emplearon 43 años de datos de precipitación de CHIRPS (1981 a julio de 2024) procesados en Google Earth Engine®. Los resultados muestran la tendencia del fenómeno a lo largo del tiempo. Se identificaron periodos de sequía extrema en 1986 y 1989, con impactos en la agricultura, ecosistemas y recursos hídricos. El análisis reveló un aumento en la amplitud de las fluctuaciones del SPI en las últimas dos décadas, posiblemente relacionado con el cambio climático global. El estudio proporciona una base para futuras investigaciones sobre la relación entre el cambio climático y la frecuencia e intensidad de las sequías en la región, destacando la importancia de implementar estrategias de gestión adaptativa.

*Palabras clave:* Meteorología, Climatología, Alerta temprana, Recursos hídricos

#### Abstract

This study analyzes drought in the municipality of Tulum, Quintana Roo, using the Standardized Precipitation Index (SPI), developed by McKee et al. (1993,1995), which is a widely used indicator to monitor drought due to its simplicity and effectiveness in analyzing wet and dry periods. Forty-three years of CHIRPS precipitation data (1981 to July 2024) processed in Google Earth Engine®. The results show the trend of the phenomenon over time. Periods of extreme drought were identified in 1986 and 1989, with impacts on agriculture, ecosystems and water resources. The analysis revealed an increase in the amplitude of SPI fluctuations in the last two decades, possibly related to global climate change. The study provides a basis for future research on the relationship between climate change and the frequency and intensity of droughts in the region, highlighting the importance of implementing adaptive management strategies.

*Keywords:* Meteorología, Climatología, Alerta temprana, Recursos hídricos

## Introducción

La sequía meteorológica se define como un fenómeno climático caracterizado por un déficit de precipitación en una región específica en un periodo prolongado de tiempo (Estrada-Medina, et al., 2016 citado por Escobar, 1997). Este fenómeno tiene impactos negativos en el ambiente, las actividades económicas y agropecuarias, la salud humana y los recursos hídricos (Velasco, et al., 2005; Infante Ramírez, 2019).

En 2021, diversos países de América Latina y el Caribe experimentaron los efectos negativos de este fenómeno; los impactos más severos fueron en México, Chile, Brasil, Argentina y Paraguay. En México, más de la mitad del territorio nacional se vio afectado por al menos un episodio de sequía grave (Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2022).

Para cuantificar y analizar la sequía se han desarrollado diversos índices. Uno de los primeros fue el Índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI), propuesto en 1965. El PDSI tenía como objetivo permitir comparaciones de sequía entre diferentes regiones y periodos temporales. Sin embargo, estudios posteriores demostraron que tales comparaciones no eran válidas y conducían a conclusiones erróneas (Alley, 1984; Guttman, 1998; Hayes, et al., 1999). Posteriormente, McKee y colaboradores (1993, 1995) desarrollaron el Índice de precipitación estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés). A diferencia del PDSI, el SPI fue diseñado específicamente para cuantificar el déficit de precipitación en múltiples escalas temporales, lo que representa una ventaja significativa en el análisis de este fenómeno climático.

El SPI es ampliamente utilizado para monitorear la sequía debido a su simplicidad y eficacia para analizar periodos húmedos y secos. Utiliza solo los valores de precipitación para calcular la sequía y puede ser estimado para diferentes escalas temporales, desde un mes hasta 48 meses, lo que permite evaluar la severidad de la sequía a corto y a largo plazos (Pyarali, 2022).

Las respuestas de los sistemas hidrológicos y agrícolas a las anomalías de precipitación se manifiestan en diversas escalas temporales. Los parámetros meteorológicos y edáficos, relevantes para la agricultura, exhiben una sensibilidad a fluctuaciones pluviométricas en periodos entre 1 y 6 meses. En contraste, los componentes hidrológicos de mayor envergadura, como los caudales fluviales, los sistemas de almacenamiento hídrico y los acuíferos, presentan una respuesta en rangos de 6 a 24 meses o incluso periodos más extensos (OMM, 2022).

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la dinámica temporal de los eventos de sequía en el municipio de Tulum mediante la aplicación del SPI. La metodología empleada se basa en el análisis de una serie temporal de 43 años de datos pluviométricos (1981 a 2024)

obtenidos de CHIRPS (Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station Data) [Funk et al., 2015], procesados mediante la plataforma geoespacial Google Earth Engine®, que es una herramienta web para el análisis y procesamiento de datos geoespaciales (Perilla & Mas, 2020).

## Marco de referencia

El fenómeno de la sequía presenta una complejidad conceptual que se refleja en diversas categorizaciones, dependiendo del contexto de su aplicación y análisis (Valiente, 2021). La definición fundamental se basa en un déficit de precipitación durante un periodo prolongado, aunque la cuantificación de este déficit es variable y depende de las características climáticas específicas de la región afectada.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1975, citado en Núñez et al., 2007) propuso una clasificación tripartita de la sequía: meteorológica, hidrológica y agrícola. Esta categorización ha sido ampliamente adoptada en la literatura científica.

La sequía meteorológica se define como una desviación negativa estadísticamente significativa de la precipitación respecto a la media climatológica en un periodo determinado (Valiente, 2021). Debido a la variabilidad espacial de los regímenes de precipitación, no es factible establecer umbrales universales para su definición, lo que resulta en caracterizaciones específicas para cada región climática.

La sequía agrícola se caracteriza por un déficit de humedad en el suelo que impacta negativamente el desarrollo y rendimiento de los cultivos. Este fenómeno se exacerba cuando el déficit de precipitación coincide con condiciones de alta temperatura, baja humedad relativa y elevada radiación solar, lo que intensifica los procesos de evapotranspiración (Quiring & Papakryiakou, 2003; Wu et al., 2004; Narasimhan & Srinivasan, 2005, citados en Hernández et al., 2022). La duración de este tipo de sequía puede oscilar entre 1 y varios meses.

La sequía hidrológica se manifiesta cuando la persistencia de condiciones atmosféricas deficitarias en precipitación afecta significativamente la recarga de cuerpos de agua superficiales y acuíferos. Este fenómeno se evidencia por una disminución en los volúmenes de escorrentía e infiltración (Núñez et al., 2007).

Estos tres tipos de sequía no son mutuamente excluyentes, sino que representan un continuo en la evolución temporal y la propagación de los impactos del déficit hídrico a través del ciclo hidrológico y los sistemas ecológicos y socioeconómicos asociados (Guo et al., 2018).

La Península de Yucatán se caracteriza por un régimen de precipitación complejo. Según Orellana y colaboradores (2009, citado en Estrada-Medina, et al., 2016), aunque generalmente predomina un régimen de lluvias de

verano, algunas áreas presentan un patrón intermedio o una distribución más uniforme de precipitaciones con tendencia a concentrarse en verano.

Un factor crucial en la dinámica de sequías en la región es la “sequía de medio verano” o “canícula”, que es un patrón de precipitación que tiene dos periodos húmedos separados por un periodo más seco en medio del verano (Zhao and Zhang, 2021 citado por García-Franco et al., 2023). Este fenómeno intraestival es común en la Península de Yucatán, así como en gran parte de México, Centroamérica y el Caribe. A pesar de su importancia, los mecanismos que rigen la estacionalidad de las precipitaciones no se comprenden completamente (García-Franco et al., 2023).

## Métodos

Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento temporal de la sequía en el municipio de Tulum utilizando el SPI. Para lograrlo, se utilizaron 43 años de datos de precipitación de CHIRPS en la plataforma web Google Earth Engine®.

CHIRPS constituye un conjunto de datos pluviométricos de cobertura cuasiglobal, de resolución media (0.05°), abarcando un periodo de más de cuatro décadas de recolección de datos. Esta base de datos integra información proveniente de imágenes satelitales con mediciones *in situ* de estaciones meteorológicas terrestres. CHIRPS genera series temporales de precipitación en formato reticular (Funk et al., 2015).

El cálculo del SPI se fundamenta en los registros históricos de precipitación para un lugar y periodo específicos (OMM, 2022). Dichos registros se ajustan a una distribución de probabilidad adecuada. Comúnmente se utiliza una distribución Gamma, dado que se adapta bien a la naturaleza de los datos de precipitación, que son positivos y asimétricos (Liu et al., 2021; González et al., 2011). A continuación, se transforma en una distribución normal, de manera que el valor medio del SPI calculado sea 0, valores positivos indican precipitaciones por encima de la mediana y valores negativos señalan un déficit en la precipitación (Edwards & McKee, 1997).

Para el cálculo del SPI, se establecieron categorías para los valores resultantes. Estas categorías se basan en la *Guía del usuario del Índice Normalizado de Precipitación* (OMM, 2012). Los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana. Es decir, los valores negativos indican déficit y los positivos, exceso (Tabla 1).

Para el municipio de Tulum, se cuantificaron las condiciones de déficit o exceso de precipitación para 6, 12 y 24 meses. Los datos obtenidos para el cálculo de SPI a través de Google Earth Engine® cubrieron un periodo de 43 años (1981 a julio 2024).

**Tabla 1.** Categorías de sequía con base en el Índice estandarizado de precipitación

| SPI            | Categoría de precipitación | Frecuencia teórica de ocurrencia |
|----------------|----------------------------|----------------------------------|
| 2.0 o más      | Extremadamente húmedo      | 1 en 50 años                     |
| 1.5 a 1.99     | Severamente húmedo         | 1 en 20 años                     |
| 1.0 a 1.49     | Moderadamente húmedo       | 1 en 10 años                     |
| 0.50 a 0.99    | Ligeramente húmedo         | 1 en 3 años                      |
| -0.49 a 320.49 | Normal                     | 1 en 3 años                      |
| -0.5 a -0.99   | Ligeramente seco           | 1 en 3 años                      |
| -1.00 a -1.49  | Moderadamente seco         | 1 en 10 años                     |
| -1.5 a -1.99   | Muy seco                   | 1 en 20 años                     |
| -2 o menos     | Extremadamente seco        | 1 en 50 años                     |

Fuente: OMM, 2012

## Área de estudio

El área de estudio comprende el municipio de Tulum, ubicado en el extremo meridional del Corredor Turístico Cancún-Tulum, conocido como la Riviera Maya, en el estado de Quintana Roo, sureste de México. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población del municipio al 2020 era de 46 721 habitantes (INEGI, 2020).

El municipio comprende una superficie de 2040.94 km<sup>2</sup>. Sus límites geográficos están definidos de la siguiente manera: al norte colinda con el municipio de Solidaridad; al este con el municipio de Cozumel y el Mar Caribe; al sur con el municipio de Felipe Carrillo Puerto, y al oeste con el estado de Yucatán (Figura 1).

Los suelos del municipio se conforman de leptosoles y regosoles en rocas calizas provocando que en periodos de lluvias el agua se infiltre con rapidez, disolviendo la roca y formando un relieve denominado karst con formaciones de dolinas, la casi nula presencia de corrientes superficiales, un sistema subterráneo de agua y la abundancia de cuevas y cavernas (De Waele, et al., 2011).

Según con la clasificación climática de Köppen, la Península de Yucatán tiene un clima cálido subhúmedo con temperatura promedio anual mayor a 22 °C y ocurrencia de lluvias en verano y otoño (junio a noviembre), con un gradiente de precipitación general de seco hacia el noroeste (600 mm) y más húmedo hacia el sureste (1400 mm), clasificado como Aw (García, 1988). Las precipitaciones que se presentan son principalmente convectivas y por influencia de los vientos alisios que traen humedad del Atlántico (Strahler y Merali, 2008).

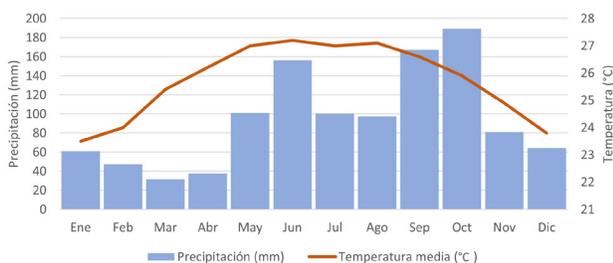
Figura 1. Mapa del municipio de Tulum



Fuente: OMM, 2012

El municipio de Tulum presenta un tipo de clima cálido subhúmedo [Ax'(w1)] con temperatura promedio anual mayor de 22 °C, lluvias en verano y alto porcentaje de lluvia invernal (10.2 %) (García, 2004). La menor cantidad de días con lluvia es durante el mes de abril (3.2 días), mientras que el mes más lluvioso es septiembre (12.8 días), como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2. Climograma de la estación meteorológica en la localidad de Tulum, 1991 – 2020 (Latitud: 20.2255°, Longitud: -87.45805°)



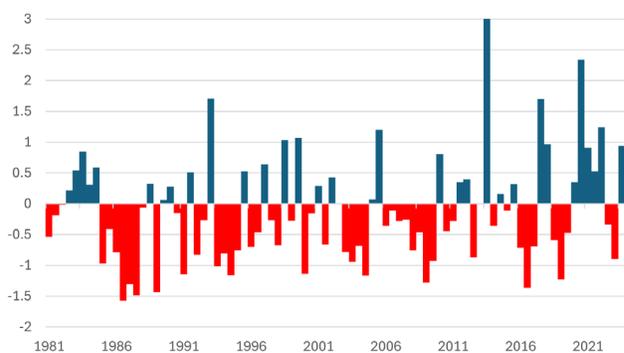
Fuente: OMM, 2012

## Resultados

Los resultados muestran la variabilidad del SPI durante el periodo de estudio (**Figuras 3 a 5**) y permiten la identificación de patrones y tendencias en la frecuencia, intensidad y duración de los eventos de sequía en la región.

La distribución del SPI de 6 meses (**Figura 3**), a lo largo del periodo analizado (desde enero de 1981 hasta julio de 2024), muestra las fluctuaciones interanuales. Se puede observar que desde el año 1985 al segundo semestre de 1987 los valores del SPI fueron negativos. De acuerdo con la **Tabla 1**, se han registrado algunos periodos ligeramente secos, como los que hubo entre julio de 1993 a enero de 1995, enero de 2003 a julio de 2004, de enero de 2008 a julio de 2009; y los de enero de 2016 a enero de 2017. De enero de 1985 a julio de 1987 se registró un periodo muy seco; el segundo semestre del año 1986 registró el valor más alto de SPI (-1.57)

Figura 3. Gráfica del SPI de 6 meses



La gráfica de la distribución interanual del SPI 12 meses (**Figura 4**) parece indicar una disminución de años con valores de SPI negativos en el periodo 2010 a 2024 respecto de las décadas anteriores. Los años con valores más altos de SPI han ocurrido en este periodo (2013: 2.13, 2020: 2.23 y 2023:2.21).

En el periodo 2001 a 2010 se registraron 9 años con valores de SPI negativos, esta década muestra el mayor de número de años con valor ligeramente seco (-0.5 a -0.99). Las dos décadas anteriores (1981 a 2000) presentan los valores negativos de SPI más importantes (de ligeramente seco a muy seco), siendo que en 1986 se registró el valor más bajo del SPI de -1.872, seguido por 1993 (-1.194) y 1994 (-1.279).

El SPI de 24 meses (**Figura 5**) registra periodos bianuales de la anomalía de la precipitación; la gráfica muestra un amplio periodo con valores negativos, que abarca desde 1984 a 1996 (12 años), otro periodo seco de 2000 a 2008 (8 años) y valores positivos del SPI a partir del año 2010.

Figura 4. Gráfica del SPI de 12 meses

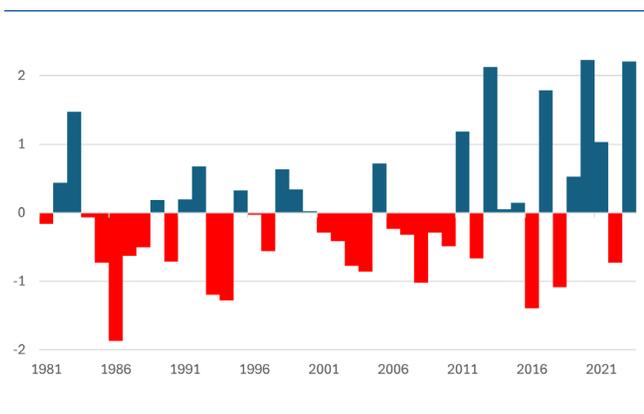
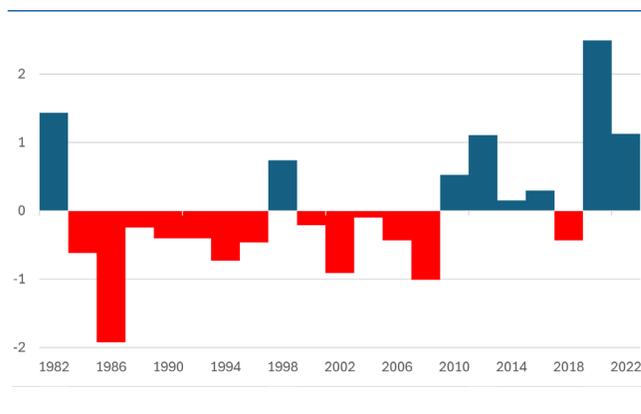


Figura 5. Gráfica del SPI de 24 meses



## Discusión

La intensidad de las precipitaciones tiene un impacto crucial en la configuración del espacio geográfico, por lo que comprender su distribución y variación a lo largo del tiempo es fundamental para la planificación territorial o para investigaciones de climatología aplicada (Blanco, 2020).

Algunos estudios han analizado el comportamiento de la precipitación en la región donde se ubica el municipio de Tulum (Península de Yucatán) y han llegado a la conclusión de que este fenómeno presenta una alta variabilidad (Romero et al., 2020; Rodríguez Morales et al., 2023; Márdero et al., 2012), tal como puede observarse en las Figuras 3 a 5. Por lo tanto, el SPI no representa de la mejor manera los periodos de sequía en las zonas tropicales (Romero, 2020) como el municipio de Tulum.

Los resultados revelan la ocurrencia de episodios de sequía en la región de Tulum, como los que sucedieron en 1985-1987 y 1994-1995, siendo el periodo muy seco de julio de 1986 (SPI-12 de -1.872) el más valor más bajo para el periodo de estudio. Esto coincide con lo encontrado por Márdero et al. (2012) para ocho estaciones meteorológicas ubicadas en la región del estudio y a lo reportado por Bárcena et al. (2010) “en el periodo de 1981 a 1999 la precipitación anual de la Península de Yucatán presentó una reducción del 10 al 15 % en la estación más seca y más del 30 % en la estación más lluviosa” señalado en Estrada & Cobos (2014).

El aumento en la frecuencia de periodos húmedos (valores de SPI positivos) observado en las últimas dos décadas en el municipio de Tulum podría estar relacionado con el cambio climático global (Lobato & Mejía, 2021; Márdero, 2012)

Aun cuando la intensidad de la sequía no representa un gran peligro, produce pérdidas económicas, aumento de

costos de producción y bajo rendimiento en las actividades agropecuarias; además de aumentar el riesgo por incendios forestales (Estrada et al., 2016; Márdero et al., 2012, Romero & Alfaro, 2024; UQROO-CIG, 2023).

La mejor comprensión de la variabilidad de la precipitación para el municipio de Tulum ayudaría a aumentar la productividad y eficiencia de la agricultura de la región (Márdero, 2018) sobre todo cuando los agricultores de la región han percibido una reducción en las lluvias (Romero & Alfaro, 2024).

## Conclusiones

La aplicación del SPI como herramienta diagnóstica ofrece un método estandarizado y eficiente para la evaluación continua de las condiciones de sequía a través del uso de bases de datos reticuladas. Esta aproximación metodológica tiene el potencial de optimizar los procesos de toma de decisiones en el ámbito agropecuario y ambiental, así como de mejorar significativamente la gestión integral de los recursos hídricos en la zona de estudio.

La localización geográfica de Tulum, y su creciente importancia como destino turístico, subraya la relevancia de comprender la dinámica de los fenómenos climáticos, como la sequía, en la región.

Los resultados presentados permiten evaluar la dinámica temporal de las anomalías negativas de lluvia en el municipio de Tulum utilizando el SPI como una aproximación a las condiciones de la variabilidad de la precipitación en este municipio y lo que aporta en el conocimiento de las implicaciones en la disponibilidad de recursos hídricos, sentando las bases para futuras investigaciones y para el diseño de estrategias de adaptación y mitigación frente a los impactos de la sequía en el municipio de Tulum.

## Referencias

- Alley, W. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100-1109. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>
- De Waele, J., Parise, M. & Plan, L. (2011). Geomorphology and natural hazards in karst areas: A review. *Geomorphology*, 134, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.001>
- Edwards, D. C., and T. B. McKee. 1997. *Characteristic of 20th century drought in the United States at multiple timescales. Climatology Report No. 97-2. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, U.S.A.*
- Escobar, A. (1997). *Las sequías y sus impactos en las sociedades del México decimonónico, 1856-1900. Historia y desastres en América Latina*, Vol. II (pp. 2-24). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Volumen II. <http://www.desenredando.org/public/libros/1997/hydv2/hydv2-todosep-09-2002.pdf>
- Estrada-Medina, H., Cobos-Gasca, V., Acosta-Rodríguez, J., Fierro, S. & Morales- Guadarrama, A. (2016). La sequía de la Península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(5), 151-165.
- Estrada Medina, H. & Cobos Gasca, V. (2014). *Programa Nacional contra la sequía PRONACOSE. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación del Consejo de Cuenca Península de Yucatán, versión 2014*. Universidad Autónoma de Yucatán. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99947/PMPMS\\_CC\\_Pen\\_nsula\\_de\\_Yucat\\_n\\_R.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99947/PMPMS_CC_Pen_nsula_de_Yucat_n_R.pdf)
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., et al. (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>
- García-Franco, J. L., Chadwick, R., Gray, L. J., Osprey, S., & Adams, D. K. (2023). Revisiting mechanisms of the Mesoamerican Midsummer drought. *Climate Dynamics*, 60(1-2), 549-569. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06338-6>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* 5th ed.; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía: CDMX, México, 2004; ISBN 970-32-1010-4.
- González-Camacho, J. M., Pérez-Rodríguez, P., & Ruelle, P. (2011). Estimación de índices normalizados de lluvia mediante la distribución gamma generalizada extendida. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 65-76. Recuperado en 23 de septiembre de 2024, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222011000400005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000400005&lng=es&tlng=es).
- Guo, H., Bao, A., Liu, T., Jiapaer, G., Ndayisaba, F., Jiang, L., et al. (2018). Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015. *Science of The Total Environment*, 624, 1523-1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.120>
- Guttman, N. (1998). Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34, 113-121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- Hayes, M., Hayes, M., Svoboda, M., Wilhite, D. & Vanyarkho, O. (1999). Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 80, 429-438. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Hernández Aguilar, M. L., Sánchez Casanova, D., López Montejo, G. D., & Cabrera Guillerme, R. (2022). Monitoreo de la sequía mediante el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) a través del uso de geotecnologías. En: *Análisis territorial y el uso de tecnologías geoespaciales* (primera, pp. 39-56). UQROO. <https://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/3993>
- Infante Ramírez, A. M., Arce Ibarra, K. D. (2019). Less Rain and More Heat?: Smallholders' Perception and Climate Change Adaptation Strategies in Tropical Environments. *Sociedad y Ambiente*, (21), 77-97. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455761515004>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos-abiertos>
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1), 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>
- Lobato Sánchez, R., & Mejía Estrada, P. I. (2021). Perspectiva sobre la sequía actual en México. *Perspectivas IMTA*, 2(16). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-16>
- Márdero, S., Schmook, B., López-Martínez, J. O., Cicero, L., Radel, C., & Christman, Z. (2018). The Uneven Influence of Climate Trends and Agricultural Policies on Maize Production in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Land*, 7(3), 80. <https://doi.org/10.3390/land7030080>
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., et al. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas*, (78), 19-33. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112012000200003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000200003&lng=es&tlng=es).
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. (1995). *Drought monitoring with multiple time scales*. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society: 233-236.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston: 179-184.
- Núñez, D., Muñoz-Robles, C., Reyes-Gómez, V., Velasco, I. & Gadsden, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia*, 41(3), 253-262.
- Orellana, R., Espadas Manrique, C., Conde, C. & Gay García, C. (2009). *Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2022). *Estado del clima en América Latina y el Caribe - 2021*. Organización Meteorológica Mundial. <https://library.wmo.int/viewer/28347/download?file=1295WMOStateoftheClimateinLAC2021es.pdf&type=pdf&navigator=1>
- OMM. (2012). *Índice Normalizado de Precipitación - Guía del usuario*. <https://www.droughtmanagement.info/literature/WMOstandardizedprecipitationindexuserguidees2012.pdf>
- Perilla, G. A., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): Una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*, 0(101). <https://doi.org/10.14350/rig.59929>

- Pyarali, K., Peng, J., Disse, M., & Tuo, Y. (2022). Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9(1), 172. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01279-5>
- Rodríguez Morales, U., Corona Vásquez, B., Prieto González, R., & Martínez Austria, P. (2023). Influence of the AMO and its modulation of the ENSO effects on summer precipitation in Mexican coastal regions. *Water Practice and Technology*, 18(2), 304-319. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.015>
- Romero, D., & Alfaro, E. J. (2024). Spatiotemporal variability of the rainy season in the Yucatan Peninsula. *International Journal of Climatology*, 44(8), 2561-2574. <https://doi.org/10.1002/joc.8468>
- Romero, D., Alfaro, E., Orellana, R., & Hernandez Cerda, M.-E. (2020). Standardized Drought Indices for Pre-Summer Drought Assessment in Tropical Areas. *Atmosphere*, 11(11), 1209. <https://doi.org/10.3390/atmos11111209>
- Strahler, A. and Z. Merali. (2008). *Visualizing physical geography*. Wiley Visualizing y The National Geographic Society.
- UQROO-CIG. (2018). *Atlas Municipal de Riesgo de Tulum 2023*. Universidad de Quintana Roo. Centro de Información Geográfica. Chetumal, Quintana Roo. México.
- Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías, métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59-80. <https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06>
- Velasco, I., Ochoa, L. & Gutierrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestion. *Región y sociedad*, 17, 35-71. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sciarttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es>
- Zhao, Z., & Zhang, X. (2021). Evaluation of methods to detect and quantify the bimodal precipitation over Central America and Mexico. *International Journal of Climatology*, 41, E897-E911.

