

¿Acabo la sequía en Sinaloa?: Un análisis desde un clima cambiante, con miras a la toma de decisiones informadas

Enrique Morales-Acuña^{1, 2*}; Andrea Manrique-Cantillo^{1, 2}; Gabriel Santiago Gutiérrez-Cárdenas^{1, 3}; Diana Cecilia Escobedo-Urías^{1, 2}

¹ Instituto Politécnico Nacional (IPN)—Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Sinaloa, Departamento de Medio Ambiente. Laboratorio de Oceanografía Satelital y Clima (LOSyC), Bulevar Juan de Dios Batíz Paredes 250, Colonia San Joachin, Guasave, Sinaloa, CP 81101, México.

² Secretaría de Ciencias Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI), CP 03940, México, México.

³ Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UJTL) —Facultad de Ciencias Básicas y Modelado, 110821, Bogotá D.C., Colombia.

*Correspondencia: emoralesacu1980@gmail.com

Si bien las expectativas de un verano lluvioso en Sinaloa han generado alivio tras un periodo de intensa sequía, la ciencia demanda un análisis más profundo antes de declarar victoria sobre este fenómeno complejo. La noticia que anuncia el "fin de la sequía" requiere una evaluación rigurosa de datos y tendencias a largo plazo. En este documento, exploraremos, desde una perspectiva científica, los elementos que deben considerarse para una toma de decisiones informada sobre el estado hídrico de la región. Inicialmente daremos una visión general de lo que es el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), para luego describir los impactos que este tiene en el clima de Sinaloa. El ENOS se define como un fenómeno climático natural recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas del Océano Pacífico tropical específicamente en las zonas centro y oriente de este. Tiene tres fases: El Niño, La Niña y una fase neutral. En las dos primeras fases las masas de agua superficiales se calientan o enfrían entre 1 °C y 3 °C, por encima de lo normal, alterando con esto los patrones de viento y las temperaturas del mar, lo que a su vez afecta los patrones climáticos globales, mientras que, en la tercera, se tiene las condiciones normales en el Océano Pacífico ecuatorial y el clima tiende a obedecer los patrones climáticos históricos. Particularmente en Sinaloa, estos fenómenos climáticos se presentan con efectos diversos que se asocian a la temporada y la ubicación de las anomalías en el Océano Pacífico Ecuatorial y la teleconexión que exista con el Modo Meridional del Pacífico Norte. Análisis previos realizados por el grupo del Laboratorio de Oceanografía Satelital y Clima del Instituto Politécnico Nacional, determinaron que para evaluar el impacto de este fenómeno de variabilidad climática en variables océano-atmosféricas es necesario saber dónde

se centran las anomalías en la superficie del océano ecuatorial, y en función de índices centrados en estas regiones identificar cuando existe una coherencia/no-coherencia para seleccionar los años donde realmente hay efectos significativos, bajo ese requisito se tuvieron en cuenta los años 1994, 1997, 2009, 2014, 2015 y 2019 para El ENOS condición El Niño, mientras que para ENOS condición La Niña se seleccionaron los años 1999, 2000, 2007, 2009, 2011, 2012, 2021 y 2024. Para la condición neutral se tuvieron en cuenta la climatología basada en la normal climatológica (1991-2020) propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). A continuación, abordaremos estos fenómenos y resaltaremos las implicaciones que tienen en la temporada de lluvia (junio-septiembre) e inviernos (diciembre-febrero) en el estado de Sinaloa.

ENOS condición El Niño y efectos en Sinaloa

En la fase El Niño los vientos alisios que soplan de este a oeste a lo largo del Ecuador se debilitan o incluso se invierten, soplando de oeste a este. Esta fluctuación en los vientos alisios permite que la masa de agua cálida que es acumulada normalmente en el oeste se desplace hacia el este, elevando la temperatura del mar en el Pacífico central y oriental (Fig. 1).

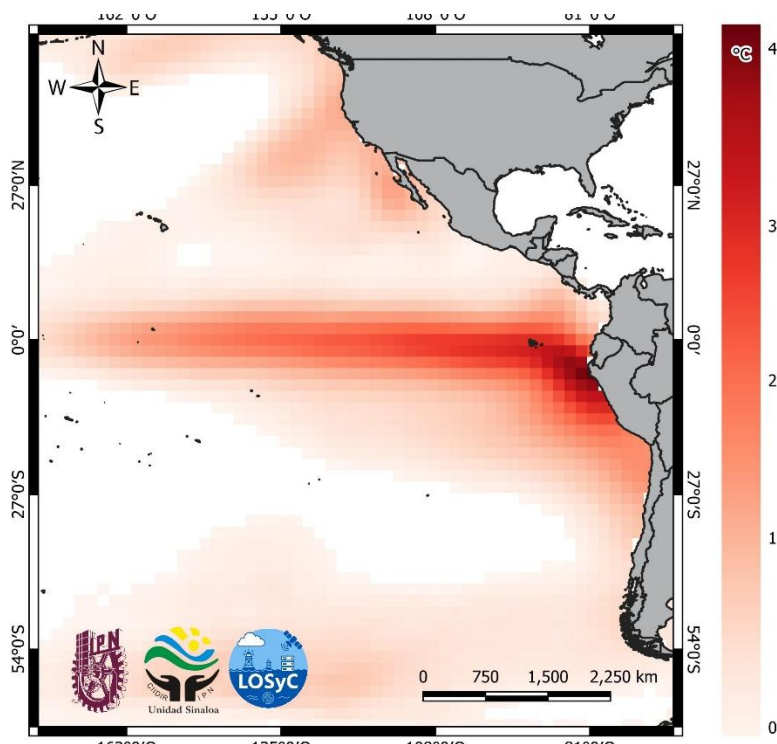


Figura 1. Anomalías de la temperatura superficial del mar respecto al periodo 1991-2020 para el periodo diciembre 1997-abril 1998 (ENOS condición El Niño).

Este calentamiento anómalo del océano tiene profundas consecuencias en la atmósfera. El aire más cálido y húmedo sobre las aguas más cálidas asciende,

intensificando la convección y alterando los patrones de presión atmosférica. Esto se manifiesta en una disminución de la presión en el Pacífico oriental y un aumento en el oeste, lo que se conoce como la Oscilación del Sur. Este fenómeno puede verse de alguna manera intensificado según donde se centren las aguas cálidas y la interacción que este tenga con el Modo Meridional del Pacífico Norte, otro modo de variabilidad climática que afecta de alguna manera los patrones climáticos en esta región del continente. De cara a los efectos que este fenómeno tiene a nivel global, estudios recientes revelan que se prevé que El Niño crezca a un ritmo más rápido, que persista más tiempo sobre el Pacífico oriental y que tenga impactos remotos más fuertes y distintos. Se prevé un aumento del 20% en la frecuencia de aparición de El Niño en el siglo XXI en comparación con la variabilidad natural prevista. Este hallazgo también sugiere que la influencia antropogénica en la ocurrencia de El Niño surgirá además de la variabilidad natural para 2051-2100.

En ese sentido, para la temporada de lluvias (junio-septiembre) de años condición El Niño se encuentra para Sinaloa una distribución espacial diferencial en la que las precipitaciones alcanzan hasta 160 mm, principalmente, en la región sur del estado, donde se encuentran los municipios: Cosalá, Elota, San Ignacio, Mazatlán, Concordia y Escuinapa (Fig. 2b). La región de la Sierra Madre Occidental mantiene precipitaciones entre 130 mm y 145 mm, mientras que la región costera al norte y centro del estado presenta las menores precipitaciones (< 90 mm). Los inviernos (diciembre-febrero) condición El Niño en Sinaloa se presentan con un gradiente longitudinal donde los máximos (35 mm) se encuentran en la región de la Sierra Madre Occidental y mínimos (12 mm) en la región costera, principalmente en los municipios Ahome, Guasave, Angostura y Culiacán.

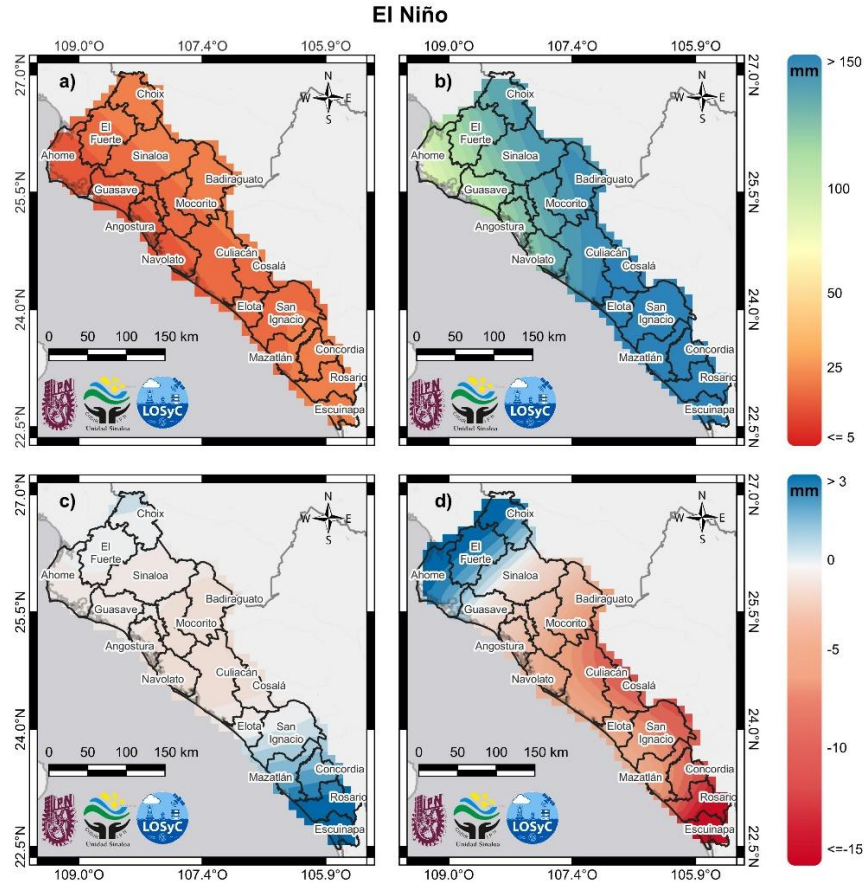


Figura 2. Compuesta de la precipitación total (a y b) y anomalías basadas en la normal climatológica 1991-2020 (c y d), para las temporadas: invierno (Diciembre-febrero) (a y c), lluvia (junio-septiembre) (b y d).

Adicionalmente, podemos identificar que, aunque se presenten lluvias en la temporada de verano e invierno, como se muestra en la Fig. 2 a y b, al comparar estos valores con la normal climatológica actual (1991-2020), los efectos no son muy alentadores. En el caso del verano la región central y sur del estado donde predominan disminuciones entre 3 mm y 20 mm, mientras que, al norte del estado en los municipios Ahome, El Fuerte, Choix, Guasave y Sinaloa, la situación resulta alentadora puesto que, predominan incrementos > 3mm por encima de la normal climatológica (Fig. 2d). Si este fenómeno tiene lugar en las temporadas de invierno (diciembre-febrero) (Fig. 2d), causaría decrementos en casi todo el estado, con anomalías que llegan hasta 5 mm por debajo de la normal climatológica, exceptuando los municipios Escuinapa, Rosario, Concordia y Mazatlán, donde se presentan incrementos hasta de 3 mm por arriba de lo normal. En términos generales, nos enfrentamos a un cambio en la concepción histórica de la respuesta que los patrones espaciales y temporales de la precipitación solían tener con la llegada de este fenómeno de variabilidad climática, donde se tenía la creencia de que durante las temporadas de verano no llovía, mientras que, en el invierno existían precipitaciones de hasta 3 mm por arriba de lo normal en todo el estado, tal como lo exponen Magaña et al. (2003).

ENOS condición La Niña y efectos en Sinaloa

Este fenómeno se caracteriza por un enfriamiento anómalo de las aguas superficiales del océano Pacífico tropical central y oriental (Fig. 3). Este enfriamiento va acompañado de cambios significativos en los patrones de viento y presión atmosférica a lo largo del Pacífico ecuatorial. En esta fase los vientos alisios se fortalecen permitiendo un afloramiento de aguas más frías, al mismo tiempo el agua cálida se acumula aún más en el Pacífico Occidental. Estos enfriamientos y calentamientos causan que el aire más frío sobre el Pacífico central y oriental suprima la convección y con ello las lluvias en esta zona, mientras que, el aire más cálido en el Pacífico Occidental permitirá una mayor actividad convectiva, lo que podría llevar al aumento de lluvias en esa región.

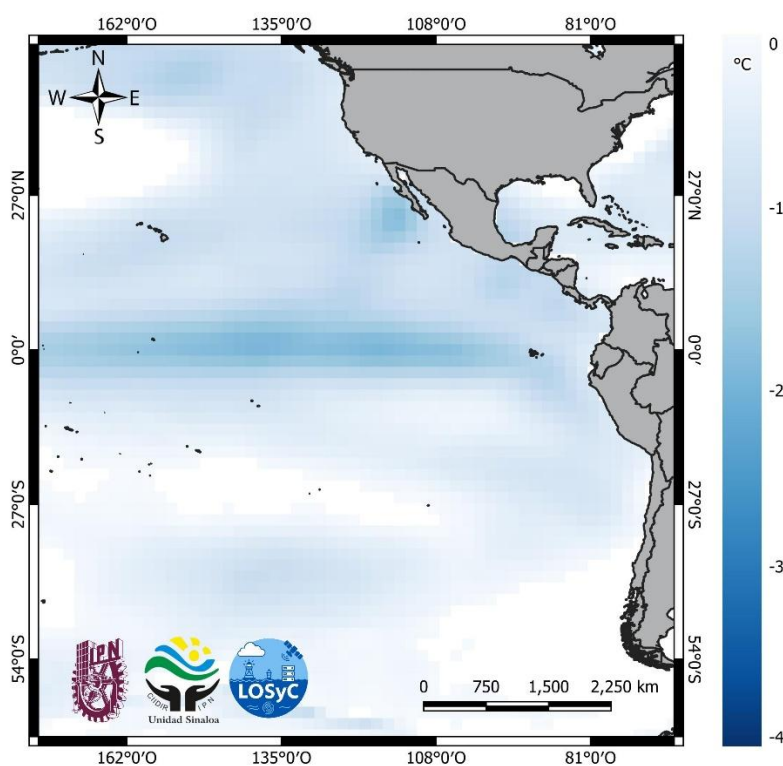


Figura 3. Anomalías de la temperatura superficial del mar respecto al periodo 1991-2020 para el periodo diciembre 1999-abril 2000 (ENOS condición La Niña).

La alteración en estos patrones atmosféricos a lo largo del Pacífico ecuatorial también influye en los patrones climáticos a nivel global, incluyendo en Sinaloa (Fig. 4), donde la precipitación para la temporada junio-septiembre (Fig. 4b) alcanza durante estos eventos hasta 150 mm en la región sur del estado en los municipios Elota, San Ignacio, Mazatlán, Concordia, Rosario y Escuinapa, mientras que, en el centro y norte del estado la precipitación solo logra alcanzar hasta 80 mm en la zona costera y 110 mm en la región de la Sierra Madre Occidental. El escenario durante la temporada invernal en comparación con la temporada de lluvias es crítico a causa

de la disminución muy intensa que existe. Particularmente en esta temporada, la precipitación muestra un gradiente longitudinal con dirección este-oeste ubicándose las máximas (25 mm) precipitaciones en la Sierra Madre Occidental y mínimas (< 5 mm) en la zona costera del estado.

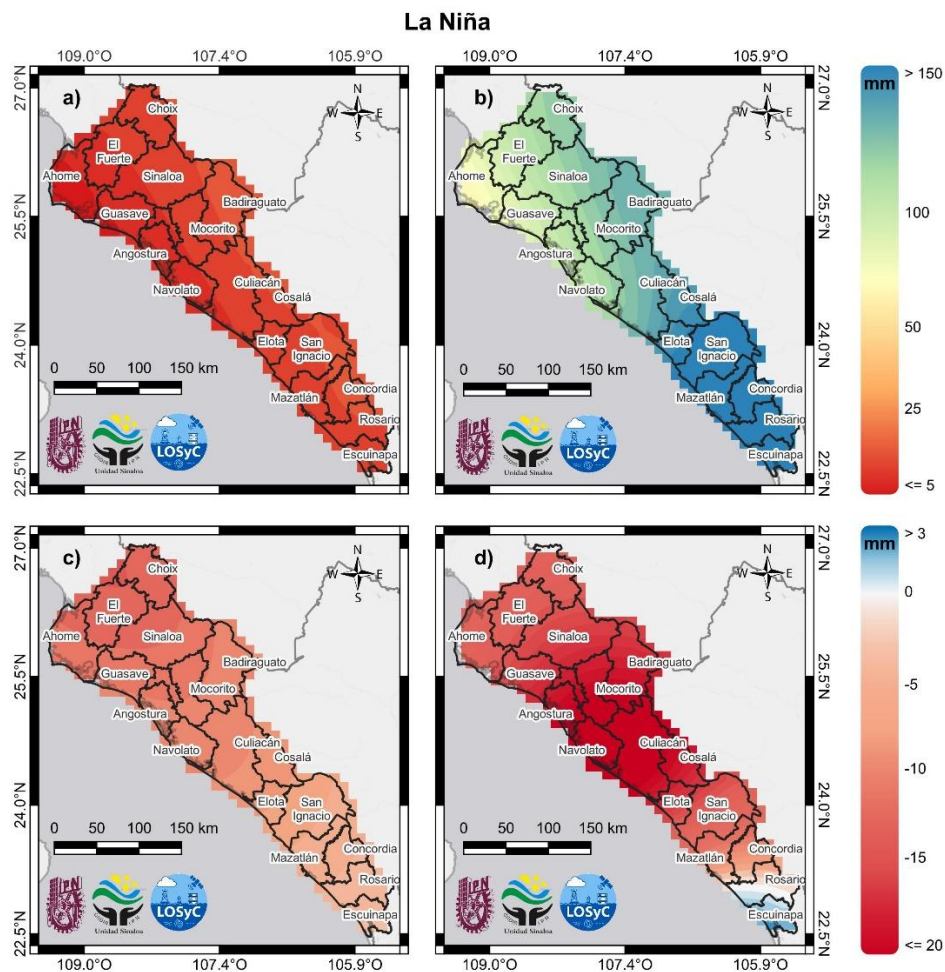


Figura 4. Compuesta de la precipitación total (a y b) y anomalías basadas en la normal climatológica 1991-2020 (c y d), para las temporadas: invierno (Diciembre-febrero) (a y c), lluvia (junio-septiembre) (b y d).

Los efectos anteriores se perciben de una mejor manera cuando evaluamos los cambios teniendo en cuenta la normal climatológica 1991-2020 (Fig. 4 c y d). En tal caso, durante la temporada de lluvia (Fig. 4d), predominan disminuciones en todo el estado, siendo más intensas en los municipios ubicados al centro (Angostura, Mocorito, Navolato, Culiacán y Cosalá) donde alcanza disminuciones > 20 mm, en contra parte a esto, al sur del estado, en el municipio de Escuinapa y sur de Rosario se presentan incrementos hasta de 3 mm. Para el invierno condición La Niña (Fig. 4 c), el panorama es desalentador al encontrar disminuciones en todo el estado de Sinaloa, siendo más intensas en el centro y norte del estado. Al igual que El Niño, en esta fase de El ENOS se ratifican los cambios debido a que la concepción era que este evento se caracterizaba por intensas sequía al norte, en la región de la

Sierra Madre Occidental (Magaña et al., 2003), pero en la actualidad vemos como esta sequía se ha extendido en las dos temporadas y para casi todo el territorio estatal (Fig. 4c y d).

ENOS condición Neutral y efectos en Sinaloa

La llegada de El ENOS condición neutral significa que el forzamiento proveniente de El Niño o La Niña en el Pacífico tropical es mínimo o inexistente. Este forzamiento puede pensarse como un empuje en una dirección determinada. El Niño y La Niña por condición natural desplazan la circulación atmosférica global, y la ausencia de ambos significa que este empuje es inexistente, por lo que, la condición neutral del ENOS representa el retorno a las condiciones promedio en el Océano Pacífico tropical (Fig. 5) y la atmósfera suprayacente.

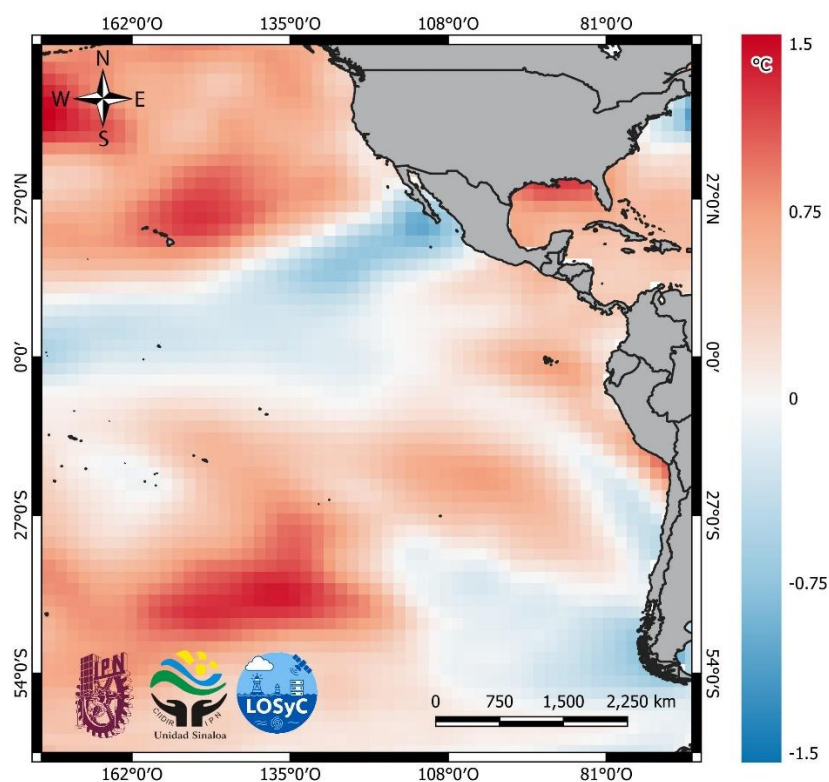


Figura 5. Anomalías de la temperatura superficial del mar respecto al periodo 1991-2020 para el periodo diciembre 2024-abril 2025 (ENOS condición neutral).

Este es también reconocido como un período de transición entre los eventos de El Niño y La Niña, o un estado en el que ninguno de estos fenómenos dominantes está influyendo significativamente en los patrones climáticos globales. Durante las condiciones neutrales, otros patrones climáticos regionales pueden tener una mayor influencia en el tiempo y el clima a nivel local. Particularmente en el estado de Sinaloa, la temporada de lluvias (junio-septiembre) (Fig. 6 b) presenta un gradiente

latitudinal con máximos valores al sur donde se encuentran los municipios San Ignacio, Mazatlán, Concordia, Rosario y Escuinapa (Fig. 6b), y mínimos al norte en los municipios Sinaloa, Guasave, El Fuerte y Ahome, quien es el más afectado con precipitaciones ≤ 75 mm. A diferencia de la temporada de lluvias, el invierno de El ENOS condición neutral presenta una disminución significativa con precipitaciones ≤ 30 mm y un gradiente longitudinal con dirección este-oeste, que muestra menores precipitaciones (≤ 10 mm) en los municipios ubicados en la franja costera los mas afectados por esta disminución (Fig. 6a).

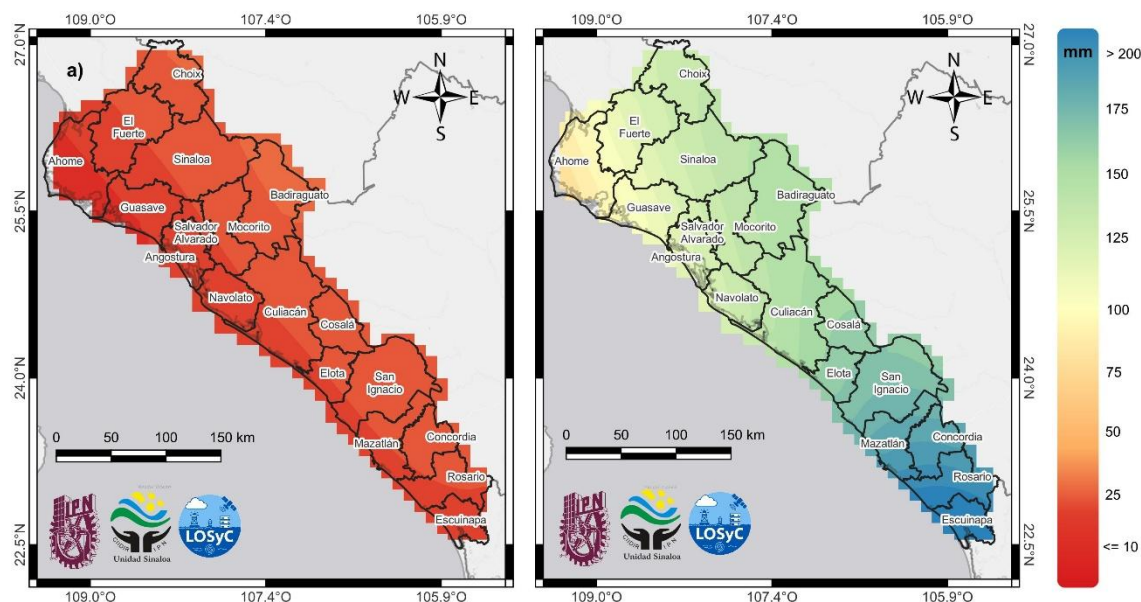


Figura 6. Climatologías de la precipitación total durante las temporadas de invierno (diciembre-febrero) (a) y lluvia (junio-septiembre) (b), del periodo base o normal climatológica 1991-2020.

Las esperanzas de un 2025 lluvioso en Sinaloa de cara a los pronósticos recientes

El centro de predicción climática de la NOAA reporta el 8 de mayo que El ENOS condición neutral se favorece durante el verano del hemisferio norte con una probabilidad del 98%, extendiéndose con una probabilidad del 54% hasta el trimestre agosto-octubre, posterior a esto, parece surgir El ENSO condición La Niña con una probabilidad del 43% en el trimestre octubre-diciembre de 2025 frente a una probabilidad del 13% en la ocurrencia de El ENOS condición El Niño y una leve tendencia creciente de El ENOS condición neutral (Fig. 7). En términos generales, la condición neutral responde principalmente, al debilitamiento de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial central y centro-oriental, generalmente por que los patrones de viento y presión atmosférica se mantienen cerca de sus promedios históricos.

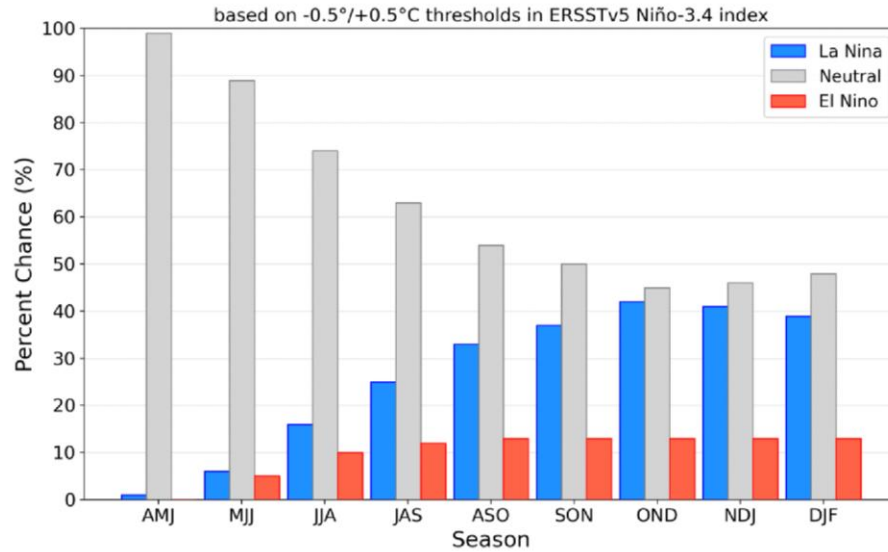


Figura 7. Probabilidad de El ENOS basados en el Niño 3.4. Comunicado Oficial del CPC NOAA para el 8 de mayo de 2025.

Si bien la llegada del ENOS condición neutra representa el retorno de las condiciones y patrones climáticos históricos (esto es, lluvias y temperaturas enmarcadas dentro del contexto normal, sin intensificación relevante alguna), sus efectos, aunque menos intensos, podrían redundarse en un descanso de los extremos climáticos como lo son: las olas de calor, heladas, sequías excepcionales o inundaciones, quienes son producto de las otras fases de El ENOS. En tal caso, los patrones climáticos locales y otros impulsores (La topografía y la proximidad a la costa), tendrán una mayor influencia en este periodo neutral. Particularmente, la precipitación para el trimestre febrero-abril del 2025 presentó anomalías negativas en todo el estado (lo que indica disminución de las lluvias en el contexto histórico). Las zonas norte (El Fuerte, Ahome y Choix) y sur (Mazatlán, Concordia, Rosario y Escuinapa) del estado se vieron más afectadas con esta disminución (Fig. 8). El Fuerte y Escuinapa fueron los municipios más afectados (Fig. 8). Bajo estas condiciones, la esperanza de muchos crece con la llegada de los ciclones tropicales pero lo cierto es que las condiciones neutrales del ENOS no suprimen ni mejoran la actividad de huracanes en la cuenca del Pacífico Oriental, por lo que sus impactos estarían dentro del rango histórico promedio.

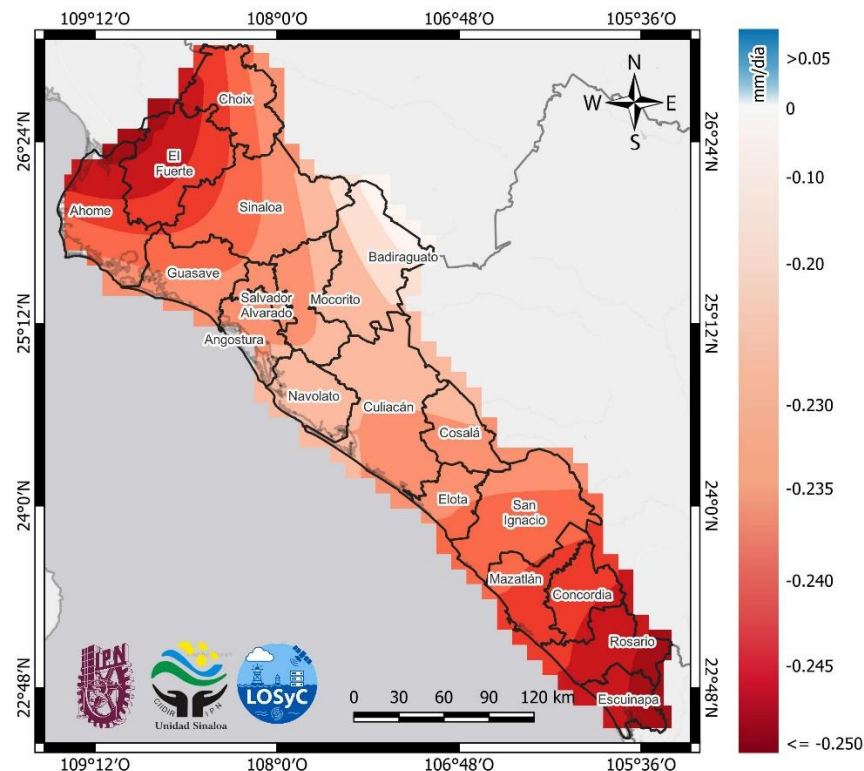


Figura 8. Anomalías de la precipitación diaria en el estado de Sinaloa para el trimestre febrero-abril de 2025, respecto a la normal climatológica 1991-2020.

Bajo la disminución significativa de la precipitación y la esperanza puesta en la llegada de los ciclones tropicales del Pacífico la pregunta que surge es: ¿Qué escenarios muestran los modelos para los meses venideros?, aquí es donde las matemáticas cobran sentido y los modelos empiezan a mostrarnos escenarios posibles para contribuir con la toma de decisiones y la gestión del agua.

Para responder a la pregunta anterior analizaremos el pronóstico climático del modelo del sistema de pronóstico acoplado NCEP versión 2 (CFSv2) (Saha et al., 2010, 2014). Este modelo usa como condiciones iniciales el comportamiento de las variables climáticas y oceanográficas de los últimos 30 días para a través de 4 ejecuciones diarias entregar datos que responden a las condiciones de tres escenarios adelantados (E1, E2 y E3) de diez días cada uno, para cada mes a pronosticar, logrando con ello estimar cuales son los cambios posibles en los patrones oceanográficos y atmosféricos a nivel global y en nuestro caso, para el estado de Sinaloa. Estos escenarios muestran un panorama crítico en el que predominan disminuciones que se intensifican a partir del 21 de julio (E3-Jun) extendiéndose hasta el 30 de agosto (E3-Ago), para luego posiblemente por factores locales y la llegada de ciclones tropicales del Pacífico, mostrar mejoría con incrementos de hasta 0.75 mm/día por encima de lo normal para el centro y sur del estado (E1-Sep). Posterior a esto, específicamente durante el 11 y 20 de septiembre

(E2-Sep), la distribución espacial de la precipitación permite establecer dos regiones del estado (norte y sur) en las que se presentan lluvias de hasta 0.5 mm/día por encima de lo normal, mientras que en el centro de este ocurre una disminución de hasta 0.25 mm/día. Del 21 al 30 de septiembre (E3-Sep) predominan incrementos > 1 mm/día en casi todo el estado, exceptuando los municipios El Fuerte y Ahome, ubicados al norte del estado. Octubre parece ser un periodo de transición entre las pocas precipitaciones que existieron y un nuevo periodo de sequía que parece anunciar la llegada de El ENOS condición La Niña cuyos efectos para el estado durante la temporada invernal ya fueron previamente analizados en este documento.

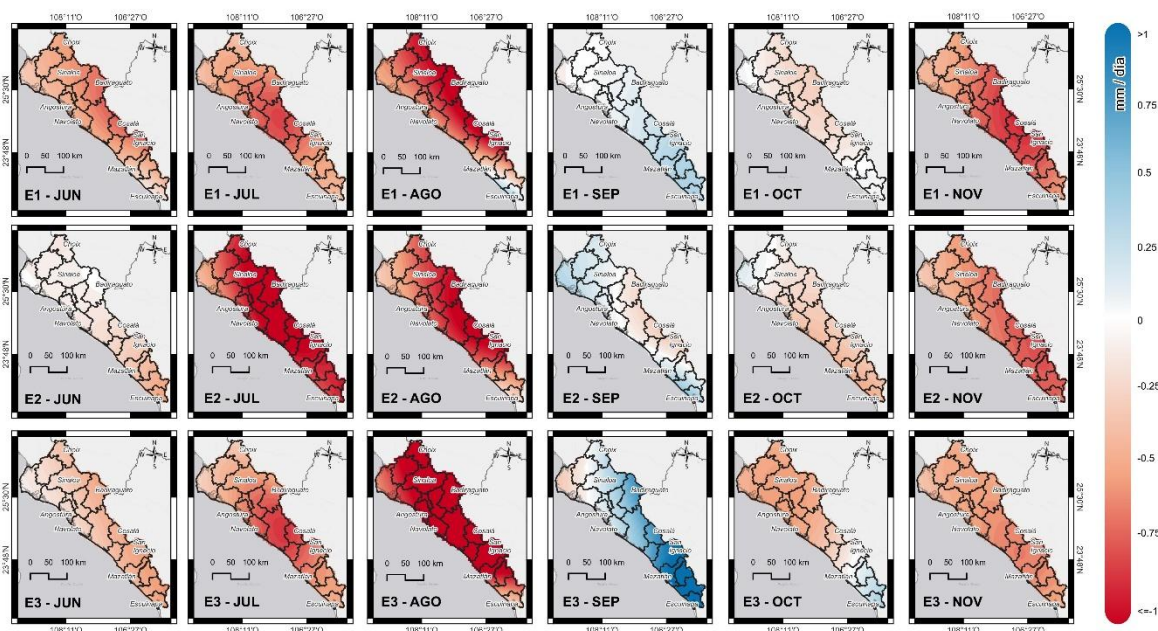


Figura 9. pronósticos del NCEP versión 2 (CFSv2) para la precipitación durante el periodo junio a noviembre del 2025. Se presentan tres escenarios E1, E2 y E3, cada escenario responde a diez días consecutivo pronosticados de cada mes de tal manera que E1 corresponde al día 1 hasta el 10, E2 del día 11 hasta el 20 y E3 del día 21 al 30 de los meses junio a noviembre del 2025. Las anomalías aquí presentadas son calculadas bajo el periodo de referencia 1991-2020.

Finalmente, frente a un clima evidentemente cambiante, el estado de Sinaloa requiere fortalecer el monitoreo y la generación de información mediante redes avanzadas y teledetección, así como adaptar la infraestructura hídrica optimizando la operación de presas y diversificando fuentes como la desalinización para gestionar de forma resiliente el recurso hídrico. También es vital promover el uso eficiente del agua en la agricultura con riego tecnificado y cambios de cultivo, e implementar una gobernanza adaptable con planes hídricos actualizados y participación ciudadana, además de desarrollar sistemas de alerta temprana para sequías e inundaciones que integren los pronósticos climáticos.

Lecturas recomendadas

- Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.3.949>
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H., Juang, H.-M. H., Sela, J., ... Goldberg, M. (2010). *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Dool, H. van den, Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). *The NCEP Climate Forecast System Version 2*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>