

APLICACIÓN DE MAPAS AUTOORGANIZADOS (SOM) A LA CARACTERIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTIVAL EN EL NORESTE ARGENTINO: RESULTADOS PRELIMINARES (1981–2024)

Gabriela Hernandez¹, Fernanda Cerqueira Vasconcellos², Eduardo Charles Vasconcellos³, Gabriela V. Müller^{4,5}, Bernado Alfonso Nunes⁶, Beatriz de Andrade Silva e Salz⁷

gabrielahernandez@azul.faa.unicen.edu.ar

¹ Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Facultad de Agronomía. NAACCE (Núcleo de Estudios en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático)

² Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Instituto de Geociências e da Atmosphere (IGEA). Grupo de Estudos, Previsões e Análises Climáticas (GEPAC/UFRJ)

³ Universidad Federal Fluminense (UFF). Instituto de Computación (IC)

⁴ Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (CEVARCAM-FICH-UNL), Santa Fe

⁵ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁶ Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Instituto de Computación (IC)

⁷ Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Ciencias Matemáticas e da Terra (CMT)

Palabras clave: Aprendizaje automático, anomalías de precipitación, variabilidad climática.

1) INTRODUCCIÓN

El noreste de Argentina es una región frecuentemente afectada por extremos hidroclimáticos severos, cuya intensidad y frecuencia se han visto incrementadas en las últimas décadas (Müller et al., 2021; Lovino et al., 2022). Desde mediados del siglo XX se ha registrado un cambio climático en el noreste argentino, caracterizado por un aumento sostenido de la precipitación regional (Lovino et al., 2018a). Este cambio podría explicarse por una combinación de factores antrópicos y naturales, incluyendo la variabilidad decadal del sistema océano-atmósfera. En este complejo contexto, donde diversos forzantes remotos y locales interactúan de forma no lineal y no homogénea, la identificación de patrones espaciales de anomalías de precipitación resulta clave para comprender los mecanismos subyacentes a estos eventos extremos.

Los recientes avances en técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) ofrecen nuevas herramientas para el análisis climático. En particular, los Mapas Autoorganizados (Self-Organizing Maps, SOM), una red neuronal no supervisada basada en aprendizaje competitivo, permiten clasificar grandes volúmenes de datos en grupos representativos, facilitando la detección de patrones ocultos en variables meteorológicas (Kohonen et al., 1997). Utilizando esta metodología, el objetivo del presente trabajo es identificar los principales patrones espaciales de anomalías de precipitación en los meses de primavera-verano, en el noreste argentino para el período 1981–2024.

2) METODOLOGÍA

Este estudio analiza patrones espaciales de precipitación en el noreste argentino identificados a partir de datos mensuales del producto satelital Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) (Funk et al., 2014). Se trabajó con promedios correspondientes a los meses de octubre a marzo, para el período 1981–2024, y se calcularon anomalías respecto a la climatología 1991–2020. Para aplicar el algoritmo Self-Organizing Map (SOM), se eliminó la tendencia lineal y se normalizaron los datos mediante la transformación Min-Max. La metodología, implementada en Python con `sklearn-som`, incluyó el preprocesamiento de datos, el entrenamiento de una red 4x4 y la identificación de nodos ganadores. La calidad del agrupamiento fue evaluada mediante el coeficiente de Silhouette (Rousseeuw, 1987). A partir de las fechas asignadas a cada nodo se construyeron compuestos de anomalía de precipitación y se generó una tabla resumen con la cantidad de meses asignados y el porcentaje de celdas significativas. La validación estadística se

realizó aplicando un test t de Student de una muestra en cada celda ($p < 0.05$), lo que permitió generar mapas de anomalía enmascarada y desviación estándar, para evaluar la robustez y la coherencia interna de los patrones espaciales identificados.

3) RESULTADOS

El análisis SOM aplicado a las anomalías normalizadas de precipitación mensual del noreste argentino durante la primavera-verano (1981–2024) permitió identificar 16 patrones espaciales recurrentes (Figura 1). La red 4x4 mostró un coeficiente de Silhouette de 0,053, lo que indica una estructura de patrones espaciales con separación moderada, aunque con evidencias de solapamiento entre nodos. Las Figuras 2a y 2b muestran los patrones espaciales de anomalía media de precipitación y la dispersión intra-nodo correspondientes a los 16 nodos de la red SOM aplicada. Los mapas de anomalía fueron enmascarados mediante un test t de Student ($p < 0.05$), ocultando las celdas sin diferencias significativas respecto a la climatología de referencia. En paralelo, los mapas de desvío estándar permiten evaluar la homogeneidad interna de cada patrón.

La Tabla I resume, para cada nodo, la cantidad de meses asignados y el porcentaje de celdas con anomalías estadísticamente significativas. A partir de esa información, es posible identificar nodos con alta coherencia espacial, baja variabilidad interna y frecuencia de ocurrencia considerable como los nodos (2,3), (3,3), (3,1), (1,0) y (2,2) lo cual sugiere que representan patrones robustos y recurrentes en la región.

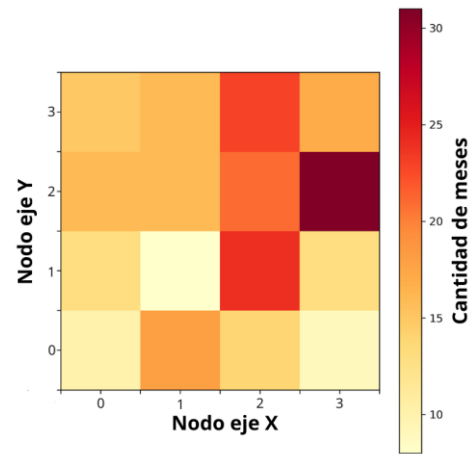


Figura 1: Frecuencia de activación de cada nodo en la red SOM 4x4 para el noreste argentino (1981–2024).

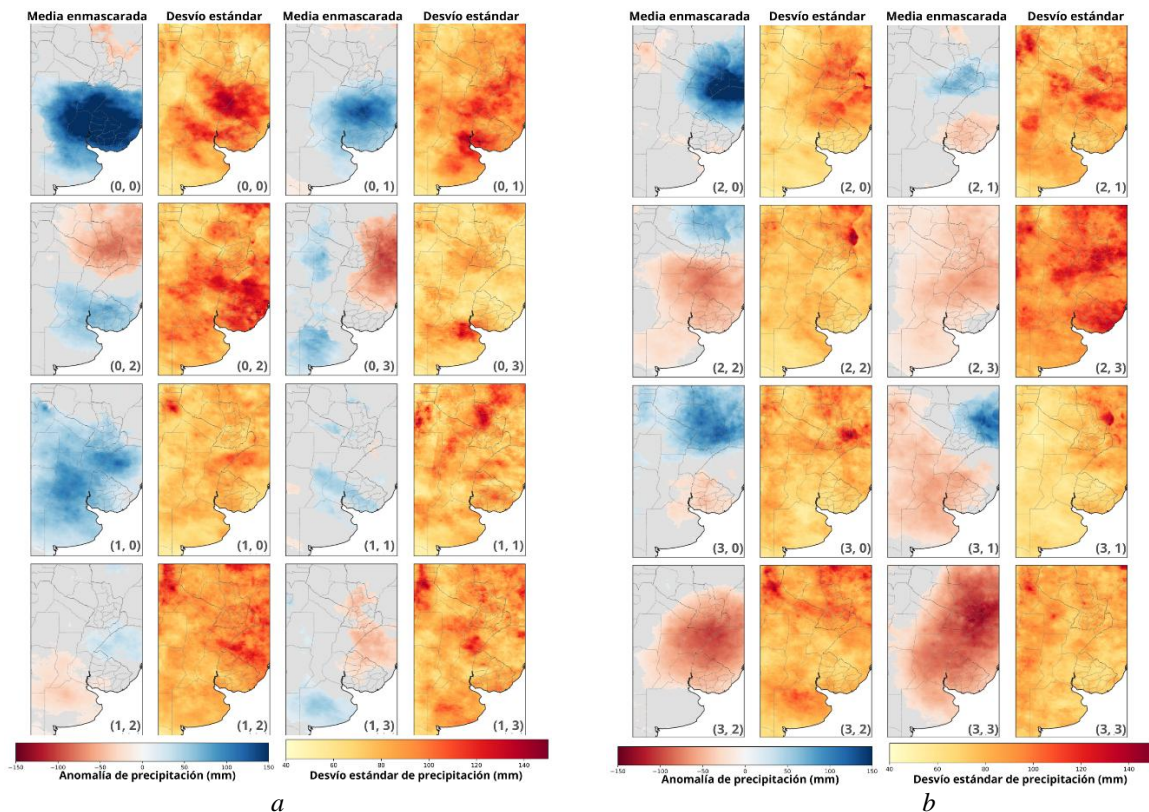


Figura 2. Mapas de anomalía de precipitación (mm/mes) media enmascarada (izquierda) y desvío estándar intra-nodo (derecha) para los 16 nodos del SOM 4x4 aplicado al noreste argentino en primavera-verano (1981–2024). (a) Nodos (0,0) a (1,3). (b) Nodos (2,0) a (3,3).

Por ejemplo, el nodo (2,3), con 31 meses asignados, presenta un 78,7% de celdas significativas y una desviación estándar moderada, reflejando anomalías negativas concentradas en el centro-este. El nodo (3,3) muestra un patrón deficitario extendido hacia el centro-norte (64,5% de significancia), mientras que en el nodo (3,1) predominan anomalías negativas en el sur-sudeste y positivas en el noreste (78,7%), con baja variabilidad interna. El nodo (1,0) exhibe señal positiva en el centro-oeste (68,4%), y el nodo (2,2), con un 66,6% de celdas significativas, presenta anomalías negativas persistentes sobre el centro-este y positivas al noreste, configurando un patrón robusto de déficit. En contraste, nodos como (1,1), (0,3) o (0,0), con menor frecuencia de ocurrencia (≤ 10 meses) y alta dispersión espacial, podrían reflejar eventos extremos o patrones poco frecuentes que no se repiten en la serie analizada.

Nodo	(1, 0)	(1, 1)	(2, 3)	(3, 2)	(2, 1)	(3, 1)	(3, 3)	(1, 2)	(2, 2)	(2, 0)	(3, 0)	(0, 1)	(1, 3)	(0, 0)	(0, 3)	(0, 2)
Cantidad de meses	13	8	31	23	16	16	17	24	21	16	15	18	13	10	9	14
% de celdas significativas	64,5	14,5	78,7	46,5	24,6	63,9	65,5	29,9	62,4	34,1	48,7	37,6	29,2	48,2	43,1	49,5

Tabla 1. Meses asignados y % de celdas significativas por nodo del SOM 4x4. Se resaltaron en color las celdas con mayor porcentaje de significancia ($p < 0.05$).

hacia el centro-norte (64,5% de significancia), mientras que en el nodo (3,1) predominan anomalías negativas en el sur-sudeste y positivas en el noreste (78,7%), con baja variabilidad interna. El nodo (1,0) exhibe señal positiva en el centro-oeste (68,4%), y el nodo (2,2), con un 66,6% de celdas significativas, presenta anomalías negativas persistentes sobre el centro-este y positivas al noreste, configurando un patrón robusto de déficit. En contraste, nodos como (1,1), (0,3) o (0,0), con menor frecuencia de ocurrencia (≤ 10 meses) y alta dispersión espacial, podrían reflejar eventos extremos o patrones poco frecuentes que no se repiten en la serie analizada.

4)CONCLUSIONES

Estos resultados preliminares evidencian el potencial del enfoque SOM para identificar patrones menos frecuentes o atípicos dentro de la distribución total de eventos analizados. No obstante, la baja separación entre nodos y la superposición espacial observada sugieren la necesidad de explorar configuraciones alternativas de red y complementar este enfoque con otras métricas de validación. Se continuará con un análisis más detallado orientado a caracterizar los eventos extremos y explorar los posibles forzantes climáticos regionales y globales que actúan.

5)AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a CAPES por la beca de investigación del Programa MOVE la América N° 88881.018732/2024-01, y al laboratorio GEPAC de la UFRJ por la oportunidad de desarrollar la investigación dentro del proyecto FAPERJ N° E-26/210.021/2024.

6)REFERENCIAS

- Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., y Verdin, A.P., 2014:** A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. <http://pubs.usgs.gov/ds/832>
- Kohonen, T.; Kaski, S.; Lappalainen, H., 1997:** Self-Organized Formation of Various Invariant-Feature Filters in the Adaptive-Subspace SOM. *Neural Computation*, v. 9, n. 6, p.1321–1344, 1 ago. 1.
- Lovino, M. A., Müller, G. V., Pierrestegui, M. J., Espinosa E. y Rodríguez L., 2022:** Extreme precipitation events in the Austral Chaco region of Argentina. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7572>.
- Lovino, M. A., Müller, O., Berbery, E. H. y Müller, G., 2018a:** How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global and Planetary Change*, 168, 78- 97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.
- Müller, G. V., Lovino, M. A. y Sgroi, L. C., 2021:** Observed and projected changes in temperature and precipitation in the core crop region of the Humid Pampa, Argentina. *Climate, Special Issue Climate Change and Land*. 9 (3), 40, doi: 10.3390/cli9030040
- Rousseeuw, P. J., 1987:** Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65.