

EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN CHILE: ¿QUÉ INFORMACIÓN PRÁCTICA PARA SU PRONÓSTICO PODEMOS EXTRAER DE SEÑALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA INTRAESTACIONAL?

**Martín Jacques-Coper^{1,2,3}, Christian Segura^{1,2}, Javier Campos^{1,2},
Paloma Navarrete^{1,2}, Natalia Ruiz^{1,2}, Álvaro Constanzo^{2,4,5}**
martinjacques@udec.cl

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

⁴Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Chile

⁵Dirección Meteorológica de Chile, Chile

Palabras clave: Olas de calor, Tornados, Oscilación de Madden-Julian

1) INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de diversos eventos meteorológicos extremos en Chile concita creciente interés social, debido –entre otros motivos– a sus potenciales impactos, sus causas y posibles formas de pronóstico, y su eventual relación con el cambio climático de origen antrópico. En esta contribución nos enfocamos en el rol que puede tener la variabilidad climática en la escala sinóptica-intraestacional (es decir, en escalas de pocos días a algunas semanas) en modular ambientes propicios para eventos meteorológicos extremos en Chile centro, sur y austral.

2) TIPOS DE EVENTOS CUBIERTOS Y MARCO CONCEPTUAL

Mediante una síntesis de estudios realizados en los últimos años, describimos resultados científicos que contribuyen a generar un esquema sistemático de posibles relaciones causales entre forzantes, teleconexiones y diversos eventos meteorológicos extremos. En cuanto a forzantes, nos enfocamos particularmente en la Oscilación de Madden-Julian (MJO, el principal modo de variabilidad intraestacional tropical) y su posible interacción con fenómenos extra-tropicales. Específicamente, mostramos un marco conceptual para abordar el desarrollo de algunas olas de calor de verano y el desarrollo de índices de monitoreo (Jacques-Coper et al., 2021), con ejemplos de su aplicación práctica a eventos concretos, como es el caso de floraciones algales nocivas en Chiloé en enero-febrero de 2021 (Segura & Jacques-Coper, *in prep.*) y los incendios de la Región de Valparaíso en febrero de 2024 (Jacques-Coper & Segura, 2024). Además, con foco en el invierno en Chile central, abordamos resultados novedosos en torno a la modulación de heladas (Hernández, 2021), olas de calor (Muñoz, 2025), y tormentas, incluyendo las que presentan condiciones potencialmente tornádicas (Campos, 2025; Navarrete, 2025). Finalmente, recalcamos oportunidades y limitaciones asociadas a aplicaciones de estos resultados, especialmente en el contexto de la generación de pronósticos y posibles alertas. En particular, discutimos el rol de la interacción entre la escala sinóptica y la intraestacional, y proponemos ideas para abordar este aspecto.

3) UN EJEMPLO: VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL & AMBIENTES TORNÁDICOS EN EL SUR DE CHILE

Los tornados y las trombas marinas son manifestaciones de tiempo severo propios del centro-sur de Chile, y así da cuenta el largo registro directo e indirecto de estos eventos, que cubre varios siglos (Bastías-Curivil et al., 2024). Como han demostrado recientes estudios (Caballero-Morán & Rondanelli, 2025; Marín et al., 2024), mayo y junio son meses donde se concentra la frecuencia de tornados y trombas marinas históricas, y esto corresponde a que la combinación de vorticidad (producto del cizalle del viento a distintos niveles) y la inestabilidad se maximizan en este periodo. Esto concuerda preliminarmente con el más reciente evento registrado el 25 de mayo de 2025 en Puerto Varas, Región de Los Lagos.

En la escala sinóptica, una configuración predominante asociada a tornados que se generan en el área de inestabilidad postfrontal consiste en una depresión en superficie que promueve viento del norte y advección cálida, bajo una vaguada en niveles medios, que induce advección fría y viento del oeste (Vicencio et al., 2021). En conjunto, estos procesos desencadenan vorticidad y convección. En un contexto intraestacional, las fases 8-1-2 activas de la MJO promueven precipitación asociada a actividad frontal de invierno en esta región (Barrett et al., 2012) y las fases 1-2 están particularmente asociadas a eventos históricos de tornados (e.g. Barrett et al., 2019).

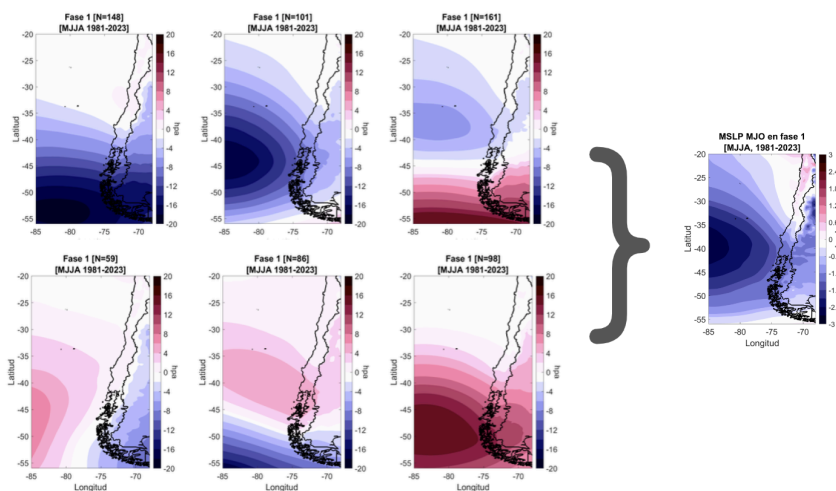


Figura 1: Compuestos de anomalías de presión a nivel del mar de días clasificados como fase 1 activa de la MJO. El panel derecho muestra el campo promedio de todos los días, mientras que los 6 paneles de la izquierda corresponden a un agrupamiento de dichos días empleando el método k-means. Datos: reanálisis ERA5; periodo mayo-agosto de 1981-2023.

Empleando datos del reanálisis ERA5 para el periodo mayo-agosto de 1981-2023, la Figura 1 exhibe el compuesto anomalías de presión a nivel del mar de todos los días clasificados como fase 1 activa de la MJO (panel derecho). En efecto, se aprecia un patrón sinóptico característico de perturbaciones baroclínicas de latitudes medias, que incluye la configuración sinóptica asociada a tormentas potencialmente tornádicas. Sin embargo, un desglose mediante agrupamiento k-means permite identificar que tal campo de anomalías resulta del promedio ponderado de configuraciones sinópticas diferentes, que corresponden, a su vez, a dos subgrupos: uno de anomalías ciclónicas (concordantes con el promedio global) y otro, de anomalías anticiclónicas (que no promoverían situaciones potencialmente tornádicas).

4) DISCUSIONES

Si se pretendiera emplear la MJO como una fuente de predictibilidad intraestacional de

configuraciones sinópticas favorables para eventos meteorológicos extremos, tales como tormentas severas y potencialmente tornádicas, el resultado presentado en la Figura 1 resalta la ambigüedad que se enfrenta al considerar sólo patrones sinópticos asociados a una fase activa particular de este modo de variabilidad. En efecto, los patrones sinópticos sobre latitudes medias resultan eventualmente de la superposición constructiva o destructiva de señales de origen tropical y extra-tropical en la escala sinóptica e intraestacional. Por lo tanto, para un mejor diagnóstico y pronóstico de configuraciones sinópticas particulares, es necesario considerar la forma en que se desarrollan las teleconexiones de origen tropical –en el sentido de Schreck et al. (2013)–, además de incluir el uso de índices que cuantifiquen la variabilidad extra-tropical.

Agradecimientos: Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 (ANID/FONDAP/1523A0002), Center for Oceanographic Research COPAS COASTAL (ANID/FB210021), ANID/FONDECYT/1251907 & 1211898.

REFERENCIAS

Barrett, B. S., J. F. Carrasco, and A. P. Testino, 2012: Madden–Julian Oscillation (MJO) Modulation of Atmospheric Circulation and Chilean Winter Precipitation. *J. Climate*, 25, 1678–1688

Barrett, B. S., Marin, J. C., y Jacques-Coper, M., 2020: A multiscale analysis of the tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile. *Atmospheric Research*, 236, 104811.

Bastías-Curivil, C., Rondanelli, R., Vicencio, J., Matus, F., Caballero-Morán, V., Muñoz, F., et al., 2024: Tornadoes and Waterspouts in Chile / Tornados y Trombas en Chile. figshare. Dataset.

Caballero-Morán, V., y Rondanelli, R., 2025: Tornado seasonality in central-southern Chile. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL110900.

Hernández, A., 2021: Análisis intraestacional de heladas meteorológicas de la región del Maule, Tesis para optar al título de Meteoróloga, Departamento de Geofísica, U. de Concepción.

Jacques-Coper, M., Veloso-Aguila, D., Segura, C., Valencia A., 2021: Intraseasonal teleconnections leading to heat waves in central Chile. *Int J Climatol.*, 41, 4712–4731.

Jacques-Coper, M., Segura, C., 2021: Análisis CR2 | ¿Calor extremo a la vista? Olas de calor, incendios forestales y marea roja / CR2, 19.01.2024.

Marín, J. C., Gutiérrez, F., Gensini, V. A., Barrett, B. S., Pozo, D., Jacques-Coper, M., y Veloso-Aguila, D., 2024: Climatological aspects of notable tornado events in Chile. *Monthly Weather Review*, 152(8), 1803-1819.

Muñoz, P., 2025: Patrones sinópticos asociados a olas de calor de invierno en Santiago y Concepción, Chile, Tesis para optar al título de Meteoróloga, Departamento de Geofísica, U. de Concepción.

Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., y Nicora, G., 2021: The Chilean tornado outbreak of May 2019: synoptic, mesoscale, and historical contexts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E611-E634.