

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE TÉRMICAS EN LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA MEDIANTE OBSERVACIONES EN PLANEADOR Y SIMULACIONES LES

Alejandro Pooli^{1,2}, Lucia Curto^{1,3}, María I. Gassmann^{1,3}
alejandropooli@gmail.com

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Servicio Meteorológico Nacional

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: vuelo en planeadores, PALM, empuje

1. INTRODUCCIÓN

Las térmicas son estructuras convectivas esenciales para el transporte vertical de calor y humedad en la Capa Límite Atmosférica (CLA), y también son el principal mecanismo de ascenso de los planeadores (aeronaves sin motor). Las térmicas se originan a partir de la convergencia de plumas térmicas desarrolladas en la Capa de Superficie, formando estructuras más organizadas, ya en la Capa Mezclada (Stull, 2012).

Actualmente no se cuenta con estudios detallados sobre el ciclo de vida de las térmicas en la atmósfera basados en mediciones de campo, ya que las mediciones que se realizan son cuasi-puntuales. A su vez, el modelado de la CLA en los últimos años ha tomado impulso con modelos de código abierto y procesos computacionales optimizados (Pooli, 2025). En este trabajo se combinan observaciones obtenidas desde planeadores con simulaciones numéricas en el modelo LES PALM, para caracterizar detalladamente la estructura y evolución de las térmicas en condiciones de buen tiempo en la llanura pampeana argentina.

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló el dispositivo “Mirlo”, basado en Arduino y sensores Bosch BME280, capaz de registrar presión, temperatura y humedad en vuelo. El equipo fue instalado en planeadores de clubes de vuelo a vela, recolectando datos durante un vuelo en planeador, realizado el día 28/10/2021 en San Andrés de Giles, Provincia de Buenos Aires. Los datos fueron validados mediante comparación con radiosondeos Vaisala. A partir de ellos se calcularon variables termodinámicas como temperatura potencial virtual (θ_v) y humedad específica (q), y se distinguieron los tramos correspondientes a ascensos (vuelo dentro de térmicas) de aquellos asociados a descensos (vuelo en el entorno), mediante el análisis de series temporales de altura.

Además, se realizó una simulación numérica con el modelo LES PALM (Maronga et al., 2015) para estudiar la organización espacial y el ciclo de vida de las térmicas. En la configuración de la corrida se establecieron los perfiles de temperatura y humedad iniciales

similares a los del vuelo, un perfil de viento geostrófico nulo, un dominio de 9 x 6 km y 2400 m de altura, con tamaño de grilla de 30 x 30 x 30 m. No se permitió la formación de nubosidad debido a la inclusión del modelo de radiación “Clear-Sky”. El tiempo de simulación fue de 2 h.

3. RESULTADOS

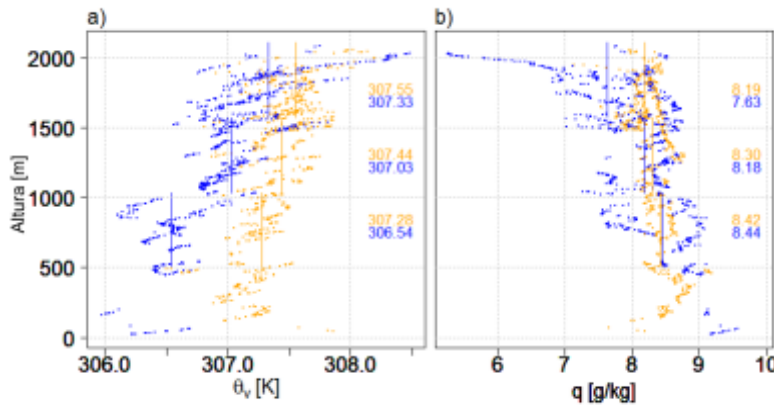


Figura 1: Perfiles verticales de (a) θ_v (K) y (b) q (g kg⁻¹) para los datos obtenidos en vuelo. Se indican movimientos verticales de ascenso (naranja) y descenso (azul). Para la parte baja, media y alta de la CLA se muestran θ_v media (a) y q media (b) en forma de líneas verticales, con el color correspondiente al movimiento vertical (ascensos o descensos), y en el margen derecho se muestran en número los valores en orden de altura.

Las observaciones realizadas en el vuelo (Fig. 1) muestran que, en niveles bajos de la CLA, las térmicas son más cálidas y húmedas que su entorno. En niveles medios y altos conservan el exceso de humedad, pero su temperatura relativa disminuye. Este cambio implica una transición del empuje positivo al negativo, aunque la inercia les permite continuar el ascenso. Las parcelas de aire que logran penetrar en la parte inferior de la Atmósfera Libre encuentran empuje negativo y son forzadas a descender, generando el arrastre de aire más cálido y seco hacia la Capa Mezclada a través del proceso de entremezcla. Este mecanismo puede identificarse en los datos correspondientes a los niveles más altos del registro, donde se observan los valores máximos de θ_v y mínimos de q , asociados a movimientos descendentes.

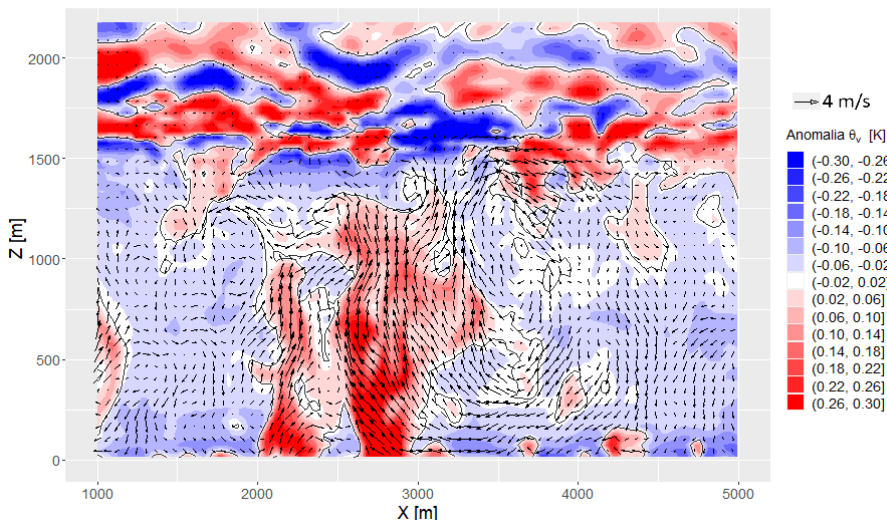


Figura 2: Corte vertical de anomalía de θ_v (K) para la simulación del modelo PALM sin viento. En todos los casos el contorno negro indica el valor nulo para la variable analizada. Los vectores indican la dirección e intensidad del viento.

La simulación con PALM (Fig. 2) reprodujo de forma similar los patrones observados. Además, se encontró que en condiciones de calma, se observaron estructuras hexagonales organizadas horizontalmente; con viento, las térmicas se alinearon en calles convectivas. Una simulación de alta frecuencia

permitió identificar etapas del ciclo de vida de las térmicas: génesis, desarrollo, overshooting/entremezcla y disipación.

4. CONCLUSIONES

Los planeadores demostraron ser plataformas eficientes para el estudio in situ de la dinámica de las térmicas en la CLA. La implementación del sistema de medición “Mirlo” permitió obtener registros confiables de variables termodinámicas clave, como temperatura, humedad y presión, con una resolución temporal adecuada para el análisis de procesos de la escala de los grandes torbellinos.

Las observaciones aéreas, combinadas con simulaciones LES en el modelo PALM, ofrecieron una descripción detallada de la estructura vertical y evolución de las térmicas, así como del mecanismo de entremezcla en la Zona de Entremezcla. Se verificó el cambio del empuje de positivo a negativo con la altura, la persistencia del exceso de humedad en las térmicas, y la influencia de la inercia en su capacidad de penetrar en la Atmósfera Libre.

Además, las simulaciones numéricas permitieron identificar patrones de organización espacial de la convección, como celdas hexagonales y calles convectivas, en función de la intensidad de viento. Esto no sólo valida el modelo utilizado, sino que también mejora la comprensión de los factores que condicionan el desarrollo y la morfología de las térmicas.

Los resultados obtenidos son valiosos tanto para la meteorología operacional como para el diseño de estrategias de vuelo a vela. Asimismo, abren la puerta a futuras investigaciones que combinen técnicas observacionales y de modelado para estudiar fenómenos que ocurren en la CLA bajo condiciones controladas y reproducibles.

REFERENCIAS

Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., y otros. 2015. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: Model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2515–2551.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), y Organización Científica y Técnica Internacional del Vuelo a Vela (OSTIV). 2009. Weather forecasting for soaring flight (WMO-No. 1038), TN 203.

Pooli, A. 2025. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera “Caracterización y modelado de térmicas en la capa límite atmosférica con datos obtenidos de vuelos en planeador”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, p.65.

Stull, R. B. 2012. An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science y Business Media.