

Comunicación: Turbulencia de aire claro en la atmósfera antártica, el rol del supercomputo en la predicción de eventos extremos

Paola Rodriguez Imazio
Servicio Meteorológico Nacional y CONICET

August 30, 2024

Resumen

La turbulencia de aire claro (CAT, por sus siglas en inglés) es un fenómeno que ocurre en el límite entre la troposfera superior y la estratosfera inferior, y su naturaleza es inesperada, peligrosa y esquiva (Ellrod 2003). Es difícil de pronosticar, y mucho más frecuente hacia las regiones polares, donde se desarrollan condiciones atmosféricas particularmente extremas. En este trabajo se utilizan mediciones in situ de aeronaves a muy alta resolución, combinados con mediciones de rutina (radiosondeos) y herramientas de supercómputo para estudiar y caracterizar eventos de CAT ocurridos al sur de la Patagonia y al norte de la Península Antártica. A partir de dichos estudios, se espera poder conocer la dinámica (desconocida aún) de los eventos de CAT en la región, la cual se reconoce fuertemente relacionada con el cambio climático (Holland et al. 2017), y avanzar en la calibración (inexistente) de indicadores locales de CAT, de suma importancia para el pronóstico aeronáutico.

1 Introducción

La turbulencia en aire claro (CAT) es un fenómeno común en el límite entre la baja estratósfera y la alta tropósfera (UTLS, por sus siglas en inglés), a menudo provocada por la inestabilidad de las ondas de gravedad internas o por una fuerte cizalladura del viento (Gultepe, 2008). La CAT puede resultar perjudicial para los aviones e incómoda para los pilotos y pasajeros (Sharman et al., 2012).

A pesar del conocimiento general de la CAT, la dinámica subyacente a la relación entre los procesos de generación de CAT y su naturaleza de pequeña escala sigue siendo difícil de alcanzar. Por un lado, los modelos de predicción numérica no logran reproducir todas las escalas involucradas en los movimientos turbulentos atmosféricos. Por otro lado, una detección adecuada de CAT requiere mediciones a escalas inferiores a 1 km con alta resolución temporal que generalmente no están disponibles a través de redes de observación estándar terrestres y aéreas. Dadas las múltiples escalas involucradas y el riesgo de encontrar un CAT fuerte, las mediciones siguen siendo técnicamente desafiantes y escasas. La escasez de observaciones aéreas aumenta a medida que uno se desplaza hacia latitudes más altas del sur, donde hay muy pocas mediciones in situ hacia el polo de 55°S, especialmente en la región UTLS y superiores, por ejemplo, Tuck et al. (1989), Parish y Bromwich (1989) y Carli et al. (2000). Las primeras campañas aéreas fueron impulsadas principalmente por la investigación del ozono (Tuck, 2021; Tuck et al., 1997), pero también registraron variaciones de temperatura de mesoescala (Gary, 2008), ondas de gravedad (Bacmeister et al., 1990) y turbulencia (Tuck, 2008).

La masa terrestre de América del Sur se extiende hasta aproximadamente 55°S. En particular, es probable que la región de la Patagonia Austral, el Pasaje de Drake y la Península Antártica creen condiciones atmosféricas favorables para el desarrollo del CAT debido a la combinación de fuertes frentes en los niveles superiores asociados con tormentas frecuentes y fuertes corrientes de aire sobre los Andes y los Antártandes. un punto de acceso para la excitación y propagación de ondas de gravedad. El transporte vertical de impulso y gases traza a través de la corriente en chorro nocturna polar producida durante eventos turbulentos también es relevante para explicar la física subyacente a la influencia del agotamiento del ozono estratosférico en la variabilidad del Modo Anular Sur (SAM), (véase, por ejemplo, Ferreira et al. (2015), Holand et al. (2017) y Jucker y Goyal (2022)).

Como se observa en Ellrod et al. (2003), y recientemente en Rodriguez Imazio et al. (2022, 2023), los eventos CAT son "parchosos". Sin embargo, la mayoría de los eventos CAT informados carecen de evidencia directa de su naturaleza irregular en la meso y la micro escala. Además, la aparición de ráfagas o parches, en la teoría de la turbulencia a menudo denominada intermitencia externa, a gran escala o intermitente según el contexto particular, parece ser inconsistente con respecto a la concepción habitual de CAT como turbulencia de Kolmogorov localmente homogénea. Esta inconsistencia motiva los estudios mostrados en el presente trabajo,

en el cual se pone especial énfasis en el uso combinado de supercómputo y mediciones directas de muy alta resolución en la UTLS, cómo una herramienta fundamental en el avance del conocimiento básico de la CAT, para una mejora fundamental en su predicción, pronóstico y rol en el cambio climático.

De esta forma, presentamos aquí estudios de eventos de CAT observados en la UTLS durante dos vuelos de investigación de la aeronave HALO (High Range Long Distance) durante la campaña SOUTHTRAC, como ejemplos de los estudios que se realizan por investigadores del SMN y colaboradores académicos nacionales e internacionales, recientemente publicados en Paola Rodriguez Imazio et al. 2022 y 2023, en el marco de la transferencia de conocimiento con fines de aplicación a productos de pronóstico aeronáutico, además de los intereses arriba mencionados. Los estudios mostrados aquí incluyen vuelos realizados sobre el sur de la Patagonia y el pasaje de Drake, y el norte de la Península Antártica. Las observaciones utilizadas se componen de mediciones directas de parámetros atmosféricos, únicas por su muy alta resolución (100 Hz), su altitud y las latitudes comprendidas, que permiten el estudio de parches individuales dentro de los eventos turbulentos. Sus propiedades estadísticas pueden desviarse significativamente de las de la turbulencia clásica (homogénea e isotrópa), lo que indica que la estratificación térmica es un parámetro importante que determina la respuesta espectral.

2 Marco teórico

Los estudios mostrados aquí se basan en el cómputo de indicadores de turbulencia, utilizando métodos distintos, aplicados a mediciones directas de aeronaves en la UTLS, y al análisis de sus desviaciones de la teoría clásica de turbulencia (conocida como Turbulencia de Kolmogorov). De esta forma, es posible cuantificar los efectos de la estratificación y la rotación, ambas presentes en la atmósfera, y ambas generadoras de anisotropía, es decir, una dirección privilegiada para el transporte y mezclado turbulento, el cual se asume isótropo y homogéneo en la teoría de Kolmogorov.

2.1 Métodos espectrales

Utilizamos dos cantidades para caracterizar la turbulencia atmosférica a nivel de vuelo: la energía cinética turbulenta específica (TKE) y la raíz cúbica de la tasa de disipación de energía ($EDR = \epsilon/3$), utilizando métodos similares a los presentados en Bramberger. et al. (2018).

La TKE esta dada por

$$TKE = \frac{1}{2} (\sigma_{uac}^2 + \sigma_{vac}^2 + \sigma_w^2), \quad (1)$$

donde uac y vac representan las componentes horizontales de la velocidad del viento a lo largo y transversales a la ruta de vuelo, respectivamente, y w es la componente vertical; y de aquí, el vector velocidad esta dado por $u_i = (uac, vac, w)$. Las varianzas $\sigma_i = \sqrt{u_i'^2} = \sqrt{(u_i - \bar{u}_i)^2}$ se calculan para distintos subsegmentos en las series temporales de la velocidad del viento medida, y la barra horizontal representa el valor medio en esos subsegmentos.

EDR se calcula según

$$EDR_i = \epsilon_i^{1/3} = \left[\frac{S_i(k)k^{5/3}}{C_i} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

donde S_i es la densidad espectral de energía

$$S_i(k) = C_i \epsilon_i^{2/3} k^{-5/3} \equiv PSD_i \quad (3)$$

donde el subíndice i se refiere a la respectiva componente del viento u_i , k es el número de onda horizontal y son las constantes de Kolmogorov (Strauss 2015).

Mientras que TKE está determinado principalmente por los remolinos en las escalas grandes, que contienen la energía, EDR da una medida de la tasa de conversión de la energía cinética turbulenta en energía térmica en las escalas mas pequeñas. Ambas cantidades proporcionan una descripción muy útil de CAT y se utilizan comúnmente para determinar la intensidad de la turbulencia en la aviación. EDR puede estar directamente relacionada con cargas específicas de la aeronave y, por lo tanto, calibrarse con respecto a diferentes tipos de aeronaves. Los umbrales respectivos para turbulencia ligera, moderada y severa utilizados aquí como referencia siguen los propuestos por Sharman et al. (2014).

2.2 Funciones de Estructura

Calculamos funciones de estructura de la velocidad de segundo y tercer orden de orden para las componentes de la velocidad u_i , según

$$Sp_{u_i}(l) = \langle [u_i(x+l) - u_i(x)]^p \rangle = \langle [\delta u_i(l)]^p \rangle, \quad (4)$$

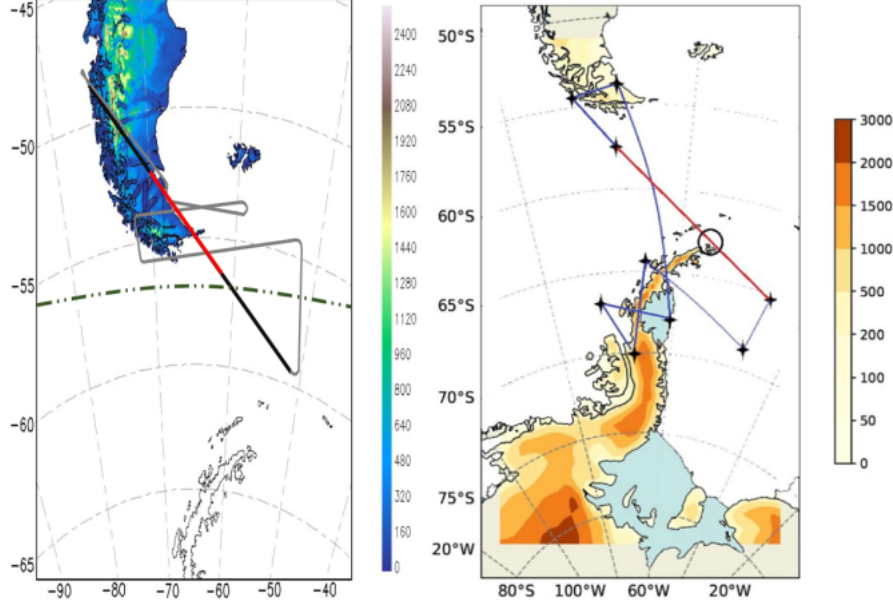


Figure 1: Rutas de vuelo para ST08 (izquierda) y ST25 (a la derecha). Las líneas rojas delimitan la ocurrencia de los eventos de CAT

donde l es una distancia de separación a lo largo de la dirección x (vuelo) y los corchetes angulares denotan un promedio de ensamble (Monin & Yaglom 1975). Usando esta expresión, las funciones de estructura de orden 2 y orden 3 ($p = 2$ y $p = 3$ en la ecuación 4) deben seguir las siguientes leyes en el marco de K41:

$$S_2 = C_2 \epsilon^{2/3} l^\beta \quad \text{con} \quad \beta = 2/3, \quad (5)$$

$$S_3(l) = \langle |\delta \mathbf{u}|^2 \delta u_{ac} \rangle = -\frac{4}{3} \epsilon l^\gamma, \quad (6)$$

donde \mathbf{u} es el vector de velocidad del viento en el sistema de coordenadas relacionado con la aeronave y γ es el índice de escala cuyo valor teórico es $\gamma = 1$. El lado derecho de la ecuación (6), conocida como ley de los 4/3, es una consecuencia directa de la ley de los 4/5 de Kolmogorov (Kolmogorov 1941, Kolmogorov 1941b).

3 Datos y herramientas de supercómputo

Las siguientes líneas describen los datos a los cuales se les aplican los métodos descritos en la sección previa, como también así las herramientas de supercómputo necesarias tanto para el procesamiento de dichos datos, como para la realización de simulaciones numéricas de alta resolución que puedan utilizarse para la calibración local de indicadores de CAT.

3.1 Datos de aeronaves

El análisis de turbulencia presentado se basa en mediciones in situ de la velocidad del viento, la temperatura y la presión (entre otros parámetros meteorológicos), provenientes de los vuelos de investigación ST25 y ST08 realizados por HALO durante la campaña SOUTHTRAC (véase la figura 1 para ver la trayectoria completa de los vuelos, y Rapp 2022 para más referencias). HALO (High Altitude Long Range) es una aeronave de investigación operada por la Agencia Aeroespacial Alemana (DLR, para más detalles, ver Rapp et al. (2022)), y los datos están disponibles mediante una colaboración bilateral CONICET-DLR.

Las observaciones in situ utilizadas consisten en series temporales medidas en altura de vuelo con frecuencia mínima de 1 Hz y máxima de 100 Hz, y provienen del Sistema Básico de Sensores y Medición de HALO (BAHAMAS). Para investigar el evento de turbulencia con más detalle, se analizan los datos de BAHAMAS de alta frecuencia de (10 y 100 Hz) (Giez et al., 2017, 2021), disponibles para secciones específicas de la ruta de vuelo, que, en ambos casos mostrados aquí coinciden con la ocurrencia de los eventos de CAT. Como ejemplo, la figura ?? muestra las series temporales de las tres componentes de la velocidad del viento y la temperatura potencial θ , donde las líneas rojas verticales delimitan el momento (y la región) específicas donde ocurre la CAT.

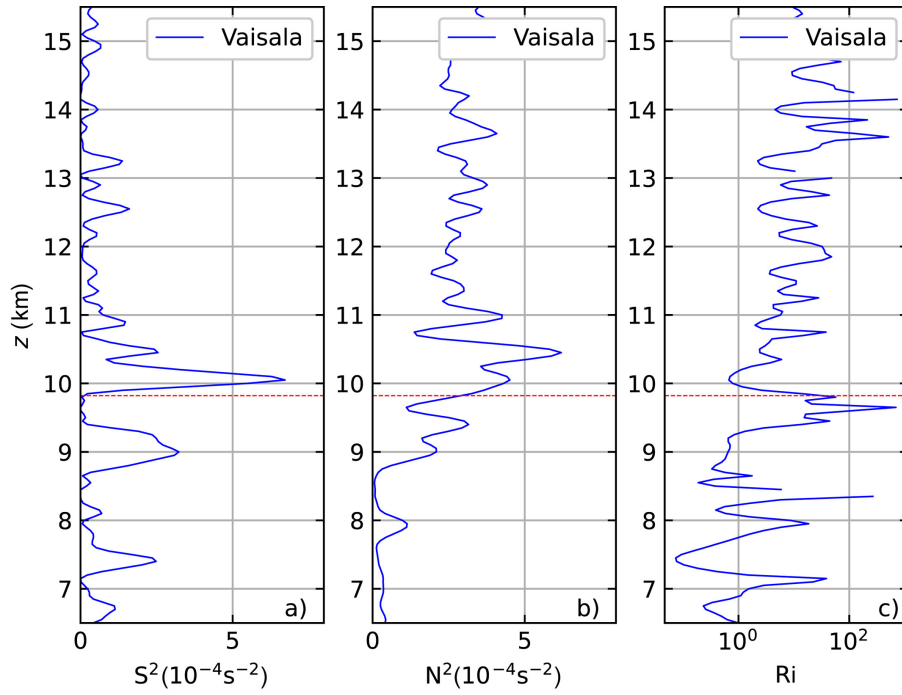


Figure 2: perfiles verticales de la cizalla vertical del viento, la frecuencia de Brunt-Väisälä y el número de Richardson, de izquierda a derecha, respectivamente

3.2 Datos de Radiosondeos

Como conjunto complementario de mediciones in situ, se emplean datos provenientes de los radiosondeos de rutina lanzados por el SMN en las distintas estaciones meteorológicas. Para los casos presentados aquí, solo pudo complementarse el vuelo ST25 (realizado el 12 de Noviembre de 2019), ya que los radiosondeos (de aquí, RS) coincidentes con la otra ruta de vuelo (ST08, realizado el 11 de Septiembre de 2019) no pudieron realizarse dadas las condiciones extremas en el sur de la Patagonia para ese día. Los métodos descritos a continuación corresponden a los propuestos para su uso sistemático en datos de RS, y resultan de suma utilidad para ser utilizados luego de la calibración con los datos de vuelo, como indicadores locales de CAT.

En el caso de ST25 el conjunto de mediciones se obtiene a partir de una RS lanzada desde la base de Marambio, situada a $64^{\circ} 14'S$ y $56^{\circ} 38'O$, a las 17:47 UTC del 12 de noviembre de 2019. El equipo utilizado corresponde a una sonda Väisälä RS92 SGP, con una resolución vertical de $\Delta z \approx 6m$, una frecuencia de adquisición de 1 Hz y una desviación estándar de ruido de $\sigma \approx 0.2 K$ para temperatura en alturas entre 8 y 13 km. Como es habitual en el análisis de datos de radiosondas, se utilizó un procedimiento de suavizado para reducir la cantidad de ruido en los perfiles verticales, similar al empleado en R. Wilson et al., (2010). Primero, se toma una media a 10 puntos, lo cual reduce la resolución vertical efectiva a $\Delta z \approx 60 m$, obteniendo así perfiles verticales suavizados de las componentes horizontales de la velocidad, la temperatura y la presión. Luego, se aplicó un segundo procedimiento de suavizado basado en splines cúbicos a cantidades derivadas como los gradientes de temperatura y de velocidad. Utilizando estos pasos de suavizado, calculamos los perfiles de la cizalladura vertical del viento al cuadrado S^2 , la frecuencia de Brunt-Väisälä al cuadrado N^2 y el número de Richardson Ri (ver Rodríguez Imazio et al. 2022 para definiciones completas).

Como ejemplo, se muestran en la figura 2 los perfiles verticales de la cizalla vertical del viento, la frecuencia de Brunt-Väisälä y el número de Richardson, obtenidos como resultado de este novedoso postprocesado, aplicado al radiosondeo descrito mas arriba. Es importante notar la aparición de valores muy cercanos al valor crítico de $Ri \sim 0.25$ para la ocurrencia de Turbulencia por cizalla, alrededor de los 12 km. De esta forma, con el contexto de los métodos numéricos, pueden generarse herramientas de predicción de bajo costo, y con mediciones de rutina, para una primera aproximación de pronóstico de CAT.

3.3 Herramientas de supercómputo

Para los casos de estudio mostrados aquí, se realizaron simulaciones específicas del modelo PolarWRF, para el vuelo ST25, y se utilizaron salidas del modelo de pronóstico operativo del SMN, WRF, combinados con salidas de reanálisis del modelo europeo ERA5. En cada caso pudieron inferirse los causales de gran escala relacionados con la ocurrencia de CAT. Para el vuelo ST25 (ocurrido al norte de la Península Antártica) se identificó la interacción de una intrusión de aire estratosférico con el jet polar, curvado por el paso de una baja polar

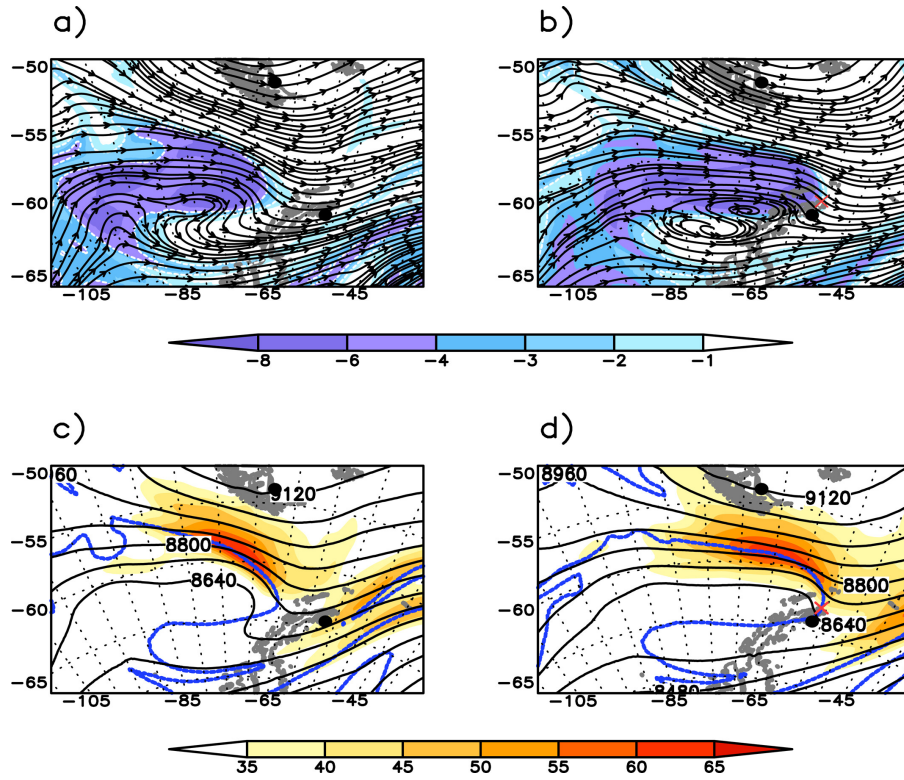


Figure 3: Panel superior: vorticidad potencial inferior a 1 PVU (sombreada) y líneas de corriente a 300 hPa (líneas negras) para las 1200 UTC (a) y las 1800 UTC (b). Paneles inferiores: viento máximo (sombreado, m s⁻¹) a 300 hPa, altura geopotencial (líneas negras, gpm) y altura de la tropopausa dinámica (2PVU, línea azul) para las 1200 UTC (c) y las 1800 UTC (d). El punto negro a 64°S representa la ubicación de la base Marambio, el que está aproximadamente a 51° marca Río Grande. La cruz roja en los paneles (b) y (d) indica la ubicación del evento CAT encontrado por HALO a las 1745 UTC, en 62.9°S y 55.84°W. Datos ERA5 a 12 de noviembre de 2019.

generada al sur-oeste de la Península. Esto puede identificarse de la figura 3, en la cual se muestra la vorticidad potencial, el viento máximo, la y altura de la tropopausa dinámica (Mas detalles en Rodriguez Imazio et al. 2022). La realización específica de una simulación de PolarWRF indica que las ondas de gravedad en niveles superiores son de baja intensidad, descartando este patrón como generador de CAT para ST25.

La caracterización en las escalas grandes mediante modelos de pronóstico para el vuelo St08 puede encontrarse en Rodriguez Imazio et al. 2023. Como ejemplo, se muestra en la figura 4 la velocidad vertical y la función frontogénesis (gran indicador de CAT, utilizado ampliamente en el pronóstico aeronáutico).

Para realizar estas simulaciones y los postprocesos se requiere de herramientas similares a las disponibles por el SMN. En esta caso, se utilizó el cluster Huayra Muyu. Huayra Muyu se compone de 128 nodos 2U, cada uno con 2 Xeon Gold 6142, 96 GiB RAM DDR4-2666, red Omni-Path para comunicación de procesos y 10 GigE para red de datos y administración. Tiene un consumo pico de 91 kVA y está refrigerado con el sistema in-row cooling de 40KW y 136485 BTU. Tiene un rack con una UPS de 150 kVA para lograr un shutdown ordenado en caso de que los dos grupos electrógenos externos fallen. El sistema de almacenamiento es un IBM Spectrum Scale DSS-G de 1.29 PiB concentrado en 4 cajones que manejan 166 discos de 8 TiB SAS manejados por el sistema de archivos GPFS. Todo esto suma una potencia pico de cálculo (Rmax) de 370.4 TFLOPS en doble precisión, posicionándola un orden de magnitud por arriba de cualquier otra máquina en Argentina. Lo más cercano podría ser TUPAC con 54 TFLOPS, Eulogia con 37 TFLOPS y Pirayú con 26 TFLOPS.

4 Resultados

4.1 Resumen de lo publicado en Rodriguez Imazio et al. 2022 y Rodriguez Imazio et al. 2023

La figure 5 muestra las series temporales de la temperatura potencial (θ) y las tres componentes de la velocidad del viento para los dos vuelos mencionados. La ocurrencia de los eventos de turbulencia esta delimitada por líneas verticales rojas. En ambos casos, puede verse un aumento significativo de las fluctuaciones de la velocidad vertical (w , segundo panel de arriba hacia abajo) durante la ocurrencia de la CAT. Esto se asocia directamente

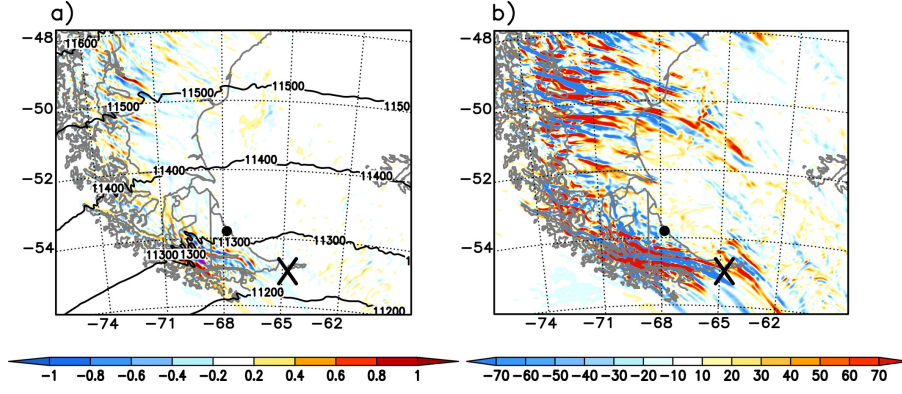


Figure 4: a) Viento vertical (m s⁻¹, color sombreado) y altura geopotencial (gpm, líneas negras) a 200 hPa. (b) Función de frontogénesis F según la Ecuación 7 ($10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$, color sombreado) a 200 hPa. Ambos gráficos son válidos a la 01:00UTC del 12 de septiembre de 2019. La ubicación del encuentro de turbulencia de aire claro (CAT) registrado por HALO alrededor de la 01:30 UTC está marcada con una cruz negra, el punto negro marca Río Grande. Datos: simulaciones WRF.

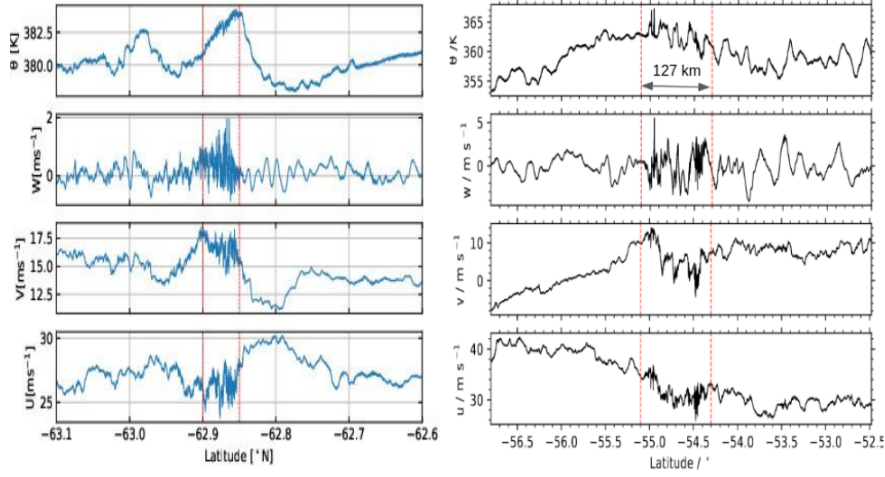


Figure 5: Temperatura potencial y componentes de la velocidad del viento (u, v, w) como función de la latitud para ambos vuelos, en la vecindad de la ocurrencia de CAT. Izquierda: ST25, derecha: ST08

con un evento aeronáutico de CAT, que en ambos casos fue consistente con los reportes de los pilotos (conocidos en la jerga como PIREPS). Por otro lado, puede verse un intercambio de energía entre las componentes u y v durante la CAT. Este intercambio entre las componentes horizontales de la velocidad está dado por la ocurrencia de turbulencia, durante el cual se ve que una componente aumenta mientras la otra disminuye, específicamente dentro del evento de CAT (entre líneas rojas en la fig. 5). Por fuera del evento de CAT, puede verse que todos los parámetros se mantienen constantes, aunque puede verse la aparición de ondas de gravedad. En ambos casos, la detección de estas ondas de gravedad se produce al norte de los eventos (a la derecha de ambos conjuntos de paneles), mientras la aeronave se aleja de la orografía, es decir, vuela en dirección sur.

La figura 6 muestra los espectros de las componentes verticales de la velocidad del viento. Para el vuelo ST25 (panel izquierdo) pueden verse las densidades espectrales de potencia obtenidas según la ecuación 3 para distintos subsegmentos de 4 km y su promedio (en negro), con datos a 10 Hz (la mayor frecuencia de adquisición para este vuelo). Para el vuelo ST08, se tienen datos a 100 Hz, y sólo se muestra el espectro promedio en subsegmentos de 4 km. En ambos casos, los datos utilizados comprenden la totalidad de los datos que se encuentran entre las líneas rojas en la figura 5. En ambos casos, los espectros muestran un rango inercial con una ley de potencias consistente con la ley de $k^{-5/3}$. Estas leyes de potencias también están incluidas como referencia mediante líneas rojas en ambos paneles. De esta forma, puede verse que los datos muestran eventos de turbulencia tanto en el sentido aeronáutico (PIREPS) como en el sentido teórico (se ajustan a la teoría de Kolmogorov).

A partir de estos espectros, podemos hallar TKE y EDR, para su directa comparación con datos de modelos de pronóstico, con otras aeronaves, y proceder a los primeros pasos de una calibración.

En la figura 7 pueden verse las series temporales de TKE (paneles izquierdos), calculadas para distintos subsegmentos, entre los 4 km y los 10 km. En la locación de ocurrencia de CAT puede verse un aumento en las

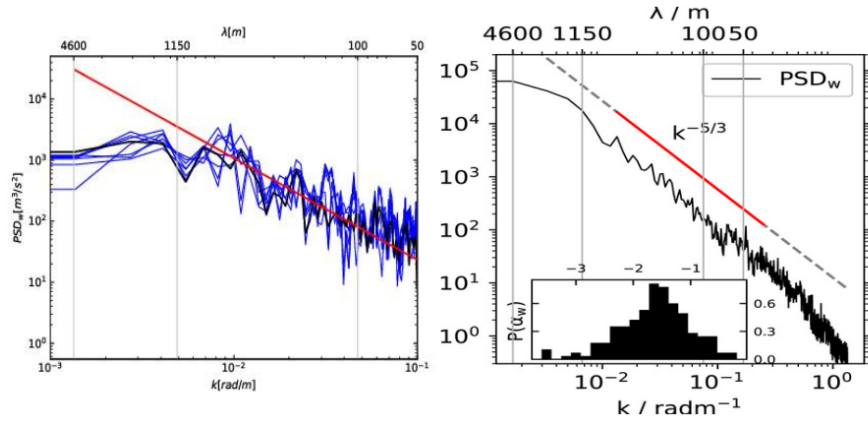


Figure 6: Densidad espectral de potencias obtenidas para la velocidad vertical del viento para ST25 (izq.) y ST08 (der.). Se incluye también una ley de potencias de Kolmogorov, como referencia, en rojo. EN el caso de mediciones a mayor frecuencia (ST08) se realizó un histograma para la distribución de los índices espectrales (para mas detalles ver Rodríguez Imazio 2023).

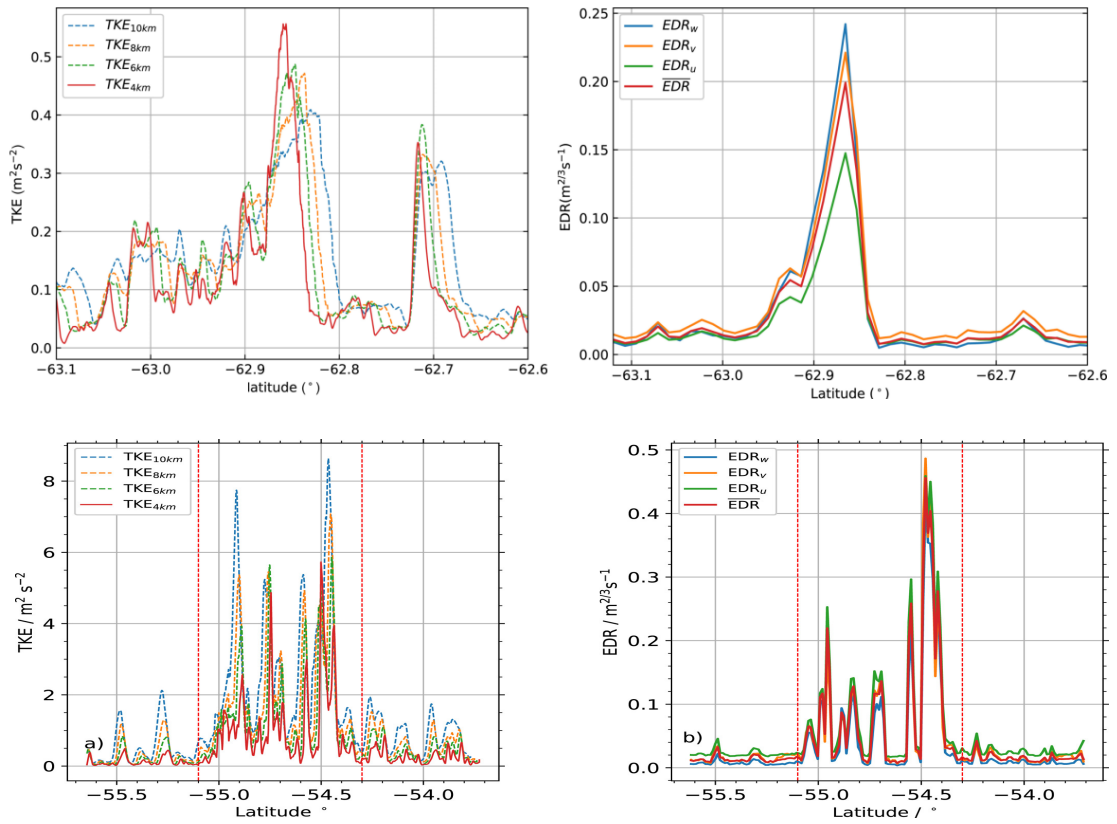


Figure 7: Energía cinética turbulenta, TKE, (izq.) y Tasa de disipación de energía turbulenta por remolinos, EDR, (derecha) para los vuelos ST25 (arriba) y ST08 (abajo).

curvas de TKE, indicando que existen remolinos de gran escala, fuertemente localizados en el espacio (notar que la extensión espacial de los picos, y la región de ocurrencia de CAT, son de alrededor de 1° de latitud), con un mayor contenido de energía. De forma consistente con los espectros mostrados mas arriba, esta energía se transfiere a las escalas mas pequeñas, lo cual puede verse en las curvas de EDR (paneles derechos en la fig. 7). Este aumento repentino en el EDR es proporcional a la tasa de transferencia de energía turbulenta, de acuerdo a la ecuación 2. A pesar de que este comportamiento se ve de forma similar en ambos vuelos, los casos de CAT presentan una diferencia fundamental, que puede verse mediante una inspección directa de las curvas para cada caso. Para el vuelo ST25, la curva de TKE observada es consistente con observaciones previas obtenidas de datos de aeronaves, esto es, un pico bien delimitado, centrado en la región de ocurrencia del evento, en el cual los valores de EDR aumentan al menos por encima de $0.05\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$, mediando zonas de valores casi nulos de EDR, las cuales identifican condiciones normales de vuelo (ver, por ej Bramberger et al. 2018 y referencias contenidas). Para el vuelo ST08, sin embargo, la curva de EDR es muy distinta. En este caso, la ocurrencia de CAT se desarrolla mediante varios picos en la curva de EDR, para los cuales puede estimarse una tasa de transferencia de energía turbulenta distinta. Tal como se lo analiza en detalle en Rodriguez Imazio et al. 2023, esto corresponde a un evento de CAT desarrollado en distintos parches turbulentos, los cuales presentan distinta actividad turbulenta. La aparición de estos parches viene dada por la presencia de ondas de gravedad, que facilitan el acoplamiento local entre la velocidad vertical y la temperatura, dando lugar a fluctuaciones o "explosiones" turbulentas. De esta forma, puede inferirse que la teoría de K41 no es adecuada para predecir estos eventos de CAT, siendo necesarias otras herramientas. La comparación directa de los métodos espectrales aquí mostrados con el método de funciones de estructura explicado en la sección **Funciones de Estructura** puede verse en las dos publicaciones citadas (Rodriguez Imazio et al. 2022 y 2023). Dicha comparación también resalta la diferencia fundamental entre ambos eventos de CAT, y es por ello que no se repiten aquí, en aras de proveer una síntesis.

Mas estudios de eventos de turbulencia en regiones montañosas, y en regiones aledañas a las montañas, como también así de otros tipos de eventos de turbulencia en nuestro territorio son necesarias para una correcta comparación con los modelos de pronóstico plantados en las secciones previas.

5 Conclusiones y perspectivas de trabajo a futuro

En esta comunicación se mostraron los métodos aplicados y los resultados del análisis de datos de muy alta resolución (la mas alta disponible hasta hoy) provenientes de una aeronave de investigación. Dichos datos fueron recolectados en latitudes muy altas al sur, que comprenden el sur de la Patagonia, el pasaje de Drake y el norte de la Península Antártica. Gracias a la calidad única de los datos pudieron compararse, directamente, dos eventos de turbulencia atmosférica específicos (CAT, por sus siglas en inglés), y pudo cuantificarse su naturaleza fundamental, como también así los patrones de gran escala involucrados en su desarrollo.

Las simulaciones disponibles para la comparación con modelos de pronóstico provienen de los pronósticos determinísticos y de ensambles de nuestro modelo operativo, WRF. De esta forma, la calibración se realizará por primera vez con datos locales y herramientas de cómputo locales. Cabe destacar aquí, que esto resulta imprescindible para una mejora en los pronósticos.

Este trabajo es indicativo de los trabajos realizados por el grupo de Turbulencia Atmosférica del SMN (GTA-SMN), con el fin de obtener nuevas y novedosas herramientas de pronóstico aeronáutico, como también así en la descripción de fenómenos locales en regiones muy remotas del planeta, dentro de nuestro territorio nacional. Los estudios fueron publicados en la revista *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. Mas estudios relacionados, prontos a publicarse, estan siendo realizados en el marco de una colaboración bilateral CONICET-DLR (Agencia Aeroespacial Alemana).

6 Referencias

- [1] Gultepe, I., Sharman, R., Williams, B., Zhou, P. D., Ellrod, G., Minnis, P., et al. (2019). A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 176(5), 1869–1921.
- [2] Sharman, R. D., Trier, S. B., Lane, T. P., Doyle, J. D. (2012). Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophysical Research Letters*, 39, L12803.
- [3] Tuck, A. F., Watson, R. T., Condon, E. P., Margitan, J. J., Toon, O. B. (1989). The planning and execution of ER-2 and DC-8 aircraft flights over Antarctica, August and September 1987. *Journal of Geophysical Research*, 94(D9), 11181–11222.
- [4] Parish, T. R., Bromwich, D. H. (1989). Instrumented aircraft observations of the katabatic wind regime near terra nova bay. *Monthly Weather Review*, 117(7), 1570–1585
- [5] Bromwich, D. H., Hines, K. M., Bai, L.-S. (2009). Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D8).
- [6] Carli, B., Cortesi, U., Blom, C. E., Chipperfield, M. P., Rossi, G. D., Redaelli, G. (2000). Airborne polar

- experiment Geophysica aircraft in Antarctica (APE-GAIA). SPARC Newsletter, 15, 21–24
- [7] Gary, P., Ellrod, G. P., Knapp, D. I. (1992). An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Weather and Forecasting*, 7(1), 150–165.
- [8] Bacmeister, J. T., Schoeberl, M. R., Lait, L. R., Newman, P. A., Gary, B. (1990). ER-2 mountain wave encounter over Antarctica: Evidence for blocking. *Geophysical Research Letters*, 17(1), 81–84.
- [9] Tuck, A. F. (2008). *Atmospheric turbulence: A molecular dynamics perspective* (1st ed.). Oxford University Press.
- [10] Tuck, A. F. (2021). Perspective on aircraft in the stratosphere: 50 Years from COMESA through the ozone Hole to climate. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 713–727.
- [11] Ferreira, D., Marshall, J., Bitz, C. M., Solomon, S., Plumb, A. (2015). Antarctic Ocean and sea ice response to ozone depletion: A two-time-scale problem. *Journal of Climate*, 28(3), 1206–1226.
- [12] Holland, M. M., Landrum, L., Kostov, Y., Marshall, J. (2017). Sensitivity of Antarctic sea ice to the Southern Annular Mode in coupled climate models. *Climate Dynamics*, 49(5–6), 1813–1831.
- [13] Jucker, M., Goyal, R. (2022). Ozone-forced southern annular mode during Antarctic stratospheric warming events. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095270.
- [14] Rodriguez Imazio, P., Dörnbrack, A., Urzua, R. D., Rivaben, N., Godoy, A. (2022). Clear air turbulence observed across a tropopause fold over the Drake passage—A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035908.
- [15] Rodriguez Imazio, P., Mininni, P. D., Godoy, A., Rivaben, N., Dörnbrack, A. (2023). Not all clear air turbulence is Kolmogorov—The fine-scale nature of atmospheric turbulence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037491.
- [16] Bramberger, M., Dörnbrack, A., Wilms, H., Gamsa, S., Raynor, K., Sharman, R. (2018). Vertically propagating mountain waves—A hazard for high-flying aircraft? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(9), 1957–1975.
- [17] Strauss, L., Serafin, S., Haimov, S., Grubišić, V. (2015). Turbulence in breaking mountain waves and atmospheric rotors estimated from airborne in situ and Doppler radar measurements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(693), 3207–3225.
- [18] Sharman, R. D., Cornman, L. B., Meymaris, G., Pearson, J., Farrar, T. (2014). Description and derived Climatologies of Automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 1416–1432.
- [19] Monin, A. S., Yaglom, A. M. (1975). *Statistical fluid mechanics, Vol. I: Mechanics of turbulence* (1st ed.). MIT Press.
- [20] Kolmogorov, A. N. (1941a). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 30, 301–305.
- [21] Kolmogorov, A. N. (1941b). Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 32, 16–18.
- [22] Rapp, M., Kaifler, B., Dörnbrack, A., Gisinger, S., Mixa, T., Reichert, R., et al. (2021). SOUTHTRAC-GW: An airborne field campaign to explore gravity wave dynamics at the World’s strongest hotspot. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(4), E871–E893.
- [23] Giez, A., Mallaun, C., Nenakhov, V., Zöger, M. (2021). Calibration of a Nose Boom mounted airflow sensor on an atmospheric research aircraft by Inflight Maneuvers (Tech. Rep. No. 2021-17). DLR.
- [24] Giez, A., Mallaun, C., Zöger, M., Dörnbrack, A., Schumann, U. (2017). Static pressure from aircraft trailing-cone measurements and numerical weather-prediction analysis. *Journal of Aircraft*, 54(5), 1728–1737.