

Avances en la meteorología aeronáutica en terreno montañoso

Por H. PUEMPEL*

Introducción

Volar sobre terreno montañoso ha supuesto siempre un desafío para los pilotos y para los predictores meteorológicos que los ayudan. Las montañas dificultan las observaciones y las predicciones, ya que influyen en el flujo de la superficie hacia la estratosfera y crean sus propios regímenes térmicos y características de capa límite. Estos desafíos requieren enfoques y soluciones específicos, que se resumen a continuación.

Los desafíos

Las observaciones

Las observaciones humanas en los valles se ven afectadas por campos visuales restringidos, y las condiciones observadas localmente tienden a no ser representativas de zonas mayores.

Las observaciones automáticas de visibilidad y de base de nubes se ven gravemente afectadas por los regímenes locales que están influenciados por la topografía. Las suposiciones utilizadas para traducir las variaciones temporales de nubosidad en cubierta parcial de nubes y nubes de ladera y bancos de niebla persistentes necesitan un número de sensores mucho mayor para dar resultados fiables.

Los observatorios de montaña también ofrecen información valiosa sobre la baja troposfera, pero su funcionamiento es caro en cuanto a mano de obra, mantenimiento y comunicaciones, y sufren de una accesibilidad que a veces es precaria.

Las instalaciones de radares meteorológicos en las montañas se enfrentan a una elección entre el apantallamiento del haz por los picos altos de los alrededores y el problema del "espumado" sobre la cima de las capas de nubes poco profundas, sobre todo durante la estación fría, si están situadas muy altas. La mezcla de radares en la cima de las montañas y otros instalados en las llanuras crea problemas durante las estaciones de transición, cuando algunas instalaciones se enfrentan sobre todo a cristales de hielo, mientras que las bajas observan gotitas de agua a elevaciones menores, haciendo que la elección de la relación z-r sea crítica.

Las imágenes de satélite, tanto en el canal visible como en el infrarrojo, tienen que discernir las nubes y la cubierta de nieve lo que, a menudo, necesita del uso de canales combinados para dar resultados fiables. Los de órbita polar están empezando a resolver los valles que generalmente no se detectan con las imágenes de satélites geoestacionarios.

Los sondeos de radio para perfiles verticales de temperatura y de humedad son escasos en zonas de montaña y requieren de medidas frecuentes para detectar la variación diurna de la distribución de humedad debida a los vientos de valle y de ladera.

El análisis de los datos

La naturaleza fuertemente localizada de las observaciones, la orientación a lo largo de los valles y las localizaciones parcialmente protegidas son responsables de una estructura altamente anisótropa de la covarianza de error y de las funciones de estructura.

La naturaleza de la capa límite alpina sigue planteando más preguntas que respuestas. Los regímenes de flujo diurno (flujos anabáticos, catabáticos), el bombeo global (flujo entrante durante la tarde, flujo saliente de una cordillera por la noche y a primeras horas de la mañana) y la circulación entre valles que depende de la orientación de la ladera con respecto al sol interactúan con los flujos de escala sinóptica y con la advección.

Los procedimientos de asimilación de datos tienen que incluir un análisis de escala de las variables observables (sistemas de viento térmico, flujos forzados, movimientos de escala sinóptica) en relación con lo que los modelos o los sistemas de predicción estadística necesitan como entrada.

Como en muchas otras aplicaciones, se están desarrollando en la actualidad sistemas de análisis variacional para tratar esta multitud de problemas. Se sospecha que, en estas circunstancias, los métodos sencillos de anidado generan más ruido y ondas de gravedad que información.

La modelización

La mayor resolución horizontal y vertical ha ayudado mucho a representar mejor la topografía en los mode-

* Servicio Meteorológico Aeronáutico, Innsbruck.

los numéricos. Incluso en modelos mundiales, las grandes cordilleras montañosas como los Alpes, las Montañas Rocosas, el Himalaya y las Cordilleras están ahora bien representadas en la escala sinóptica. Ahora se entienden bien fenómenos como la ciclogénesis a sotavento, y generalmente se la predice bien. Están empezando a aparecer en los modelos sistemas de mesoescala como los flujos foehn, pero los sistemas diurnos de viento todavía están mal representados.

Entre los problemas restantes se incluye una representación adecuada de:

- Los campos superficiales, en particular la cubierta y la profundidad de la nieve y la humedad del suelo en función de la característica del terreno.
- Las islas de calor elevadas siguen planteando problemas en la mayor parte de los sistemas de coordenadas verticales ya que, en topografías muy abruptas, los gradientes horizontal y vertical se entremezclan. A veces se utiliza la difusión incrementada, pero solo resuelve los problemas numéricos y no la distribución no realista del calentamiento.
- El problema de escala para representar correctamente la división entre el forzamiento de escala sinóptica, la intensificación local provocada por la topografía y los flujos térmicos sigue afectando a la predicción local. Esto es especialmente cierto para la convección originada, canalizada o intensificada por la topografía en la vecindad de las cordilleras montañosas importantes.
- El efecto de la resistencia aerodinámica de la onda gravitatoria sobre el flujo superior está empezando a comprenderse mejor incluso en modelos mundiales, y muestra potencial para identificar la ruptura de la onda gravitatoria, que suele estar acompañada por un incremento repentino de la resistencia aerodinámica de la onda gravitatoria y, por lo tanto, de la diferencia de presión entre el viento ladera arriba y el lado de sotavento de las cordilleras montañosas.
- El papel de las cordilleras montañosas en la intensificación de la precipitación ha sido el tema del Programa Alpino Mesoescalar (MAP), cuyos experimentos de campo se realizaron en 1999. En particular se estudiaron con detalle el papel de las cordilleras montañosas en la canalización del flujo, el aumento de la convergencia de la humedad y el ascenso forzado.

Predicciones y alertas específicas para la aviación

Todas las operaciones de Reglas de Vuelo Visual (RVV) en terreno montañoso se ven afectadas por

las nubes de ladera y por la intensificación de la precipitación, que reducen la visibilidad. Un terreno pendiente suele coincidir con una base de nubes más baja y estrechos pasillos de vuelo a través de valles empinados, formando un cóctel atroz de peligros para las operaciones de RVV. Esto es cierto para los helicópteros, pero incluso más para los aviones de ala fija que necesitan mantener una velocidad mínima para permanecer suspendidos y un valle lo suficientemente ancho para realizar un giro de 180° de forma segura cuando el camino está bloqueado. En muchos países se han desarrollado productos especiales de predicción y alerta de RVV para tratar este problema. Los países centroeuropeos realizan de manera rutinaria Predicciones de Ruta para la Aviación General (GAFOR) y alertas asociadas (GAMET) para ofrecer a los operadores de RVV herramientas de planificación para vuelos en montañas. Sin embargo, la alta variabilidad espacial y temporal de la nubosidad y de la precipitación en terreno complejo plantea importantes problemas a la realización de tales mapas de predicción: sobre todo, la automatización es, en la actualidad, difícil de prever.

Las montañas son atractivas para muchos deportes y actividades de ocio, pero, desgraciadamente, son la causa de un importante número de accidentes. La única manera de llegar a la gente en ese terreno suele ser mediante aviones de rescate, que necesitan información precisa de las condiciones meteorológicas locales en zonas remotas, donde la demanda de información precisa es difícil de satisfacer dada la escasez de las redes de observación.

La estructura de la capa límite "alpina", su desarrollo diurno y su transformación dependen de los flujos térmicos (vientos de valle y de ladera), que afectan a la generación, la situación y la duración de las nubes bajas y de la niebla en valles y cuencas. Mientras que los flujos secos catabáticos pueden retrasar o evitar la formación de niebla por el drenaje continuo de las capas de humedad cercanas a la superficie, las nubes de ladera y los estratos bajos suelen formarse después de la precipitación y a lo largo de las estaciones de transición, cuando puede observarse con frecuencia una correlación negativa entre la aparición de tales estratos y las tierras bajas que rodean a una cordillera mayor y a los valles interiores. La red cada vez más reducida de estaciones de observación humana tiene que compensarse con medios técnicos para salvaguardar la disponibilidad y la fiabilidad de la información sobre visibilidad y nubosidad.

Los flujos foehn y las nubes de rotación a sotavento suponen amenazas graves para las aeronaves, tanto en vuelo (sobre todo cuando atraviesan dorsales con

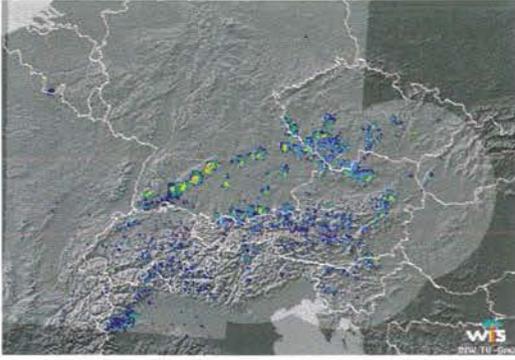


Figura 1 — Imagen compuesta de radar de Europa central, 12 de mayo de 2004 a las 12:20 horas locales

regímenes de flujo fuertes) y en la aproximación y aterrizaje en zonas afectadas. Corrientes descendientes fuertes del orden de varios m/s a sotavento de las dorsales alargadas y de los collados pueden sobrepasar el poder ascendente de aeronaves ligeras, ocasionando choques. Los vuelos no motorizados de planeadores, ala deltas y parapentes son especialmente vulnerables. Se suele encontrar una cizalladura de viento fuerte durante la fase final de la “interferencia del foehn”, cuando el aire foehn, chinook o de tramontana se abre paso a través de una capa de inversión poco profunda a sotavento de una cordillera montañosa. Se pueden observar aumentos o pérdidas de velocidad de hasta 40 nudos en unos pocos cientos de pies.

La ruptura de la onda gravitatoria puede ser responsable de episodios de turbulencia fuerte y extrema tanto en niveles bajos cerca de tierra como en altitud, donde se produce la ruptura de la onda gravitatoria de niveles altos. Estos episodios son raros, pero capaces, sin embargo, de ocasionar daños estructurales a las aeronaves y heridas graves a los pasajeros.

Las operaciones invernales en los aeropuertos de montaña se ven particularmente afectadas por temporales de nieve, precipitación congelante y condiciones degradadas en la pista, que tienden a acortar las pistas y a dificultar los procedimientos de aproximación, y una “estación fría” más larga debida a su mayor elevación.

La convección inducida y canalizada por la topografía está asociada a las características particulares del terreno. Los bordes de las mesetas elevadas, sobre todo cuando están acompañadas por grandes cuencas fluviales o lagos, constituyen un campo abonado a la convección organizada. La imagen compuesta del radar meteorológico de Europa central que se muestra en la Figura 1 ilustra este efecto para las estribaciones septentrionales de los Alpes, la Selva Negra y la meseta de Bohemia, donde grandes ríos (el Danubio), una serie de embalses (el Moldova) o lagos prealpinos sumi-

nistran humedad para interactuar con la convergencia provocada por el terreno y el calor diferencial. En el momento del verano, cuando se ha terminado de fundir la nieve, son visibles efectos similares cerca de las regiones más altas de los Alpes.

Los flujos fríos que salen de las células convectivas sobre terreno complejo pueden canalizarse y alcanzar los valles principales con zonas de cizalladura muy concentradas y corrientes descendientes.

Soluciones y avances

Observaciones

Como el coste de los observadores a tiempo completo se ha vuelto prohibitivo en comparación con las observaciones automatizadas lejos de los aeródromos, en algunas zonas ha tenido éxito el uso de “observadores voluntarios” en los collados, a lo largo de las rutas de RVV y en puntos de interés para aumentar la red de estaciones automáticas, que muy raramente informan de los crucialmente importantes parámetros de nubosidad y visibilidad. Sin embargo, la dificultad para encontrar, mantener y formar a dichos observadores sigue siendo un factor crítico en esta interesante manera de abordar el problema.

Las cámaras Web de la industria del turismo o de comunidades para fines comerciales han demostrado ser un valioso bien para ampliar la red de observación, sobre todo de nubosidad y de visibilidad, en terreno complejo. Solo en Austria, el servicio meteorológico para la aviación tiene acceso a 197 cámaras, algunas de ellas giratorias, otras con un campo visual fijo.

La automatización de los observatorios de montaña, que están entre las estaciones de observación más costosas de manejar y mantener, está progresando. Por ejemplo, Suiza ha instalado una red de estaciones automáticas sobre un gran número de cimas montañosas, y el servicio de alerta de avalanchas de Austria mantiene 38 estaciones automáticas solo en la provincia del Tirol, abarcando únicamente un área de 12 000 km². Se necesitan conexiones de datos por radio o por telefonía móvil para disponer de los datos en línea, se está utilizando tecnología nueva para detectar el espesor de la nieve y se han desarrollado e introducido instrumentos de viento que son menos susceptibles de congelarse sin una gran demanda de energía para calentarlos.

En los EE.UU. se está estudiando el uso en red de radares de bajo coste y corto alcance para solucionar el problema del apantallamiento, y promete convertirse en una alternativa interesante a las redes convencionales.

Las redes de rayos se ven menos afectadas por el apantallamiento que los radares meteorológicos y pueden instalarse a bajo coste para los Servicios Meteorológicos, ya que generalmente hay un gran interés por parte de la industria de producción de electricidad y la industria de los seguros para instalar o financiar parcialmente dichas redes.

El beneficio de utilizar imágenes de satélite multispectrales para distinguir entre la nieve, las nubes bajas y la niebla se ha puesto de manifiesto con éxito utilizando satélites de órbita polar y de investigación. El uso de tales datos para la predicción inmediata y para la predicción de muy corto plazo depende en la actualidad de la disponibilidad de un número suficiente de satélites para ofrecer una resolución temporal satisfactoria que puede alcanzarse sobre todo en latitudes altas cuando, por ejemplo, se disponga de los satélites europeo y chino además de las plataformas actuales de la NOAA.

El éxito del *resondeo* del programa de la AMDAR ha aumentado la cantidad de datos de aeronaves disponible para una mayor resolución temporal en los perfiles verticales y se espera que la introducción prevista de sensores de humedad en aeronaves equipadas con la AMDAR tenga un gran efecto positivo sobre la detección de potenciales condiciones de engelamiento, que se suelen intensificar en la cara corriente arriba de las cordilleras montañosas.

Análisis de datos

Para acomodar la covarianza de error determinada topográficamente entre las observaciones de superficie a lo largo de los valles y las transversales a las cordilleras, el uso de funciones de estructura anisótropa y de técnicas llamadas de "huella" ha sido el primero en utilizar un modelo de análisis de alta resolución para el terreno alpino por parte de la Universidad de Viena (VERA). Las estructuras típicas climatológicamente seguras de los campos de presión superficial y de temperatura para distintos momentos del día y para las estaciones respaldan las observaciones, llevando a una mejor representación de los efectos de las montañas sobre estos campos.

Modelización

Para resolver incluso la escala de valles grandes, hace falta utilizar modelos de resolución muy alta. Se necesitan distancias de rejilla muy por debajo de 10 km para describir correctamente la desviación de los flujos de escala sinóptica, y harían falta rejillas incluso más finas para resolver los flujos térmicos, los flujos de desfiladero y la canalización. Como el calor diferencial de las laderas expuestas frente a las ocultas juega un papel en la convección, la resolución espacial nece-

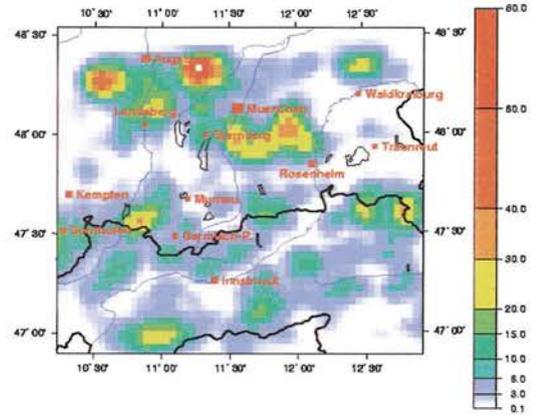


Figura 2 — Predicción de alta resolución de precipitación para las estribaciones alpinas. Obsérvese la concentración de precipitación a lo largo de las cumbres, y las zonas secas a lo largo de los valles interiores (2004).

saria acarrea el uso de formulación no hidrostática y el cálculo directo de la convección. Resulta crucial un tratamiento cuidadoso de las propiedades de la superficie tales como la humedad del suelo, la cubierta y profundidad de la nieve, y la vegetación, con su gran dependencia de la altitud.

En la actualidad se están desarrollando y probando en algunos países sistemas de predicción por conjuntos a corto plazo, y se han constatado resultados muy prometedores, por ejemplo, por parte de grupos de investigación italianos al aplicar tales técnicas al terreno complejo de la península italiana.

Los intentos de obtener la ruptura de la onda gravitatoria a partir de campos de modelos internos sólo han obtenido un éxito parcial. La disipación de la energía cinética turbulenta en modelos de alta resolución se está estudiando como fuente de información para la presencia de ruptura de la onda gravitatoria, pero todavía sufre un alto índice de falsas alarmas. Las técnicas parametrizadas asociadas al cálculo de la resistencia aerodinámica de la onda gravitatoria (ROG), que suele revelar un incremento masivo en la presencia de ROG de altos niveles, también parecen algo prometedoras. Se están realizando más esfuerzos de investigación para hacer frente a este problema, por ejemplo, en el marco del proyecto "Flysafe" europeo propuesto al Sexto Programa Marco de la Unión Europea.

Un ejemplo de un modelo de investigación ejecutado de manera *cuasioperativa* para la región alpina (Figura 2) por el Centro de Investigación de Karlsruhe, en Alemania, demuestra el potencial de las predicciones de muy alta resolución para identificar la precipitación intensificada por la orografía en los Alpes comparado con zonas convectivas mayores en las estribaciones.

Predicciones y alertas específicas para la aviación

La naturaleza regular de los regímenes de viento de valle sugiere el uso de técnicas estadístico-dinámicas para resolver tales regímenes térmicos correlacionándolos con otros campos como el calentamiento radiativo, la nubosidad, las propiedades del suelo y los campos de viento de escala sinóptica. Incluso la predicción localizada de fuertes vientos ladera abajo invita a la reducción de escala del flujo foehn basado en datos experimentales (como los obtenidos durante el experimento del MAP o el proyecto de Ondas de Sierra), intensificada por experimentos de simulación locales de muy alta resolución.

Los pronósticos de aeródromo y de ruta se benefician de las climatologías locales de episodios convectivos (zonas fuente, trayectorias típicas) basadas en datos de radar y de rayos recogidos a lo largo de varios años.

Para emplazamientos críticos como el aeropuerto de Hong Kong (véase el artículo de la página 337), el uso de perfiladores de viento, lidares y redes de observación local para detectar la cizalladura del viento pueden ser necesarios para ofrecer niveles aceptables de seguridad bajo cualquier condición meteorológica.

Los países alpinos están desarrollando conjuntamente métodos combinados para la predicción de la llegada, la fuerza y la distribución de las térmicas para los pilotos de planeadores que implican datos de modelos, sondeos e información de satélite, y ahora están disponibles como producto de valor añadido en la Web para los usuarios interesados ("Alptherm", que se encuentra en www.alpenflugwetter.com).

Conclusiones y perspectivas

A lo largo de los cinco o seis próximos años, se espera un importante progreso en los siguientes campos:

- La meteorología por satélite se beneficiará de los radiómetros avanzados a bordo tanto de satélites de órbita polar como geoestacionarios, aumentando la capacidad de detectar y analizar nubes bajas y la visibilidad en valles y cuencas y las ten-

dencias de su formación y su disolución. Los barridos rápidos mejorarán la predicción inmediata de temporales en zonas que no están cubiertas por las redes de radares.

- La instalación de equipos de la AMDAR en aeronaves regionales y la disponibilidad de sensores de humedad mejorará nuestro conocimiento de la estructura térmica de la atmósfera dentro de las regiones montañosas y de la capa límite.
- Los posteriores aumentos en la resolución de los modelos y en las predicciones por conjuntos a corto plazo permitirán predicciones probabilísticas de los episodios convectivos que afectan a las operaciones en las terminales de aeródromo y en las maniobras de aproximación y salida en terreno complejo.
- Un mejor conocimiento de la ruptura de la onda gravitatoria y de su predicción con modelos no hidrostáticos de alta resolución mejorará las alertas (SIGMET, AIRMET) sobre las montañas.

Referencias y fuentes útiles

En el *Quarterly Journal* de la Real Sociedad Meteorológica, 129 (enero de 2003), se publicó un volumen especial dedicado a la investigación relacionada con el MAP; editores invitados P. Bougeault, R. A. Houze, R. Rotunno y H. Volkert.

Se pueden encontrar más detalles sobre el análisis de alta resolución para la región alpina VERA en: <http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/vera/>.

En <http://www.arpa.emr.it/smr/archivio/downloads/generale/Meteo002.zip> puede encontrarse una interesante presentación en PowerPoint sobre un sistema de predicción por conjuntos para una zona limitada ejecutado por el servicio meteorológico regional de Emilia-Romana, en el norte de Italia.

En la página Web del Instituto Meteorológico y centro de investigación de Karlsruhe: <http://www.imkifu.fzk.de>, se ofrece una descripción del modelo regional de alta resolución para Europa central y la zona alpina.

