

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 13. MEDICIÓN DEL VIENTO EN ALTITUD	458
13.1 Generalidades	458
13.1.1 Definiciones	458
13.1.2 Unidades de medida del viento en altitud	458
13.1.3 Requisitos meteorológicos	459
13.1.3.1 Aplicaciones para operaciones meteorológicas	459
13.1.3.2 Mejoras en los procedimientos de notificación	460
13.1.3.3 Requisitos de exactitud	460
13.1.3.4 Requisitos de altitud máxima	462
13.1.4 Métodos de medición	463
13.1.4.1 Seguimiento mediante señales de radionavegación	464
13.1.4.2 Seguimiento mediante antena direccional	464
13.2 Sensores e instrumentos de medición del viento en altitud	465
13.2.1 Teodolitos ópticos	465
13.2.2 Radioteodolitos	466
13.2.3 Radar	467
13.2.3.1 Radares primarios	467
13.2.3.2 Radares secundarios	467
13.2.4 Sistemas de seguimiento de ayuda a la navegación	468
13.2.4.1 Disponibilidad de señales navaid en el futuro	469
13.2.4.2 Sistema de Posicionamiento Global	469
13.2.4.3 Cadenas LORAN-C	470
13.3 Métodos de medición	471
13.3.1 Consideraciones generales sobre el procesamiento de datos	471
13.3.2 Observaciones realizadas con globos piloto	472
13.3.3 Observaciones realizadas con una antena direccional	472
13.3.4 Observaciones realizadas con sistemas de radionavegación	473
13.4 Ubicación del equipo en tierra	474
13.5 Fuentes de error	474
13.5.1 Generalidades	474
13.5.1.1 Errores de seguimiento del objetivo	475
13.5.1.2 Errores en la asignación de altura	475
13.5.1.3 Movimiento del objetivo respecto de la atmósfera	476
13.5.2 Errores en las observaciones con globos piloto	476
13.5.3 Errores de los sistemas que utilizan una antena direccional	476
13.5.4 Errores en los sistemas de medición del viento mediante GPS	479
13.5.5 Errores en los sistemas de radionavegación terrestres LORAN-C	482
13.5.6 Errores de representatividad	483
13.6 Comparación, calibración y mantenimiento	485
13.6.1 Comparación	485
13.6.1.1 Control operativo por comparación con campos de predicción	485
13.6.1.2 Comparación con otros sistemas de medición del viento	486
13.6.2 Calibración	486
13.6.3 Mantenimiento	487
13.7 Correcciones	487
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	489

CAPÍTULO 13. MEDICIÓN DEL VIENTO EN ALTITUD

13.1 GENERALIDADES

13.1.1 Definiciones

Las definiciones siguientes han sido tomadas del *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM, 2010):

Observación con globo piloto: determinación de los vientos en altitud siguiendo la trayectoria de un globo libre con la ayuda de un dispositivo óptico.

Observación de radioviento: determinación de los vientos en altitud siguiendo la trayectoria de un globo libre por medios electrónicos.

Observación de radiovientosonda: observación combinada de radioviento y de radiosonda.

Observación del aire en altitud: observación meteorológica realizada en la atmósfera libre, bien directa o indirectamente.

Observación del viento en altitud: observación efectuada a una altura dada o resultado de un sondeo completo para determinar la velocidad y la dirección del viento en la atmósfera.

El presente capítulo aborda principalmente las observaciones realizadas con radioviento y globos piloto. En varios capítulos de la parte II se examinan las técnicas relativas a los globos, así como las mediciones que requieren plataformas especiales, equipo especializado o que se hacen indirectamente por métodos de teledetección. Actualmente se recibe un gran número de observaciones de aeronaves comerciales y también de perfiladores de viento y radares meteorológicos. Los datos adquiridos desde globos se obtienen principalmente mediante técnicas de radiovientosonda, aunque pueden realizarse también observaciones mediante globos piloto y radioviento cuando se necesitan datos adicionales, sin los gastos que implica el lanzamiento de una radiosonda.

13.1.2 Unidades de medida del viento en altitud

La velocidad del viento en altitud se expresa generalmente en metros por segundo o en nudos, aunque también se utiliza el kilómetro por hora. La dirección de la que procede la corriente de aire se notifica en grados a partir del norte: 90° representa el viento que proviene del este, 180° el del sur, 270° el del oeste y 0/360° el del norte. En los informes TEMP, la dirección del viento se redondea a los 5° más cercanos. Al utilizar esta resolución, se reduce la exactitud que puede obtenerse con los sistemas modernos de medición del viento, en especial cuando los vientos en altitud son fuertes. Los datos de estos sistemas codificados en BUFR brindan información más exacta sobre la dirección y velocidad del viento en altitud.

Los informes sobre la dirección del viento de superficie resultantes de mediciones realizadas a 1° o menos de latitud del Polo Norte o del Polo Sur deben notificarse de manera que el cero de su acimut esté alineado con el meridiano 0° de Greenwich. Todas las estaciones de observación en altitud fijas y móviles ubicadas a hasta 1° de latitud del Polo Norte o del Polo Sur deberían utilizar este sistema de coordenadas distinto con respecto a la dirección del viento en todos los niveles del sondeo completo, incluso si el globo se aleja a más de 1° de latitud del polo. El método de información de estas mediciones debería indicar que en el informe de observación del aire en altitud se utilizó un sistema de coordenadas diferente, en particular si se utilizaron claves alfanuméricas tradicionales; la ubicación de la estación en clave BUFR indica automáticamente que se utilizó ese sistema de coordenadas diferente.

La altura utilizada al informar sobre mediciones de radioviento y radiovientosonda es la altura geopotencial, de modo que las mediciones del viento se realizan a la misma altura que las mediciones de radiosonda de la temperatura y la humedad relativa (véase el capítulo 12 de la parte I (sección 12.3.6)). La conversión de la altura geométrica, medida con radiosonda GPS o radar, a la altura geopotencial es simplemente una función del campo gravitacional en un lugar determinado y no depende del perfil de temperatura y humedad del lugar. La energía potencial gravitatoria (Φ) de una unidad de masa de cualquier cosa es la integral de la gravedad normal del nivel medio del mar ($z_{\text{geométrica}} = 0$) a la altura de la masa ($z_{\text{geométrica}} = Z$), según la ecuación 13.1:

$$\Phi = \int_0^Z \gamma(z_{\text{geométrica}}, \varphi) dz_{\text{geométrica}} \quad (13.1)$$

donde $\gamma(z_{\text{geométrica}}, \varphi)$ es la gravedad normal por encima del geoide. Es una función de la altitud geométrica, $z_{\text{geométrica}}$, y la latitud geodésica, φ .

Este geopotencial se divide por la gravedad normal a 45° de latitud para obtener la altura geopotencial utilizada por la OMM:

$$z(z_{\text{geométrica}}, \varphi) = \Phi(z_{\text{geométrica}}, \varphi) / \gamma_{45^\circ} = \left(\int_0^z \gamma(z_{\text{geométrica}}, \varphi) dz_{\text{geométrica}} \right) / \gamma_{45^\circ} \quad (13.2)$$

donde γ_{45° se tomó en la definición como $9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$.

Así pues, la unidad utilizada para designar la altura es el metro geopotencial tipo. En la troposfera, el valor de la altura geopotencial es una aproximación cercana a la altura geométrica expresada en metros (véase, por ejemplo, el capítulo 12 de la parte I (cuadro 12.4)). Las alturas geopotenciales utilizadas en los informes del viento en altitud tienen como referencia el nivel del mar, pero en numerosos sistemas el cálculo de las mismas se realiza inicialmente en términos de la altura sobre el nivel de la estación.

La conversión de las alturas geométricas a las alturas geopotenciales se detalla en el capítulo 12 de la parte I, con inclusión de expresiones adecuadas para la dependencia del campo gravitacional de la altura y la latitud.

13.1.3 Requisitos meteorológicos

13.1.3.1 Aplicaciones para operaciones meteorológicas

Las observaciones del viento en altitud son esenciales para las predicciones meteorológicas operativas en todas las escalas a nivel mundial, y son más eficaces cuando se utilizan junto con mediciones simultáneas de campo de masa (temperatura y humedad relativa).

- a) En la capa límite atmosférica, las mediciones fiables del viento en altitud y de la cizalladura vertical del viento son esenciales para las predicciones de la contaminación ambiental.
- b) Son fundamentales para la seguridad y el ahorro de las operaciones aeronáuticas.
- c) La exactitud de las mediciones del viento en altitud y de la cizalladura vertical del viento resulta crucial para el lanzamiento de vehículos espaciales y otros tipos de cohetes.
- d) Las incertidumbres en la determinación de los vientos en altitud son el factor que limita la puntería de la artillería moderna y, por lo tanto, tienen importancia para la seguridad de las operaciones militares.
- e) El viento en altitud es una de las variables climáticas esenciales.

13.1.3.2 **Mejoras en los procedimientos de notificación**

Por lo general, los valores del viento en altitud se introducen en las predicciones numéricas del tiempo como promedios a lo largo de una capa cuyo espesor dependerá de las escalas de movimiento atmosférico concernientes a la predicción. Tales valores no suelen utilizarse como datos de entrada a las presiones o altitudes tipo, sino que, generalmente, estarán centrados en altitudes de presión que variarán a medida que cambia la presión de superficie en el lugar de la observación. Así pues, es de importancia fundamental que en los informes del viento en altitud se represente con exactitud la variación de los vientos entre niveles tipo. Ello permite, además, asegurarse de que se comuniquen datos exactos del viento a esos niveles.

En los sistemas modernos de radioviento, las computadoras tienen la capacidad de suministrar fácilmente toda la estructura detallada de las operaciones meteorológicas y de la investigación científica. Los informes del viento en altitud deberían contener información suficiente para definir la cizalladura vertical del viento a través de los límites entre las diversas capas en los campos de masa. Por ejemplo, siempre que sea posible habría que informar de la cizalladura del viento a través de las inversiones de temperatura, o de la cizalladura del viento significativa asociada con grandes cambios de la humedad relativa en la vertical.

Al comunicar los datos del viento en altitud en las claves FM 35-XI Ext. TEMP o FM 32-XI PILOT (OMM, 2011a), se acepta una desviación de las velocidades del viento de hasta 5 m s^{-1} respecto de la interpolación lineal entre niveles significativos. El uso de algoritmos automatizados con ese límite de ajuste puede generar errores en los mensajes comunicados, que serán mucho mayores que los errores de observación. En ocasiones, el proceso de cifrado también puede reducir la exactitud más allá de las necesidades al respecto indicadas en el capítulo 12 de la parte I.

Ello debería prevenirse lo antes posible, presentando los informes en una clave BUFR apropiada que permita la presentación de datos sobre vientos verticales de alta resolución, además de los niveles significativos para satisfacer las necesidades de los usuarios. No obstante, hasta que ello se logre, para los mensajes TEMP y PILOT es posible utilizar, como práctica nacional, un límite de ajuste correspondiente a una velocidad del viento de 3 m s^{-1} en lugar de 5 m s^{-1} . Restringiendo el límite de ajuste debería obtenerse, en promedio, un informe de nivel significativo de viento por kilómetro, aproximadamente, en la vertical. Los informes TEMP o PILOT deberían comprobarse visualmente respecto de las mediciones detalladas del viento en altitud, y los mensajes comunicados tendrían que corregirse con el fin de eliminar los errores de ajuste inaceptables antes de su emisión.

En un comienzo, los datos del viento en altitud se procesaban manualmente o con una pequeña calculadora, por lo que no resultaba práctico elaborar informes detallados de la estructura vertical del viento, lo cual explica el uso de niveles significativos y límites de ajuste relativamente rudimentarios, que no son adecuados para la calidad de las observaciones producidas por los sistemas modernos de radiovientosonda.

13.1.3.3 **Requisitos de exactitud**

Los requisitos de exactitud para las mediciones del viento en altitud están descritos en términos de velocidad y dirección del viento, así como de los componentes ortogonales del viento, en el capítulo 12 de la parte I (anexo 12.A). En la mayoría de los casos, los sistemas de medición del viento en altitud deberían poder medir vientos de entre 0 y 100 m s^{-1} . Si los sistemas están concebidos para mediciones del viento a niveles bajos no siempre necesitarán un intervalo de valores tan amplio. Deben reducirse lo más posible los errores sistemáticos de la medición de la dirección del viento, desde luego muy por debajo de 5° , especialmente en lugares donde los vientos en altitud son habitualmente fuertes. En la década de 1990, con un buen mantenimiento operativo, la mayoría de los sistemas de medición del viento proporcionaban datos del viento en altitud con un error vectorial típico (2σ) superior o igual a 3 m s^{-1} en la troposfera inferior y de 5 a 6 m s^{-1} en la troposfera superior y la estratosfera (Nash, 1994). La aparición de sistemas de medición del viento mediante GPS muy fiables significa que muchos sistemas modernos funcionan aún mejor, con un error vectorial típico ($k = 2$) menor de 1 m s^{-1} , con poca degradación

de la calidad de las mediciones en la vertical (véanse los resultados de la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad, efectuada en Yangjiang (China) (OMM, 2011b)).

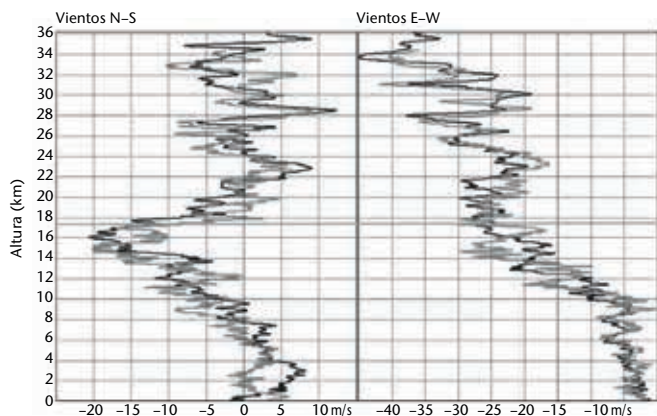
En la figura 13.1 se muestran ejemplos de perfiles verticales de vientos horizontales de Yangjiang (China) y Reino Unido. Estas mediciones se realizaron con una resolución vertical superior a 150 m. La figura 13.1 a) muestra dos mediciones de Yangjiang espaciadas seis horas. La estructura fina de la vertical no es el resultado de ruido, sino la estructura real en la atmósfera, medida también por otros sistemas de radiovientosonda en los vuelos respectivos. Durante esta prueba hubo vientos muy fuertes del este en los niveles superiores de la estratosfera (asociados con la fase oriental de la oscilación cuasibienal). Los vientos más fuertes del norte asociados con el chorro a unos 16 km se extienden hasta unos 21 km y luego a la troposfera, a 17,5 km. La estructura detallada del viento en la estratosfera entre 22 y 34 km suele persistir más de 7 horas, lo que demuestra que una gran parte de la estructura detallada no es transitoria y por ello merece la pena que se archive y se notifique.

La figura 13.1 b) corresponde al principio del invierno en Reino Unido, en que la tropopausa es mucho más baja, a unos 11 km, pero nuevamente en este caso, los vientos más fuertes asociados con el chorro en la troposfera superior se extienden al menos hasta a 16 km. Las grandes perturbaciones en el viento causadas por las ondas gravitatorias inmediatamente por encima de la tropopausa no se resolverían a una resolución vertical de 1 km. En esta ocasión, hay otro chorro asociado con la circulación alrededor del vórtice polar a alturas superiores a 30 km. La figura 13.1 c) corresponde a las condiciones del verano de Reino Unido. En este caso hay una cizalladura vertical del viento significativa a través de la tropopausa. Los vientos del este predominan en la estratosfera a alturas superiores a 16 km, y no son tan fuertes como los vientos del oeste que hay en invierno. No obstante, entre 20 km y 32 km, vuelve a haber perturbaciones importantes en los vientos del verano.

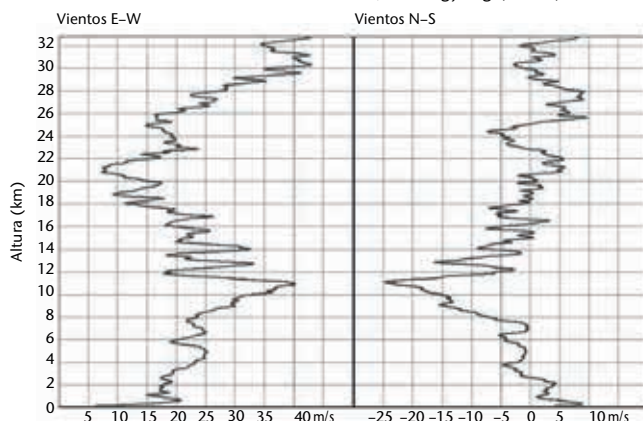
Así pues, aunque la necesidad acusada por los usuarios de una resolución vertical para las mediciones del viento en altitud indicada en el capítulo 12 de la parte I (cuadro 12.B.1 del anexo 12.B) se sitúa entre 200 y 500 m en la troposfera y es de 1 km en la estratosfera, en la práctica hay información en las mediciones de radiovientosonda que debería archivarse e informarse por otras razones, además de los análisis de la predicción numérica del tiempo. Así, se recomienda que, cuando sea posible, los sistemas utilicen la mayor resolución disponible actualmente, con una resolución vertical igual o mayor que 200 m en la troposfera inferior y mayor que 300 m en la troposfera superior y la estratosfera inferior. Como puede verse, hay fuertes cizalladuras cerca del chorro máximo, y resolverlas con fiabilidad requiere una resolución vertical superior a los 500 m citados en el cuadro 12.B.1.

Una resolución vertical de 50 a 150 m puede ser útil para las actividades meteorológicas generales realizadas en la capa límite atmosférica (hasta 2 km por encima de la superficie). No obstante, para que el aumento de la resolución sea útil, el sistema de seguimiento utilizado deberá mantener una exactitud aceptable de las mediciones del viento a la resolución vertical más alta.

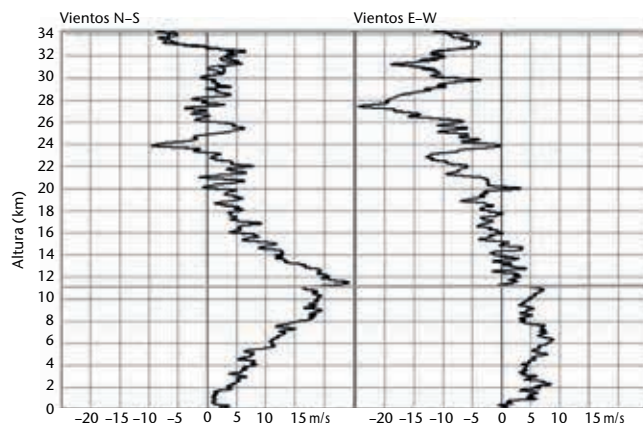
Es frecuente especificar mediciones del viento en altitud de gran exactitud para ciertos tipos de operaciones, como el lanzamiento de cohetes. En este caso, deben usarse globos especiales de superficie moldeada, que siguen los vientos más de cerca que los globos meteorológicos ordinarios. Como las observaciones deberán realizarse cerca del emplazamiento requerido y con un margen de tiempo dado, para cumplir esas condiciones de exactitud deberá planificarse cuidadosamente el calendario de observaciones necesario. Cabe señalar la siguiente característica de la variabilidad atmosférica: las diferencias del vector cuadrático medio entre dos observaciones del viento en altitud, sin errores y a una misma altura (por ejemplo, con una resolución vertical de 300 m), serán en general inferiores a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ si las mediciones se realizan simultáneamente y a una distancia inferior a 5 km en sentido horizontal. Lo mismo sucederá si las mediciones se efectúan en el mismo lugar, pero a intervalos de tiempo inferiores a unos 10 minutos (según estudios similares a menor escala que los estudios de representatividad de Kitchen (1989)).



a) Vuelo 1 a las 0800 horas (en negro) y vuelo 3 a las 1448 horas (en gris) del 14 de julio de 2010, de la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad, en Yangjiang (China)



b) Medición de noviembre realizada en Camborne (Reino Unido); se superponen datos de dos tipos diferentes de radiosonda. (Nota: En este diagrama, los componentes zonal y meridional del viento están invertidos; es decir, el componente zonal se muestra a la izquierda)



c) Medición de julio realizada en Camborne (Reino Unido); se superponen datos de dos tipos diferentes de radiosonda.

Figura 13.1. Ejemplos de perfiles verticales de los vientos horizontales, medidos a una resolución vertical de unos 150 m en Yangjiang (China), y a comienzos del invierno y del verano en Reino Unido; la línea gris horizontal indica la altura de la tropopausa.

13.1.3.4 **Requisitos de altitud máxima**

En algunos emplazamientos, especialmente los que forman parte del Sistema Mundial de Observación del Clima, podría ser necesario utilizar equipos provistos de globos (como los examinados en este capítulo) para obtener información sobre el viento en altitud hasta alturas

de 35 km o más. Los globos necesarios para alcanzar estas alturas pueden ser mucho más costosos que los pequeños y económicos que transportan los sistemas de radiovientosonda a alturas de entre 20 y 25 km.

Una red ideal de observación del viento en altitud deberá tomar muestras en todas las escalas de movimiento (desde la planetaria hasta la mesoescala) en la troposfera y en la estratosfera inferior. La red de observación tendrá que identificar también estructuras de viento significativas a pequeña escala utilizando sistemas de teledetección de alta resolución temporal. No obstante, en la estratosfera media y alta las escalas de movimiento predominantes observadas en las operaciones meteorológicas son mayores (escala planetaria y escalas sinópticas mayores). Por esa razón, tal vez no sea necesario efectuar mediciones a alturas superiores a 25 km en todos los emplazamientos de una red nacional de observación del viento en altitud con un espaciamiento optimizado para las observaciones en la troposfera. El costo operativo total puede ser menor si se utilizan conjuntamente los sistemas de observación descritos en este capítulo y los sistemas de detección descritos en la parte II. En tales casos, la infraestructura técnica nacional deberá estar en condiciones de asegurar el mantenimiento adecuado de los diversos sistemas utilizados.

13.1.4 Métodos de medición

Los datos de viento en altitud de sistemas instalados en globos se obtienen principalmente mediante técnicas de radiovientosonda, aunque pueden realizarse también observaciones mediante globos piloto y radioviento cuando se necesita disponer de datos adicionales sin los gastos que implica el lanzamiento de una radiosonda. Las observaciones de las estaciones de altitud del Sistema Mundial de Observación se complementan en tierra incorporando mediciones de aeronaves, perfiladores de viento y radares meteorológicos Doppler. En zonas con gran nivel de operaciones aeronáuticas, la información disponible de las aeronaves y los radares prevalecen sobre la de las radiosondas hasta una altura de unos 12 km. Sobre el mar, esas observaciones se obtienen principalmente mediante aeronaves civiles que vuelan a niveles de crucero. Estas observaciones se complementan incorporando perfiles verticales obtenidos mediante radiovientosondas lanzadas desde buques o islas apartadas, y mediante el seguimiento de nubes o de estructuras de vapor de agua observadas desde satélites meteorológicos geoestacionarios. En el futuro, se espera que las mediciones del viento por medio de dispositivos de lidar (detección y localización por ondas luminosas) a bordo de satélites y por radar mejoren la cobertura mundial de los actuales sistemas de observación. Los radares sónicos (sodares), los lidars y los anemómetros cometa se utilizan también para las mediciones del viento de alta resolución temporal, necesarias para aplicaciones específicas. Se están desarrollando también aeronaves sin piloto, de bajo costo, para usos meteorológicos.

Los métodos de radiovientosonda para medir la velocidad y la dirección del viento en altitud están generalmente basados en la observación del movimiento de un globo libre que asciende a una velocidad más o menos uniforme, o de objetos que caen por efecto de la gravedad, como las radiosondas con paracaídas. Dado que se precisa medir el movimiento horizontal del aire, es necesario que el objetivo utilizado no tenga un movimiento horizontal apreciable respecto del aire observado. La información esencial requerida de los sistemas de seguimiento directo incluye la altura del objetivo y las mediciones de su posición horizontal o, en su defecto, su velocidad horizontal a intervalos de tiempo conocidos. Los requisitos de incertidumbre indicados en el capítulo 12 de la parte I (anexo 12.A) incluyen el efecto de los errores de altitud o de presión atribuidos a las mediciones del viento. Será difícil cumplir los requisitos de exactitud operativa habituales en niveles superiores a la capa límite atmosférica utilizando métodos de seguimiento que presupongan cierta velocidad ascensional del globo, en lugar de medir la altura mediante un sistema de seguimiento o mediante una radiosonda incorporada al objetivo.

Para medir el movimiento de la atmósfera, los sistemas de teledetección dispersan radiación electromagnética o sonido desde alguno de los objetivos siguientes: hidrometeoros, polvo, aerosoles o heterogeneidades del índice de refracción causadas por una turbulencia atmosférica de pequeña escala o por las propias moléculas de aire.

Los métodos de medición directa del viento examinados en este capítulo utilizan objetivos cuya posición puede ser seguida continuamente. Aunque pueden utilizarse numerosos métodos para seguir los objetivos, en el presente texto se considerarán solo dos tipos ampliamente utilizados.

13.1.4.1 **Seguimiento mediante señales de radionavegación**

Este método consiste en fijar a un objetivo (un globo ascendente o una radiosonda con paracaídas) una radiosonda capaz de recibir señales emitidas por un sistema de transmisores de radionavegación. El sistema más común es el uso de señales de satélites de navegación. En la práctica, hasta el momento, ello significa utilizar las señales GPS de NAVSTAR, aunque otros servicios de radionavegación introducidos más recientemente podrían utilizarse en el futuro. Una antena especial de la radiosonda recibe las señales de los satélites. El sistema también tiene una antena GPS situada en tierra para recibir señales de referencia. Un equipo GPS, en tierra o la radiosonda, decodificará las señales o calculará la posición de la radiosonda en tres dimensiones en función del tiempo.

El seguimiento mediante señales de radionavegación se logró por primera vez a gran escala con la cadena de navegación Omega, pero una vez que este servicio dejó de funcionar, la mayoría de los operadores de radiosondas pasaron a determinar el viento mediante GPS. También se utilizaron las señales de navegación de largo alcance en tierra basadas en el sistema LORAN, descrito en OMM (1985). La cobertura ofrecida por LORAN-C junto con el sistema ruso Chayka ha disminuido en los últimos años y ahora su uso operativo se limita principalmente a Europa oriental cuando Chayka está operando.

El seguimiento de ayuda a la navegación (navaid) por GPS se utiliza cada vez más en operaciones meteorológicas de rutina gracias al alto grado de automatización que ofrece este tipo de sistemas de determinación del viento. Además, el nivel de mantenimiento que requiere el equipo de navaid situado en tierra es muy bajo. La medición en altura con radiosondas GPS es el mejor método para determinar las alturas necesarias para la medición precisa de temperaturas en la estratosfera en los estudios climáticos.

Las primeras radiosondas GPS utilizaban la banda de frecuencias centrada en torno a 403 MHz del servicio de ayuda a la meteorología (MetAids) para transmitir datos a la superficie, pero hay unos pocos países en los que no se puede operar radiosondas civiles a gran escala en esta banda y se han desarrollado radiosondas GPS que también utilizan la banda de frecuencia más alta de MetAids en torno a 1 680 MHz.

13.1.4.2 **Seguimiento mediante antena direccional**

En muchas redes nacionales grandes el mayor costo del material fungible de las radiosondas GPS se ha traducido en la continuación del uso de radiosondas sin GPS junto con un sistema de tierra que sigue la trayectoria del objetivo utilizando una antena direccional que mide el acimut y dos de los parámetros siguientes: ángulo de elevación, alcance oblicuo y altura. Las mediciones se realizan mayormente mediante un radioteodolito o un radar secundario (véase la sección 13.2.3.2) para seguir la trayectoria de una radiosonda transportada por un globo. En algunos casos, se utiliza un teodolito óptico para seguir la trayectoria del globo. Un radar primario (véase la sección 13.2.3.1) también puede seguir la trayectoria de un objetivo reflector transportado por el globo, pero aunque este sistema se usaba generalizadamente en el pasado, ya no es de uso común. La diferencia entre los radares primarios y secundarios es que el radar primario detecta los impulsos reflejados por su objetivo, mientras que el radar secundario solo transmite los impulsos y no busca reflexiones. Con un radar secundario, la radiosonda/transpondedor unida al globo recibe los impulsos de radar y transmite información sobre el momento de recepción a la estación de radar en tierra. Los sistemas de radar y radioteodolito suelen tener una incertidumbre en el seguimiento cercana a $0,1^\circ$ en elevación y acimut, mientras que el margen de error de los sistemas de radar suele ser inferior a 30 m.

Los modernos sistemas de radioteodolito, con antenas de dimensiones inferiores a 2 m, son los más adecuados para efectuar mediciones del viento en altitud cuando las elevaciones de los

globos se mantienen entre 10° y 15°. El sistema de radar secundario sigue utilizándose en redes nacionales cuando se dispone de un espectro de radiofrecuencia de las bandas de frecuencias del servicio de ayuda a la meteorología. Las antenas direccionales que dan buenos resultados son las que funcionan en la banda de frecuencia de 1 680 MHz, dado que el tamaño de la antena necesario para el seguimiento direccional a 403 MHz es demasiado grande para la mayoría de las prácticas operativas modernas.

La decisión de utilizar un radioteodolito o una radiosonda GPS para medir el viento en altitud estará influida parcialmente por el alcance oblicuo máximo esperado en el emplazamiento de observación. El sistema de medición del viento por GPS obtendrá una medición con buena exactitud en los grandes alcances. El alcance máximo varía considerablemente con la latitud: 70 km serán adecuados en las regiones ecuatoriales y polares, pero se necesitarán alcances de hasta 200 km o más en ciertas zonas templadas de latitud media. En el cuadro 13.1 se indica el porcentaje de ocasiones en que se rebasaron ciertos alcances oblicuos con globos a 30 km de altitud. Los datos corresponden a estaciones ubicadas en Europa entre los paralelos 50° N y 60° N. Los porcentajes indicados corresponden al año entero, pero habría que tener presente que los sondeos que excedieron los límites se centraron en la estación invernal.

Cuadro 13.1. Porcentaje de ocasiones en que se rebasaron ciertos alcances oblicuos (globo a 30 km de altitud)

Alcance oblicuo excedido (km)	140	160	175	190
Porcentaje de ocasiones (%)	5	2	1	0,5

13.2 **SENSORES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL VIENTO EN ALTITUD**

Los sistemas de radioviento se utilizaron en un principio para realizar mediciones del viento en altitud en presencia de nubes. Tales sistemas también eran capaces de efectuar mediciones muy exactas para grandes alcances, siguiendo trayectorias de globos a altitudes de hasta 30 km. En la actualidad, el uso de esos sistemas es esencial para obtener el grado de exactitud que requieren, en la mayoría de los casos, las mediciones modernas del viento en altitud. El alto nivel de automatización de los actuales sistemas de radiovientosonda permite prescindir de un operador durante la mayor parte del ciclo de medición, con lo cual se reduce el costo de las operaciones meteorológicas.

13.2.1 **Teodolitos ópticos**

Los teodolitos ópticos pueden utilizarse para hacer el seguimiento de globos cuando el costo de las mediciones de radioviento no puede justificarse, por ejemplo, en momentos intermedios entre los ascensos principales o en otros lugares de un país para zanjar las brechas de una red a altitudes más bajas (véase OMM, 2008). Los operadores deberán tener un alto nivel de formación y de pericia para evitar que los errores de medición del viento en altitud aumenten rápidamente cuando el globo supera la capa límite, aunque se han logrado períodos de observación útiles en partes de América del Sur y África.

El sistema óptico de los teodolitos de seguimiento de globos piloto debería estar montado de modo que el eje de su ocular permanezca siempre horizontal, cualquiera que sea la dirección en que se apunte el telescopio. Para ello, será preferible emplear un prisma pentagonal en lugar de un prisma ortogonal, ya que un ligero desplazamiento del primero no afectará la perpendicularidad de las dos partes que integran el eje óptico.

El ocular del enfoque del telescopio debería estar provisto de una rejilla de alambre y proporcionar de 20 a 25 aumentos con un campo de visión no inferior a 2°. El soporte del teodolito tendría que ser de estructura robusta. Debería permitir girar el teodolito rápidamente a mano, o lentamente por rozamiento o engranaje helicoidal en las ruedas acimutal y de elevación. Estas deberían estar graduadas en divisiones no superiores a 1° y provistas de nonios

o tornillos micrométricos que permitan realizar lecturas de ángulos con una resolución de $0,05^\circ$, con posibilidad de estimación a $0,01^\circ$. Las escalas tendrían que estar marcadas e iluminadas de manera que puedan leerse con facilidad, tanto de día como de noche. La holgura del engranaje de las ruedas no debería exceder de $0,025^\circ$. Los errores de colimación horizontal y vertical no deberían ser superiores a $0,1^\circ$.

Para facilitar el seguimiento de un globo en movimiento rápido, el teodolito debería estar provisto de una mira. Es también útil, a tal efecto, hacer uso de un telescopio secundario con un campo visual amplio no inferior a 8° .

La base del teodolito debería poder acoplarse a un trípode corriente u otro tipo de soporte, e incorporar algún dispositivo que permita nivelar con exactitud el aparato. El soporte debería ser adaptable a la estatura del observador. El teodolito debería ser de estructura robusta y estar protegido frente a la corrosión.

El sistema debería utilizarse con un programa informático apropiado para ingresar y verificar los datos de las observaciones a fin de detectar errores.

13.2.2 Radioteodolitos

La determinación del viento mediante radioteodolito es más apropiada para ubicaciones donde las elevaciones del globo respecto de la estación de tierra permanecen altas durante todo el vuelo. Si la elevación del globo se mantiene por encima de 16° , es posible cumplir la mayoría de los requisitos de incertidumbre indicados en el capítulo 12 de la parte I para las mediciones del viento en altitud utilizando antenas de seguimiento relativamente pequeñas. Cuando los globos se encuentran a baja elevación, los errores de medición mediante radioteodolito aumentan rápidamente a medida que disminuye la elevación, incluso con antenas de seguimiento más grandes (véase la sección 13.5.3). Cuando los vientos en altitud se mantienen muy fuertes es muy difícil cumplir los requisitos de incertidumbre del capítulo 12 de la parte I utilizando un radioteodolito, a menos que se emplee un transpondedor para obtener una medición del alcance oblicuo (véase la sección 13.2.3.2).

Por lo general, se utilizaba un radioteodolito para seguir la trayectoria de las emisiones de una radiosonda suspendida de la parte inferior de un globo meteorológico. Para determinar la intensidad máxima de la señal, se hace girar en torno a los ejes vertical y horizontal, mediante servomecanismos apropiados, una antena direccional acoplada a un receptor de radio. La radiofrecuencia utilizada es generalmente 1 680 MHz. Un buen modelo de antena, con un diámetro de unos 2 m, debería tener una sensibilidad baja respecto del haz principal en sus lóbulos laterales; con tales tamaños es posible conseguir seguimientos angulares con una exactitud de $0,1^\circ$. Así, el radioteodolito podría hacer seguimientos a elevaciones bajas, del orden de 6° a 10° , sin interferencia entre las señales recibidas directamente de las radiosondas y las reflejadas por las superficies adyacentes. La interferencia entre señales directas y reflejadas se denomina interferencia por trayectos múltiples, y es, por lo general, el factor que limita la capacidad de seguimiento del radioteodolito a elevaciones bajas. El grado de interferencia por trayectos múltiples dependerá absolutamente de la posición de la antena respecto de las superficies reflectantes, tanto si el radioteodolito está situado sobre un tejado como sobre el suelo.

Antes de adquirir un radioteodolito deberían solicitarse al fabricante las características detalladas de funcionamiento de la antena, del sistema de detección, de los servocontroles, y de los algoritmos para el procesamiento de datos. Los radioteodolitos portátiles modernos con antenas de menos de 2 m de diámetro pueden tener problemas de interferencia por trayectos múltiples a elevaciones tan altas como 16° . Cuando se producen interferencias por trayectos múltiples, la señal máxima no se obtendrá por lo general en la dirección del globo. Los errores de elevación varían con el tiempo, pues las condiciones de interferencia por trayectos múltiples cambian a medida que la radiosonda se mueve, lo cual puede introducir errores sistemáticos considerables (superiores a 10 m s^{-1}) en los datos de viento.

Mientras el radioteodolito sigue la trayectoria de la radiosonda, transmite al ordenador del equipo de tierra los ángulos de acimut y de elevación observados. Las mediciones provenientes de la radiosonda determinan, con el tiempo, la variación de la altura geopotencial correspondiente a las direcciones observadas. Es posible deducir así con qué frecuencia cambia de posición el globo. La computadora debería mostrar las mediciones del viento en altitud en forma tabular o gráfica. La continuidad de los vientos en la vertical permitirá al operador verificar posibles errores de seguimiento. Cuando el operador considere que el seguimiento es satisfactorio, se podrá enviar a los usuarios un informe adecuado sobre el viento en altitud.

En ocasiones, los globos cambiarán de dirección poco después del lanzamiento debido a una cizalladura del viento justo sobre la superficie. Los globos regresarán al radioteodolito, aun cuando hayan sido lanzados para alejarse del radioteodolito. En tales casos, para poder mantener el seguimiento automatizado con exactitud, el radioteodolito deberá ser capaz de adoptar unas frecuencias de barrido muy altas en acimut y en elevación. Ello implica unas especificaciones mecánicas más exigentes de lo necesario para la mayoría de los vuelos cuando el globo se encuentra a distancias mayores. A fin de rebajar las especificaciones mecánicas necesarias para un seguimiento exacto, varios radioteodolitos modernos incorporan un seguimiento interferométrico. En estos sistemas, el interferómetro compara la fase de las señales que llegan a las distintas secciones de su antena de seguimiento con el fin de determinar la posición de la fuente transmisora respecto de la orientación de la antena. En la práctica, se toman muestras de los datos de fase en microprocesadores de alta velocidad, mientras que un servomecanismo simple orienta la antena aproximadamente en dirección de la radiosonda. La orientación aproximada de la antena es necesaria para que el interferómetro tenga una buena relación señal/ruido y para minimizar las reflexiones recibidas desde tierra. A continuación, se deducen los valores de elevación y acimut combinando varias posiciones de la antena, mientras que la dirección de la fuente se deduce mediante el interferómetro a partir de las mediciones de fase. La exactitud de la medición obtenida es similar a la que se logra con los mejores radioteodolitos ordinarios. Los sistemas de radioteodolito interferométrico suelen ser más fiables y de mantenimiento más económico.

13.2.3 **Radar**

13.2.3.1 ***Radares primarios***

La característica fundamental de la técnica de seguimiento por radar, en comparación con la del radioteodolito, es que el alcance oblicuo se mide directamente con el acimut y la elevación. Los radares primarios se basan en la detección de impulsos de ondas de radio ultracortas reflejadas por un objetivo adecuado transportado por el globo. Con un radar primario fiable es posible alcanzar en casi todas las circunstancias los márgenes de incertidumbre (exactitud) requeridos para las mediciones del viento en altitud que se indican en el capítulo 12 de la parte I. Los radares de seguimiento de alta precisión permiten conseguir una gran exactitud en las mediciones del viento en altitud, pero en la práctica su utilización es muy costosa. Para obtener mediciones con una incertidumbre menor de 1 m s^{-1} , es esencial utilizar globos de superficie moldeada (que también son muy costosos) en lugar de globos meteorológicos ordinarios.

No es necesario utilizar una radiosonda para determinar valores de viento con un radar primario, basta con un reflector adecuado. Si existe una estructura de apoyo técnico para el mantenimiento del radar y si los gastos de personal son muy pequeños, se podrían conseguir considerables ahorros al reducir al mínimo los gastos que implica una radiosonda. Sin embargo, el uso de radares primarios como herramienta de medición del viento para obtener mediciones operativas baratas no ha tenido éxito en los países en desarrollo, en que no suele hacerse el mantenimiento del equipo; en la mayoría de los países ahora se utilizan radiosondas GPS o radioteodolitos.

13.2.3.2 ***Radares secundarios***

En los sistemas de radar secundario, los pulsos de energía transmitidos por la estación de tierra son recibidos por un sistema respondedor transportado por el globo. Este sistema

puede consistir en un paquete de transpondedor separado, o en un dispositivo incorporado al diseño básico de la radiosonda. La frecuencia de la señal de retorno no tiene por qué coincidir necesariamente con la de la señal de salida. El tiempo transcurrido entre la transmisión del pulso y la respuesta del respondedor permite medir directamente el alcance oblicuo. El uso de este tipo de sistema todavía está muy generalizado en las grandes redes nacionales.

La ventaja de esta técnica sobre la del radar primario estriba en la posibilidad de mantener el seguimiento a mayores alcances para una potencia de salida dada del transmisor de tierra. Ello se debe a que la energía transmitida por el respondedor es independiente y, por lo general, mayor que la energía recibida del transmisor terrestre. De ese modo, la energía recibida por el receptor de tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia oblicua del objetivo y no inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia oblicua (como sucede con el radar primario).

La complejidad del sistema y las necesidades de mantenimiento de un sistema de radar secundario suelen ser intermedias entre las del radioteodolito y las del radar primario. Los administradores de la redes deben poder garantizar que los sistemas están bien mantenidos. Por ejemplo, en la Federación de Rusia algunos sistemas más antiguos (véase el cuadro 13.4) de buen desempeño respecto del seguimiento y que están utilizándose ampliamente aunque son difíciles de mantener, están siendo sustituidos por sistemas de seguimiento de tierra mejorados, que son relativamente fáciles de mantener (véase OMM, 2005).

13.2.4 **Sistemas de seguimiento de ayuda a la navegación**

En los sistemas de seguimiento navaid, la radiosonda incorpora un sistema de antena que recibe las señales enviadas por un sistema de radionavegación que estará a cargo de organismos independientes de los Servicios Meteorológicos Nacionales. En la actualidad, los sistemas navaid utilizados para medir el viento con fines operativos son los dispositivos GPS por satélite, que brindan una cobertura mundial, y los sistemas LORAN, que incorporan transmisores terrestres y tienen una cobertura muy limitada.

Una de las principales ventajas de los sistemas navaid es la simplicidad del sistema de tierra, que no tiene partes móviles y no requiere ajustes muy exactos de las antenas de seguimiento. Por ello, el sistema puede desplegarse desde aeronaves y buques y desde emplazamientos situados en tierra.

Para mantener en niveles mínimos el costo del procesamiento de las señales en la radiosonda, la mayor parte del procesamiento de las señales LORAN en las mediciones del viento se efectúa después de que la radiosonda haya retransmitido de vuelta las señales navaid al sistema de tierra. Así pues, en estos sistemas será esencial una buena recepción desde la radiosonda; la ubicación de las antenas del equipo de tierra deberá permitir una buena línea visual hacia las radiosondas en todas las direcciones. A medida que se reduce el costo de los equipos GPS que procesan las señales GPS, es posible realizar una gran parte del procesamiento de las señales GPS en la radiosonda, aunque una parte debe realizarse en tierra para incorporar la información de las señales GPS de referencia recibidas por una antena terrestre local. En operaciones normales, la exactitud de las mediciones de posición de la radiosonda GPS no se reduce significativamente en función del alcance de las estaciones en tierra (véase OMM, 2011b).

Los principales problemas operativos de las radiosondas GPS operativas modernas se han registrado cuando hay transmisores de radio en la vecindad a frecuencias que causan interferencias con la recepción de las señales GPS por la radiosonda.

Para las mediciones del viento en altitud, esta se asigna a partir de las mediciones de la altura geopotencial de la radiosonda. En el sistema de tierra es esencial que la indicación de tiempo de los datos de viento navaid procesados coincida exactamente con la indicación de tiempo de las mediciones de altitud de la radiosonda.

13.2.4.1 **Disponibilidad de señales navaid en el futuro**

Las operaciones internacionales de navegación ya utilizan principalmente señales de satélites GPS en órbita alrededor de la Tierra. Estas señales satelitales han sustituido en buena medida a las recibidas de transmisores terrestres fijos. El otro servicio de navegación satelital mundial en funcionamiento es GLONASS, en la Federación de Rusia. BeiDou (COMPASS), en China, y Galileo, en Europa, también están las fases iniciales de operación, en preparación para su uso como servicios mundiales antes de 2020. Un número limitado de países ha preferido seguir utilizando sistemas de navegación terrestres LORAN para sus redes de navegación regionales o nacionales. Antes de contemplar algún tipo de inversión a largo plazo en un sistema determinado, deberá consultarse a las autoridades de navegación acerca de la disponibilidad de señales en el futuro.

Aunque el cálculo de los valores de viento mediante el sistema de navegación GPS es más complejo que con las señales navaid de los transmisores terrestres, debido a que los satélites se desplazan continuamente respecto de las radiosondas, el desarrollo de sistemas de radiosonda GPS ha alcanzado la madurez y se han podido probar 11 sistemas comerciales en Yangjiang (China) (véase OMM, 2011b). Muy pocos diseños han registrado problemas importantes y la mayoría cuenta con recepción de señales adecuada (reciben señales de cinco a ocho satélites en un momento determinado) y algoritmos de procesamiento adecuados que relacionan las señales GPS recibidas por la radiosonda con las recibidas por una antena de referencia en la estación de tierra.

13.2.4.2 **Sistema de Posicionamiento Global**

Las radiosondas GPS se utilizan actualmente en aproximadamente la mitad de las estaciones de la red mundial de radiosondas.

El GPS de NAVSTAR es un sistema de radionavegación de gran exactitud basado en señales de radio emitidas por una constelación de 25 satélites que orbitan a la Tierra en 6 planos. Cada uno de los planos orbitales intersecta el ecuador con un espaciado de 60° y una inclinación orbital de 55° respecto del eje polar. El período orbital de cada satélite dura aproximadamente 11 horas y 58 minutos. La constelación de satélites está configurada de manera que en cualquier lugar del mundo haya siempre un mínimo de cuatro satélites por encima del horizonte aunque, en ciertas situaciones, habrá hasta ocho satélites visibles desde la tierra.

Las señales transmitidas desde los satélites son controladas por patrones de frecuencia atómicos que confieren una estabilidad de frecuencia superior a $1 \cdot 10^{-13}$. Cada satélite transmite dos únicos códigos digitales pseudoaleatorios de determinación de la distancia, junto con información adicional como el almanaque de la constelación, las efemérides, la hora UTC y el funcionamiento del satélite. Los códigos de determinación de la distancia y los datos del sistema se transmiten mediante tecnología digital bifásica de espectro ensanchado. El nivel de potencia de las señales del código de determinación de la distancia es de -130 dBm, muy inferior al ruido térmico de fondo.

Se tienen en cuenta los códigos siguientes:

- a) El código de adquisición aproximativa se transmite en una portadora a 1 575,42 MHz que está modulada mediante un código de ruido pseudoaleatorio específico del satélite, con una frecuencia de segmentos de 1 023 MHz; esta modulación extiende de hecho la anchura del espectro del código de adquisición aproximativa en 2 MHz.
- b) El código de precisión puede ser sustituido por un código Y controlado por el ejército en los períodos en que se activa el sistema contra falsificaciones. El código de precisión y los datos del sistema se transmiten coherentemente en las portadoras L1 (1 575 MHz) y L2 (1 228 MHz).

Las longitudes de onda de las señales GPS son mucho más cortas que las de LORAN. Las antenas utilizadas para recibir las señales GPS, que son mucho más pequeñas, deberán estar ubicadas en la parte superior de la radiosonda, y deberían estar libres de obstáculos en todas las direcciones

que apunten al horizonte. Las antenas pequeñas están mejor protegidas que las LORAN de los efectos perjudiciales de la electricidad atmosférica. Aunque la ubicación de las antenas GPS podía plantear un conflicto con el sensor de temperatura de la radiosonda, este problema ha sido solucionado en los diseños disponibles.

Las señales GPS deberán ser preprocesadas en la radiosonda a fin de reducir la información GPS a señales que pueden ser transmitidas a la estación de tierra en la frecuencia portadora de la radiosonda (o bien como información analógica, como en el sistema LORAN, o mediante un tren de datos digitales). El preprocesamiento puede efectuarse mediante diversas técnicas. Las radiosonda GPS modernas utilizan el código de precisión en modo diferencial, lo que exige la recepción simultánea de las señales GPS en un receptor de la estación de tierra y en el de la radiosonda. Para obtener un cálculo exacto de los valores de viento hacen falta señales de al menos cuatro satélites. En modo diferencial, la fase de las señales recibidas en la radiosonda utiliza como referencia las recibidas en la estación de tierra. Esto resulta especialmente útil cuando la radiosonda se encuentra cerca de la estación de tierra, ya que los errores de ubicación introducidos por los retardos de propagación desde el segmento espacial hasta los receptores o por el sistema contra falsificaciones son similares en ambos receptores y pueden eliminarse en gran parte.

Los sistemas de seguimiento GPS pueden hacer un seguimiento exacto con una frecuencia de muestreo muy alta (de pocos segundos). De esa manera, es posible medir la modulación de la velocidad horizontal aparente, ya que la radiosonda oscila como un péndulo bajo el globo durante un período de 10 a 15 segundos. La mayoría de las pequeñas diferencias que se encontraron en las mediciones del viento con radiosonda GPS en Yangjiang (China) provinieron del uso de algoritmos diferentes para filtrar el movimiento del globo, en que muchas veces el algoritmo se ajustaba a una configuración particular de la suspensión de la radiosonda y no a la utilizada en la prueba de comparación de radiosondas (OMM, 2011b).

Una de las consideraciones prácticas en relación con las radiosondas GPS es el tiempo que tarda el dispositivo de seguimiento de la radiosonda en sincronizarse con las señales recibidas del satélite. No es aconsejable lanzar la radiosonda antes de haber conseguido esta sincronización. Para ello puede ser necesario situar la radiosonda en el exterior durante varios minutos antes del lanzamiento o bien utilizar un método de transmisión de las señales GPS a la radiosonda en el lugar donde esta está siendo acondicionada.

13.2.4.3 **Cadenas LORAN-C**

El sistema LORAN-C es un servicio naváico de relativamente largo alcance que funciona en una banda de bajas frecuencias centrada en torno a 100 kHz (longitud de onda, 3 km). Como se utilizaba principalmente para la navegación marina, particularmente en áreas costeras y continentales de cabotaje, la cobertura de LORAN-C abarcaba solo ciertas partes del mundo, en especial las zonas marítimas del hemisferio norte. Los nuevos propietarios han renovado algunas de las cadenas para ofrecer redes regionales o nacionales de navegación marina.

Una transmisión LORAN-C consiste en grupos de ocho o nueve impulsos de la portadora de 100 kHz, cada uno de los cuales tiene una duración de 150 μ s aproximadamente. Cada cadena de transmisores consta de una estación principal y dos o más estaciones secundarias. En principio, la coherencia de la cadena se establece tomando como referencia la transmisión principal. Cada estación secundaria transmite sus grupos de impulsos a intervalos fijos después de la estación principal, con una cadencia específica para cada cadena, que normalmente es de una vez cada 100 μ s.

Las señales LORAN-C se propagan como ondas terrestres y como ondas ionosféricas reflejadas por la ionosfera. Las ondas terrestres son relativamente estables en su propagación. Solo se introducen algunas correcciones de fase muy pequeñas que dependen del medio de propagación (terrestre o marino) de las señales. El ritmo de variación de las correcciones de fase a medida que cambia la posición de la radiosonda no suele ser lo suficientemente grande para afectar la exactitud de las mediciones del viento. La propagación de la onda ionosférica es más variable, ya que depende de la posición de la ionosfera, y variará según la hora del día.

Las señales de onda terrestres procedentes del transmisor son mucho más intensas que las de las ondas ionosféricas, pero estas se atenúan mucho más lentamente que aquellas. Así pues, el mejor momento para medir valores de viento mediante LORAN-C es aquel en que la mayoría de las señales recibidas de todos los transmisores por la radiosonda son ondas terrestres. Tales situaciones son posibles en partes de las áreas de servicio de LORAN-C, pero no en todas las ubicaciones teóricamente cubiertas.

La radiosonda LORAN-C recibe las señales mediante su propia antena y, seguidamente, modula la frecuencia portadora de la radiosonda para transmitir las señales al receptor de esta. El dispositivo de seguimiento LORAN utilizado para detectar los instantes de llegada de los impulsos LORAN debería ser capaz de diferenciar hasta cierto punto entre las señales de onda terrestres e ionosféricas. Para ello, habrá que detectar el instante de llegada de las partes delanteras de los impulsos. En la actualidad, los dispositivos de seguimiento LORAN pueden funcionar en modo de cadena cruzada, de manera que es posible utilizar conjuntamente señales procedentes de más de una cadena LORAN. Este mecanismo es esencial para obtener mediciones del viento de buena calidad en numerosas partes de las áreas de servicio del sistema LORAN-C. Los valores de viento se calculan a partir de los ritmos de variación de las diferencias entre los instantes de llegada de pares de transmisores LORAN-C. Para efectuar los cálculos se utilizan todas las señales LORAN-C fiables de las que se pueda disponer, en lugar de un mínimo estricto de tres.

Actualmente, el uso de sistemas de navegación LORAN-C es muy limitado.

13.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN

13.3.1 Consideraciones generales sobre el procesamiento de datos

Los sensores de seguimiento modernos pueden obtener lecturas con mucha mayor frecuencia que a intervalos de 1 minuto, que era la utilizada en los primeros sistemas manuales. Por lo general, el procesamiento de los datos de viento estará totalmente automatizado mediante la utilización de una computadora en el sistema de tierra. El operador archivará y visualizará la información sobre los vientos en altitud para verificarla antes de enviarla a los usuarios.

Así, el muestreo óptimo de los datos de seguimiento se efectuará a intervalos no mayores de 10 segundos. El muestreo debería realizarse a la frecuencia más alta que se considere útil en el sistema de seguimiento. Las altas frecuencias de muestreo facilitan el control de la calidad de los datos mediante algoritmos automatizados. Después de la edición inicial, los datos de seguimiento pueden suavizarse con técnicas estadísticas, y utilizarse para calcular la variación de la posición con el tiempo, en caso necesario. El suavizado determinará el espesor de la capa atmosférica en que será aplicable la medición del viento en altitud. El suavizado será frecuentemente distinto según la etapa del vuelo, a fin de tener en cuenta las distintas necesidades de los usuarios a diferentes alturas y las limitaciones del sistema de seguimiento utilizado. Si la exactitud de la medición disminuye demasiado en niveles superiores, podría ser necesario reducir la resolución vertical de la medición por debajo del nivel óptimo requerido a fin de mantener los errores de medición dentro de límites aceptables.

Los algoritmos eficaces de corrección inicial y suavizado pueden utilizar polinomios de bajo orden (Acheson, 1970) o splines cúbicos (de Boor, 1978). En OMM (1986) se indican varios algoritmos para el cálculo de los datos de viento a partir de observaciones de radar y de radioteodolitos. Por lo general, los datos de viento pueden determinarse a partir de posiciones diferenciales de los datos de seguimiento o a partir de las razones de cambio de las variables técnicas suavizadas por el sistema de seguimiento (véase Passi, 1978). Numerosos sistemas modernos utilizan esta última técnica, pero los algoritmos deberán poder resolver algunas singularidades de las variables técnicas, por ejemplo cuando el globo vuelve a pasar por encima del lugar de seguimiento a alta elevación.

Cuando los vientos calculados a partir de los datos de seguimiento se visualizan para la verificación, será importante indicar las regiones del vuelo en que se perdieron algunos datos

o se considera que tienen demasiado ruido para utilizarlos. Algunos de los algoritmos utilizados para la interpolación tal vez no sean muy estables cuando existen lagunas en los datos de seguimiento. Es importante diferenciar entre las mediciones fiables de la cizalladura vertical del viento y las cizalladuras resultantes del procesamiento automatizado de los datos, cuando se carece de datos de seguimiento. Al comenzar a subir el globo, los datos de seguimiento frecuentemente son de baja calidad. Si el sistema de observación en altitud no puede realizar mediciones válidas del viento poco después del lanzamiento, será preferible dejar un espacio en blanco en los informes hasta que sea posible obtener tales datos. Esto sucede porque la interpolación entre la superficie y los primeros niveles de datos válidos a menudo requiere la interpolación a través de las capas de cizalladura acentuada del viento en la vertical. Los algoritmos automatizados rara vez funcionan adecuadamente en esas circunstancias.

13.3.2 **Observaciones realizadas con globos piloto**

La nivelación exacta y la orientación del teodolito óptico con respecto al norte verdadero constituyen unos requisitos previos esenciales para la observación del acimut y de la elevación de un globo en movimiento. Las lecturas de acimut y de elevación deberían realizarse a intervalos no inferiores a 1 minuto. Los ángulos acimutales deberían determinarse a la décima de grado más próxima. Durante el ascenso de un globo piloto, la lectura de los ángulos de elevación debería redondearse a la décima de grado más próxima si aquellos son iguales o superiores a 15° . Cuando los ángulos sean menores de 15° , será necesario medir la elevación con una resolución de $0,05^\circ$.

Cuando el ascenso de la radiosonda esté siendo seguido por un teodolito óptico será posible obtener una mayor exactitud de la medición del viento en altitud a elevaciones inferiores. Por lo tanto, la lectura de los ángulos de elevación debería redondearse a la décima de grado más próxima cuando aquellos sean superiores a 20° ; a los $0,05^\circ$ más próximos cuando sean iguales o inferiores a 20° , pero mayores de 15° ; y a los $0,01^\circ$ más próximos cuando sean iguales o inferiores a 15° . Para medir el tiempo podrá utilizarse un cronómetro o una alarma que suene a los intervalos deseados.

En los ascensos en que se utilice un solo teodolito, la evaluación de la velocidad y de la dirección del viento implica el cálculo trigonométrico de las variaciones, minuto a minuto, de la posición del plano del globo. La manera más práctica de hacerlo consistirá en utilizar un programa informático apropiado.

Si se requiere una mayor exactitud habría que utilizar la técnica de doble teodolito. La línea de base entre los instrumentos debería tener una longitud mínima de 2 km, de ser posible en una dirección casi perpendicular al viento dominante. Los cálculos se simplifican cuando las dos estaciones de seguimiento están a un mismo nivel. La comunicación por teléfono o por radio entre las dos estaciones debería ayudar a sincronizar las observaciones desde ambos emplazamientos. La sincronización es esencial para conseguir una exactitud satisfactoria de la medición. La utilización de teodolitos registradores, cuyas lecturas quedan registradas electrónicamente, puede ser muy útil para mejorar la exactitud de las mediciones.

Para realizar el seguimiento con varios teodolitos pueden utilizarse otros procedimientos de evaluación. La redundancia proporcionada por la totalidad de los datos de seguimiento permite mejorar la exactitud de la medición, pero obliga a realizar los cálculos en un ordenador personal (véanse Lange, 1988; Passi, 1978).

13.3.3 **Observaciones realizadas con una antena direccional**

Los sistemas de medición del viento que efectúan el seguimiento con antenas direccionales requieren unos procedimientos de instalación y mantenimiento muy cuidadosos. Debe hacerse todo lo posible por asegurar la exactitud de las mediciones de elevación y acimut. A tal fin, será necesario nivelar exactamente la instalación y efectuar un mantenimiento cuidadoso para asegurarse de que la orientación del eje eléctrico de la antena se mantenga cercana al eje mecánico. Para ello pueden utilizarse varios métodos de comprobación, por ejemplo,

el seguimiento de la posición de transmisores u objetivos locales cuya posición sea conocida. En los últimos años, la orientación incorrecta del acimut ha generado errores adicionales en las mediciones del viento en numerosas estaciones.

La calibración del alcance oblicuo de un radar primario puede verificarse tomando como referencia objetivos estacionarios conocidos, de haberlos. Por lo general, el seguimiento mediante radar puede verificarse comparando las alturas geopotenciales del radar con mediciones simultáneas de la radiosonda. En la sección 13.7 se examinan las correcciones de las mediciones de la altura por radar para los errores de seguimiento introducidos por la refracción atmosférica.

La comparación de las mediciones de la altura por radar con las alturas geopotenciales de la radiosonda GPS permite identificar el seguimiento mediante radar que no cumple las normas. Además, cuando las mediciones por radar del alcance oblicuo son fiables es posible identificar pequeños errores sistemáticos de la elevación comparando las alturas por radar con las de la radiosonda en función de la cotangente de la elevación. En OMM (2011*b*) se establecen los errores típicos de la altura geopotencial de la radiosonda GPS para las radiosondas más habitualmente utilizadas.

Tanto los sistemas de radar como los radioteodolitos pueden tener dificultades para seguir un objetivo a corta distancia, debido a que la intensidad de la señal recibida por un lóbulo lateral de la antena puede ser suficientemente alta para permitir un seguimiento automatizado continuado a corta distancia; sin embargo, cuando el seguimiento se realiza desde un lóbulo lateral, la intensidad de la señal recibida disminuirá rápidamente al cabo de unos minutos, dando la impresión de que el objetivo ha desaparecido. Cuando ello suceda, puede resultar difícil recuperar el seguimiento en ciertos sistemas en condiciones de nubes bajas, lluvia o niebla en el lugar de lanzamiento. Por lo tanto, será necesario disponer de un método que permita comprobar que el objetivo está centrado en el haz principal al inicio del vuelo. Esta operación podría realizarla un operador utilizando un dispositivo de puntería, un telescopio o una videocámara alineada con el eje de la antena. La alineación del seguimiento es más difícil de comprobar con un radioteodolito interferométrico, pues el seguimiento mecánico del radioteodolito no siempre coincidirá exactamente con la dirección observada de desplazamiento del globo.

13.3.4 **Observaciones realizadas con sistemas de radionavegación**

El desarrollo de observaciones del viento mediante GPS fue descrito por primera vez por Call (OMM, 1994) y Kaisti (1995). Estos sistemas no decodificaban las señales de GPS recibidas, y ahora han sido sustituidos por radiosonadas GPS que sí decodifican las señales.

La geometría utilizada para las señales de navegación por satélite es tal que los algoritmos de determinación del viento mediante GPS parecen ser más fiables cuando, durante el ascenso, se reciben las señales desde al menos cinco satélites. El almanaque del GPS se puede utilizar para identificar los momentos en los que la geometría satelital resulte insuficiente para obtener datos de viento. En la práctica, esta situación es infrecuente con la actual configuración satelital y las buenas antenas de recepción satelital utilizadas con las radiosondas modernas.

Al realizar mediciones del viento en altitud con sistemas de seguimiento navaid, el sistema terrestre navaid tendría que estar exactamente sincronizado con las transmisiones navaid antes del lanzamiento. La sincronización se obtiene, generalmente, utilizando señales recibidas mediante una antena local conectada al receptor del sistema terrestre. Esa antena debería poder recibir las señales adecuadas para efectuar la sincronización independientemente de las condiciones meteorológicas en el emplazamiento. El equipo de tierra debería suministrar al operador indicaciones claras de las señales navaid disponibles para medir el viento antes del lanzamiento y también durante el vuelo de la radiosonda. Cuando las radiosondas GPS se utilizan para mediciones en altitud durante el ascenso operativo, es esencial que se determine con exactitud la altura de la antena local de GPS respecto de la superficie y se ingrese en el programa informático de procesamiento de la estación de tierra.

Después del lanzamiento, los sistemas navaid están muy automatizados. Sin embargo, las estimaciones de los errores de medición esperados, basadas en la configuración y en la calidad de las señales navaid recibidas, serán útiles para el operador. Durante el vuelo, el operador deberá poder identificar las radiosondas defectuosas con características de baja recepción o transmisión que proporcionen observaciones manifiestamente inferiores a las normales. Estas deberán ser eliminadas y, de ser necesario, habrá que repetir el lanzamiento.

Las mediciones del viento en altitud satisfactorias con sistemas de radionavegación LORAN requieren que la radiosonda reciba señales de al menos tres estaciones LORAN. La diferencia entre los instantes de llegada de las señales de navegación recibidas por la radiosonda, tras una transmisión coherente desde dos ubicaciones, define el lugar geométrico o la línea de posición (véase OMM, 1985). Este tendrá la forma de una hipérbola sobre un plano (pero se convierte en una elipse sobre una superficie esférica). Por esa razón, los sistemas de navegación que utilizan esta técnica se denominan sistemas hiperbólicos. Dos líneas de posición que se corten serán suficientes para determinar las posiciones en el plano. Sin embargo, si las líneas de posición son casi paralelas en el punto de intersección puede obtenerse un error considerable de la posición, asociado a un pequeño error en el instante de llegada. Con los sistemas navaid de medición del viento en altitud LORAN ha quedado claramente demostrado que deberían utilizarse todas las señales navaid disponibles de un tipo determinado (por lo general, cuatro o cinco como mínimo) para mejorar la fiabilidad del seguimiento. En Karhunen (1983) se indica un tipo de algoritmo utilizado para explotar todas las señales disponibles del sistema navaid.

13.4 UBICACIÓN DEL EQUIPO EN TIERRA

Un radioteodolito o un radar deberá ubicarse en un terreno elevado cuyo horizonte esté lo más libre posible de obstáculos. Ninguno de ellos debería subtender un ángulo mayor de 6° en el punto de observación. Un emplazamiento ideal sería una colina simétrica con una pendiente de unos 6° para una distancia de 400 m, en una hondonada rodeada de promontorios con una elevación angular de 1° o 2° .

El sistema de seguimiento debería estar sustentado en una base firme sobre la que se instalará el equipo. Para obtener mediciones navaid satisfactorias será esencial contar con una buena recepción de las señales mediante una antena navaid local y la antena del sistema terrestre de la radiosonda. Las antenas deberían estar instaladas en un emplazamiento de observación en altitud que disponga de un horizonte adecuado para recibir señales desde todas las direcciones.

Generalmente, las mediciones del viento en altitud se comunican junto con las del viento en superficie. Es preferible que estas se obtengan en un emplazamiento cercano al lugar de lanzamiento del globo, que debería haberse seleccionado de modo que proporcione vientos que resulten adecuados a la finalidad de la medición del viento en altitud. Por ejemplo, si la medición del viento en altitud es necesaria para detectar un efecto localizado que influye en un aeródromo, la ubicación óptima podría diferir de la de un emplazamiento requerido para observar movimientos en mesoescala y en escala sinóptica en un área más extensa.

13.5 FUENTES DE ERROR

13.5.1 Generalidades

Los errores generados en las mediciones del viento en altitud son una combinación de los errores debidos a un seguimiento imperfecto del movimiento horizontal del objetivo, los errores en la altura asignada al objetivo y las diferencias entre el movimiento del objetivo y el movimiento atmosférico real.

13.5.1.1 **Errores de seguimiento del objetivo**

La relación entre los errores de viento y los de seguimiento difiere según el método de observación. En algunos sistemas, como los radioteodolitos, los errores de viento varían mucho con el alcance, el acimut y la elevación, incluso cuando los errores de estos parámetros de seguimiento se mantienen constantes con el tiempo. Por otra parte, los errores de viento generados en los sistemas de seguimiento navaid no suelen variar demasiado con el alcance o con la altura.

En OMM (1975) se evaluaron las incertidumbres resultantes del cálculo manual de los datos de viento, llegándose a la conclusión de que el riesgo de introducir errores apreciables utilizando métodos manuales para calcular datos de viento (mesas de trazado, reglas de cálculo, etc.) era demasiado grande, y que deberían automatizarse los cálculos en la medida de lo posible.

La exactitud de todos los sistemas de medición del viento en altitud varía ocasionalmente. Esa variación puede producirse en períodos cortos durante el vuelo de un objetivo determinado, cuando el seguimiento se debilita temporalmente, o durante todo el vuelo, por ejemplo, cuando las señales transmitidas desde una radiosonda navaid son defectuosas. En algunos lugares, la exactitud del seguimiento del viento en altitud puede deteriorarse gradualmente al cabo de varios meses, debido a la inestabilidad de la capacidad de seguimiento o a la configuración del sistema terrestre. En todo caso, convendría que se obtuviesen estimaciones de la exactitud de la medición del viento en tiempo real como complemento de los informes de tales mediciones. Los errores comunicados permitirían identificar mediciones de menor calidad y atribuirles una menor ponderación en los análisis numéricos. En la práctica, los errores pueden comunicarse utilizando las claves TEMP o PILOT y las tablas BUFR adecuadas (OMM, 2011a).

Cuando los errores de seguimiento del objetivo comienzan a introducir errores de viento inaceptables a una resolución vertical determinada, se suele compensar la situación calculando los valores de viento a una menor resolución vertical.

En la práctica, la reducción escalonada de la resolución vertical de las mediciones del viento en altitud a través de la troposfera superior y de la estratosfera inferior se adoptó principalmente para superar las limitaciones de seguimiento de los radioteodolitos. Esta práctica no está justificada por la estructura vertical real observada en la atmósfera, pues muchas de las mayores cizalladuras de viento verticales se encuentran generalmente en los niveles superiores de las corrientes en chorro, entre 10 y 18 km de altitud (véanse, por ejemplo, los perfiles verticales de viento detalladamente expuestos en Nash, 1994).

13.5.1.2 **Errores en la asignación de altura**

Los errores en la asignación de altura para vientos medidos con radioventosondas en la troposfera y en la estratosfera inferior serán los mismos que los analizados para mediciones del viento en altitud en el capítulo 12 de la parte I. Estos errores serán mayores para las radiosondas que utilizan sensores de presión en la estratosfera superior y serán más significativos para la predicción numérica del tiempo o estudios climáticos si hubiera cizalladuras del viento importantes en la vertical, como en el vórtice de la noche polar (véase la figura 13.1 b)).

Para los globos piloto cuyo seguimiento se hace con un único teodolito, la altura se obtiene a partir del tiempo de vuelo y la velocidad de ascenso del globo se supone. En la práctica, es difícil lanzar globos con una velocidad de ascenso determinada con precisión. Por consiguiente, si hay cizalladuras del viento significativas en la vertical a niveles bajos, posiblemente relacionadas con diferencias significativas en la velocidad vertical de las térmicas, las mediciones de los globos piloto podrían verse afectadas negativamente por los errores en la asignación de altura.

Las pruebas de prototipos efectuadas con sistemas totalmente automatizados de medición del viento en altitud frecuentemente revelan discrepancias entre las horas asignadas a las observaciones del viento y las asignadas a las correspondientes mediciones de radiosonda. En algunos casos, la medición del viento no comienza al mismo tiempo que la de la radiosonda, y en otros la sincronización se pierde durante el vuelo por diversas razones. Las horas asignadas

a los vientos en los informes no siempre se corresponden con las de las muestras de los datos utilizadas para calcular el viento, sino con la hora de comienzo o finalización del muestreo. Todos los tipos de error de cronometría podrían dar lugar a grandes errores en las alturas asignadas a las mediciones de viento y deben ser eliminados durante las pruebas para poder lograr operaciones fiables.

13.5.1.3 **Movimiento del objetivo respecto de la atmósfera**

El movimiento del objetivo respecto del aire es más importante para los sistemas con mayor exactitud de seguimiento y mayor resolución vertical. Por ejemplo, la oscilación de la radiosonda GPS situada bajo un globo es claramente visible en las mediciones de seguimiento mediante GPS, y debe filtrarse siempre que sea posible.

El movimiento del globo respecto de la atmósfera, producido por la formación de vórtices a lo largo de la estela del globo, puede ocasionar errores de hasta 1 o 2 m s⁻¹ (nivel 2σ) en el seguimiento de pequeños globos piloto (de 50 g de peso) a resoluciones verticales de 50 m. Los errores en el movimiento del globo son menos importantes en las mediciones operativas de rutina (resoluciones verticales de unos 300 m), donde las mediciones se realizan mediante el seguimiento de globos de mayor tamaño (de peso superior a 350 g).

El deslizamiento horizontal de los paracaídas de las radiosondas respecto de la atmósfera puede suponer también un factor limitador de la exactitud en las mediciones mediante radiosondas GPS con paracaídas. Las velocidades de descenso utilizadas con las radiosondas con paracaídas son, por lo general, dos veces superiores a la velocidad de ascenso de los globos con radiosonda en usos operativos.

13.5.2 **Errores en las observaciones con globos piloto**

Los errores instrumentales de un buen teodolito óptico no suelen ser superiores a ±0,05° y pueden variar lentamente con el acimut o con la elevación, pero son pequeños en comparación con los errores introducidos por el observador. Los errores de lectura no deberían ser superiores a 0,1°. La importancia de estos errores aumenta en los grandes alcances y cuando se opera a elevaciones bajas.

En los ascensos con un solo teodolito, la mayor fuente de errores es la incertidumbre respecto a la velocidad de ascenso del globo. Esta incertidumbre se produce por variaciones en la operación de llenado del globo con gas, en la forma de este y en la velocidad vertical de la atmósfera a través de la cual asciende. Un error proporcional determinado en la velocidad de ascenso da lugar a un error proporcional en la altitud del globo y, por consiguiente, al modificarse el ángulo de elevación, a un error proporcional en la velocidad del viento.

En los ascensos con doble teodolito, el efecto de los errores del sistema depende del método de evaluación adoptado. Schaeffer y Doswell (1978) han proporcionado análisis de tales errores.

13.5.3 **Errores de los sistemas que utilizan una antena direccional**

La relación entre los errores del vector viento y los errores de las propias mediciones de seguimiento puede expresarse como una función aproximada de la altura y del viento medio (o del cociente entre este último y la velocidad ascensional media del globo). Por lo que se refiere a los errores aleatorios en las mediciones del viento mediante radares primarios y radioteodolitos, las relaciones son:

- a) mediciones de alcance oblicuo, acimut y elevación mediante radares primarios o secundarios:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_r^2 \cdot Q^2 / (Q^2 + 1) + \varepsilon_\theta^2 \cdot h^2 + \varepsilon_\varphi^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] / \tau^2 \quad (13.3)$$

- b) mediciones de acimut, ángulo de elevación y altura mediante teodolitos ópticos o radioteodolitos y radiosondas:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_h^2 \cdot Q^2 + \varepsilon_\theta^2 \cdot h^2 \cdot (Q^2 + 1)^2 + \varepsilon_\varphi^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] / \tau^2 \quad (13.4)$$

donde ε_v es el error vectorial del valor de viento calculado; ε_r es el error aleatorio en la medición del alcance oblicuo; ε_θ es el error aleatorio en la medición del ángulo de elevación; ε_φ es el error aleatorio en la medición del acimut; ε_h es el error aleatorio de la altura (deducido de la medición de la presión); Q es la magnitud del viento vectorial medio hasta la altura h dividida por la velocidad ascensional media del globo hasta la altura h ; y τ es el intervalo de tiempo transcurrido entre las muestras.

El cuadro 13.2 ilustra las diferencias de exactitud del viento vectorial obtenidas con estos dos métodos de medición del viento en altitud. La velocidad ascensional media utilizada para las mediciones del viento en altitud estará generalmente comprendida entre 5 y 8 m s⁻¹. Los valores del error vectorial del viento se deducen de las ecuaciones 13.3 y 13.4 para varias alturas y valores de Q , y para un sistema de seguimiento que reúna las características siguientes: $\varepsilon_r = 20$ m; $\varepsilon_\theta = 0,1^\circ$; $\varepsilon_\varphi = 0,1^\circ$; $\varepsilon_h =$ error de altura equivalente a un error de presión de 1 hPa; $\tau = 1$ min.

El cuadro 13.2 pone de manifiesto que las mediciones efectuadas con un radioteodolito (o teodolito óptico) son claramente menos exactas que las obtenidas con un radar primario o secundario.

En las expresiones del error vectorial de los valores de viento calculados mediante las ecuaciones 13.3 y 13.4, los dos primeros términos que aparecen dentro de los corchetes representan el error radial y el error de los vientos observados con el mismo acimut que la antena de seguimiento. El tercer término del corchete representa el error tangencial, es decir, el error de viento observado a ángulos rectos del acimut de la antena de seguimiento. Con estos tipos de sistemas de medición del viento en altitud, la distribución del error no es independiente de la dirección, y no puede ser adecuadamente representada utilizando un solo parámetro. Así pues, los valores del cuadro 13.2 indican las magnitudes de error, pero no sus direcciones.

Cuando los errores tangenciales y radiales son muy diferentes en magnitud, la distribución de errores es muy elíptica y los errores combinados tienden a concentrarse paralela o perpendicularmente al eje de la antena de seguimiento. El cuadro 13.3 muestra los cocientes entre algunos de los errores tangenciales y radiales que se combinan para obtener los errores vectoriales del cuadro 13.2. En el cuadro 13.3, los valores superiores a 3 indican situaciones en que predomina la componente de error tangencial. Así pues, en las mediciones del viento mediante radar, los errores tangenciales predominan a alcances mayores (valores altos del viento medio y, por consiguiente, valores altos de Q , más alturas máximas). Con los sistemas de radioteodolito, los errores radiales predominan a alcances mayores, y el cociente es muy inferior a 1. La contribución principal a los errores radiales del radioteodolito la aporta el error del ángulo de elevación, salvo en las situaciones de altitudes elevadas con valores pequeños de Q , en cuyo caso el error aleatorio en la altura de la radiosonda se convierte en el mayor de los términos.

Los resultados indicados en los cuadros 13.2 y 13.3 se basan en una evaluación teórica de los errores de los diversos tipos de sistemas. No obstante, se supone que los valores de viento se calculan a partir de una simple diferencia entre dos muestras discretas de datos de seguimiento. Los cálculos no tienen en cuenta las probables mejoras de exactitud obtenidas cuando la razón de cambio de la posición se calcula a partir de grandes muestras de información de seguimiento obtenida con una resolución temporal alta. El cuadro 13.4 contiene estimaciones de la exactitud de medición real lograda por varios radares y radioteodolitos en las cuatro fases de la Comparación internacional de radiosondas de la OMM (en la sección 13.6.1.2 se encontrarán referencias al respecto).

Cuadro 13.2. Error vectorial ($m s^{-1}$) de un 90% en función de la altura y del cociente Q entre el viento medio y la velocidad ascensional

Q	Radar						Radioteodolito					
	ε_v 5 km	ε_v 10 km	ε_v 15 km	ε_v 20 km	ε_v 25 km	ε_v 30 km	ε_v 5 km	ε_v 10 km	ε_v 15 km	ε_v 20 km	ε_v 25 km	ε_v 30 km
1	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	1	1,5	3	5,5	9	25
2	1	1,5	2,5	3	4	4	5	4	6,5	11	19	49
3	1,5	2,5	3	4	5	6	4	7	11	19	30	76
5	1,5	3	5	6	8	10	9	18	27	42	59	131
7	2,5	5	7	9	11	13	18	34	51	72	100	194
10	3	6,5	10	13	16	19	34	67	100	139	182	310

Notas:

- Este cuadro no incluye los errores adicionales introducidos por interferencias debidas a trayectos múltiples en las observaciones del radioteodolito. Cabe esperar errores adicionales debido a estos efectos para los valores de Q entre 7 y 10.
- En la práctica, las observaciones del viento efectuadas con radioteodolitos se suavizan para las capas de mayor espesor que las indicadas en estos cálculos para todas las altitudes a partir de 5 km. Por lo tanto, para altitudes a partir de 15 km, los errores del radioteodolito deberían dividirse, al menos, por un factor de cuatro para que correspondan a la práctica operativa.

Cuadro 13.3. Relación entre los componentes del error en las observaciones del viento en altitud ($\alpha_v = \text{error tangencial/error radial } \alpha$)

Q	Radar						Radioteodolito					
	α_v 5 km	α_v 10 km	α_v 15 km	α_v 20 km	α_v 25 km	α_v 30 km	α_v 5 km	α_v 10 km	α_v 15 km	α_v 20 km	α_v 25 km	α_v 30 km
1	1/2	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/3	1/4	1/5	1/13
2	1	1	2	2	2	2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1/13
3	1	2	2	3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/5	1/6	1/13
5	1	3	4	4	5	5	1/5	1/5	1/6	1/6	1/7	1/14
7	3	5	5	6	6	7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/14
10	4	7	8	9	9	9	1/10	1/10	1/10	1/11	1/11	1/16

De los tres radioteodolitos verificados en la citada comparación, el sistema japonés logró los mejores resultados para valores de Q elevados, pero el sistema utilizado sometía a un mayor suavizado las mediciones de la elevación, y no medía con exactitud el viento vertical en las capas superiores de las corrientes en chorro. El radioteodolito portátil más pequeño instalado en Japón por Estados Unidos arrojaba los errores de mayor magnitud para valores de Q elevados, por problemas con la interferencia debida a trayectos múltiples.

La forma elíptica de las distribuciones de error para las observaciones de radar y de radioteodolito mostró las tendencias previstas para valores de Q elevados. Sin embargo, el comportamiento elíptico no fue tan acusado como figura en el cuadro 13.3, probablemente porque los errores aleatorios en las razones de cambio del acimut y de la elevación fueron, en la práctica, menores que los adoptados para el cuadro 13.3.

En la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad, efectuada en Yangjiang (China) (OMM, 2011b), China utilizó un radar secundario moderno que funcionaba

Cuadro 13.4. Estimaciones de los errores vectoriales aleatorios típicos (nivel 2σ , unidad: $m s^{-1}$) en las mediciones del viento en altitud obtenidas durante la Comparación internacional de radiosondas de la OMM (se incluyen estimaciones de los valores típicos de Q y α_v para cada una de las cuatro fases)

<i>Sistema</i>	ϵ_v 3 km	α_v 3 km	Q 3 km	ϵ_v 18 km	α_v 18 km	Q 18 km	ϵ_v 28 km	α_v 28 km	Q 28 km	<i>Lugar de la prueba</i>
Radar primario (Reino Unido)	1,1	1	3,5	2,1	1,3	5	2,7	1,6	5	Reino Unido ^a
Radioteodolito (Estados Unidos)	2,1	≈ 1	1,5	4,8	≈ 1	2,5	5,2	≈ 1	1	Reino Unido
Radioteodolito (Estados Unidos)	2,8	≈ 1	2,5	10,4	0,4	6	9	0,33	4	Estados Unidos
Radioteodolito portátil	1,5	≈ 1	< 1	4,8	≈ 1	3	5,8	≈ 1	1,5	Kazajstán
Radioteodolito portátil	2,2	≈ 1	1,5	12	0,31	5,5	9	0,23	4	Japón
Radioteodolito (Japón)	1,7	≈ 1	1,5	6,4	0,48	5,5	4,7	0,48	4	Japón
Radar secundario (AVK, Federación de Rusia)	1,5	≈ 1	< 1	2,6	≈ 1	3	2,6	≈ 1	1,5	Kazajstán
Radar secundario (China)	1,5	≈ 1	< 1	3,8	≈ 1	3	3,4	≈ 1	1,5	Kazajstán

Nota:

a Datos obtenidos de la prueba realizada en Reino Unido después de la fase I de la Comparación internacional de radiosondas de la OMM (véase Edge y otros, 1986).

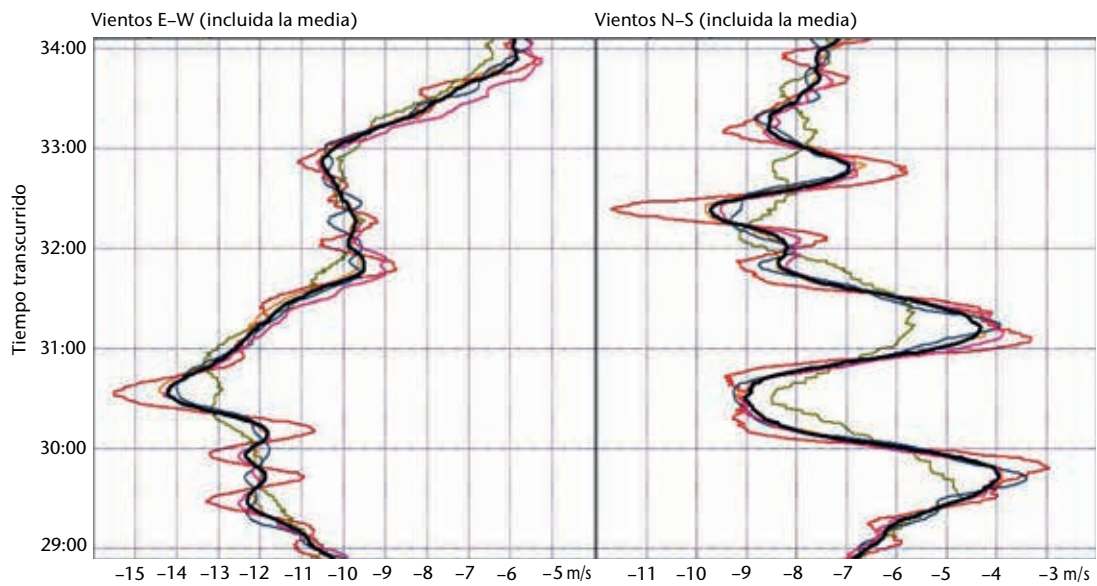
a 1 680 MHz con el sistema de radisonda Daqiao. Cuando los vientos eran fuertes en la troposfera inferior, los valores de Q a una altura de unos 4 km se situaban entre 2 y 3, el alcance era de unos 15 km y el error vectorial cuadrático medio ($k = 2$) en los vientos era de 1 a 1,2 $m s^{-1}$ con una elipticidad de entre 1 y 1,3. Cerca de la finalización de los vuelos en la estratosfera, Q volvió a ser 2,5 en promedio, pero en los alcances más amplios de 70 a 100 km, ϵ_v para $k = 2$ era unos 2,7 $m s^{-1}$ y la elipticidad era 2. Los vientos de referencia en Yangjiang eran vientos medidos por GPS con una alta resolución vertical, superior a 150 m, mientras que la resolución vertical de la referencia utilizada en Kazajstán era 300 m en el mejor de los casos. Por lo tanto, el radar secundario moderno chino funciona bien y constituye una mejora respecto del anterior sistema de 403 MHz.

13.5.4 Errores en los sistemas de medición del viento mediante GPS

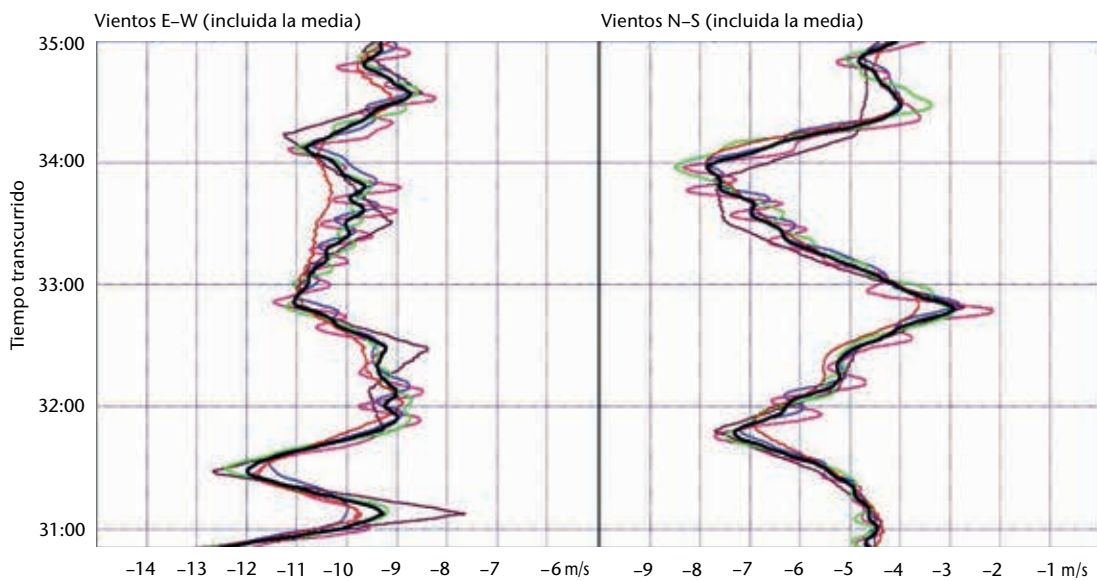
En teoría, los sistemas de medición del viento mediante GPS que utilizan códigos de adquisición aproximada en modo diferencial deberían ser capaces de medir los vientos con una incertidumbre de 0,2 $m s^{-1}$. Las estimaciones de exactitud del cuadro 13.5 se llevaron a cabo sobre la base de recientes pruebas de la OMM de radiosondas GPS. La principal diferencia entre los sistemas estriba en el filtro aplicado a los vientos para eliminar el movimiento de la radiosonda relativo al globo. Este movimiento es parcialmente un péndulo regular de las radiosondas bajo el globo y en parte otra rotación irregular y una reacción de desplazamiento a las diferencias entre los vientos experimentados por el globo y la radiosonda a medida que progresa el ascenso del globo.

En la figura 13.2 se muestran ejemplos de observaciones simultáneas de vientos obtenidas en la troposfera superior con radiosondas GPS en la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad. Solo se usan extractos de los vuelos dado que únicamente al observar una muestra breve de datos de los vuelos pueden verse las diferencias, ya que la concordancia general es mucho mejor que lo que fue la norma en las primeras mediciones operativas del vientos.

Los extractos en la figura 13.2 muestran que casi todos los sistemas coinciden en resolver la estructura vertical con picos en las estructuras ondulatorias separados por unos 90 segundos, aunque no en el mismo grado en el caso de las fluctuaciones cuando los picos estaban separados por 40 segundos o menos. Así, las longitudes de onda verticales a 600 m generalmente se resolvían sin ambigüedad, aunque había una considerable ambigüedad a 200 m o menos. Un



a) Vuelo 33: Jinyang, InterM, Lockheed Martin Sippican, MODEM y Vaisala



b) Vuelo 34: Changfeng, Graw, Huayun, Meisei y Meteolabor

Figura 13.2. Extractos de vuelos de intercomparación de medición del viento con GPS en Yangjiang (China) durante la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad (OMM, 2011b)

sistema de la figura 13.2 a) fue suavizado en demasía en comparación con los demás, mientras un sistema de la figura 13.2 b) trató de ajustar líneas rectas a las mediciones GPS; ambos comportamientos llevaron a veces a valores fuera de los límites respecto de los valores correctos.

Estos extractos, que no representan lo mejor ni lo peor, sugieren que el procesamiento de la medición del viento con GPS ha alcanzado un nivel relativamente bueno y que una gran cantidad de fabricantes han obtenido resultados satisfactorios. Esto se confirmó cuando se generaron estadísticas de los 60 vuelos realizados con radiosondas GPS operativas en Yangjiang (véase cuadro 13.5). En este cuadro, las diferencias en el viento (obtenidas de unos 30 vuelos de comparación) se promediaron en 2 minutos, 30 segundos o 10 segundos, y se atribuyó el mejor desempeño a los dos sistemas que tuvieron los menores errores vectoriales cuadráticos medios. Los errores que muestra el cuadro 13.5 son suficientemente aceptables para satisfacer el requisito óptimo del usuario respecto de los vientos mencionado en el capítulo 12 de la parte I (anexo 12.A).

Cuadro 13.5. Error vectorial aleatorio ($k = 2$) y errores sistemáticos de sistemas de medición del viento navaid con GPS de buena calidad durante la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad en Yangjiang (China)

<i>Rango de altura</i>	<i>Error sistemático</i> <i>(m s⁻¹)</i>	<i>Error vectorial cuadrático medio a 2 km de resolución vertical</i> <i>(m s⁻¹)</i>	<i>Error vectorial cuadrático medio a 300 m de resolución vertical</i> <i>(m s⁻¹)</i>	<i>Error vectorial cuadrático medio a 100 m de resolución vertical</i> <i>(m s⁻¹)</i>
Troposfera inferior 0-8 km	Hasta $\pm 0,05$	0,06-0,15	0,12-0,50	0,3-0,7
Troposfera superior 8-17 km	Hasta $\pm 0,10$	0,1-0,4 ^a	0,3-0,9 ^a	0,4-1,4 ^a
Estratosfera 17-34 km	Hasta $\pm 0,15$	0,15-0,40 ^b	0,3-0,8 ^b	0,4-1,1 ^b

Notas:

a El peor desempeño se registró a alturas cercanas a 16 km.

b El peor desempeño se registró a alturas mayores de 28 km.

Con el tiempo, las diferencias en el filtrado de las mediciones de la posición GPS para reducir al mínimo los efectos de las mediciones de radiosonda relativas al globo probablemente se reduzcan en comparación con los alcances indicados en el cuadro 13.5. No obstante, los movimientos irregulares (en contraposición con el movimiento pendular relativamente uniforme) de la radiosonda en relación con el globo limitarán la concordancia que puede obtenerse entre dos radiosondas en un vuelo de prueba. Por esa razón, cabe esperar que el error de una medición determinada de radiosonda sea mayor que el que podría calcularse dada la exactitud esperada de la posición de la radiosonda que puede obtenerse con los sistemas de radionavegación satelital.

El globo externo de los globos dobles utilizados en China suele explotar cerca de los 16 km y las perturbaciones resultantes en la estabilidad del movimiento de la radiosonda podrían haber sido la causa del mayor error vectorial cuadrático medio registrado cerca de los 16 km en el cuadro 13.5. En pruebas realizadas en Reino Unido (60 vuelos) a lo largo de varias estaciones en 2009/2010 con radiosondas GPS de dos fabricantes distintos presentes en Yangjiang, los resultados en la troposfera inferior y la estratosfera fueron similares a los del cuadro 13.5. No obstante, los errores vectoriales cuadráticos medios en la troposfera superior se situaron entre 0,3 y 0,6 m s⁻¹ a una resolución vertical de 100 m, y entre 0,2 y 0,5 m s⁻¹ a una resolución vertical de 300 m. Por consiguiente, en el caso de estos dos sistemas, la estructura fina de las mediciones del viento de la troposfera superior en Reino Unido concordaba más que la de los sistemas en Yangjiang.

A veces, una radiosonda GPS puede fallar y no informar de vientos durante un vuelo que informa de la temperatura y la humedad hasta que el globo explota. Otras veces, la interferencia de radiofrecuencias de una fuente externa causa problemas y la medición de los vientos podría tener errores más grandes. El programa informático debe poder informar al operador cuando se presentan problemas como estos, ya que es difícil distinguir entre la estructura atmosférica real y las mediciones con errores aleatorios grandes (véase, por ejemplo, el perfil del viento en la figura 13.3).

A diferencia del LORAN-C terrestre, el rendimiento de la medición de vientos con GPS no variará significativamente con las condiciones de la ionosfera.

13.5.5 Errores en los sistemas de radionavegación terrestres LORAN-C

Los errores en los sistemas navaid dependen de la estabilidad de fase de las señales navaid recibidas en la radiosonda y de la posición de la radiosonda respecto de los transmisores de la red navaid. Sin embargo, no es posible ignorar la calidad del enlace telemétrico entre la radiosonda y el receptor en tierra. En ciertas pruebas en que las radiosondas han alcanzado mayores distancias (entre 50 y 100 km, como mínimo), los errores de viento de los sistemas de medición de viento navaid aumentan con el alcance, pero generalmente en una proporción similar o inferior a la del aumento del alcance para un radar primario. Inmediatamente después del lanzamiento, la recepción de las señales de las radiosondas no siempre es fiable. En los sistemas LORAN-C, los errores en la medición del viento son mayores inmediatamente después del lanzamiento que cuando la radiosonda se ha estabilizado tras varios minutos de vuelo.

La exactitud de las mediciones de viento con el sistema navaid LORAN-C está limitada principalmente por la relación señal-ruido de las señales recibidas en la radiosonda. El tiempo de integración utilizado en la práctica para obtener mediciones de viento fiables varía entre 30 segundos y 2 minutos para las señales LORAN-C. La intensidad de señal recibida en un determinado lugar desde ciertos transmisores LORAN-C puede fluctuar apreciablemente durante el día, debido, en general, a que en algunas circunstancias las variaciones diurnas de la altitud y de la orientación de las capas ionosféricas ejercen una mayor influencia sobre la intensidad de la señal. Las fluctuaciones de la intensidad y de la estabilidad de la señal pueden ser tan grandes que podría no ser posible efectuar mediciones del viento satisfactorias con los sistemas LORAN-C en todo momento del día.

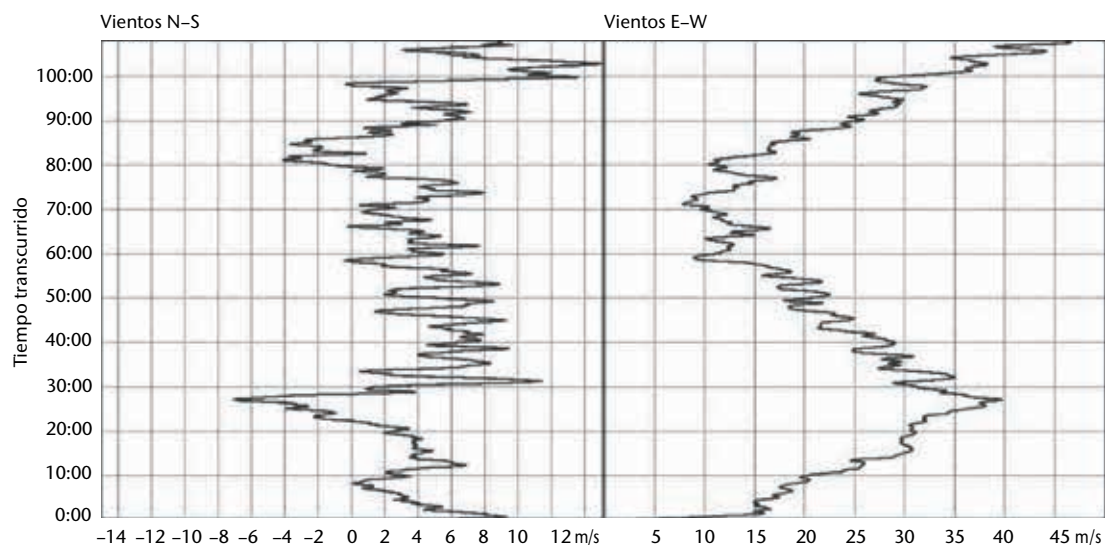


Figura 13.3. Ejemplo de un perfil vertical de viento medido independientemente por radiosondas GPS de dos fabricantes diferentes en Camborne (Reino Unido), que muestra la estructura en pequeña escala presente en muchas mediciones correctas. El programa informático de procesamiento de la radiosonda debe indicar qué partes del vuelo son menos fiables cuando la recepción de las señales de GPS es claramente menos fiable de lo habitual.

Un segundo factor importante que influye en la exactitud de la medición con LORAN-C es la reducción geométrica de precisión de la exactitud del sistema de navegación, que depende de la ubicación del receptor de la radiosonda respecto de los transmisores navaid. Cuando la radiosonda está cerca del centro de la línea de base entre los dos transmisores, un error aleatorio determinado en la diferencia entre los instantes de llegada desde dos transmisores dará lugar a un pequeño error aleatorio de posición en una dirección paralela a la línea de base entre los transmisores. Sin embargo, si la radiosonda está situada en la prolongación de la línea de base más allá de los transmisores, el mismo error aleatorio en la diferencia entre los instantes de llegada dará lugar a un error de posición muy considerable en la misma dirección. Para conseguir la exactitud máxima en las mediciones del viento horizontal en dos dimensiones se necesitan, como mínimo, dos pares de transmisores navaid con sus líneas de base aproximadamente en ángulo recto, y con la radiosonda en el centro del triángulo definido por los tres transmisores. En la práctica, para mejorar la exactitud de las mediciones del viento se utilizan, siempre que ello es posible, señales procedentes de más de dos pares de transmisores navaid. Las técnicas que utilizan soluciones de cuadrados mínimos para determinar la coherencia de las mediciones del viento obtenidas resultan útiles para estimar valores de los errores en las mediciones del viento.

Otra fuente de error es la perturbación de la propagación de las señales enviadas por transmisores de la red navaid.

Passi y Morel (1987) realizaron uno de los primeros estudios sobre los errores de medición del viento con sistemas LORAN. Como se indica en el cuadro 13.6, los sistemas disponibles en el mercado permiten realizar mediciones del viento de buena calidad. La calidad de las observaciones obtenidas utilizando principalmente señales de ondas terrestres se obtuvo de pruebas de instalación efectuadas en las islas británicas, como se indica en Nash y Oakley (1992). La calidad de medición obtenida con transmisores para mayores alcances, en que las ondas ionosféricas son apreciables, se estimó a partir de los resultados de la fase IV de la Comparación internacional de radiosondas de la OMM realizada en Japón (véase OMM, 1996). En Reino Unido, se puso fin a la medición de valores de viento mediante LORAN-C debido a la incertidumbre del futuro de LORAN-C en el noroeste de Europa y se sustituyó por mediciones con GPS en todos los sitios operativos.

Cuadro 13.6. Error aleatorio ($k = 2$) y error sistemático previstos en sistemas de medición del viento navaid LORAN-C en zonas donde la cobertura de señales navaid es casi óptima

<i>Sistema</i>	<i>Tiempo medio (s)</i>	<i>Error sistemático ($m s^{-1}$)</i>	<i>Error aleatorio ($m s^{-1}$)</i>
LORAN-C (onda terrestre)	30-60	Hasta $\pm 0,2$	0,6-3
LORAN-C (onda ionosférica)	60-120	Hasta $\pm 0,2$	1,6-4

13.5.6 Errores de representatividad

La mayoría de las mediciones de radioviento presentan variaciones en pequeña escala en el viento en la atmósfera que los modelos actuales de predicción numérica del tiempo no representan. Así, por ejemplo, cuando se comparan los perfiles de los componentes del viento medido con GPS directamente con los resultados de los modelos numéricos mundiales, la desviación estándar del resultado de la observación/modelo numérico ($k = 2$) en latitudes medias suele situarse entre 4 y 6 $m s^{-1}$ en la troposfera inferior y entre 4 y 9 $m s^{-1}$ en la troposfera superior, es decir, siempre es mucho mayor que los errores vectoriales de los instrumentos que figuran en el cuadro 13.5 para una resolución vertical de 300 m. Parte de esta discrepancia será el resultado de la baja exactitud de la medición de los vientos, como se observó anteriormente en la sección 13.1.3.2.

Las diferencias del error vectorial cuadrático medio entre las mediciones del viento en altitud con radiosondas espaciadas 2, 6, 18 y 54 horas se han calculado sobre la base de la serie cronológica

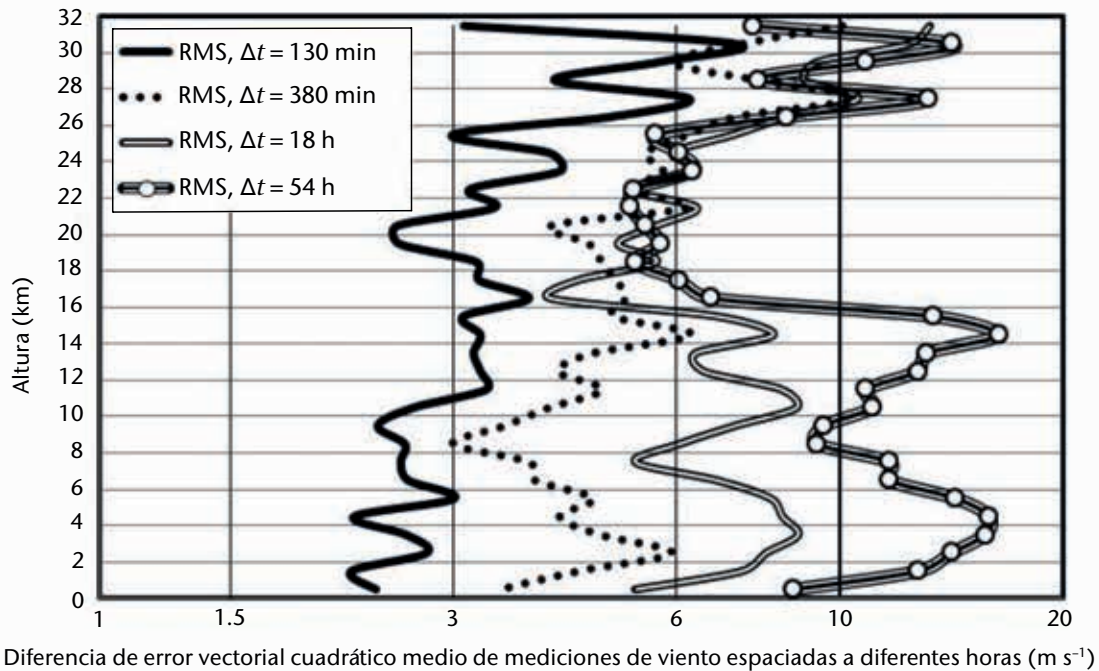


Figura 13.4. Diferencias del error vectorial cuadrático medio (RMS; $k = 1$) de mediciones del viento espaciadas 2, 6, 18 y 54 horas de 11 pares de observaciones, con una resolución vertical de 1 km, de la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad, efectuada en Yangjiang (China), en julio de 2010. Se han suprimido las contribuciones de los errores de los instrumentos de las diferencias.

de mediciones producida por la Intercomparación de la OMM de sistemas de radiosonda de alta calidad, efectuada en Yangjiang (China) (OMM, 2011b), aplicando la técnica usada por Kitchen (1989). Los resultados se muestran como función de la altura en la figura 13.4.

Así, cabe esperar que el error vectorial cuadrático medio de las mediciones de los vientos guarde relación con el espaciamiento de las mediciones utilizando la relación, basada en Kitchen (1989):

$$\left(\tau_v(\Delta t)\right)^2 = \left(b_v \Delta t^\gamma\right)^2 + \left(\tau_{v(\text{pequeña escala})}(\Delta t)\right)^2 \quad (13.5)$$

donde $\tau_v(\Delta t)$ es la diferencia del error cuadrático medio de las mediciones de los vientos espaciadas un tiempo Δt ; y $b_v \Delta t^\gamma$ es la función de la estructura que representa la desviación del error cuadrático medio debida a cambios en la escala sinóptica y mesoescalar a lo largo del tiempo, en que b_v y γ son constantes. En Yangjiang, γ tenía un valor entre 0,5 y 0,6 para mediciones de vientos en la troposfera espaciadas entre 6 y 54 horas. Por último, $\tau_{v(\text{pequeña escala})}(\Delta t)$ es la diferencia del error vectorial cuadrático medio en los vientos en altitud de estructuras en pequeña escala, como las ondas de cuasi inercia-gravedad, las capas turbulentas o la estructura de la escala de nube.

En la troposfera de Yangjiang, la diferencia del error vectorial cuadrático medio en la estructura en pequeña escala fue de $2 \text{ m s}^{-1} \pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$, mientras que la diferencia del error vectorial cuadrático medio en la escala sinóptica y mesoescalar fue de entre 2 y 3 m s^{-1} con un espaciamiento de 2 horas, y aumentó a unos 7 m s^{-1} con un espaciamiento de 18 horas. Estos valores son de una magnitud semejante a los valores encontrados por Kitchen (1989) en la troposfera inferior y media en Reino Unido. Las diferencias del error vectorial cuadrático medio fueron mayores en la troposfera superior en Reino Unido por las variaciones en la escala sinóptica asociadas a las corrientes en chorro de latitud media. Mientras que podría esperarse que la diferencia vectorial en la escala sinóptica y mesoescalar disminuiría a menos de 1 m s^{-1} con un espaciamiento de 40 minutos en Yangjiang, no se dispone de información sobre los espaciamientos temporales necesarios para reducir la diferencia del error vectorial cuadrático medio en pequeña escala a un valor menor que 1 m s^{-1} . Por ello, para que haya una concordancia

estrecha entre las mediciones del viento, o para que las mediciones representen las condiciones de la atmósfera en un momento dado con gran exactitud, las mediciones deben realizarse con un espaciamiento temporal de mucho menos de 20 minutos, como se afirma en la sección 13.1.3.3.

En Yangjiang, las fluctuaciones a pequeña escala asociadas con las ondas de cuasi inercia-gravedad dominan la variación de la diferencia del error vectorial cuadrático medio a lo largo del tiempo, y no es posible ajustar una función de estructura para la variación en escala sinóptica y mesoescalar a lo largo del tiempo, como también observó Kitchen en condiciones veraniegas de Reino Unido. Las diferencias del error vectorial cuadrático medio con un espaciamiento temporal de 18 horas en Yangjiang fueron de entre 5 y 9 m s⁻¹, valores de magnitud semejante a los observados en Reino Unido.

Por lo tanto, los errores de representatividad en la medición de los vientos normalmente estarán más influenciados por las variaciones en pequeña escala y las variaciones de escala sinóptica y mesoescalar probablemente sean significativas en asociación con las estructuras que se observan con las corrientes en chorro en la troposfera superior y la estratosfera inferior. Como resultado de ello, habrá una variación entre los diferentes emplazamientos, y los valores examinados en el presente capítulo son solo una instantánea de un tipo de lugar y condición sinóptica, en la que se incluyeron mediciones efectuadas durante la aproximación y el alejamiento de tifones en la zona.

13.6 COMPARACIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO

13.6.1 Comparación

Los sistemas de observación del viento en altitud suelen ser bastante complejos y presentan diferentes modos de avería. No es inhabitual que los sistemas experimenten un fallo parcial, sin por ello dejar de generar una estructura de viento vertical que parezca verosímil a los operadores. Muchos de los sistemas requieren un ajuste y un mantenimiento cuidadosos para mantener la exactitud del seguimiento.

La exactitud de las mediciones del viento de los sistemas operativos puede verificarse tomando como referencia estadísticas de control elaboradas por centros de predicción numérica del tiempo. Las estadísticas de control consisten en resúmenes de las diferencias entre las mediciones del viento en altitud en cada emplazamiento y los campos de predicción a corto plazo (información general) en el mismo lugar. Con las técnicas actuales de asimilación y análisis de datos, los errores de observación influyen en cierta medida en los campos de análisis meteorológico. Se ha evidenciado así que las predicciones de corto plazo a partir de un análisis realizado 6 horas antes de la hora de observación permiten detectar los errores de observación con la máxima fiabilidad.

El funcionamiento de los sistemas de medición del viento en altitud puede compararse también con el de otros sistemas cuya calidad de medición ha sido determinada mediante pruebas especiales. Tales pruebas permiten evaluar los errores de seguimiento independientemente de los errores de asignación de altura.

Ambos tipos de comparación pueden interpretarse utilizando los métodos estadísticos propuestos en OMM (1989).

13.6.1.1 *Control operativo por comparación con campos de predicción*

Los centros principales designados por la Comisión de Sistemas Básicos de la OMM pueden proporcionar a los operadores de los sistemas las estadísticas necesarias para realizar comparaciones diarias entre mediciones del viento operativas y campos de predicción a corto plazo de los modelos de predicción numérica del tiempo.

La interpretación de las estadísticas de control para los vientos en altitud no es tarea simple. Los errores aleatorios de los campos de predicción son de magnitud similar o superior a los del

sistema de viento en altitud si este funciona correctamente. Los errores de predicción varían con la ubicación geográfica, y para su interpretación puede ser necesario solicitar orientación a los centros de predicción numérica del tiempo. Sin embargo, es relativamente fácil identificar los sistemas de viento en altitud en que los errores aleatorios son mucho mayores de lo normal. En los últimos años se han identificado fallos en cerca de un 6% de los sistemas de la red mundial. Los radioteodolitos y los radares secundarios son los sistemas que presentan más fallos de funcionamiento.

Los resúmenes de errores sistemáticos entre observaciones y campos de predicción a lo largo de varios meses o de todo un año son también útiles para identificar errores sistemáticos de la velocidad y de la dirección del viento en un sistema determinado. Los pequeños desajustes en las antenas de seguimiento de los radioteodolitos o de los radares son fallos relativamente comunes.

13.6.1.2 **Comparación con otros sistemas de medición del viento**

Mediante pruebas de comparación especiales entre sistemas de medición del viento en altitud ha sido posible obtener gran cantidad de información sobre el funcionamiento real de los diversos sistemas de medición del viento en altitud utilizados en todo el mundo. En ellas, varios objetivos que penden de un único globo son seguidos simultáneamente por diversos sistemas terrestres. La hora fijada para los informes de viento de las distintas estaciones de tierra está sincronizada con un margen inferior a 1 segundo. Seguidamente, las mediciones del viento se comparan en función del tiempo de vuelo, y se asignan las altitudes a los vientos, de manera independiente. La interpretación de los resultados de la comparación será más fiable si al menos uno de los sistemas produce mediciones del viento de alta exactitud con características de error establecidas.

Entre 1984 y 1993 se realizó una serie completa de pruebas de comparación en el marco de la Comparación internacional de radiosondas de la OMM. Las fases I y II de las pruebas se efectuaron en Reino Unido y en Estados Unidos, respectivamente (OMM, 1987). La fase III, a cargo de la Federación de Rusia, tuvo lugar en Kazajstán (OMM, 1991), y la fase IV se desarrolló en Japón (OMM, 1996). Se realizaron otras pruebas en Brasil en 2001 (OMM, 2006a) específicamente para determinar problemas en la medición del viento mediante GPS en los trópicos, lo que llevó al uso de sistemas mejorados de radiosondas GPS, que también se probaron en Mauricio en 2005 (OMM, 2006b) y más exhaustivamente en Yangjiang (China) en 2010 (OMM, 2011b).

La información contenida en los cuadros 13.4, 13.5 y 13.6 se basó principalmente en los resultados de la Comparación internacional de radiosondas de la OMM y en pruebas adicionales realizadas con arreglo a las mismas normas que las pruebas de la OMM.

Ahora que el desarrollo de los sistemas GPS de medición del viento ha madurado, la mayor parte de los sistemas pueden usarse como patrones itinerantes útiles y fiables para las pruebas de comparación de los sistemas de medición del viento en altitud en áreas del mundo más apartadas.

13.6.2 **Calibración**

La calibración del alcance oblicuo debería comprobarse para los radares que utilizan señales de retorno provenientes de un objeto alejado cuya ubicación se conozca con exactitud. También sería preciso comprobar de modo similar el acimut.

La orientación de las antenas de seguimiento de los radioteodolitos o de los radares debería verificarse periódicamente comparando las lecturas realizadas mediante un teodolito óptico. Cuando las diferencias medias entre las observaciones de elevación mediante teodolito y mediante radar fueran superiores a $0,1^\circ$ debería comprobarse el ajuste de la antena de seguimiento. Si la comprobación del acimut se efectúa por medio de una brújula, la conversión del norte geomagnético al norte geográfico deberá hacerse exactamente.

Con los sistemas navaid, es importante verificar que el ordenador del sistema de tierra registre exactamente la ubicación del sistema terrestre. El sistema de seguimiento navaid debe configurarse correctamente de acuerdo con las instrucciones del fabricante, y debería tener un funcionamiento estable antes del lanzamiento de la radiosonda.

13.6.3 Mantenimiento

Los radioteodolitos y radares son relativamente complejos y, por lo general, requieren mantenimiento a cargo de un técnico con experiencia, que deberá ocuparse tanto de las tareas de mantenimiento eléctrico y mecánico como de las reparaciones. El nivel de especialización y la frecuencia del mantenimiento variarán según el modelo del sistema. Algunos radioteodolitos modernos han sido diseñados para mejorar la fiabilidad mecánica en comparación con los primeros tipos utilizados. El costo y la viabilidad del servicio de mantenimiento son factores importantes a la hora de seleccionar el tipo de sistema que se utilizará para medir el viento en altitud.

En la mayoría de los actuales sistemas de seguimiento navaid, los fallos eléctricos se subsanan sustituyendo los módulos averiados. Entre estos módulos se incluirían, por ejemplo, los receptores de la radiosonda o los sistemas de seguimiento navaid. Los sistemas navaid terrestres no contienen, por lo general, partes móviles, y su mantenimiento mecánico es insignificante, aunque será necesario inspeccionar regularmente los sistemas de antenas, cables y conectores para verificar que no estén afectados por la corrosión u otros efectos de la intemperie. El costo de mantenimiento será mínimo, siempre y cuando se hayan adquirido suficientes módulos de repuesto.

13.7 CORRECCIONES

Cuando las observaciones de radioviento se efectúan mediante radar, la información de seguimiento del mismo se utiliza para calcular la altitud asignada a las mediciones. Tales alturas de radar deberán corregirse para reflejar la curvatura de la Tierra mediante la fórmula siguiente:

$$\Delta z_{\text{curvatura}} = 0,5(r_s \cdot \cos \theta)^2 / (R_c + r_s \sin \theta) \quad (13.6)$$

donde r_s es el alcance oblicuo hasta el objetivo, θ es el ángulo de elevación en dirección al objetivo y R_c es el radio de curvatura de la Tierra en la estación de tierra.

Además, la dirección de propagación del haz del radar varía debido a que el índice de refracción del aire disminuye en promedio con la altura, al igual que la temperatura y el vapor de agua. Las variaciones del índice de refracción hacen que la onda de radar se curve y regrese a la Tierra. Así pues, debido a la refracción atmosférica, el ángulo de elevación observado en el radar será casi siempre mayor que la elevación geométrica verdadera del objetivo.

En el cuadro 13.7 se indican las magnitudes típicas de las correcciones de la refracción, $\Delta z_{\text{refracción}}$, calculadas por Hooper (1986). Con el reciente aumento de la capacidad de procesamiento de las computadoras de los sistemas de tierra, se dispone más fácilmente de algoritmos para calcular las correcciones del índice de refracción en aplicaciones con radares de seguimiento de alta precisión. Las correcciones que figuran en el cuadro 13.7 se calcularon a partir de medias climatológicas de temperatura y vapor de agua en períodos de cinco años en diversos lugares. Los días en que los errores de refracción son máximos, las correcciones necesarias podrían ser superiores a las medias climatológicas del cuadro 13.7 hasta en un 30% en algunos lugares.

Cuadro 13.7. Ejemplos de correcciones para la curvatura y refracción de la Tierra a las observaciones de altura obtenidas por radar

<i>Alcance del plano (km)</i>	<i>Altitud (km)</i>	$\Delta z_{\text{curvatura}}$	$\Delta z_{\text{refracción}}$	$\Delta z_{\text{refracción}}$	$\Delta z_{\text{refracción}}$
			<i>60° N 01° W</i>	<i>36° N 14° E</i>	<i>1° S 73° E</i>
25	10	49	-9	-10	-12
50	15	196	-31	-34	-39
100	20	783	-106	-117	-133
150	25	1 760	-211	-231	-262
200	30	3 126	-334	-363	-427

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Acheson, D. T., 1970: *LORAN-C Windfinding Capabilities: Wallops Island Experiments*. Departamento de Comercio de Estados Unidos, Servicio Meteorológico, ESSA Technical Memorandum WBTM EDL 11.
- De Boor, C., 1978: *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, Nueva York.
- Edge, P., M. Kitchen, J. Harding y J. Stancombe, 1986: *The Reproducibility of RS3 Radiosonde and Cossor WF Mk IV Radar Measurements*. Oficina Meteorológica, Bracknell, OSM No. 35.
- Hooper, A. H., 1986: *The Calculation of Radio-wave Refraction, with Special Reference to Data Height-finding Radars*. Oficina Meteorológica, Bracknell, OSM No. 17.
- Kaisti, K., 1995: "New low-cost GPS solution for upper-air windfinding", en *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina (27 a 31 de marzo de 1995). Sociedad Meteorológica de Estados Unidos, págs. 16 a 20.
- Karhunen, P., 1983: "Automated windfinding developments", en *Preprints of the Fifth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11 a 15 de abril de 1983), págs. 110 a 115.
- Kitchen, M., 1989: "Representativeness errors for radiosonde observations", en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 115, págs. 673 a 700.
- Lange, A. A., 1988: "A high-pass filter for optimum calibration of observing systems with applications", en *Simulation and Optimization of Large Systems* (A. J. Osiadacz, ed.). Clarendon Press, Oxford, págs. 311 a 327.
- Nash, J., 1994: "Upper wind observing systems used for meteorological operations", en *Annales Geophysicae*, vol. 12, págs. 691 a 710.
- Nash, J. y T. J. Oakley, 1992: "Experience in the use of LORAN-C windfinding in the United Kingdom", en *Proceedings of the Twenty-first Annual Technical Symposium*. Wild Goose Association, Birmingham (Inglaterra), págs. 81 a 88.
- Organización Meteorológica Mundial, 1975: *Upper-air Sounding Studies* (R.E. Vockeroth). Technical Note No. 140 (WMO-No. 394), volumen II. Ginebra.
- , 1985: *Meteorological Observations Using Navaid Methods* (A.A. Lange). Technical Note No. 185 (WMO-No. 641). Ginebra.
- , 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21 (WMO/TD-No. 175). Ginebra.
- , 1987: *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30 (WMO/TD-No. 195). Ginebra.
- , 1989: "An algorithmic approach for improving and controlling the quality of upper-air data" (A. A. Lange), en *Papers Presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV)*. Instruments and Observing Methods Report No. 35 (WMO/TD-No. 303). Ginebra.
- , 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40 (WMO/TD-No. 451). Ginebra.
- , 1994: "A new GPS rawinsonde system" (D. B. Call), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*. Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Ginebra.
- , 1996: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV, Tsukuba (Japan), 1993: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59 (WMO/TD-No. 742). Ginebra.
- , 2005: "Studying the accuracy of AFAR-based radar sounding system" (A. Ivanov y V. Tseitlin), en *Papers and posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005)*. Instruments and Observing Methods Report No. 82 (WMO/TD-No.1265). Ginebra.
- , 2006a: *WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Alcântara (Brazil), 2001* (R. da Silveira, G.F. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall'Antonia, L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques and J. Nash). Instruments and Observing Methods Report No. 90 (WMO/TD-No. 1314). Ginebra.
- , 2006b: *WMO Intercomparison of Radiosonde Systems – Vacoas (Mauritius), 2005* (J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko). Instruments and Observing Methods Report No. 83 (WMO/TD-No. 1303). Ginebra.
- , 2008: "Suggestions for upgrading the pilot balloon network in West Africa and elsewhere in the tropics" (M. Douglas, J. Mejía, R. Orozco y J. Murillo), en *Papers and posters presented at the*

- WMO *Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2008)*. Instruments and Observing Methods Report No. 96 (WMO/TD-No. 1462). Ginebra.
- , 2010: *Manual del Sistema Mundial de Observación (OMM-N° 544)*, volumen I. Ginebra.
- , 2011a: *Manual de claves (OMM-N° 306)*, volumen I. Ginebra.
- , 2011b: *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems – Yangjiang (China), 2010* (J. Nash, T. Oakley, H. Vömel and L. Wei). Instruments and Observing Methods Report No. 107 (WMO/TD-No. 1580). Ginebra.
- Passi, R. M., 1978: "Overdetermined windfinding systems", en *Atmospheric Technology*, vol. 10, págs. 65 a 75.
- Passi, R. M. y C. Morel, 1987: "Wind errors using the worldwide LORAN network", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 4, págs. 690 a 700.
- Schaefer, J. T. y C. A. Doswell, 1978: "The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, págs. 911 a 915.
-