



MINISTERIO DEL AIRE
DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN DE VUELO

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

PUBLICACIONES

Serie **A** (Memorias), núm. **18**

ASCENDENCIA ONDULATORIA

POR

JOSÉ ANTONIO BARASOAIN ODÉRIZ

Y

MANUEL CASTAÑS CAMARGO

METEORÓLOGOS

SECCIÓN DE AEROLOGÍA

APARTADO 285. — MADRID

1 9 4 7

M58
BAR
A 18

AEMET-BIBLIOTECA



1011787

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Ro 6.961

El mi amigo Stewart con afecto *Sig M58-6*
J. Barasoain



20/1/48

MINISTERIO DEL AIRE
DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN DE VUELO

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

PUBLICACIONES

Serie **A** (Memorias), núm. **18**

ASCENDENCIA ONDULATORIA

POR

JOSÉ ANTONIO BARASOAIN ODÉRIZ

Y

MANUEL CASTAÑAS CAMARGO

METEORÓLOGOS

No pag.

SECCIÓN DE AEROLOGÍA

APARTADO 285. — MADRID

1 9 4 7

GRÁFICAS HUÉRFANOS
EJÉRCITO DEL AIRE.

A los aficionados españoles al vuelo sin motor, y en especial a los Profesores de la Escuela de esta modalidad en Huesca, quienes bajo la experta dirección del Comandante Peñafiel han colocado a nuestra Patria en un destacadísimo lugar.

INTRODUCCIÓN

En la atmósfera predomina generalmente el movimiento horizontal del aire sobre el vertical; no obstante, este último tiene mayor importancia que aquél, por dar lugar con mucha más frecuencia a condensaciones, debidas al enfriamiento que sufre la masa de aire al elevarse, y que son causa de la formación de nubes y, eventualmente, de precipitaciones.

La atmósfera deja libre en estos movimientos verticales una enorme cantidad de energía, de la que hasta ahora sólo el vuelo sin motor hace utilización directa y sistemática. Las corrientes verticales pueden tener muy distintos orígenes. Nosotros nos ocupamos de un tipo de ascendencia de especial importancia. Desde un punto de vista exclusivamente práctico, lo más interesante es que la ascendencia ondulatoria deja sentir sus efectos a todas las alturas y que las zonas en que esto ocurre permanecen inmóviles respecto al terreno. Se produce siempre que hay viento de alguna intensidad y el terreno es montañoso. No es, pues, disparatado propugnar su utilización para fines más generales. Incluso puede servir de importante ayuda a la aviación con motor, si sabe aprovecharla. El estudio de sus características es siempre de interés para todo el que vuela, y de su conocimiento puede obtener algo más que la explicación de fenómenos, casi siempre presentes en la atmósfera y perfectamente sensibles para los aviones más potentes, ya que, como se verá más adelante, la componente vertical del viento supera en algunos casos los ocho metros por segundo.

Por eso, y sin que pretendamos dar una importancia desmedida a este modesto trabajo, lo creemos de interés para todo aquel que se relaciona, de un modo u otro, con los fenómenos atmosféricos. Guiados de este criterio hemos procurado darle el carácter más elemental posible, y cuando no hemos tenido otro remedio que dar cabida en él a alguna cuestión teórica, hemos procurado que la incomprensión de ésta no sea obstáculo para el buen entendimiento del resto del artículo (1). Asimismo, cuando algún pormenor de cálculo surge incidentalmente, procuramos explicarlo en nota al final de este trabajo.

(1) Nos referimos especialmente a lo que respecta a la ecuación Lyra-Moazogotl.

Felicitemos al Profesor de la Escuela de Vuelos sin Motor don Luis Vicente Juez Gómez por su "record" mundial de altura en velero biplaza, homologado recientemente por la Federación Aeronáutica Internacional, así como a los Profesores don Miguel Ara Torrell y don Julián Sevillano Pérez por sus magníficos vuelos realizados el mismo día del "record", el último de los cuales nos ha suministrado valiosa información acerca de las características de la ondulatoria en Huesca.

Agradecemos a la Dirección General de Aviación Civil la ayuda prestada, conducente al mejor estudio meteorológico de la formación de ondulaciones atmosféricas en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca.

PRELIMINARES

Características generales de la ascendencia ondulatoria. - Observaciones e hipótesis teóricas alemanas acerca de este fenómeno.

El fenómeno de la formación de ondulaciones fué utilizado por primera vez en los Montes Gigantes (Alemania) en el año 1933 por Wolf Hirth, quien le bautizó con el nombre de "onda larga". Steinig continuó las observaciones y fué el primero en estudiar la nube originada, llamada en honor de su descubridor, "nube Moazagotl".

Se presenta el fenómeno cuando sopla viento perpendicularmente a una cordillera. Su primera explicación es muy elemental: obligado el aire a remontar el obstáculo, subiendo a barlovento del mismo y bajando a sotavento, queda desplazado de su nivel de equilibrio, al cual tiende a volver, sobrepasándolo por inercia y repitiéndose el proceso, que, a causa del rozamiento, se va amortiguando. Las partículas de aire están, pues, sometidas a una traslación horizontal, unida a un movimiento vertical vibratorio y amortiguado. Dan así lugar a una serie de ondas que van disminuyendo de amplitud. Esta explicación del fenómeno, como veremos no del todo satisfactoria, fué la que sirvió para los primeros esquemas, reformados más tarde por los resultados experimentales encontrados por los pilotos; así, Paul Steinig hace depender las



Fig. 1.

Uno de los primeros esquemas alemanes de formación de ondulatoria.

características de las ondulaciones de la forma del obstáculo por encima del cual pasa el aire, especialmente de su forma en sotavento; de la velocidad, y del terreno que sigue al obstáculo. Una ladera empinada y una corriente fuerte aumenta la magnitud de la desviación y determina así el valor de los primeros ángulos de proyección y caída (fig. 1), mientras que el terreno que sigue influ-

ye sobre la formación del oleaje. Cuando la fuerza del viento tiene oscilaciones, se producen también pequeñas traslaciones de las zonas de ascendencia, y precisamente en el sentido de acercarse la ondulación al obstáculo cuando la velocidad del viento aumenta, acortándose entonces la longitud de onda, mientras que, al disminuir el viento, la ondulación avanza y la longitud de onda es mayor. A veces, si la humedad es suficientemente elevada, la elevación del aire da lugar a condensaciones que se producen, naturalmente, en las cumbres de

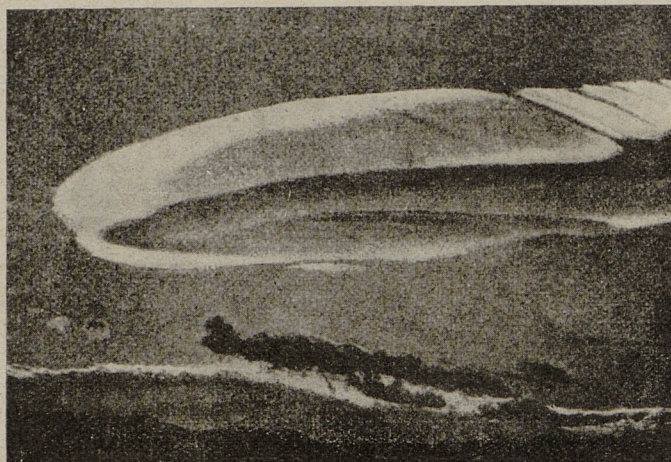


Fig. 2.

Nube "Moazagotl", de los Montes Gigantes.

las ondas. Las nubes resultantes permanecen inmóviles, o con el lento movimiento de las ondas respecto a tierra, formándose constantemente en su parte de barlovento y disolviéndose en la de sotavento; resulta curioso contemplar estas nubes inmóviles en el seno de una fuerte corriente de aire. Claro está que constituyen un indicio de gran valor para los pilotos, quienes saben que hallarán ascendencia a barlovento de las mismas. Este tipo de nubes ha sido llamado "Moazagotl", como hemos dicho, dándose este nombre, en primer lugar, a la que se origina sobre los Montes Gigantes. Su forma tiene alguna semejanza con las nubes llamadas lenticulares (fig. 2). Se presentan, sin embargo, en otros muchos lugares. La figura 3 muestra nubes muy probablemente asociadas a la formación de ondulaciones atmosféricas. Algunas muy conocidas, como la "Contessa dal Vento" en Italia, tienen seguramente este mismo origen. Abundan también en Groenlandia, Inglaterra y España; más adelante incluimos algunas fotografías de las nubes observadas en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca. En general se presentarán, bajo condiciones de humedad convenientes, en todos los lugares donde existan desniveles oro-

gráficos de consideración, siempre que el viento sople en dirección perpendicular a los mismos.

En realidad, también las lenticulares típicas deben considerarse como de ondulatoria (1), y tanto éstas como las Moazagotl pueden ser comprendidas dentro de un grupo más extenso de nubes, designadas con el nombre de "Margarodes", y definidas de la manera siguiente: *Bancos extensos de textura indistinta, densos en el centro, algo transparentes en los bordes, presentando frecuentemente ondulaciones.* Pueden ser considerados como agrupaciones de nubes individualmente lenticulares.

Las investigaciones iniciadas por Steinig acerca de la contextura de la nube Moazagotl, fueron continuadas por Küttner más recientemente (1938), quien señala entre las formas que puede tomar, la de una extensa masa sombría, que parecería una nube tormentosa a no ser por el borde agudo y brillante que presenta en su parte de barlovento.

Asociadas a las nubes típicas de ondulatoria y en las capas inferiores de la atmósfera, se presentan nubes turbulentas en forma de rodillo, que se



Fig. 3.

Nubes lenticulares probablemente asociadas a ondulatoria en Inglaterra.

extiende por debajo de las cumbres de las ondas, y son, generalmente, de bastante longitud.

Así se llega al esquema de ondulatoria dado por Küttner, y que reproduce

(1) Loisel y Coulomb, a este respecto, refieren haber observado un rosario de nubes lenticulares, seguramente correspondientes a las cumbres de otras tantas ondas, por encima del valle del Rhummel, en Constantina.

la figura 4. Las zonas que corresponden a los rodillos nubosos, a los que hay que buscar un origen termoconvectivo, son muy turbulentas, contrastando con las de ondulatoria pura de régimen perfectamente laminar. Este contraste es máximo en las horas centrales del día, es decir, cuando los movimientos convectivos alcanzan mayor intensidad. Los sondeos realizados en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca muestran, en efecto, la escasa estabilidad de la zona baja de la atmósfera.

La ascendencia ondulatoria se utilizó en Alemania para vuelos de altura y, eventualmente, de distancia (en 1936 se consiguió un vuelo de 81 kilómetros, empezando por alcanzar unos 1.400 metros de altura sobre el punto de partida). Como vuelo de altura de algún interés, mencionamos el de Erwin Ziller, quien penetró en la nube Moazagotl a una altura de 3.598 metros, alcanzando los 6.492 todavía en el interior de la misma.

Pasemos ahora a considerar alguna de las explicaciones teóricas que se han dado a la formación de ondulaciones atmosféricas. La del doctor Hoehndorf es en esencia la ya mencionada por nosotros al principio de este apartado,

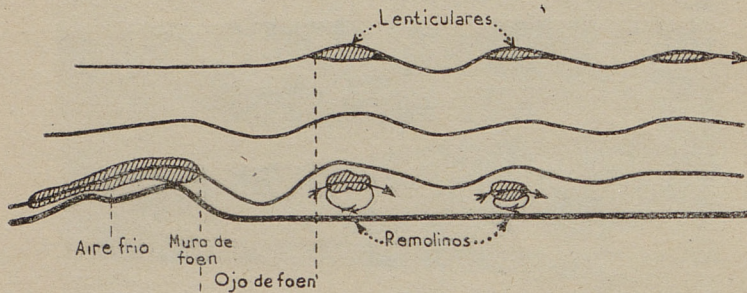


Fig. 4.

Mostrando un esquema de la nubosidad asociada a la ondulatoria, según Küttner.

y que ahora vamos a desarrollar con un poco más de extensión. Comienza Hoehndorf por distinguir entre las ondulaciones atmosféricas, según se formen en una atmósfera próxima a la inestabilidad (gradiente térmico de $0,8^{\circ} \text{C./100 metros}$), o en situaciones meteorológicas con masas de aire muy estable (gradiente de $0,3^{\circ} \text{C./100 metros}$). En el primer caso supone Hoehndorf que, por hallarse recalentado el aire próximo al suelo, una partícula tal como la que ocupa la posición *a* (fig. 5), tiene su nivel de equilibrio a una altura *n*. Se produce entonces un movimiento vibratorio amortiguado de la partícula, tal y como se ha explicado anteriormente; el obstáculo juega el papel de desencadenador del fenómeno.

En el segundo caso se refiere Hoehndorf a la circunstancia de que a barlovento de la montaña exista, estancada, una masa de aire frío (foehn anticiclónico); entonces dicha montaña queda como nivelada, sucediendo todo igual que si el aire bajase de una meseta cuya altura fuera la del obstáculo. Entonces el nivel de equilibrio de la partícula baja bruscamente, y la caída de ésta

da origen a un movimiento ondulatorio en torno a su nuevo nivel de equilibrio (fig. 6).

El estudio de Hoehndorf es un tanto vacilante y casi contradictorio. Explica, o pretende explicar, el fenómeno en algunos casos especiales. Por otra parte, no está de acuerdo con las observaciones de los pilotos, según las

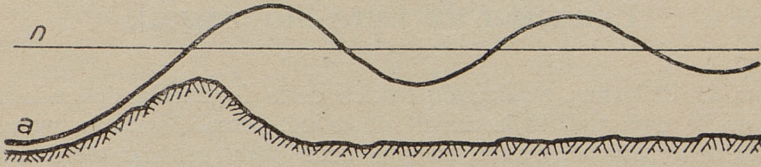


Fig. 5.

Hipótesis de Hoehndorf para masas de aire próximas a la inestabilidad.

cuales, y como ya indicamos, la longitud de onda decrece al aumentar el viento, siendo precisamente lo contrario lo que resulta según su teoría. La formación de las lenticulares la explica como efecto de la condensación del vapor de agua, debido a la elevación del aire por convección (caso de los cúmulos), cuando a escasa altura sobre el nivel de condensación existe una inversión. Dicha explicación nos parece inaceptable (1).

J. Küttner supone como condiciones previas para la formación de ondas, la existencia de inversiones a gran altura, respecto a la del obstáculo, así como una estratificación lábil fuera de dichas zonas.

Posteriormente, G. Lyra dedujo una ecuación de ondas para la componente vertical del viento. Utilizó para ello las ecuaciones fundamentales de la Hidrodinámica, haciendo uso de ciertas hipótesis restrictivas encaminadas a facilitar la integración. Consigue así dar un nuevo esquema de la formación de ondulaciones. Por el interés que presenta esta teoría, la exponemos con alguna extensión en el próximo capítulo. Pueden verse los resultados de la integración de la ecuación de Lyra para diferentes condiciones en los límites, en algunas figuras del sugerente artículo del Capitán Quintanilla, "Ojeada sobre el vuelo sin motor", publicado en la "Revista de Aeronáutica".



Fig. 6.

Caso de una atmósfera muy estable, según Hoehndorf.

Por último, H. Stunke, completando el trabajo de Lyra, estudia la perturbación de la componente horizontal del viento.

(1) Puede verse a este respecto lo que J. Coulomb y J. Loisel dicen con referencia a las nubes lenticulares en su libro *La Physique des Nuages*.

Ecuación de Lyra-Moazagotl.

Lyra ha dado una explicación teórica de la formación de ondulaciones atmosféricas, cuyo detalle de cálculo no es indispensable para la buena comprensión del fenómeno, y sirve, más que nada, para justificar teóricamente el mismo, sin que sus resultados coincidan exactamente con los obtenidos experimentalmente, ya que son muchas las hipótesis restrictivas que no se cumplen en la realidad, y que Lyra impone a sus cálculos para conseguir la ecuación en términos finitos que resuelve el problema.

A sotavento de una cadena de montaña es corriente la formación de ondas estacionarias, como hemos visto más arriba. Veamos cómo se consigue explicar esta estructura de la atmósfera. Para ello partiremos de las ecuaciones generales de Hidrodinámica, que, como es sabido, son las siguientes:

Ecuaciones de Euler:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \end{aligned}$$

que admiten la siguiente expresión en forma vectorial:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \text{grad } \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p;$$

y ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

que, puesta en forma vectorial, queda:

$$\text{div} (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Consideramos la corriente como bidimensional, estando dirigido el eje x según la dirección horizontal del viento, y el eje z verticalmente hacia arriba.

Expresaremos asimismo la condición estacionaria del fenómeno, mediante la anulación de las derivadas geométricas respecto al tiempo, o sea:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0.$$

Por otra parte, la única fuerza exterior que interviene es la de la gravedad, naturalmente en la dirección del eje z , quedando las ecuaciones de Euler en la forma siguiente:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2)$$

Su forma vectorial será:

$$\vec{V} \text{ grad } \vec{V} = -g - \frac{1}{\rho} \text{ grad } p.$$

La de continuidad queda de la forma siguiente:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

o bien en su forma implícita:

$$\text{div} (\rho \vec{V}) = 0.$$

Consideremos el caso de una masa de aire que se desplaza con velocidad horizontal constante u' en todos sus puntos ($w' = 0$). Para pasar al caso en que dicho régimen sea alterado por la presencia de un obstáculo, sumaremos a estas velocidades perturbaciones de las mismas: u'' y w'' . Las velocidades así resultantes: $u = u' + u''$, $w = w''$, corresponden al caso del movimiento perturbado. Estas variables u y w deberán satisfacer a las ecuaciones generales de la Hidrodinámica.

Análogamente expresaremos la presión y densidad por $p = p' + p''$, y $\rho = \rho' + \rho''$, donde p' y ρ' son únicamente función de la altitud.

Consideramos las perturbaciones de los valores de la corriente fundamental u'' , w'' , p'' y ρ'' ; asimismo, sus derivadas como pequeñas frente a los valores de estas magnitudes en la corriente fundamental u' , p' y ρ' .

Intervienen, por tanto, las cuatro variables u , w , p y ρ ; correspondientemente, tenemos para el cálculo del problema cuatro ecuaciones: las dos de Euler, la de continuidad y la de estado de los gases perfectos.

Se podrá, pues, mediante la eliminación de tres variables, obtener una ecuación diferencial con una variable solamente.

Sustituyendo en la primera ecuación de Euler [1], obtenemos:

$$(u' + u'') \frac{\partial u''}{\partial x} + w'' \frac{\partial u''}{\partial z} = - \frac{1}{\rho' + \rho''} \frac{\partial p''}{\partial x},$$

ya que

$$\frac{\partial u'}{\partial x} = \frac{\partial u'}{\partial z} = \frac{\partial p'}{\partial x} = 0.$$

Multipliquemos los dos miembros de la ecuación por $(\rho' + \rho'')$:

$$(u' + u'') (\rho' + \rho'') \frac{\partial u''}{\partial x} + w'' (\rho' + \rho'') \frac{\partial u''}{\partial z} = - \frac{\partial p''}{\partial x},$$

y considerando despreciables todos los productos en los que intervengan dos o más valores perturbados, ya que los suponemos muy pequeños, y por tanto, los productos podrán considerarse como infinitésimos de orden superior:

$$\rho' u' \frac{\partial u''}{\partial x} = - \frac{\partial p''}{\partial x}. \quad (4)$$

La segunda ecuación de Euler [2] se convierte sustituyendo:

$$(u' + u'') \frac{\partial w''}{\partial x} + w'' \frac{\partial w''}{\partial z} = - \frac{1}{\rho' + \rho''} \cdot \frac{\partial (\rho' + \rho'')}{\partial z} - g;$$

suprimiendo términos pequeños de segundo orden y operando:

$$u' \frac{\partial w''}{\partial x} = - \frac{1}{\rho' + \rho''} \frac{\partial (\rho' + \rho'')}{\partial z} - g,$$

$$\rho' u' \frac{\partial w''}{\partial x} = - \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\partial p''}{\partial z} - g (\rho' + \rho''),$$

teniendo en cuenta la ecuación de la Estática aplicada a la corriente fundamental, y que es

$$- \frac{\partial p'}{\partial z} = g \rho',$$

resulta:

$$\rho' u' \frac{\partial w''}{\partial x} + g \rho'' = - \frac{\partial p''}{\partial z}. \quad (5)$$

La ecuación de continuidad [3] queda sustituyendo

$$\frac{\partial(\rho' + \rho'')(u' + u'')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho' + \rho'')w''}{\partial z} = 0;$$

operando y despreciando términos pequeños de segundo orden:

$$\rho' \frac{\partial(u' + u'')}{\partial x} + u' \frac{\partial \rho''}{\partial x} + \rho' \frac{\partial w''}{\partial z} + w'' \frac{\partial \rho'}{\partial z} = 0,$$

o sea:

$$\rho' \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) = -u' \frac{\partial \rho''}{\partial x} - w'' \frac{\partial \rho'}{\partial z}. \quad (6)$$

Supondremos que la evolución de cada partícula se puede considerar adiabática, lo que está justificado admitiendo que el fenómeno sea suficientemente rápido y no existan ni condensaciones ni evaporaciones. Entonces tendremos:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}},$$

donde α es la constante de Poisson.

Diferenciando logarítmicamente tendremos:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\alpha} \frac{dp}{p},$$

o sea:

$$\frac{d\rho}{d p} = \frac{1}{\alpha} \frac{\rho}{p} = \frac{1}{\alpha R T},$$

ya que $p = \rho \cdot R \cdot T$ (ecuación de estado).

Si llamamos $c_0^2 = \kappa \cdot R \cdot T_0$, se tendrá:

$$\frac{d\rho}{d p} = \frac{1}{c_0^2 (1 + \alpha \bar{t})},$$

donde α es el coeficiente de dilatación de los gases perfectos y \bar{t} es la temperatura centígrada (Celsius).

Sustituyendo los valores de ρ y p , se tendrá:

$$\frac{d(\rho' + \rho'')}{d(p' + p'')} = \frac{1}{c_0^2 (1 + \alpha \bar{t})}.$$

Podremos despreciar $\alpha \cdot t$ frente a 1, lo que equivale a no tener presente en el efecto de dilatación de la partícula la parte correspondiente a la variación de temperatura, con lo que queda:

$$\frac{d}{dt} (\rho' + \rho'') = \frac{1}{c_o^2} \frac{d}{dt} (\rho' + \rho'').$$

Desarrollando esta expresión, teniendo en cuenta que son diferenciales sustanciales, tendremos:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho' + \rho'') + u \frac{\partial}{\partial x} (\rho' + \rho'') + w'' \frac{\partial}{\partial z} (\rho' + \rho'') = \\ & = \frac{1}{c_o^2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho' + \rho'') + u \frac{\partial}{\partial x} (\rho' + \rho'') + w'' \frac{\partial}{\partial z} (\rho' + \rho'') \right]; \end{aligned}$$

Por ser el fenómeno estacionario, las derivadas geométricas respecto al tiempo son nulas, y prescindiendo, además, de términos pequeños, queda:

$$c_o^2 \left(u' \frac{\partial \rho''}{\partial x} + w'' \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right) = u' \frac{\partial \rho''}{\partial x} + w'' \frac{\partial \rho'}{\partial z}.$$

Dividiendo por u' y aplicando la ecuación fundamental de la Estática al segundo miembro, tendremos:

$$\frac{\partial \rho''}{\partial x} - \frac{w''}{u'} g \rho' = \frac{c_o^2}{u'} \left(u' \frac{\partial \rho''}{\partial x} + w'' \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right).$$

Aplicando la ecuación de continuidad al segundo miembro, resulta igual a

$$- c_o^2 \frac{\rho'}{u'} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right);$$

y despejando $\frac{\partial \rho''}{\partial x}$, tendremos:

$$- g \frac{\rho'}{u'} w'' + \frac{c_o^2 \rho'}{u'} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \rho''}{\partial x}. \quad (7)$$

Hemos obtenido las ecuaciones buscadas [4], [5], [6] y [7], y ahora deberemos realizar la anunciada eliminación.

Eliminemos primeramente la presión p'' (dicho con más exactitud, la perturbación de la presión).

Para ello derivemos la [7] respecto a z y la [5] respecto a x , e igualemos ambos resultados:

$$\rho' u' \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} + g \frac{\partial \rho''}{\partial x} = - \frac{g \rho'}{u'} \frac{\partial w''}{\partial z} - g \frac{w''}{u'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} + \frac{c_o^2}{u'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) + \frac{c_o^2}{u'} \frac{\rho'}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right). \quad (8)$$

Eliminaremos $\frac{\partial \rho''}{\partial x}$ con ayuda de la ecuación de continuidad [6].

Despejando $\frac{\partial \rho''}{\partial x}$ en [6], tendremos:

$$\frac{\partial \rho''}{\partial x} = - \frac{w''}{u'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} - \frac{\rho'}{u'} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right);$$

y sustituyendo en [8] se tendrá:

$$\rho' u' \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} - g \frac{\rho'}{u'} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) = - \frac{g \rho'}{u'} \frac{\partial w''}{\partial z} + \frac{c_o^2}{u'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) + \frac{c_o^2}{u'} \frac{\rho'}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right).$$

Multiplicando los dos miembros por $\frac{u'}{c_o^2 \rho'}$, se tendrá:

$$\frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} - \frac{g}{c_o^2} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) = - \frac{g}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} + \frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right);$$

y ordenando los términos, tendremos:

$$\frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} - \left(\frac{g}{c_o^2} + \frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) + \frac{g}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Para el cálculo de $\frac{\partial \rho'}{\partial z}$ considera Lyra aplicable la ecuación $\rho' = \kappa \frac{p'}{c_o^2}$,

lo que sólo es cierto cuando se trata de una atmósfera isoterma. Derivando esta ecuación, tendremos:

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} = \frac{1}{\rho'} \frac{\chi}{c_o^2} \frac{\partial \rho'}{\partial z};$$

sustituyendo en esta misma el valor de $\frac{\partial \rho'}{\partial z}$, que nos da la ecuación fundamental de la Estática,

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{g\chi}{c_o^2}. \quad (10)$$

Iguando las ecuaciones [7] y [4], se tiene:

$$-\frac{g}{u'} w'' + \frac{c_o^2 \rho'}{u'} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} \right) = \rho' u' \frac{\partial u''}{\partial x};$$

y despejando la cantidad contenida en el paréntesis, tendremos:

$$\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} = \frac{g}{c_o^2} w'' + \frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial u''}{\partial x}.$$

Sumando a los dos miembros

$$-\frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} - \frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial u''}{\partial x}$$

tendremos:

$$\frac{c_o^2 - u'^2}{c_o^2} \frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{c_o^2 - u'^2}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} = \frac{g}{c_o^2} w'' - \frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z}.$$

Multiplicando los dos miembros por $\frac{c_o^2}{c_o^2 - u'^2}$, se obtiene:

$$\frac{\partial u''}{\partial x} + \frac{\partial w''}{\partial z} = \frac{g}{c_o^2 - u'^2} w'' - \frac{u'^2}{c_o^2 - u'^2} \frac{\partial w''}{\partial z}. \quad (11)$$

Sustituyendo en [9] la [11], se obtendrá:

$$\begin{aligned} \frac{u'^2}{c_o^2} \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} - \left(\frac{g}{c_o^2} + \frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right) \left(\frac{g}{c_o^2 - u'^2} w'' - \frac{u'^2}{c_o^2 - u'^2} \frac{\partial w''}{\partial z} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{g}{c_o^2 - u'^2} w'' - \frac{u'^2}{c_o^2 - u'^2} \frac{\partial w''}{\partial z} \right) + \frac{g}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} = 0. \end{aligned}$$

Multiplicando por $\frac{c_o^2 - u'^2}{u'^2}$ y sustituyendo el valor de $\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z}$ dado por la [10], obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{c_o^2 - u'^2}{c_o^2} \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} - g \frac{1 - \chi}{c_o^2} \left(\frac{g}{u'^2} w'' - \frac{\partial w''}{\partial z} \right) - \frac{g}{u'^2} \frac{\partial w''}{\partial z} + \\ + \frac{\partial^2 w''}{\partial z^2} + g \frac{c_o^2 - u'^2}{c_o^2 u'^2} \frac{\partial w''}{\partial z} = 0; \end{aligned}$$

y ordenando,

$$\left(1 - \frac{u'^2}{c_o^2} \right) \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w''}{\partial z^2} - \frac{g \chi}{c_o^2} \frac{\partial w''}{\partial z} + g^2 \frac{\chi - 1}{c_o^2 u'^2} w'' = 0. \quad (12)$$

Ecuación diferencial que contiene sólo una variable-función, y que además puede ponerse en forma más sencilla.

Si hacemos el cambio de variable,

$$w'' = w_1'' e^{\frac{z}{2h}},$$

donde h es una constante a determinar,

$$\frac{\partial w''}{\partial z} = \left(\frac{\partial w_1''}{\partial z} + \frac{1}{2h} w_1'' \right) e^{\frac{z}{2h}},$$

$$\frac{\partial^2 w''}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial^2 w_1''}{\partial z^2} + \frac{1}{h} \frac{\partial w_1''}{\partial z} + \frac{1}{4h^2} w_1'' \right) e^{\frac{z}{2h}}.$$

Por otra parte, si hacemos el cambio de variable $x_1 = x \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u'^2}{c_o^2}}}$, tendremos:

$$\left(1 - \frac{u'^2}{c_o^2} \right) \frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} = e^{\frac{z}{2h}} \cdot \frac{\partial^2 w_1''}{\partial x_1^2};$$

sustituyendo en la ecuación diferencial y dividiendo por $e^{\frac{z}{2h}}$, queda:

$$\frac{\partial^2 w_1''}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w_1''}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{h} - \frac{g \chi}{c_o^2} \right) \frac{\partial w_1''}{\partial z} + \left(\frac{1}{4h^2} - \frac{g \chi}{c_o^2} \frac{1}{2h} + \frac{g^2 (\chi - 1)}{u'^2 c_o^2} \right) w_1'' = 0. \quad (13)$$

Como se ve, por el modo como ha sido introducida, h tiene las dimensiones de una longitud.

Haciendo

$$h = \frac{c_o^2}{\kappa g} = \frac{1}{g} \frac{p'}{\rho'} = \frac{R T}{g} = 8.000 \text{ m.},$$

desaparece el primer paréntesis, y tras algún cálculo resulta:

$$\frac{\partial^2 w''}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w''}{\partial z^2} + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} w'' = 0, \quad (14)$$

siendo

$$\lambda = \frac{2\pi u' c_o}{g \sqrt{\kappa - 1 - \kappa^2 u'^2 / 4 c_o^2}}.$$

De esta manera hemos puesto la ecuación de perturbación para w''_1 en una forma que permite la integración que fué hecha por Lyra para una meseta de un perfil de montaña de sección rectangular (fig. 7). Las líneas de corriente muestran las características esenciales de las ondulaciones atmosféricas: la pequeña perturbación a barlovento de la montaña, el hundimiento de

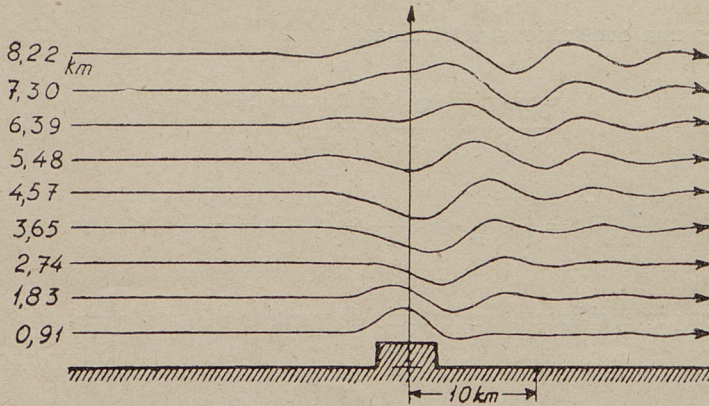


Fig. 7.

Forma de las líneas de corriente, según G. Lyra.

una parte de las líneas de corriente sobre la misma y la amplitud decreciente de las ondulaciones de las líneas de corriente a sotavento. Digamos aún que el cálculo supone una atmósfera isoterma y una ecuación individual de estado también isoterma.

La ascendencia ondulatoria en Inglaterra.

Recientemente—los primeros vuelos de interés comenzaron el año 1944— los pilotos de velero ingleses han empezado a utilizar este tipo de ascendencia. Creemos interesante dar una información especial, aunque somera, de los resultados alcanzados en este país, ya que aún no se ha escrito nada en castellano sobre ello, permaneciendo así desconocido para los aficionados a la utilización o al estudio de lo que en la atmósfera acontece.

Constituye, por otra parte, una nueva y valiosa aportación, aunque sólo fuera por mostrar algunas características discrepantes, junto con otras coincidentes, respecto a la ondulatoria en España. La búsqueda de las analogías y diferencias, que presenta un mismo fenómeno en distintos lugares, constituye un buen método para deslindar aquellas características que, por presentarse siempre, podríamos llamar esenciales, de aquellas otras que, acompañando al fenómeno sólo en casos aislados, deben ser consideradas como accidentales.

Los primeros vuelos en ondulatoria se verificaron utilizando la formada por los montes Hartside—estribación situada al extremo Norte de los Peninne—. Están orientados de NW. a SE., y por aprovecharse su vertiente de 450 metros al valle del Eden, da lugar a ondulaciones atmosféricas cuando sopla viento del NE. Su intensidad es a veces muy grande y llega a una permanencia de hasta tres días. La corriente se adapta a la forma de la pendiente, y terminada ésta se eleva, dando lugar a la primera onda. Esto parece incontrovertible, pues en la cumbre de la misma se forma una nube de forma cilíndrica y paralela a la loma, que permanece estacionaria a una altura que oscila entre los 760 metros y 1.524 metros. A veces, si el grado de humedad es suficientemente elevado, se forma otra de características análogas, situada en su vertical y a unos 4.880 metros de altura como máximo, unida a la primera por una zona de neblina. Esta formación nubosa se repite corriente abajo, correspondiendo a las cumbres de nuevas ondas. El fenómeno parece favorecido por la presencia de una inversión entre los 1.219 y 1.829 metros de altura. Se suponía que la nube menos elevada se formaba al nivel de la base de la inversión. La superior se explicó como formada por una corriente aérea, reproducción exacta de la reinante en la capa más baja.

El equipo de vuelo sin motor se situó en la base de la pendiente, debajo de la nube formada por la primera onda. Después de algunos intentos infructuosos, en los que los pilotos volaron en dirección al valle, fué soltado el piloto Noel McLean, quien, volando a 180 metros de altura, se enfrentó al viento, encontrando ascendencia de tres metros por segundo. Después de atravesar una zona de gran turbulencia, situada a los 300 metros de altura, pene-

tra en régimen laminar, elevándose a gran velocidad—se supone llegó a los doce metros por segundo—. Esta situación permaneció hasta llegar a los 2.743 metros, donde quedó emplazado a un kilómetro de distancia, aproximadamente, del cilindro inferior, quedando luego inmóvil y enfrentado al viento del NE. sobre la vertical del punto de salida. Transcurrido un breve período reanuda la ascendencia, superando los 3.352 metros. No existía el cilindro nuboso alto, pero alcanzó el punto en el que parecía probable se hubiera formado de existir humedad suficiente. Encontró dificultades para tomar tierra, por no conseguir bajar a pesar de entrar en picadas muy fuertes. Sólo pudo alcanzar su objeto penetrando en la zona descendente de la corriente. Este fué el primer caso y lugar de Inglaterra, y constituye el “record” de altura británico.

El piloto inglés de vuelo sin motor Terence Horsley, interesado en esta cuestión, prosiguió buscando nuevos lugares de formación de ondulatoria. Los primeros síntomas de este fenómeno los encuentra en Lundie Castle—estribaciones occidentales de los Grampians, condado de Angus—, con ocasión de un fuerte huracán que arrancó 2.000 árboles. En este caso el viento que produce las ondulaciones es de dirección NW., y la zona arrasada por él, supone Horsley sea el lugar de bajada de la corriente de aire antes de elevarse para dar lugar a la primera onda. La figura 8 nos da un esquema de la región en

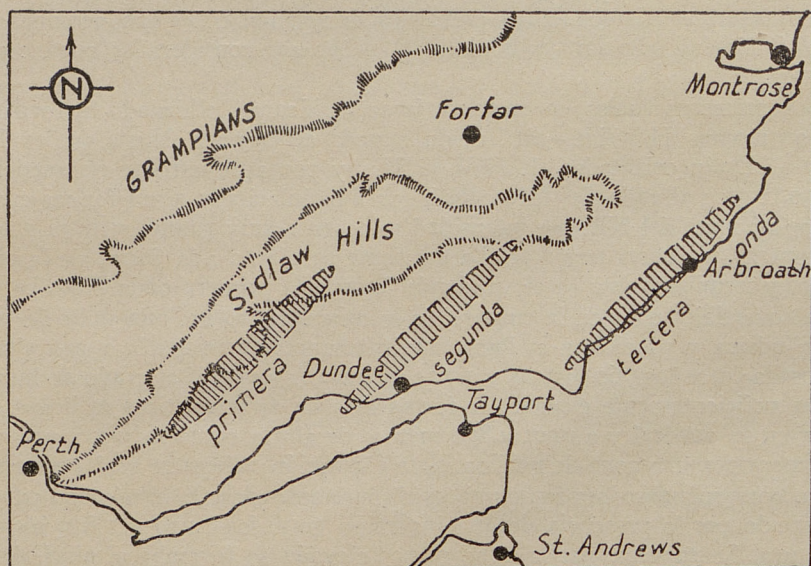


Fig. 8.

la que se forma la ondulatoria. Los Sidlaws es una cadena de montes que se extiende de NE. a SW. en una longitud de 45 kilómetros, con Perth en su extremo sur y Forfar en su extremo norte. Su altura media es de 304 metros y llega hasta los 454. Hacia el Norte se extienden los Grampians, estando separados de esta región por el ancho valle de Isla. Queda así explicado que

esta pequeña loma entre la meseta y el mar, esté suficientemente aislada para influir en el tiempo local. Como en el caso de Hartside, aquí también se forman tres nubes cilíndricas, correspondiendo a otras tantas ondas, y cuya situación aparece en la mencionada figura. El aumento de la nubosidad cumuli-

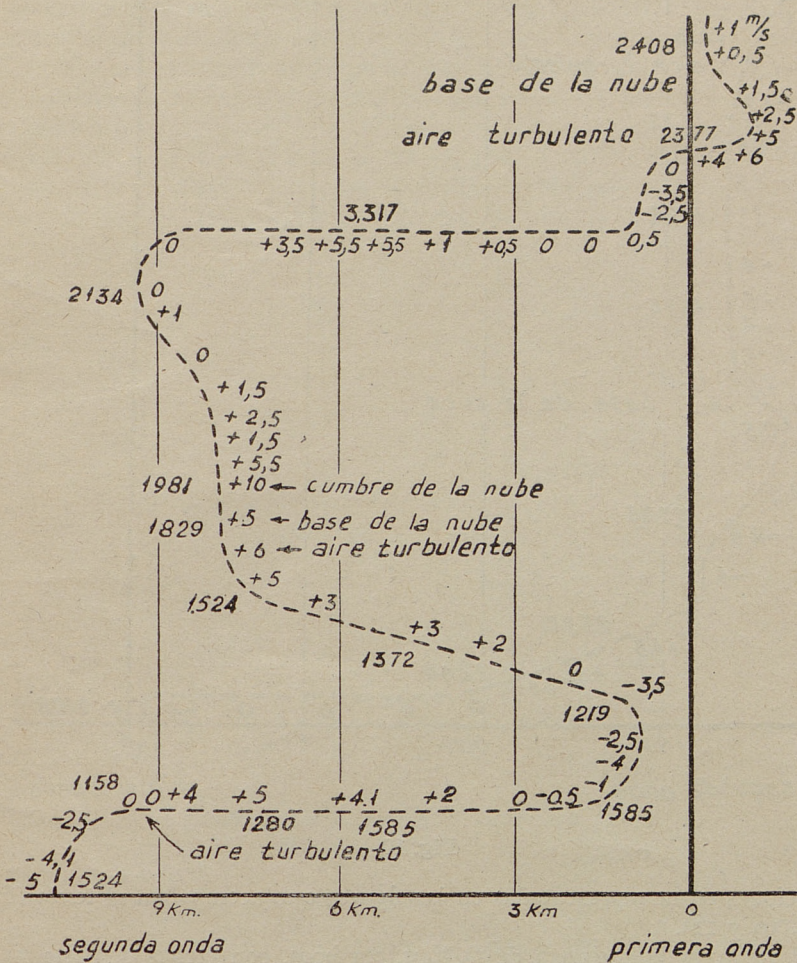


Fig. 9.

Los números pequeños indican las velocidades ascensionales en metros/segundos, y los de mayor números de cifras, las altitudes.

forme durante el vuelo que vamos a relatar, favorecido por la acción orográfica, hizo difícil de identificar la de ondulatoria; pero la existencia de ascendencia en la parte anterior de la nube y descendencia en la posterior, no dejan lugar a duda acerca del origen de la misma. La longitud de las nubes era de

unos 24 kilómetros, y su espesor horizontal, de dos a tres kilómetros. Sus alturas eran 1.219, 1.828 y 2.407 metros, para la primera, segunda y tercera nube, respectivamente. En este día—29 de septiembre de 1944—voló Horsley en avión “Anso”, llevando un cuadernillo atado a la pierna derecha, cuyas

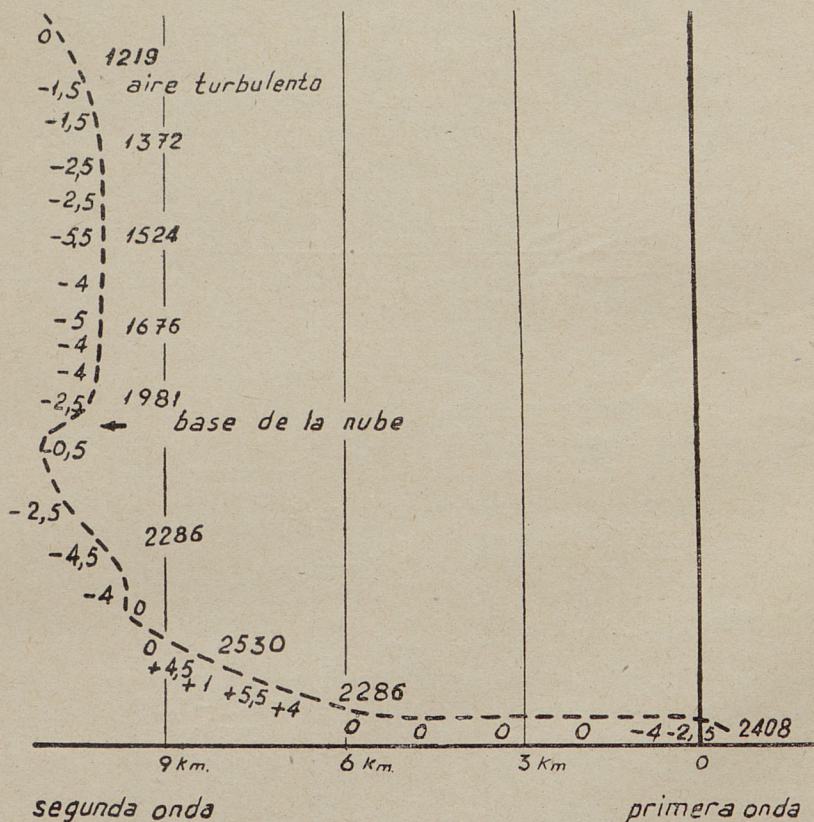


Fig. 10.

anotaciones están representadas en las figuras que acompañan al texto (figuras 9, 10 y 11).

El viento en el suelo era de 55 kms. por hora, con rachas de hasta 74 kilómetros por hora, y su dirección, de 245°, aunque a los 600 metros es ya de 300°. Como indica la figura 9, el piloto penetró primeramente en la parte descendente de la segunda onda, como comprobó por pasar el variómetro de 0 a —5 metros por segundo, bajando en régimen muy laminar de 1.524 a 1.158 metros. Pasando por debajo de la nube, alcanzó la parte de ascensión, observando que en la parte intermedia había turbulencia. En un espacio de pocos metros el variómetro cambió de un descenso de cinco metros por segundo a una velocidad ascensional de cuatro metros por segundo, que aumentó luego a cinco metros por segundo al dirigirse el piloto hacia la pri-

mera onda, distante siete kilómetros. Esta velocidad ascensional disminuye lentamente a lo largo de más de cuatro kilómetros. Llegó así a la conclusión interesante que enseña esta experiencia: la corriente ascensional a barlovento de la nube se extiende más que la corriente descendente a sotavento. A una distancia de más de cuatro kilómetros de la nube fué registrada una ascensional de más de 5,6 metros por segundo, mientras que en el lado de descendencia la extensión de la misma no pasó nunca de dos kilómetros.

La corriente, notablemente laminar con algunas excepciones en la base y en el extremo de la nube, confirma las experiencias obtenidas por Mc Lean. El piloto afirma que la corriente de aire en la altura queda obligada a igualarse a la forma de la onda inferior, ya que por esta causa alcanzó 2.621 metros encima de la tercera onda y en un punto situado inmediatamente sobre la cumbre de la nube, sobrepasada a los 2.408 metros. En la figura 9 se puede

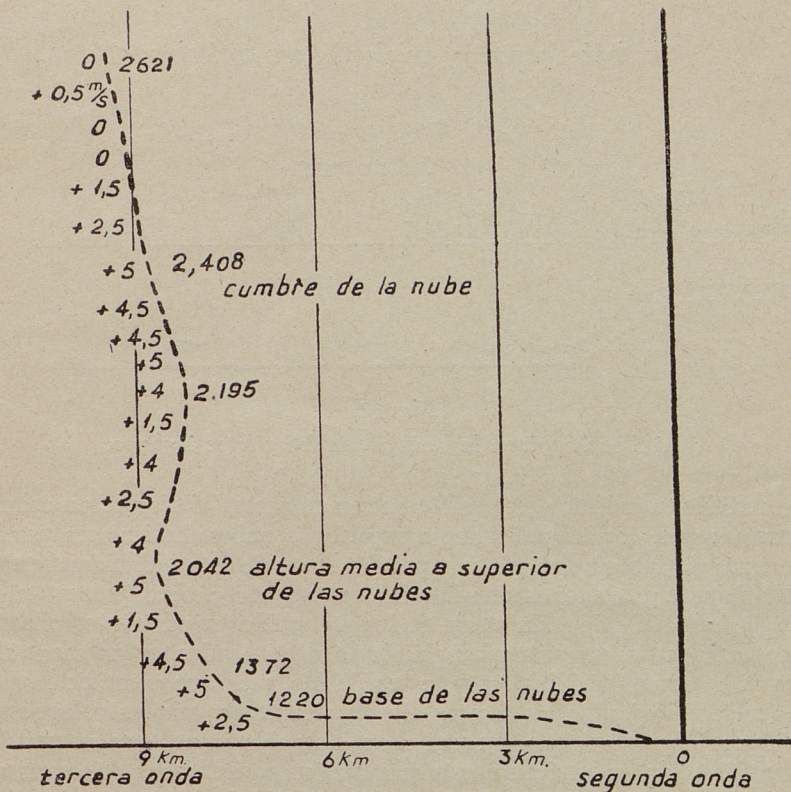


Fig. 11.

ver que la velocidad ascensional más elevada fué alcanzada a los 1.981 metros. Asimismo, se ve que la ascensional continuó durante otros 1.336 metros.

Las figuras 10 y 11 indican los otros dos fragmentos del vuelo citado, y juntas con la figura 9 dan un esquema completo del mismo.

Unos días después de este vuelo pudo observar este piloto el mismo fenómeno, esta vez con cielo completamente despejado. El viento soplaba de la misma dirección, pero el aire era extraordinariamente seco. Sólo por las experiencias obtenidas en la primera ocasión pudo encontrar la posición de la onda, esta vez invisible (1).

Comentario.

A juzgar por lo anteriormente extractado, los pilotos ingleses carecen todavía de un conocimiento teórico de la naturaleza de la ascendencia ondulatoria. El esquema que presentan de la característica de la misma es, indudablemente, muy elemental y un tanto desproporcionado (fig. 12). Sin embargo, sus observaciones experimentales son de algún mérito y presentan un indudable interés.

Las descripciones que hacen de las nubes que se forman adolecen de alguna imprecisión, lo que no permite clasificarlas claramente, ni como Mczagoatl ni

Corriente superior originada por la forma de las ondas

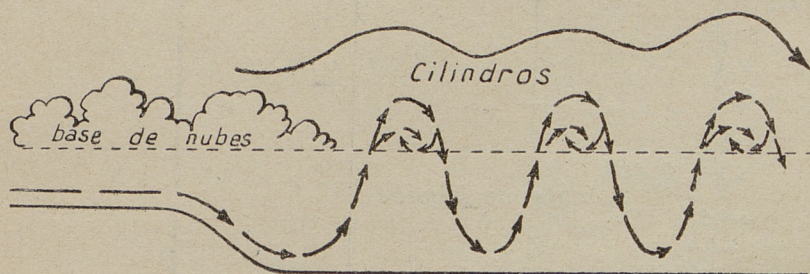


Fig. 12.

Así se imaginan la ondulatoria los pilotos ingleses.

como rodillos turbulentos. Es posible que en su parte inferior deban asimilarse a estos últimos, correspondiendo la superior a nubes lenticulares asociadas. Carecemos de fotografías que nos puedan sacar de esta incertidumbre.

No deja de presentar interés la sencillez que, por lo visto, presenta el fenómeno de formación de ondulatoria en Inglaterra. Según parece, los pilotos británicos encuentran un exacto acoplamiento de las ondas en las capas altas y bajas de la atmósfera. Esto tal vez sea debido, más que a condiciones especiales meteorológicas, a las escasas alturas alcanzadas por los volovelistas de aquel país. Esperamos que, merced a su innegable entusiasmo, logren éxitos de consideración en el futuro, aun cuando las posibilidades del vuelo a vela en la ascendencia ondulatoria parecen bastante limitadas por las condiciones orográficas de las Islas Británicas.

(1) Hemos preferido dar la exacta correspondencia en m. y m/seg. de las alturas y velocidades, que venían en el artículo original en pies y pies/min.; sin embargo, conviene advertir que la precisión del trabajo inglés es de unos ± 15 m. en las alturas y de $\pm 0,25$ m/seg. en las velocidades.

Ascendencia ondulatoria en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca.

Se halla esta Escuela entre los pueblos de Monflorite y Alcalá del Obispo, a unos 11 kilómetros de la capital, y posee una ladera orientada al Oeste, de aproximadamente 70 metros de altura, que limita por el Este la llamada "Hoyada de Huesca". Al norte de la Escuela, y a unos 25 kilómetros, se encuentra la Sierra de Guara, estribación de los Pirineos, cuyo pico más alto es el Guara, de 2.077 metros.

La ondulatoria es producida por acción de la Cordillera Pirenaica, cuando en la altura sopla viento de dirección Norte. Si éste tiene suficiente intensidad, resultando así aprovechables los campos de ascendencia formados, el viento correspondiente en tierra es de componente Oeste, manteniéndose durante todo el día, a veces cruzándose un poco al Norte durante el transcurso del mismo, y lo suficientemente intenso para permitir el vuelo en la ascendencia orográfica creada por la ladera de la Escuela, llegando a veces a sobrepasar los 20 metros por segundo. Durante los períodos de este régimen se vuela, pues, durante todo el día, lo que no quiere decir que se consiga siempre aprovechar la ascendencia ondulatoria; que evidentemente reina en la altura, pero no en las capas bajas de la atmósfera, únicas exploradas por el piloto, quien volando en orográfica no sobrepasa los cien metros. Sólo es posible la utilización de las ondas existentes en los dos casos siguientes:

1.º El piloto encuentra ascendencias térmicas que aprovecha hasta elevarse a zonas en que la ondulatoria se deja ya sentir.

2.º Pasa directamente del vuelo en orográfica al vuelo en ondulatoria. Esto sólo ocurre en circunstancias muy especiales.

El primer procedimiento se ha utilizado frecuentemente. Los sondeos termodinámicos que poseemos muestran que, efectivamente, en las capas bajas la estabilidad es pequeña en estos días, contrastando con la muy grande existente en la atmósfera superior.

Más interesante, sin embargo, es el segundo caso. Cuando se presenta, todos los veleros que se hallaban siguiendo el curso de la ladera y con altura casi invariable, comienzan a elevarse simultáneamente; poco después se deshace el primitivo orden al buscar cada piloto, volando ya en franca ondulatoria, las ascendencias a su juicio más favorables. Lo indicado hace pensar que una de las ondas, en condiciones especiales de dirección y velocidad del viento, resuena, por decirlo así, junto a la ladera. Aunque resulta aventurado afirmarlo, tal vez no consista en otra cosa el fenómeno conocido en esta Escuela bajo el nombre de "ascendencia general".

Hay otros síntomas que acompañan la ascendencia ondulatoria. Uno



Fig. 13.

Nubes que acompañan la formación de ondulaciones atmosféricas.

de los más conocidos y ya indicado anteriormente es el de formación de nubes (figs. 13 y 14), que dan idea de la forma y situación de las ondas por poseer las mismas ondulaciones de éstas, sirviendo así para hacerlas visibles. En especial una de ellas posee una estratificación extraordinariamente marcada, y ha sido bautizada en esta Escuela con el nombre de "nube Monflorite". Su base se encuentra por encima de los 6.000 metros (a más alto nivel del ordinario en esta clase de nubes), síntoma muy prometedor, pues muestra prácticamente la existencia de ondulaciones atmosféricas en regiones aún no alcanzadas (fig. 14).

Además, se presenta algunas veces un curioso fenómeno, consistente en la aparición en el cielo de líneas delgadas, de gran longitud, casi horizontales y con ondulaciones. Se extienden por toda la parte Este del horizonte, son de un color azul claro, y en apariencia están muy alejadas. Su origen no está definido, pero es nuestra opinión que deben atribuirse a un fenómeno de óptica producido por la presencia en la atmósfera de discontinuidades (probablemente inversiones térmicas muy señaladas).

El que aparezcan onduladas indicaría, de ser cierta nuestra hipótesis, que la ondulatoria se extiende a toda la provincia de Lérida por lo menos. El escaso contraste de estas líneas con el resto del cielo ha impedido, desgraciadamente, su fotografía.

Los primeros trabajos encaminados a un estudio teórico-experimental de

la ascendencia ondulatoria en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca se realizaron en noviembre de 1944, aprovechando los datos suministrados por los informes de los pilotos. Hubo mañana durante la cual alcanzaron altura considerable siete de éstos siguiendo diferentes trayectorias. De los mencionados informes se extractaron las observaciones que resultaron interesantes para el estudio del fenómeno. Estas observaciones eran: hora, ascendencia en metros por segundo en ese instante y posición del aparato (altura y proyección vertical del mismo). Conociendo la intensidad aproximada del viento en las diferentes alturas, la correspondiente indicación variométrica y la velocidad de descenso del aparato en vuelo normal, es fácil calcular con alguna precisión el ángulo de inclinación respecto a la horizontal de la sección de la superficie de la onda por un plano vertical que contenga la dirección del viento a esa altura.

La investigación encaminada a este fin, aunque suministró alguna información acerca de la inclinación de la onda (para la máxima, por ejemplo, se calculó un ángulo próximo a 20°), no determinó claramente la situación de las ondas. Las razones de este fracaso relativo son de muy diversa índole, y mencionamos las siguientes:

1. Las condiciones no son nunca las mismas de un día a otro, por lo que constituyen, en cierto modo, estudios no relacionables, los que se hacen con los datos de cada día.



Fig. 14.

Nubes que acompañan la formación de ondulaciones atmosféricas.

2. Si nos limitamos a un intervalo pequeño de tiempo, para evitar la intervención desorientadora de las modificaciones del fenómeno al transcurrir éste, disminuye igualmente el número de vuelos o longitudes de trayectorias utilizadas en el estudio.

3. Se presentan anomalías derivadas de la falta de acoplamiento, por decirlo así, de la zona baja y alta de una misma onda. Ocurre frecuentemente que dos pilotos situados sobre la vertical de un mismo lugar, suben o bajan con velocidades diferentes, e incluso mientras uno de ellos se encuentra en plena ascendencia, el otro está en zona de descenso.



Fig. 15.

Mapa sinóptico del día 25 de septiembre de 1945, a trece horas, mostrando la situación característica en un día de ondulatoria.

4. Si para evitar estas singularidades consideramos los trayectos comprendidos dentro de un intervalo pequeño de alturas, disminuimos paralelamente el número de datos a utilizar.

5. Los pilotos redactan sus informes en tierra a partir de los datos que recuerdan, ya que, ocupados en la labor de volar, no pueden hacer anotaciones precisas. En principio encontramos algunas diferencias respecto a la ascendencia ondulatoria en Inglaterra.

La principal de éstas consiste en que allí aparecen las ondas más claramente dibujadas y se extienden hasta capas más bajas de la atmósfera, mientras que en Huesca se presentan llenas de anomalías y son más difíciles de alcanzar. Sin embargo, y a juzgar por los resultados, alcanzan capas más altas y en conjunto ofrecen posibilidades mucho más prometedoras para el futuro, siempre que no se desestime el importante papel que ha de jugar una ordenación científica de observaciones, único procedimiento para resolver de modo más determinado los problemas planteados.

El criterio de predicción de formación de ondulatoria que ha dado hasta ahora mejor resultado, es el que tiene por fundamento el hecho, comprobado experimentalmente, de ir asociadas a distribuciones determinadas de la presión. En esos días el gradiente horizontal de presión es relativamente intenso, y está dirigido hacia el W. (correspondiente a viento del N.). Generalmente las isóbaras vuelven su convexidad hacia la región de la Escuela (véase la figura 15). Es lo más frecuente que se presente en el seno de una masa fría, a los pocos días del paso de una depresión con dirección al Mediterráneo o al sur de Francia.

Ocurre algunas veces, como ya hemos indicado, que a pesar de la innegable existencia de ondulatoria en la altura, puesta de relieve por la nubosidad característica, no se consigue alcanzarla por no ser practicable ninguno de los dos procedimientos indicados anteriormente. Incluso suele ocurrir, cuando el viento arriba, muy intenso, tiende a girar al E. al aumentar la altura, que en la región inferior de la atmósfera reina calma o viento muy débil, siendo sólo posible el vuelo a remolque.

Ultimos vuelos realizados en la Escuela de Vuelos sin Motor de Huesca y su trascendencia para la determinación de las características de la ascension ondulatoria.

La práctica adquirida por los Profesores que prestan sus servicios en esta Escuela, así como las magníficas condiciones que para su aprovechamiento reúne la ondulatoria en Huesca, son causa de que una vez alcanzada ésta por el velero, llegue a la cota máxima del vuelo de un modo continuo, con ascensiones poco variables.

Como comprobación de este aserto reproducimos (fig. 16) la banda del altígrafo oficial, que corresponde al vuelo efectuado por el Profesor Luis Vicente Juez, el día 25 de septiembre de 1945, en velero biplaza, y que ha sido



Fig. 16.

Reproducción de la banda del altígrafo oficial empleado en su vuelo por Luis Vicente Juez.

homologado por la Federación Aeronáutica Internacional, previa homologación por la Federación Aeronáutica Nacional de España. Este piloto alcanzó 6.263 metros sobre el nivel del mar, según el cálculo efectuado por aquella Federación, siguiendo las normas de su Código Deportivo. Con este vuelo Juez

superó su anterior "record", aún no homologado por el mencionado Organismo, en 983 metros. La banda del altígrafo utilizado por su compañero Miguel Ara, quien alcanzó una altura ligeramente superior, aunque insuficiente para batir el "record" de Juez, muestra análogas características. Ambas nos ilustran acerca de las velocidades ascensionales utilizadas.

Pero de un modo mucho más notable se puso de relieve la importancia del avión sin motor como medio de investigación aerológica. Ya desde principios de 1945 se dotó a uno de los veleros biplazas de meteorógrafo de avión. Este instrumento sirve, como es sabido, para registrar simultáneamente datos de presión, temperatura y humedad. Conocidas estas variables meteorológicas pueden determinarse las restantes. Con su adaptación a los veleros se consigue, pues, la determinación de las condiciones reinantes en la zona de la atmósfera en que vuelan. Mediante los datos de presión, teniendo en cuenta la distribución de la temperatura y humedad, se calculan con toda precisión las alturas. Conocida la velocidad de giro del tambor, será posible el cálculo del tiempo transcurrido entre dos alturas; un simple cociente nos dará la ascendencia media en el correspondiente intervalo. Si se conoce, por ejemplo, mediante sondeos con globo piloto, la dirección y velocidad del viento en la altura y el velero vuela en condiciones normales, es posible deducir de los valores de las ascendencias, como ya hemos indicado, datos acerca de la inclinación de la superficie de la onda.

En el día 25 de septiembre de 1945, fecha en que Juez batió su "record", resultaba conveniente verificar un sondeo con meteorógrafo, tanto para determinar las condiciones en que se había verificado el mencionado "record", como para estudio de la ascendencia ondulatoria. Habiendo desaparecido la posibilidad de alcanzar ésta en vuelo orográfico, se tomó el partido de remolcar el velero, provisto de meteorógrafo, hasta una zona de ascendencia, para que sosteniéndose en ella, verificase el indicado sondeo. Es para nosotros una satisfacción hacer mención del magnífico vuelo realizado por el Profesor Julián Sevillano, que pilotó el velero. Soltado a 2.000 metros sobre el nivel del mar (las alturas que mencionaremos en adelante se sobreentienden medidas sobre el nivel del mar y en metros geodinámicos), logró elevarse hasta 6.650 metros. Esto hubiera constituido la superación del establecido por Juez, si no fuera preciso descontar de la altura alcanzada la altura a que fué soltado. Por otra parte, el piloto salió en misión exclusivamente meteorológica; mal provisto, por tanto, de instrumentos de control. La proyección sobre un plano horizontal de su vuelo puede verse en la figura 17, y la figura 18 muestra el facsímil de la banda registrada por el meteorógrafo.

El resultado del sondeo tiene un gran valor, ya que ilustra acerca de un nuevo procedimiento para determinar las características de las ondulaciones atmosféricas.

La índole de este artículo, que pretende ser asequible a todos en su parte descriptiva, nos recomienda una explicación elemental, que a muchos podría parecer superflua en algunos puntos.

Como es sabido, la temperatura disminuye generalmente al ascender en el seno de la atmósfera. Hay, sin embargo, zonas de casi siempre pequeño espesor vertical y muy extendidas horizontalmente, en las que esto no ocurre, sino

que la temperatura aumenta al aumentar la altura; estas zonas son conocidas en Meteorología con el nombre de “inversiones térmicas” o, más sencillamente, “inversiones”. Su importancia reside en el hecho de que actúan de modo parecido a membranas elásticas, que dividen la atmósfera en compartimientos, de

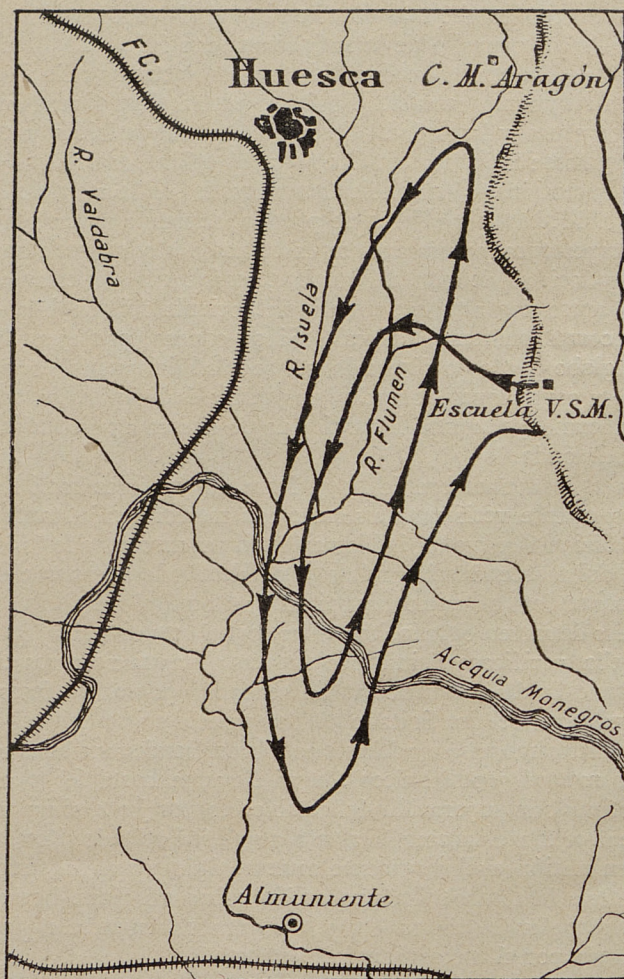


Fig. 17.

Proyección horizontal del vuelo realizado por Julián Sevillano.

los que ellas constituyen los tabiques separadores, pues los movimientos del aire perpendiculares a su superficie resultan frenados elásticamente por ellas. De aquí se deduce que el aire ha de moverse paralelamente a la inversión; consecuentemente, la zona de inversión deberá tener las mismas ondulaciones

que sigue el viento en la atmósfera, y el estudio de éstas queda reducido al de aquélla.

En la figura 18, y en la curva de presión, se ve que el piloto pasó por una altura máxima relativa, que una vez calculada resultó ser de 6.100 metros. Bajó luego hasta 4.630 metros, para subir, por último, hasta los 6.650 metros. Comoquiera que la zona de la inversión estaba entre estas alturas, el velero la atravesó cuatro veces (véase el diagrama del sondeo, fig. 19). Tenemos así cuatro puntos de la superficie superior de la inversión y otros tantos de la inferior.



Fig. 18.

Reproducción de la banda registrada en el vuelo de Sevillano. Los números corresponden a los puntos notables, coincidiendo con los indicados en la figura siguiente.

Claro está que este procedimiento nos da sólo información acerca de las ondas en una zona muy restringida de la atmósfera. Pero es posible emplear otro mucho más general, que exponemos elementalmente a continuación.

Como hemos dicho, el fenómeno de la ondulatoria consiste, en síntesis, en que todas y cada una de las partículas, en lugar de moverse horizontalmente (podríamos decir "sobre superficies horizontales idealmente trazadas en la atmósfera"), lo hacen siguiendo trayectorias onduladas (es decir, "se deslizan sobre superficies onduladas"), no consistiendo el problema de la determinación de las características de esta ascendencia en otra cosa que en el conocimiento de estas "superficies de deslizamiento". Ahora bien, por ser el movimiento de las partículas muy rápido, puede considerarse como adiabático (1), y en consecuencia la entropía o, lo que es lo mismo, la temperatura

(1) Véase la nota sobre transformaciones adiabáticas inserta al final de este artículo.

potencial no varía (puede considerarse así aun cuando el proceso dista de ser reversible).

Como por otra parte, cada partícula tiende a mantenerse en la superficie de temperatura potencial que le corresponde, dichas superficies no son otras que las de "deslizamiento" buscadas; es decir, nos reproducirán las ondula-

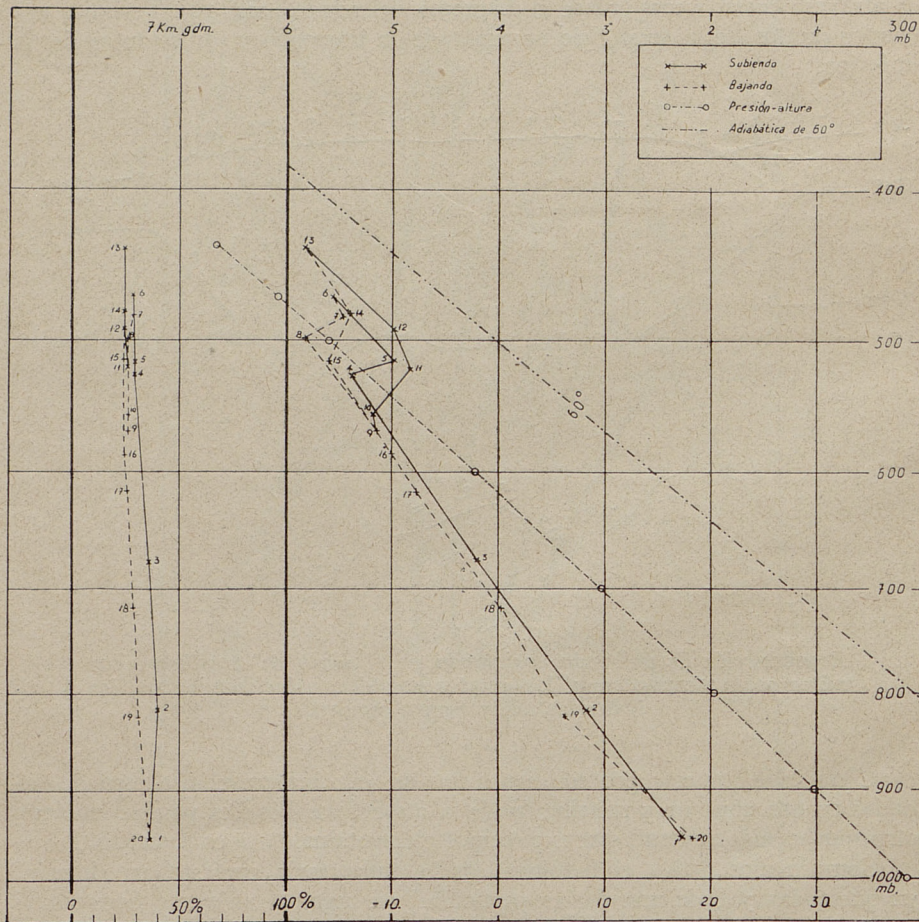


Fig. 19.

Diagrama del sondeo realizado en su vuelo por Sevillano.

ciones atmosféricas. Puesto que es fácil ver, mediante el sondeo, qué superficies atraviesa el velero, será posible dibujarlas. Esto es lo que se ha hecho en la figura 20, donde además hemos trazado la proyección sobre el plano del meridiano de la Escuela de Vuelos sin Motor, del vuelo de Sevillano. Como se ve, algunas de ellas han sido atravesadas por el piloto cuatro veces, mien-

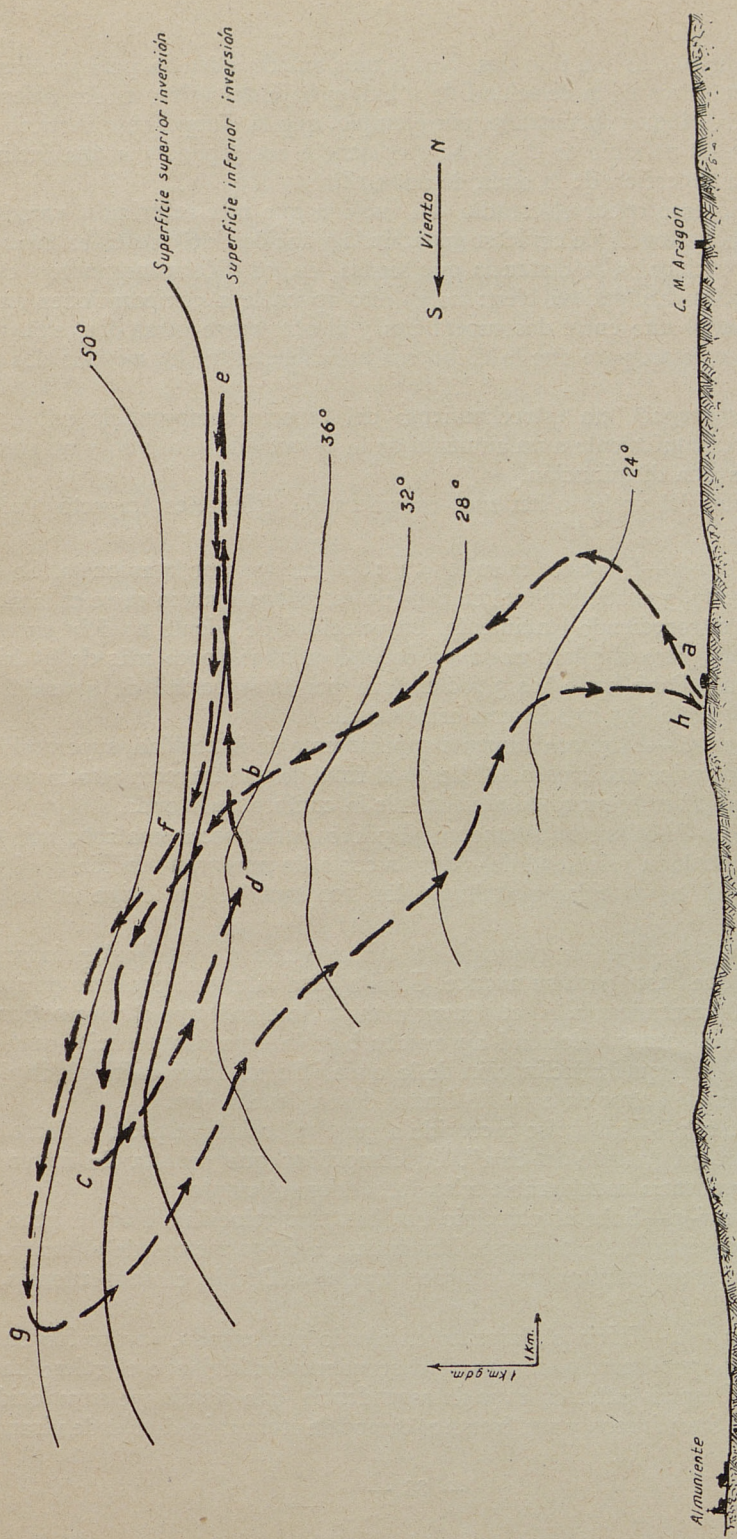


Fig. 20.

Proyección sobre el plano del meridiano de Huesca del vuelo de Julián Sevillano y de las ondulaciones atmosféricas.

tras que otras sólo lo han sido dos. Nos hemos guiado, además, para su dibujo, de los datos acerca de la velocidad de subida y baja del velero en los diferentes trayectos. Hemos encontrado, por ejemplo, que la componente vertical del viento tiene un máximo de 8,5 m/s., que viene a corresponder a una inclinación de la superficie de la onda de unos 18°.

Antes de emprender el estudio del vuelo a que nos referimos, vamos a hacer una advertencia de carácter general: la velocidad del viento es inversamente proporcional a la distancia que separa, en los diferentes puntos, cada dos superficies. Entiéndase bien: no es esto aplicable a comparaciones entre puntos situados uno entre dos superficies y el otro entre otras dos, sino que ambos deben estar, para que lo dicho sea aplicable, entre las mismas dos superficies.

En consecuencia, un estrechamiento del espacio comprendido entre dos superficies es equivalente a un aumento de la velocidad del viento y un ensanchamiento a una disminución.

El estudio del vuelo lo haremos considerando diferentes trayectos (véase la fig. 20).

Trayecto a-b.—El velero es soltado a 2.000 metros por la avioneta. Se enfrenta al viento, y encontrándose en zona de ascendencia, como se ve en la figura, se eleva retrocediendo lentamente. La velocidad del viento no debe exceder de 80 kms/h., pero el piloto vuela a velocidad mínima (poco más de 65 kilómetros/hora). Pasó hacia los 3.700 metros por la velocidad de ascendencia máxima del vuelo (8,5 m/s., como hemos dicho).

Trayecto b-c.—El viento aumenta rápidamente de intensidad, superando en algún momento los 110 kms/h. Al llegar al final de este trayecto cesa la ascendencia por estar muy próximo el velero de la cumbre de la onda.

Trayecto c-d.—Consecuentemente, el piloto, para buscar una zona más favorable, aumenta la velocidad del velero a costa de una gran pérdida de altura (puso el avión a velocidad próxima a los 120 kms/h., que exige un fuerte picado).

Trayecto d-e.—En su principio el piloto vuela a velocidad próxima a 80 kms/h., que basta para su avance. Gana alguna altura al penetrar en zona, ya volada, de ascendencia. Al continuar avanzando disminuye el viento, por lo que volando a menor velocidad aprovecha bien la leve ascendencia, que corresponde a la pequeña inclinación de la onda. En su final sufre algún descenso, y antes de entrar en zona de franca descendencia, vira.

Trayecto e-f.—Es el único recorrido a gran velocidad respecto a tierra, ya que el velero va "viento en cola". Al comprobar que penetra de nuevo en zona de ascendencia considerable, vira aproándose al viento.

Trayecto f-g.—Sube al principio con bastante velocidad. Poco a poco va disminuyendo ésta, hasta anularse. Hallándose a 6.650 metros de altura y sin oxígeno, no puede intentar, sin peligro, superarla. Decide, en consecuencia, la bajada.

Trayecto g-h.—Inicia el descenso en picado prolongado, favorecido en su primera parte por hacerlo en zona de descendencia, dirigiendo el velero hacia la Escuela. Después entra en zona de ascendencia, que disminuye su velocidad de descenso. Saca frenos, y ya, frente al campo de aterrizaje, desciende virando.

Consecuencias prácticas sacadas del estudio de la ascendencia ondulatoria en Huesca.

Son de dos clases: las que se refieren directamente al vuelo a vela, y las que tratan cuestiones meteorológicas. Las exponemos en este orden.

1. El procedimiento, sancionado por la práctica, para obtener altura, consistente en enfrenar el velero al viento y, volando a velocidad mínima, dejarse llevar por éste, es bueno. Una vez cese la ascendencia, parece lo más conveniente aumentar la velocidad del aparato aun a costa de perder altura, ya que de esta manera se puede penetrar en filetes de aire superiores.

2. La velocidad horizontal máxima del viento coincide, generalmente, con las máximas ascencias.

3. La existencia de componentes verticales desvirtúa el procedimiento, usado generalmente para el cálculo de la velocidad del viento a las diferentes alturas, mediante el sondeo con globo piloto, seguido por un solo teodolito, ya que la hipótesis de una velocidad ascensional constante no se cumple.

4. El sondeo, pues, ha de realizarse con dos teodolitos, cuyo mayor inconveniente es la dificultad de conseguir simultaneidad en las observaciones, o bien con un solo teodolito provisto de retículo, con hilo movido por tornillo micrométrico, con lo que tenemos un dato más (por ejemplo, diámetro aparente del globo), no siendo entonces precisa ninguna hipótesis auxiliar.

5. La velocidad horizontal del viento depende no sólo de la altura, sino también de cualquier pequeño desplazamiento horizontal. En otras palabras: es distinta para cada trayectoria del globo. Convendría, pues, ensayar el lanzamiento de globos con distintas fuerzas ascensionales.

6. Las variaciones de la velocidad horizontal del viento son muy grandes. Consecuentemente, las simplificaciones que Lyra introduce en sus fórmulas de partida no son admisibles. El estudio teórico de la ondulatoria a partir de la ecuación del mencionado autor, no permite, pues, una aproximación suficiente.

7. Los resultados obtenidos a partir del vuelo estudiado prueban que el procedimiento utilizado es muy prometedor, ya que por sí sólo nos ha permitido un avance en el conocimiento del fenómeno mucho mayor que el conseguido mediante los informes verbales de los pilotos, a pesar de haberse estudiado un buen número de éstos. Convendría, pues, aumentar el número de veleros provistos de meteorógrafo en los días de ascendencia ondulatoria.

Madrid-Monflorite, enero 1946.

Nota acerca de los procesos adiabáticos.

Creemos conveniente insertarla para dar una noción explicativa de la parte de este artículo á que se refiere, a los no iniciados en Termodinámica.

Se dice que una partícula evoluciona adiabáticamente si no intercambia calor con el ambiente. Por razones que no son de este lugar, la invariancia de la cantidad de calor conviene sea expresada por la de otra magnitud directamente relacionada con ella. Esta es la entropía definida para los procesos reversibles por $dS = \frac{dQ}{T}$, donde S es la entropía, Q la cantidad de calor y T la temperatura absoluta. Un significado más claro tiene lo que en Meteorología se llama temperatura potencial, que se designa por la letra θ , siendo la temperatura que adquiere la partícula considerada al ser llevada adiabática y reversiblemente a la presión de 1.000 mb., sin que en su seno se hayan verificado procesos de evaporación y condensación. Su expresión en función de S es $dS = C_p \frac{d\theta}{\theta}$, donde C_p es el calor específico a presión constante del aire.

En los procesos adiabáticos reversibles secos (sin condensación o evaporación de agua) no varía, pues, la temperatura potencial. El que consideramos en nuestro artículo se puede considerar como adiabático, y aun cuando dista de ser reversible, es admisible muy aproximadamente que la temperatura potencial de cada partícula que toma parte en la formación de la ondulatoria no varía.

RESEÑA BIBLIOGRAFICA

PAUL STEINIG.—*La ascendencia de ondulación*. (Manual del Vuelo a Vela, por Wolf Hirth. Editorial Labor, 1942.)

DR. HOEHNDORF.—*Movimiento ondulatorio a sotavento*. (Manual del Vuelo a Vela, por Wolf Hirth. Editorial Labor, 1942.)

JOAQUÍN KÜTTNER.—*Zur Entstehung der Föhnele. Untersuchung auf Grund von Wellensegelflügen und Beobachtungen an der Moazagotl-Wolke*. (Beitr. Phys. d. freien. Atmosph. 25-251-299, 1939, núm. 4.)

JOAQUÍN KÜTTNER.—*Moazagotl und Föhnele*. (Beitr. Phys. fr. Atmosph. 26-79-114, 1938. Núm. 2 (Hamburg).)

G. LEYRA.—*Über den Einfluss von Bodenerhebungen auf die Strömung einer Stabilgeschichteten Atmosphäre*. (Beitr. Phys. freien atmosphe. 26-197-206, 1940. Número 4.)

H. STÜNKE.—*Bemerkungen über die horizontalen Störungsgeschwindigkeiten der in vorstehenden Arbeit behandelten Strömung*. (Beitr. Phys. freien Atmosph. 26-207-210, 1940. Núm. 4.)

J. COULOMB y J. LOISEL.—*La physique des Nuages*. (Editions Albin Michel. París, 1939.)

TERENCE HORSLEY.—*Nueva luz sobre la "Onda estacionaria"*. (Aeronautics, enero de 1945.)

JOAQUÍN QUINTANILLA.—Artículos en la *Revista de Aeronáutica* en 1944 y 1945.

GRÁFICAS HUÉRFANOS
EJÉRCITO DEL AIRE.

M
B
A