

# Notas sobre la formación de movimientos ondulatorios en la atmósfera y su utilización para el vuelo a vela

Por el Teniente J. F. QUINTANILLA

Sucesivos artículos aparecidos en la REVISTA DE AERONAUTICA con motivo de los "records" nacionales de altura de vuelo sin motor, conseguidos apoyándose en un tipo especial de ascendencia que se forma al sur de la Sierra de Guara, cerca de la Escuela de Vuelo sin Motor de Huesca, han despertado la curiosidad de los lectores por los movimientos ondulatorios que se forman en la atmósfera y su utilización para el vuelo sin motor. Resumiendo algunos trabajos sobre el tema, vamos a definir en líneas generales los conocimientos que se tienen actualmente sobre el origen, un tanto confuso, de estos movimientos.

\* \* \*

Wolf Hirth fué el primero en comprobar que no sólo se producían ascendencias utilizables para el vuelo a vela a barlovento de las montañas, sino también a sotavento. En 1933, saliendo remolcado por avión de la Escuela Alemana de Grunau, próxima a los Montes Gigantes, consiguió casualmente elevarse a gran altura, volando debajo de una nube de extraño aspecto, que se formaba sistemáticamente siempre que soplaban viento S. a sotavento de dichos montes. Atribuyó el hecho a la formación de un oleaje aéreo, al que denominó "onda larga", originado probablemente por un fenómeno similar a las "ondas de gravedad" que definió Helmholtz en 1889. Por desgracia, no pudo continuar sus exploraciones, sustituyéndole en ellas Paul Steinig, quien apoyándose en la misma nube batió en 1937 el "record" mundial de altura, alcanzando los 5.760 metros. Pronto se hizo célebre esta nube —a la que se puso el nombre de Moazagotl—, pues su aparición suponía para los veleros que eran remolcados hasta su vertical, horas y horas de vuelo a gran altura. Ante las posibilidades de utilización que representaba esta nueva e insospechada fuente de energía, el D. F. S., Instituto Alemán de Experimentación del V. S. M., organizó en 1938, bajo la dirección de Exterbrink, una serie de vuelos de estudio a más de 5.000 metros de altura en Herzogstand, a espaldas de los Alpes. Los resultados obtenidos confirman la existencia de olas u ondulaciones del aire en estas regiones, habiéndose conseguido también volar sin motor a sotavento de los montes Eulen, Landshuter y Bobkatzbach.

Küttner, en un interesantísimo trabajo sobre la Moazagotl, nos explica la técnica del vuelo en estas ascendencias. Saliendo de un aerodromo situado a sotavento de dicha nube—para poder regresar en vuelo al campo en el caso de no alcanzar la ascendencia—se hacía remolcar por avión hasta su vertical. Una vez bajo la nube se soltaba del cable de remolque e iniciaba el vuelo libre, empleando, según el objeto del vuelo, una de las modalidades siguientes:

1.<sup>a</sup> Si se trataba de un vuelo de duración, una vez alcanzada la ascendencia se paseaba a su largo, transversalmente al viento, como en un vuelo de ladera.

2.<sup>a</sup> Si, por el contrario, se trataba de conseguir la mayor altura posible, volaba a proa al viento, dejándose unas veces subir por la ascendencia como por un ascensor, otras encaramándose por encima de las nubes volando en espiral.

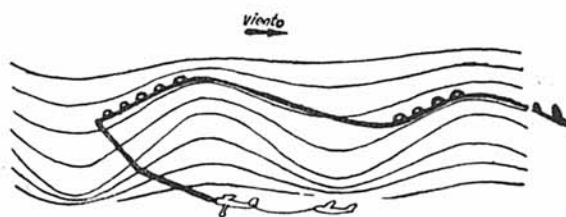


Fig. 1.—Técnica del vuelo en las ascendencias por ondulación.

3.<sup>a</sup> Por último, en los vuelos de distancia (fig. 1), una vez conseguida la mayor altura posible cara al viento en la primera onda, se lanzaba viento en popa a gran velocidad y perdiendo altura hacia la onda siguiente, a la que reconocía por empezar a subir el variómetro. Volvía de nuevo a ganar altura en esta onda, escalándola hasta su cresta, y se lanzaba sobre la siguiente, repitiendo así el ciclo mientras encontraba ascendencias en su camino.

La explicación de estos fenómenos es cada día más difícil, pues se ha comprobado intervienen en ellos múltiples factores, muchos de ellos originados en la alta atmósfera, poco conocidos aún.

Helmholtz veía en las ondulaciones atmosféricas un fenómeno análogo a la ola marina; es decir, un fenómeno de oscilaciones producido en el límite entre dos fluidos de diferente densidad. Si se hace caso omiso de los frotamientos, una vez puesto en marcha el movimiento, la acción de la gravedad es suficiente para entretenerle sin consumo de energía.

La comparación de la dirección de propagación de las ondulaciones y de la longitud de onda obtenidas teóricamente con las observadas en la atmósfera real, ha demostrado que esta teoría, emitida en 1889, no es suficiente para explicar el fenómeno (\*).

Las teorías emitidas actualmente tratando de explicarle operan sobre masas de aire ideales obligadas por alguna causa exterior a separarse de su altura o posición de equilibrio. Esta separación forzada da origen a un movimiento oscilatorio amortiguado, tratando de recobrar dicha posición, comparable al de un péndulo o una cuerda de violín a los que se saca de su estado de reposo. Cuando dicho movimiento oscilatorio va acompañado de otro de traslación horizontal—es decir, la masa de aire se mueve con el viento—, el movimiento resultante es un movimiento ondulatorio. Y en el caso particular de que la velocidad de propagación de la vibración sea igual a la del viento, la ondulación resulta estacionaria respecto al suelo, siendo susceptible la parte ascendente de la ola de ser utilizada para el vuelo a vela.

He aquí en breve extracto las diversas causas que pueden dar origen a movimientos ondulatorios en la atmósfera:

1.<sup>a</sup> (Höhndorf).—La masa de aire discurre a nivel del suelo por la llanura, recalentándose durante su viaje (fig. 2). Debido a este recalentamiento, su altura de equilibrio pasa de *a* a *b*. En estas condiciones de termolabilidad llega la masa a una montaña, viéndose forzada a elevarse para trasponerla. Esta elevación forzada actúa como causa resolutive de la termolabilidad; la masa sube con ánimo de alcanzar su altura de equilibrio, pero debido a la inercia del movimiento ascensional adquirido, al llegar a *b* continúa sobrepasando dicha altura y llegando hasta *c*. Con ello se ceba el movimiento oscilatorio amortiguado, que,

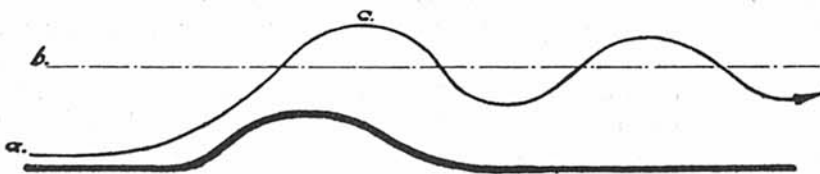


Fig. 2.—Formación de "ondas de obstáculos" en atmósfera termolábil.

combinado con el de traslación de que va animada la masa, origina las llamadas "ondas de obstáculos" u "on-

(\*) Véase "Torbellinos termo-convectivos", publicados en esta REVISTA. (N. de la R.)

dulaciones a sotavento", que se forman teóricamente en todas las montañas.

2.<sup>a</sup> (Höhndorf).—Sea el caso frecuente en invierno del enfriamiento intenso de las masas de aire en

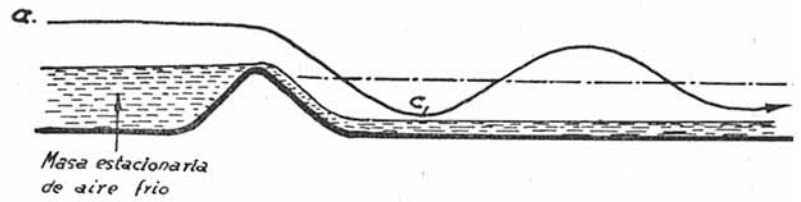


Fig. 3.—Formación de "ondas de obstáculos" en atmósfera termoestable.

contacto con el suelo por efecto de la irradiación nocturna de la Tierra. Se estacionará entonces a barlovento de la montaña una masa de aire frío muy estable (fig. 3). A sotavento, en cambio, no se estacionará esta masa, pues será absorbida por la depresión que origina el movimiento de traslación del conjunto (viento). En estas condiciones, el aire que fluya sobre la

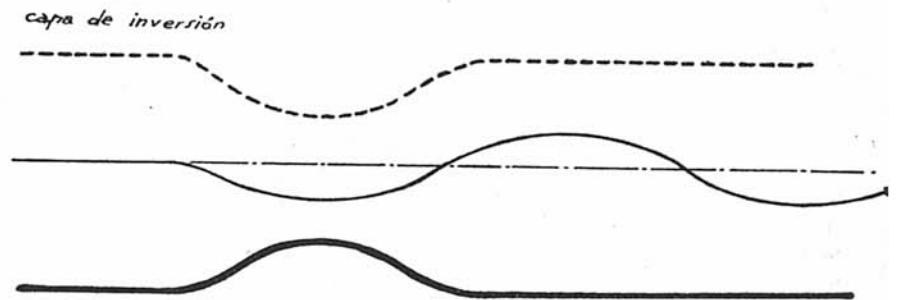


Fig. 4.—Formación de "ondas de obstáculos" bajo una inversión térmica.

cresta se precipitará en la llanura de sotavento, descendiendo su posición o altura de equilibrio de *a* a *b*.

Pero debido a la inercia del movimiento descendional, al llegar a dicha altura la sobrepasará, llegando hasta *c*, con lo que el movimiento oscilatorio queda así cebado, repitiéndose el ciclo anterior.

3.<sup>a</sup> (Exterbrink).—Supongamos ahora una capa de inversión sobre la montaña. La masa de aire encajonada entre la montaña y la capa de inversión se ve precisada, debido a la estrechez del paso, a aumentar su velocidad para trasponer la cima. El aumento de velocidad del viento en la cima produce, según la ley de Bernouilli, una depresión en la cresta (observad que se forma un tosco tubo de Venturi). La depresión solicita las masas de aire superiores, y la inversión, por tanto, se curva hacia abajo sobre la vertical de las cumbres (fig. 4). Resulta de aquí

que a gran altura el movimiento del aire presenta una componente descendente del lado de barlovento de la montaña. Las partículas desviadas hacia abajo tienden, una vez pasada la cumbre, a volver a su posición

de equilibrio. El movimiento oscilatorio queda así ce-  
bado, repitiéndose el ciclo general.

4.<sup>a</sup> (Exterbrink).—De las observaciones hechas en  
1938 en los Alpes, resulta que la altura a la cual se  
forman las ondas de obstáculos en una montaña es  
siempre la misma. Se deduce, por tanto, que la capa  
de inversión que posiblemente las origina está también  
siempre a la misma altura. El hecho de que esta altu-  
ra sea, por lo menos, tres veces superior a la de las  
inversiones normalmente provocadas por el relieve ter-  
restre, lleva a pensar que esta capa de inversión no  
es otra que la que separa la capa inferior de la atmós-  
fera, llamada por los meteorólogos "capa turbulenta",  
de la "atmósfera libre". En la "atmósfera libre", el  
viento obedece en fuerza y dirección a la ley del gra-  
diente—es decir, el viento es tangente a las isóbaras, y  
su fuerza es proporcional al gradiente de la presión—,  
mientras que en la "capa turbulenta", donde por efec-  
to de la vecindad del suelo el frotamiento es fuerte,  
el viento no sigue la ley del gradiente. A la altura  
donde comienza a reinar el viento del gradiente exis-  
te, por tanto, una superficie de discontinuidad de la  
fuerza y dirección del viento, que muy bien pudiera  
ser la que en la interpretación 3.<sup>a</sup> hemos considerado  
como capa de inversión.

Esta superficie de discontinuidad originaría las on-  
dulaciones por el siguiente proceso, que desglosamos  
de este capítulo por originarse también sin la presen-  
cia de núcleos montañosos.

5.<sup>a</sup> (Höhndorf).—Hasta aquí hemos visto como  
causa resolutoria del fenómeno la presencia de una mon-  
taña. No obstante, hay casos en los cuales se produce  
el oleaje en la atmósfera libre sin la presencia de nú-  
cleos montañosos. Cuando una masa de aire discurre  
sobre otra inferior más fría y que marcha a diferente  
velocidad—es decir, cuando dos masas están separadas  
por una inversión acompañada de un salto en la velo-  
cidad del viento—, se produce entre ambas un oleaje  
análogo al que se produce en la superficie del mar (figu-  
ra 5). La dirección de propagación de la ola es la del  
"viento relativo"—resultante de los vientos de cada

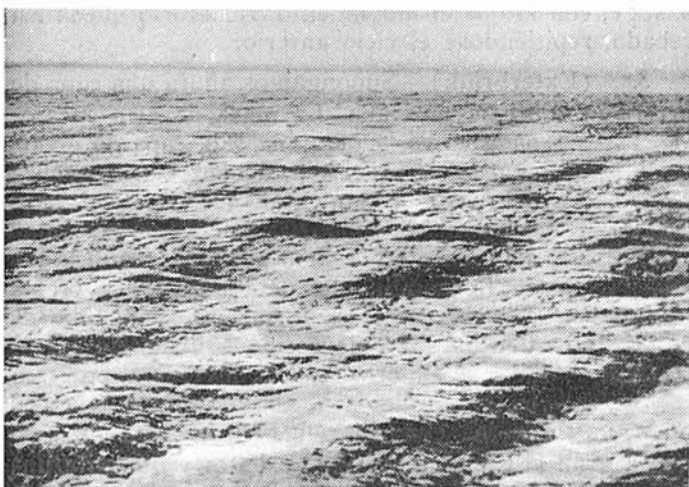


Fig. 5.—Formación de oleaje entre dos masas de aire de dis-  
tinta densidad, materializada por un mar de nubes.

masa—, y su velocidad, aproximadamente la mitad de  
la de este viento relativo. Quiere esto decir que nunca  
podrán coincidir la velocidad del viento y la de pro-  
pagación del movimiento ondulatorio, premisa para la  
formación de ondas estacionarias respecto al suelo, por  
lo que este oleaje será de difícilísima utilización para  
el vuelo a vela.

6.<sup>a</sup> (Dreisbach).—Además de las "ondas de obs-  
táculos" y del "oleaje" descritos existen, por último, las  
llamadas "ondas de presión" que se originan en la tro-  
popausa—separación entre la troposfera y la estratos-  
fera—, provocadas al parecer por variaciones bruscas  
de presión en su nivel. Su utilización para el vuelo sin  
motor sería análoga a la de las ondas de obstáculos, si  
bien éstas serían mucho más difíciles de alcanzar en  
vuelo, pues el nivel medio de la tropopausa en nuestra  
latitud es de 11.000 metros.

\* \* \*

Hemos despojado deliberadamente estas seis posi-  
bles causas de formación de movimientos ondulatorios  
de toda hojarasca que pudiera hacer dificultosa su com-  
prensión, a fin de que el lector se haga rápidamente con  
una visión clara del problema. Sin embargo, el hecho  
de que ninguna de las seis causas expuestas sea sufi-  
ciente de por sí para producir las ascensiones de más  
de cinco metros por segundo observadas en vuelo, in-  
dica que en la atmósfera estas causas se entremezcla-  
rían reforzándose, uniéndose a ellas otras aún descono-  
cidas, por lo que no podemos aplicar por el momento,  
para explicar dichas ascensiones, ni las matemáticas, ni  
la mecánica, ni las experiencias que se tienen en hidro-  
dinámica sobre otros fenómenos parecidos (es de notar  
que el flujo del aire sobre la montaña es análogo, a pri-  
mera vista, al de la corriente de un río sobre una pre-  
sa). De entre las variables que alteran más profunda-  
mente los hechos expuestos, entresacamos por su im-  
portancia las siguientes:

#### A) El gradiente térmico:

1. El gradiente térmico tiene una importancia de-  
cisiva en la formación de estos movimientos, pues de él  
dependen la amplitud de onda, la frecuencia de la vi-  
bración y la diferencia entre la altura de equilibrio de  
la masa de aire antes y después del fenómeno. Datos  
éstos quizá los más importantes para el vuelo sin mo-  
tor, pues determinan la intensidad de la ascendencia y  
la altura sobre el terreno de la misma.

2. Tiene además el gradiente térmico especial in-  
tervención en el tipo de nubosidad que se forme, otro  
dato de gran importancia para el vuelo sin motor, ya  
que las nubes son las que materializando el fenómeno  
sirven de guía al piloto para volar sin salirse de la as-  
cendencia.

Las nubes en bandas transversales al viento obser-  
vadas en las ondas de obstáculos pertenecen a dos tipos  
fundamentales: cumuliformes y lenticulares.

El que se produzcan unas y otras depende a su vez  
de que el tipo de oscilación originado sea estable o in-  
estable. Son estables aquellas oscilaciones cuya am-  
plitud permanece sensiblemente constante a lo largo de

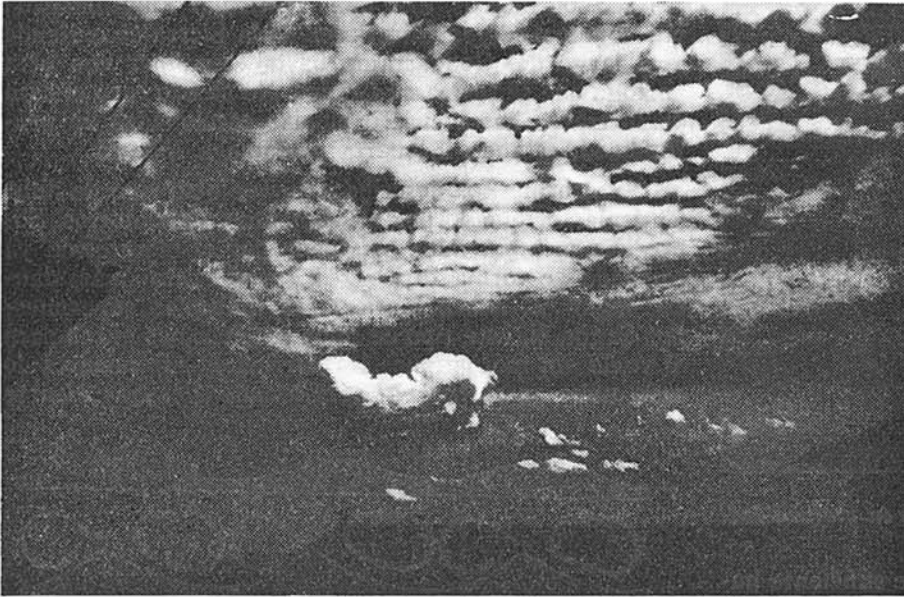


Fig. 6.—Nubes de origen ondulatorio inestable. *Altocumulus*.

su propagación, e inestables, aquellas otras cuya amplitud aumenta a medida que se propaga la onda. Se demuestra matemáticamente que una oscilación es tanto más inestable cuanto más pequeña es su longitud de onda. En la atmósfera, las oscilaciones de longitud de onda superior a dos kilómetros son estables; las de longitud de onda inferior a este límite son inestables. Las ondas estables dan origen a nubes del tipo lenticular; las ondas inestables, a nubes del tipo cumuliforme.

Estas últimas (fig. 6) de desarrollo vertical, suelen tener suficiente importancia para dar lugar



Fig. 7.—Nubes de origen ondulatorio estable. *Altocumulus lenticularis*.

a precipitaciones y se encuentran casi cotidianamente en las montañas. Empiezan por una ondulación de débil amplitud que va creciendo paulatinamente y termina rompiendo las olas, originando torbellinos y deshaciéndose con ello el primitivo movimiento de ondulación. A causa de su brevedad suelen pasar inadvertidas.

Las nubes del tipo lenticular son las características de las ondulaciones susceptibles de ser utilizadas para el vuelo a vela, por lo que vamos a tratarlas con más detalle.

El aspecto de estas nubes (figura 7), llamadas también "Margarodes", es decir, nacaradas, es en bancos extendidos de textura homogénea, densos en su centro, difusos y casi transparentes en los bordes,

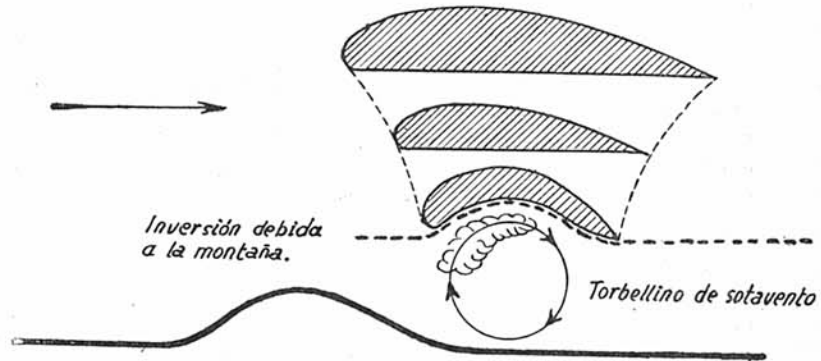


Fig. 8.—Formación de lenticulares escalonadas en altura, según Eexterbrink.

presentando frecuentemente ondulaciones, y a veces irisaciones verdes o púrpuras (Loisel). Este aspecto característico se explica suponiendo que la masa de aire que se pone en ondulación está formada por capas estratificadas con una elevada humedad relativa. Estas capas son deformadas hacia lo alto por la ondulación, y estando limitada esta deformación por una capa de inversión o de discontinuidad de vientos (causas 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup>), los estratos se comprimen, produciéndose una acumulación de humedad en las crestas de la ondulación, que da lugar a la condensación. Las bandas de nubes formadas se originan constantemente en el borde de barlovento y se destruyen en el de sotavento. Son, pues, las nubes lenticulares esencialmente dinámicas.

Küttner ha descrito el mecanismo de formación de la Moazagotl (figura 8). De un lado, el aire ca-



Fig. 9.—Formación de lenticulares escalonadas en profundidad.

liente que corre en la altura, cuando tiene suficiente humedad, da lugar a la formación de nubes lenticulares en bandas paralelas transversales al viento de tipo y origen ya conocidos. Por otro lado, cerca del suelo, en la "capa turbulenta" de sotavento de la montaña, se forman en la vertical de las lenticulares pequeñas nubes producidas por torbellinos de eje horizontal, llamadas "torniquetes". Dice Kuttner que en el interior de estas nubes bajas suele reinar una agitación y turbulencia tal que parece que se ha entrado en una mansión mortuoria.

He aquí algunos datos sobre la Moazagotl: Altura de los Montes Gigantes, 1.500 metros; de la Silesia, 500 metros; de la base de la Moazagotl, 3.000 a 5.000 metros; del vértice, 7.000 metros. Viento, 15 a 20 m/s. Longitud de onda, de 4 a 10 kilómetros. Amplitud de onda, de 2 a 500 metros.

Nubes de este tipo se han observado con frecuencia a sotavento del sistema Carpetano, con vientos N., pudiendo apreciarse a veces a alturas superior-

res a 5.000 metros, una nube lenticular muy alargada que comenzando en Miraflores de la Sierra se extiende a lo largo del Guadarrama hasta empalmar con otra análoga que se forma en Gredos. No siendo raro el caso de formarse hasta cuatro bandas escalonadas en profundidad, estando la cuarta próxima a Madrid.

Exterbrink nos describe a su vez otro tipo de nube lenticular originado por movimientos ondulatorios. Sobre una primera nube originada por el mecanismo ya conocido se forma otra, y a veces otra más, dando lugar a nubes lenticulares múltiples superpuestas. Según él, este tipo de nube sería el más eficaz para el vuelo sin motor, pues las corrientes ascendentes de cada nube se refuerzan, permitiendo alcanzar alturas

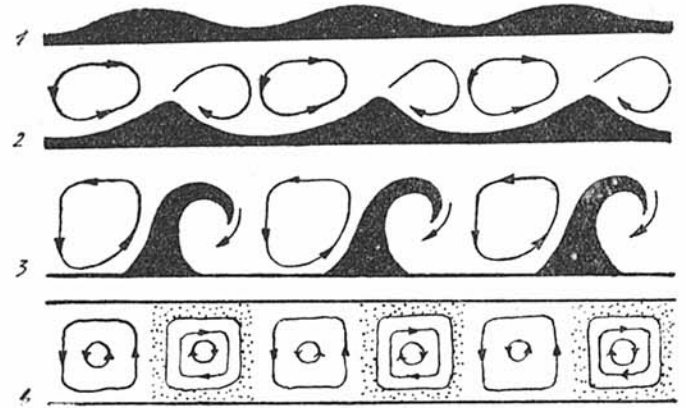


Fig. 11.—Formación de torbellinos transversales inestables en el laboratorio, según Avsec.

elevadas. De este tipo es la "Contessa del viento" del Etna, y posiblemente pudiera ser una nube típica observada a sotavento de la Sierra de Guara—cerca de la Escuela de Vuelo sin Motor de Huesca—llamada Monflorite. En dicha nube Monflorite (fig. 10) aparecen bien distintas varias lenticulares escalonadas en altura, que por estar demasiado próximas unas a otras son difíciles de utilizar para el vuelo a véla.

Este escalonamiento de lenticulares en altura se ha observado también a sotavento del Guadarrama, apreciándose cuatro lenticulares netamente delimitadas, que en el transcurso del día se unieron, fundiéndose en una sola de aspecto parecido a la Monflorite.

3. Por último, el gradiente térmico, cuya intervención en los movimientos ondulatorios estudiamos, intervendría en la formación del oleaje descrito en la causa 5.<sup>a</sup> Este oleaje, que según Helmholtz es de origen exclusivamente dinámico, tendría también una segunda parte termodinámica. A la formación de las olas en la superficie de separación de dos masas de aire de distinta densidad seguiría el desarrollo de corrientes termoconvectivas, que se adaptarían a las olas reforzándolas.

Avsec ha reproducido el fenómeno en la cámara de humos (fig. 11), deduciendo de sus



Fig. 10.—Alto-cumulus lenticularis sobre la Escuela de Vuelo sin Motor de Monflorite (Huesca).

experiencias que estas corrientes termodinámicas terminarían por producir la inestabilidad de la ondulación, rompiendo las olas y originándose una serie de torbellinos paralelos de eje horizontal, que giran alternativamente en direcciones contrarias.

B) Los saltos del viento.

Hemos visto en la causa 4.<sup>a</sup> cómo una superficie de discontinuidad en la velocidad y dirección del viento puede dar lugar a movimientos ondulatorios. Lo variable de esta capa de discontinuidad por efecto de las turbulencias y de los roces con la montaña permitiría explicar las deformaciones, la desaparición y la reaparición de las ondas de obstáculos, así como el aspecto cambiante de las nubes observadas.

C) Movimientos ondulatorios reflejos.

Cada masa de aire tiene una frecuencia de vibración determinada que depende de múltiples factores. Al producirse los movimientos ondulatorios que hemos descrito, su propagación vertical induce en las masas vecinas otros movimientos ondulatorios reflejos, que actúan a su vez sobre el primitivo que les dió origen, produciéndose, según las frecuencias respectivas, fenómenos de reforzamiento, debilitación, anulamiento, pulsaciones, etc., siguiendo las leyes generales de los movimientos armónicos. Quizá sea debido a un efecto de resonancia el reforzamiento de las ondas de obstáculos hasta hacerlas utilizables para el vuelo a vela, pues, como ya sabemos, ninguna de las seis causas estudiadas es suficiente de por sí para producir las ascensiones observadas en vuelo.

