



EL PROBLEMA DE LA VISIBILIDAD

Por JOSE MARIA JANSA GUARDIOLA, Meteorólogo.

Una de las cuestiones más interesantes que se plantean en Meteorología aeronáutica y que dista mucho todavía de haber encontrado solución completa, es la que se refiere a la visibilidad. Es bien sabido que la visibilidad deficiente es uno de los mayores enemigos del aviador y que la falta completa de visibilidad ha exigido la organización de toda una técnica complicada, que constituye el vuelo a ciegas. El Arma aérea está supeditada todavía más completamente a las condiciones de la visibilidad; tanto es así que el éxito de una operación militar—bombardeo o reconocimiento—puede depender en alto grado de las citadas condiciones. Recíprocamente, la defensa antiaérea encuentra una poderosa ayuda en los medios artificiales de empeorar la visibilidad: el enmascaramiento, siempre practicado en la guerra, se ha hecho indispensable y ha adquirido modalidades especiales en Antiaeronáutica; las cortinas de humo, también utilizadas de antiguo, obedecen a las mismas necesidades.

Interesa, pues, cada día más reunir el mayor número posible de elementos relativos a tan intrincado problema para poder llegar a constituir un cuerpo de doctrina bastante completo. Tendremos que referirnos a las más variadas materias, poniendo a contribución todos los capítulos de la Meteorología. En primer lugar es preciso puntualizar ideas y precisar conceptos, que, a decir verdad, existen todavía demasiadas vaguedades y confusiones. Introduciendo magnitudes apropiadas que permitan una interpretación matemática de los fenómenos se debe tratar luego de formular leyes y de establecer relaciones. Una vez hecho esto, se debe buscar una explicación de los hechos, lo cual obliga a considerar la propagación de la luz a través de un medio turbio cual es la atmósfera; la naturaleza, número y origen

de las partículas difusoras en suspensión coloidal; el proceso de la condensación del vapor acuoso sobre núcleos higroscópicos y la consiguiente generación y crecimiento de gotitas microscópicas características del aire nebuloso y del aire nuboso; la conexión de todos estos fenómenos con el juego de las masas de aire y de los frentes, y por último, las posibles aplicaciones de la teoría, tanto al mejoramiento como a la perturbación artificial de la visibilidad.

LA DEFINICION DE LA VISIBILIDAD

Se entiende por *visibilidad* en Meteorología, o más correctamente, por *distancia de visibilidad* de un objeto, la menor distancia a la cual el objeto en el seno de la atmósfera, en las condiciones naturales del día y en una dirección determinada, deja de ser visible a simple vista. Esta definición adolece de imprecisiones, científicamente inadmisibles, tanto por lo que se refiere a la naturaleza del objeto como a las condiciones del observador, y sin embargo, sobre ella se basa la Clave internacional del Código de Copenhague, que, como se sabe, establece diez grados de visibilidad creciente, que se cifran de 0 a 9, según la distancia a partir de la cual *dejan de ser visibles los objetos*. Se prescinde de la perspectiva geométrica en virtud de la cual la visibilidad de los objetos lejanos resulta perjudicada; de la forma, color y estructura de la superficie visible; de sus condiciones de iluminación, etc., que influyen grandemente sobre el resultado; por otro lado, se prescinde también de la agudeza visual del observador, que es, por cierto, muy variable de unos individuos a otros.

Hoy se ha hecho clásica la teoría de Koschmieder, que

se apoya en una base racional y permite suficiente claridad de concepto. Fundándonos en ella vamos a establecer las definiciones fundamentales que luego habrán de servir de base a nuestro ensayo de explicación. La visibilidad de un objeto depende de tres clases de factores, a saber: factores que afectan al objeto mismo, factores dependientes del estado de la atmósfera y factores que afectan al receptor, que en teoría tanto puede ser un ojo humano como una placa fotográfica o una célula fotoeléctrica. El interés del meteorólogo se dirige particularmente a los factores atmosféricos, por cuyo motivo habrá que eliminar de momento los demás elementos. Esto se consigue tomando como objeto un disco negro que se destaca sobre el fondo luminoso de la atmósfera en el horizonte, y como receptor el ojo normal capaz de apreciar una diferencia de iluminación de un 2 por 100. A medida que el disco se aleja va aumentando la masa de aire luminoso interpuesta y el disco se va destacando menos, hasta que al llegar a cierta distancia el contraste se hace inferior al 2 por 100, y por consiguiente, el observador deja de percibir el disco: esta distancia es la distancia de visibilidad horizontal. Esto mismo puede expresarse de otra manera: la atmósfera, como todo medio turbio, actúa como un medio luminoso *por dentro*; es decir, la luz difusa del cielo (procedente, en último término, del sol) nace por difracción en las numerosas partículas dispersas en el aire (incluyendo las mismas moléculas gaseosas), y es, por consiguiente, tanto más intensa cuanto más numerosas son dichas partículas, o sea cuanto más profunda es la columna de gas que contribuye al efecto; por consiguiente, la luminosidad máxima *del aire* se encuentra en dirección del horizonte donde la longitud de la columna luminosa es máxima. Si el horizonte está libre de obstáculos, nuestra mirada puede atravesar la columna completa, que no se extiende hasta el infinito, sino solamente hasta el límite de la atmósfera, y que está *cerrada* en el fondo por la *superficie del espacio cósmico*, absolutamente negra; en cambio, si la columna queda interceptada por el disco negro, que hemos supuesto colocado a cierta distancia, el efecto es sencillamente como si la columna atmosférica se hubiese acortado, quedando suprimida toda la parte que queda detrás del disco: la luminosidad *delante* del disco será, pues, menor. Como a medida que la longitud de la columna luminosa crece, es decir, que el disco se aleja, su luminosidad crece siguiendo una ley exponencial podremos escribir:

$$B_x = B_h \cdot (1 - e^{-\alpha x}), \tag{1}$$

donde B_x es el brillo de una columna de aire de espesor x , B_h el brillo de una columna de espesor infinito, es decir, el límite de B_x para $x \rightarrow \infty$, igual al brillo del horizonte; e es la base de los logaritmos neperianos y α una constante característica del estado de la atmósfera. La condición de invisibilidad del disco se expresará así:

$$\frac{B_h - B_x}{B_h} = 0,02, \tag{2}$$

llamando s al valor de x que cumple esta condición, o sea:

$$1 - \frac{B_x}{B_h} = 0,02;$$

o bien:

$$\frac{B_x}{B_h} = 0,98,$$

que introducida en la ecuación [1], nos da:

$$e^{-\alpha s} = 0,02,$$

y tomando logaritmos decimales,

$$\alpha \cdot s = \frac{-\log 0,02}{\log e} = 3,91;$$

de donde

$$s = 3,91 \cdot \frac{1}{\alpha}. \tag{3}$$

Esta relación fundamental establece la proporcionalidad inversa entre la visibilidad horizontal s y el coeficiente α , característico del estado de la atmósfera. La distancia s se llama con propiedad visibilidad del horizonte, pues significa aquella distancia a partir de la cual no se ve ya el aire atmosférico, es decir, que representa una reducción del horizonte astronómico por efecto de la turbulencia óptica de la atmósfera; si se desvaneciese todo el aire que se encuentra más allá de esta distancia, el brillo aparente del horizonte no sería afectado en absoluto; además, todo objeto negro colocado a distancia inferior a s es visible, y colocado a distancia superior es invisible. El coeficiente α tiene las dimensiones del inverso de una longitud; se llama coeficiente de amortiguamiento óptico, y significa el amortiguamiento que sufre el brillo del horizonte por la interposición de una capa de aire que tenga un espesor de la unidad de longitud. Esta interpretación exige algunas explicaciones. Efectivamente, antes se ha dicho que el brillo del horizonte resulta de la contribución de todas las partículas difusoras del aire hasta su límite; al interponer a cierta distancia el disco negro, queda suprimida la contribución de todas las partículas posteriores; esta contribución vale, pues, la diferencia entre el brillo total y el debido a las partículas anteriores, como resulta inmediatamente de la ecuación [1] escrita así:

$$B_h - B_x = B_h \cdot e^{-\alpha x}.$$

El segundo miembro representa una pérdida de brillo del horizonte, y puede interpretarse suponiendo que dicho horizonte es un objeto brillante colocado en el infinito y cuya luz nos llega a través de toda la atmósfera, debilitándose más o menos según su grado de turbulencia. Este grado de turbulencia viene caracterizado precisamente por el coeficiente α .

Para $x < 3,91 \cdot \frac{1}{\alpha}$, el término sustractivo $B_h \cdot e^{-\alpha x}$ resulta $< 0,02 \cdot B_h$, que, según lo dicho para la sensibilidad normal del ojo, equivale prácticamente a cero; es decir, que una capa de aire de espesor inferior a la distancia de visi-

bilidad del horizonte resulta transparente, de tal manera que si el horizonte fuese un objeto luminoso puesto efectivamente detrás de ella, sería todavía perfectamente visible; en cambio, cuando $x > 3,91 \cdot \frac{1}{\alpha}$, resulta $B_x \cdot e^{-\alpha x} > 0,02 \cdot B_h$; es decir, que la cantidad de luz que la capa de aire es capaz de absorber va creciendo exponencialmente con el espesor de la misma; para $x \rightarrow \infty$ es $\lim. B_h \cdot e^{-\alpha x}$ igual cero; es decir, una capa de aire de espesor infinito resulta completamente opaca, como es natural. Esta interpretación del coeficiente α no es tan arbitraria como a primera vista pudiera parecer, pues si el brillo del horizonte, en vez de ser producido, como lo es, por la luminosidad interior de la atmósfera, lo fuese realmente por un objeto brillante exterior equivalente, y en cambio toda la atmósfera pudiese mantenerse en la sombra, la disminución del brillo se produciría exactamente en la forma expuesta y el coeficiente de debilitación del brillo aparente valdría precisamente α . Para dar idea del orden de magnitud de α , diremos que con visibilidad de 50 kilómetros resulta un valor α de 0,08, y por consiguiente, un amortiguamiento o debilitación de la luz transmitida a través de la atmósfera, expresada por el factor $e^{-0,08} = 0,92$ por kilómetro, o sea, aproximadamente, una pérdida de brillo de un 8 por 100 por kilómetro; es decir, que si la intensidad inicial (brillo del horizonte) vale 100, después de atravesar un kilómetro de atmósfera valdrá 92; después de dos kilómetros, 85..., y después de 50 kilómetros quedará reducido a 2, límite de sensibilidad del ojo normal. En vez de esto puede decirse también (y nos ajustaremos mejor a la realidad): el primer kilómetro de atmósfera contribuye al brillo percibido con 8 unidades; los dos primeros, con 15..., y los 50 primeros, con 98, que, dado el límite supuesto de sensibilidad del ojo, se confunde con 100. Con visibilidad de 10 kilómetros, el coeficiente de amortiguamiento α vale 0,39, y el factor correspondiente, $e^{-0,39} = 0,68$, o sea una pérdida de brillo del 32 por 100 por kilómetro, y con visibilidad de un kilómetro, α vale 3,9, y el factor de reducción, 98 por 100 por kilómetro, como era de esperar.

La teoría precedente supone, como hemos dicho, que la sensibilidad de la vista humana al contraste de brillo es de un 2 por 100. Puede evitarse fácilmente esta restricción sustituyendo en las ecuaciones el valor numérico 0,02 por la letra ϵ , que representará el contraste mínimo perceptible. Si además escribimos $0,43 \alpha = \alpha'$, la ecuación [1] tomará la forma

$$B_x = B_h \cdot (1 - 10^{-\alpha' x}) \quad [1']$$

y la [3] la forma, más general,

$$s = -\log \epsilon \cdot \frac{1}{\alpha'} \quad [3']$$

Si además se supone $\epsilon = 0,1$ (caso que corresponde, aproximadamente, a una placa fotográfica corriente, cuya sensibilidad para el contraste, como se sabe, es cinco veces menor que la de la vista humana) y llamamos S_n el valor que toma entonces s resulta, sencillamente:

$$s_n = \frac{1}{\alpha'} \quad [3'']$$

es decir, que el coeficiente de amortiguamiento no es más que el recíproco de la distancia de visibilidad del horizonte con un receptor cuya sensibilidad para el contraste sea de un 10 por 100. La distancia de visibilidad en estas condiciones se llama *distancia normal*. Puede decirse, pues: distancia normal de visibilidad es aquella a la cual tiene que alejarse un disco negro dentro de la atmósfera para que el contraste de su brillo aparente, con relación al brillo del horizonte, quede reducido a su décima parte. Se comprende inmediatamente que esta definición condiciona la visibilidad exclusivamente al estado de enturbiamiento atmosférico, que era cabalmente nuestro propósito.

La definición anterior, que tiene una gran importancia teórica, no tiene realmente interés en la práctica, pero es preciso conocerla, porque servirá de base al problema práctico. En la práctica, lo que interesa es, naturalmente, la visibilidad de los objetos reales que forman parte efectiva del paisaje, tales como casas, árboles, etc. Para llegar a precisar el problema por completo lo haremos en dos etapas, tratando de definir primero la visibilidad de un objeto homogéneo, pero no negro, y a continuación la de un objeto complejo, es decir, cuya superficie visible esté compuesta de partes con distinto brillo. En el caso del objeto homogéneo hay que distinguir, según que su brillo efectivo sea superior o inferior al brillo del horizonte. Si es superior, su distancia de visibilidad será mayor que la normal del horizonte, mientras que si es inferior, será menor. Es fácil generalizar la teoría antes expuesta para el disco negro al caso actual, sin más que sustituir en lugar del brillo absoluto del horizonte B_h el contraste relativo entre dicho brillo y el del objeto, contraste que se expresará mediante la fórmula:

$$C_x = \frac{B_x - B_h}{B_h},$$

donde B_x representa ahora el brillo aparente del objeto (debilitado por la interposición de la atmósfera) a la distancia x . El contraste efectivo corresponde a $x = 0$, es decir:

$$C_0 = \frac{B_o - B_h}{B_h};$$

B_o es el brillo del objeto iluminado por la luz atmosférica (eventualmente por la luz del Sol) supuesto fuera del aire, o sea en contacto inmediato con el observador. En el caso del disco negro será $B_o = 0$, y el contraste con relación al brillo del horizonte valdrá -1 . Si introducimos en la ecuación [1] los contrastes en lugar de los brillos, tomará la forma

$$\frac{B_x - B_h}{B_h} = \frac{0 - B_h}{B_h} \cdot e^{-\alpha x};$$

y sustituyendo 0 por B_o ,

$$\frac{B_x - B_h}{B_h} = \frac{B_o - B_h}{B_h} \cdot e^{-\alpha x},$$

o sea:

$$C_x = C_o \cdot e^{-\alpha x} = C_o \cdot 10^{-\alpha' x} \quad [4]$$



La visibilidad influye decisivamente en el resultado de las operaciones.

La ecuación [2] se sustituirá por ésta:

$$Cs = \varepsilon; \tag{5}$$

y teniendo en cuenta [3'] y [3''], resultará como distancia de visibilidad del objeto:

$$s_o = \frac{1}{\alpha'} \cdot (1 + \log \cdot C_o) = s_n \cdot (1 + \log \cdot C_o). \tag{6}$$

La distancia horizontal de visibilidad de un objeto será, pues, sencillamente proporcional a la distancia normal de visibilidad del horizonte. Si el objeto es más brillante que el horizonte,

$$B_o > B_h,$$

y por consiguiente,

$$C_o > 1$$

$$\log C_o > 1;$$

de donde

$$s_o > s_n;$$

es decir, la distancia de visibilidad del objeto es mayor que la distancia normal de visibilidad del horizonte, o sea que el objeto situado más allá del horizonte atmosférico es aún visible, lo cual se comprende intuitivamente. Si por el contrario,

$$B_o < B_h,$$

será:

$$s_o < s_n$$

y el objeto dejará de ser visible antes de haber alcanzado el horizonte atmosférico.

Ahora estamos en condiciones de abordar el problema de la visibilidad de los objetos reales. Interesa no solamente descubrir la presencia de determinados objetos, sino además reconocerlos, que son dos problemas distintos. Para descubrir la presencia de un objeto basta que sea visible su parte más brillante (o más oscura, según los casos); para reconocerlo es preciso poder distinguir bien sus detalles, o lo que viene a ser lo mismo, debe ser perceptible el contraste de brillo entre sus partes. Se comprende que la visibilidad del detalle sea más difícil que la visibilidad simple. Todavía es otra cosa la visibilidad del color, de la cual prescindiremos por ahora. El cálculo de la distancia de visibilidad del detalle se puede obtener partiendo de la misma ecuación [4], en la cual se sustituyen el contraste C_o , con relación al horizonte, por la diferencia de contraste entre sus partes. Si llamamos C_o'' el contraste correspondiente a la parte más brillante, y C_o''' el correspondiente a la más oscura, la diferencia de contraste C_o' será:

$$C_o' = C_o'' - C_o''' = \frac{B_o - B_h}{B_h} - \frac{B_o - B_h}{B_h} = \frac{B_o - B_o'}{B_h}.$$

Hay que seguir tomando como brillo de referencia el del horizonte, porque no debe olvidarse que todo el objeto habrá de destacarse sobre él para que sea visible. Es fácil introducir el contraste intrínseco, o sea la diferencia relativa de brillo entre sus propias partes, que llamaremos C_i , multiplicando y dividiendo por B_o , así:

$$C_o' = \frac{B_o - B_o'}{B_o} \cdot \frac{B_o}{B_h} = C_i \cdot \frac{B_o}{B_h},$$

o sea:

$$C_o' = C_i \cdot (1 + C_o'').$$

La ecuación [4] se transformará entonces en la siguiente:

$$C_x' = C_i \cdot (1 + C_o'') \cdot 10^{-\alpha' x};$$

de donde llamando S_d la distancia de visibilidad del detalle, en analogía con la ecuación [6],

$$s_d = s_n \cdot [1 + \log \cdot C_i + \log \cdot (1 + C_o'')]. \tag{7}$$

Un caso particular interesante es el de un objeto homogéneo de mucho relieve, y por consiguiente con sombras pro-

pías, sobre todo cuando se halla iluminado por el Sol. La visibilidad de las sombras obedecerá a la teoría expuesta, y vendrá dada por la misma fórmula [7], en la cual C_i representa el contraste entre la parte iluminada y la sombra a distancia cero, y C_o'' el contraste de la parte iluminada con relación al horizonte.

Hasta aquí hemos considerado que la sensibilidad del receptor era la normal, $\epsilon = 0,1$, pero sabemos que la de la vista humana es muy variable de unos individuos a otros, y en todo caso superior a ésta, y que la de las placas fotográficas varía entre amplios límites. Rehaciendo la teoría se ve en seguida que se pueden obtener los resultados generales sin más que sustituir en las fórmulas [3], [6] y [7] la unidad por $-\log \cdot \epsilon$. Resultan así las fórmulas más generales:

$$s = s_n \cdot (-\log \cdot \epsilon), \quad [3']$$

$$s_o = s_n \cdot (-\log \cdot \epsilon + \log \cdot C_o), \quad [6']$$

$$s_d = s_n \cdot [-\log \cdot \epsilon + \log \cdot C_i + \log \cdot (1 + C_o'')], \quad [7']$$

que pueden traducirse en las siguientes reglas:

1.^a La visibilidad del horizonte se obtiene multiplicando la visibilidad normal (distancia a la cual el contraste queda reducido a una décima) por un coeficiente característico del receptor, o sea el logaritmo cambiado de signo del contraste mínimo perceptible.

2.^a La visibilidad de un objeto se obtiene multiplicando la misma visibilidad normal por un coeficiente constante, compuesto de dos sumandos: uno característico del receptor y otro del objeto (logaritmo del contraste de brillo de dicho objeto a distancia nula con relación al horizonte).

3.^a La visibilidad del detalle, o sea la distancia de reconocimiento de un objeto, se obtiene también multiplicando la distancia normal de visibilidad por un coeficiente compuesto de tres sumandos: el primero característico del receptor, el segundo característico del objeto (logaritmo de su contraste intrínseco) y el tercero dependiente de su contraste con relación al horizonte. Suponemos siempre que las condiciones de visibilidad debidas a la perspectiva geométrica se cumplen siempre, es decir, que se trata de objetos suficientemente voluminosos con relación a la distancia a que se encuentran y de detalles bastante grandes para que caigan dentro de los límites del poder separador del receptor: ojo o cámara fotográfica.

Como se ve, las fórmulas finales que acabamos de obtener dan cabida adecuada a los tres elementos de que depende la visibilidad: el estado de la atmósfera, representada por la distancia normal de visibilidad S_n , o su recíproco el coeficiente de amortiguamiento atmosférico α ; la sensibilidad del receptor ϵ y la naturaleza óptica del objeto indicada por los coeficientes C_o y C_i .

* * *

Volviendo a la ecuación fundamental [4], observaremos su semejanza formal con la ley de Bouguer-Lambert, que regula la debilitación de la radiación solar durante su

paso a través de la atmósfera. Esta coincidencia no es fortuita. Dicha ley se escribe así:

$$I = I_o \cdot q^x;$$

donde I_o significa la cantidad de energía de la radiación solar incidente en el límite de la atmósfera, llamada constante solar; I , la cantidad recibida por el observador; q , el factor de debilitación, y x , el camino recorrido por la radiación dentro de la atmósfera. Haciendo uso de la identidad

$$q = 10^{\log \cdot q},$$

la ecuación anterior puede escribirse así:

$$I = I_o \cdot 10^{(\log \cdot q) \cdot x}.$$

Si ahora nos limitamos a considerar la energía de radiación correspondiente a la parte visible del espectro, se verificará, evidentemente:

$$\alpha' = -\log \cdot q; \quad [8]$$

es decir: el coeficiente de debilitación que interviene en la definición de la visibilidad es el logaritmo del factor de debilitación de la ley de Bouguer, aplicada a las radiaciones visibles.

Ahora bien: la debilitación de la luz, tanto puede obtenerse aumentando el camino recorrido, como el enturbiamiento con tal de que el exponente $x \cdot \log \cdot q = \log \cdot q^x$ no cambie. De aquí se deduce una nueva posibilidad de definición correcta de la visibilidad, que en el fondo coincide con la expuesta, por comparación con una columna de aire de enturbiamiento tipo y ópticamente equivalente a la dada. Este es el procedimiento seguido por Linke, el cual toma como tipo de comparación el aire puro y seco, cuyo factor de transparencia (complemento del de enturbiamiento) fue calculado por lord Rayleigh, y vale para la región media del espectro visible 0,989 por kilómetro. El factor de enturbiamiento de Linke es el exponente a que hay que elevar el factor de transparencia de Rayleigh para obtener el factor de transparencia efectivo; llamándole F , será:

$$q = 0,989^F. \quad [9]$$

Para $F = 1$, es decir, con atmósfera pura y seca, el coeficiente de enturbiamiento, que llamaremos α_o' , valdrá $-\log \cdot 0,989 = 0,05$, que corresponde a una distancia normal de visibilidad de 200 kilómetros aproximadamente. En los demás casos será:

$$F = \frac{\alpha'}{\alpha_o'} = 200 \cdot \alpha,$$

como es fácil comprobar teniendo en cuenta la ecuación [8], relación importante porque enlaza el factor de Linke con el coeficiente de Koschmieder. La longitud de la columna de aire puro y seco, equivalente a una columna de aire turbio

de equis kilómetros de longitud, será, evidentemente, $F \cdot x$. Si hacemos $x = S_n$, resulta $\frac{1}{\alpha'_0}$, es decir, 200 kilómetros, como era de esperar. También puede buscarse la longitud de aire puro y seco equivalente a un kilómetro de aire turbio, que resulta numéricamente igual al factor F , pues tenemos:

$$\frac{200}{S_n} = \frac{\alpha'}{\alpha'_0} = F,$$

lo cual asigna a este coeficiente una notable significación física inmediata.

Dentro del mismo orden de ideas, el meteorólogo inglés Gold propuso en 1939 una unidad de enturbiamiento llamada *nébula*, definida por la condición que un enturbiamiento de 100 nébulas reduce la intensidad luminosa incidente a una milésima parte. Así, pues,

$$I_e \cdot g^{100} = I_0 : 1000;$$

de donde

$$100 \cdot \log . g = -3,$$

$$g = 0,933.$$

Un enturbiamiento de β nébulas por kilómetro corresponde a un factor de transparencia

$$q = 0,933^\beta; \tag{10}$$

por ejemplo, si la visibilidad a simple vista es de 10 kilómetros, el enturbiamiento será de 56 nébulas por kilómetro. Comparando esta ecuación con la [9], resulta la notable relación aproximada

$$F = 6 \beta,$$

de la cual se deduce que el exponente de Gold y el factor de Linke, aunque obtenidos partiendo de principios distintos, poseen idéntica significación. La distancia normal de visibilidad en función de una y otra será:

$$S_n = \frac{200}{F} = \frac{200}{6\beta} = \frac{1}{\alpha'};$$

relaciones que resumen el enlace existente entre las cuatro magnitudes S_n , α' , F y β , que se usan para caracterizar el estado de transparencia o visibilidad atmosférica.

LA TEORIA DE LA VISIBILIDAD

El aire puro y seco puede considerarse, para nuestro objeto, como completamente transparente, pues según se ha visto, la distancia normal de visibilidad que le corresponde es de 200 kilómetros; así es que la visibilidad del horizonte a simple vista es del orden de los 340 kilómetros, magnitud que carece totalmente de significación práctica. En Me-

teorología no tiene importancia la visibilidad mientras no sea inferior a 50 kilómetros, y en Aeronáutica hasta que no lo sea a 10 kilómetros. La turbulencia óptica de la atmósfera, dentro de estos límites, deberá, pues, atribuirse a la presencia de partículas flotantes en el aire y no a las moléculas gaseosas. Estas partículas son sólidas (polvo) o líquidas (gotas de agua); su acción es doble: actúan en primer lugar interceptando la radiación, efecto que llamaremos de pantalla, y en segundo lugar, difundiendo lateralmente por difracción otras radiaciones perjudiciales, efecto que llamaremos de deslumbramiento. Para explicar el efecto de pantalla hemos de suponer que la columna gaseosa, a través de la cual miramos, está ella misma a oscuras; por ejemplo, encerrada dentro de un tubo de paredes ennegrecidas. En estas condiciones las partículas flotantes pueden considerarse como totalmente opacas. Supongamos ahora un objeto brillante cualquiera colocado en el fondo del tubo, mientras nosotros miramos por el otro extremo. El brillo está definido por la razón entre la intensidad luminosa total recibida y la superficie aparente (ángulo sólido) del objeto, y es, por consiguiente, independiente de la distancia, pues tanto la intensidad luminosa total como el tamaño aparente son inversamente proporcionales al cuadrado de dicha distancia. Ahora bien: las partículas flotantes en el aire ocultan una cierta fracción de la superficie aparente del objeto, haciéndola más o menos invisible. Llamemos R la fracción de superficie real del objeto oculta; $1 - R$ será la parte no eclipsada. Como el brillo real de esta parte, según lo dicho, no varía, la intensidad luminosa recibida a la distancia x será proporcional a $(1 - R) : x^2$; la superficie aparente total lo será, en cambio, a $l : x^2$, y por consiguiente el brillo aparente lo será a $1 - R$. La interposición de las partículas opacas produce, pues, el mismo efecto que una disminución de brillo. Supongamos dichas partículas distribuidas uniformemente en toda la columna gaseosa, y llamemos r a la fracción de superficie del objeto oculta por las contenidas en la unidad de longitud de la columna. Este coeficiente r tiene plena significación siempre que las partículas sean completamente negras, es decir, siempre que sean capaces de absorber totalmente todas las radiaciones que reciben, por lo menos dentro de los límites del espectro visible. Las partículas reales son siempre más o menos transparentes y más o menos reflectoras. Hay que entender que sustituyen estas partículas reales por partículas absolutamente negras de efecto equivalente. Si llamamos x a la distancia, la fracción R , de superficie oculta, será solamente función de x ; la designaremos, pues, por $R(x)$. Calculemos el incremento de esta función al pasar de x a $x + dx$: representa el oscurecimiento producido por las partículas contenidas en el prisma de base, unidad y altura dx . La fracción de superficie del objeto, todavía visible a la distancia x , es, como hemos dicho, $1 - R(x)$, y como suponemos la distribución perfectamente desordenada, y por consiguiente la parte ya oculta y la descubierta son eclipsadas por las partículas siguientes en la misma proporción, el oscurecimiento debido al prisma de espesor dx valdrá $[1 - R(x)] \cdot r \cdot dx$, y podremos escribir:

$$R'(x) \cdot dx = [1 - R(x)] \cdot r \cdot dx;$$

es decir,

$$\frac{R'(x)}{1 - R(x)} = r,$$

ecuación que se integra inmediatamente:

$$R(x) = 1 - C \cdot e^{-rx};$$

como para $x = 0$ ha de ser $R(x) = 0$, será, sencillamente:

$$R(x) = 1 - e^{-rx}.$$

El brillo aparente a la distancia x vendrá, pues, afectado por el factor:

$$1 - R = e^{-rx}. \quad [11]$$

Es evidente que las condiciones reales de la atmósfera no son las que hemos supuesto; las partículas flotantes no solamente ocultan parcialmente la superficie de los objetos y empañan así aparentemente su brillo, sino que, alumbradas lateralmente por la luz solar o del cielo, se convierten en cierto modo ellas mismas en focos luminosos por difracción, y al deslumbrar la vista del observador (o la placa fotográfica en su caso) debilitan con luz parásita el efecto de la luz principal procedente del objeto. Es bien sabido que un objeto perfectamente visible en el fondo de una habitación a media luz, deja de serlo si se abre una ventana lateral por la cual puedan penetrar los rayos solares, alumbrando intensamente el polvillo atmosférico; a pesar de que entonces hay más luz en la habitación y de que el efecto de pantalla producido por el polvillo no ha variado, el objeto resulta invisible. También es sabido que si se coloca un velo negro delante de un objeto brillante apenas disminuye su visibilidad, mientras que si se coloca un velo idéntico, pero blanco, y sobre todo si se ilumina fuertemente, la visibilidad resulta sensiblemente perjudicada.

Según la conocida fórmula de lord Rayleigh, la intensidad de la luz, difractada por una partícula en una dirección determinada, obedece a la ley del cuadrado de la distancia, como si la partícula fuese un verdadero foco emisor. Para calcular el efecto de deslumbramiento podemos suponer, pues, el aire atmosférico sustituido por un elevado número de pequeños focos luminosos de igual intensidad, distribuidos uniformemente en el espacio; llamemos i dicha intensidad, que es la media de las intensidades efectivas, y n el número de partículas por unidad de volumen. El flujo luminoso que en estas condiciones saldría de una esfera de radio x será:

$$i \cdot n \cdot \frac{4}{3} \pi x^3 : 4 \pi x^2 = \frac{1}{3} \cdot i \cdot n \cdot x,$$

pero las mismas partículas emisoras son a la vez absorbentes; tanto es así que la energía que emiten procede en parte de las demás partículas. Si llamamos p el poder absorbente medio de las partículas, y $B(x)$ el brillo superficial de una esfera de radio x , la contribución de las partículas contenidas entre las esferas de radio x y $x + dx$ al brillo superficial de la esfera de radio $x + dx$, será:

$$n \cdot [i - p \cdot B(x)] \cdot dx;$$

de donde

$$n \cdot [i - p \cdot B(x)] \cdot dx = B'(x) \cdot dx.$$

Integrando, resulta:

$$B(x) = \frac{i}{p} - \frac{1}{n \cdot p} \cdot C \cdot e^{-n \cdot p \cdot x};$$

y como para $x = 0$ debe ser $B(x) = 0$, el valor de la constante será:

$$C = n \cdot i,$$

y en definitiva:

$$B(x) = \frac{i}{p} \cdot (1 - e^{-n \cdot p \cdot x}). \quad [12]$$

Debemos hacer una importante advertencia sobre la exacta significación de p . Le llamamos poder absorbente aunque no representa el poder absorbente propiamente dicho, sino la fracción de energía luminosa que la partícula intercepta en la dirección x , ya sea que haya sido efectivamente absorbida o sencillamente desviada por reflexión o por difracción, del mismo modo que antes hemos llamado i a la intensidad de la luz enviada por la partícula en la dirección x , aunque sabemos que no se trata de un verdadero fenómeno de emisión. Numéricamente p es igual al área de la sección de la partícula negra equivalente.

Mientras que en la fórmula obtenida antes, sin tener en cuenta la absorción, el brillo superficial crecía proporcionalmente a x , ahora tiende asintóticamente hacia un valor límite máximo igual a $\frac{i}{p}$. Este límite representa, evidentemente, el brillo del horizonte que resulta, pues, independiente del número y tamaño de las partículas y depende solamente de su naturaleza y de la iluminación exterior. De aquí se deduce que dicho brillo del horizonte variará entre límites bastante estrechos, tanto si el cielo está sereno como si existe niebla, aunque la distancia de visibilidad varía considerablemente de un caso a otro. Se comprende intuitivamente que tiene que ser así, pues el brillo del horizonte es siempre el resultado de la participación de un número aproximadamente constante de partículas, y lo mismo da que estén distribuidas a lo largo de una columna corta que larga.

El brillo aparente de un objeto resulta, pues, alterado al aumentar su distancia dentro de la atmósfera por dos motivos: En primer lugar, resulta multiplicado por el factor e^{-rx} (ecuación 11), menor que la unidad por el efecto de pantalla, y en segundo lugar queda aumentado en el brillo de la parte de atmósfera que tiene delante (ecuación 12) por el efecto de deslumbramiento. Si llamamos B_a el brillo aparente, y B_i el brillo intrínseco, tendremos, pues:

$$B_a = B_i \cdot e^{-rx} + \frac{i}{p} \cdot (1 - e^{-n \cdot p \cdot x}).$$

Si el objeto es negro, $B_i = 0$, y resulta

$$B_a = \frac{i}{p} (1 - e^{-n \cdot p \cdot x}),$$

en absoluta coincidencia con la ecuación [1].

El contraste con el horizonte valdrá, en general, según lo dicho:

$$\begin{aligned} \frac{B_a - B_h}{B_h} &= \left[B_i \cdot e^{-rx} + \frac{i}{p} (1 - e^{-n \cdot p \cdot x}) - \frac{i}{p} \right] : \frac{i}{p} = \\ &= \frac{p}{i} \cdot B_i \cdot e^{-rx} - e^{-n \cdot p \cdot x}. \end{aligned}$$

Si ahora se tiene en cuenta que en virtud de su significación física $r = n\phi$, la fórmula se simplifica y queda:

$$\frac{B_a - B_h}{B_h} = e^{-n\phi x} \cdot \left(\frac{\phi}{i} \cdot B_i - 1 \right). \quad [13]$$

El paréntesis representa el contraste a distancia cero (pues no debe olvidarse que $\frac{i}{\phi}$ es el brillo del horizonte), con lo cual la ecuación [13] resulta idéntica a la ecuación fundamental [4] que ha servido para definir la visibilidad. La constante α que figura en ésta adquiere así una clara significación física: representa el poder absorbente específico medio del aire turbio para las radiaciones visibles.

* * *

En las fórmulas obtenidas hasta ahora no figura explícitamente la humedad atmosférica, que, sin embargo, como se sabe de antiguo, es uno de los factores más decisivamente influyentes sobre la visibilidad. Para terminar vamos a examinar someramente esta cuestión.

Ya se ha dicho que el aire puro y seco, cuyas únicas partículas actuantes son sus propias moléculas, funciona como absolutamente transparente en toda la región visible del espectro. El aire húmedo, pero puro, resulta ligeramente opalino a causa de las bandas de absorción que presenta el vapor de agua, principalmente en el dominio de las ondas largas; pero esta opacidad carece todavía de trascendencia práctica. La presencia en el aire de polvo sólido es ya una causa decisiva de que empeore sensiblemente la visibilidad; pero cuando ésta se hace inferior a los 10 kilómetros, que es cuando empieza a interesar en Aeronáutica, puede asegurarse la intervención predominante, si no exclusiva, de partículas líquidas, es decir, gotitas, vapor de agua condensado.

El fenómeno de la condensación del vapor de agua en

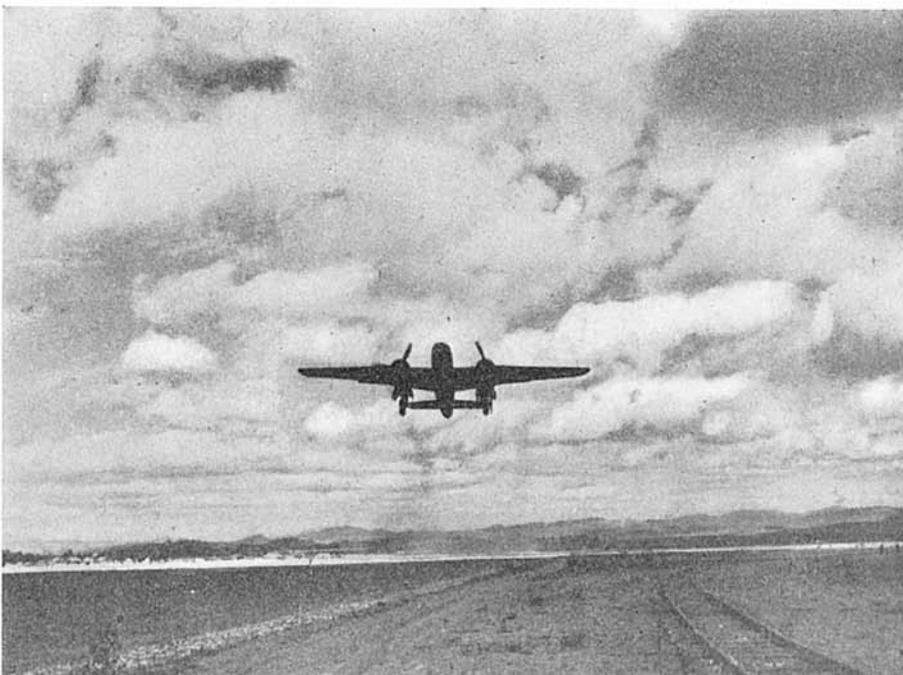
la atmósfera es muy complicado y no tenemos que ocuparnos ahora de eso. Lo único que nos interesa es que para que la condensación se produzca es indispensable la existencia previa de núcleos de condensación. Estos núcleos son de dos clases: partículas de polvo y moléculas gaseosas ionizadas. De todos modos la condensación no empieza mientras la humedad del aire no es suficiente, pudiéndose afirmar, en general, que cuanto más pequeños son los núcleos más difícil resulta iniciar la condensación, de tal modo que mientras las grandes partículas de sustancias higroscópicas permiten una condensación prematura con humedad relativa muy por debajo del estado de saturación, los iones exigen un elevado grado de sobresaturación. La humedad relativa del 100 por 100 no juega aquí ningún papel particular. La distinción entre granos de polvo y núcleos de condensación es muy importante, porque mientras que los granos de polvo actúan por sí mismos como partículas difusoras, los demás núcleos no adquieren eficacia mientras no se haya producido la gotita a su alrededor. Cuando la atmósfera está muy cargada de polvo, aunque sea seco, la visibilidad es mala; a medida que aumenta la humedad relativa los granos de polvo se hinchan, absorbiendo por un proceso más químico que físico el vapor de agua, y la visibilidad empeora; si sigue aumentando todavía la humedad entran en acción los núcleos de condensación propiamente dichos, que por sí mismos no perjudicaban a la visibilidad, y ésta decrece todavía más. Se ve, por tanto, que la visibilidad disminuye a medida que la humedad aumenta, por dos motivos: porque crece el volumen de las partículas difusoras y porque se hace también mayor su número. Para ponderar la importancia de ambos efectos calculemos la expresión del coeficiente r en función del número n de partículas por unidad de volumen y de la sección media m de las mismas. (Según hemos advertido más arriba, se tiene numéricamente $m = \phi$.) Admitiendo que si se añade una nueva partícula la probabilidad de recubrir o de no recubrir a las anteriores es proporcional a la superficie ya cubierta y a la todavía

descubierta; es decir, que la propia sección de la partícula queda dividida en la razón de dichas áreas, y el área descubierta resulta con ello disminuída en una cantidad calculable, se obtiene fácilmente por recurrencia:

$$\begin{aligned} r &= n \cdot m - \frac{n \cdot (n-1)}{2!} m^2 + \\ &+ \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{3!} m^3 - \dots \pm m^n. \end{aligned} \quad [14]$$

Siendo m un número muy pequeño y n generalmente grande, en la práctica se podrán despreciar todos los términos que siguen al segundo, o por lo menos al tercero.

Si las partículas crecen de tamaño, el incremento de r resulta sensiblemente proporcional al de m ; así, si se trata de gotas de volumen k veces mayor, r será $\sqrt[3]{k^2}$ veces mayor. Cuando aumenta el número n de partículas, la



La visibilidad puede limitar grandemente la acción aérea.

variación de r es también proporcional a la de n . A este mismo resultado se llega también considerando que un aumento del número de partículas produce aproximadamente el mismo efecto que un alargamiento proporcional de la columna de aire turbio; es decir, que si se multiplica n por k se podrá escribir:

$$e^{-(kn) \rho x} = e^{-k(n\rho) x};$$

es decir,

$$r' = k r.$$

Falta ahora considerar lo que ocurre cuando varía el número de partículas sin cambiar el volumen total. Si llamamos V a dicho volumen total, N el número de partículas esféricas (gotas) y ρ su radio antes de la variación, y N' y ρ' los valores correspondientes, después de ella podremos escribir. (No hay que decir que hablamos siempre de las partículas negras equivalentes a las partículas reales.)

$$N \cdot \frac{4}{3} \pi \rho^3 = N' \cdot \frac{4}{3} \pi \rho'^3;$$

es decir,

$$\frac{N}{N'} = \frac{\rho'^3}{\rho^3}.$$

La razón entre las áreas de las secciones correspondientes será:

$$\frac{m}{m'} = \frac{N \rho^2}{N' \rho'^2},$$

y teniendo en cuenta la igualdad anterior,

$$\frac{m}{m'} = \frac{\rho'}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{N}{N'}}.$$

Esta razón, según hemos visto (ecuación 14), es aproximadamente igual a la razón de los coeficientes r y r' correspondientes. Resulta, pues, que con una misma masa de agua la visibilidad es peor si está distribuida formando un gran número de pequeñas gotitas, que si forma un pequeño número de gotas mayores. Comprobación de la teoría es el hecho conocido que un aguacero bastante copioso, con sus grandes gotas, impide mucho menos la visibilidad que una niebla menuda con sus gotitas invisibles. De aquí se deduce el papel especial que en el problema de la visibilidad juega el número de núcleos de condensación, modificando esencialmente el influjo de la humedad; si la humedad relativa es elevada y existe un gran número de núcleos, se formarán muchas gotitas y la visibilidad será mala; si con la misma humedad existen pocos núcleos, se formarán gotas mayores, pero en menor número, y la visibilidad será mejor. Cuando el aire está relativamente seco, entonces los pequeños núcleos de condensación no intervienen, pero intervienen los granos de polvo; si el contenido en polvo es grande, sobre todo si goza de propiedades higroscópicas, la visibilidad será deficiente; si es escaso, habrá visibilidades extraordinarias. Los procesos de coagulación, en los cuales varias gotitas se reúnen en una sola, favorecen la visibilidad, mientras los procesos de pulverización la perjudican.

La fórmula definitiva de la visibilidad es, pues, en resumen, la siguiente:

$$s_0 = \left[1 : \left(n \cdot m - \frac{n(n-1)}{2!} m^2 + \dots \pm m^n \right) \right] \cdot \left[-\log \varepsilon + \log \left(\frac{m}{i} \cdot B_i - 1 \right) \right], \quad [15]$$

donde s_0 representa la distancia a que deja de ser visible un objeto determinado; n , el número de partículas difusoras por unidad de volumen; m , la superficie aparente o sección media de una partícula negra ópticamente equivalente a la partícula real; ε , la sensibilidad del receptor; i , la intensidad luminosa de la partícula ($\frac{i}{m}$ = brillo aparente del horizonte), y B_i el brillo intrínseco del objeto. Las magnitudes n y m son funciones todavía desconocidas de la humedad, además de estar relacionadas entre sí.

APLICACIONES PRACTICAS

Prescindimos por completo de las importantes aplicaciones que se hacen de la visibilidad en Meteorología para la diagnosis de las masas de aire, para el cálculo del coeficiente de turbulencia, para la economía de la radiación, etcétera, etc., y nos limitaremos a unas ligeras indicaciones sobre las aplicaciones aeronáuticas.

La visibilidad interesa a todos los pilotos porque a ella están supeditados en gran parte los métodos de navegación; pero interesa también de un modo especial al observador militar y al Mando por su íntimo enlace con el éxito o el fracaso de posibles operaciones.

Vamos a sacar las consecuencias prácticas que se desprenden de nuestra ecuación final [15]. Cuando interesa la buena visibilidad lo primero que debe procurarse es prevenirla, cometido de la exclusiva incumbencia del meteorólogo, que exige el análisis bien detallado de la situación atmosférica y de las particularidades locales, y el conocimiento completo, sobre todo, de las condiciones de humedad y sus futuras variaciones, y de la naturaleza y densidad de los núcleos de condensación y de las partículas de polvo. En segundo lugar, debe lucharse contra la mala visibilidad, tratando, o bien de influir sobre la atmósfera para mejorarla, o bien de conseguir la penetración óptica a través del medio turbio. La mejora de la visibilidad, que por hoy es un deseo todavía irrealizable, pero teóricamente posible, habrá de conseguirse provocando artificialmente la coagulación. El aire turbio es enteramente asimilable a una suspensión coloidal, la cual es tanto más estable cuanto más homogéneas son las partículas que la constituyen. Cuando existen gotas desiguales se produce espontáneamente una destilación que va destruyendo las gotas menores en beneficio de las mayores; cuando existe una mezcla de cristales de hielo y gotas sobrefundidas, se produce un fenómeno análogo en beneficio de aquéllos; en ambos casos se obtiene la sustitución de un gran número de gotas pequeñas por un pequeño número de gotas grandes, con la consiguiente mejora de la visibilidad. A veces se llega incluso a la separación de una parte del agua por precipitación, la cual, al caer, produce de paso otro beneficio: el lavado o arrastre del polvo sólido flotante,

y con ello la eliminación de los núcleos de condensación más perjudiciales. El día que pueda verificarse en el seno de la niebla o de las nubes la *inoculación* de *gérmenes* coagulantes, se habrá adelantado mucho en el camino de la mejora artificial de la visibilidad.

Actualmente parece más asequible, aunque tampoco se ha conseguido todavía, la penetración óptica, es decir, la visión a través de la niebla. Se funda en la utilización de la luz infrarroja, que tiene dos propiedades, conducentes ambas a una mejora de la visibilidad; en primer lugar, el contraste intrínseco de los objetos ordinariamente presentes en el paisaje es mucho más intenso con luz infrarroja que con luz visible, y en segundo lugar, los granos de polvo y las gotitas de agua, que son obstáculos formidables para la luz visible, resultan pequeños para las ondas de gran longitud, y los fenómenos de difracción amenguan mucho o llegan a desaparecer prácticamente; el aire turbio se convierte en un medio ópticamente vacío para ondas suficientemente largas. La fotografía con placas sensibles al infrarrojo y filtros apropiados, es actualmente una realidad de todos conocida, y es bien sabido también la riqueza de detalles que por este procedimiento pueden descubrirse en días de mala visibilidad, o incluso a través de la niebla. El día que pueda conseguirse transformar directamente las radiaciones infrarrojas en luz visible, como verifica la pantalla fluorescente con los rayos X, habrán desaparecido las molestias y los peligros de vuelo a ciegas.

Cuando, por el contrario, interesa reducir artificialmente la visibilidad, pueden también seguirse dos procedimientos: o reducir todo lo posible el contraste intrínseco del objeto que quiere ocultarse, o bien tendiendo delante de él una nube artificial. De ambos procedimientos se hace amplio uso en la guerra desde antes del apogeo de la Aviación, pero ambos han adquirido modernamente una importancia de primer orden como defensa pasiva contra el Arma aérea. La

disminución del contraste se llama *enmascaramiento* o *camuflado*, y se obtiene haciendo uso de ramajes, lonas o telas, pintando los objetos y vistiendo el personal con colores neutros semejantes al fondo del paisaje; en Rusia se ha empleado el vestido blanco para moverse sobre la nieve. La técnica de las nubes artificiales se ha perfeccionado extraordinariamente y se emplean en gran escala. No es de nuestra incumbencia profundizar en esta cuestión. Únicamente conviene dejar establecido que es más ventajoso hacer uso de la niebla, cuando se puede, que del humo, porque las partículas líquidas ocultan más que las sólidas, y siendo más ligeras gozan también de mayor tiempo de persistencia. Los humos deben ser ricos en sales higroscópicas, que en contacto con el aire húmedo se hincharán y producirán rápidamente una niebla densa. Antes de decidir el procedimiento a seguir y de escoger las sustancias a emplear, es preciso en cada caso conocer perfectamente el estado de la atmósfera, sobre todo su riqueza en polvo y en núcleos de condensación, su humedad, coeficiente de turbulencia y corrientes generales o locales establecidas. Cuando exista abundancia de núcleos de condensación bastará usar preparados ricos en vapor de agua; cuando, por el contrario, la humedad sea suficiente, podrán emplearse con éxito preparados ricos en polvo o provocar artificialmente una intensa ionización del aire; cuanto más seca se encuentre la atmósfera, más higroscópicas deberán ser las partículas que se arrojen en su seno. Las condiciones de iluminación tienen también importancia primordial. El brillo del horizonte depende de la posición del Sol y, por tanto, de la hora. La mayor eficacia se obtiene con luz lateral, que ilumina fuertemente la niebla sin alumbrar los objetos que desean ocultarse. No será ningún despropósito el ensayo del alumbrado artificial que haga de la niebla una nube luminosa perjudicial para la visibilidad por su gran poder de deslumbramiento. A veces será posible reforzar por este medio el efecto insuficiente de una débil niebla natural.

