

# Trazas de la temperie

MANUEL LARA JAÉN  
mlaraj@aemet.es

## Nieblas de radiación

Durante los pasados meses de enero y diciembre se han registrado en el interior de la Península numerosas nieblas como consecuencia del bloqueo anticiclónico. Echamos un vistazo a una de estas situaciones y teorizamos sobre las variables microfísicas que pueden estimarse a partir de una EMA.

### Niebla del 6 de enero de 2019 en Navalmoral de la Mata

Entre el 5 y 7 de enero las nieblas de radiación fueron recurrentes en amplias zonas del interior de la Península. La figura 1 (arriba), muestra el análisis de superficie a las 12 Z del día 6 con el potente anticiclón centrado en la Bretaña bloqueando la circulación y abajo el sondeo observado en Madrid para las 00 Z de ese día. El sondeo marca una enorme inversión en superficie con un aumento de temperatura de 10 °C en los primeros 50 hPa, y muestra una humedad muy baja en todos los niveles, con apenas 3.9 mm de agua precipitable entre superficie y 300 hPa, lo cual favorece el enfriamiento radiativo nocturno.

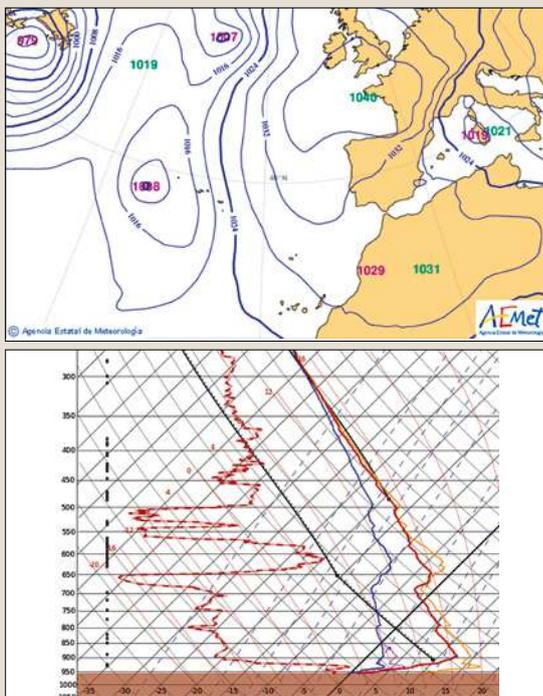


Figura 1. Arriba: Mapa de superficie del 6 de enero a 12 UTC con anticiclón de 1040 hPa centrado en Bretaña. Abajo: Sondeo observado en Madrid a las 00 de ese día, mostrando la enorme inversión en superficie y la extraordinaria sequedad de la atmósfera, el contenido en agua precipitable entre superficie y 300 hPa es de sólo 3.9 mm

En el caso que vamos a estudiar, la EMA de AEMET de Navalmoral de la Mata (Cáceres, a 260 m de altitud) dotada de visibilímetro, registró niebla el día 6 durante 20 horas, con visibilidades por encima de 1 km sólo en el periodo de 4 horas entre las 12 y 16 UTC. La visibilidad osciló entre 100 y 200 m durante el periodo de niebla, que había comenzado a las 21 UTC del día anterior. Los gráficos de la figura 2, muestran el viento medio y la temperatura junto a la visibilidad. Las temperaturas registradas fueron realmente bajas con una TMin de -2.2 °C y una TMax de 5.3 °C. El viento, registrado por un anemómetro ultrasónico, se mantuvo por debajo de 1 ms<sup>-1</sup> casi todo el periodo.

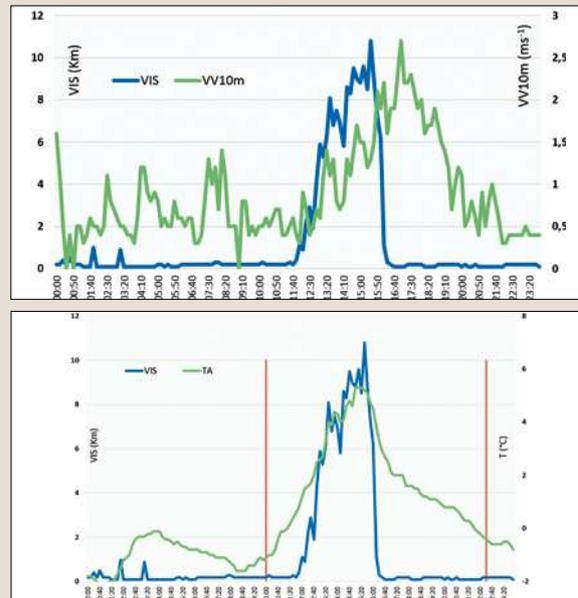


Figura 2. Arriba: Gráficas de visibilidad y viento medio en 10 minutos de la EMA de Navalmoral de la Mata del 6 de enero de 2019. Abajo: ídem para visibilidad y temperatura del aire; las líneas rojas indican los dos momentos en los que el pluviómetro registra 0.2 mm

La niebla levanta a las 12 UTC. La temperatura había comenzado a subir lentamente desde las 10 UTC, pero la visibilidad tardó en mejorar dos horas; el viento reacciona con lentitud. La máxima visibilidad, 10.8 km, se alcanza a las 15:30 UTC, casi coincidiendo con la TMax, de apenas de 5.3 °C. Una hora después tenemos la niebla de vuelta con 200 m de visibilidad mientras el viento, de nuevo con retraso, llegaba en esos momentos a su escuálida velocidad media máxima de 2.5 ms<sup>-1</sup>.

Es habitual que en situación de niebla espesa y persistente los pluviómetros, manuales o automáticos, registren precipitación, normalmente en cantidades inferiores a 0.5 mm por día. En este caso, el pluviómetro, de balancín con 0.2 mm de resolución, registró 0.4 mm, con dos vuelcos a las 10:00 y 22:20 UTC, indicados con líneas rojas en la figura 2 (abajo). Los primeros 0.2 mm necesitaron para depositarse 14 horas de niebla, desde las 20h del día anterior hasta las 10h, mientras que los segundos 0.2 mm se depositaron en bastante menos tiempo, unas 7.7 horas de niebla. Esta diferencia podría explicarse por el hecho de que durante la tarde las temperaturas fueron algo más altas y el viento menos débil que durante la mañana y la madrugada, ambos factores, en teoría, ayudan a un espectro con gotas mayores y a un mayor depósito de las mismas por turbulencia.

### Visibilidad, coeficiente de extinción y contenido en agua líquida de la niebla

La ley de Koschmieder (1924) es el fundamento teórico detrás de la mayoría de los visibilímetros, y relaciona la visibilidad

con el coeficiente de extinción,  $\beta$ , para un umbral de contraste determinado.

$$VIS = -\ln(C_t) / \beta$$

Aunque el umbral de contraste utilizado inicialmente fue de 0.02, en la actualidad para el cálculo del MOR tanto OMM como OACI utilizan el umbral de 0.05, con lo que la ley de Koschmieder suele venir expresada como:

$$VIS = 3.0 / \beta$$

Por tanto, desandando el camino hecho por el instrumento, si en Navalморal de la Mata la visibilidad era de 100 m,  $\beta$  tendría un valor de  $0.03 \text{ m}^{-1}$ :

$$\beta (VIS = 100m) = 3.0 / 100 = 0.03 \text{ m}^{-1} = 30 \text{ km}^{-1}$$

Por otro lado existen en la literatura, [2], diversas relaciones empíricas que para nieblas nos relacionan el coeficiente de extinción en una niebla con su contenido en agua líquida  $W_L$ , todas ellas de la forma.

$$\beta = aW_L^b$$

Los coeficientes a y b de los distintos autores muestran una aparente alta variabilidad con a variando entre 65 y 178 y b entre 0.63 y 0.96. La figura 3 muestra una selección de las distintas curvas y pone de manifiesto que las diferencias entre ellas son significativas para valores de  $W_L$  altos pero que lógicamente convergen para valores bajos. Las discrepancias entre las distintas relaciones se explican por los distintos instrumentos y métodos utilizados que acotan el espectro de gotas por arriba y por debajo de diferente manera, así como por los distintos tipos de nieblas estudiados. Otros factores que explican la variación son las distintas alturas a la que se realizaron las medidas y la fase en la que se encontraban nieblas, ya que durante el ciclo de vida de una niebla la distribución de tamaño de gotas (DTG) sufre variaciones.

Pero es probable que sea el tipo de niebla el factor que más contribuye a la discrepancia de estas expresiones.

Las nieblas de radiación se suelen distinguir de las de advección en un mayor número de gotas pequeñas que contribuyen poco al contenido total de agua líquida  $W_L$  pero que son bastante efectivas en la extinción. Es decir, en general, con un mismo contenido en agua líquida, en las nieblas de radiación la visibilidad es menor en que las de advección.

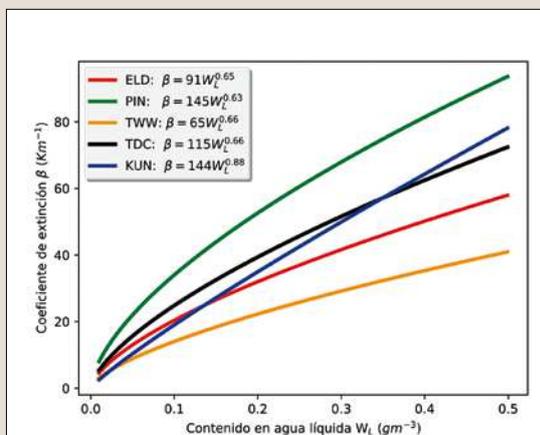


Figura 3. Coeficiente de extinción frente a contenido en agua líquida en nieblas.

Las 5 curvas se corresponden con las expresiones de Eldrich (ELD), Pinnick (PIN), Tomasi para nieblas "Wet and Warm" (TWW), Tomasi para nieblas "Dry and Cold" (TDC) y Kunkel (KUN). La curva de Kunkel, en azul, que tiene un comportamiento muy cercano a la linealidad, se obtuvo a partir de 1400 DTG en nieblas de advección promediando medidas a 5 y 30 m de altura

Para hacer un pequeño ejercicio numérico vamos a utilizar la expresión de Tomasi para las que él denominó, nieblas secas y frías (curva en negro en la figura 3), adjetivos con los que suponemos que se refiere a las nieblas de radiación o de carácter continental, en contraposición a las que llamó nieblas húmedas y cálidas (curva naranja), que se corresponderían con nieblas de advección o de carácter marítimo. La ecuación es

$$\beta = 115W_L^{0.66}$$

Donde  $\beta$  iría en  $\text{Km}^{-1}$  y  $W_L$  en  $\text{gm}^{-3}$ ; resolviendo para  $W_L$ :

$$W_L = (\beta / 115)^{1/0.66}$$

Que para nuestro caso de Navalморal de la Mata, con un coeficiente de extinción  $\beta$  de  $30 \text{ Km}^{-1}$ , nos daría un contenido en agua líquida  $W_L$  de  $0.13 \text{ gm}^{-3}$ . Queda implícito en lo que llevamos dicho que estamos suponiendo una atmósfera no contaminada, es decir que aunque admitimos la existencia de partículas, lógicamente no habría niebla si no las hubiera, damos por hecho que el tipo y número de partículas no aportan extinción adicional a la de las gotas de niebla y que éstas son de agua pura, y desde luego esféricas. El emplazamiento de la EMA de Navalморal de la Mata, en medio de una dehesa, permite suponer que esta hipótesis de atmósfera limpia se cumple. Y la esfericidad de las gotas en estos tamaños es completa.

## Distribución de tamaños de gotas en nieblas

Al igual que ocurre con las nubes, los parámetros microfísicos de una niebla se podrían determinar fácilmente si conociéramos la expresión analítica de su DTG. Por ejemplo la concentración de gotas sería el momento cero de la distribución, el radio medio el cociente de los momentos primero y cero, el contenido en agua líquida es proporcional al tercer momento, la reflectividad radar al sexto etc.

Es probable que la función densidad de probabilidad más utilizada para modelizar la DTG de nieblas, y nubes, sea la distribución gamma modificada (DGM). Pruppacher cita que DTG experimentales de niebla se han ajustado a la DGM con  $\gamma=1$  y  $\beta=2$ , llamada distribución Khragian-Mazin (DKM), cuyos momentos pueden calcularse fácilmente, [3], Tabla 1.

DGM	DKM	Momentos DKM
$n(r) = ar^\alpha \cdot e^{-br^\gamma}$	$n(r) = ar^2 e^{-br}$	$m_i = ab^{-(3+i)} \cdot \Gamma(3+i)$

Tabla 1. Distribución Gamma Modificada (DGM), distribución Khragian-Mazin (DKM) y expresión de los momentos de esta última.  $n(r)$  es el número de gotas de radio r por  $\text{m}^3$ . Téngase en cuenta que  $\Gamma(3+i)$  es simplemente  $(2+i)!$

Podemos hacernos una idea de cómo es la DTG en una niebla de radiación con la figura 4 que muestra la DTG de una niebla de radiación en Huntington, EEUU, medida por la NASA utilizando instrumentación instalada en un avión volando en el interior de la niebla. La referencia [4] contiene los datos y detalles sobre el tipo de instrumentación utilizada en estos vuelos, que se realizaron también en otras cuatro localidades y en aproximaciones sucesivas en diferentes alturas, algunas tan asombrosamente bajas como 10 m.

Se observa en la gráfica un comportamiento unimodal con el máximo número de gotas por  $\text{m}^3$  en el intervalo entre 5 y 8  $\mu$ . Los

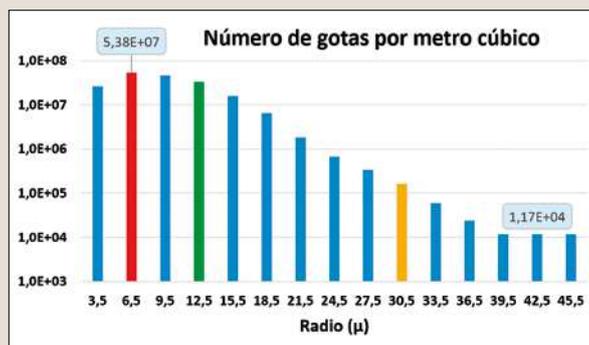


Figura 4. Distribución de tamaño de las gotas a 60 m sobre el suelo en una niebla de radiación en Huntington (EE. UU.), 28 septiembre 1992. Gráfica dibujada a partir de datos de [4]. La columna en rojo indica el radio (6.5 μm) para el cual la concentración de gotas es máxima. La columna verde indica el radio (12.5 μm) que aporta la mayor cantidad de volumen de agua líquida a la niebla. A pesar de que la concentración disminuye rápidamente al aumentar el radio, nótese que la escala es logarítmica, el papel de las gotas grandes es importante; la columna naranja aporta un volumen de agua similar al aportado por el radio máximo. Las nieblas de advección descritas en [4] suelen tener un aspecto similar, si bien el espectro es algo más ancho, con mayor concentración en radios grandes que la niebla de radiación aquí mostrada.

intervalos tienen anchura de 3 μ comenzando las medidas en 2 μ. El autor del trabajo señala la posibilidad de que por debajo de 2 μ el número de gotas sea muy elevado, pero que existen dificultades grandes para realizar estas medidas y para distinguir partículas sólidas de las gotitas diminutas (< 2 μ). Esto puede explicar el hecho de que en algunos trabajos las DGT sean bimodales con un primer máximo en radios inferiores a 2 μ. El total de gotas por m<sup>3</sup> en esta observación es de 1.85·10<sup>8</sup>, equivalentes a 185 gotas por cm<sup>3</sup>, teniendo que resaltar que no se han contabilizado gotas inferiores a 2 μ.

La pregunta que nos planteamos es: Con los datos que tenemos de la EMA, ¿sería posible determinar la DTG de la niebla? Y desde luego en principio, la respuesta es no. Aunque nada nos impide teorizar un poco y hacer algunas hipótesis arriesgadas. Podemos empezar asumiendo que podemos ajustar la DTG de nuestra niebla a una DKM:

$$n(r) = ar^2 \cdot e^{-br}$$

El contenido en agua líquida será:

$$W_L (g m^{-3}) = \int_0^{\infty} m(r)n(r)dr$$

Donde m(r) es la masa en g de la gota de agua de radio r:

$$W_L = (4\pi/3) \rho_w \int_0^{\infty} r^3 n(r)dr = (4\pi/3) \rho_w m_3$$

Y m<sub>3</sub>, tercer momento de nuestra distribución, es según la tabla 1:

$$m_3 = ab^{-6} \Gamma(6) = 120ab^{-6}$$

Sustituyendo el contenido de agua líquida de nuestra niebla W<sub>L</sub> = 0.13 gm<sup>-3</sup>, y tomando ρ<sub>w</sub> = 10<sup>6</sup>gm<sup>-3</sup> como densidad del agua líquida, obtenemos una primera relación entre los parámetros de la distribución:

$$0.13 = (4\pi/3)10^6 \cdot 120ab^{-6}$$

$$2.5 \cdot 10^{-10} = ab^{-6} \quad (\text{Eq-1})$$

Lógicamente necesitamos otra relación para cerrar el sistema y determinar a y b. Pero una EMA estándar no dispone de instrumentación para poder estimar el radio medio de las gotas o la concentración, o alguna otra variable como la reflectividad radar que pudiéramos poner en función de algún momento. En general parece que no se podría avanzar más.

Pero como se ha dicho al principio, esta niebla depositó 0.4 mm y sabemos que 0.2 mm los depositó en 7h40m y eso equivaldría a una intensidad de precipitación R = 0.025 mmh<sup>-1</sup>. Realmente decir que esos 0.4 mm depositados es precipitación, con el mismo sentido físico que en el caso de la lluvia, es algo aventurado, dada la tendencia de las gotitas de niebla a adherirse a objetos sólidos como hojas o las propias paredes del pluviómetro. Parece por tanto difícil determinar qué parte de esa cantidad sería precipitación en el sentido habitual, y qué parte no hubiera llegado al balancín de no existir las paredes del pluviómetro.

Pero consideremos, en beneficio del argumento y siendo conscientes de la debilidad de la hipótesis y de que estamos sobreestimando, que realmente la niebla produjo esa intensidad de precipitación, casi infinitesimal por otra parte. La intensidad de

precipitación R, ya en mmh<sup>-1</sup>, la podemos escribir en función de la DTG y la velocidad terminal de las gotas U<sub>∞</sub>(D) como

$$R(mm h^{-1}) = 6\pi \cdot 10^{-4} \int_0^{\infty} D^3 n(D)U_{\infty}(D)dD$$

Con D diámetro en mm y U<sub>∞</sub> la velocidad terminal de las gotas en ms<sup>-1</sup>. La velocidad terminal para gotas muy pequeñas puede calcularse por la ley de Stokes que según R. Rogers en su clásico Física de Nubes puede aplicarse hasta las 40 μ, si bien otros autores son algo menos generosos. La velocidad de Stokes viene dada por las expresiones,

$$U_{\infty} = (2r^2 g(\rho_w - \rho_a)/9\mu_{da}) = (D^2 g(\rho_w - \rho_a)/18\mu_{da})$$

dependiendo de si utilizamos el radio o el diámetro, donde μ<sub>da</sub> es la viscosidad dinámica del aire 17.15·10<sup>-6</sup> Pa·s y ρ<sub>a</sub> la densidad del aire. Sustituyendo U<sub>∞</sub> en la expresión de R

$$R(mm h^{-1}) = (6\pi \cdot 10^{-4} g(\rho_w - \rho_a)/18\mu_{da}) \int_0^{\infty} D^5 n(D)dD$$

Manipulando la integral para hacerla función del radio, utilizando el momento de quinto orden m<sub>5</sub> = ab<sup>-8</sup>Γ(8), y sustituyendo las constantes y nuestro dato de R = 0.025 mmh<sup>-1</sup>, obtenemos, tras operar, la segunda ecuación que estamos buscando:

$$1.2 \cdot 10^{-15} = ab^{-8} \quad (\text{Eq-2})$$

La resolución del sistema formado por las ecuaciones Eq-1 y Eq-2 nos da la siguiente DTG para nuestra niebla:

$$n(r) = 2.7 \cdot 10^{29} r^2 \cdot e^{-3.5 \cdot 10^5 r}$$

A partir de ella podemos ya, por ejemplo, calcular la concentración de gotas N y el radio medio r:

$$N = 2a/b^3 = (2 \cdot 2.7 \cdot 10^{29}) / (3.5 \cdot 10^5)^3 = 1.25 \cdot 10^{13} \text{ gotas por m}^3;$$

$$r = b/3 = 8.510^{-6} \quad m = 8.5\mu$$

Y aunque el radio tiene un valor razonable, la concentración de gotas parece excesiva, seguramente debido a nuestra sobrestimación de R. Para finalizar recordamos las cuatro hipótesis que hemos utilizado por orden estimado de menor a mayor riesgo:

- Distribución Khrgian-Mazin para representar el tamaño de gotas de nuestra niebla.
- Relación de Tomasi para calcular el contenido en agua líquida a partir del coeficiente de extinción.
- Ley de Stokes para la velocidad de caída de las gotas.
- Utilización de la precipitación registrada por el pluviómetro para estimar una intensidad de precipitación de la niebla.

## Bibliografía

- [1] H.R. Pruppacher, J.D. Klett: Microphysics of Clouds and Precipitation (2010).
- [2] B.A. Kunkel: Parameterization of Droplet Terminal Velocity and Extinction Coefficient in Fog Models. *Journal of Climate and Applied Meteorology* (1984).
- [3] B. Thies y otros: The Influence of Drop Size Distributions on the Relationship between Liquid Water Content and Radar Reflectivity in Radiation Fogs. *Atmosphere* (2017).
- [4] J.A. Zak, NASA: Drop Size Distributions and Related Properties of Fog for Five Locations Measured from Aircraft (1994). <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940028559.pdf>