

Estelas de condensación

1. ¿Qué son y cómo se forman?

Las estelas de condensación son nubes de hielo, en forma de largas líneas, que surgen en ocasiones al paso de un avión, por condensación del vapor de agua contenido en las emisiones de los motores. A veces también se forman otro tipo de estelas en la punta de las alas, por condensación del vapor atmosférico a causa de la bajada de presión y temperatura que se produce al paso del avión, pero estas últimas suelen ocurrir en el despegue y el aterrizaje, no durante el vuelo en niveles altos, y duran mucho menos.

Los motores de los aviones emiten vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos, monóxido de carbono, gases de azufre y partículas de hollín y metal. De todos estos gases y partículas, el vapor de agua es lo único relevante para la formación de estelas.

Para que se formen las grandes estelas tras los aviones en ruta son necesarias unas condiciones de temperatura y humedad determinadas, que permitan que se produzca la condensación del vapor de agua emitido por los motores. Los gases de azufre pueden ayudar, porque facilitan la formación de pequeñas partículas que pueden actuar como núcleos de condensación, pero, en general, de todas formas hay suficientes partículas que sirven como núcleos de condensación en la atmósfera. El resto de los gases y partículas emitidos por el motor de los aviones no influyen en la formación de las estelas.

Cuando los gases que emite el avión se mezclan con el aire circundante, se enfrían rápidamente y, si la humedad en la atmósfera es suficiente para que la mezcla alcance la saturación, se producirá la condensación del vapor de agua. El nivel de humedad de la mezcla, es decir, el que se llegue a la saturación o no, dependerá de la temperatura y humedad del aire, así como de la cantidad de vapor de agua y la temperatura de las emisiones del avión.

El póster de la NASA explica muy bien el proceso de mezcla de los gases expulsados por los motores y el aire circundante, y las condiciones en que se forman las estelas (Anexo, https://scool.larc.nasa.gov/pdf/Contrail_ID_Chart_Spanish_2014_4.pdf).

2. ¿Es correcto denominarlas *chemtrails*?

En inglés, la palabra correcta es *contrails* (abreviatura de *condensation trails*, estelas de condensación). El término *chemtrails* (abreviatura de *chemical trails*, estelas químicas) es el empleado por los seguidores de la teoría que afirma que



AEMet

desde los aviones se están lanzando productos químicos con el objetivo de modificar artificialmente el tiempo o el clima.

3. ¿Existe consenso científico sobre la posible existencia de un programa atmosférico secreto de gran escala?

El estudio de la Universidad de California de Shearer en 2016 (Shearer C. et al., 2016) presentaba la opinión de 77 científicos expertos en química atmosférica o en geoquímica. 76 de ellos no encontraron ninguna evidencia de un *secret large-scale atmospheric program* (SLAP), o programa atmosférico secreto de gran escala, y el número 77 refirió, como única evidencia que no podía explicar, altos niveles de bario atmosférico en una zona remota sobre un terreno con bajos niveles de bario.

4. ¿Hay distintos tipos de estelas?

Una vez que se forma una estela, su evolución depende de las condiciones atmosféricas. Así, podemos ver los tres tipos de estelas que se mencionan en el póster, ejemplos de imágenes están disponibles en UCAR (Center for Science Education, NCAR <https://scied.ucar.edu/image/three-types-contrails>):

- Estelas de vida corta: son pequeñas líneas blancas que vemos detrás del avión, y que desaparecen casi tan rápido como pasa la aeronave. Ocurren cuando la cantidad de vapor de agua en la atmósfera es pequeña, y entonces las partículas de hielo que forman la estela vuelven al estado gaseoso rápidamente.
- Estelas persistentes que no se extienden: son largas líneas blancas, que permanecen después de que ha pasado el avión, pero no crecen ni se expanden. Ocurren cuando la humedad en la atmósfera es grande, por lo que la estela no se evapora (más precisamente, no se sublima), y puede durar horas.
- Estelas persistentes que se extienden: son líneas que van engordando y haciéndose más anchas y de forma irregular a medida que pasa el tiempo. Esto ocurre cuando la humedad en la atmósfera es muy próxima al nivel de condensación, y es fácil que el vapor de agua atmosférico se condense sobre las partículas de hielo de la estela. Si además hay algo de inestabilidad y turbulencia, las estelas van tomando una forma irregular. Estas estelas, además, pueden ser desplazadas por el viento.

5. ¿Es técnicamente viable fabricar estelas que no sean de vapor de agua?

Según la estimación de David Incertis (Chemtopic, 2014) en el blog *500 euros por un chemtrail*, si las estelas consistieran en compuestos metálicos dispersados desde aviones, para obtener una estela de las dimensiones de las estelas persistentes, haría falta dispersar una cantidad tal de material cuyo peso ningún avión sería capaz de transportar.

6. ¿Es posible predecir las estelas?

Las primeras referencias de estelas de condensación se tienen hacia finales de la primera guerra mundial, cuando los aviones fueron capaces de volar a las altitudes a las que se dan las condiciones para su formación. Hasta principios de la segunda guerra mundial, se consideraron poco más que una curiosidad, pero durante la guerra las estelas pasaron a ser un tema de mucho interés, porque podían delatar a un avión. Así, en distintos países se empezaron a investigar las causas y condiciones para su formación. En 1953 el norteamericano Appleman publicó un gráfico que permitía, conociendo las condiciones de temperatura y humedad en altura, determinar si se formarían estelas, y a qué niveles (Web NASA, The Globe Program: Predicting Contrails Using an Appleman Chart).

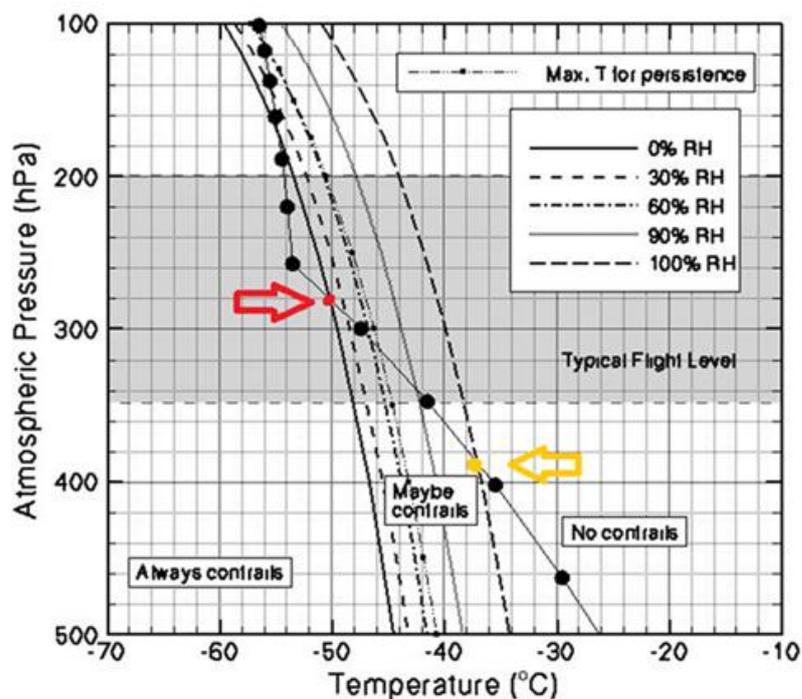


Figura 1: Perfil atmosférico de temperatura en latitudes medias en invierno (cortesía: The Globe Program-NASA)



AEMet

En la figura 1, la línea que une los puntos negros representa el perfil atmosférico de temperaturas típico en invierno en latitudes medias. En estas condiciones, las estelas son posibles (si la humedad en la atmósfera circundante es suficiente) por encima del nivel de 400hPa, que equivale a una altitud de unos 7 km. (punto marcado en amarillo) y son cada vez más probables en niveles superiores, hasta ser prácticamente seguras (incluso con una humedad en la atmósfera del 0%) por encima de los 320 hPa, aproximadamente (punto marcado en rojo), es decir, algo por encima de los 9km de altitud.

7. ¿Hay razones para preocuparse por las estelas de los aviones?

Aparte del interés estratégico para los vuelos militares, las estelas de condensación persistentes sí tienen hoy en día relevancia por su influencia en el cambio climático antropogénico.

La aviación es una de las actividades económicas más importantes en el mundo moderno. Tanto el CO₂ como los demás elementos procedentes de la combustión de los motores provocan cambios en el sistema climático. En la figura 2 se muestran los procesos mediante los cuales las emisiones de la aviación y el aumento de cirros afectan al sistema climático (Lee et al., 2020). Las contribuciones para el forzamiento radiativo neto positivo (calentamiento) surgen de las emisiones de CO₂, vapor de agua, NO_x y hollín, y de los cirros provenientes de las estelas (estelas lineales y de las nubes cirrus que surgen de ellas). Tanto el CO₂ emitido por la aviación, como el conjunto de las contribuciones distintas del CO₂ conducen a un calentamiento neto en la superficie.

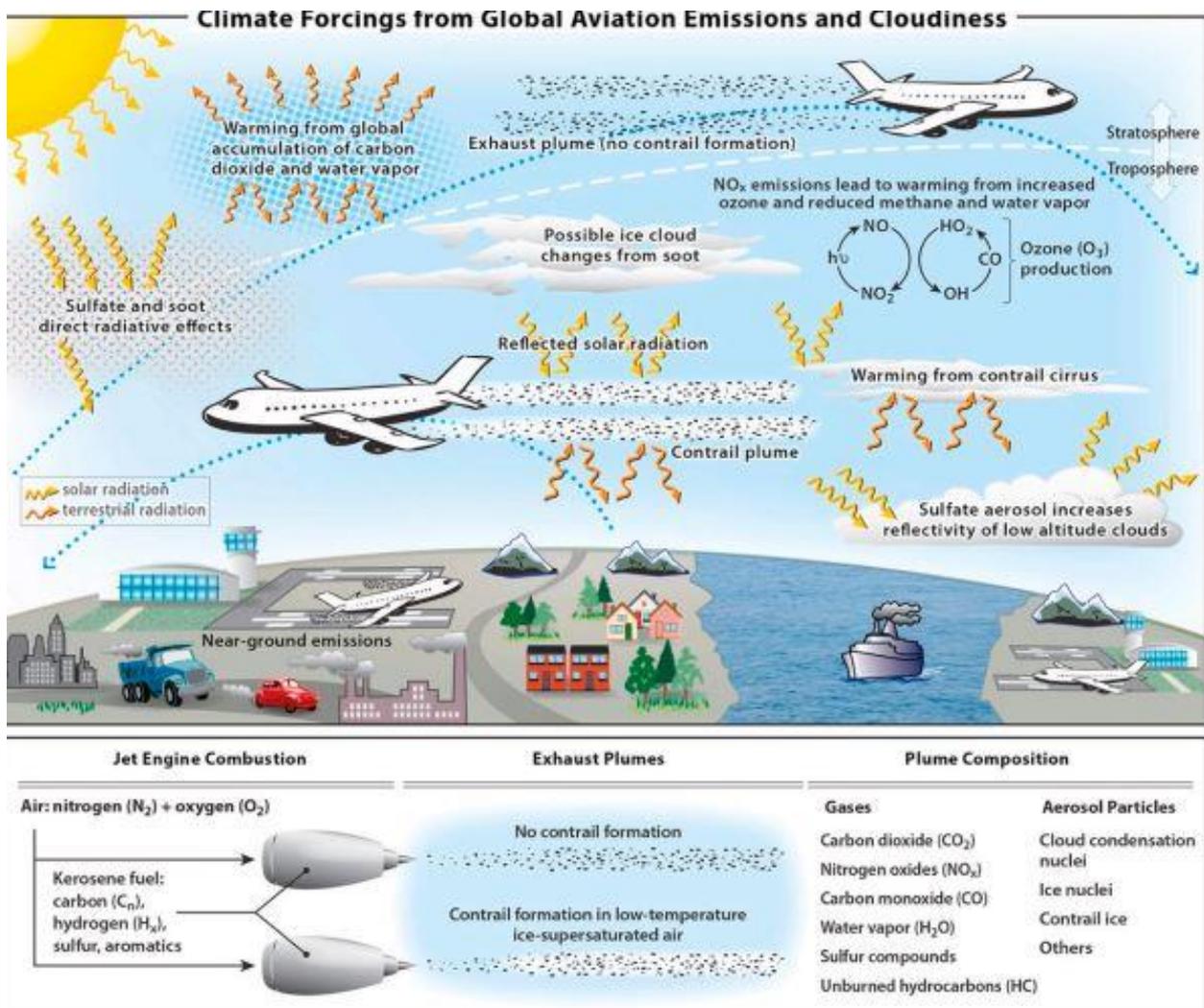


Figura 2: Descripción esquemática de los procesos mediante los cuales las emisiones de la aviación y el aumento de los cirros afectan al sistema climático. Fuente: **The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, Atmospheric Environment, Lee et al., 2020**

En el Sexto Informe del IPCC, se señala que la aviación está asociada con una variedad de forzadores del clima en diferentes plazos temporales. Por un lado aquellos cuya influencia decae rápidamente después de una o dos décadas desde su emisión, en particular las emisiones de NO_x y partículas de aerosol, junto con las emisiones de vapor de agua; por otro lado los que presentan una influencia mucho más persistente como el CO₂. Los mayores efectos entre los primeros corresponden a la formación de estelas persistentes de condensación y emisiones de NO_x que interactúan con otros componentes atmosféricos.

Las estelas persistentes son nubes de cristal de hielo que se forman alrededor de los aviones, a partir de partículas de hollín y vapor de agua del motor, inyectadas en ambiente frío y atmósfera sobresaturada respecto al hielo, que puede propagarse y formar nubes tipo cirros.

La influencia de los cirros y estelas inducidos por la aviación se estimó en el Sexto Informe del IPCC (figura 3), aunque con un nivel de confianza bajo, obteniéndose un incremento en la temperatura en 2019 respecto a la época preindustrial (1750) de 0,02 °C

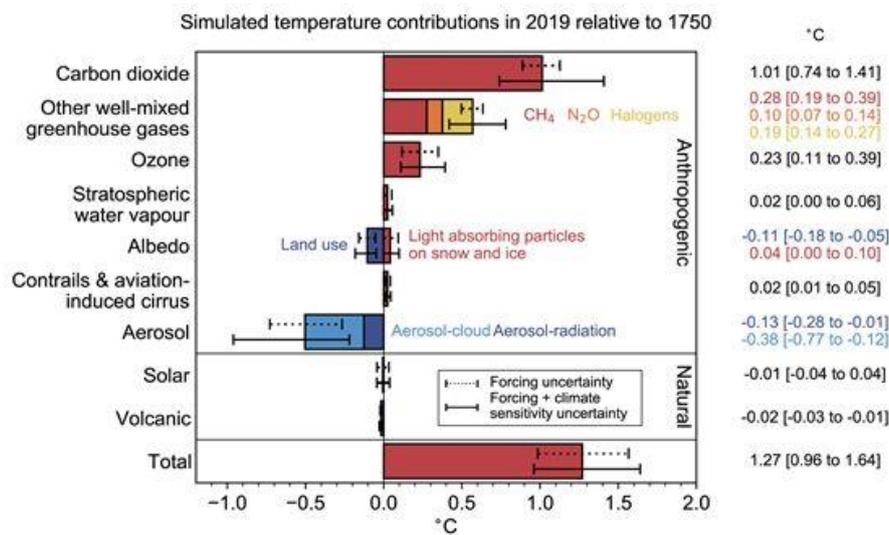


Figura 3: La Contribución de los diferentes agentes contribuyentes al cambio de temperatura de 2019 en relación con 1750.

Un análisis integral y cuantitativo de evaluación del impacto de la aviación sobre el clima, se realiza en el trabajo de Lee et al (2021), obteniendo resultados de las estimaciones en términos de forzamiento radiativo efectivo (ERF) de CO₂, NO_x, vapor de agua, cirros procedentes de estelas, e interacciones entre aerosoles-radiación y aerosoles-nubes con hollín y sulfato. El forzamiento radiativo es la variación, expresada en Wm⁻², del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar. Según lo anterior, el forzamiento radiativo mide el cambio en el balance de radiación de la Tierra debido a factores externos, mientras que el forzamiento radiativo efectivo considera cómo el sistema climático responde a esos cambios. Esta última medida es importante para comprender los efectos reales del cambio climático y cómo los diferentes forzamientos interactúan para determinar el calentamiento global y otros efectos en el sistema climático de la

Tierra. Extendiendo este análisis a datos históricos se han obtenido los resultados que se muestran en la figura 4 entre 1940 a 2018. Las barras y bigotes (líneas negras que se extienden paralelas a las barras) muestran las mejores estimaciones del forzamiento radiativo efectivo y los intervalos de confianza del 5 al 95 %, respectivamente. Las barras rojas indican términos de calentamiento y las barras azules de enfriamiento. Los valores numéricos de forzamiento radiativo efectivo (ERF, por sus siglas en inglés) y forzamiento radiativo (RF) se dan en las columnas con sus intervalos de confianza (5–95%), junto con las relaciones ERF/RF y los correspondientes niveles de confianza

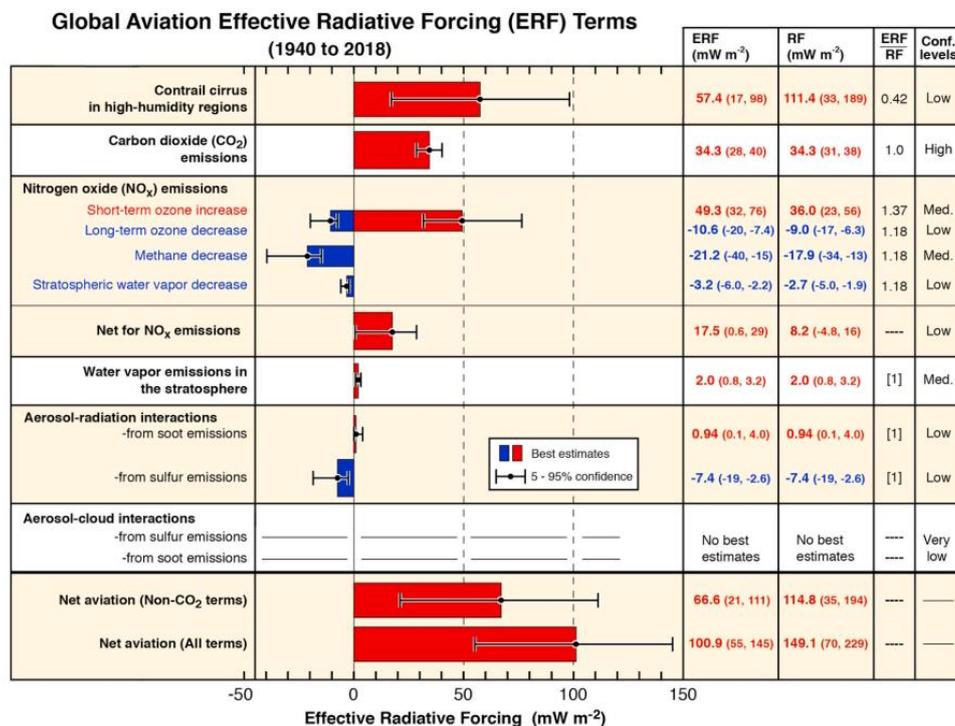


Fig. 4: Estimaciones de los términos de forzamiento climático de la aviación global desde 1940 hasta 2018 en mW/m².

8. ¿Por qué las estelas de los aviones son más frecuentes?

Hay dos factores que influyen en esa mayor frecuencia por un lado el incremento constante en el tráfico aéreo (ver figura 5).

Por otro lado la mayor eficiencia en los motores de los aviones hace que la formación de las estelas pueda ocurrir a temperaturas más altas. Según algunos estudios con observaciones incluidas (U. Schumann, 2000) la temperatura de los gases de escape de los motores disminuye al aumentar la eficiencia de propulsión, provocando la formación de estelas a niveles más bajos o en un rango más amplio de altitudes.

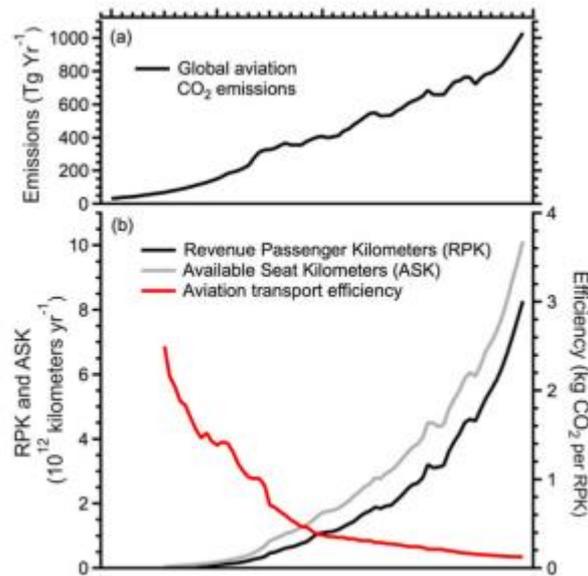


Figura 5: Datos relacionados con el crecimiento del tráfico aéreo y emisiones de CO₂ de 1940 a 2018 (Lee et al, 2021. Diversas fuentes)

Es de prever que el crecimiento del tráfico aéreo y los avances tecnológicos de los motores hagan aumentar la formación de estelas.

El impacto de las estelas es visible a veces desde los satélites meteorológicos, como podemos comprobar en esta imagen del satélite Terra de la NASA que nos mostraba @meteosojuela en un tuit, acompañada de sus fotos del cielo desde La Rioja (figura 6).



Figura 6: Imagen de satélite con imágenes de estelas en la Rioja

Las estelas en sí, son simples nubes de hielo, que no pueden envenenarnos, como temen algunos, sin embargo, el impacto de la aviación en la naturaleza es complejo, pero indudable, y no debemos minusvalorar sus consecuencias en el futuro del planeta.

9. ¿Por qué las estelas a veces se cruzan y en ocasiones incluso parecen formar una malla en el cielo?

La explicación está en el entramado que forman las aerovías establecidas para la navegación aérea, como se puede apreciar en la figura 7 de aerovías en el espacio aéreo superior de ENAIRE (accesible desde Insignia, <https://insignia.enaire.es/>).

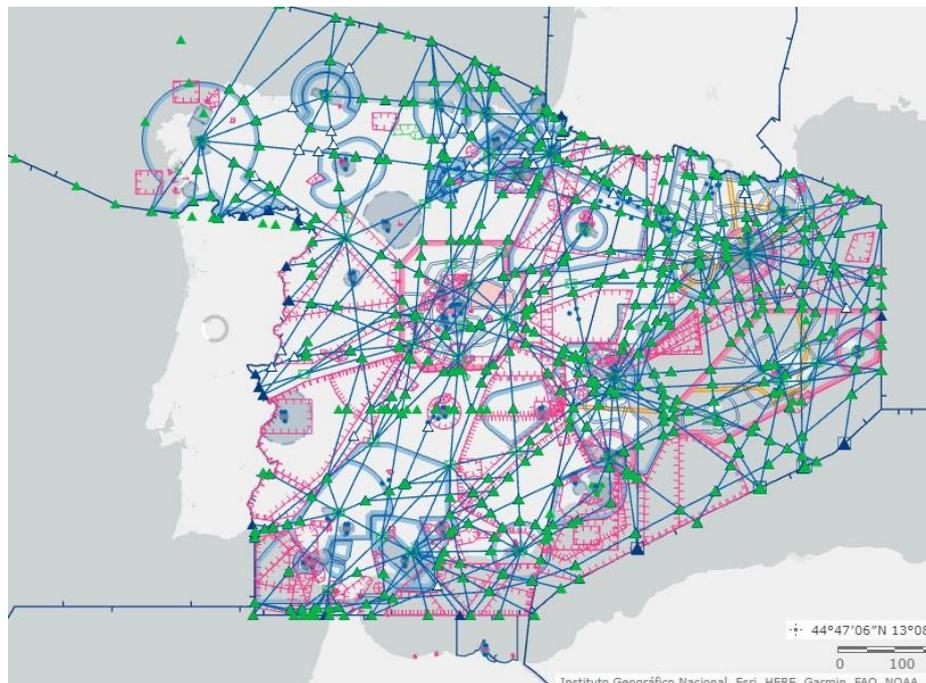


Figura 7: Captura de pantalla de ENAIRE-INSIGNIA de autovías y espacios aéreos

10. Entonces, ¿las emisiones de los motores de los aviones no producen ningún daño?

Como se ha señalado anteriormente el tráfico aéreo genera una serie de agentes forzadores del clima, cuya influencia se puede cuantificar entre un 3 y un 4 % del impacto de todas las actividades humanas en el cambio climático y que no se puede ni mucho menos despreciar.



AEMet

No obstante, y como ya se ha comentado antes, este impacto no está relacionado con algunas hipótesis pseudocientíficas de “fumigación” para eliminar la posibilidad de lluvia, ni otras similares, sino con el aumento del efecto invernadero.

Para hacernos una idea de la densidad del tráfico aéreo, este video de la Zurich School of Applied Sciences, *A Day in the Life of Air Traffic Over the World*, nos muestra el tráfico en todo el globo en un día: <https://youtu.be/G1L4GUA8arY?list=PL3416E39D02A5BFE9>

INFORMACIÓN ADICIONAL:

NASA: [“Contrails”](#)

United States Environmental Protection Agency (EPA): [“Aircraft Contrails Factsheet”, *contrails.pdf* \(faa.gov\)](#)

Federal Aviation Administration, US Department of Transportation: [“Contrails 101 \(faa.gov\)”](#)

J.M. Cisneros, 2008: [“Perturbaciones climáticas y esporádicas causadas por los aviones”, Cisneros \(aemet.es\)](#)

BIBLIOGRAFIA:

- Incertis D., 2014: [Por qué los chemtrails de metales no pueden existir, *http://500eurosportunchemtrail.blogspot.com*](http://500eurosportunchemtrail.blogspot.com)
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021. Chapter 7: The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi:10.1017/9781009157896.009.
- Lee D.S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M.R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S.J., Freeman S., Forster P.M., Fuglestedt J., Gettelman A, De Leon R.R., Lim L.L., Lund M.T., Millar R.J., Owen B., Penner J.E, Pitari G., Prather M.J., Sausen R., Wilcox L.J., 2020. The contribution of global aviation to



AEMet

anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment* 2020. Volume 244, January 2021, 117834
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

- Penner J.E., Lister D.H., Griggs D.J., Dokken D.J., McFarland M. 1999 : Aviation and the Global Atmosphere. Report. IPCC. Prepared in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Cambridge University Press, UK. pp 878. <https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/>
- Schumann U., Influence of propulsion efficiency on contrail formation, *Aerospace Science and Technology* (2000). Volume 4, Issue 6, September 2000 [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(00\)01062-2](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(00)01062-2)
- Schumann U., Busen R, 2000. Experimental Test of the Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation. *Journal of Aircraft* Vol. 37, No. 6, November–December 2000. <https://elib.dlr.de/9281/1/AIAA-2715-2000.pdf>
- Shearer C., West M., Caldeira K. and Davis S., 2016: Quantifying expert consensus against the existence of a secret, large-scale atmospheric spraying program, *Environmental Research Letters*, Volume 11, Number 8
- Szopa, S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W.D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N. and Zanis P., 2021. Chapter 6: Short-Lived Climate Forcers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, , M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817–922, doi:10.1017/9781009157896.008.
- Web NASA, The Globe Program: Predicting Contrails Using an Appleman Chart: <https://www.globe.gov/es/web/s-cool/home/observation-and-reporting/contrails/appleman-chart-teacher>

Noviembre 2023

National Aeronautics and Space Administration



Carta de Identificación y Guía de Formación de las Estelas de Vapor

¿Te has preguntado alguna vez lo que son esas líneas en el cielo? Las estelas de condensación son nubes que se forman cuando el vapor de agua se condensa y congela alrededor de partículas (aerosoles) que se dan en el escape de aeronaves. Esta tabla explica cómo y por qué se dan. Sigue los paneles 1-7 bajo estas líneas para aprender a leer el cielo.

Las nubes son la mayor variable controladora de la temperatura y clima de

la atmósfera terrestre. Cualquier cambio en la masa nubosa global puede contribuir a cambios a largo plazo en el clima terrestre. Las estelas, en especial las persistentes, representan un incremento de nubes en la tierra causadas por el hombre, y casi seguro están afectando el clima y a través de nuestros recursos naturales. Hoy en día, los científicos están intentando aprender más sobre la longevidad de las estelas persistentes y la manera en que puedan afectar el clima en el futuro.

Preparando el gráfico de las condiciones de las estelas.

El eje X (eje horizontal) representa la temperatura y el eje Y (eje vertical) representa la cantidad de humedad en la atmósfera.

Donde el agua cambia de estado.

El área azul en sombra (frío y húmeda) muestra las condiciones donde la condensación (de gas a líquido) ocurre en la atmósfera. Debido a que hace frío donde los aviones vuelan, cualquier gota de agua que se forme en el escape de la nave, se transformará en hielo (de líquido a sólido) al poco de formarse. El área a rayas muestra donde el hielo permanecerá. En el área blanca, el hielo se sublimará (de sólido a gas).

Típicos puntos de inicio, A y B.

La atmósfera despejada en la altitud elevada es normalmente fría y seca (punto A). El escape de la nave está caliente y húmedo (punto B).

El proceso de mezclado empieza en B y sigue hacia A.

1. El escape húmedo y caliente de la aeronave se entra al mezclarse con el aire hasta que alcanza la saturación en la curva de condensación.
2. (= F Formación de la estela)
3. Las gotas de agua se congelan y cristalizan.
4. Las gotas de agua se evaporan, pero los cristales de hielo persisten.
5. (= D Disipación de la estela) los cristales de hielo se subliman, y la estela se disipa.

5 Pasajeras

La estela que se forma y desaparece a medida que el avión pasa. Aunque su longitud permanece casi constante, puede ser muy corta o pueda llegar a ocupar una porción grande del cielo. Generalmente es muy delgada.

6 Persistentes

Una estela fina que permanece en el cielo tras haber desaparecido la nave. Estas estelas no son mucho más anchas que las pasajeras y son más delgadas que el grosor de un dedo sostenido a la distancia del brazo extendido.

7 Persistentes que se expanden.

Una estela gruesa que permanece en el cielo tras haber desaparecido el avión. Estas son más anchas que el grosor de un dedo sostenido a la distancia del brazo extendido. Estas estelas pueden durarse hasta parecer cirros de formación natural.

Estelas en aire seco + estelas pasajeras

El escape del avión se mezcla con el aire de la atmósfera a lo largo de la línea entre los puntos B y A. Una estela se forma en el punto F y persiste hasta el punto D. Cuando la línea recta entre los puntos A y B tan apenas se cruza con la curva de condensación, se forma una estela de vapor pasajera.

Estelas en aire frío + estelas persistentes

Cuando el punto A, es tal que la línea recta entre los puntos B y A, se cruza más allá del área de condensación, y A, está más cerca de la curva de sublimación, una estela más larga y duradera, o persistente se forma entre F y D.

Estelas en aire húmedo + estelas persistentes que se expanden

Cuando el punto A, está en la zona rayada (aire húmedo), la adición del escape caliente y húmedo del avión lleva a la formación de estelas persistentes, posiblemente que se expanden ya que las partículas de hielo formadas en el punto F no se sublimarán en el punto A.