

Títol del treball:

Anàlisi de les condicions meteorològiques que afavoreixen la formació de deixants de condensació

Estudiant: Joan Curiel Nicolau

Correu electrònic: joancurielnicolau@gmail.com

Grau en Ciències ambientals.

Tutor: Josep Calbó Angrill

Correu electrònic: josep.calbo@udg.edu

AGRAÏMENTS

Primer de tot m'agradaria agrair a totes les persones que han fet possible aquest TFG, sense vosaltres no hagués estat possible. Especialment vull agrair:

Al Grup de Recerca en Física Ambiental de la Universitat de Girona, els quals m'han tractat com un més de l'equip, m'han proporcionat tota l'ajuda, oportunitats i eines necessàries per completar aquest TFG.

Al meu tutor del treball, el Dr. Josep Calbó, per la seva atenció, dedicació i predisposició en tot moment a resoldre dubtes i oferir idees.

També al Jaume, estudiant del doctorat, per ajudar-me en tot moment.

Als meus amics i companys més propers, pels vostres ànims i consells en tot moment.

I evidentment a la meva família. Especialment, als meus pares, al meu germà, als meus padrins i a la Flavia, sense el vostre suport no hauria estat possible.

ÍNDEX

Resum	4
Reflexions d'ètica, sostenibilitat i gènere	7
1.-Introducció	9
1.1. Deixants de condensació i teories conspiranoiques	9
1.2. Classificació dels núvols	10
2.-Aims	13
3.-Marc teòric	14
4.-Metodologia	17
4.1. Estació meteorològica i les càmeres d'observació del cel	17
4.2. Les imatges del cel i el seu tractament	19
4.3. Tractament de dades dels radiosondatges	20
4.4. Tractament de dades dels vols d'avions	22
5.-Resultats i discussió	23
5.1. Estudi climàtic	23
5.2. Anàlisi de les condicions que produeixen esteles	26
5.3. Cas d'estudi	32
6. Conclusions	36
7. Bibliografia	38

RESUM

Des de la revolució industrial, les activitats humanes han modificat el clima i el temps; l'exemple més notable és l'escalfament global provocat per l'emissió de gasos amb efecte hivernacle. La formació de deixants de condensació, com a resultat dels gasos resultants de la combustió en les turbines dels avions a reacció, és una de les modificacions més visibles i conegudes. En efecte, la gran densitat de vols a nivells alts de la troposfera facilita que, depenent de les condicions ambientals, es formin aquests deixants, que si perduren en el temps es consideren núvols antropogènics.

Aquest treball pretén estudiar els deixants de condensació en el cel de Girona, des d'una doble vessant. Per una banda, obtenir una quantificació de la freqüència d'aquest fenomen. Per altra banda, comprovar les condicions a l'atmosfera que permeten (o no) la formació dels deixants. Amb aquest objectius, s'ha fet una revisió de la bibliografia existent, sobre les condicions en què es produeixen aquests deixants de condensació, i sobre els seus efectes. També s'ha fet una revisió exhaustiva de les imatges proporcionades per una càmera de visió hemisfèrica del Grup de Física Ambiental (GFA) de la universitat de Girona, corresponents a 10 anys (2013-2022). Per últim, s'han combinat aquestes observacions, amb les condicions atmosfèriques a l'alta troposfera, donades pels radiosondatges realitzats a la ciutat de Barcelona pel Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) i amb la informació dels vols comercials que van passar sobre Girona durant alguns dies de l'any 2022.

Els resultats indiquen que una mica més d'un d'entre cada quatre dies es pot observar, en algun moment del dia, deixants de condensació en el cel de Girona. És més habitual a l'hivern que a l'estiu, i pel matí o migdia que per la tarda. Per altra banda, totes les observacions de deixants (o la seva absència) es corresponen correctament amb el pas d'avions en nivells on les condicions ambientals, donades pel diagrama de Schumann, justifiquen la seva formació (o la seva inexistència).

RESUMEN

Desde la revolución industrial, las actividades humanas han modificado el clima y el tiempo; el ejemplo más notable es el calentamiento global provocado por la emisión de gases de efecto invernadero. La formación de estelas de condensación, como resultado de los gases resultantes de la combustión en las turbinas de los aviones a reacción, es una de las modificaciones más visibles y conocidas. En efecto, la gran densidad de vuelos a niveles altos de la troposfera facilita que, dependiendo de las condiciones ambientales, se formen estas estelas, que si perduran en el tiempo se consideran nubes antropogénicas.

Este trabajo pretende estudiar las estelas de condensación en el cielo de Girona, desde una doble vertiente. Por un lado, obtener una cuantificación de la frecuencia de ese fenómeno. Por otra parte, comprobar las condiciones en la atmósfera que permiten (o no) la formación de las estelas. Con estos objetivos, se ha realizado una revisión de la bibliografía existente, sobre las condiciones en que se producen estas estelas de condensación, y sobre sus efectos. También se ha realizado una revisión exhaustiva de las imágenes proporcionadas por una cámara de visión hemisférica del Grupo de Física Ambiental (GFA) de la universidad de Girona, correspondientes a 10 años (2013-2022). Por último, se han combinado estas observaciones, con las condiciones atmosféricas en la alta troposfera, dadas por los radiosondajes realizados en la ciudad de Barcelona por el Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) y con la información de los vuelos comerciales que pasaron sobre Girona durante algunos días del año 2022.

Los resultados indican que algo más de uno de entre cada cuatro días se puede observar, en algún momento del día, estelas de condensación en el cielo de Girona. Es más habitual en invierno que en verano, y por la mañana o mediodía que por la tarde. Por otra parte, todas las observaciones de estelas (o su ausencia) se corresponden correctamente con el paso de aviones en niveles donde las condiciones ambientales, dadas por el diagrama de Schumann, justifican su formación (o su inexistencia).

ABSTRACT

Since the industrial revolution, human activities have modified climate and weather; the most notable example is global warming caused by the emission of greenhouse gases. The formation of condensation trails, as a result of gases resulting from combustion in jet aircraft turbines, is one of the most visible and well-known modifications. Indeed, the high density of flights at high levels of the troposphere facilitates the formation of these trails, depending on the environmental conditions, which, if they persist over time, are considered anthropogenic clouds.

This work aims to study the condensation trails in the sky of Girona, from a double perspective. On the one hand, to obtain a quantification of the frequency of this phenomenon. On the other hand, to verify the conditions in the atmosphere that allow (or not) the formation of contrails. With these objectives in mind, a review of the existing literature on the conditions under which these condensation trails are produced and their effects has been carried out. An exhaustive review of the images provided by a hemispherical vision camera of the Environmental Physics Group (GFA) of the University of Girona, corresponding to 10 years (2013-2022), has also been carried out. Finally, these observations have been combined, with atmospheric conditions in the upper troposphere, given by radiosondages performed in the city of Barcelona by the Meteorological Service of Catalonia (SMC) and with information from commercial flights that passed over Girona during some days of the year 2022.

The results indicate that a little more than one in four days, at some time of the day, condensation trails can be observed in the sky of Girona. It is more common in winter than in summer, and in the morning or midday than in the afternoon. On the other hand, all observations of contrails (or their absence) correspond correctly with the passage of aircraft at levels where the environmental conditions, given by the Schumann diagram, justify their formation (or non-existence).

REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA

En aquest treball, tota la informació utilitzada per la seva elaboració ha estat correctament citada respectant els drets de propietat intel·lectual dels/les autors/es.

També cal afegir que no s'ha duit a terme cap actuació que tingués un impacte significatiu sobre el medi, ja que s'han fet servir dades ja existents d'imatges d'una càmera instal·lada a l'edifici de l'Escola Politècnica de la UdG i s'han consultat les dades del radiosondatge de Barcelona efectuat pel Servei Meteorològic.

Pel que fa al tractament de les imatges, la inspecció s'ha efectuat sobre les imatges originals, sense cap classe de manipulació. Igualment, els principis ètics en el tractament de dades també s'han aplicat a les dades dels radiosondatges, ja que s'han tractat tal com han estat enviades des del Servei Meteorològic de Catalunya, sense, òbviament, falsificar ni modificar cap dada.

En no implicar cap tractament de dades personals, ni experimentació en humans ni amb altres organismes vius, no considerem cap altre implicació ètica destacable.

REFLEXIÓ SOBRE SOSTENIBILITAT

Les esteles de condensació dels avions modifiquen l'estat de l'atmosfera, ja que es comporten, o són en realitat, núvols, cosa que pot tenir un impacte en el balanç energètic de la Terra. De fet, alguns estudis suggereixen que les esteles de condensació poden tenir un efecte d'escalfament a l'atmosfera. A més a més, encara que les esteles siguin més visibles, els avions que les provoquen emeten simultàniament grans quantitats de diòxid de carboni, influint doncs en l'escalfament local i el canvi climàtic per aquesta via. Per altra banda, també s'ha plantejat la qüestió de la contaminació de l'aire a una escala més local. Els motors de les aeronaus emeten diversos contaminants, inclosos els òxids de nitrogen i partícules de carboni negre. Aquestes emissions poden afectar la qualitat de l'aire a les àrees properes als aeroports.

En termes de sostenibilitat, és important cercar solucions que minimitzin els impactes negatius de les emissions dels avions, incloent-hi les esteles de condensació. Això implica l'adopció de tecnologies més netes i eficients a la indústria de l'aviació, així com el desenvolupament de polítiques i regulacions que promoguin pràctiques sostenibles. A més, es pot fomentar la investigació i desenvolupament d'avions més ecoeficients i combustibles alternatius per reduir encara més l'impacte ambiental de l'aviació.

La sostenibilitat de l'aviació en general és un desafiament complex que requereix un enfocament integral i col·laboratiu. És necessari trobar un equilibri entre els beneficis econòmics i socials que ofereix l'aviació i la necessitat de protegir el nostre medi ambient. En promoure la innovació i la consciència ambiental a la indústria de l'aviació, podem avançar cap a un futur en què la sostenibilitat i la mobilitat aèria coexisteixin de manera més harmoniosa.

REFLEXIÓ SOBRE PERSPECTIVA DE GÈNERE

Aquest treball evidencia un cop més que la societat, també en l'àmbit de la recerca científica, continua estant força monopolitzada pels homes. En tots els documents consultats, la majoria d'autors eren homes. S'ha realitzat un gràfic comparant la ràtio de dones i d'homes respecte del total d'autors dels textos consultats, tal com es pot observar en la figura A.

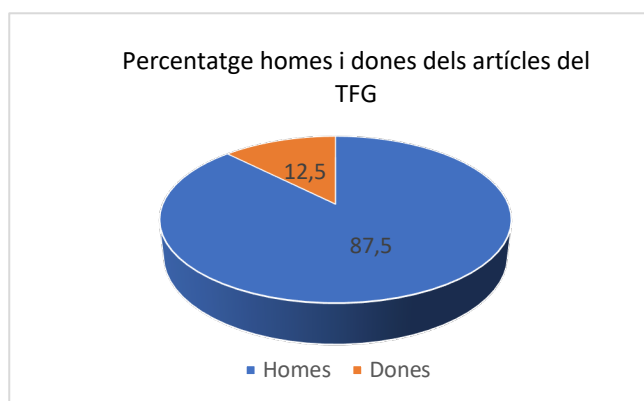


Figura A. Percentatge homes i dones dels articles usats per la realització del TFG. **Font:** Elaboració pròpia

Extrapolant l'experiència del Treball de Final de Grau a la meua formació universitària, he pogut constatar que l'androcentrisme hi continua essent molt present. Sí que és cert que a l'aula hi ha hagut sempre paritat o, fins i tot, més noies que nois. Aquest fet moltes vegades no coincideix amb el professorat. En el darrer any, entre els dos mòduls optatius que he realitzat, el professorat en un era el 100% d'homes i en el segon només un 40% eren dones. Així, sembla que quan s'accedeix a la docència i a la recerca, la igualtat s'esvaeix.

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Deixants de condensació i teories de conspiració

Des de l'aparició de l'aviació i sobretot des que els avions volen a nivells alts de l'atmosfera, s'ha manifestat un fenomen molt vistós, que és el rastre que deixen aquests avions en forma de línies blanques en el cel. En les darreres dècades, aquest fenomen, que anomenem esteles de condensació generades pels avions, deixants de condensació, o "contrails" en anglès, ha captat cada cop més atenció tant dels científics com del públic en general.

Els deixants de condensació són en realitat núvols de caràcter antropogènic que es formen per la condensació del vapor d'aigua dels gasos que s'escapen dels motors de les aeronaus, quan es donen unes certes condicions atmosfèriques. Darrerament, no obstant, un grup de persones s'han referit a aquestes esteles amb el nom de "chemtrail", proposant diverses teories de conspiració en relació a les esteles de condensació.



Figura 1. Deixant de condensació. **Font:** CNN

En efecte, els deixants de condensació estan actualment en el punt de mira de les teories de conspiració. Els rastres que els avions deixen a l'atmosfera, pels amants d'aquestes teories, són anomenats "chemtrail", paraula que prové de l'anglès "chemical trail" (Mazon et al., 2018). Segons aquestes persones, l'objectiu d'aquesta conspiració és la modificació del temps atmosfèric o el control o la intoxicació de la població a gran escala. Per posar en context la repercussió que tenen les teories de conspiració: "L'any 2011, Mercer, Keith i Sharp (2011) van donar a conèixer que el 14% de les persones que havien participat a l'enquesta, creien en part en les teories de conspiració relacionades amb els chemtrails, i un 3% n'estava completament convençut. Finalment, Shearer, West, Caldeira i Davis (2016) determinen que, a nivell internacional, gairebé el 17% de la població creu en l'existència de plans secrets d'escala globals associats als chemtrails" (Mazon et al., 2018).

Com bé es sap, però, res d'això es cert. Els "chemtrails" no són reals. Així ho publiquen diverses organitzacions, com són l'Agència de Protecció Ambiental dels EUA (EPA, 2000) i la NASA. Multitud d'estudis científics reafirmen la no existència d'aquests deixants químics; entre d'altres, veure Cairns (2006) o Shearer et al. (2016).

El que sí que és real es l'existència de contrails, formats per gotes d'aigua o cristalls de gel que ha condensat del vapor emès pels avions, i que han estat un subproducte de l'aviació d'ençà que els humans van començar a volar mitjançant motors de reacció (Pretor-Pinney i Sanderson, 2006; Tingley & Wagner, 2017).

1.2 Classificació dels núvols

Un núvol és un agregat visible de gotetes molt petites o cristalls de gel suspesos a l'aire. Alguns es poden trobar en elevades altituds mentre que d'altres gairebé toquen la superfície terrestre (Ahrens, 2009).

Els núvols es divideixen en 10 tipus bàsics (vegeu figura 2) que s'anomenen "gèneres", segons la classificació de l'Organització Meteorològica Mundial (OMM). L'esquema modern de classificació de núvols es pot trobar detalladament a "The International Cloud Atlas", el qual els classifica per gènere i espècie. Pel que fa als gèneres, aquesta classificació és la següent (Cloud Appreciation Society, pàgina web):

- **Núvols alts:** Cirrus, Cirrocumulus i Cirrostratus. En general compostos de cristalls de gel, d'aparença blanca i prima, tanmateix poden aparèixer de diferents colors quan el sol es troba baix a l'horitzó.
- **Núvols mitjans:** Altcumulus, Altostratus i Nimbostratus. Generalment, estan compostos per gotes d'aigua, encara que també poden estar formats per cristalls de gel quan les temperatures són prou baixes.
- **Núvols baixos:** Cumulus, Stratocumulus, Stratus i Cumulonimbus. Estan formats per gotes d'aigua, tot i que els Cumulonimbus, que presenten gran desenvolupament vertical, també contenen aigua gelada.



Figura 2: Els 10 tipus de núvols principals. **Font:** Cloud Appreciation Society

Cal dir que aquesta classificació es fa en funció de l'altitud en què es presenta la base del núvol. Així, els núvols alts es troben habitualment per damunt dels 6000 m, els mitjans entre 2000 i 6000 m, i els baixos presenten la seva base per sota de 2000 m d'altitud. No obstant, alguns núvols baixos, en particular els cumulonimbus, poden tenir un gran desenvolupament vertical, i els seus cims assoleixen altituds molt importants (10000 m).

Aquesta classificació, acompanyada de diverses espècies per cada gènere, i varietats, era suficient fins que es va tenir en compte una altra variable: l'origen dels núvols. Normalment, els núvols són formats només per causes naturals (evaporació, convecció, fronts d'aire, volcans...), però durant els darrers anys, diverses activitats humanes, a diferents nivells de l'atmosfera, han generat els seus propis núvols. Per poder donar importància a la presència d'aquests núvols formats com a conseqüència d'alguna activitat humana, es va crear el concepte de núvol antropogènic, com una manera de diferenciar els núvols generats per l'acció humana.

1.2.1 Concepte dels núvols antropogènics

Els núvols provocats per les accions humanes poden aparèixer a causa de diferents accions. A nivells baixos, aquests solen tenir l'origen a les xemeneies de les indústries, entre d'altres (Mazón et al., 2012). En canvi, els núvols alts són produïts, bàsicament, per les emissions dels avions o pels seus efectes aerodinàmics (Murcray,1970).

Per tal de diferenciar els núvols que s'han format de manera natural dels que s'han format a causa de l'activitat humana, es va proposar posar el prefix antropo- per tal de poder identificar-los (Mazón et al., 2012).

Per tant, així quedaria la classificació dels núvols antropogènics segons els diferents nivells:

- **Núvols alts:** Antropocirrus, Antropocirrocumulus i Antropocirrostratus.
- **Núvols mitjans:** Antropoaltocumulus, Antropoaltostratus i Antroponimbostratus.
- **Núvols baixos:** Antropocumulus, Antropostratocumulus, Antropostratus i Antropocumulonimbus.

Segons l'Atles de núvols de l'Organització Meteorològica Mundial, l'estela de condensació d'un avió és considerada un núvol quan perdura almenys 10 minuts, i en aquest cas deixaria de ser una estela de condensació per convertir-se oficialment en un núvol del tipus *Cirrus homogenitus*. En efecte, l'OMM va decidir optar per afegir "homogenitus" a la denominació del núvol en lloc de la proposta inicial del prefix "antropo-", però en el mateix sentit, és a dir, fent referència al fet que és una conseqüència de l'activitat humana. Si l'estela creix encara més i acaba prenent una forma de cirrus més natural, el seu nom complet passa a ser *Cirrus homogenitus homomutatus*.

1.2.2 Origen dels núvols antropogènics

Els núvols antropogènics són creats per l'acció humana, però hi ha diverses accions que poden desencadenar la formació d'aquests. Aquestes accions es poden classificar segons el tipus de núvol que s'ha creat.

A. Núvols antropogènics baixos:

Els núvols antropogènics de baix nivell són els més propensos a formar-se, especialment els antropocúmuls (aCu) i els antropostratocúmuls (aSc). Aquests núvols es poden generar per les emissions de zones industrials que alliberen energia tèrmica, conjuntament amb humitat, dins de l'aire fred inestable. La figura 3-4 mostra un aSc i un aCu generats per una zona industrial i una planta geotèrmica respectivament.



Figura 3-4: A l'esquerra, un antropostratocumulus observat a Berlin (Alemanya) i a la dreta un antropocumulus observat a Nesjavellir (Islàndia). **Font:** Mazón et al., 2012

B. Núvols antropogènics mitjans:

És molt poc probable que l'activitat humana participi en la formació de núvols en nivells mitjans de l'atmosfera. Per tant, probablement no existeixen antropovarietats dels núvols de nivell mitjà.

C. Núvols antropogènics alts:

La majoria dels antroponúvols de nivells alts són causats per la injecció de vapor d'aigua provinent dels motors dels avions. L'antropocirrocúmulus (aCc) és el més freqüent dels núvols d'alt nivell causats per l'alliberament de vapor d'aigua i la seva posterior condensació però també es poden formar antropocirrus (aCi) i antropocirrostratus (aCs) si aquests aCc inicials estan alineats o estesos respectivament. La figura 5 mostra aquests tres tipus de núvols antropogènics (aCc, aCi i aCs) (Mazón et al., 2012).



Figura 5. Antroponúvols d'alt nivell observats a Barcelona el Setembre del 2011. **Font:** Mazón et al., 2012

2 AIMS

The goal of this work is to study the atmospheric conditions under which condensation trails are produced in the sky of Girona. This general objective is deployed in two specific aims:

- To determine the evolution of condensation trails by means of a climatological study, based on 10 years (2013-2022) of observations.
- To analyze and verify the atmospheric conditions that favor the formation of condensation trails, in particular for a limited number of days in the year 2022.

3 MARC TEÒRIC

Les esteles de condensació són núvols de gel, en forma de llargues línies, que de vegades sorgeixen al pas d'un avió, principalment degut a la condensació del vapor d'aigua contingut a les emissions dels motors. De vegades també es formen un altre tipus d'esteles a la punta de les ales, per condensació del vapor atmosfèric a causa de la baixada de pressió i temperatura que es produeix al pas de l'avió, però aquestes últimes solen ocórrer en l'enlairament i l'aterratge, no durant el vol a nivells alts, i duren molt menys.

Els motors dels avions emeten vapor d'aigua, diòxid de carboni (CO_2), petites quantitats d'òxids de nitrogen (NO_x), hidrocarburs, monòxid de carboni, gasos de sofre i partícules de sutge i metall. De tots aquests gasos i partícules, el vapor d'aigua és l'únic rellevant per a la formació d'esteles, tot i que les partícules, que sovint contenen sofre, poden actuar com a nuclis de condensació, facilitant la formació d'esteles. Tanmateix, en general, hi ha prou partícules a l'aire que serveixen com a nuclis de condensació. La resta de gasos i partícules emesos pel motor dels avions no influeixen en la formació de les esteles, però òbviament, el diòxid de carboni té altres efectes rellevants, degut a que es tracta d'un gas que absorbeix fortament la radiació infraroja, és a dir un gas amb efecte hivernacle que contribueix a l'escalfament global.

Quan els gasos que emet l'avió es barregen amb l'aire circumdant, es refreden ràpidament i si la humitat a l'atmosfera és suficient perquè la barreja arribi a la saturació a la temperatura ambient, es produirà la condensació del vapor d'aigua. El nivell d'humitat de la barreja, és a dir, el que s'arribi a la saturació o no, dependrà de la temperatura i la humitat de l'aire, així com de la quantitat de vapor d'aigua i la temperatura de les emissions de l'avió (AEMET, 2022).

Segons l'AEMET (Agència Estatal de Meteorologia), podem diferenciar tres tipus d'esteles de condensació segons la durada i la intensitat:

- 1. Esteles de vida curta:** són com petites línies blanques que es poden observar darrere de l'avió, i que desapareixen ràpidament. Això passa quan la quantitat de vapor d'aigua que hi ha en l'atmosfera és petita, i per tant, les partícules de gel que formen l'estela tornen a estat gasós ràpidament.
- 2. Esteles persistents que no s'expandeixen:** són llargues línies blanques persistents, però que no creixen ni s'expandeixen. Passa quan la humitat en l'atmosfera és gran, per tant,

l'estela no es dissipa i pot persistir durant hores si l'ambient és a més estable (poc vent i poca turbulència).

- Esteles persistents que s'expandeixen:** són aquelles esteles que es van expandint i fent-se més grans i de forma irregular a mesura que el núvol creix. Això passa quan la humitat en l'atmosfera és pròxima al nivell de saturació, i és fàcil que el vapor d'aigua atmosfèric es condensi sobre les partícules de gel de l'estela. Si afegim que hi ha inestabilitat i turbulència, les esteles van agafant forma irregular. A més a més, aquestes esteles poden ser desplaçades pel vent.

Com s'ha dit, la formació d'aquestes esteles de condensació depèn de diversos factors. Els factors més importants són la temperatura i la humitat relativa de l'aire. N'hi ha d'altres que també juguen un paper en la formació. Aquests són la pressió (o l'altitud), la velocitat de l'avió i el tipus de motor que porta l'avió. Normalment, aquests deixants es troben per sobre els 8.000 metres d'altitud i a temperatures per davall dels -40°C .

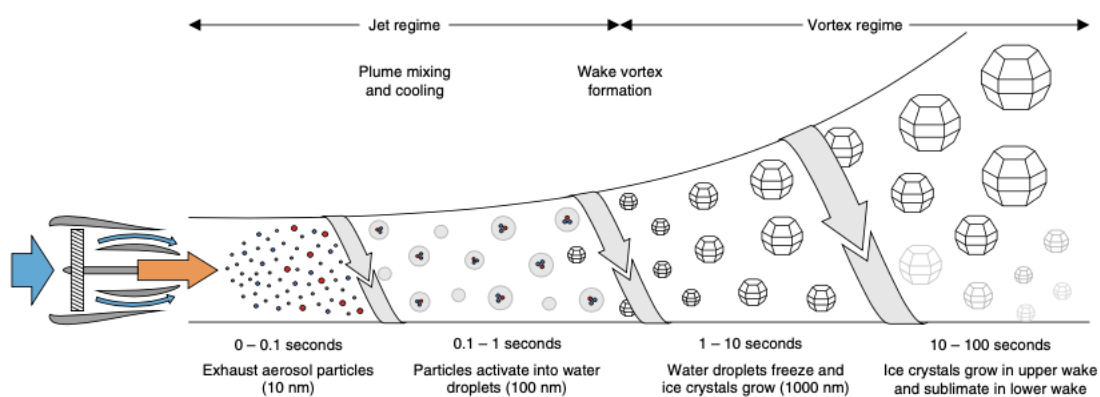


Figura 6. Processos que influeixen en l'etapa de formació de l'estela. **Font:** Kärcher (2018).

Com es pot veure en la figura 6, els plomalls d'escapament són produïts per la combustió de combustible i mescla d'aire a alta temperatura i pressió dins els motors a recció. Quan la mescla turbulenta amb l'aire ambient (fletxes) i el refredament associat produeixen una sobresaturació del plomall respecte l'aigua líquida, les partícules del plomall actuen com a nuclis de condensació, s'activen, l'aigua condensa al seu damunt i per tant es converteixen en gotes d'aigua (gotes grises), que posteriorment es congelen i creixen ràpidament mitjançant l'absorció de vapor d'aigua (per sublimació) formant així una estela visible.

Segons la revisió de Kärcher (2018), d'acord amb les observacions de diversos avions i un model de mescla termodinàmica, s'ha demostrat que les temperatures normalment per sota dels -40°C proporcionen un llindar per sota del qual apareixen esteles de curta o llarga

durada darrere dels avions a reacció que volen per sobre 8 km d'altitud. Cal dir que l'aparició de les esteles es pot predir amb més certesa si es coneix la pressió ambiental, la humitat relativa, les emissions de vapor d'aigua i calor i les característiques propulsives dels motors dels avions.

Així, el gràfic de Schumann (Figura 7) ens indica en quines ocasions es formaran "contrails", és a dir, deixants de condensació. El gràfic és un diagrama en què es representen tres variables, concretament l'altitud, la temperatura, i, a sobre, les línies que indiquen la humitat relativa respecte l'aigua líquida (que depèn de la temperatura i la pressió, la qual al seu torn depèn de l'altitud) a partir de les quals es formaran o no esteles. Per aquest diagrama s'assumeixen unes condicions determinades corresponents a un tipus de motor (eficiència de propulsió $h=0,3$, un fuel amb un índex d'emissió de vapor d'aigua $E_{H_2O}=1,223$ i un poder calorífic $Q=43,2 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) però es pot utilitzar de manera força general per la majoria d'avions a reacció habituals. Com es pot observar, per temperatures i altituds de vol per sota de la línia d'humitat relativa zero, sempre es formaran esteles de condensació. Per temperatures i altituds de vol per sobre la línia d'humitat relativa del 100%, mai es formaran esteles de condensació. Finalment, hi ha una zona de "transició" on és possible que es formin o no deixants de condensació, en aquest cas dependrà de la humitat relativa.

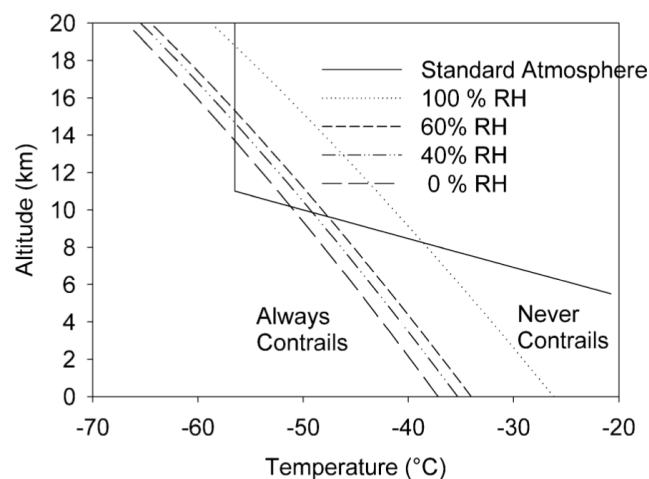


Figura 7. Gràfic amb les condicions per la formació de deixants de condensació. **Font:** Schumann, 2005

Tot i que la cobertura global de les esteles i els cirrus de les esteles és molt menor que la dels cirrus formats de manera natural, els seus efectes radiatius no són insignificants. L'avaluació de l'impacte de l'augment de la nuvolositat resultant de les esteles requereix la caracterització contínua de les esteles i el seu entorn durant tota la seva vida útil. A més, és difícil estimar el forçament radiatiu de les esteles i els cirrus de les esteles des d'una

perspectiva global perquè la cobertura global i les propietats òptiques d'aquests núvols no estan ben quantificades. Així, no hi ha un mètode establert per estimar el forçament radiatiu dels cirrus de les esteles (Burkhardt et al., 2010). S'han de tenir en compte les propietats òptiques de les partícules de gel per tal de determinar els efectes radiatius de les esteles i els antropocirrus conseqüents, ja que les variacions en el contingut de l'aigua gelada i la forma de les partícules i les distribucions de mida determinen les profunditats òptiques espectrals i, per tant, la quantitat de radiació d'ona curta que es reflecteix o absorbeix i la quantitat de radiació d'ona llarga que s'absorbeix (Yang et al., 2010).

Sigui com sigui, l'aviació produeix aproximadament el 2,5 % de les emissions de CO₂, l'1,9% dels gasos d'efecte hivernacle i el 3,5% del forçament radiatiu antropogènic causant del canvi climàtic. D'aquest 3,5%, com a mínim una tercera part és a causa dels deixants de condensació.

Segons l'estudi "Aviation Contrail Cirrus and Radiative Forcing Over Europe During 6 Months of COVID-19" (Schumann et al., 2021), durant la pandèmia COVID-19, el trànsit aeri es va reduir en un 72% a Europa entre març i agost del 2020 en comparació del 2019. La cobertura modelitzada de contrails va disminuir de manera similar i el forçament radiatiu calculat va disminuir regionalment fins a 0.7 W/m².

4 METODOLOGIA I DADES

Per poder dur a terme la identificació de les esteles de condensació i avaluar les condicions en què s'han format, s'han emprat diverses dades que s'han tractat amb diferents mètodes. En primer lloc, s'ha utilitzat la càmera de visió hemisfèrica de l'estació meteorològica del Grup de Física ambiental (GFA) de la Universitat de Girona; després, s'han utilitzat els radiosondatges duits a terme a la ciutat de Barcelona pel Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat) en combinació amb els registres dels avions que van passar per damunt Girona.

4.1 Estació meteorològica i les càmeres d'observació del cel

L'estació meteorològica i radiomètrica de la Universitat de Girona es troba situada al terrat de l'edifici PII de l'Escola Politècnica Superior (41.96° N, 2.83° E 110m s. n. m.), on s'hi recullen diverses variables meteorològiques i de radiació amb continuïtat des de l'any 1993. Les mesures es fan de manera automatitzada, i s'agreguen en valors mitjans o integracions en diferents intervals. Diàriament es duu a terme un protocol de manteniment i control de

qualitat. Els arxius de dades també són revisats posteriorment (Grup de Física Ambiental, pàgina web). En l'estació meteorològica hi ha el conjunt d'instruments i sensors meteorològics més habituals, així com una sèrie de sensors més específics relacionats amb la radiació i l'observació de núvols. Així mateix, a l'estació hi ha una càmera de visió hemisfèrica que fotografia continuament el cel. De fet, al llarg dels anys s'han instal·lat fins a tres diferents càmeres, seguint l'evolució de la tecnologia de la fotograria digital i la disponibilitat de càmeres comercials.

D'una banda, la càmera que anomenem WSC (de "whole sky càmera") és una càmera digital dotada d'un objectiu d'ull de peix per aconseguir una visió hemisfèrica, muntada amb un sistema ombrejador. Enregistra captures del cel en format JPG, i emmagatzema tota la informació al servidor informàtic del Departament de Física, **Nimbus**. Aquestes imatges es poden tractar amb diferents algorismes per determinar la cobertura de núvols, quins tipus de núvols hi ha, etc. La càmera WSC va substituir una càmera anterior que s'havia instal·lat el 2001, va entrar en funcionament l'any 2008 i es va canviar per la nova, la SONA, l'any 2015. Mentre va estar en funcionament, la WSC enregistrava imatges cada minut durant les hores amb llum de dia (Figura 8).

La càmera SONA és una càmera d'observació del cel que és fabricada i comercialitzada per una empresa de les Illes Canàries (SIELTEC). Envia les captures de les imatges del cel a un ordinador anomenat **nano** i aquest al servidor **Cumulus** el qual emmagatzema totes les dades. L'última captura d'aquesta càmera de visió hemisfèrica es pot veure en temps real a la pàgina web del grup de física ambiental. Aquesta càmera va començar a entrar en funcionament a finals de l'any 2015 i, actualment, encara està en funcionament. Aquesta càmera està programada per obtenir imatges durant les 24 h del dia (Figura 9), canviant el temps d'exposició de manera que s'aconsegueixin imatges nocturnes útils.

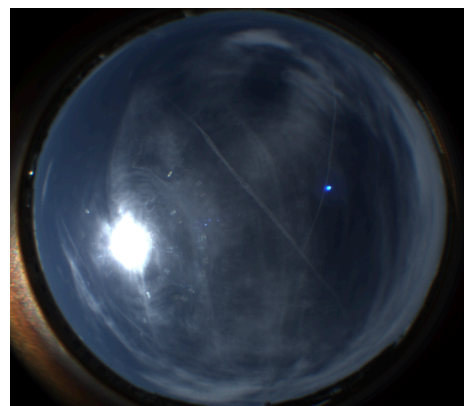
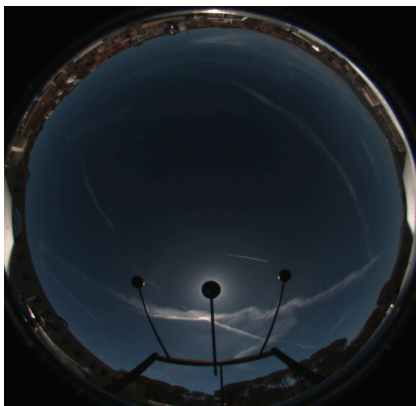


Figura 8 i 9: A l'esquerra, imatge presa per la WSC, amb sistema ombrejador; a la dreta, imatge presa per la SONA, sense sistema ombrejador. **Font:** Grup de recerca de física ambiental

4.2 Les imatges del cel i el seu tractament

Així doncs, es disposa de totes les fotografies, que es troben en format PNG o JPG, obtingudes des de l'any 2013 fins l'any 2022, des de les càmeres "WSC" o "SONA" (segons el període). Això significa un volum de més de 4 milions d'imatges. Com que es va optar per una inspecció visual, aquest nombre d'imatges seria inabastable. Per tant, vam optar per triar tres moments al dia (matí, entre 9 i 10 h; migdia, entre 12 i 13 h; tarda, entre 15 i 16 h) per inspeccionar les imatges en aquests intervals. Totes les hores són de temps universal "UTC". Es van triar aquests instants perquè durant tot l'any (incloent hivern) hi ha prou llum com perquè hi hagi imatges del cel disponibles fins i tot de la càmera WSC. Així, s'haurien d'haver visualitzat un màxim de 648.000 fotografies. A la pràctica, han estat força menys, tant per alguns períodes en què les càmeres no van funcionar, com perquè la sistemàtica d'inspecció visual feia que quan ja es detectava un deixant en una imatge dins l'interval horari, ja no es continuava amb la resta d'imatges. Igualment, amb dies amb pluja, o totalment coberts de núvols, no calia inspeccionar totes les imatges dins de l'hora.

A partir de les imatges, s'ha confeccionat una base de dades que conté les observacions dels deixants de condensació. La base de dades s'ha confeccionat mitjançant el treball manual d'escombratge de cada hora acordada i dels anys mencionats anteriorment. Com s'ha dit, l'escombratge es du a terme fins als 60 minuts posteriors a l'hora acordada, és a dir, es miren les fotografies de les 09:00 a les 10:00, de les 12:00 a les 13:00 i de les 15:00 a les 16:00. Si en una fotografia es detecten deixants, ja no es miren les següents, a no ser que hi hagi dubtes (normalment, és més fàcil la codificació a partir de l'evolució que no a partir d'una sola imatge).

A continuació, les dades es traslladen a un arxiu en format Excel. Concretament, per cada mes es crea una taula d'Excel on es posa en una columna els dies del mes, i en les files es posa les 3 hores revisades. S'ha creat aquesta codificació de "1" i "0" per tal d'identificar els instants on hi ha, o no, deixants de condensació. És a dir, quan es detecta presència de deixants de condensació, es posa un "1" en la casella corresponent. En el cas que no es detecti esteles de condensació, a l'Excel, al dia i a l'hora corresponent es posarà un "0". S'ha d'especificar que quan es detecta un deixant, independentment de la durada en minuts que tenguí, a l'Excel es considera com a detecció, és a dir, es posa un "1" a la casella corresponent. Tampoc es compta el nombre de deixants, ni la seva longitud o extensió espacial.

Pel tractament de les dades s'ha fet diferents estudis estadístics. En el primer cas, per cada any s'han comptat el número de dies amb alguna detecció en alguna de les tres hores. A partir d'aquí s'ha calculat la freqüència relativa (%).

A continuació s'ha analitzat per mesos el període estudiat. És a dir, s'ha realitzat un recompte dels dies amb alguna estela i s'ha calculat la freqüència relativa (%) de cada mes. També, per cada mes, s'han comptat per hores les deteccions, i finalment, s'han calculat la distribució relativa (%) de les esteles detectades entre les hores d'observació (09 h, 12 h, 15 h) per cada mes del període 2013-2022.

Per acabar, cal esmentar que alguns dies la càmera no estava disponible, per tant hi ha dies que no es tenia imatges del cel. S'ha considerat que si en un mes específic hi havia més de 10 dies perduts, sense imatges, el valor d'aquell mes no és representatiu, i s'ha eliminat el registre corresponent. A continuació, s'ha substituït aquest registre eliminat pel valor de la mitjana per aquell mes calculada amb la resta d'anys. És a dir, s'ha aplicat una versió simplificada de les tècniques de "gap filling" que es fan servir habitualment en una anàlisi de sèries climàtiques, per evitar biaixos derivats de dades incorrectes o incompletes.

4.3 Tractament de dades de radiosondatges

Per començar, cal explicar que és un radiosondatge. Un radiosondatge és el resultat de les mesures de diverses variables atmosfèriques en diversos nivells de l'atmosfera. Consisteix en el llançament d'una sonda, que és impulsada per un globus (inflat amb heli), i que ascendeix fins a uns 25 km d'altitud. La sonda està equipada d'una emissora de ràdio que transmet les dades que va registrant a l'estació de superfície. Les variables que s'obtenen són la temperatura, la humitat relativa, la pressió, i la força i la direcció del vent a diferents altures.

El radiosondatge que hem utilitzat per obtenir les dades es realitza a Barcelona, concretament des de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona. Es duu a terme dues vegades al dia, a les 00 i a les 12 UTC. En el cas d'aquest estudi, s'han analitzat les dades del radiosondatge de les 12 UTC, ja que és més proper a les hores en què hem detectat la presència d'esteles a partir de les imatges de les càmeres (recordem que no s'han inspeccionat imatges nocturnes).

Encara que l'estudi sigui de l'àrea de Girona, s'han fet servir els radiosondatges de Barcelona per l'absència de radiosondatge a Girona. Es creu que aquestes dades de Barcelona ens seran útils per la proximitat (menys de 100 km), i pel fet que les dades que són rellevants són

de nivells alts de l'atmosfera, on la variació amb la distància és menys important.

Com es pot veure en la figura 10, la troposfera és la capa que va des de la superfície terrestre fins a uns 12 km d'altitud. Es pot observar que la temperatura disminueix a mesura que l'altitud augmenta. Recordem que per una atmosfera estàndard, la temperatura disminueix 6,5°C per cada quilòmetre d'altura (en la figura 10, el gradient és una mica més alt, especialment en els nivells més propers a la superfície). Aquesta regió conté quasi el 99% del vapor d'aigua de l'atmosfera, com es veu en la figura 10, la humitat relativa va variant segons l'altitud, fins als 12 km, la tropopausa, on comença a disminuir molt notablement. En efecte, per damunt, el radiosondatge penetra en l'estratosfera, que va des de la tropopausa fins a uns 50 km d'altitud. En aquesta zona la temperatura primer és constant i després augmenta amb l'altura, mentre que la humitat relativa, com es pot veure en el gràfic de la figura 10, continua disminuint fins a arribar al 0% d'humitat relativa.

Dels 10 anys analitzats anteriorment, s'ha elegit un any, en aquest cas l'any 2022 (perquè és el més recent, i per tant, és més fàcil aconseguir també la informació dels vols) per fer una anàlisi més profunda. D'aquest any s'han elegit una sèrie de dies per cada mes de l'any on en dues o tres hores hi ha detecció de deixants de condensació (excepte pels mesos d'estiu, en què això no passa mai, i s'han triat com a cas totalment oposat, dies sense deixants). Així, es varen demanar al Servei Meteorològic de Catalunya els radiosondatges de 23 dies de l'any 2022, repartits entre tots els mesos de l'any, i incloent dies sense esteles.

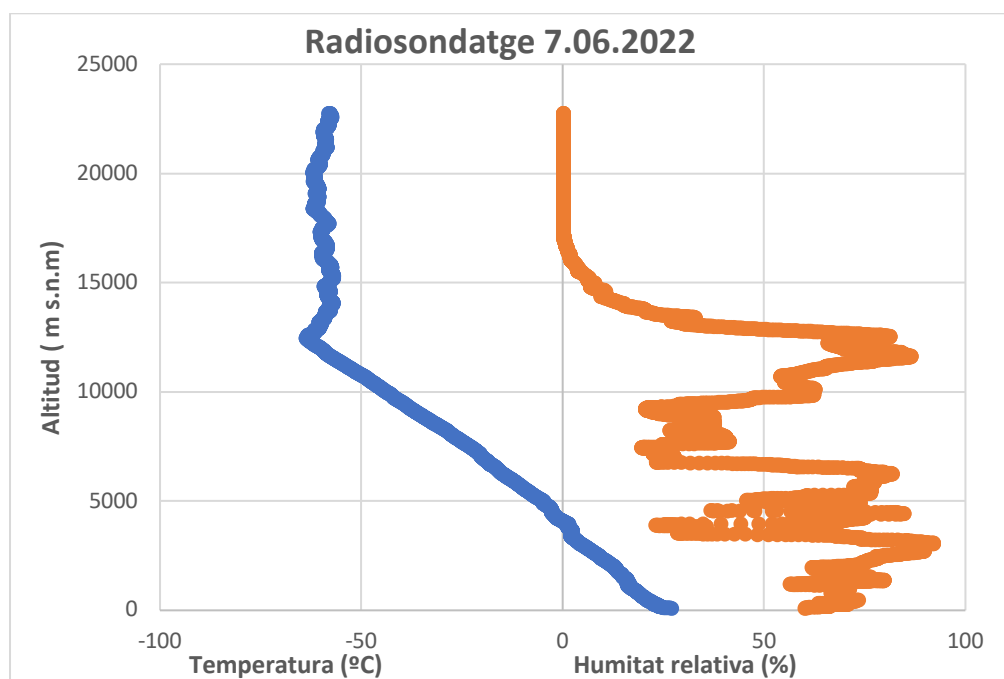


Figura 10. Radiosondatge del dia 7 de juny de l'any 2022. Font: Dades del Meteocat i elaboració pròpia.

Una vegada obtingudes les dades, aquestes han vingut comprimides en un arxiu que s'ha hagut de descomprimir prèviament. Després ha resultat que cada arxiu corresponia a un radiosondatge d'un dia. Per tant, tenint en compte que els arxius venien en un format "TXT", per una millor visualització s'han convertit aquests arxius a un format "EXCEL". Finalment, s'ha generat els gràfics de les dues variables rellevants i que s'han tingut en compte (la temperatura i la humitat relativa) en funció de l'altitud (Figura 10).

4.4 Tractament de dades dels vols d'avions.

Mitjançant la pàgina web *Flightradar24*, s'ha pogut accedir a les dades dels avions que sobrevolaren una àrea determinada del cel de Girona els dies elegits de l'any 2022 per poder dur a terme l'anàlisi de les condicions atmosfèriques (Figura 11). D'aquesta web es poden treure moltes variables, com poden ser número de vol, tipus d'avió, antiguitat de l'avió, ruta, altura, velocitat, temperatura i vent entre d'altres.

En aquest cas, la variable que s'ha tingut en compte ha estat l'altitud. A partir d'aquí s'ha confeccionat una base de dades, on s'ha classificat tots els avions que volaven per l'àrea determinada durant el període de temps de les 12 h a les 13 h (ja que és l'hora per la que tenim els radiosondatges i les imatges inspeccionades) dels dies seleccionats de l'any 2022.

L'àrea que s'ha inspeccionat té uns 50 x 40 km de superfície, centrada a Girona, assumint que aquesta superfície és visible per la càmera de visió del cel. Els nivells de vols més típics que s'han trobat han estat a partir dels 9.000 metres fins als 12.500 metres d'altitud, és a dir, altituds de creuer. Finalment, les direccions més freqüents han estat de nord a sud, i de nord-est a sud-oest.



Figura 11. Àrea seleccionada per on sobrevolaven els avions per la seva identificació. **Font:** Flightradar24 i elaboració pròpia.

5 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats s'han dividit en 3 apartats. En el primer es donaran els resultats de l'estudi que té una orientació climàtica, a partir dels deu anys analitzats; en el segon s'analitzaran els dies seleccionats de l'any 2022 relacionant les observacions dels deixants amb les condicions donades pel respectiu radiosondatge i amb el diagrama de formació d'esteles (Schumann, 2005); finalment, en el tercer apartat es mostra en detall un cas d'estudi, un dia en concret de l'any 2022.

5.1 Estudi climàtic

Primer de tot s'ha fet un anàlisi del conjunt de dades obtingudes al llarg dels anys, per veure com es distribueixen les esteles. Com s'ha mencionat en el tractament de dades, s'ha realitzat una correcció en les dades, ja que en un primer anàlisi es va detectar un cert biaix en el resultat com a conseqüència dels dies no disponibles, és a dir dies sense imatges degut a errades de funcionament de les càmeres. En efecte, com es pot veure en la figura 12, la freqüència de dies amb alguna estela observada està entre poc menys del 20% i el 40% amb les observacions sense corregir.

En canvi, una vegada aplicada la tècnica de correcció de dades inexistent, la freqüència de dies amb observacions d'esteles passa a ser entre el 20% i el 35%. La freqüència mitjana pels 10 anys analitzats és de 27,6%. Això és un valor força elevat, representa que en més d'una quarta part dels dies s'observen esteles, més notable encara si es té en compte que quan el cel està cobert de núvols és impossible detectar esteles des de la superfície. Es troba un mínim a l'any 2021, que podria estar relacionat amb la disminució dels vols degut a la pandèmia provocada pel COVID-19. De fet, fent referència a la pandèmia, es pot observar que els anys en que es va estar immersos dins la pandèmia, en aquest cas, els anys 2020 i 2021, es veu una tendència a la baixa que comença l'any 2020 i arriba al punt més baix a l'any 2021. En canvi, el punt màxim es troba a l'any 2017, tot i que amb una freqüència similar als anys 2014 i 2015. Finalment, cal dir que no s'observa cap tendència general cap a un increment o una disminució de les esteles, almenys durant els 10 anys analitzats (s'ha comprovat que la tendència no és estadísticament significativa).

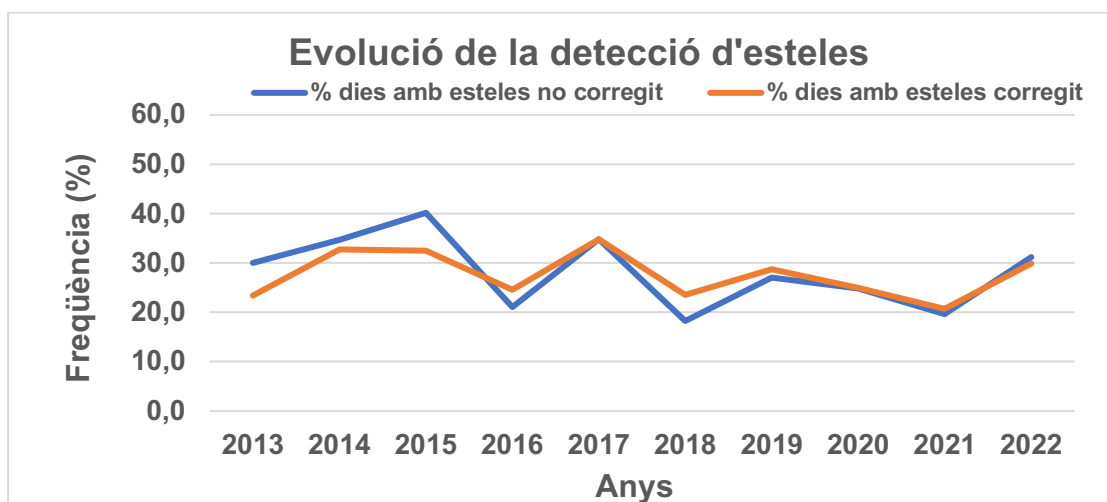


Figura 12. Evolució de la detecció d'esteles al llarg de 10 anys. **Font:** Elaboració pròpia

Per altra banda, s'ha confeccionat un gràfic amb les freqüències mitjanes mensuals pel període estudiat, des de l'any 2013 a l'any 2022, per comprovar si es detecta alguna estacionalitat en els deixants visibles en el cel de Girona (Figura 13). S'observa clarament que els mesos amb menys deixants visibles es troben durant l'estiu, en particular els mesos de juliol (<10%) i agost (<20%). Això es correspon a la termodinàmica de l'atmosfera on els mesos de l'estiu les temperatures són més altes. Pel que fa a la resta dels mesos la freqüència d'observació d'esteles es troba entre el 28% i el 37% (amb valors més elevats per mesos més freds, com ara Desembre i Gener, però també a l'Octubre).

Tot i que no es mostra en el gràfic, s'ha observat específicament els mesos de la pandèmia. Així, si els mesos de març, abril i maig tenen una freqüència mitjana relativa de 26,5%, 28,9% i 28,3 % respectivament, l'any 2020 aquests mesos varen tenir una freqüència relativa de 19%, 0% i 25% respectivament. Es pot observar, doncs, que en els mesos més durs de confinament la mitjana va estar per sota la freqüència relativa corresponent (el valor del mes de maig no es troba tan per sota, hipotèticament pel començament de la desescalada de la quarantena).

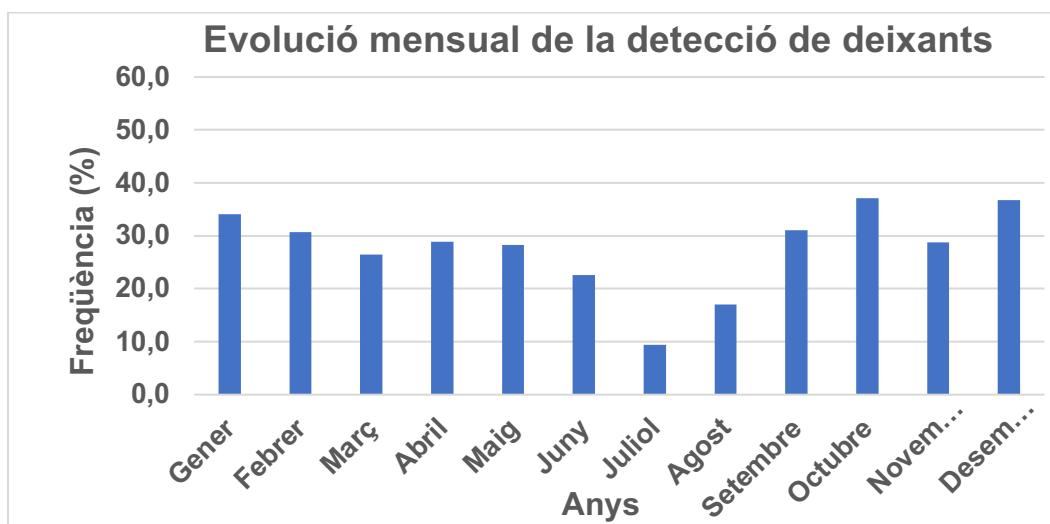


Figura 13. Evolució mensual de pel període 2013-2022. **Font:** Elaboració pròpia

Finalment, en la figura 14, es mostra la freqüència relativa del repartiment de les observacions de cada mes entre les tres hores d'observació (09 h, 12 h, 15 h). En general, la freqüència màxima es troba a les 12 hores. En algun cas, a les 09 h també hi ha força deteccions. En canvi, a les 15 h, s'observa un patró generalitzat en què es veu que és l'hora amb menys detecció de deixants. Una hipòtesi del perquè és degut aquest fet és per la freqüència de vols que, probablement, és més alta al matí/migdia sobre el cel de Girona. També, cal mencionar que força tardes hi ha més núvols que als matins, degut als núvols d'evolució diürna, la qual cosa impedeix la detecció de deixants.

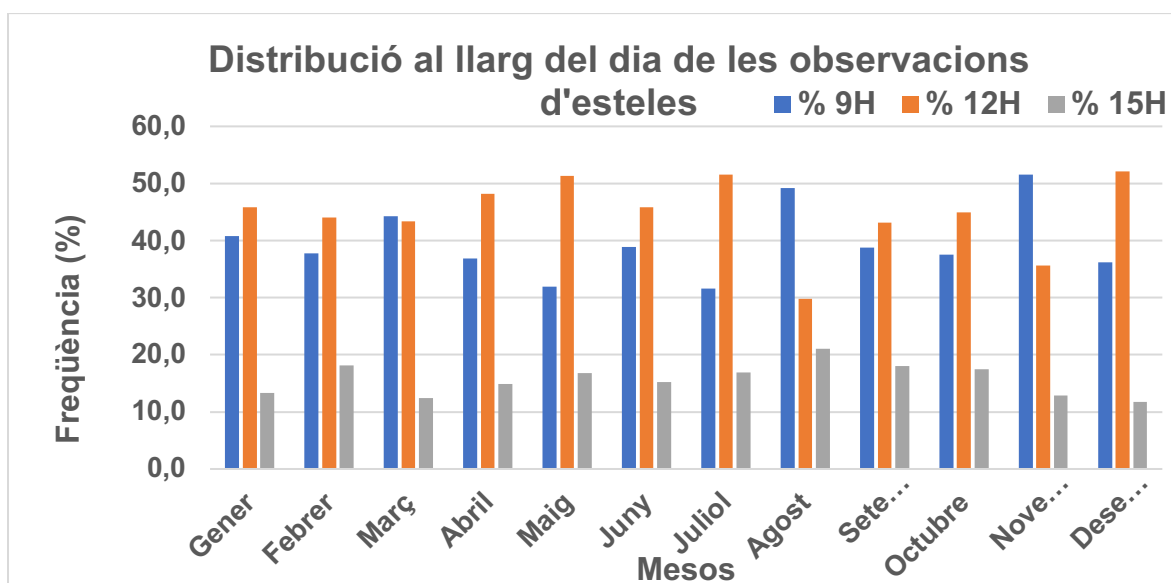


Figura 14. Distribució al llarg del dia de les observacions d'esteles. **Font:** Elaboració pròpia

5.2 Anàlisi de les condicions que produeixen esteles

En aquest apartat s'analitzaran les condicions en què es produeixen les esteles de condensació. A continuació es presenta una taula (taula 1) on s'han seleccionat els dies de l'any 2022 que tenen esteles almenys en dues de les tres hores. Per, també hi trobam dos dies on només es va detectar esteles en una de les tres hores observades, i quatre dies d'estiu en què no es van detectar esteles, tot i presentar cels serens. A partir d'aquí s'ha comptabilitzat, mitjançant el Flightradar24, el nombre total d'avions que sobrevolen el cel de Girona en les hores observades, i l'altura en què ho fan. Finalment, mitjançant els radiosondatges, s'ha pogut comprovar mitjançant el gràfic de Schumann que hi ha una total coherència amb la formació de l'esteles i els avions que sobrevolaren el cel de Girona a les 12 h de cada dia. Cal dir que en els dies que només hi ha deteccions en hores diferents a les 12 h, s'ha utilitzat els nivells de vol de les hores en què s'han detectat. Això ha passat el dia 28/03; 21/05; 04/06 (tot i que s'han combinat aquests nivells de vol amb el radiosondatge de les 12 h).

Taula 1. Detecció dels dies amb esteles de l'any 2022. **Font:** Elaboració pròpia

DATA	HORA DETECCIÓ	Nº AVIONS	RANG DE VOL (m)	COHERÈNCIA AMB GRÀFIC SCHUMANN (2005) **
04.01	09H/12H/15H	22	10.700-12.500	SÍ
09.02	09H/12H/15H	22	10.000-12.300	SÍ
18.02	09H/12H/15H	28	10.000-12.500	SÍ
26.02	09H/12H/15H	30	9.300-11.300	SÍ
09.03	12H	12	10.700-11.900	SÍ
28.03	15H	4	10.700-11.300	SÍ
22.04	09H/12H	17	9.300-12.500	SÍ
13.05	09H/12H	28	9.200-12.500	SÍ
21.05	09H/15H	32	9.200-12.500	SÍ
22.05	09H/12H	26	9.200-12.500	SÍ
04.06	09H/15H	31	9.300-12.500	SÍ
07.06	09H/12H	25	9.400-11.500	SÍ
16.06	12H/15H	32	10.100-13.500	SÍ
05.07	-	7*	9.500-12.500	SÍ
20.07	-	9*	8.900-11.900	SÍ
03.08	-	9*	10.700-12.500	SÍ
15.08	-	9*	9.400-11.900	SÍ
18.09	09H/12H/15H	34	8.300-12.500	SÍ
03.10	09H/12H/15H	29	9.300-12.500	SÍ
25.10	09H/12H/15H	22	8.300-12.500	SÍ
07.11	09H/12H/15H	25	9.700-12.500	SÍ
23.12	09H/12H/15H	22	9.700-11.900	SÍ
25.12	09H/12H/15H	28	9.500-12.500	SÍ
26.12	09H/12H/15H	25	9.500-12.500	SÍ

*En aquest cas, com que no s'han detectat esteles a cap hora, només s'han comptabilitzat els avions en el període de temps de les 12-13 h ja que és l'hora en què es realitzen els radiosondatges.

Per explicar amb més detall com s'ha fet l'anàlisi de la coherència del diagrama de Schumann, s'han elegit quatre dies d'entre els analitzats de l'any 2022. En aquest cas, cada un dels dies elegits corresponen a una estació climatològica. Cal dir que tres dels quatre dies seleccionats són dies en què sí que s'han detectat deixants de condensació, en canvi el dia que fa referència a l'estiu és un dia en què no es va detectar cap deixant de condensació. Per tant, es pot dir que s'analitzaran les condicions per la formació de deixants i les condicions per la no formació de deixants.

Els dies elegits, tal com estan assenyalats a la Taula 1, són: dia 18 de febrer, dia 22 d'abril, dia 3 agost i dia 7 de novembre. Per cada dia es presentarà la figura del radiosondatge entre 9.000 i 13.000 metres amb les altituds dels vols i finalment el diagrama de Schumann amb la indicació dels vols que passaven per damunt Girona.

1. Anàlisi 18 de febrer

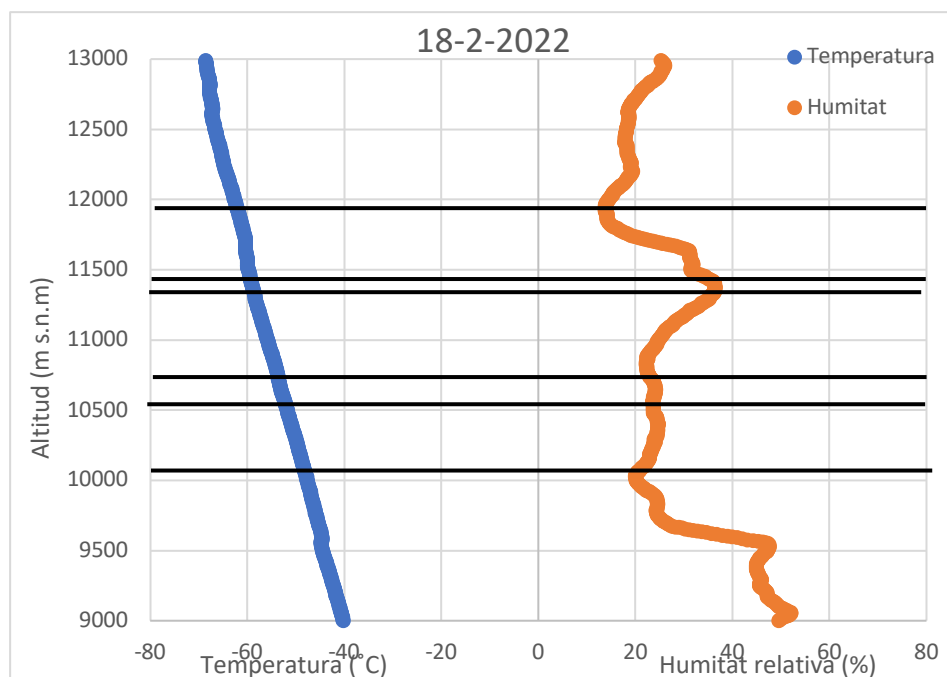


Figura 15. Radiosondatge del dia 18 de febrer de l'any 2022 amb els nivells de vol. **Font:** Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat i dades flightradar24.

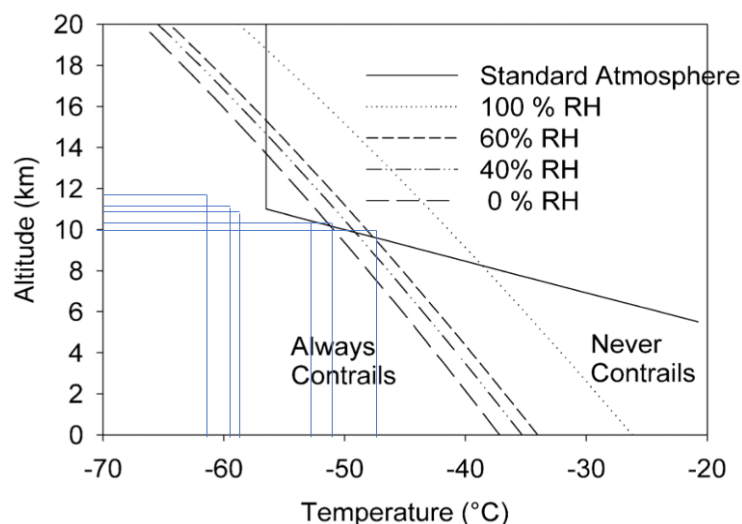


Figura 16. Gràfic amb les condicions per la formació de deixants de condensació. **Font:** Schumann (2005) i elaboració pròpia.

En general, com es pot veure en la figura 16, la majoria de vols que es varen detectar en la zona d'estudi es troben en la regió on sempre es produeixen deixants de condensació, és a dir que volen a una altitud en què la temperatura ambient és tal que independentment de la humitat, es poden formar les esteles. En canvi, hi ha dos nivells de vol que es troben en la zona on es poden o no es poden formar aquests deixants depenent de la humitat. Per saber si en aquets nivells de vol es varen produir deixants de condensació, s'ha de tenir en compte la humitat relativa en l'altura determinada. En el cas del nivell de vol que es troba a 10 km d'altitud, es troba en la zona on s'ha de tenir una humitat superior al 60% per tal que es formin els deixants. En aquest cas, mirant la figura 15 la humitat que es troba en aquesta altitud és d'un 20%, per tant no es formaria aquest deixant a 10 km d'altitud. Finalment, en l'altre cas, que es troba a 10,5 km d'altitud, es troba en la regió d'entre 0-40 % d'humitat, més concretament, amb una temperatura que requeriria una humitat una mica per sobre del 0%. Mirant la figura 16, a 10,5 km d'altitud la humitat és d'un 23,6 %, en conclusió aquest avió sí que formaria una estela.

2. Anàlisi 22 d'abril

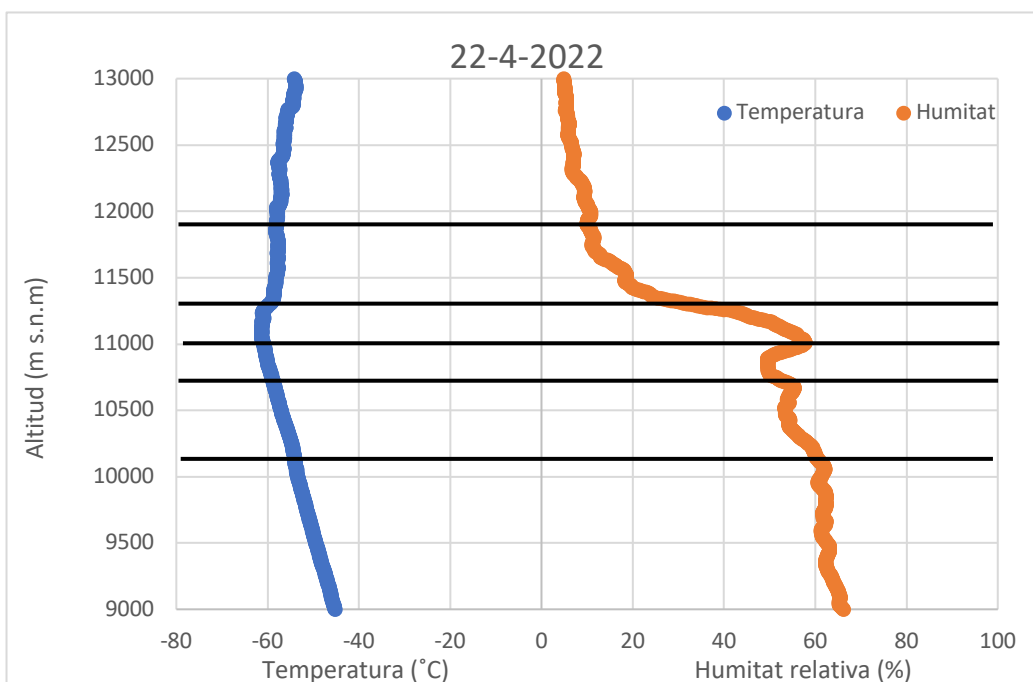


Figura 17. Radiosondatge del dia 22 d'abril de l'any 2022 amb els nivells de vol. **Font:** Dades del Meteocat, dades flightradar24 i elaboració pròpia.

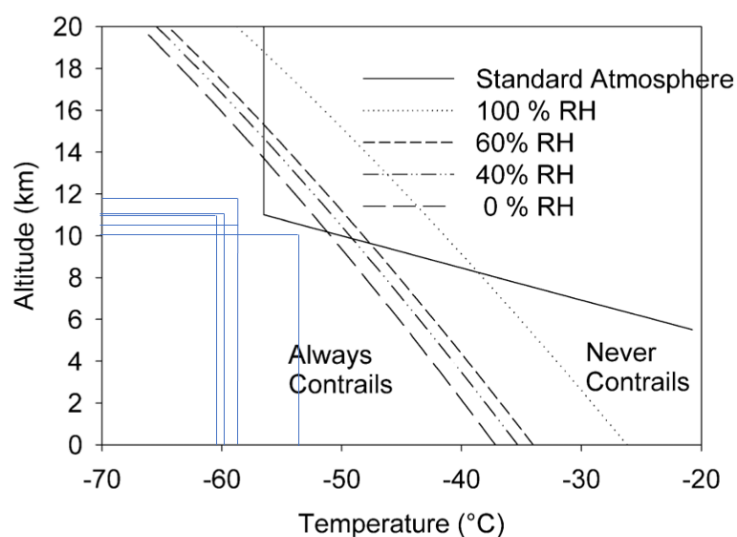


Figura 18. Gràfic amb les condicions per la formació de deixants de condensació. **Font:** Schumann (2005) i elaboració pròpia.

En aquest cas, es fa l'anàlisi del dia 22 d'abril, dia que correspon a la primavera. En general, com es pot veure en la figura 18, tots els vols que es varen detectar en la zona determinada per realitzar l'estudi es troben en la zona (altitud i temperatura) on sempre es produeixen deixants de condensació. Analitzant els nivells de vol més baix i més alt registrat aquest dia;

en el cas de l'avió que vola a 10.100 metres d'altitud, en el radiosondatge (figura 17), es pot veure que es va enregistrar una temperatura de -54°C . Per tant, portant aquestes dades al gràfic de la figura 18, s'observa que l'avió es troba en la zona on sempre es formen deixants de condensació, per tant, formarà deixants. En el cas de l'avió que vola a més altitud, es troba a 11.900 m el radiosondatge (figura 17), mostra que la temperatura era de -58°C . Amb aquestes dades, i portant-les al gràfic de la figura 18, s'observa que l'avió es troba en la zona on sempre es formen deixants de condensació, per tant, formarà deixants.

3. Anàlisi 3 d'agost

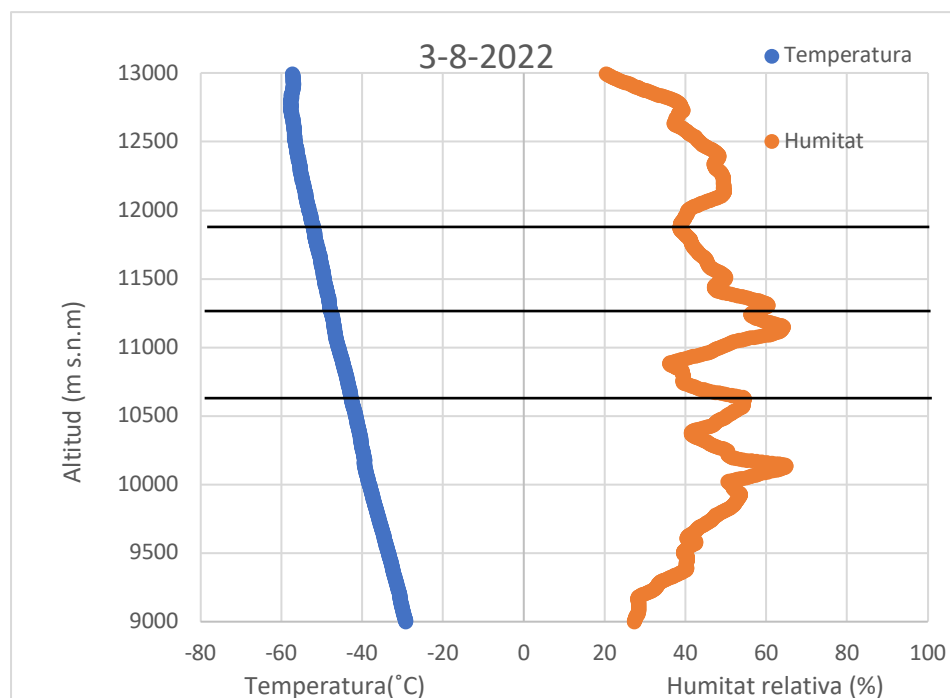


Figura 19. Radiosondatge del dia 3 d'agost de l'any 2022 amb els nivells de vol. **Font:** Dades del Meteocat, dades flihtadar24 i elaboració pròpia.

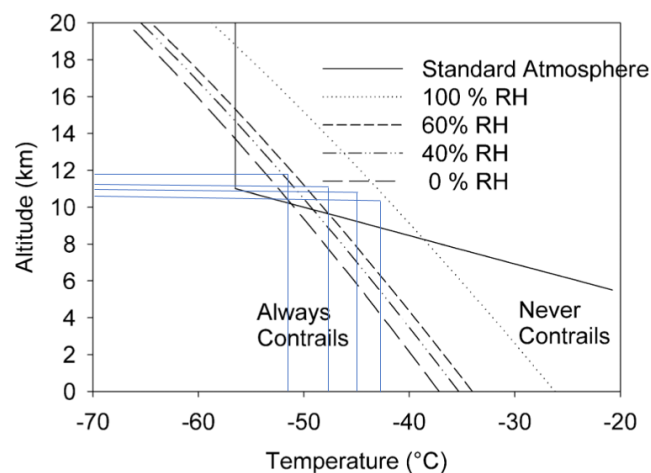


Figura 20. Gràfic de les condicions per la formació de deixants de condensació i els nivells de vol **Font:** Schumann (2005) i elaboració pròpia.

En aquest cas, es fa l'anàlisi del dia 3 d'agost, dia que correspon a l'estiu. Aquest dia es caracteritza per ser un dia on en les imatges extretes de la càmera SONA no s'observen deixants d'avions, per això ha estat elegit i així poder observar si es degut a unes condicions desfavorables. Com es pot observar en la figura 20, cap dels nivells dels vols estan en la zona de "never contrails", sinó que es troben en la zona de transició, on es possible la formació però depenent de la humitat relativa que hi hagi. Pel que fa al vol que es troba a 11.900 metres d'altitud, es pot observar a la figura 19 que vola a una temperatura de -52°C amb una humitat relativa del 38%. Portant aquestes dades al segon gràfic, s'observa que per tal que l'avió pugui deixar deixants de condensació, la humitat hauria de ser superior al 40%. En els altres casos, passa el mateix: a 11.300 metres, amb una temperatura de -48°C , per tal que es formin deixants la humitat relativa hauria de ser superior al 65%, en aquest cas s'observa que en aquesta altitud es troba una humitat del 60%. Finalment, en els nivells de vol, 10.700 metres i 11.300 metres, amb una temperatura de -43°C i -45°C respectivament, en els dos casos haurien de tenir una humitat superior al 80% per tal que es formessin les esteles de condensació, però en aquests casos, la humitat (veure el radiosondatge) és de 43% i 48% respectivament.

4. Anàlisi 7 de novembre

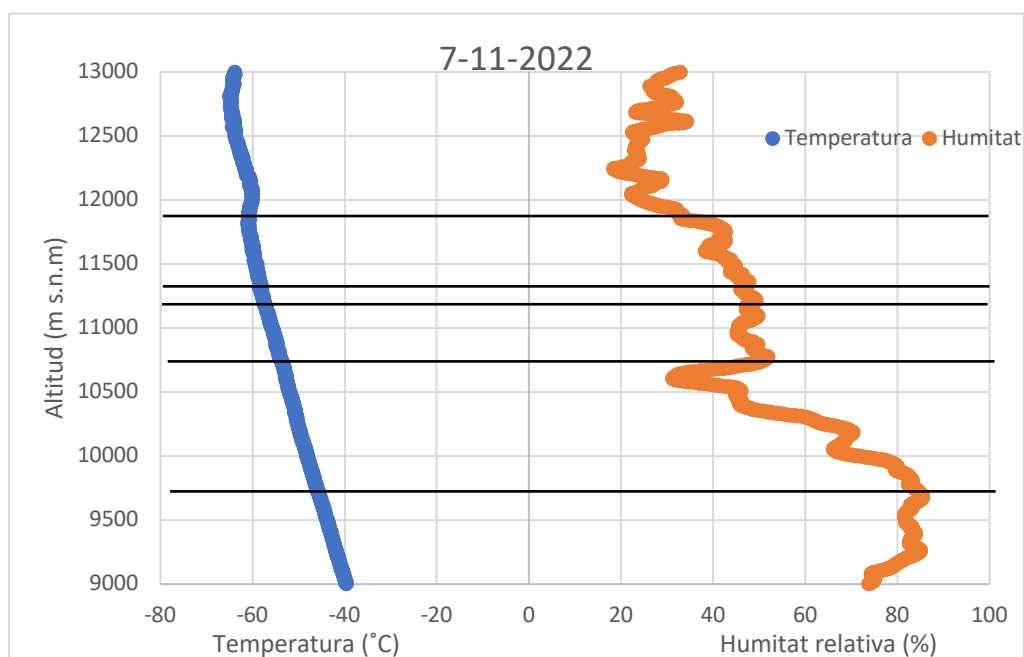


Figura 21. Radiosondatge del dia 7 de novembre de l'any 2022 amb els nivells de vol. **Font:** Dades del Meteocat, dades flihtadar24 i elaboració pròpia.

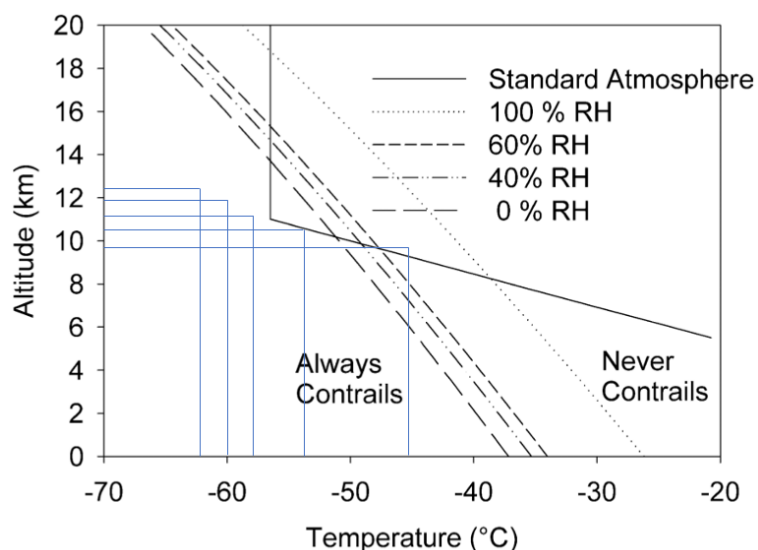


Figura 22. Gràfic de les condicions per la formació de deixants de condensació i els nivells de vol. Font: Schumann (2005) i elaboració pròpia.

En aquest cas, es du a terme l'anàlisi del dia 7 de novembre, que correspon a la tardor. Com es pot observar en la figura 22, la majoria dels casos d'aquest dia produiran esteles de condensació, ja que mitjançant les temperatures extrems del radiosondatge de la figura 21, i extrapolant l'altura en el gràfic de la figura 22, tots els nivells de vol es troben en la zona de "always contrails", és a dir, que sempre es formaran esteles de condensació independentment de la humitat relativa. Si que és veritat que hi ha un cas, on un nivell de vol es troba dins la zona de transició, on pot o no formar estela de condensació depenent de la humitat que hi hagi en aquesta altura. Com es pot observar en el gràfic de la figura 21, es troba a 9.700 metres d'altitud i a una temperatura d'uns -45°C . La gràfica de la figura 22 ens mostra que hauria de tenir una humitat superior al 70% per tal de que es puguin formar esteles de condensació. El radiosondatge (figura 21) ens diu que en aquesta altitud hi ha una humitat relativa del 85%. Per tant, podem concloure que en aquest cas, també es formarà l'estela de condensació d'aquest avió. Per això, es pot dir que aquest dia, tots els avions detectats en el cel de Girona deixaran deixants de condensació.

5.3 Cas d'estudi

Per acabar l'apartat de resultats i discussió, s'ha afegit un cas d'estudi, on s'analitza encara amb més profunditat, presentant totes les dades, un dia concret. Aquesta anàlisi es durà a terme de la mateixa manera que s'ha fet pels dies anteriors, però en aquest cas s'utilitzarà el Flightradar24 per tal d'identificar exactament cada avió amb cada estela observada. El dia que s'ha elegit per realitzar el cas d'estudi és el dia 26 de desembre del 2022.

Taula 2. Informació més rellevant dels vols observats entre les 12-13 h del dia 26 de desembre. **Font:** Flightradar24 i elaboració pròpia.

COMPANYIA	Nº DE VOL	HORA	ALTURA (m)	DIRECCIÓ
Eurowings	EW9680	12.08	10.051	Nord -> sud
Ryanair	FR9864	12.08	11.277	Nord-est -> sud-oest
Eurowings	EW6851	12.23	11.282	Nord -> sud
Ryanair	FR1786	12.23	11.209	Nord-est -> sud-oest
Air Nostrum	IB8727	12.29	10.058	Nord-est -> sud-oest
Air Nostrum	IB8757	12.31	10.667	Nord-est -> sud-oest
Iberia	IB3243	12.34	11.277	Nord-est -> sud-oest
Ryanair	FR2542	12.43	11.277	Nord-est -> sud-oest

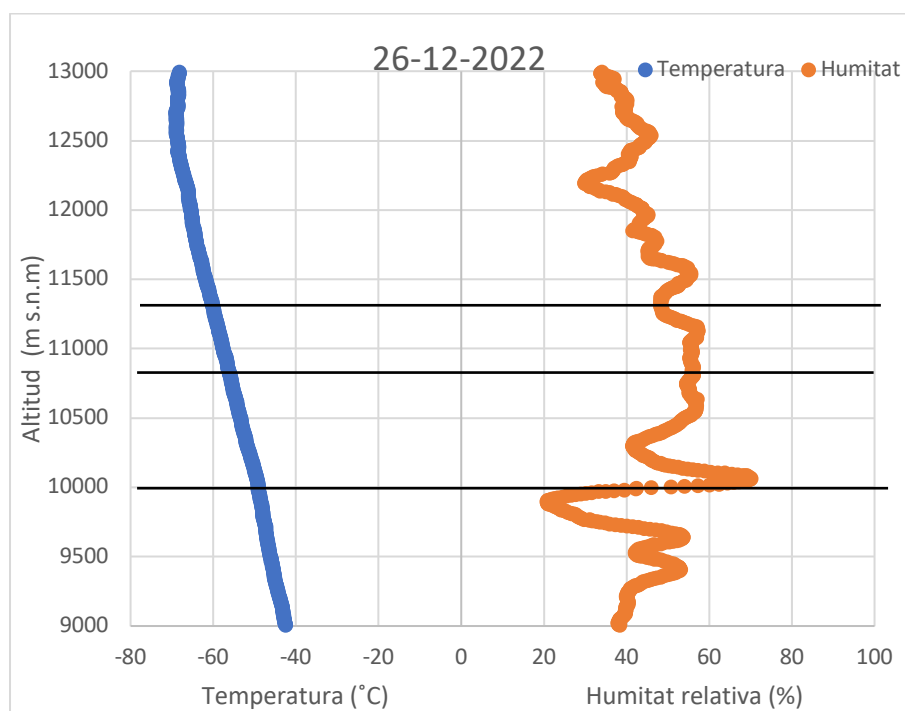


Figura 23. Radiosondatge del dia 7 de novembre de l'any 2022 amb els nivells de vol. **Font:** Dades del Meteocat, dades flightradar24 i elaboració pròpia.

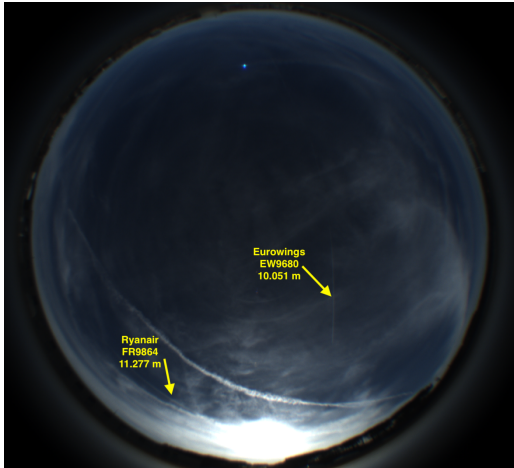


Figura 24-25. Observació dels deixants produïts a les 12:08 del dia 26 de desembre amb la seva identificació.
Font: GFA, Flightradar24 i elaboració pròpia.

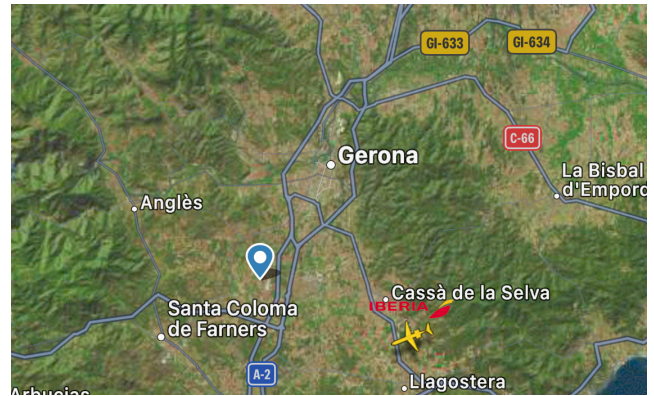
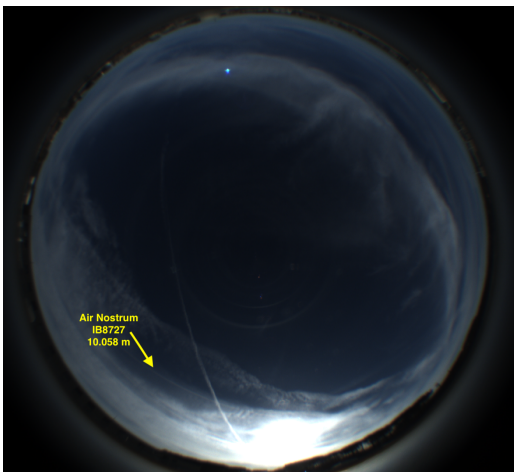


Figura 26-27. Observació dels deixants produïts a les 12:23 del dia 26 de desembre amb la seva identificació.
Font: GFA, Flightradar 24 i elaboració pròpia.

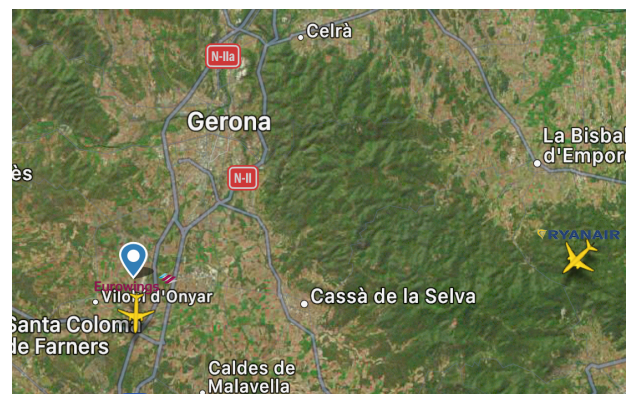
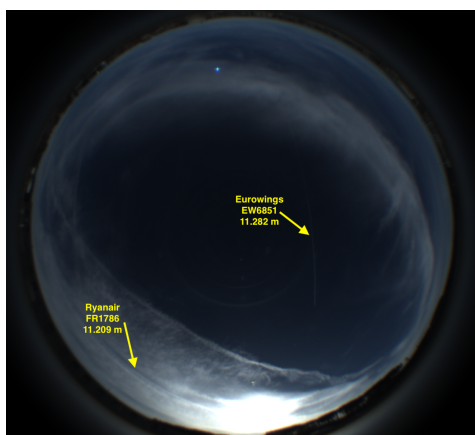


Figura 28-29. Observació dels deixants produïts a les 12:28 del dia 26 de desembre amb la seva identificació.
Font: GFA, Flightradar24 i elaboració pròpia

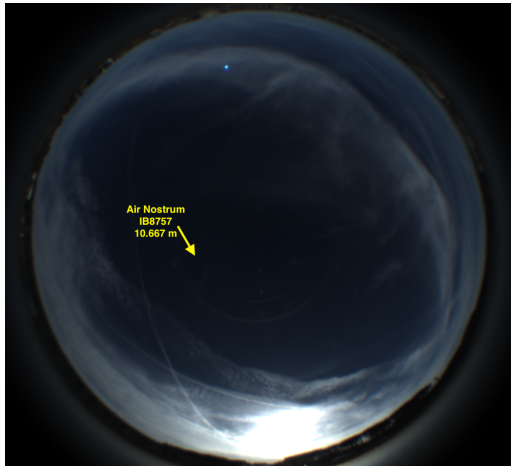


Figura 30-31. Observació dels deixants produïts durant el període de les 12:31 del dia 26 de desembre amb la seva identificació. **Font:** GFA, Flightradar24 i elaboració pròpia

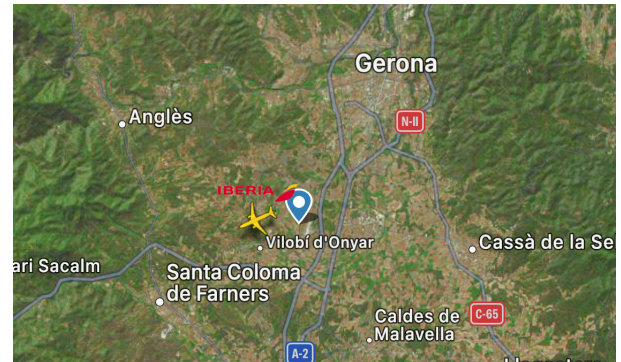
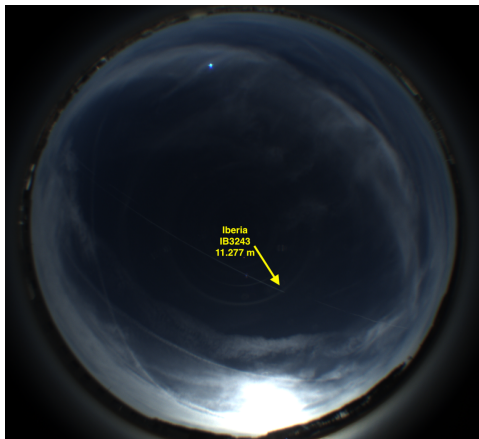


Figura 32-33. Observació dels deixants produïts durant el període de les 12:34 del dia 26 de desembre amb la seva identificació. **Font:** GFA, Flightradar24 i elaboració pròpia.

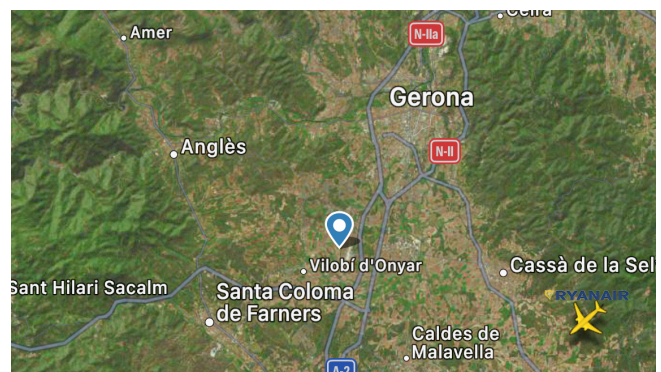
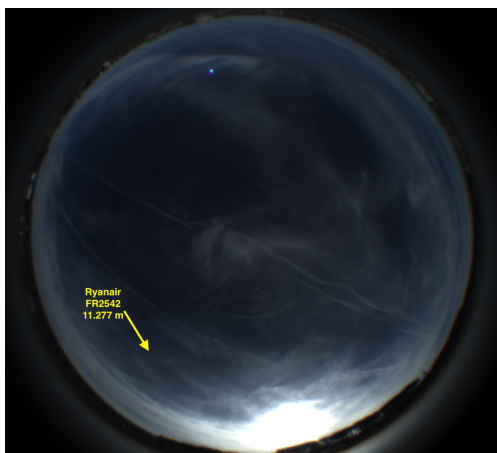


Figura 34-35. Observació dels deixants produïts durant el període de les 12:43 del dia 26 de desembre amb la seva identificació. **Font:** GFA, Flightradar24 i elaboració pròpia.

Per començar, cal dir que en alguna de les imatges es pot observar alguna estela que no està assenyalada, això es degut que són esteles persistents que s'han produït en moments anteriors a la de l'anàlisi o són esteles que ja han estat assenyalades en imatges anteriors.

Com es pot observar, s'han identificat els avions que han produït els deixants observables. Podem observar que la majoria dels avions tenen una direcció de nord-est cap al sud-oest, excepte alguns que la seva direcció és de nord a sud. També, els 8 avions que s'han detectat volaven aquest dia entre els 10.000 metres fins als 11.300 metres aproximadament. A partir d'aquí es pot, mitjançant el següent gràfic podem veure que, la majoria dels avions es troben en la zona de "always contrails", d'aquí a que es produeixin deixants de condensació. En canvi, els avions que estan a 10.000 m d'altitud, aquests la formació o no de deixants dependrà exclusivament de la humitat relativa. Per tal de que es formin, la humitat ha de ser superior al 40%. En aquest cas, mitjançant el radiosondatge (Figura 23), es pot comprovar que en aquesta altitud hi ha un 54% de humitat, per tant, tal i com es veu en les figures 24 i 28, es formaran deixants a 10.000 metres d'altitud.

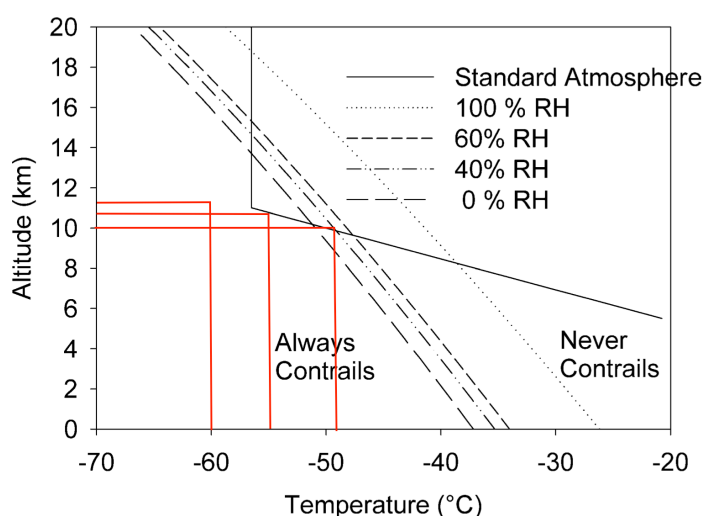


Figura 36. Gràfic de les condicions per la formació de deixants de condensació i els nivells de vol. Font: Schumann (2005) i elaboració pròpia.

6 Conclusions

The work presented is based on ten years of photographs taken by a hemispherical vision camera deployed at the meteorological and radiometric station of the University of Girona. Vertical profiles of the state of the atmosphere (radiosoundings) and information on commercial aircraft that passed over the city have also been used.

From the results obtained from the climatological study of the contrails detected in the images, the conclusions are the following:

- The evolution of contrails occurrence has been oscillating between 20% and 35%, with an average frequency of 27.6%. As can be seen, these values are notably high, especially if it is taken into account that when the sky is covered with low or medium clouds, trails cannot be detected.

- As for the monthly frequency, it has been found that there is a clear seasonality. The months with less contrails are the summer months, July (<10%) and August (<20%). As for the rest of the months, the frequency is between 28% and 37%, with higher values in the coldest months (which is consistent with the literature, such as Minnis et al., 2003).
- Finally, as for the distribution of contrails throughout the day, the maximum frequency is found at 12 H. In some months, there are quite a number of detections at 09 H. On the other hand, at 15 H there is a generalized pattern in which it is seen that it is the hour of less detections.

As for the results of the analysis of the atmospheric conditions that favor the formation of condensation trails, it has been found the validity of the graph of Schumann (2005), which explains when contrails will form or not depending on the height and temperature (and also, sometimes, depending on the relative humidity). Thus, the thermodynamic explanation of the formation of contrails explains, for example, the seasonality of their frequency, completely ruling out any conspiracy hypothesis.

However, the investigation of condensation trails as anthropogenic clouds is key due to their effects on terrestrial radiative forcing, in order to improve climate predictions. Further research and improvement of methods is needed. In this work, there have been certain limitations caused by lack of time. In case of having more time, the observed period could be extended, since there is data (sky images) since 2001. Also, the work done has been manual, and could be automated by software to recognize the trails so being able to analyze more hours than those analyzed here. In addition, a better quantification of the observed trails could also be performed, taking into account the persistence among other factors. Finally, also to improve the analysis of the thermodynamic conditions of the atmosphere, more information could be obtained from the aircrafts, such as the type of engine and the temperature of the exhaust gas emissions.

7 Bibliografia

- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology today : an introduc-on to weather, climate, and the environment*. Ninth Edition. Pacific Grove, California, Brooks/Cole.
- Burkhardt, U., Kärcher, B., & Schumann, U. (2010). Global modeling of the contrail and contrail cirrus climate impact. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(4), 479-484.
- Cairns, R. (2016). Climates of suspicion: 'chemtrail' conspiracy narratives and the international politics of geoengineering. *The Geographical Journal*, 182(1), 70–84. <https://doi.org/10.1111/GEOJ.12116>
- Kärcher, B. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications* 2018 9:1, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- Mazon Bueso, J., Costa Vila, M., & Pino Gonz Ález, D. (2018). Aircraft clouds: From chemtrail pseudoscience to the science of contrails. *Metode*, 2018(8), 181–187. <https://doi.org/10.7203/metode.8.9954>
- Mazón, J., Costa, M., Pino, D., & Lorente, J. (2012). Clouds caused by human activities. *Weather*, 67(11), 302.
- Mercer, A. M., Keith D. W., & Sharp, J. D. (2011). Public understanding of so- lar radiation management. *Environmental Research Letters*, (6)4, 044006.
- Minnis, P., Ayers, J. K., Nordeen, M. L., & Weaver, S. P. (2003). Contrail frequency over the United States from surface observations. *Journal of climate*, 16(21), 3447-3462.
- Murcay, W. B. (1970). On the possibility of weather modification by aircraft contrails. *Monthly Weather Review*, 98(10), 745-748.
- Pretor-Pinney G and Sanderson B (2006) The cloudspotter's guide: The science, history, and culture of clouds. Taylor & Francis <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3200/WEWI.59.5.60-61>
- Schumann, U., Bugliaro, L., Dörnbrack, A., Baumann, R., & Voigt, C. (2021). Aviation Contrail Cirrus and Radiative Forcing Over Europe During 6 Months of COVID-19. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2021GL092771. <https://doi.org/10.1029/2021GL092771>
- Schumann, U. (2005). Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique*, 6(4–5), 549–565. <https://doi.org/10.1016/J.CRHY.2005.05.002>
- Shearer, C., West, M., Caldeira, K., & Davis, S. J. (2016). Quantifying expert consensus against the existence of a secret, large-scale atmospheric spraying program. *Environmental Research Letters*, 11(8), 084011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084011>
- Tingley, D., & Wagner, G. (2017). Solar geoengineering and the chemtrails conspiracy on social media. *Palgrave Communications*, 3(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-017-0014-3>
- Yang, P., Hong, G., Dessler, A. E., Ou, S. S. C., Liou, K. N., Minnis, P., & Harshvardhan. (2010). Contrails and Induced Cirrus: Optics and Radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(4), 473–478. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2837.1>

Pàgines web

- Cloud Appreciation Society. Retrieved from: <https://cloudappreciationsociety.org>
- Contrails are a problem for aviation -- but there could be an easy solution | CNN. (n.d.). Retrieved May 20, 2023, from <https://edition.cnn.com/travel/article/contrails-aviation-climate-change-satavia-scen-spc-intl/index.html>
- EPA. (n.d.). *How do contrails form?* Retrieved April 27, 2023, from https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/contrails.pdf
- Estelas de condensación producidas por la aviación - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. (n.d.). Retrieved May 20, 2023, from <https://www.aemet.es/es/noticias/2022/09/estelas-condensacion-aviacion-2022>
- Deixants de condensació - Servei Meteorològic de Catalunya | Meteocat. (n.d.). Retrieved April 28, 2023, from <https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/publicacions/miscellania/deixants-de-condensacio>
- Flightradar24: Live Flight Tracker - Real-Time Flight Tracker Map. (n.d.). Retrieved May 20, 2023, from <https://www.flightradar24.com/51.5,-0.12/6>
- World Meteorological Organization. Retrieved from: <https://public.wmo.int/en>