

TREBALL DE RECERCA

ESTUDI DELS DEIXANTS DE CONDENSACIÓ



Quins factors determinen la seva formació i durada?

Airbus A320

2n Batxillerat

Cornellà de Llobregat, 9 de novembre de 2021

Vist-i-plau tutor

Signatura

Registre secretaria

Segell

Primer de tot m'agradaria donar les gràcies a la meva tutora. Sense tu res hauria estat possible. Gràcies per la teva ajuda diària, el teu compromís i el teu positivisme quan més ho he necessitat.

Gràcies a Yolanda Solà i Jordi Escoda Manso per la vostra ajuda i la vostra aportació d'informació en aquest treball.

Per últim, gràcies al meus familiars i amics pel vostre constant interès i la vostra voluntat d'ajudar-me sempre, tant en l'àmbit acadèmic com personal. M'agradaria fer una especial menció als meus avis, als meus pares i a la meva germana que són els que més a prop han estat durant aquesta etapa.
Mai em cansaré d'agrair-vos-ho.

RESUM

Avui dia un dels principals mitjans de transport és l'avió, tant al transport de passatgers com al de mercaderies. Gràcies a ell hem aconseguit poder comunicar els continents amb molta més facilitat. Sent un mitjà de transport tan present a les nostres vides, com en sabem tan poc d'ell?

Aquest treball consisteix en l'estudi dels deixants de condensació, els núvols en forma de llargues línies que es formen per la condensació del vapor d'aigua que emet el motor durant la combustió. S'analitza aquest fenomen després de fer un estudi de l'avió comercial i el seu motor. Finalment, s'ha fet un treball pràctic observant deixants de condensació metòdicament i estudiant la meteorologia a la troposfera i al nivell del mar per tal de saber què origina que es formin aquests deixants. Això s'ha pogut fer gràcies a les dades diàries del radiosondatge que ens ha proporcionat la Universitat de Barcelona.

Després de finalitzar aquest treball es pot concloure que la formació d'aquests núvols antropogènics sembla estar directament relacionada amb la humitat relativa i la temperatura de rosada en altura. A més a més, partint d'aquesta informació s'ha comprovat que es pot arribar a induir certes condicions atmosfèriques gràcies a l'observació de deixants de condensació, encara que no de manera precisa.

ABSTRACT

Nowadays, one of the main means of transportation is the plane, both passenger and goods transport. Due to its use, we have managed to intercommunicate the different continents much more easily. Being such a present form of transportation in our lives, how do we know so little about it?

This research project consists on the study of contrails, line-shaped clouds produced by the condensation of the water steam that planes' engines emit during the combustion. This phenomenon is analyzed after the study of the commercial aircraft and its engine. Finally, fieldwork has been done by observing contrails methodically and studying weather in the troposphere and at the sea level to know how contrails are formed.

Once the investigation has been finished, it can be concluded that the formation of these anthropogenic clouds seems to be directly related to relative humidity and temperature of dew in height. In addition, it has been established from this information that certain atmospheric conditions can be induced by observation of contrails, but not accurately.



ÍNDEX

INTRODUCCIÓ.....	3
Objectius.....	4
Hipòtesi.....	4
MARC TEÒRIC.....	5
1. Avions.....	5
1.1. Descripció avió.....	5
1.2. Característiques dels avions observats.....	5
1.2.1. Parts principals d'un avió comercial.....	5
1.2.2. Alçada de vol dels avions comercials.....	8
1.2.3. Dimensions i pes.....	8
1.2.4. Velocitat de vol.....	9
1.3. Motor.....	10
1.3.1. Tipus de motor.....	10
1.3.2. Tipus de combustible.....	12
1.3.3. Capacitat màxima del dipòsit de combustible.....	13
2. Combustió.....	14
2.1. Querosè.....	14
2.2. Combustió al motor i reacció química del querosè.....	14
3. Esteles.....	15
3.1. Què són?.....	15
3.2. Com es formen?.....	15
3.2.1. La condensació de l'aigua.....	16
3.2.2. Atmosfera a l'entorn de l'alçada dels avions.....	19
3.2.3. Procés de formació de l'estela de l'avió.....	21
3.3. Interès científic de les esteles.....	24
3.3.1. Les esteles i la predicció meteorològica.....	25
4. Núvols.....	26
4.1. Estratocúmul (Sc).....	28
4.2. Estrats (St).....	28



4.3. Cúmul (Cu).....	28
4.4. Cumulonimbus (Cb).....	29
4.5. Altocúmul (Ac).....	29
4.6. Altostrats (As).....	29
4.7. Nimbostrats (Ns).....	30
4.8. Cirrus (Ci).....	30
4.9. Cirrocúmul (Cc).....	31
4.10. Cirrostrats (Cs).....	31
4.11. Núvols antropogènics.....	31
MARC PRÀCTIC.....	34
1. Metodologia.....	34
2. Resultats.....	39
CONCLUSIONS.....	48
BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA.....	50
ANNEXOS.....	54
1. Tipologia d'avions.....	54
1.1. Aviació militar.....	54
1.2. Aviació de passatgers.....	55
1.3. Aviació pel transport aeri de mercaderies.....	56



INTRODUCCIÓ

Sempre m'ha agradat viatjar i he tingut la sort de tenir una família amb molta ambició per conèixer el món que, des de ben petita, m'ha inculcat aquestes ganes de descobrir noves localitats i cultures.

Des de que vaig pujar per primer cop a un avió l'any 2013 l'interès per tot el que tenia a veure amb l'aviació ha anat creixent i la meua obsessió per mirar el cel en tot moment ha crescut encara més durant el transcurs d'aquest treball.

A l'haver de decidir tema pel meu treball de recerca no vaig tenir cap dubte que ho volia fer d'alguna cosa relacionada amb l'àmbit aeri i aeronàutic. Després de pensar en totes les coses que em cridaven l'atenció i em generaven curiositat dels avions, vaig decidir que la que més em motivava era saber la raó per la qual es formaven els deixants de condensació que tant veia al meu dia a dia, quan mirava al cel. Per què no en veia sempre encara que visc a menys de 8 km de distància de l'aeroport Josep Tarradellas Barcelona-El Prat? Per què els avions que veia aterrant des de petita al mirador de la platja del Prat no deixaven aquest rastre tan curiós en el que sempre m'havia fixat?

Per tant, em vaig decantar per fer el meu treball de recerca sobre els deixants de condensació, fent una anàlisi d'aquests i estudiant més a fons els avions i tot el que estava relacionat amb ells. He estudiat els tipus d'avions que existeixen, les característiques de tots ells i, després, m'he centrat a fons en els avions comercials ja que son els que més transiten la zona aèria de la meua ciutat, Cornellà de Llobregat. A més a més, volia que la part pràctica fos un treball experimental i científic, en aquest cas, fent observacions i analitzant els resultats.



OBJECTIUS

Els meus objectius a l'hora d'estudiar les esteles dels avions són saber la seva composició, el perquè de la seva aparició i les seves característiques.

Per poder entendre les aparicions de les esteles també estudiaré les condicions atmosfèriques a les altures a les quals volen els avions. Saber el tipus d'avió i motor que està emetent l'estela també és una informació important que pot influir de manera significativa en l'aspecte de l'estela i en la seva aparició o no.

L'objectiu final serà comprendre amb profunditat el fenomen de la formació de les esteles dels avions i poder relacionar les seves característiques amb els factors que les originen. També es pretén conèixer la possible relació de les esteles amb les prediccions de fenòmens meteorològics i fins i tot, saber aspectes de l'atmosfera gràcies a les característiques d'aquests deixants de condensació.

HIPÒTESI

Seguint el mètode científic, fet servir en aquest treball, primer de tot formulo la meua hipòtesi que podré validar o refutar mitjançant l'estudi que faré sobre aquest tema. En un primer moment, la hipòtesi és que existeix una relació entre les característiques de les esteles i la seva durada al cel amb el tipus d'avió o les condicions meteorològiques de l'entorn. A més a més, ens permeten predir canvis de temps a curt termini, tal i com la cultura popular i els meteoròlegs semblen assegurar.

Una vegada formulada la hipòtesi, el meu objectiu principal durant aquest treball serà confirmar-la o rebutjar-la gràcies al seguiment que faré.



MARC TEÒRIC

1.AVIONS

1.1 DESCRIPCIÓ AVIÓ

Un avió, o també anomenat aeroplà, és un vehicle que consta d'un o més motors i d'unes ales totalment fixes i que té una densitat major a la de l'aire. Té la capacitat de sustentar-se a l'atmosfera per reaccions de l'aire que no estiguin fetes per l'avió en qüestió contra la superfície terrestre, sinó que siguin reaccions dinàmiques de l'aire contra les seves ales.

Aquest tipus d'aeronau pot fer diferents funcions i dur a terme diferents tasques:

- Transport de persones a distàncies curtes (vols nacionals), mitjanes (vols dins del mateix continent) o llargues (vols internacionals).
- Transport de càrregues i animals.
- Àmbit militar per reconeixements de terreny enemic, desembarcament de tropes o bombardejos per missions aèries.
- Àmbit esportiu de competicions de tipus aèries.
- Àmbit de salvaguarda a rescats marítims, com a naufragis, i al combat d'incendis forestals gràcies a la disposició de góndoles de càrrega on s'emmagatzema aigua.

1.2. CARACTERÍSTIQUES DELS AVIONS OBSERVATS

Els avions estudiats a aquest treball són els avions comercials, ja que són els més transitats a la zona d'observació, Cornellà de Llobregat. Això és degut a la presència de l'Aeroport Josep Tarradellas Barcelona- El Prat a uns 7,5 quilòmetres de distància.

1.2.1. PARTS PRINCIPALS D'UN AVIÓ COMERCIAL

Segons la part on estan situades i la seva utilitat podem trobar diferents parts a un avió comercial.

Fuselatge

El fuselatge és el conjunt principal de l'avió, el cos de l'avió, on trobem la cabina de passatgers, la cabina de comandament i la zona de càrrega. És la part principal de l'avió



i és on es troben unides les altres parts com el tren d'aterratge o les ales, sigui directament o indirectament.

El tall transversal del fuselatge acostuma a ser circular, ja que d'aquesta manera les pressions que imposa la cabina s'alleugen. Si la seva secció no fos circular, acabaria adoptant aquesta forma geomètrica per la pressió interna, és a dir, la diferència entre la pressió dins la cabina i la pressió a l'atmosfera exterior.

Ales

Les ales són la part més important de l'avió, ja que són les encarregades de proporcionar la força de sustentació que és la força que contraresta al pes i, per tant, provoca l'enlairament de l'avió. Dins de l'ala trobem els dipòsits de combustible.

Segons la seva localització a l'avió poden haver-hi tres posicions: ala alta, ala mitjana i ala baixa.

Les ales estan formades per diferents parts amb funcions molt diferents i imprescindibles pel vol de l'avió. Hi ha parts mòbils i parts immòbils o fixes, les més importants són:

- El **wingtip** o punta alar és la part de l'ala més llunyana al fuselatge. Existeixen diferents tipus classificats per la seva forma com el winglet o la bora de Hoerner.
- Els **alerons** es troben als extrems de cada ala i són els encarregats de fer que l'avió pugui girar i produir balanceig gràcies a la seva mobilitat.
- Els **flaps** o dispositius d'hipersustentació s'encarreguen de reduir la velocitat durant l'enlairament i l'aterratge. Gràcies a la seva mobilitat durant aquests moments, la força de sustentació augmenta, ja que la superfície alar ho fa també.
- Els **spoilers**, que es troben a la cara superior alar, busquen la disminució de la força de sustentació de l'avió per tal de disminuir l'altura d'una manera controlada. Durant l'aterratge es despleguen totalment per tal de perdre tota la sustentació i transferir el pes al tren d'aterratge i, d'aquesta manera aconseguir una frenada més eficaç.



Empenatge

L'empenatge és tot el conjunt de la cua de l'avió, és a dir la part posterior d'aquest. La cua és l'element estabilitzador de l'avió i està formada pels estabilitzadors verticals i els horitzontals.

A la part estabilitzadora vertical es troba el **timó de direcció o rudder** que és l'encarregat de fer girar a l'aeronau en l'eix X.

A l'estabilitzador horitzontal es troben els **timons de profunditat** o timons d'alçada que fan possible la mobilitat del morro de l'avió en l'eix Y.

Tren d'aterratge

El tren d'aterratge és la part inferior de l'aeronau que permet la seva mobilitat pel medi terrestre, per tant fa servir un tren de rodament per la mobilitat sobre asfalt. Durant l'aterratge ha d'aconseguir frenar absorbint l'energia cinètica que porta l'avió i ha d'amortir l'impacte amb el terra. Existeixen els trens d'aterratge fixos, que són els que no es mouen durant el vol, i els retràctils, que durant el vol s'introdueixen dins la part inferior de l'avió per tal d'aconseguir una millor estabilitat.

Motors

Els motors són els encarregats de transformar l'energia química del combustible en energia mecànica per tal de fer que l'avió pugui volar. El motor es troba a la part inferior de l'ala i el dipòsit de combustible a l'ala, cosa que permet que hi hagi una major eficàcia.

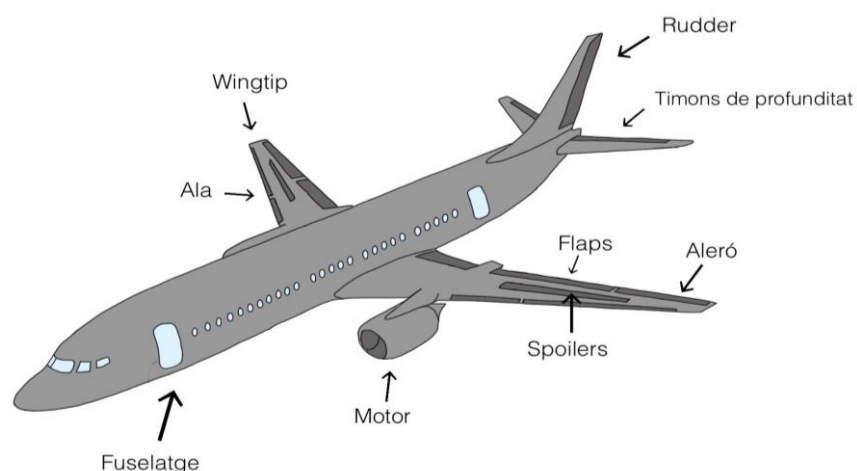


Fig. 1: Parts d'un avió comercial. Imatge original de Sara Allende creada amb Sketches.



1.2.2. ALÇADA DE VOL DELS AVIONS COMERCIALS

Els avions comercials acostumen a volar a unes alçades anomenades alçades de creuer que oscil·len entre uns 10.000 i uns 12.000 metres que és el mateix que uns 30.000 i 42.000 peus.¹

La necessitat de volar a aquestes alçades és deguda a diversos motius.

El primer de tots és el rendiment del motor. A alçades elevades, la densitat de l'aire i la pressió atmosfèrica és menor, cosa que fa que la resistència que ha d'oposar l'aeronau també ho sigui. Aquestes raons fan que l'avió pugui arribar a velocitats més elevades consumint el mateix combustible, cosa que provoca un estalvi d'aquest.

Una altra raó és per evitar els fenòmens meteorològics que acostumen a quedar-se a la troposfera, que és la capa de l'atmosfera que arriba fins als 10.900 metres.

1.2.3. DIMENSIONS I PES

Les dimensions i el pes dels avions comercials varien molt segons el model i el tipus d'avió. Alguns dels avions comercials més comuns són:

	Alçada (m)	Longitud (m)	Envergadura (m)	Pes buit (tones)	Pes amb càrrega màxima (tones)
Airbus A320	11,8	37,6	35,8	62,5	78,4
Airbus A330-300	16,8	63,7	60,3	175	242
Airbus A340-600	17,9	75,4	63,5	251	381,2
Boeing 747-8	19,4	76,3	68,5	186	447,7
Boeing 777-200	18,5	63,7	60,9	134,8	247,2
Boeing 737-400	11,1	36,5	28,9	33,2	68
Mc Donnell Douglas MD-80	9,1	45,2	32,8	35,3	63,5

¹ 1 peu equival a 0,3048 metres.

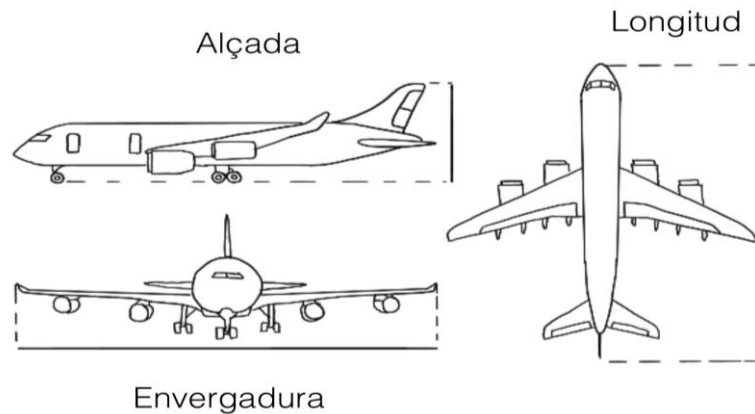


Fig. 2: Avió comercial. Imatge original de Sara Allende creada amb Sketches.

1.2.4. VELOCITAT DE VOL

La velocitat de l'aeronau varia segons el moment del recorregut en el qual es troba i segons les condicions atmosfèriques. La velocitat no és la mateixa quan està enlairant, quan està aterrant o durant el vol.

Velocitat d'enlairament

La velocitat durant el procés d'enlairament oscil·la entre els 257 i els 290 km/h. Aquesta velocitat pot variar segons la resistència de l'aire, el pes de l'avió o l'ús de les diferents parts de l'ala.

Velocitat de creuer

La velocitat de creuer o velocitat mitjana és la velocitat que assoleix l'aeronau en condicions normals de pressió i temperatura, sense que variï l'altura o la resistència del vol, i que es manté constant.

Acostuma a estar al voltant dels 800-900 km/h.

Velocitat d'aterrament

Quan comença el descens de l'aeronau, el pilot comença a disminuir la velocitat d'aquest fins a arribar a una velocitat segura per tal de poder aterrar. Aquesta velocitat acostuma a estar entre els 240 i els 267 km/h.

Aquesta velocitat, com les demés, també pot variar depenent de les condicions de la pista d'aterratge i les condicions meteorològiques.



Fig. 3: Exemple del vol Vueling Airlines 3217 - VLG3217 / VY3217 de Tenerife Nord a Barcelona amb un Airbus A320 de l'aerolínia Vueling Airlines. Enlairat el dimecres 19.05.2021 a les 17:40 h i aterrat a les 20:42, hora local de Barcelona.

1.3. MOTOR

Els motors són els mecanismes que transformen l'energia química present en la combustió en energia mecànica, per tal de fer que l'avió es desplaci. Un avió comercial acostuma a tenir entre dos i quatre motors amb els que transporta tota la càrrega de l'aeronau.



Fig. 4: Motor Rolls-Royce Trent 7000 d'un Airbus A330 neo. Imatge extreta de Fly News.

L'energia mecànica actua sobre un eix de la màquina al qual s'uneix el mecanisme que es vol moure.

El propulsor transforma l'energia mecànica en energia cinètica d'una corrent de gasos.

El conjunt de motor i propulsor s'anomena motopropulsor.

1.3.1. TIPUS DE MOTORS

Si ens centrem en els motors d'aviació, els podem classificar en dos grans grups.

Motors alternatius

Aquests motors també són anomenats motors d'èmbol o d'explosió. El motor alternatiu d'un avió està format per una sèrie de cilindres on es comprimeix l'aire, es mescla amb el combustible i s'inflama la mescla. La combustió de la mescla de combustible i aire



produeix un increment de la pressió del gas a l'interior del cilindre, pressió que es aplicada sobre l'èmbol, un cos mòbil dins del cilindre. El moviment lineal de l'èmbol es transforma en un moviment circular gràcies a un sistema articulat que fa girar l'eix del motor.

Segons la seva forma de construcció i ordenació dels cilindre podem trobar una altra classificació:

- **Motors de cilindres en línia** que disposen de quatre o sis cilindres en posició recta o invertida.
- **Motors de cilindres horitzontals i oposats** que estan formats per quatre o més cilindres oposats situats en un pla horitzontal. Els avantatges sobre els de línia són la disminució de la longitud del motor, la formació d'una unitat compacta i amb menys vibració i, per últim, la disminució de la resistència aerodinàmica de la instal·lació de l'avió, en presentar un perfil més estret.
- **Motors en estrella o radials** constituïts per un conjunt de cilindres que es situen en forma d'estrella en sentit radial, al voltant cigonyal. Poden tenir una, dues o quatre estrelles de cilindres. El nombre de cilindres a l'estrella sempre és senar per evitar els temps passius que es produiran entre cilindres diametralment oposats.

Motors de turbina o turborreactors

Els turborreactors pertanyen a la família dels motors autorreactors que a la vegada pertanyen als motors de reacció.

Els motors autorreactors són motors de reacció no autònoms ja que han d'agafar aire atmosfèric per la seva combustió. El combustible es troba a l'aeronau però l'oxigen s'ha de captar de l'atmosfera, per tant el vol d'aquestes aeronaus ha de ser a alçades on hi hagi suficient oxigen.

Els turborreactors són tots els motors que disposen d'una turbomàquina. L'òrgan comú de tots els turborreactors és el generador de gas, el conjunt motriu que produeix l'energia comuna i és el nucli del motor.

Trobem quatre tipus principals de turborreactors:



- **Turboreactor bàsic** format per un generador de gas i una tovera de sortida, és a dir, un conducte cilíndric de secció variable que canalitza els gasos que surten de la turbina a gran velocitat.
- **Turbohèlix** que combina el generador de gas, una tovera de sortida per canalitzar els gasos de sortida i una hèlix acoblada a l'eix del motor.
- **Turboventilador o turbofan** que disposa de dos fluxos, el flux primari i el secundari. El flux primari és el normal de l'aire que passa pel generador de gas i el secundari és el que passa pel "fan", un compressor de major diàmetre que el del generador de gas, on l'aire es comprimeix. L'aire del flux secundari surt per una tovera independent a l'exterior.
- **Turboeix** format per un generador de gas, una tovera de sortida i un eix de potència al que s'acoba un sistema de transmissió per fer girar els rotors d'un helicòpter.

La gran majoria dels avions comercials actuals fan servir motors de turbina ja que són més potents, segurs i aconseguixen velocitats i alçades més elevades que els de pistó.

1.3.2. TIPUS DE COMBUSTIBLE

Els motors de turbina de l'aviació comercial normalment poden fer servir tres tipus diferent de combustible: el Jet A, el Jet A1 i el Jet B.

	Jet A	Jet A1	Jet B
Temperatura de congelació (°C)	-40	-47	-60
Punt d'inflamació (°C)	38	38	20
Composició	hidrocarburs des de C9 fins a C17	hidrocarburs des de C9 fins a C17	30% querosè 70% gasolina

Tots aquests combustibles estan formats per querosè.

Els més utilitzats a l'aviació comercial són el Jet A i el Jet A1. El Jet A1, al tenir un punt de congelació menor al del Jet A, és millor pels vols internacionals de llarga distància,



sobretot els que pertanyen a rutes polars. El Jet A és més comú als Estats Units i el Jet A1 a la resta del món.

El Jet B és més comú a l'aviació militar que a la comercial. Es fa servir a llocs amb temperatures molt baixes ja que, és més inflamable que els altres.

1.3.3. CAPACITAT MÀXIMA DEL DIPÒSIT DE COMBUSTIBLE

Tots els dipòsits de combustible han de tenir un volum lliure per l'expansió tèrmica del combustible que no ha de ser inferior al 2% de la capacitat màxima del dipòsit.

Cada avió té una capacitat de combustible diferent segons aspectes com el pes i la distància màxima de vol.

	Distància màxima de vol (km)	Litres màxims de combustible (L)
Airbus A320	6.200	27.200
Airbus A330-300	11.750	139.090
Airbus A340-600	14.450	204.500
Boeing 747-8	14.800	242.470
Boeing 777-200	9.700	117.340
Boeing 737-400	4.175	20.104
Mc Donnell Douglas MD-80	7.034	22.107



2. COMBUSTIÓ

2.1. QUEROSÈ

Els combustibles que fan servir els avions comercials, el Jet A i el Jet A1 estan formats per querosè.

El querosè és una mescla d'hidrocarburs que s'obtenen per la destil·lació del petroli que té una volatilitat i una densitat intermèdia entre el Diesel i la Gasolina. És insoluble en l'aigua i és transparent o amb un suau to groguenc.

Es fa servir com a combustible als motors a reacció i de turbina de gas. També s'inclou al gasoil d'automoció a les refineries.

2.2. COMBUSTIÓ AL MOTOR I REACCIÓ QUÍMICA DEL QUEROSÈ

Ja que el combustible que s'utilitza a l'aviació està format per querosè, que alhora, està format per hidrocarburs, la reacció química que es produeix és una combustió.

Aquesta combustió emet vapor d'aigua, diòxid de carboni, òxids de nitrogen en petites quantitats, monòxid de carboni, gasos de sofre i sutge² i partícules metàl·liques formades per les altes temperatures a la combustió del motor durant el vol.

He intentat aconseguir la reacció química del querosè per tal de poder fer càlculs estequiomètrics per analitzar, d'aquesta manera, algunes emissions de la combustió realitzada als motors dels avions comercials. No ha sigut possible aconseguir aquesta informació, ja que no es pot saber amb exactitud la composició del combustible Jet A1. Sabem que està format per querosè, aquest a la vegada format per hidrocarburs des del C9 fins al C17, però no hi ha una composició exacta, per tant, si féssim els càlculs amb una reacció aproximada mai obtindríem uns resultats fiables i reals.

² Sutge: partícules sòlides minúscules que es formen per la combustió incompleta del carbó o altres hidrocarburs combustibles. També és anomenat negre de fum, estalzim o sutja.



3.ESTELES

3.1. QUÈ SÓN?

Les esteles de condensació dels avions són núvols en forma de llargues línies que es formen per la condensació del vapor d'aigua que emet el motor durant la combustió. De tots els gasos que es produeixen al motor degut a la combustió, només el vapor d'aigua és necessari per a la formació de les esteles. Els gasos de sofre que es desprenen del motor poden arribar a ajudar, ja que faciliten la formació de partícules que actuen com a nuclis de condensació. De totes maneres, acostuma a haver-hi, de manera natural, suficients partícules que fan de nuclis de condensació a l'atmosfera, cosa que fa que els gasos de sofre no siguin imprescindibles.



Fig. 5: Imatge d'esteles de condensació el dia 27 de setembre, a les 8:14h a Cornellà de Llobregat. Imatge original de Sara Allende.

3.2. COM ES FORMEN?

Les esteles que observem en el cel són el resultat de diversos factors. En primer lloc, per tal d'originar-se necessitem que es produeixi la condensació del vapor d'aigua generat en la combustió dels hidrocarburs en els avions, però en aquest fenomen hi influiran les condicions ambientals, que faciliten o impedeixen aquesta condensació.



Els avions comercials, al trobar-se en la capa més alta de la troposfera, a uns 10.000-12.000 metres, deixen anar vapor d'aigua en una regió amb condicions atmosfèriques variables. Les pressions i les temperatures canvien i, per tant, algunes de les propietats físiques i químiques de l'aigua són diferents que al nivell del mar, estant a una pressió d'1 atm.

3.2.1.LA CONDENSACIÓ DE L'AIGUA

La condensació és el pas de l'estat gasós al líquid, en aquest cas, el vapor d'aigua es transforma en aigua líquida. Aquest fenomen passa quan la pressió de vapor d'aigua és major que la pressió de vapor de saturació.

Entenent la pressió de vapor d'aigua com a: *“pressió determinada que produeixen les molècules que abandonen l'estat líquid i omplen l'estat lliure fins a saturar el recinte quan un líquid omple parcialment un recipient tancat”*³. Cada líquid té una pressió de vapor característica, que depèn de la temperatura.

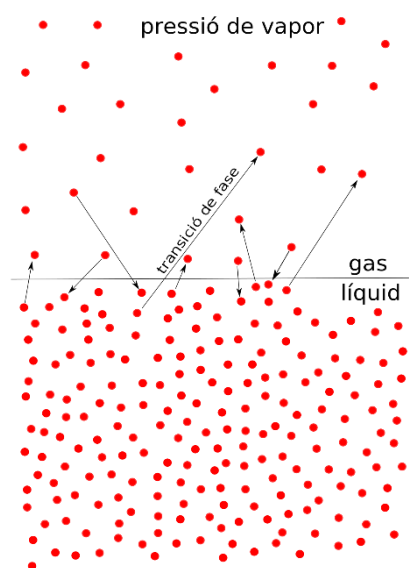


Fig. 6: Esquema de partícules de la transició de la fase líquida a gasosa i a l'inrevés com a resultat de la pressió de vapor. Imatge de Arnaugir.

Normalment, la condensació es produeix quan la temperatura del gas disminueix, això fa que disminueixi la pressió de vapor de saturació, però també pot succeir si la pressió de vapor augmenta, és a dir, si es comprimeix el gas.

Perquè sigui possible la condensació, és necessària la presència de nuclis de condensació sobre els que es puguin formar les gotes d'aigua, anomenades partícules higroscòpiques degut a la seva alta capacitat d'absorció d'humitat. Si no hi haguessin nuclis de condensació, l'aigua podria seguir en estat gasós encara que la pressió de vapor fos major a la de saturació.

³ segons la Universitat de Barcelona a “Operacions Bàsiques al Laboratori Químic” redactat per integrants dels Departaments de Química Orgànica, Química Inorgànica i Farmacologia i Química Terapèutica



En el cas de la creació de les esteles de condensació, estem parlant d'unes alçades d'uns 10.000 o 12.000 metres, alçades a les que volen els avions comercials. A aquestes alçades, la temperatura d'ebullició, la de condensació i el punt de congelació de l'aigua no són iguals que al nivell del mar amb una pressió d'1 atm. Al trobar-se a un nivell alt de la troposfera la pressió és menor, encara que no sempre és la mateixa ja que pateix variacions constantment depenent de si hi ha un anticicló o una borrasca, si tenim masses d'aire més calent o més fred, el vent, etc.

Tot i això, al saber que la pressió és més baixa que al nivell del mar, podem saber que la temperatura d'ebullició és menor i el punt de congelació és més alt que a unes condicions normals d'1 atm.

DIAGRAMA DE FASES DE L'AIGUA

Un diagrama de fases serveix per delimitar, de manera gràfica, la ubicació de les distintes fases d'una substància, en aquest cas l'aigua.

La línia que separa el sòlid del gas correspon als punts de sublimació, la que separa el gas del líquid correspon als punts d'ebullició i, per últim, la que separa el sòlid del líquid correspon als punts de fusió.

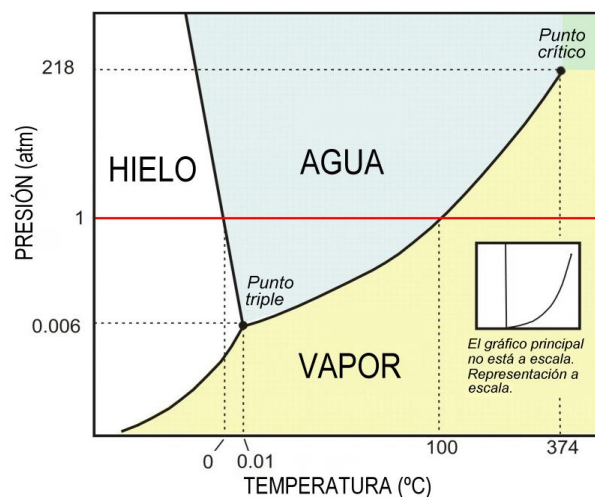


Fig. 7: Diagrama de les fases de l'aigua, extret de la web "nota cultural del día".

Dins dels diagrames de fases hi ha dos punts a tenir en compte: el punt triple i el punt crític.

- El **punt triple** d'un fluid és el punt exacte entre la pressió i la temperatura on la substància coexisteix en les tres fases: sòlid, líquid i gas, i és únic i diferent per a cada substància. Fixant-nos en el diagrama de fases de l'aigua, si la pressió és menor a la del punt triple, la substància no existeix en estat líquid.

A l'aigua, trobem el punt triple a -0,006 atm i 273,15 K, el que seria el mateix que 0,01°C. En aquestes condicions, coexisteixen les tres fases: la sòlida, líquida i gasosa.



- El **punt crític** d'una substància es troba al final de la línia divisòria entre les fases líquid/gas. Es troba al final de la línia d'ebullició i també és propi de cada substància. Al superar aquests valors de temperatura i pressió, la substància passa a ser supercrítica, no és ni un líquid ni un gas. Les dues fases es troben unides i provoquen que la substància tingui unes propietats físiques intermèdies.

A l'aigua, trobem el punt crític a 218,4 atm i 647,3 K (374,3 °C).

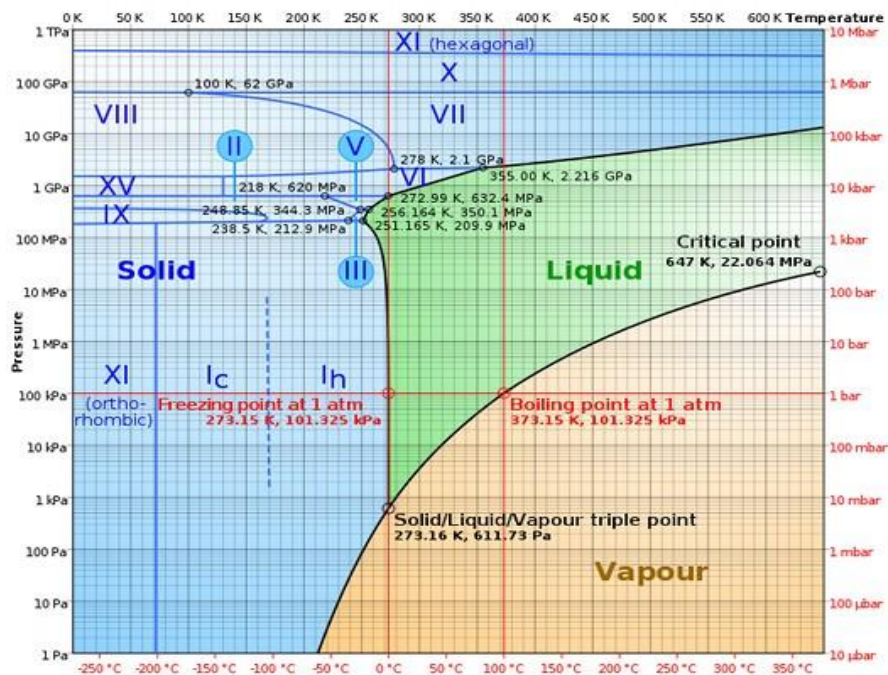


Fig. 8: Diagrama de les fases de l'aigua, extret de Thermal Engineering.

PUNT DE ROSADA o PUNT DE GEBRE

El punt de rosada és la temperatura a la que l'aire ha de baixar per a que es doni la condensació del vapor d'aigua present a l'ambient. Hi ha una quantitat màxima de vapor d'aigua que pot contenir l'aire a qualsevol temperatura, l'anomenada pressió de saturació del vapor d'aigua. Això és degut a que quan l'aire es refreda fins a la temperatura exacta, l'anomenat punt de rosada, fa que l'aire no pugui emmagatzemar més aigua o vapor d'aigua i es comenci a condensar. Per tant, a temperatures menors de l'aire, menys vapor d'aigua pot tenir-ne i, a la inversa, a majors temperatures de l'aire, més vapor d'aigua pot emmagatzemar. A la vegada, a més pressió de l'aire, per tant, més pressió del vapor d'aigua, més alt serà el punt de rosada (és a dir, en un



ambient de més pressió, s'afavoreix la condensació, que es podrà produir a temperatures més altes). El punt de rosada s'anomena punt de gel quan la Temperatura és inferior a 0°C.

El punt de rosada depèn de la quantitat de vapor d'aigua que conté una massa d'aire. La proporció de vapor d'aigua que trobem a l'aire en relació a la màxima quantitat que hi pot haver, s'anomena humitat relativa de l'aire. Arribem al punt de rosada (o de gel) quan la humitat relativa és del 100% i l'aire se satura.

$$Pr = \sqrt[8]{\frac{H}{100}} \cdot (110 + T) - 110$$

Fig. 9: Fórmula del punt de rosada.

A la Fig. 9 Veiem la fórmula que ens relaciona les variables de temperatura de rosada (°C) amb la humitat relativa(%) i la temperatura (°C).

3.2.2. ATMOSFERA A L'ENTORN DE L'ALÇADA DELS AVIONS

Les alçades de creuer oscil·len entre els 10.000 i els 12.000 peus, per tant, estem parlant de finals de la troposfera i, fins i tot, principis de l'estratosfera.

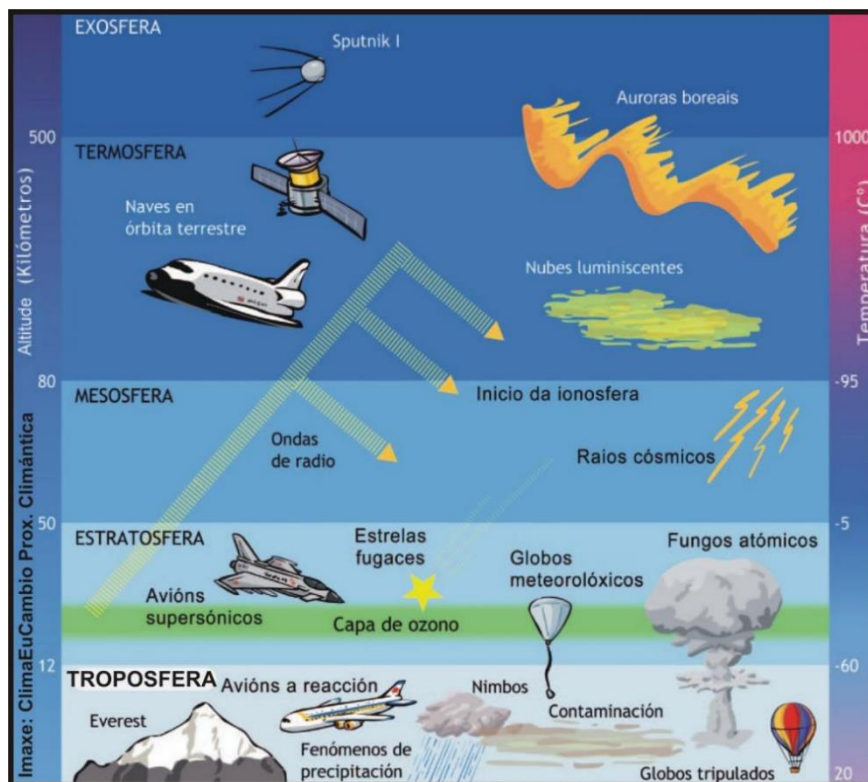


Fig. 10: Capes de l'atmosfera, imatge extreta de la web "AulaFácil".



TROPOSFERA

La troposfera és la capa de l'atmosfera més propera a la Terra, per tant, la capa inferior. Adquireix el seu nom ja que, "*Tropos*" vol dir canvi i a aquesta capa trobem una variació constant del clima. El seu gruix oscil·la entre els 8 km i els 15 km, depenent de la zona de la Terra on ens trobem. Als pols és menor, i a l'equador és major, a causa de la força centrífuga, per tant, el gruix de la troposfera depèn del moviment de rotació de la Terra. També pot variar amb les estacions o amb els fenòmens climàtics que es trobin a la zona observada.

La troposfera es caracteritza per la reducció de la temperatura amb l'altitud. Això és degut al escalfament de l'aire a prop de la superfície terrestre, per la radiació solar. Aquest fenomen explica que a més prop de la superfície, més temperatura.

Està formada per un 78% de nitrogen, un 21% d'oxigen i un 1% d'altres gasos com l'argó, el vapor d'aigua i el diòxid de carboni.

Conté el 80% de la massa d'aire de l'atmosfera gràcies a la gravetat, que fa que la majoria de l'aire es quedi a aquesta capa. Aquest aire es manté en constant circulació, en totes les direccions, degut a les diferències de temperatura a les diferents superfícies de la Terra, per tant, l'atmosfera és inestable a la troposfera.

Aquesta capa també conté la major part del vapor d'aigua, arribant fins a un 99% de tot el vapor d'aigua de l'atmosfera. Això, junt amb el fet de que l'aire es manté en constant circulació, fa que es formin els núvols i es donin els fenòmens meteorològics a prop de la superfície.

TROPOPAUSA

La tropopausa és la capa de transició entre la troposfera i l'estratosfera. La temperatura a partir d'aquest nivell es manté constant amb l'altitud. Es pot trobar a diferents alçades, depenent d'on acaba la troposfera en aquella zona.

Aquesta capa atrapa el vapor d'aigua, els aerosols i la gran majoria dels fenòmens meteorològics associats dins de la troposfera. El gran canvi a la gradient vertical de temperatura fa que els núvols no es continuïn formant a partir d'aquesta.



ESTRATOSFERA

L'estratosfera és la capa que es troba després de la tropopausa i arriba fins als 50 km d'altitud. “*Strata*” vol dir capa i aquest nom és degut a que l'estratosfera està formada pel seu propi conjunt de capes.

A la zona més baixa la temperatura es manté constant amb l'altitud. Degut a això, no hi ha moviments verticals de l'aire (sense diferències de temperatura no hi poden haver moviments convectius), per tant, s'eviten les formacions de fenòmens significatius. L'aire només es mou horitzontalment i no hi ha turbulències.

El poc vapor d'aigua i aerosols que hi ha a aquesta capa poden formar núvols amb poc desenvolupament vertical, anomenats núvols estratosfèrics. Aquests núvols no influeixen en el clima de la troposfera.

Una vegada hem superat els 20 km d'altitud, la temperatura comença a augmentar gradualment fins a valors de 0° C a 50 km d'altitud. Aquest canvi està relacionat amb la presència de la capa d'ozó que ocupa els $\frac{2}{3}$ superiors de l'estratosfera. La radiació ultravioleta fa que les molècules d'O₂ es trenquin i es puguin formar les molècules d'O₃. Aquest procés continu fa que s'alliberi molta calor, cosa que resulta com a augment de temperatura. Aquesta capa d'ozó absorbeix gran part de la radiació UV que prové del Sol, cosa indispensable per la supervivència a la Terra.

Per tant, al contrari que a la troposfera, l'aire fred i pesat es troba a la part inferior de la estratosfera, i l'aire calent i lleuger es troba a la part superior.

3.2.3. PROCÉS DE FORMACIÓ DE L'ESTELA DE L'AVIÓ

Com hem estudiat als apartats anteriors, el motor de l'avió desprèn vapor d'aigua com a resultat de la seva combustió. Es pot donar la situació que la barreja entre l'aire de l'atmosfera i el que surt de l'avió contingui més vapor d'aigua del que pot contenir a aquella temperatura, és a dir, la barreja es troba sobresaturada. Degut a això, sobre les partícules sòlides que també exhala el motor, es formen gotes d'aigua que, degut a les baixes temperatures es congelen. Com a resultat d'aquest procés es formen els deixants de condensació o esteles de condensació.



Aquesta formació depèn de la temperatura i humitat de l'aire de l'atmosfera en el que es troba l'avió, però també influeix el motor i la seva potència.

Si limitem l'anàlisi de les esteles a les condicions atmosfèriques es diu que *“no es formen quan la humitat és baixa i la temperatura és sota zero però no suficientment baixa. Al contrari, sí que es formarien si l'aire és molt humit i molt fred.”*⁴

Perquè l'estela es mantingui a l'atmosfera durant un cert temps, caldria que l'aire estigués saturat amb una humitat relativa quasi del 100%. Com que la pressió saturant del vapor d'aigua és menor respecte del gel que respecte de l'aigua, podria passar que la humitat relativa respecte de l'aigua fos lleugerament inferior a 100%, però que la humitat relativa respecte al gel sigui superior a aquest 100%. A aquestes condicions, un núvol format per gotes d'aigua es dissiparia lentament, mentre que un núvol format per cristalls de gel creixeria mentre tingués vapor d'aigua disponible. Aquesta és la raó per la que hi ha deixants de condensació que poden perdurar durant molt de temps, fent-se molt amples i movent-se amb el vent fins a distàncies molt llunyanes.

Per tant, depenent de la temperatura i la humitat de l'aire per on passa l'avió, podríem observar esteles de llarga durada (que acabarien convertint-se en antroponúvols), de petita durada, o fins i tot, no observar-ne cap estela.



Fig. 11: Imatge del cel el dia 24 de setembre de 2021 a Cornellà de Llobregat a les 19:25h. Imatge de Sara Allende on podem observar molts deixants de condensació de llarga durada.

⁴ Conclusions de: [Deixants de condensació - Servei Meteorològic de Catalunya | Meteocat](#)



GRÀFIC D'APPELMAN

El 1953, Appelman va crear un gràfic que va rebre el seu nom. Aquest estudi mostra la possibilitat de creació d'un deixant donades una alçada i una temperatura, depenent de la humitat relativa. Segons aquest gràfic, serà a partir del 8km d'altitud on es trobarien les condicions de temperatura i humitat necessàries per a la formació d'esteles.

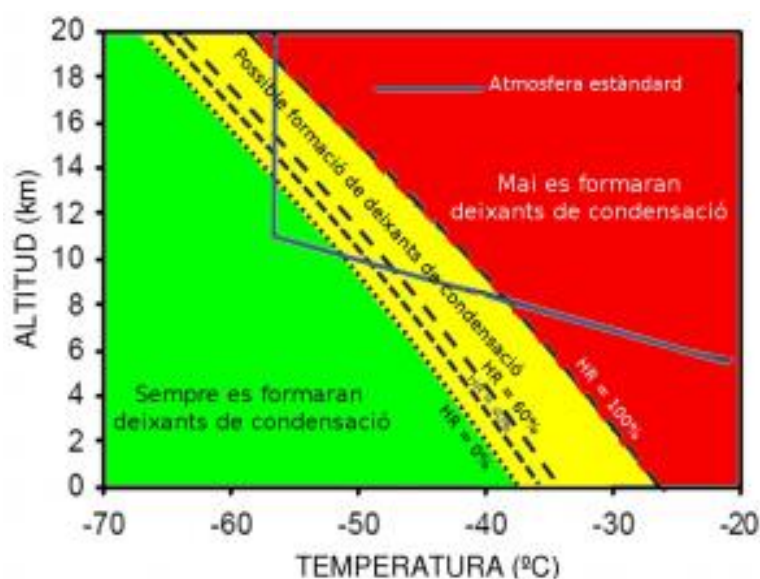


Fig. 12: Gràfic d'Appelman adaptat al català extret de meteo.cat al blog: "Deixants de condensació" el 14 d'agost del 2015.

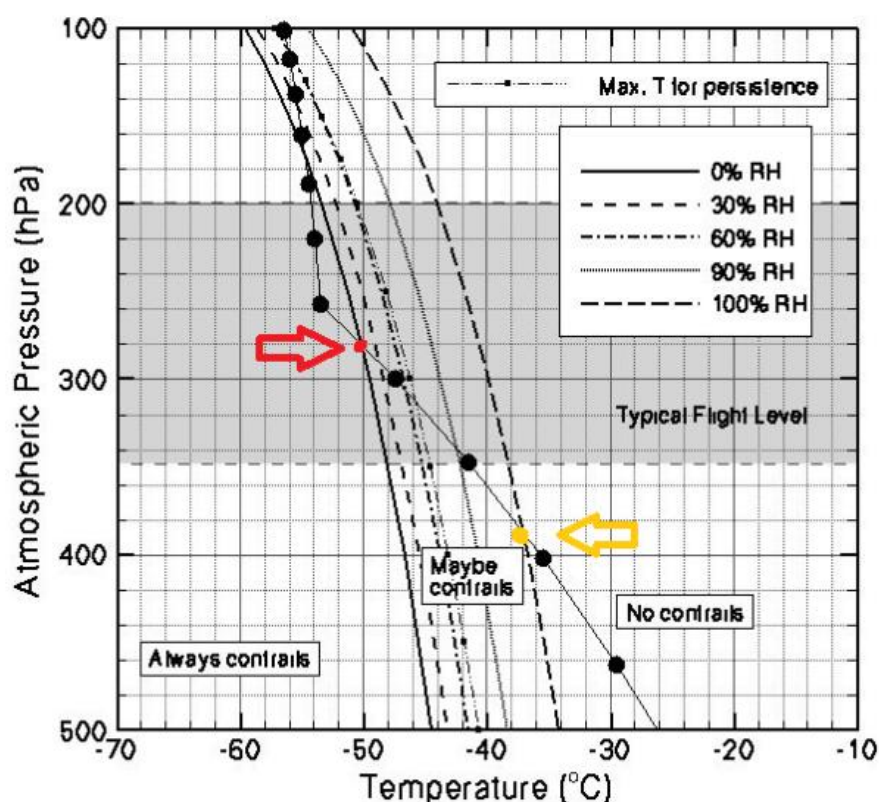


Fig. 13: Imatge real del Gràfic d'Appelman, extreta del blog de la AEMET: "Estelas de condensación" de la Delia Gutiérrez Rubio, meteoròloga de la AEMET, el 15 de març del 2017.



3.3. INTERÈS CIENTÍFIC DE LES ESTELES

Les esteles augmenten el número de núvols a l'atmosfera, ja que són núvols amb forma de línia. Els núvols ajuden al control de la temperatura de l'atmosfera de la Terra i qualsevol canvi en la nuvolositat a partir de actes humans, com serien les esteles, poden arribar a contribuir a canvis a llarg terme del clima de la Terra.

Com diu Delia Gutiérrez Rubio, meteoròloga de AEMET, al blog “Estelas de condensación: las nubes que señalan el rastro de los aviones”, publicat el 15 de març del 2017 per AEMETblog:

“Aparte del interés estratégico para los vuelos militares, las estelas de condensación persistentes sí tienen hoy en día relevancia en el campo de la predicción, particularmente en la predicción del clima a largo plazo. Un trabajo científico estimó, en 1998, que la cobertura nubosa creada por el hombre a partir de las estelas de los aviones era del 0,1% de la superficie del planeta, y esto sin contar los cirros de evolución a partir de las estelas más persistentes. Además, es de prever que el crecimiento del tráfico aéreo y los avances tecnológicos de los motores hagan aumentar este porcentaje”.

Per tant, arribem a la conclusió de que les esteles tindrien un impacte en el canvi climàtic, també estudiat al blog de la Delia Gutiérrez Rubio per l'AEMET:

“Hay estudios que han encontrado una correlación entre el aumento de la cobertura nubosa de cirros y las emisiones de aeronaves. En promedio, el 30% de la superficie de la Tierra está cubierta de cirros. Un aumento de la cobertura nubosa de cirros tendería a aumentar la temperatura global superficial. Por tanto, el aspecto de las estelas de condensación del que tiene fundamento preocuparse es su posible impacto en el aumento de temperatura global.”

Les esteles es fan servir per dur a terme diferents observacions i estudis, algun d'ells són:

- Anàlisi meteorològic a partir de la humitat i la durada de les esteles.
- Estudi del moment i la ruta d'avions i vols antics.
- Estudi dels motors a partir de la formació de les esteles ja que afecta a la seva formació.



- Obtenció d'imatges de satèl·lit en les que es pot estudiar la cobertura de recorregut gràcies a les esteles de condensació.

3.3.1.LES ESTELES I LA PREDICCIÓ METEOROLÒGICA

Tal i com hem dit a l'apartat anterior, es podria arribar a fer un anàlisi meteorològic a partir de la durada de les esteles. Ara, la pregunta és, és possible predir fenòmens meteorològics a partir de l'observació de la forma, la longitud i la durada de les esteles dels avions presents a l'atmosfera?

Segons l'estudi fet a l'apartat 3.2.3.*Procés de formació de l'estela de l'avió*, que es formin o no les esteles depèn de factors com la humitat, el punt de rosada, l'alçada o la temperatura. Tot fenomen que passa a l'atmosfera arriba a tenir repercussions meteorològiques posteriorment. Per tant, relacionant-ho, arribaríem a la conclusió de que es podria fer una predicció del temps meteorològic o, fins i tot de fenòmens meteorològics, amb l'estudi de les esteles.

Tal i com el meteoròleg Mario Picazo explica al seu llibre *"Los grillos son un termómetro: curso práctico de meteorología"* : *"Estas nubes alargadas se forman artificialmente con el paso de un avión por zonas altas de la atmósfera y, obviamente, no producen lluvia. [...] si tras el paso del avión el rastro empieza a deshacerse, significa que el aire está seco; por el contrario, que la nube se mantenga en el aire durante un determinado periodo de tiempo indica que la atmósfera contiene bastante vapor de agua a la altura a la que navega el avión. Esta última situación puede anticipar la llegada de tiempo inestable, ya que cuando el aire está bien nutrido con vapor de agua, resulta más probable la formación de nubes consistentes y cargadas de agua"*.



4. NÚVOLS

Tal i com diu l'Organització Meteorològica Mundial al seu "Atles internacional de núvols": *"un núvol és un hidrometeor⁵ consistent en partícules diminutes d'aigua líquida, gel, o ambdós, suspeses a l'atmosfera i que, pel general, no toquen el terra. També poden estar formats per partícules d'aigua líquida o gel de majors dimensions, així com partícules líquides no aquoses o partícules sòlides procedents, per exemple, de gasos industrials, fum o pols"*.

Hi trobem diferents tipus i famílies de núvols segons diferents factors com la forma, el color, la textura, les dimensions, l'estructura, la luminància⁶, etc. Trobem deu grans famílies, les principals: cirrus, cirrocúmul, cirrostrats, altocúmul, altostrats, nimbostrats, estratocúmul, estrats, cúmul, cumulonimbus.

Els núvols acostumen a trobar-se entre la superfície de la Terra, al nivell del mar i la tropopausa, al final de la troposfera. Els diferents tipus de núvols es poden classificar per alçades a les que apareixen. Dividim la troposfera en tres parts, a la zona temperada nord, on es troba Espanya, la part baixa va des de la superfície de la Terra fins als 2 km d'alçada. Després, veiem la part mitjana que avarca des dels 2 km fins als 5-7 km, i, per últim, la part alta va des dels 5-7 km fins a la tropopausa, als 13 km, aproximadament.

⁵ hidrometeor: meteor aquós format per la condensació, precipitació o congelació del vapor d'aigua a l'atmosfera.

⁶ luminància: llum que reflecteixen, dispersen i transmeten les partícules que componen un núvol. Aquesta llum prové d'astres lluminosos, com el Sol, la Lluna o les estrelles, o de la superfície de la Terra, encara que aquesta és menys comuna.

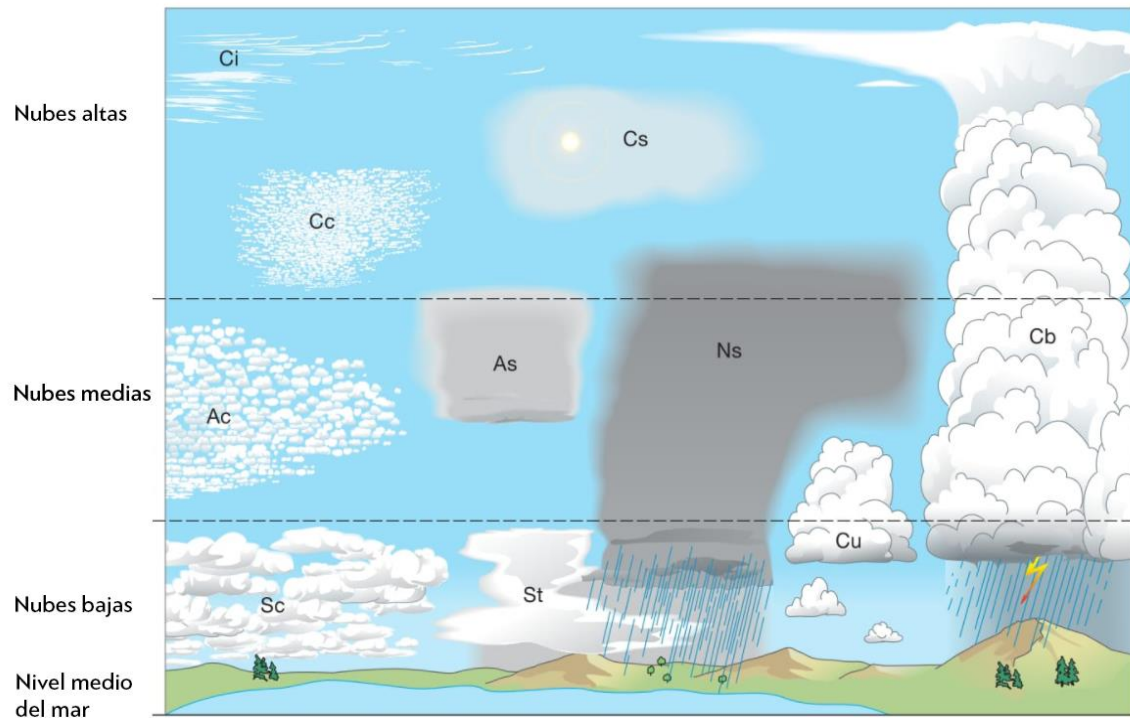


Fig. 14: Tipus de núvols. Imatge extreta de l'Atlas Internacional de Núvols, de l'Organització Meteorològica mundial.

Analitzant aquesta imatge veiem quins núvols pertanyen a cada capa.

NIVELL D'ALÇADA	TIPUS DE NÚVOL
Baix	estratocúmul estrats cúmul cumulonimbus.
Mitjà	altocúmul altostrats nimbostrats,
Alt	cirrus cirrocúmul cirrostrats,



4.1. ESTRATOCÚMULS (Sc)

Bancs de núvols de gran extensió horitzontal i amb poc desenvolupament vertical. Solen ser grisos encara que, de vegades, alternen amb un color blanquinós. Està format per masses arrodonides, rodets o cilindres irregulars. Totes aquestes formes estan repartides de forma regular fins a formar estratocúmul. Normalment es troben sota els 2.000 metres i poden arribar a cobrir el cel amb totalitat encara que, per els núvols dels que està format es podria arribar a veure el cel blau.

Generalment, no aporten precipitació o, si n'aporten, només són plugims. Aquest tipus de núvol anticipa mal temps, indicant tempestes en un futur.

4.2. ESTRATS (St)

Capa de núvols de gran extensió horitzontal però d'un desenvolupament vertical molt baix. Acostumen a cobrir el cel i tenen un color característic, el gris fosc. La seva base és bastant uniforme i es troba a alçades baixes. Acostumen a existir entre el terra i els 800 metres. De vegades es confon amb boira.

Poden generar precipitacions, convertint-se en boira, boirina o en plugim. Depenent de les condicions meteorològiques a la seva base es poden donar precipitacions en forma de neu.

4.3. CÚMULS (Cu)

Núvols separats, generalment amb un aspecte dens. Se'ls identifica ja que, acostumen a tenir forma de cotó, amb un contorn molt definit. Tenen un major desenvolupament vertical que horitzontal encara que és molt variable. Des dels petits cúmuls que apareixen amb molt bon temps, fins als de gran desenvolupament vertical que són els precursors dels cumulonimbus o els núvols de tempesta.

Normalment no són capaços de cobrir tot el cel. Es caracteritzen per la base relativament fosca i, normalment, horitzontal i que es troben a una alçada de 800-1.000 metres. Les parts més altes, en canvi, són d'un blanc brillant. Al seu interior trobem gotes d'aigua però a les parts més altes podem trobar partícules de gel.



No acostumen a donar precipitacions excepte les que tenen un desenvolupament vertical molt més elevat, que poden generar precipitacions en forma de xàfec.

4.4. CUMULONIMBUS (Cb)

Són anomenats núvols de tempesta i són els que tenen un major desenvolupament vertical. Travessen els tres nivells d'altituds, des de la base, al nivell inferior, a la cima, al nivell superior i no solen cobrir el cel amb totalitat.

És un núvol dens i molt alt amb una base molt fosca que es troba a poca alçada, a uns 800 metres. Una part de la seva cima és aplanada, allisada i blanca.

Provoquen precipitacions molt importants en formes de pluges molt intenses acompanyades de calamarsa i, depenent de les condicions meteorològiques, neu.

4.5. ALTOCÚMULS (Ac)

Mantell ennuvolat de gran extensió horitzontal format per núvols individuals de poc desenvolupament vertical. La seva base es troba a uns 3.000 metres d'alçada i poden cobrir tot el cel encara que, s'observen forats on es pot veure el cel o el Sol.

Els núvols que formen aquesta capa estan separats entre ells, acostumen a ser grisos però, de vegades s'alternen amb un color blanquinós i tenen un aspecte fibrós. S'assemblen molt als estratocúmulos però, els núvols que el formen són de menor mida.

Estan constituïts per gotes d'aigua, encara que, a temperatures molt baixes poden contenir cristalls de gel. Aquest tipus de núvol no produeix precipitacions.

4.6. ALTOSTRATS (As)

Mantell uniforme de gran extensió horitzontal i un desenvolupament vertical considerable que pot arribar a cobrir tot el cel però, al tenir parts molt primes, podem arribar a veure la llum del Sol. Té un aspecte fibrós i és de color grisós o blavenc. La seva base es troba entre els 3.000 i 4.000 metres d'alçada.



Estan constituïts per gotes d'aigua i cristalls de gel i la majoria dels cops per gotes de pluja i flocs de neu i no produeixen fenòmens d'halo⁷.

Produeixen precipitacions en forma d'aigua o neu normalment, continues però no molt intenses.

4.7. NIMBOSTRATS (Ns)

Els nimbostrats són una capa continua amb un desenvolupament horitzontal elevat i un creixement vertical moderat. Poden arribar a ocupar tot el cel, ocultant completament el Sol degut a la seva densitat, tenen un color grisós fosc característic i un aspecte velat. La formació de la seva base es troba a alçades molt diverses cosa que fa que se'ls pugui considerar núvols baixos o mitjans.

Estan constituïts per gotes d'aigua o pluja i també poden tenir cristalls de gel i flocs de neu.

Aquests núvols sempre donen precipitacions que acostumen a ser continues i no molt intenses.

4.8. CIRRUS (Ci)

Són el núvol més alt dels que es formen a la troposfera, trobant-se entre els 6.000 i 8.000 metres d'alçada. Són de gran extensió horitzontal però no acostumen a cobrir totalment el cel. Tenen un aspecte fibrós o de filaments i estan constituïts per petits cristalls de gel que fan que tinguin un color blanquinós i sense ombres.

No donen precipitacions però, acostumen a informar-nos que en el futur arribaran núvols més compactes, amb més desenvolupament vertical, que si en donen.

La presència de molts cirrus pot ser un signe d'un sistema frontal o d'una aproximació d'una pertorbació a les capes altes.

⁷ halo: fenomen òptic meteorològic que consisteix, en aquest cas, en que els cristalls de gel que formarien els núvols produirien un anell lluminós amb el Sol o la Lluna al centre.



4.9. CIRROCÚMULS (Cc)

Tenen una aparença d'una capa de núvols de color blanc, sense ombres pròpies, i es formen a unes alçades d'uns 7.000 metres. Estan compostats per elements molt petits en forma d'ones que, la majoria dels cops, no estan units entre si, cosa que ens permet veure forats de cel.

Estan formats majoritàriament per cristalls de gel i no donen precipitacions.

Els cirrocúmulos i els altocúmulos poden lluir pràcticament idèntics, encara que els cirrocúmulos són més alts i no produeixen cap ombra.

4.10. CIRROSTRATS (Cs)

Núvols que formen un vel transparent i blanquinós, d'aspecte fibrós que cobreix el cel parcial o totalment i que deixen observar el Sol però, de manera molt velada. Apareixen a uns 8.000 metres d'alçada i no produeixen precipitacions.

Està format per petits cristalls de gel relativament diversos, cosa que explica la seva transparència. Molts cops s'observen fenòmens d'halo, quan els núvols són prims. A vegades és tan prim que es sap de la presència de cirroestrats gràcies a aquest fenomen.

4.11. NÚVOLS ANTOPOGÈNICS

Els núvols antropogènics són aquells que han estat formats degut a l'acció humana o la seva formació ha estat influïda directament per la seva acció. Dintre d'aquest grup és on trobem els deixants de condensació, també coneguts com a antropocirrocúmulos, cirrus homogenitus o antropocirrus, que són núvols antropogènics alts.

Com em va informar Jordi Escoda Manso, professor de llengua castellana i literatura a l'Institut Joan Puig i Ferrer i observador meteorològic de la Selva del Camp, Reus i la Riba-roja d'Ebre, els deixants dels avions han de romandre com a mínim 10 minuts al cel per a que puguin ser considerats núvols antropogènics.

Una vegada aquests núvols experimentin una transformació a uns núvol cirru més natural, el núvol resultat tindrà com a nom el que correspongui al seu gènere, espècie i varietat i, finalment, "homomutatus" com a nom de núvol especial.



Fig. 15: **Estratocúmul (Sc)**. Imatge de Michael Bruhn, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.



Fig. 16: **Estrat (St)**. Imatge de Michael Bruhn, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.

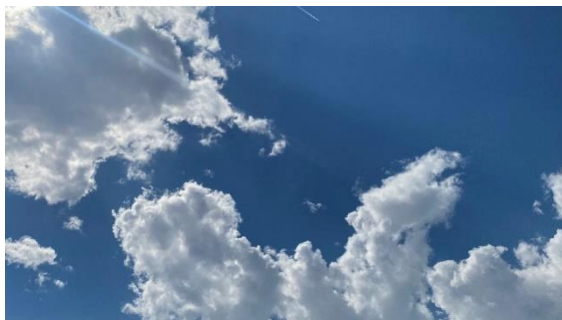


Fig. 17: **Cúmul (Cu)**. Imatge original de Sara Allende.



Fig. 18: **Cumulonimbus (Cb)**. Imatge de Antonio J. Galindo, extreta de la Organització Meteorològica



Fig. 19: **Altocúmul (Ac)**. Imatge de Petr Malyshev.



Fig. 20: **Altostrats (As)**. Imatge de Frank Le Blancq, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.



Fig. 21: **Nimbostrats (Ns)**. Imatge de Martin Gudd, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.



Fig. 22: **Cirrus (Ci)**. Imatge de Stephen Burt, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.



Fig 23: **Cirrocúmul (Cc)**. Imatge de George Anderson, extreta de la Organització



Fig. 24: **Cirrostrats (Cs)**. Imatge de Usynina Luybov, extreta de la Organització Meteorològica Mundial.



Fig. 25: **Núvols Antropogènics, deixants de condensació**. Imatge original de Sara Allende, 8 de Maig de 2021 a les 16:58h, Cornellà de Llobregat .



MARC PRÀCTIC

1.METODOLOGIA

El marc pràctic d'aquest treball consisteix en l'anàlisi de deixants de condensació d'avions de l'àrea de Cornellà de Llobregat, Barcelona.

La metodologia utilitzada ha estat basada en l'observació, identificació del número de vol i registre audiovisual durant el mes de juliol i la primera quinzena de setembre del 2021. Posteriorment, he analitzat les dades de les meves observacions i les he creuat amb les dades reals del perfil meteorològic en alçada que em proporciona la Universitat de Barcelona, amb els seus radiosondatges diaris.

No vaig poder realitzar les observacions durant el mes d'agost per trobar-me fora de Barcelona, ni tampoc a partir de l'inici de classes per tenir horaris escolars incompatibles amb la franja d'observacions que era necessària. El lloc d'observació ha estat sempre ubicat al barri Almeda (el terrat del meu domicili) i el temps d'observació era de 11 UTC a 13 UTC⁸, hora solar, diàriament. El temps d'observació era en aquesta franja degut a què l'hora de llançada del radiosondatge automàtic, fet des del terrat de la Facultat de Física⁹ a la Universitat de Barcelona, és a les 11 UTC, de manera que arriba a la part superior de la troposfera a les 12 UTC. Per tant, pretenent creuar la informació extreta de les meves observacions amb les dades del radiosondatge de la UB, per ser el més exactes possibles, les observacions es van fer des d'una hora abans fins a una hora després del llançament del globus.

El radiosondatge, tal i com diu el Servei Meteorològic de Catalunya, *"és un sondatge atmosfèric realitzat per una radiosonda, és a dir, la caracterització vertical de l'atmosfera mitjançant instruments transportats habitualment per un globus"*. Aquest radiosondatge és l'únic que es fa a Catalunya actualment, i uns dels pocs d'Espanya. Partint d'aquesta informació, haver tingut la sort de tenir l'únic radiosondatge de

⁸ de 13:00 a 15:00h, hora local

⁹ Situat a uns 5 km del lloc d'observació de les esteles, al barri d'Almeda de Cornellà de Llobregat.



Catalunya a prop del lloc d'observació d'aquest treball, va fer possible la seva realització i posterior anàlisi de dades.



Fig. 26: Imatge del globus sonda en el moment del seu llançament.¹⁰

Per poder dur a terme l'estudi realitzat a aquest treball, s'havia de saber diferents tipus d'informacions de variables meteorològiques en alçada. Vaig contactar amb Yolanda Solà, una meteoròloga de la Universitat de Barcelona, per demanar-li les dades registrades pel radiosondatge durant el mes de juliol i setembre.

Durant tot el mes de juliol i la primera quinzena de setembre, vaig estar al terrat de casa meua, a Cornellà de Llobregat, observat i registrant tots els avions que passaven durant la franja d'observacions. Cada avió que localitzava, era gravat i prenia nota del temps de durada i característiques de l'estela. Al mateix moment que gravava havia de buscar quin avió i vol era per, més tard, saber tota la informació necessària. Això va ser possible gràcies a la app de Flightradar24 (Flight Tracker), un rastrejador de vols.

¹⁰ <https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/equipaments-meteorologics/radiosondatge/>



Fig. 27: Web de Flightradar24: www.flightradar24.com

Al buscar el vol que era, posava l'hora en la que jo havia vist l'avió, per tant, el moment en el que volava per la zona d'observació. L'aplicació em proporcionava informació sobre el vol que era, la companyia aèria, l'avió i la seva matrícula, el lloc de sortida i d'arribada, la velocitat (en nusos) i l'alçada (en peus) de l'avió i la direcció (en graus). Gràcies a aquesta aplicació podia saber com estava volant l'avió en el moment en el que s'estava produint l'estela que jo estudiaria més endavant.

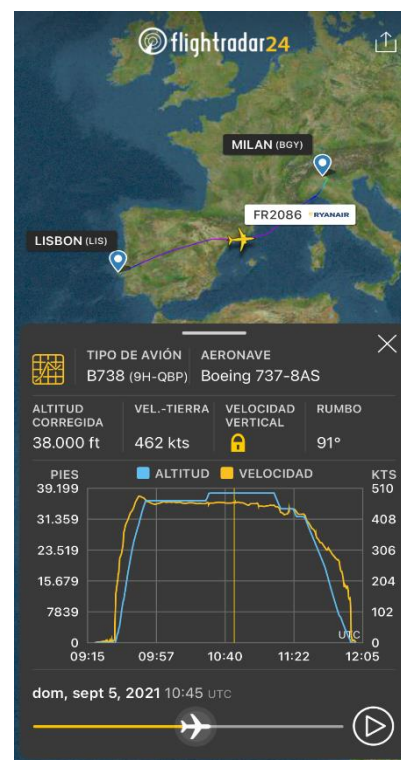


Fig. 28: Exemple de rastreador de vols amb Flightradar24, del dia 7 de setembre, del vol FR2086, de Lisboa a

Amb tota aquesta informació vaig anar omplint un excel per cada mes d'observacions. A aquest excel també vaig posar tots els links a les fotos i els vídeos de cada avió, que anava fent durant les observacions. Depenent de la durada vaig fer-hi més o menys, si era un deixant de condensació de llarga durada el documentava durant tot el temps que havia estat visible, per poder fer un seguiment. També vaig afegir columnes on s'especificava la durada de l'estela (en segons), l'hora d'avistament i la forma de l'estela. Al excel també hi ha altres informacions de l'avió com el seu pes buit. Se'm va ocórrer la idea d'estudiar si hi havia una relació entre la estela i el tipus de motor però, al veure que cada motor era diferent i que no és que n'hi hagués pocs, per poder diferenciar-los, vaig deixar aquest estudi a part, ja que ben bé podrien generar un nou Treball de Recerca en quant a complexitat i dedicació.

A aquests excels també trobem el registre de la part meteorològica que correspon a cada dia, com el tipus de núvols al cel al moment d'observació, el temps meteorològic



al llarg del dia i les precipitacions. Les dades de precipitació les vaig aconseguir al twitter @meteocornellà, un compte on pugen diàriament, les condicions meteorològiques a la ciutat, preses des del barri Centre, a prop de l'Ajuntament.

L'últim que vaig afegir van ser les dades del radiosondatge: pressió (hPa), temperatura (°C), humitat relativa (%), temperatura de rosada (°C), velocitat del vent (nudos) i direcció del vent (°). Per a les dades al nivell del terra, vaig agafar les primeres dades que donava el radiosondatge, a 98 m sobre el nivell del mar, és a dir, l'altura del terrat de la facultat de Física de la Universitat de Barcelona, des d'on es llança la radiosonda. En canvi, per a les dades en alçada, agafava l'alçada a la que volava l'avió al moment d'observació, dada que ens havia proporcionat la app de Flightradar24, i que era diferent per a cada avió. A l'hora de fer les gràfiques de les condicions meteorològiques diàries, he agafat el valor mitjà (diferent pel juliol i setembre) de l'alçada de vol de les observacions pels dies en els que no hi havia avistaments.

Dels dies 4, 5 i 6 de setembre no vaig poder aconseguir dades ja que, tal i com em va explicar la Yolanda Solà, van tenir problemes tècnics que van impedir que es fessin radiosondatges durant una sèrie de dies, fins que ho van arreglar. Ha estat un petit inconvenient degut a què eren dies amb molts avistaments d'avions i amb esteles de llarga durada.

EXCEL JULIOL



EXCEL SETEMBRE



A més a més, cada dia feia una foto panoràmica del cel a l'hora de començament d'observació i a l'hora final. Vaig fer dos diaris d'observacions, un del mes de juliol i un altre del mes de setembre on, a part de guardar les imatges del cel, anava anotant problemes, observacions o simplement, com es veia el cel i quin tipus de núvols trobàvem.

**DIARI D'OBSERVACIONS JULIOL****DIARI D'OBSERVACIONS SETEMBRE**

El mes amb més problemes va ser el juliol ja que hi va haver molts dies de pocs o cap avistament d'avions. Al principi creia que era perquè no passaven avions durant el temps d'observació però, finalment, vaig descobrir que era perquè els avions que passaven no deixaven estela. Això feia que l'avió fos molt difícil, quasi impossible, de detectar.

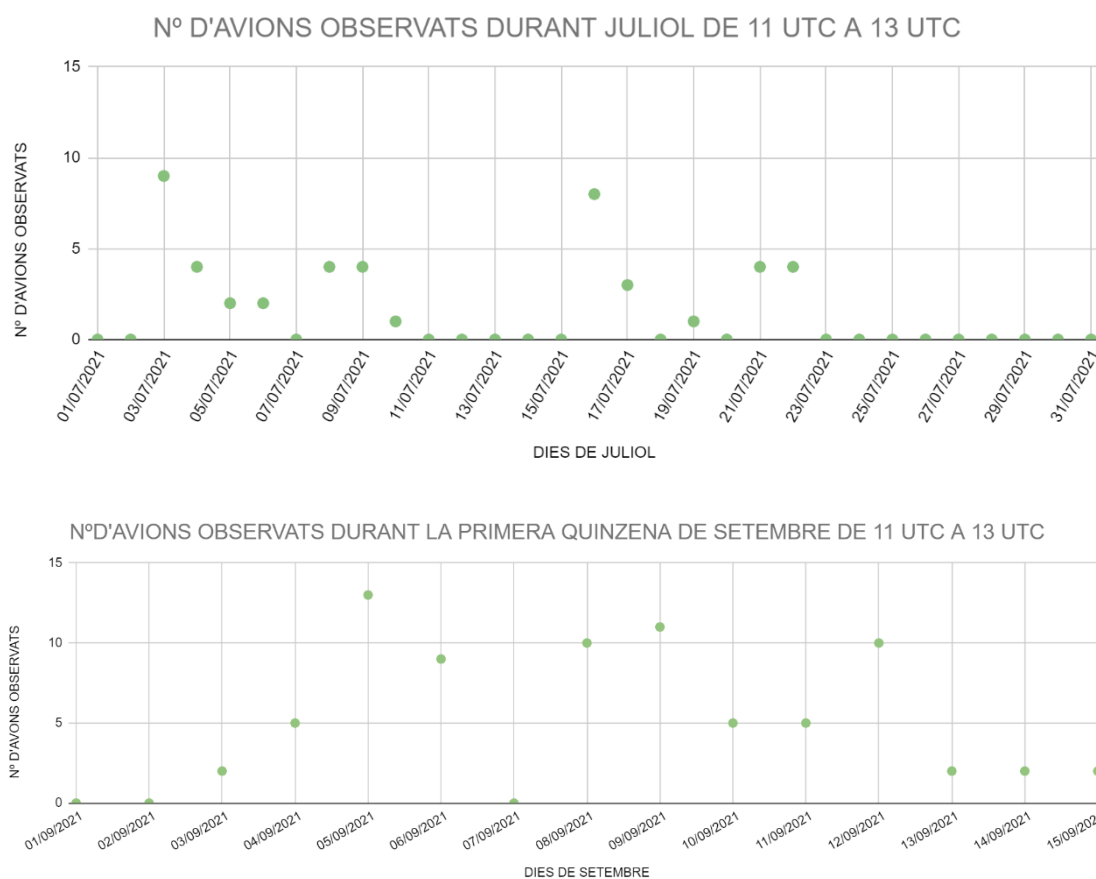
Al setembre tot va ser més fàcil ja que les esteles eren molt més visibles i ja havia solucionat tots els problemes que havia tingut al juliol.



2.RESULTATS

Després de fer les observacions diàries i omplir tot l'excel, vaig començar a fer gràfiques per tal de trobar algun tipus de relació en la formació d'esteles i les condicions meteorològiques en alçada. Hauria estat molt interessant també poder fer l'anàlisi tenint en compte les característiques dels motors dels avions, però tal com he comentat abans, la complexitat d'aquest estudi donaria lloc a un altre Treball de Recerca.

Nº D'AVIONS OBSERVATS



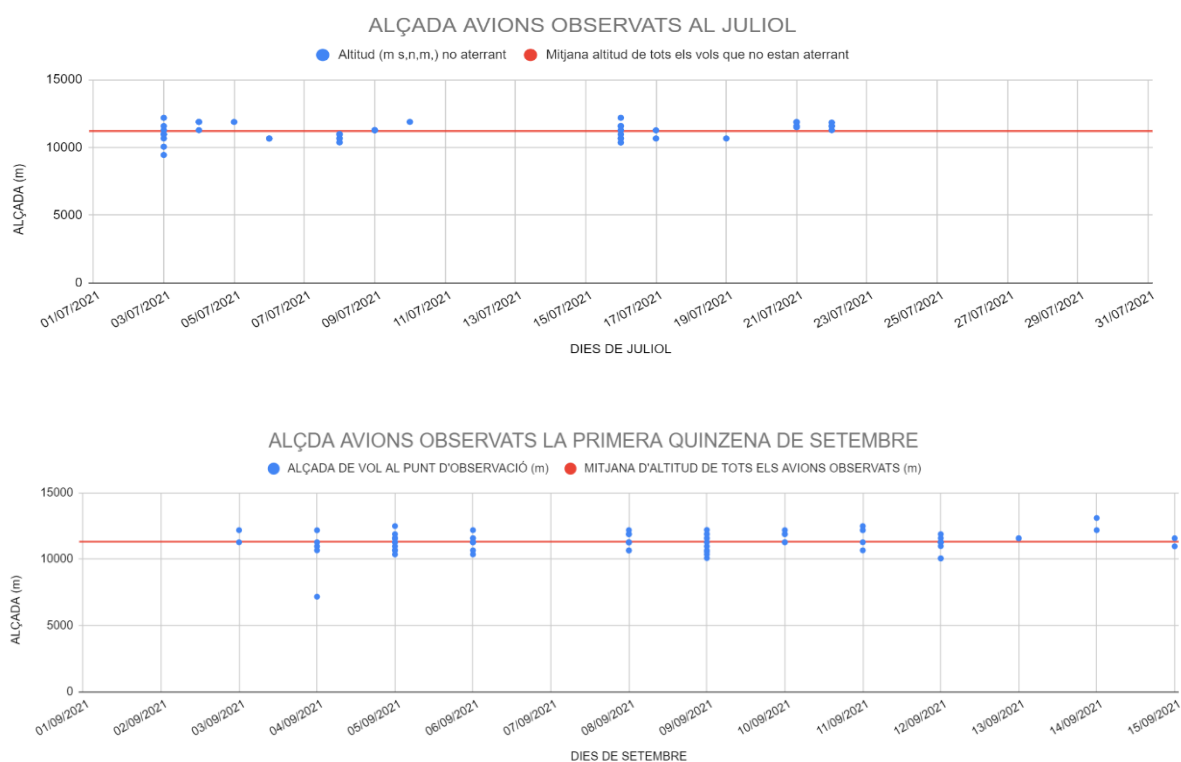
Encara que al juliol es van fer observacions durant 31 dies i al setembre només durant 15 dies, el número d'avistaments d'avions va ser major al setembre amb un total de 76 avions estudiats en comparació els 46 del mes de juliol. A més a més, durant el mes de juliol van haver-hi molts dies sense cap observació. Sabia que passaven avions, gràcies a l'aplicació de Flightradar24, però no detectava els avions al cel. Finalment, vaig arribar a



la conclusió de que això era degut a la estela inexistent dels avions durant aquests dies i, per tant, era molt difícil la seva detecció.

Sabent això, arribem a la conclusió que, si he pogut observar moltes més esteles durant el mes de setembre, possiblement ha estat a causa de què les condicions per a la seva formació i persistència al cel han estat diferents. El mes de juliol va ser un mes molt estable meteorològicament, no sent així durant el mes de setembre

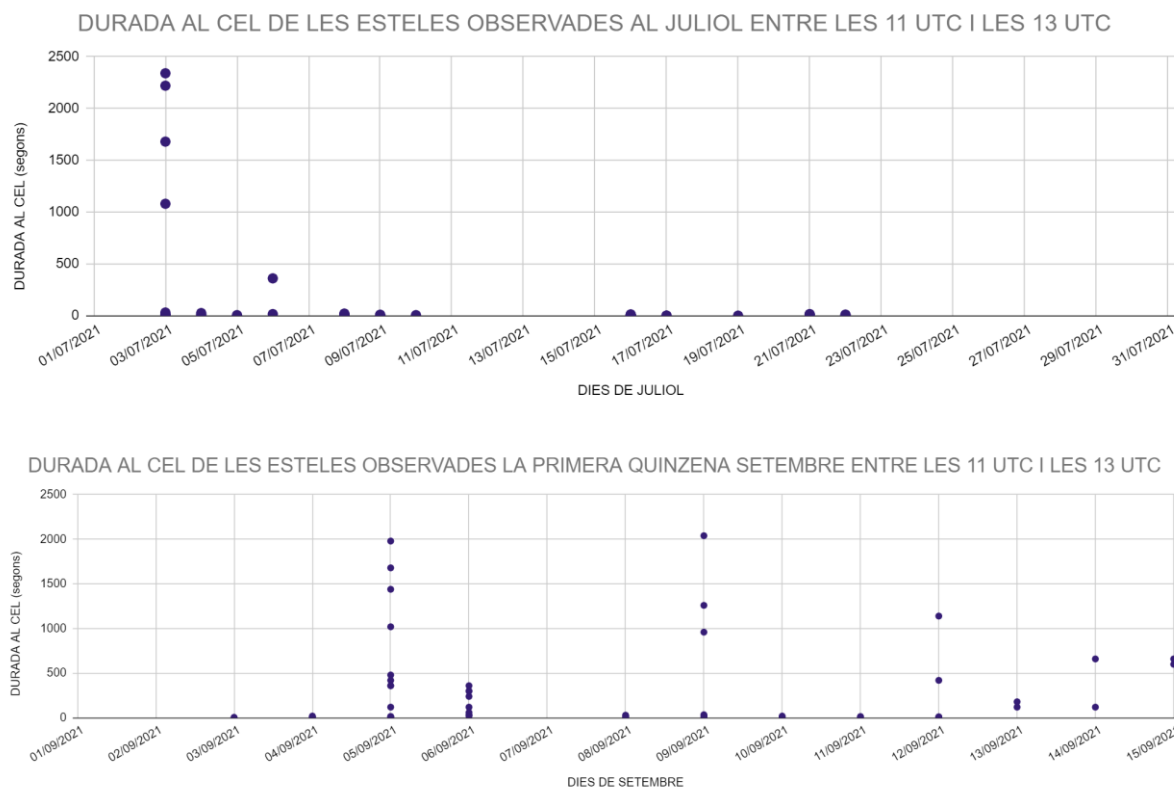
ALÇADA DE VOL



A aquests gràfics veiem l'alçada dels avions observats, tant al juliol com a la primera quinzena de setembre. Observant la mitjana, feta amb les dades dels avions observats cada mes, veiem que és bastant semblant als dos mesos. Al juliol l'alçada mitjana va ser 11.213 metres. En canvi, al setembre va ser 11.323 metres.



DURADA AL CEL DE ELS DEIXANTS DE CONDENSACIÓ



En relació amb la durada al cel de les esteles observades, podem veure una gran diferència entre el mes de juliol i el mes de setembre. A més a més, també trobem molts dies sense dades al mes de juliol degut a que no van haver-hi avistaments.

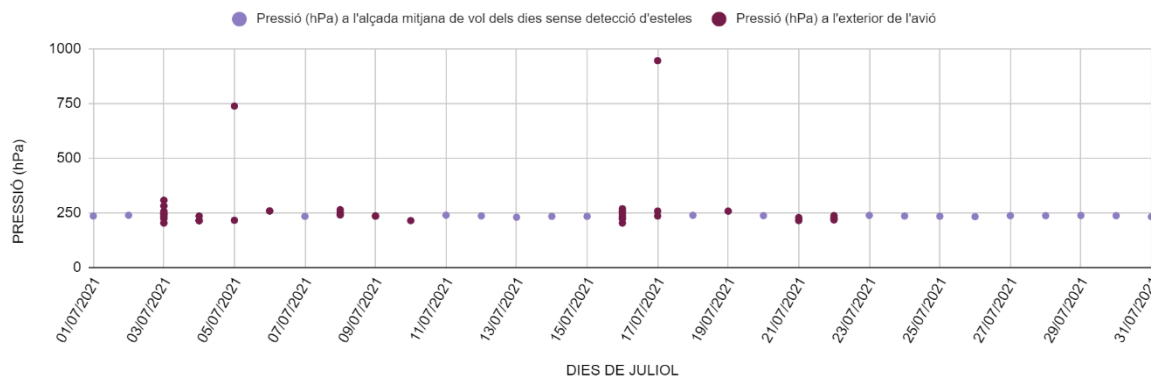
Al juliol considerarem el dia 3 i el dia 6 com a dies importants, amb esteles de llarga durada en comparació amb la resta del mes. Per tant, a la resta de gràfics ens centrarem específicament en aquests dies.

De la mateixa manera, a la primera quinzena de setembre, considerarem dies d'estudi el dies 5 ,9 ,12 ,13 ,14 i 15 de setembre. Com hi va haver problemes amb el radiosondatge els dies 4, 5 i 6 de setembre, el dia 5 de setembre, encara que és uns dels dies amb més avistaments, no es podrà estudiar, ja que no tenim dades meteorològiques.

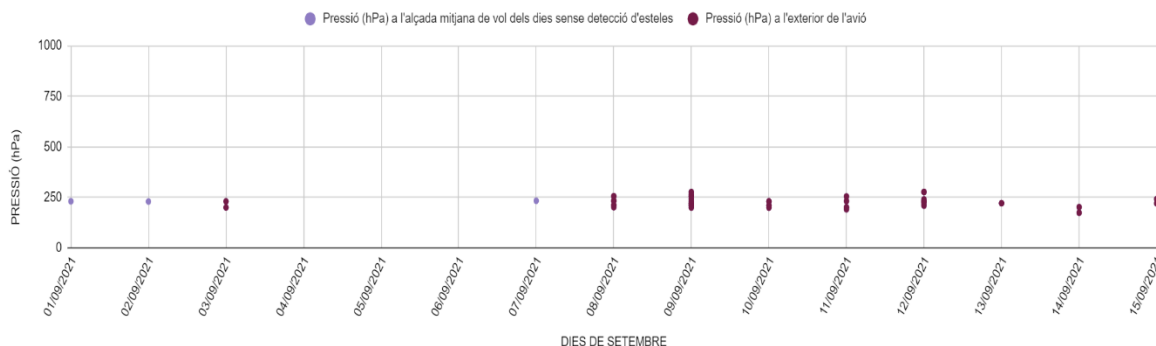


PRESSIÓ ATMOSFÈRICA

PRESSIÓ ATMOSFÈRICA EXTERIOR DELS VOLS OBSERVATS AL JULIOL



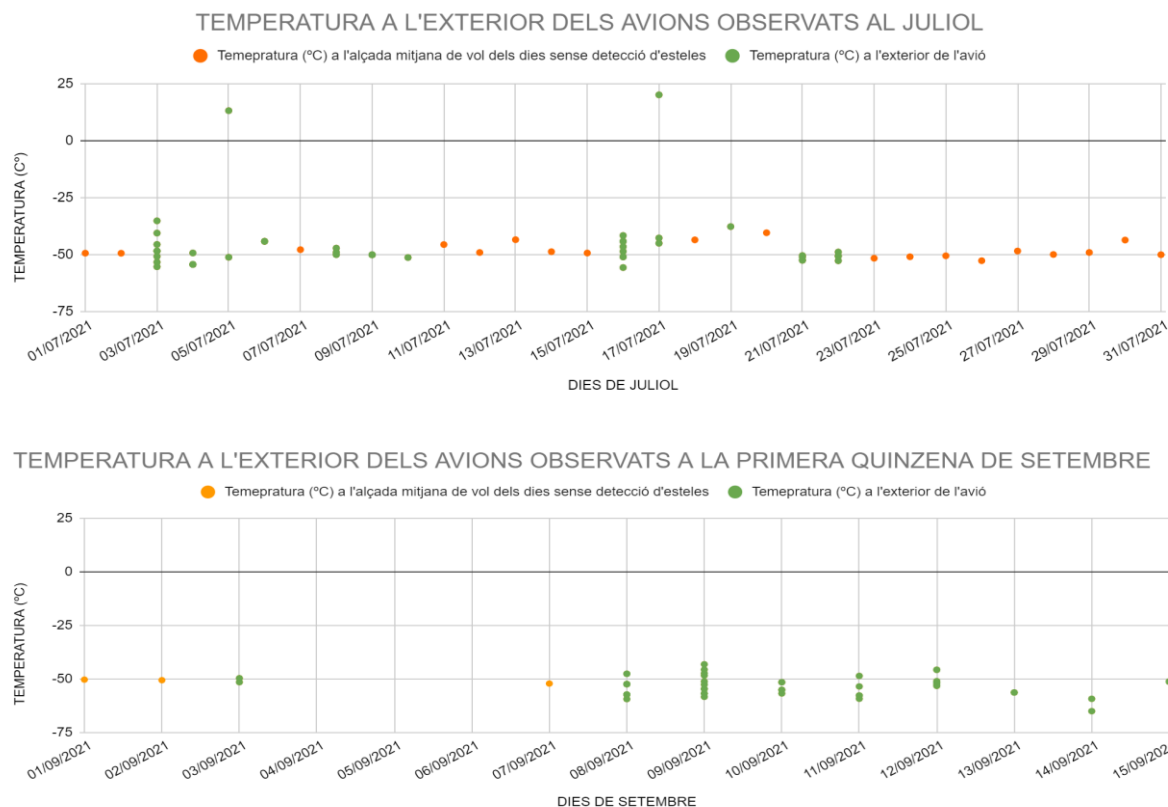
PRESSIÓ ATMOSFÈRICA EXTERIOR DELS VOLS OBSERVATS A LA PRIMERA QUINZENA DE SETEMBRE



Gràcies a aquests gràfics, podem comprovar que la pressió atmosfèrica a l'alçada de vol dels avions no varia molt al llarg dels dies. La variació que veiem depèn de l'alçada a la qual es trobava l'avió. Al juliol veiem el registre de dos avions, que estaven aterrant, a una pressió atmosfèrica superior a la resta dels avions. Tot i estar en alçades de vol inferiors, es van observar esteles.



TEMPERATURA

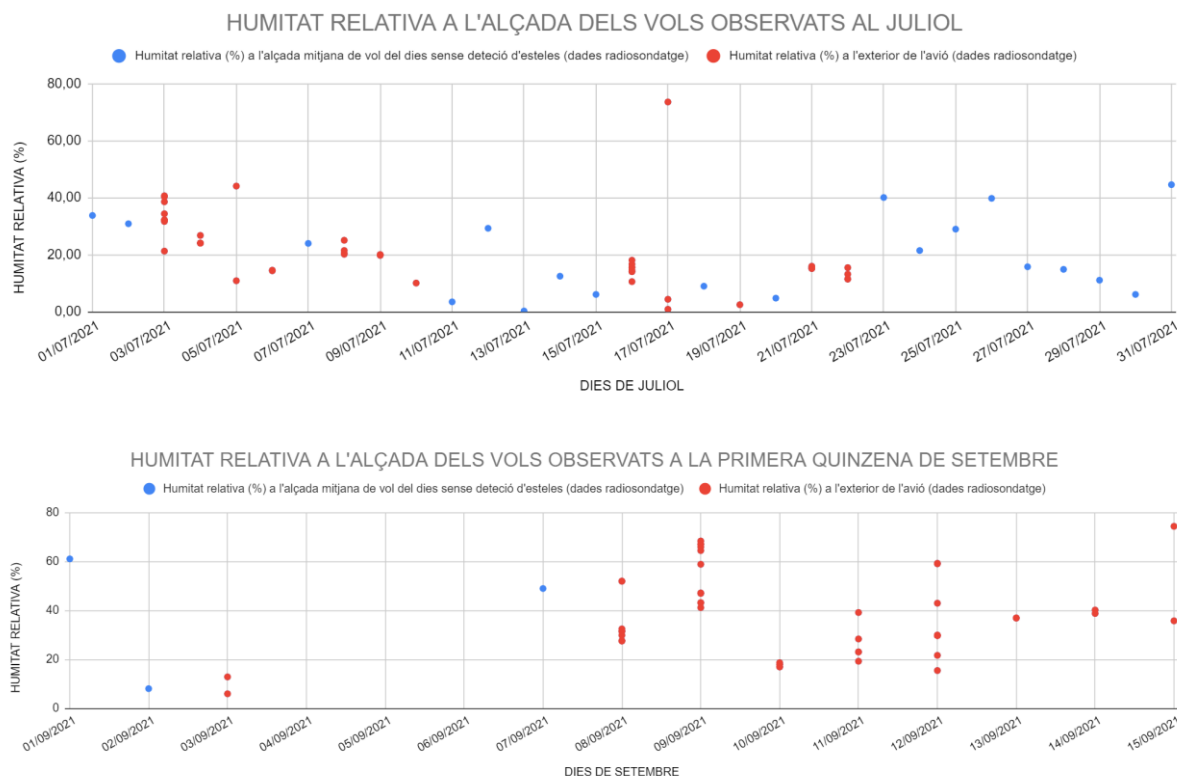


Analitzant els resultats obtinguts, observem que no hi ha una relació massa directa entre la temperatura i la formació de deixants. Veiem esteles que es formen a diferents temperatures exteriors, amb un rang que correspon amb el que Appelman mostra en els seus gràfics (apartat 3.2.3. Procés de formació de l'estela de l'avió), entre uns -50°C i uns -40°C . A més a més, si ens fixem en els dies d'estudi marcats depenent de la durada de l'estela al cel, veiem que no són dades especialment diferents a les altres. Suposo que les variacions que s'observen en la temperatura tenen més relació amb l'altura del vol que no en les variacions pròpiament atmosfèriques. Faig aquesta suposició perquè els dos vols que estaven aterrant tenen temperatures significativament diferents pel fet que volaven a alçades diferents.

Detecto que inclús a temperatures superiors a -40°C s'han observat deixants de condensació, tot i que segons l'estudi d'Appelman això seria poc probable. Sembla ser que alguna altra variable meteorològica ha d'influir també en la formació de deixants, ja que només la dada de la temperatura no sembla que ens permeti explicar la seva formació.



HUMITAT RELATIVA



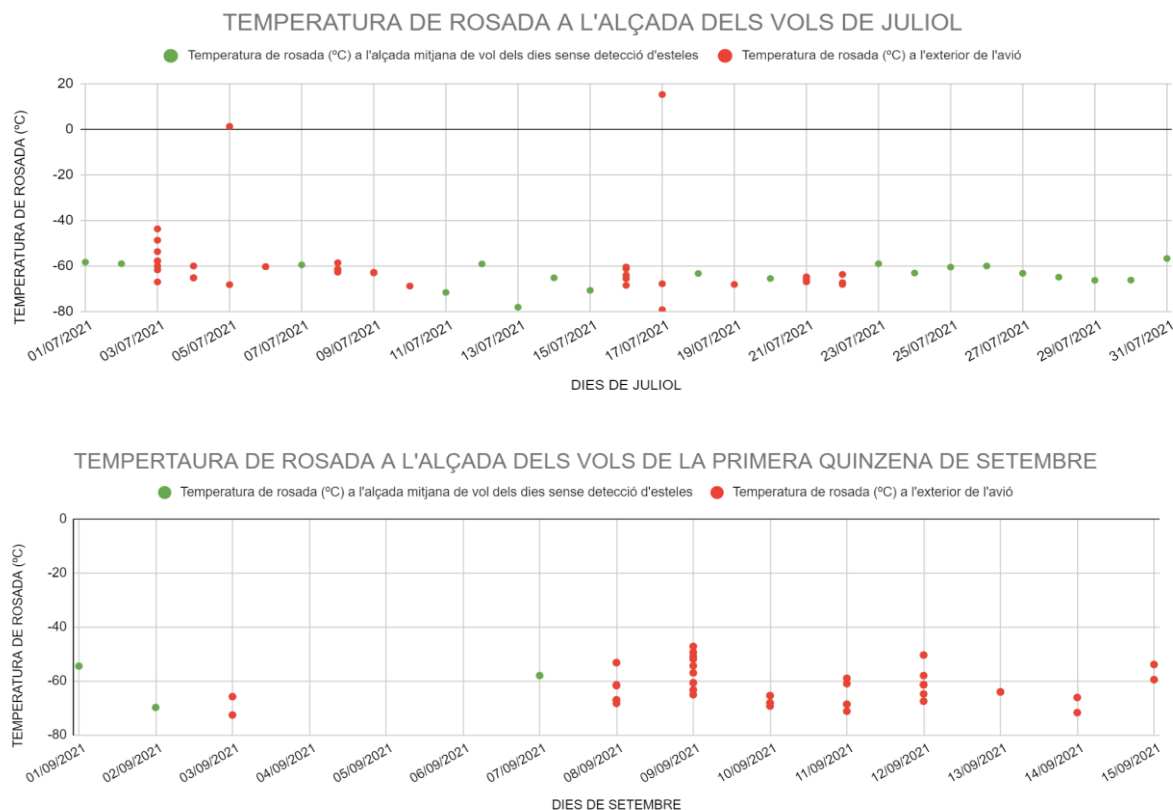
En el cas de la variable de la humitat relativa sembla que hi hagi una relació més marcada amb la formació de les esteles. A aquests gràfics, sobretot al de setembre, podem veure com la humitat relativa és més elevada els dies que havíem preestablert com a dies amb esteles de llarga durada. Es veu clarament al dia 9 de setembre, uns dels dies de setembre amb observacions de deixants de condensació amb més durada al cel. També podem trobar aquesta relació a partir del dia 12 de setembre.

A la gràfica de juliol si que veiem una mica de pujada en la humitat relativa del dia 3 però, en canvi, el dia 6 de juliol no veiem aquest fenomen.

Pel que fa al valor mitjà de la humitat relativa a l'interior dels avions observats, trobem un augment al mes de setembre, amb una humitat relativa mitjana de 36,92%, en comparació amb juliol, amb una humitat relativa mitjana de 21,28%. Com he comentat abans, el mes de juliol va ser un mes amb molta estabilitat atmosfèrica, però no així el mes de setembre, on hi ha hagut més canvis i fins i tot dies amb precipitacions. Sembla raonable que un augment de la humitat relativa pugui explicar en part aquestes observacions meteorològiques.



TEMPERATURA DE ROSADA



Igual que la humitat relativa, la temperatura de rosada també augmenta els dies amb deixants de condensació de llarga durada al cel. Això té sentit ja que la temperatura de rosada¹¹ es calcula a partir de la temperatura i la humitat relativa, per tant, aquestes variables han d'estar relacionades.

Ho veiem clarament al dia 3 de juliol, dia amb més esteles de llarga durada de tot juliol. També veiem l'augment a la temperatura de rosada als dies d'estudi de setembre. No obstant això, s'observen esteles també en condicions de punt de rosada inferior a -70°C .

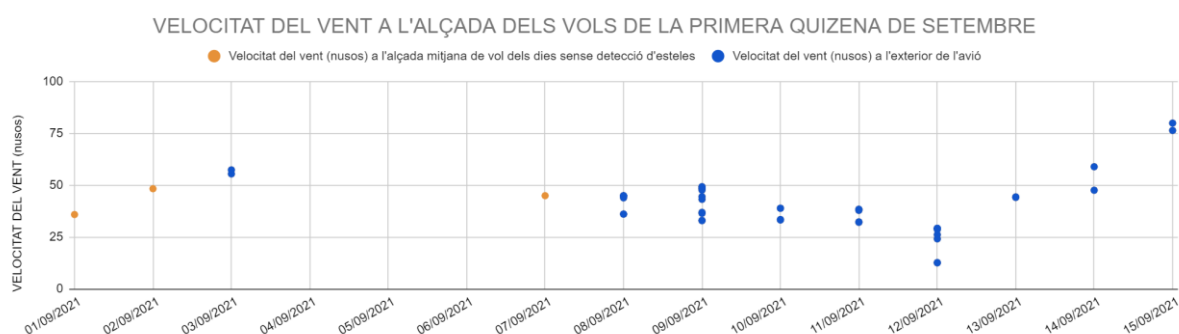
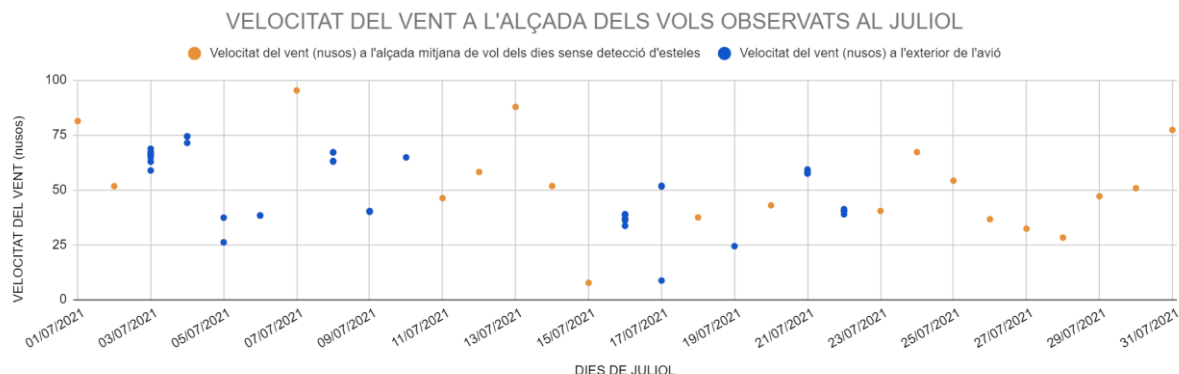
Per tant, trobem una certa relació entre la durada de les esteles i la temperatura de rosada, igualment que hem vist que passava amb la humitat relativa.

Tal com he fet amb la humitat relativa, he calculat el valor mitjà de la temperatura de rosada per a cada mes per veure si hi ha molta variació. Al juliol trobem una mitjana de $-59,97^{\circ}\text{C}$ i al setembre de $-61,76^{\circ}\text{C}$, per tant la variació no és molt notable.

¹¹ Veure a l'apartat 3.2.1. La condensació de l'aigua



VELOCITAT DEL VENT



Al fer les observacions de les esteles, vaig fer una classificació segons la forma de l'estela: si s'eixamplava, si no s'eixamplava, si era trencada o si era llisa. Una vegada feta aquesta classificació volia comprovar si a la seva forma influïa la velocitat del vent en alçada.

No trobem gaire relació, tot i que el sentit comú em diu que sí n'hi hauria d'haver, ja que el vent en alçada ha d'afectar a la forma de l'estela, ajudant a trencar-se o a canviar el seu aspecte. Segons les meves observacions, els pocs dies d'estela trencada no són dies amb velocitat del vent significativament més elevada. Només trobaríem aquesta relació al dia 3 de setembre, dia amb algun deixant de condensació que es trobava trencat i amb velocitat del vent una mica més elevada.

Per poder treure conclusions més fiables, seria interessant poder realitzar més observacions, i en horaris del dia diferents (ja que les meves observacions s'han realitzat a la franja del migdia, moment de màxima radiació solar on es provoquen corrents d'aire verticals d'ascens) per tal d'estudiar de manera més precisa com afecten els canvis de velocitat i direcció del vent en alçada amb la forma de les esteles.



Cal remarcar que no van haver molts avistaments d'esteles trencades, per tant, no podem saber amb exactitud si aquest factor influeix o no, però podria ser que en alguns casos sí que ho fes.

PRECIPITACIONS

01/09/2021	0'8 mm
02/09/2021	0,8 mm
03/09/2021	0,6 mm
09/09/2021	0,4 mm
10/09/2021	5,2 mm

Registre de precipitacions.

Extret de @meteocornellà.

Al fer el recompte de dies amb precipitacions, podem veure que durant tot el mes de juliol no va haver-hi, en canvi a la primera quinzena de setembre va haver-hi una sèrie de dies en els quals sí que trobem algunes precipitacions, encara que amb valors no molt elevats.



CONCLUSIONS

Després de dur a terme tot aquest treball sobre els deixants de condensació, he arribat a algunes conclusions en diferents àmbits.

Primer de tot, m'agradaria destacar la manca de dades meteorològiques reals de la troposfera en llocs determinats. Només hi ha radiosondatge a alguns punts d'Espanya, en concret (i per sort), aquí a Barcelona en trobem un d'ells, des de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.

Gràcies a l'estudi realitzat, les dades recollides i les gràfiques fetes, he arribat a la conclusió de què són diversos els factors que intervenen en la formació de les esteles dels avions, i no és fàcil dir quin d'ells és més determinant. Segons les meves observacions i l'anàlisi de dades, els dos factors que semblen influir més en la formació d'esteles són la humitat relativa i la temperatura de rosada, cosa que té sentit ja que estan relacionades. He observat que quan aquestes pugen, podem observar més deixants de condensació i aquests duren més al cel. La pressió a l'alçada de vol ha estat força constant, al voltant dels 250 hPa, i he observat deixants tant a pressions lleugerament més baixes com més altes d'aquest valor. A aquestes pressions baixes, aquesta variable no sembla ser una variable determinant en la formació d'esteles, o com a mínim són altres variables les que semblen influir més. En el cas de la temperatura, també he observat esteles en un rang força ampli des del -65 °C als -35°C.

Les meves observacions es limiten a un mes i mig, i a l'horari en el qual fa el registre de dades el radiosondatge. Seria molt interessant poder ampliar aquest estudi, iniciat en aquest treball de recerca, fent més observacions i registre de dades, de manera continuada al llarg de l'any i disposar, si fos possible, de més dades reals de les condicions de l'atmosfera en horaris del dia diferents (actualment la UB fa radiosondatges diaris a les 12 UTC i a les 00 UTC). També penso que es podria arribar a trobar una relació entre la velocitat del vent en alçada i la forma de les esteles, però no he pogut esbrinar de quina manera influeix amb les meves observacions. En alguns casos, quan la velocitat del vent era més elevada, sí trobàvem esteles trencades, però les meves observacions no em permeten extreure més conclusions.



Per tant, al veure que hi ha una certa relació en la formació de les esteles i la temperatura de rosada i la temperatura en alçada, i més especialment, la humitat relativa, arribem a la conclusió que amb l'observació de deixants de condensació potser es podrien arribar a induir o saber certes condicions atmosfèriques sense radiosondatge, encara que no de manera precisa. Al detectar deixants de condensació de llarga durada podem suposar que hi ha més humitat relativa i probablement una temperatura de rosada superior.

En relació amb la pregunta inicial en fer aquest treball de recerca de si es podien fer prediccions meteorològiques a partir dels deixants de condensació, he arribat a una conclusió que no m'esperava. Sembla que hi ha certa relació en l'observació d'esteles més marcades o de més durada i els canvis de temps, però sorprenentment, no sempre. Els meteoròlegs acostumen a dir que quan veiem esteles molt persistents al cel s'està apropant un canvi de temps o pluges. En canvi, jo només vaig apreciar aquest fet als dies 9 i 10 de setembre que van ser dies amb precipitacions i les esteles dels dies 5, 9 i 12 van ser de llarga durada. Per tant, pot ser que sí que hi hagués certa relació, però no sempre i, de vegades, no la trobéssim pels canvis en la direcció del vent que farien que s'allunyin els fronts. Caldria fer un estudi més exhaustiu i recollir moltes més dades per poder continuar traient conclusions sobre la relació dels canvis de temps i l'observació/persistència dels deixants de condensació.

També m'agradaria comentar que aquest juliol de 2021, va ser un mes amb molta estabilitat meteorològica i ho hem vist gràcies al número més reduït d'esteles i també, per la poca durada d'aquestes. En canvi, setembre va ser un mes amb molts més avistaments d'esteles, encara que només vaig fer observacions a la primera quinzena, i va haver-hi més variabilitat meteorològica.

Per últim, he arribat a la conclusió que si aquest estudi es fes de manera més metòdica i durant un període de temps superior, segurament es podrien treure moltes més conclusions i, fins i tot, trobar relacions directes entre les característiques de les esteles i la meteorologia de la zona. També seria interessant estudiar la relació que té el tipus de motor de cada avió amb la formació d'aquests deixants de condensació observats.



BIBLIOGRAFIA:

Esteban Oñate, Antonio. **Conocimientos del avión. Obra adaptada al programa de estudios JAR FCL para Piloto Comercial y de Transporte de Línea Aérea.** 5ª edició.

Madrid: Thomson Editores Spain Paraninfo, 2005. ISBN: 84-283-2902-8.

WEBGRAFIA:

Recarte, Javier. **Definiciones y términos aeronáuticos** [en línia]. 4ª Edició. Bufete Aeroley, juliol del 2019. [Consulta: 5 abr. 2021]

<http://www.bufeteaeroley.es/Definiciones_4.pdf>

Calderón, Grecia. **Avión.** [en línia]. Euston 96, 2018. [Consulta: 15 abr.2021]

<<https://www.euston96.com/avion/>>

Connolly, Eduardo. **Els avions.** [en línia]. 2 de març de 2012. [Consulta: 15 abr.2021]

<https://es.slideshare.net/LIBRERUM/els-avions-11836429?next_slideshow=1>

Lopez Solà, Laura. **Tipus d'avions.** [en línia]. 9 de desembre de 2014. [Consulta: 15 abr.2021]

<<https://es.slideshare.net/lauralopezsola/tipus-davions>>

Pacheco, Isabel. **Tipos de aviones: ¿cuáles son y cómo reconocerlos?**. [en línia]. Centro Oficial de Formación Profesional, 30 de maig de 2020. [Consulta: 15 abr.2021]

<<https://www.cesurformacion.com/que-tipos-de-aviones-existen-y-como-puedes-aprender-a-distinguirlos/>>

Muñoz Navarro, Miguel Angel. **Manual de vuelo. Prevuelo: Rendimiento (performance)** [en línia]. Safecreative, 2020. [Consulta: 17 abr.2021]

<https://www.manualvuelo.es/4prev/44_perfm.html>

Cómo identificar los diferentes tipos de aviones [en línia]. Crew school. [Consulta: 17 abr.2021]

<<https://www.crewschool.es/como-identificar-diferentes-tipos-de-aviones/>>

Soto Morales, Rodrigo. **Aviación general** [en línia]. A21, 2 de juliol de 2019. [Consulta: 17 abr.2021]

<<https://a21.com.mx/el-nido-del-aguila/2019/07/02/aviacion-general>>



Todo sobre el mundo de la aviación. [en línia]. Mundo aviones. [Consulta: 22 abr.2021]

<<https://www.mundoaviones.top/>>

Sánchez Tarifa, Carlos. **El techo y la velocidad máxima de los aviones equipados con turborreactores** [en línia]. Revista de Aeronáutica nº124, Març de 1951. [Consulta: 22 abr.2021]

<<http://aerobib.aero.upm.es/cst/bibliografia/A10.pdf>>

Airbus [en línia]. [Consulta: 28 abr.2021]

<<https://www.airbus.com/>>

Boeing [en línia]. [Consulta: 28 abr.2021]

<<https://www.boeing.es/>>

IASCA (Inter Aviation Services) [en línia]. [Consulta: 29 abr. 2021]

<<https://iasca.aero/>>

Vallbona Villajosana, Ernest. **Conocimientos teóricos para el Alumno de Piloto de Transporte de Línea Aérea: el motor turbina** [en línia]. CESDA, 2011. [Consulta: 1 maig 2021]

<http://www.aviaco-va.es/WP/motor_de_turbina.pdf>

Recope. Seguridad energética [en línia]. [Consulta: 11 maig 2021]

<<https://www.recope.go.cr/>>

Química.es [en línia]. [Consulta: 15 maig 2021]

<<https://www.quimica.es/>>

National Aeronautics and Space Administration. **Airspace. Contrails.** [en línia].

Aeronautics Research Mission Directorate. Museum in a BOX. Grades K-12. [Consulta: 23 maig 2021]

<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails_k-12.pdf>



Estelas de condensación. [en línia] Agencia Estatal de Meteorología. [Consulta: 28 maig 2021]

<https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/modificacion_artificial_tiempo/estelas_condensacion.pdf>

Tema 5. Mecanismos de Condensación. Precipitación. [en línia] Universidad de Murcia. [Consulta: 7 juny 2021]

<https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/modificacion_artificial_tiempo/estelas_condensacion.pdf>

Wis_Alien. **La magia de los diagramas de fases, o cómo puede haber hielo a más de 100°C.** [en línia] NAUKAS, física, 2 de febrer de 2012. [Consulta: 16 juny 2021]

<<https://naukas.com/2012/02/02/la-magia-de-los-diagramas-de-fases-o-como-puede-haber-hielo-a-mas-de-100oc/>>

Lesarri, Alberto (professor de química). **Gases reales: punto crítico** [vídeo en línia]. Univeristat de Valencia, 27 de febrer de 2018. [Consulta: 16 juny 2021]

<<https://www.youtube.com/watch?v=Gu4OLLtyweE&list=LL&index=2&t=227s>>

Javi. **Punto triple de una sustancia. Punto crítico. Estados en equilibrio. Punto triple del agua** [vídeo en línia]. 26 d'abril de 2013. [Consulta: 20 juny 2021]

<<https://www.youtube.com/watch?v=SuM41tojXbY>>

HRoom. **Termodinámica - Punto triple (Hacemos una cámara de VACÍO)** [vídeo en línia]. 23 de gener de 2020. [Consulta: 20 juny 2021]

<<https://www.youtube.com/watch?v=GyqJoabd0ZY&list=LL&index=3>>

¿Qué es el punto de Rocío y cómo medirlo? [en línia]. Vaisalia. [Consulta: 10 agost 2021] <<https://www.vaisala.com/es/blog/2019-10/que-es-el-punto-de-rocio-y-como-medirlo>>

Acadenas. **Clase 5: Humedad absoluta, Humedad relativa y punto de rocío** [vídeo en línia]. 5 d'octubre de 2017. [Consulta: 10 agost 2021]

<<https://www.youtube.com/watch?v=whIAkVTA85A&list=LL&index=2>>



La atmósfera y sus capas. [en línia]. Generalitat valenciana, conselleria d'agricultura, desenvolupament rural, emergència climàtica i transició ecològica. [Consulta: 12 agost 2021]

<<https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-atmosfera-y-sus-capas>>

SpacePlace. [en línia]. NASA Ciència, 28 de juny de 2019. [Consulta: 12 agost 2021]

<<https://spaceplace.nasa.gov/troposphere/sp/>>

Mundo Aeronáutico. **Capas de la Atmósfera Terrestre** [vídeo en línia]. 25 d'abril de 2021. [Consulta: 14 agost 2021] <<https://www.youtube.com/watch?v=ngOyLWZr8hM>>

Gutiérrez Rubio, Delia. **Estelas de condensación : las nubes que señalan el rastro de los aviones** [en línia]. Aemetblog, 15 de març de 2017. [Consulta: 16 agost 2021]

<<https://aemetblog.es/2017/03/15/estelas-de-condensacion-las-nubes-que-senalan-el-rastro-de-los-aviones/>>

Deixants de condensació [en línia]. Servei Meteorològic de Catalunya, (meteo.cat), 14 d'agost de 2015. [Consulta: 16 agost 2021]

<<https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/publicacions/miscellania/deixants-de-condensacio/>>

Atlas Internacional de Nubes [en línia]. Organización meteorológica Mundial.

[Consulta: 3 setembre 2021]

<<https://cloudatlas.wmo.int/es/home.html>>

Radiosondatge [en línia]. Servei Meteorològic de Catalunya, (meteo.cat). [Consulta: 16 octubre 2021]

<<https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/equipaments-meteorologics/radiosondatge/>>



ANNEXOS

1. TIPOLOGIA D'AVIONS

Segons les tasques que realitzen els diferents avions, podem distingir-ne diferents categories i diferents característiques.

1.1. AVIACIÓ MILITAR

L'aviació militar és la utilització d'aeronaus amb fins bèl·lics dins d'un marc tàctic i estratègic. Hi formen part tots els medis materials i humans que conformen les forces aèries d'una nació.

Dins de l'aviació militar també trobem els vols d'atac, de defensa, de reconeixement, de vigilància, de rescat i de transport dins de l'àmbit bèl·lic.

- **Avió militar de combat.**

Són avions destinats per defensar els cels atacant a avions adversaris, disposen de sistemes per transportar armament, bombes i míssils. Són pilotats per un sol pilot i disposen d'un gran rendiment i d'una gran performance, és a dir, el conjunt de capacitats que té l'avió com la velocitat i altitud màxima i mínima, l'abast màxim, la taxa de consum del combustible, les distàncies d'enlairament i aterratge i la capacitat de càrrega útil.

- **Avió militar d'entrenament.**

Avions destinats per a l'aprenentatge de futurs pilots de combat. L'avió és pilotat per dues persones: l'instructor i l'alumne.

- **Avió de transport militar.**

La funció dels avions de transport militar és portar equips, tropes i càrregues a localitats on es requereixi la seva presència, com a camps de batalla.

Disposen d'una bona capacitat de càrrega i es poden fer llançaments de càrregues amb paracaigudes, tant d'objectes com de militars. A l'haver d'enlairar-se i aterrar a pistes curtes i poc preparades els seus pneumàtics són de baixa pressió.



Fig. 29: McDonnell Douglas F/A-18 Hornet, pilotat pel capità de la Marina dels Estats Units d'Amèrica Kevin Reece el 8 d'Octubre de 2003 al sud de la Xina. Avió militar de combat.



Fig. 30: C-130 Hercules o CASA C-295, imatge de F. Javier Chao. Avió de transport militar de l'exèrcit espanyol.

1.2. AVIACIÓ DE PASSATGERS

L'aviació de passatgers està destinada al transport de persones, sigui a llargues o curtes distàncies.

- Avions comercials.

Aquest tipus d'avions són els més comuns i més coneguts per la població. Permeten portar a més de 100 passatgers entre països i continents.

Els avions comercials amb més capacitat són els de fuselatge ampli, que disposen de dos passadissos que recorren tot l'avió. Aquest tipus d'avió, normalment, està destinat als vols de llarga distància.

Per una altra banda tenim els avions comercials de fuselatge estret, que al contrari que els de fuselatge ampli, disposen d'un sol passadís. Aquests avions són destinats a vol de mitjana o curta distància.

Els avions comercials més comuns són el Boeing 747, l'Airbus A330, l'Airbus A340, en el que poden viatjar més de 600 persones, i, el més comú, l'Airbus A320 amb més de 15.200 aeronaus venudes a 2019.

- Avió d'aviació general.

Segons la OACI, dins d'aquest grup s'engloben totes les operacions d'aviació civil que no siguin servicis aeris regulars ni operacions no regulars de transport aeri per remuneració o arrendament. Són avions destinats al transport de passatgers que no pertanyen a



aerolínies. Aquest tipus d'aviació inclou: vols personals d'esport, clubs de vol, escoles de vol, vols de negocis corporatius i executius i vols agrícoles.

Tots els avions d'aviació general pesen menys de 7.500 kg.



Fig. 31: Airbus A320, imatge d' Orlando Torricelli. Avió comercial.



Fig. 32: Diamond DA40, imatge de One Air. Avió d'aviació

1.3. AVIACIÓ PEL TRANSPORT AERI DE MERCADERIES

Aquest tipus d'aviació està destinada al transport de béns i objectes de gran mida pel medi aeri. Els avions d'aquest grup posseeixen grans portes situades en diferents llocs que faciliten la càrrega i descàrrega de les mercaderies. Disposen d'un fuselatge major als avions vists als grups anteriors i la cua i les ales dels avions es troben a una altura més elevada.

- **Avions mixtos**

Aquest tipus d'avió és el que transporta tant càrrega com passatgers. La càrrega es troba a la bodega mentre que els viatgers es troben a la part superior, a la cabina.

Els avions més comuns per aquest tipus de transport són l'Airbus 319, l'Airbus 320, l'Airbus 321 i el Boeing 737.

- **Avions de càrrega.**

En aquest grup trobem els avions destinats exclusivament al transport de càrregues i mercaderies.

Els més utilitzats són el Boeing 747-400 ERF, amb una capacitat de càrrega de 112 tones, i el Boeing 747 F Freighter amb una capacitat total d'unes 107 tones.



- Supertransports

Els avions que pertanyen a aquest grup estan destinats al transport de càrregues de dimensions molt més grans de l'habitual.

Un exemple és l'Airbus 300-600 ST que és capaç de transportar helicòpters i, fins i tot, avions més petits. És més conegut com a “Beluga” a causa de la seva forma a la part davantera del fuselatge.

Un altre clar exemple d'aquest tipus d'avions de transport aeri és l'Antonov 225 Mriya, el transportador més gran del món. Té una capacitat de càrrega de 250 tones.



Fig. 33: Airbus A319. Avió mixte.



Fig. 34: Boeing 747-400 ERF. Avió de càrrega.



Fig. 35: Antonov 225 Mriya. Avió de supertransports més gran del món.