

# Intrusions de pols sahariana a la costa mediterrània occidental

Autor: Albert Hernández Dominich

Supervisora: Yolanda Sola Salvatierra, ysola@meteo.ub.edu

Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Diagonal 645, 08028 Barcelona, Spain.\*

**Abstract:** La costa mediterrània occidental és una zona important per estudiar les propietats òptiques en columna dels aerosols provinents d'Àfrica que alteren la qualitat de l'aire. En el present treball, aquests episodis s'han escollit a partir de l'anàlisi en clústers de les retrotrajectòries del model HYSPLIT a una altura de 3 km. Dels dies seleccionats s'ha analitzat l'espessor òptica dels aerosols (AOD) i l'exponent d'Angström ( $\alpha$ ) i l'albedo de dispersió simple (SSA) a diferents longituds d'ona a Granada, Burjassot, Barcelona i l'Alta Provença. Les característiques esperables per intrusions de pols mineral s'han apreciat amb més claredat durant l'estiu i la tardor i per les estacions més properes a la regió font. En els episodis més intensos s'observen valors d'AOD elevats i d' $\alpha$  baixos, així com un creixement de l'SSA amb la longitud d'ona. En canvi, l'hivern ha estat l'època de l'any que més ha diferit en aquest comportament a causa de la crema de biomassa per calefacció que genera aerosols de diferents característiques i a les situacions d'estancament típiques durant aquests mesos. Les estacions més allunyades de la regió font també han mostrat valors més diferents degut a la mescla amb altres tipus d'aerosols produïda durant el seu transport a llarga distància. Finalment, no s'han detectat diferències significatives en les propietats de la pols mineral segons la regió d'origen al nord d'Àfrica.

## I. INTRODUCCIÓ

Els aerosols presenten una gran influència sobre el clima mundial que s'ha vist agreujada substancialment en algunes regions per l'activitat humana. Aquests afecten el clima directament dispersant i absorbint radiació, modificant així el balanç radiatiu local i global. Per altra banda, també ho fan indirectament actuant com a nuclis de condensació i canviant les propietats òptiques dels núvols i afavorint la seva formació. No obstant això, els aerosols presenten una gran incertesa en l'impacte en el balanç radiatiu a causa de l'alta variabilitat espacial i temporal de les seves propietats físiques, químiques i òptiques degut al seu curt temps de residència a la troposfera (Arias et al. 2021, Mandija et al. 2017).

La pols mineral forma part dels aerosols d'origen natural i es tracta d'un dels més abundants a l'atmosfera. Les emissions d'aquestes partícules a l'hemisferi nord provenen principalment del nord d'Àfrica (aproximadament el 50% de la càrrega total de pols) i depenen de les propietats del sòl, la vegetació i el vent proper a la superfície, encara que poden ser emesos directament per l'activitat humana (agricultura, construcció, entre altres) (Arias et al. 2021, Valenzuela et al. 2012b). L'impacte de l'aerosol mineral sobre el clima és un dels més ambigus i caldria una detallada descripció de la mida, les propietats òptiques i conèixer la composició química de l'aerosol. Aquests dispersen la radiació d'ona curta i absorbeixen la d'ona llarga sortint cap a l'espai, donant lloc a un refredament i un escalfament del sistema terrestre, respectivament (Cachorro et al. 2016, Yu et al. 2016). Segons el balanç entre aquests dos efectes, estimacions mostren que l'efecte radiatiu mitjà global d'aquest

tipus d'aerosols varia entre  $-0.7$  i  $+0.5 \text{ Wm}^{-2}$  al cim de l'atmosfera i entre  $-0.82$  i  $-1.92 \text{ Wm}^{-2}$  a la superfície (Carslaw et al. 2010). Per altra banda, la capacitat d'absorbir vapor d'aigua atmosfèric pot donar lloc a un augment de l'estabilitat i així, una alteració del cicle hidrològic reduint la precipitació (Arias et al. 2021). Així mateix, aquest tipus d'aerosols són de gran importància en el sistema climàtic terrestre, ja que aporten ferro i altres nutrients al fitoplàncton marí (Carslaw et al. 2010).

Yus-Díez et al. (2021) van mostrar que el transport de pols sahariana cap a la península Ibèrica ocorre sobretot en època de primavera i estiu i es veu afavorit generalment per quatre situacions sinòptiques ben diferenciades: un sistema d'altres pressions a nivell de superfície situat al nord d'Àfrica, una depressió a l'Atlàntic, un sistema d'altres pressions a nivells alts situat al nord d'Àfrica i una depressió al nord d'Àfrica. La progressiva aridificació de diverses zones arreu del món, concretament el nord d'Àfrica, ha provocat que aquests episodis siguin cada cop més freqüents a la península Ibèrica. Aquest increment probablement va començar fa uns centenars d'anys i encara és present avui en dia (Cruz et al. 2021). Altres estudis han mostrat que els episodis de pols mineral a Espanya provoquen un augment de les partícules en suspensió i de les PM10 (diàmetres  $< 10 \mu\text{m}$ ), afectant així a la qualitat de l'aire i donant lloc a una major vulnerabilitat a les malalties respiratòries i pulmonars (De Longueville et al. 2010, Querol et al. 2001). Aquestes intrusions es poden identificar a partir de diferents tècniques: mesures en superfície, teledetecció, trajectòries de les masses d'aire, entre altres. Aquest últim s'ha fet servir en múltiples articles com els de Rozwadowska et al. (2010) i Valenzuela et al. (2012b) i és un dels mètodes més utilitzats per identificar l'origen dels aerosols arreu del món (Cachorro et al. 2016). Estudis recents han mostrat que aquests episodis són força usuals a la península Ibèrica i se n'han analitzat les propi-

---

\* Adreça electrònica: ahernado7@alumnes.ub.edu

etats òptiques en columna per tal de caracteritzar-los en profunditat (Cachorro et al. 2016, Mandija et al. 2017, Toledano et al. 2007). Concretament, Toledano et al. (2007) van concloure que durant el període 2000-2004 entre el 14% i el 21% dels dies a El Arenosillo, municipi de Huelva, van estar afectats per intrusions saharianes.

L'objectiu d'aquest treball és analitzar les masses d'aire procedents del nord d'Àfrica que afecten la costa mediterrània occidental a través de retrotrajectòries i posteriorment caracteritzar les propietats òptiques en columna dels aerosols.

## II. METODOLOGIA

Per a fer aquest estudi s'han seleccionat estacions de mesura situades a diferents distàncies de la regió font de pols mineral. La selecció definitiva de les estacions s'ha fet d'acord amb la disponibilitat de dades i comprèn entre 01/05/2007 i 30/04/2021, tot i que no de forma contínua donada la naturalesa de les observacions i els períodes de calibratge. La Figura 1 mostra les estacions analitzades: Granada (GRN), situada al sud de la ciutat en un ambient rural i no industrialitzat, Barcelona (BCN), ubicada en un entorn urbà, Burjassot (BUR), també posicionada en un entorn urbà i l'observatori d'Alta Provença (OHP), emplaçada en un entorn rural (NASA 2022).

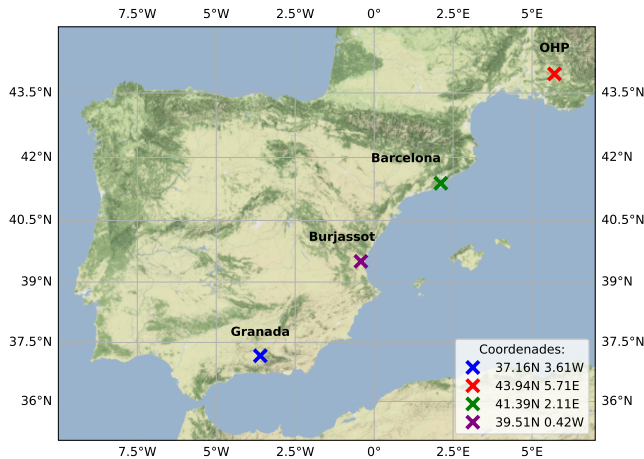


Figura 1. Ubicació de les estacions estudiades. S'ha utilitzat la llibreria *Cartopy* per generar el mapa.

### A. Dades d'AERONET

L'*Aerosol Robotic Network* (AERONET) és una xarxa de fotòmetres solars terrestres que proporciona dades diàries de diverses propietats òptiques i radiatives dels aerosols. L'instrument de referència és un radiòmetre espectral CIMEL CE-318 que mesura la radiància del sol i del cel per certes longituds d'ona dins de l'espectre visible i l'infraroig proper (Emery and Camps 2017). Les propietats òptiques dels aerosols analitzades en el present treball són la profunditat òptica dels aerosols (AOD) per una longitud d'ona de 675 nm, que permet avaluar la

càrrega d'aerosols en columna. Aquesta es determina considerant una versió adaptada de la llei de Beer tenint en compte que el detector enregistra voltatges:

$$V_{\lambda} = V_{\lambda 0} \cdot d^2 \cdot e^{-\tau_{\lambda} m}, \quad (1)$$

sent  $V_{\lambda}$  el voltatge mesurat pel detector a una longitud d'ona  $\lambda$ ,  $V_{\lambda 0}$  el voltatge extraterrestre obtingut a partir del calibratge,  $d$  la ràtio entre la distància mitjana i la real Terra-Sol,  $\tau_{\lambda}$  l'espessor òptica total i  $m$  la massa d'aire relativa, que en primera aproximació depèn del cosinus de l'angle zenital. Finalment, l'AOD s'obté sotraient totes les contribucions dels altres components atmosfèrics (absorció i dispersió per gasos) a l'espessor òptica total. Per altra banda, també s'ha tractat amb l'exponent d'Ångström ( $\alpha$ ) pel rang 440-870 nm:

$$\alpha = -\frac{d \text{ AOD}_{\lambda}}{d \lambda}. \quad (2)$$

Es tracta d'un paràmetre que mostra la dependència espectral de l'espessor òptica dels aerosols amb la longitud d'ona i que dona informació sobre la mida de l'aerosol en columna sent aquesta inversament proporcional a  $\alpha$ . Aquest paràmetre es pot determinar a partir de la llei d'Ångström:

$$\text{AOD}_{\lambda} = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (3)$$

sent  $\beta$  el coeficient adimensional de terbolesa i  $\lambda$  la longitud d'ona expressada en micres. Per últim, s'ha tractat amb l'albedo de dispersió simple (SSA), paràmetre que mostra la relació entre l'eficiència de dispersió ( $\sigma_d$ ) i la d'extinció ( $\sigma_e$ ):

$$\text{SSA}_{\lambda} = \frac{\sigma_{d,\lambda}}{\sigma_{e,\lambda}}. \quad (4)$$

L'SSA és un paràmetre clau per conèixer el potencial dels aerosols per refredar o escalfar l'atmosfera que depèn fortament de la longitud d'ona. En aquest treball s'ha analitzat el comportament per diverses longituds d'ona: 440, 670, 870 i 1020 nm. Aquest pot prendre valors des de 0 per una partícula completament absorbent fins a 1, per una partícula totalment dispersant. No obstant això, la presència de diferents tipus d'aerosols en barreja a l'atmosfera comporta que aquest valor tendeixi a 1.

Les dades d'AERONET estan processades a tres nivells diferents (Holben et al. 1998). Les dades del nivell 1.0 són aquelles observacions automàtiques sense filtrat de núvols (*cloud-screening*). En canvi, en el nivell 1.5 es produeix un filtratge automàtic de núvols que elimina les mesures que s'han fet amb núvols davant del disc solar. Per últim, en el nivell 2.0, a més de comptar amb un filtratge de núvols com el nivell anterior, les dades s'han sotmès a processos de control de la deriva al calibratge. És aquest últim el que s'ha utilitzat en el present estudi

per analitzar l'AOD i l' $\alpha$  obtingudes a partir de mesures de radiància directa, però pel cas del SSA s'ha fet servir el nivell 1.5 per a maximitzar el nombre de dades, ja que els productes d'inversió inclouen certes restriccions (com per exemple, una de les més rellevants és que els valors d'AOD a 440 nm han de ser superiors a 0.4) que provoquen una reducció notable de les dades a tractar (Holben et al. 1998).

## B. Model HYSPLIT

L'*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) és un model desenvolupat per l'*Air Resources Laboratory* (ARL) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) que permet simular trajectòries de parcel·les d'aire i dispersió de contaminants, tant a escala local com global, mitjançant una combinació entre l'enfocament Eulerià i Lagrangiana. El model utilitza aquest últim pel càlcul de les retrotrajectòries considerant un sistema de referència mòbil i calculant-ne l'advecció i la difusió a mesura que les parcel·les d'aire s'allunyen de la seva ubicació inicial basant-se en dades meteorològiques (reanàlisi, models, etc). Adicionalment, la dispersió de contaminants s'obté mitjançant l'enfocament Eulerià, fent servir una graella tridimensional fixa. Les retrotrajectòries de l'HYSPLIT són una bona eina que permet identificar l'origen de les masses d'aire i així, la possibilitat d'intrusions de pols sahariana (ARL 2022, Stein et al. 2015).

En aquest treball s'han utilitzat 518 gigabytes de dades meteorològiques organitzats en 1056 fitxers del *Global Data Assimilation System* (GDAS) amb una resolució horitzontal de  $1^\circ \times 1^\circ$  que correspon a aproximadament  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  a l'equador i 23 nivells verticals (GDAS1) (Qor-el-aïne et al. 2021). HYSPLIT també disposa de les dades meteorològiques amb resolució de  $0.5^\circ$  i 55 nivells verticals (GDAS0.5). No obstant això, va deixar de generar-se l'any 2019 limitant així l'estudi a un període menys extens i a més, no proporciona la velocitat vertical i el càlcul el fa HYSPLIT a partir de la divergència horitzontal, generant així una major incertesa en el càlcul de les retrotrajectòries (Su et al. 2015). Altres estudis fets fins ara també han utilitzat GDAS1 enfront dels altres, com per exemple en les publicacions de Chen et al. (2022), Qor-el-aïne et al. (2021).

S'ha realitzat una retrotrajectòria per dia a 120 hores enrere (5 dies) a partir de les 12 UTC per cadascuna de les estacions analitzades. S'ha fixat una altura sobre el nivell del sòl de 3 km, ja que així es pot observar la procedència de les masses d'aire a les estacions més allunyades d'Àfrica, seguint la proposta d'altres treballs (Córdoba-Jabonero et al. 2011).

## C. Caracterització dels dies amb intrusió de pols sahariana

Per tal de poder caracteritzar l'origen de les masses d'aire, donat l'elevat nombre de retrotrajectòries, es fa

ús del mètode de clústers de HYSPLIT, un mètode estadístic que permet agrupar les retrotrajectòries individuals en grups segons el seu lloc d'origen (Qor-el-aïne et al. 2021). El model calcula la variància espacial total (TSV) i la distància entre retrotrajectòries per poder agrupar-les en clústers. A la primera iteració de càlcul, es considera que cada retrotrajectòria és un clúster fins a arribar a l'última iteració, que només disposa d'un clúster que engloba totes les retrotrajectòries. La TSV augmenta durant les primeres iteracions, es redueix considerablement i finalment torna a augmentar sobtadament, indicant que les retrotrajectòries agrupades en clústers deixen de tenir un origen similar. Aquest últim augment en la TSV s'observa a la Figura 2 i permet escollir de manera visual i subjectiva el nombre de clústers basant-se en minimitzar-ne el nombre augmentant mínimament TSV (Borge et al. 2007, Rozwadowska et al. 2010).

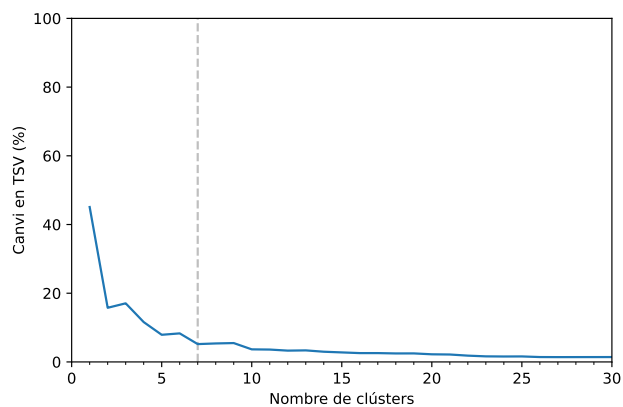


Figura 2. Canvi percentual de TSV enfront el nombre de clústers del *re-clustering* de BCN on es pot observar el nombre de clústers (7) escollits. S'ha limitat l'eix d'abscisses fins a 30 clústers per poder visualitzar-ho clarament.

Posteriorment, s'ha realitzat un *re-clustering* repetit la metodologia de clústers utilitzada anteriorment, fent servir únicament aquelles retrotrajectòries que procedien del nord d'Àfrica amb l'objectiu de poder analitzar amb més precisió l'origen de les masses d'aire i les propietats dels aerosols. D'aquesta manera, s'han classificat subjectivament els clústers d'interès segons la seva procedència africana: oest, centre i est. El *re-clustering* permet a més un refinament de la selecció eliminant aquelles retrotrajectòries que no tenen origen a la zona d'estudi i que el primer *clustering* va considerar. Per aquest motiu, el nombre de trajectòries es redueix en el *re-clustering* (Taula I).

El procés que s'ha seguit des del càlcul de les retrotrajectòries fins a l'anàlisi d'aquelles que en són d'interès es pot observar a la Figura 3. El nombre de dades a analitzar es va reduint a mesura que avança el procés degut a que, en primer lloc, durant l'anàlisi en clústers s'extremen les retrotrajectòries d'interès i, en segon lloc, ja que les dades proporcionades per AERONET no presenten valors de les magnituds analitzades tots els dies tal com es mostra a la Taula I.

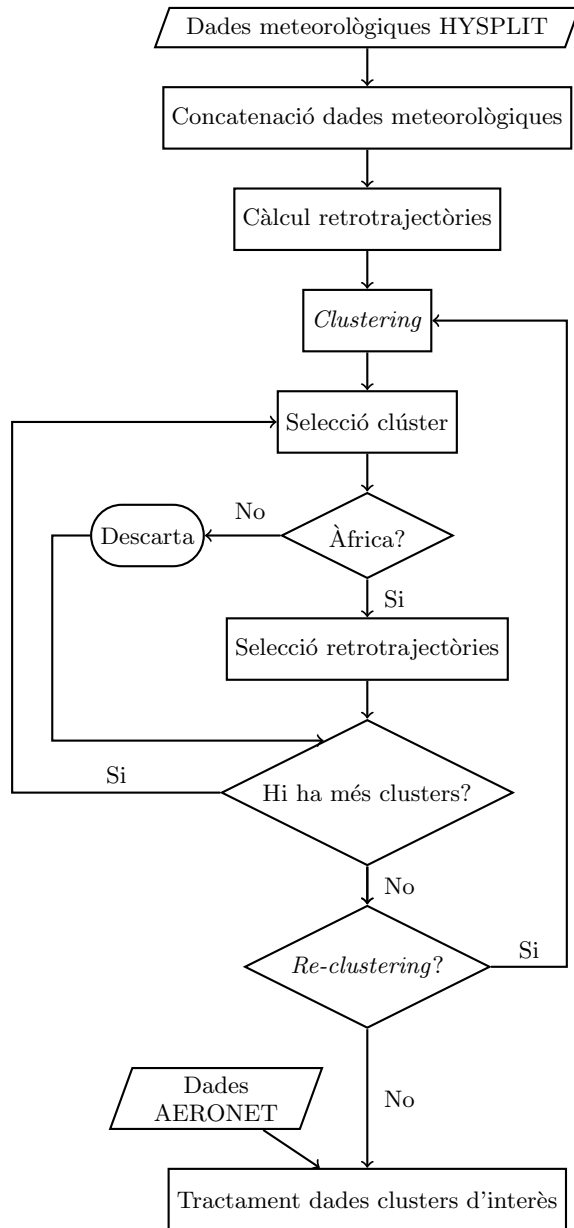


Figura 3. Diagrama de fluxos mostrant el procés seguit fins al tractament de les dades.

Taula I. Evolució del nombre de dies amb possible procedència africana per cadascuna de les estacions estudiades. Totes elles contenen inicialment 5113 retrotrajectòries (100%).

Estació	Clustering	re-clustering	AERONET
GRN	2187 (42.8%)	1631 (31.9%)	1077 (21.1%)
BUR	1380 (27.0%)	664 (13.0%)	424 (8.3%)
BCN	1360 (26.5%)	524 (10.2%)	320 (6.3%)
OHP	1067 (20.9%)	567 (11.1%)	281 (5.5%)

En aquest treball s'ha desenvolupat un programa de Python per llegir les dades, analitzar els resultats i mostrar aquests gràficament. A més, s'han generat *scripts* de *bash* per a manipular prèviament el gran volum de fitxers d'entrada a HYSPLIT i per seleccionar les retrotrajectòries usades en el segon anàlisi en clústers.

### III. RESULTATS I DISCUSSIÓ

#### A. Retrotrajectòries

Les retrotrajectòries mitjanes que s'han escollit segons el seu origen aplicant la metodologia descrita es mostren a la Figura 4.

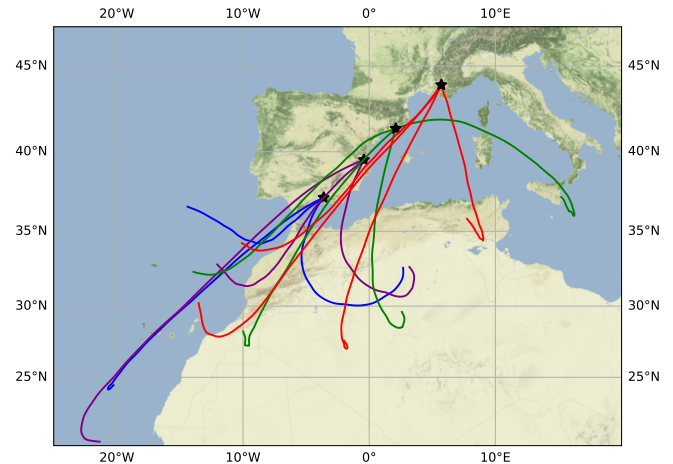


Figura 4. Retrotrajectòries mitjanes després d'aplicar el *re-clustering* per a totes les estacions d'estudi. El color blau correspon a GRN, el lila a BUR, el verd a BCN i el vermell a OHP.

Es poden observar 3 regions diferenciades en funció de la regió d'Àfrica d'on prové la massa d'aire: oest, centre i est. Cal mencionar que no totes les estacions mostren retrotrajectòries mitjanes en les tres regions ja que la proximitat de l'estació a la regió font no permet discernir-ho. L'estudi d'*Escudero et al. (2011)* basat en retrotrajectòries utilitzant el model HYSPLIT per La Castanya (Montseny, Barcelona) per 7 episodis amb intrusions de pols sahariana va concloure que l'est i l'oest d'Algèria van ser les zones font més actives seguides de les zones de Tunísia-Nord-est d'Algèria i Mauritània-Sàhara Occidental.

El nombre d'episodis amb possible intrusió de pols que s'han obtingut posteriorment al *re-clustering* es presenten a la Taula II. Les estacions d'estiu i de tardor mostren el major nombre d'episodis, sent GRN amb 510 retrotrajectòries (47.4%) a l'estiu la més destacable. No obstant això, els episodis que es donen a la tardor ocorren en gran part durant el mes de setembre (el 50% dels episodis a la tardor a GRN es donen en aquest mes, per exemple), possiblement pel fet que les característiques climàtiques

Taula II. Nombre de dies amb possible procedència africana per cadascuna de les estacions de l'any.

Estació AERONET	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	
GRN	1077 (100%)	145 (13.5%)	153 (14.2%)	510 (47.4%)	269 (25.0%)
BUR	424 (100%)	61 (14.4%)	97 (22.9%)	192 (45.3%)	74 (17.5%)
BCN	320 (100%)	54 (16.9%)	65 (20.3%)	120 (37.5%)	81 (25.3%)
OHP	281 (100%)	39 (13.9%)	63 (22.4%)	103 (36.7%)	76 (27.0%)

d'aquest mes són molt semblants a les de l'agost. Aquests resultats estan en concordança amb estudis previs (*Russo et al.* 2020, *Valenzuela et al.* 2012a) que mostren que la màxima freqüència d'aquests esdeveniments es dona en els mesos d'estiu. Com era d'esperar, el nombre d'episodis es redueix a mesura que augmenta la distància a la regió font, però també, les situacions sinòptiques afavoreixen que pugui haver-hi transport des de zones més orientals. A l'estació de BCN les masses d'aire de l'est d'Àfrica es donen clarament en els mesos de primavera (56% dels episodis) i a l'estació d' OHP durant tot l'any, sent la tardor l'època de l'any que més en presenta.

## B. Propietats òptiques a partir de mesures directes

Les intrusions de pols desèrtica presenten un valor d'AOD similar per totes les longituds d'ona. Aquesta mínima variació dona lloc a que els episodis estiguin caracteritzats per un valor petit d' $\alpha$  (*Toledano et al.* 2007). Els episodis amb major intensitat d'AOD i aquells que presenten una major mida de la partícula són habituals durant l'època d'estiu i primavera i presenten una variació clara d'ambdós paràmetres, indicadors que ajuden a discernir i/o confirmar si es tracta d'un episodi d'aquestes característiques. La Figura 5 mostra un diagrama de caixes de l'AOD per cada estació analitzada segons la provenença de la massa d'aire. Es pot veure que els valors més elevats de la mitjana d'aquesta variable i els *outliers*, implicant una major concentració d'aerosols en columna, corresponen al centre africà durant els mesos d'estiu amb un valor mitjà d'AOD de  $0.28 \pm 0.15$  a GRN,  $0.27 \pm 0.13$  a BUR,  $0.24 \pm 0.08$  a BCN i  $0.19 \pm 0.08$  a OHP. S'ha repetit la mateixa representació per l' $\alpha$  tal com es mostra a la Figura 6. Els resultats obtinguts per aquesta variable mostren que els valors més petits es donen en les retrotrajectòries provinents del centre africà i durant els mesos d'estiu, amb una mitjana estacional de  $0.45 \pm 0.32$  a GRN,  $0.72 \pm 0.34$  a BUR,  $0.52 \pm 0.25$  a BCN i  $0.80 \pm 0.08$  a OHP. Els valors més alts d'AOD i més baixos d' $\alpha$  corresponen a l'estació de GRN degut a la proximitat a la regió font (*Benkhalifa et al.* 2017). No obstant això, les característiques esperables per intrusions per la presència d'aerosol mineral no s'aprecien amb tanta claredat a mesura que augmenta la distància a la regió font. Els valors més alts d' $\alpha$  s'observen durant

l'època d'hivern degut a que possiblement existeixi una barreja amb aerosol d'origen local procedent de la crema de biomassa per calefacció o pel fet que, com s'està analitzant tota la columna, la meteorologia local no afavoreixi la dispersió de contaminants prop de la superfície. Durant els mesos d'estiu no són típiques aquestes dues fonts i els valors d' $\alpha$  són més petits. Malgrat això, encara que a GRN, BUR i BCN és bastant clara l'entrada de material particulat de mida gran, a l'estació de OHP no s'aprecia, ja que la distància a la regió font és tan gran que durant el seu recorregut es produeix barreja amb aerosols de tipus regional i oceànic.

S'han realitzat múltiples estudis al llarg dels últims anys analitzant les propietats òptiques en columna en diferents punts de la península Ibèrica mostrant resultats que estan d'acord amb els prèviament comentats. *Valenzuela et al.* (2012a) van realitzar l'estudi de les propietats òptiques en columna en el període 2005-2010 durant episodis amb intrusions de pols mineral a GRN, *Benkhalifa et al.* (2017) pel període 2010-2013 per diverses estacions situades a l'oest mediterrani, *Foyo-Moreno et al.* (2019) pels anys 2010-2012, entre altres. Concretament, en aquests articles van obtenir un valor mitjà d'AOD per una longitud d'ona de 670 nm de  $0.22 \pm 0.14$  i un valor d' $\alpha$  de  $0.42 \pm 0.21$  per l'estació de GRN, un valor mitjà d'AOD per 500 nm de  $0.54 \pm 0.22$  i un valor d' $\alpha$  de  $0.53 \pm 0.29$  per l'estació de BCN, un valor mitjà d'AOD per 440 nm de  $0.37 \pm 0.14$  i un valor d' $\alpha$  de  $0.67 \pm 0.24$  per l'estació de BUR. Encara que els valors estan analitzats a diferents longituds d'ona, es pot observar una certa tendència de valors més grans d'AOD i petits d' $\alpha$  pels dies amb intrusions de pols mineral.

Hi ha certes situacions sinòptiques típiques que afavoreixen l'arribada de pols mineral des del nord d'Àfrica fins a la península Ibèrica. En primer lloc, un centre d'altres pressions situat al nord d'Àfrica donant lloc al transport de les masses d'aire carregades de pols seguint el gir de l'anticicló, passant per les Illes Canàries i l'oceà Atlàntic. El segon escenari tracta d'una depressió situada a l'oceà Atlàntic, davant de Portugal. Aquesta situació produeix el transport des de les regions del Sàhara i Sahel i està sovint relacionada amb episodis de deposició humida. Per altra banda, una depressió situada al nord d'Àfrica és un escenari comú que afecta l'est de la península Ibèrica on la massa d'aire és transportada pel Mediterrani. Per últim, degut a l'escalfament del sòl africà durant l'estiu, es produeix una depressió tèrmica al nord d'Àfrica, donant lloc a altres pressions a nivells superiors. L'alta convecció eleva les partícules a grans altituds i el gradient de pressió en altura les transporta cap al nord (*Cachorro et al.* 2016).

## C. Propietats òptiques a partir de mètodes indirectes

El comportament de l'SSA a diferents longituds d'ona permet conèixer les característiques dels components dels aerosols dominants que varien en funció de la regió,

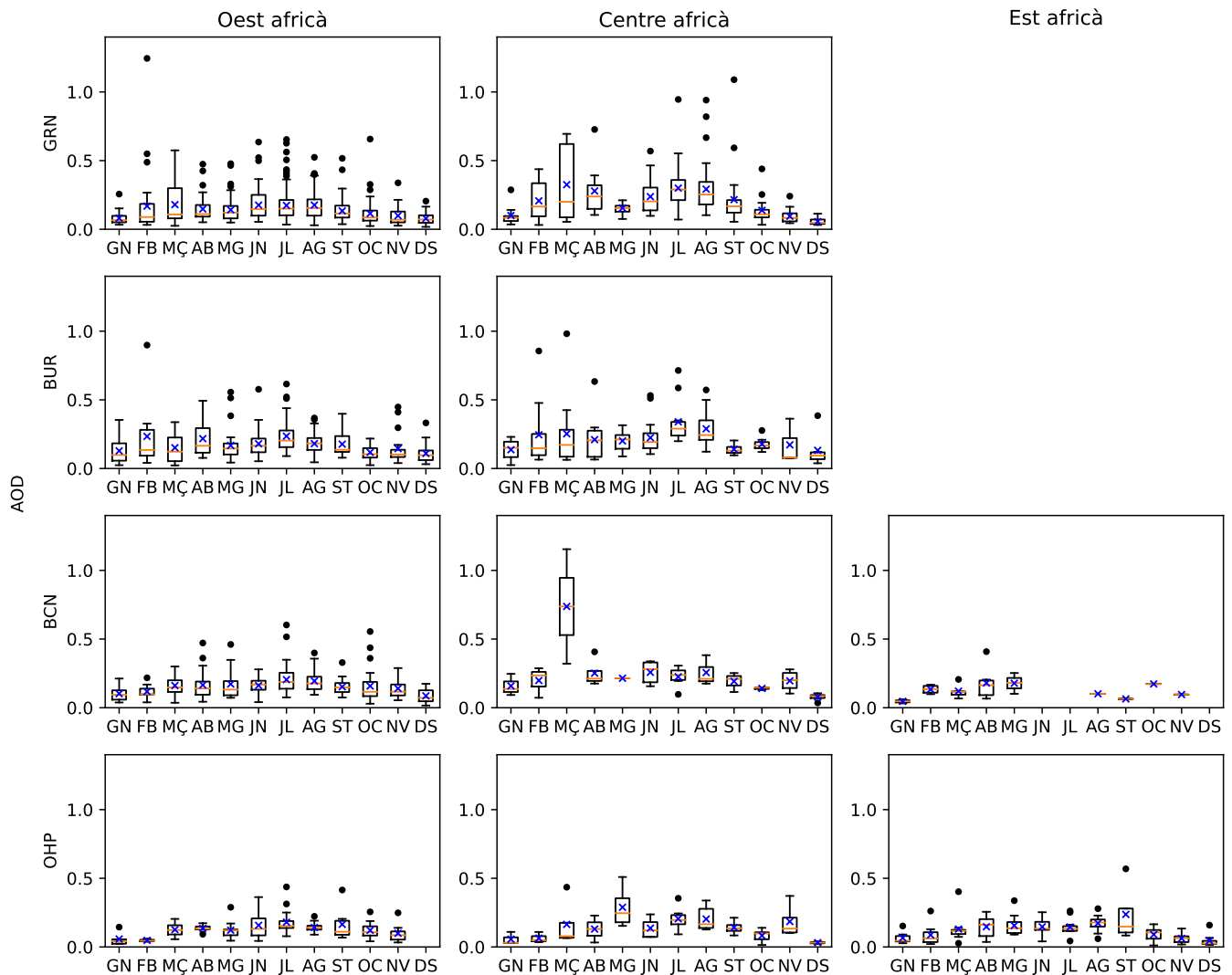


Figura 5. Diagrama de caixes de l'AOD per cadascuna de les estacions analitzades i segons la regió d'origen. La caixa s'estén des del primer fins al tercer quartil de les dades i els bigotis s'estenen fins a 1.5 vegades el rang interquartílic. Es mostra en taronja la mediana, en blau la mitjana i els punts negres representen els *outliers*.

l'estació de referència i l'època de l'any. Els aerosols de pols mineral presenten els valors més baixos de SSA a la regió de l'ultraviolat que creixen en magnitud a mesura que la longitud d'ona és major. En canvi, els aerosols antropogènics procedents de la crema de combustibles fòssils presenten el comportament oposat, amb una màxima absorció a la regió de l'infraroig. Analitzant les dades d'AERONET el que s'observaria són valors mínims d'SSA per a una longitud d'ona de 440 nm per la pols mineral i la màxima absorció es donaria a 1020 nm pels aerosols antropogènics (mínim SSA). Un treball amb diferents estacions d'AERONET arreu del món va mostrar que l'SSA espectral variava entre 0.94 i 0.78 per partícules procedents de la crema de biomassa i entre 0.92 i 0.99 quan les partícules de pols mineral eren les dominants (Dubovik *et al.* 2002). Tanmateix, l'SSA pot presentar un altre comportament, mostrant primer

un creixement i posteriorment un decreixement amb la longitud d'ona, fet que indica una mescla entre aerosols de tipus mineral i carboni negre a causa de la millor absorció del primer per longituds d'ones curtes i del segon, per longituds d'ona llargues (Li *et al.* 2015).

Els valors mitjans estacionals de l'SSA per cadascuna de les longituds d'ona estudiades es mostren a la Figura 7, on es pot visualitzar el comportament espectral d'aquesta variable per les estacions analitzades, l'origen de la massa d'aire i l'època de l'any. L'estació que presenta una entrada més clara de pols mineral de mida gran és GRN durant els mesos d'estiu, tardor i primavera amb un creixement de l'SSA quasi en totes les longituds d'ona. Aquesta variació espectral (increment amb la longitud d'ona) és deguda a que els compostos presents són rics en ferro i domina l'absorció en longituds d'ona curtes. Aquest comportament pràcticament no s'aprecia durant els mesos

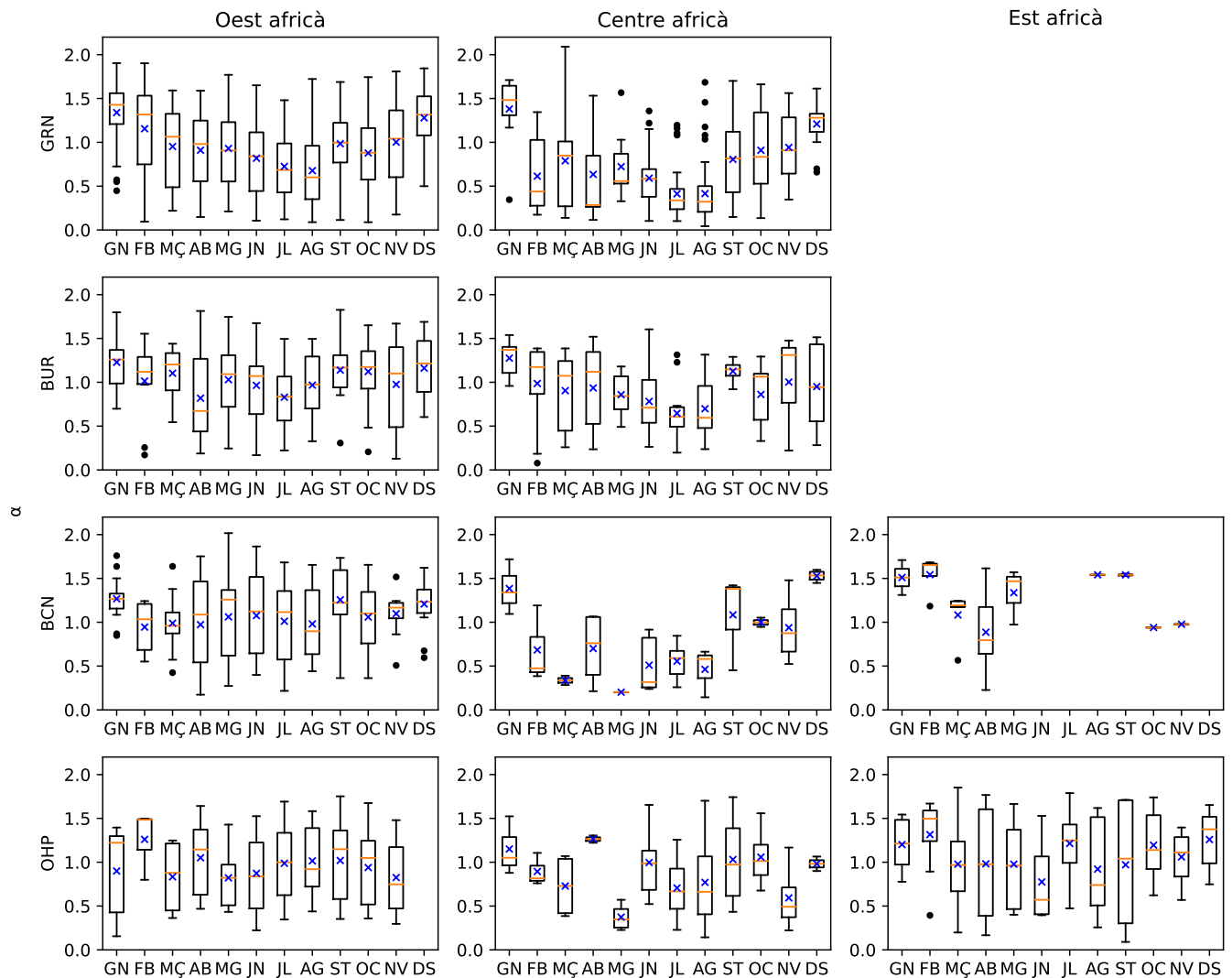


Figura 6. Diagrama de caixes de l' $\alpha$  per cadascuna de les estacions analitzades i segons la regió d'origen. La descripció de l'esquema és el mateix que la Figura 5.

d'hivern a cap de les estacions estudiades (sent la d'OHP la més clara) degut possiblement a l'emissió de partícules d'origen antropogènic per combustió i per la poca ventilació. Això confirma el que havia mostrat prèviament el diagrama de caixes d' $\alpha$  que dona informació sobre la mida de les partícules. Durant els mesos d'hivern, l'estació de BCN presenta valors d'SSA més alts en comparació amb l'estació de GRN. Encara que les emissions antropogèniques a la ciutat de BCN són majors, les característiques orogràfiques de l'estació de GRN (situada en una vall envoltada de grans muntanyes) afavoreix els episodis d'estancament durant els mesos d'hivern (*Foyo-Moreno et al.* 2019). Per altra banda, durant la tardor a BUR i per masses procedents del centre africà, es pot observar una clara mescla entre aerosols de tipus mineral i aerosols antropogènics provinents de la crema de combustibles fòssils.

Hi ha certs mesos que presenten una forta variabili-

tat de l'SSA, fet que indica que les característiques en columna són molt diferents degut a la possible barreja amb aerosol local i en alguns casos, la poca quantitat de dades a analitzar. La manca de dades es pot apreciar a l'estació d'OHP durant la primavera (centre) per les longituds d'ona de 870 nm i 1020 nm o a l'estació de BCN durant l'època d'estiu (est). L'estació de BCN (centre) durant la primavera presenta el valor mitjà de SSA més elevat ( $0.98 \pm 0.01$ ) a 675 nm indicant un domini d'aerosols de caràcter dispersant. Per altra banda, la d'OHP (oest) és aquella amb un valor més baix,  $0.84 \pm 0.1$  a 1020 nm durant els mesos d'hivern.

*Dubovik et al.* (2002) van mostrar que la diferència espectral  $\Delta SSA$  ( $SSA_{1020} - SSA_{440}$ ) prenia valors superiors a 0.05 per les partícules de pols mineral. En el present treball, la diferència espectral ha estat al voltant d'aquest valor en alguns casos i fins i tot, l'ha superat. Les estacions més pròximes a la regió font han estat les

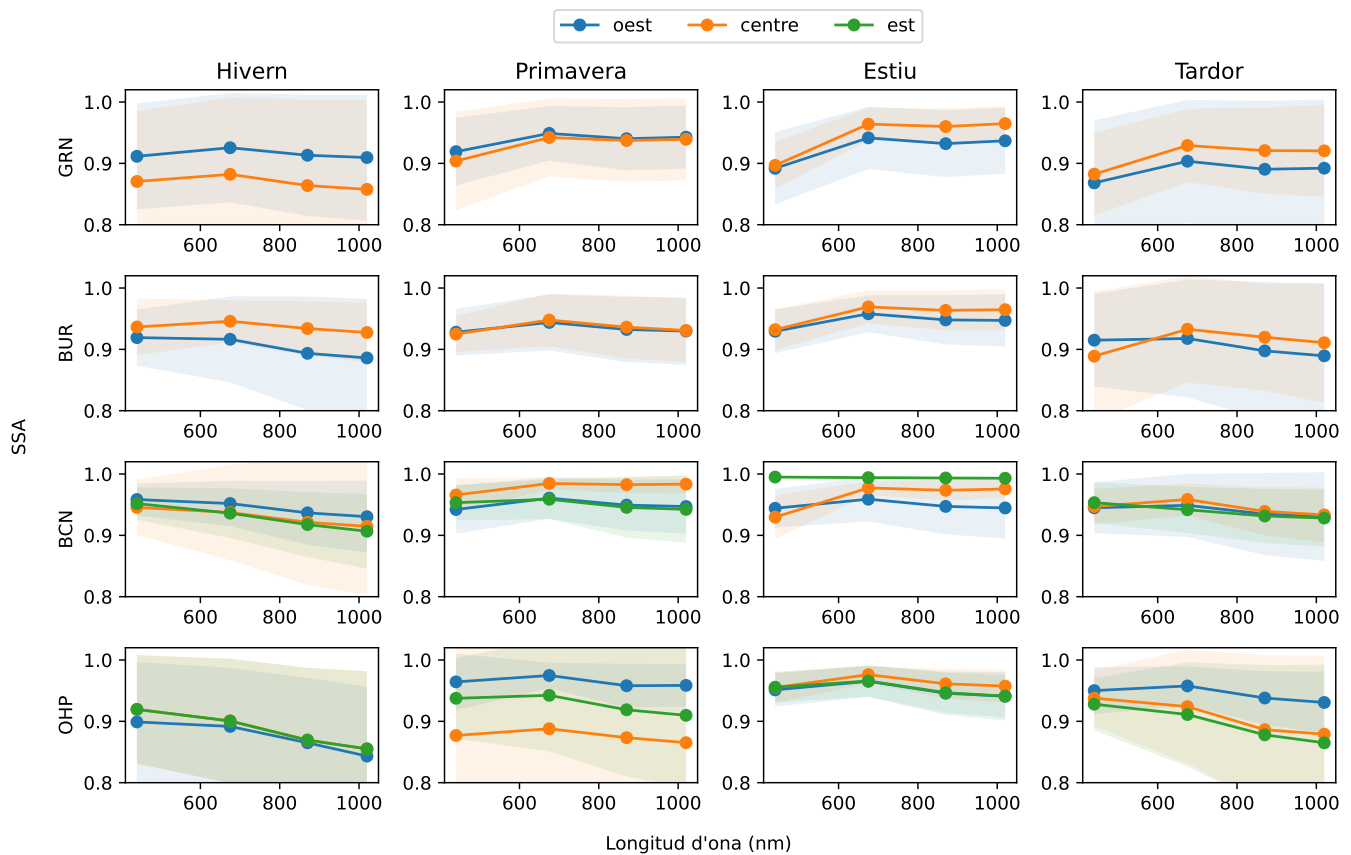


Figura 7. Valor mitjà estacional de l'SSA (línia sòlida) i desviació estàndard (regió ombrejada) per totes les estacions analitzades i segons la regió d'origen. S'ha fixat 0.8 com a límit inferior i 1.0 com a límit superior en l'eix d'ordenades per poder visualitzar millor la figura.

que han presentat un valor més elevat, sobretot durant els mesos d'estiu, sent l'estació de GRN (centre) la que mostra el valor més elevat durant els mesos d'estiu, 0.068. Per altra banda, les estacions més allunyades i els mesos d'hivern no han manifestat valors elevats de  $\Delta$ SSA degut a la mescla dels aerosols durant el seu recorregut i a la crema de biomassa.

No s'han observat diferències notables segons l'origen de les masses d'aire. Escudero *et al.* (2011) van estudiar la composició química dels aerosols segons la procedència de les masses d'aire a La Castanya (Montseny) conclouent que no s'apreciaven diferències importants durant els set episodis analitzats degut a l'alta barreja de les masses d'aire provinents d'Àfrica. No obstant això, es va observar una dominància d'aerosols rics en calci i pobres en alumini en les masses d'aire procedents del nord del Sàhara (oest, est d'Algèria i Tunísia) en comparació amb aquelles originàries del sud del Sàhara i del Sahel (zones d'origen a Mali, Mauritània Occidental i Sàhara Occidental) sobretot a causa de la interacció de la pols mineral amb altres partícules i de l'envelliment durant el seu recorregut que en modifica les propietats. Ara bé, la presència de carbonats de calci pot provocar una menor absorció a causa del fet que aquestes espècies

no absorbeixen radiació en l'espectre solar (Lafon *et al.* 2006). Les retrotrajectòries procedents de l'oest que presenten més recorregut (Figura 4) podrien estar afectades per les característiques pròpies dels aerosols de la zona del Sahel mostrant una major absorció i així, un valor d'SSA menor. No obstant això, aquest comportament no s'aprecia quasi en cap de les estacions analitzades degut a que les retrotrajectòries mitjanes amb origen a les diferents regions d'Àfrica engloben retrotrajectòries que podrien estar influenciades per altres zones amb diferents característiques a la regió del Sahel.

#### D. Limitacions del mètode

Tot i que els resultats estan d'acord amb la literatura, cal donar èmfasi en certes limitacions inherents al mètode utilitzat:

- Els dies ennuvolats no estan representats a la base d'AERONET, ja que les mesures amb núvols davant del disc solar són eliminades. A més, no hi ha dades nocturnes.
- Les propietats òptiques analitzades en aquest tre-



ball són en columna podent implicar una certa barreja que dificulti l'anàlisi de les intrusions de pols mineral.

- La resolució del model meteorològic usat en les retrotrajectòries és de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Aquesta pot ser massa baixa per poder analitzar certs episodis concrets.
- Les retrotrajectòries s'han calculat a 3 km d'altura, considerant que el transport es dona a aquest nivell. No s'han considerat entrades a nivells més baixos que podrien afectar sobretot a les estacions més properes.
- L'elecció del nombre de clústers en el model HYSPLIT és subjectiu basat en el gràfic de canvi de TSV enfront del nombre de clústers.
- Tant en el *clustering* com en el *re-clustering* s'han menyspreat i/o seleccionat retrotrajectòries que podrien pertànyer o no als clústers d'interès.

#### IV. CONCLUSIONS

S'ha realitzat l'estudi de les propietats òptiques columnars a quatre emplaçaments distribuïts al llarg de la costa mediterrània occidental a partir de les dades d'AERONET per diversos episodis d'entrada de pols mineral seleccionats amb el mètode de retrotrajectòries del model HYSPLIT. Els resultats han mostrat una dominància d'aquests episodis a l'estiu i la tardor, sobretot durant el mes de setembre. En aquest mes hi ha més abundància d'episodis d'entrada de pols mineral degut a que les situacions sinòptiques són semblants a les dels mesos d'estiu.

Les propietats òptiques columnars dels aerosols han presentat una clara entrada de material particulat de mida gran durant l'estiu i la tardor, sobretot en les estacions més pròximes a la regió font. Encara que durant el treball s'ha dividit l'origen de les masses d'aire en tres regions, la proximitat a la regió font no permet discernir les retrotrajectòries més a l'est que han quedat englobades al centre. Estudis previs estan d'acord amb els resultats obtinguts en aquest treball exposant valors semblants d'AOD i d' $\alpha$  durant aquests episodis. L'estudi de l'SSA ha permès confirmar el que prèviament han mostrat les mesures directes. Els mesos d'hivern no han presentat valors esperables per cap variable durant episodis d'intrusió de pols mineral degut, en primer lloc, a la crema de biomassa per calefacció que provoca barreja de l'aerosol mineral amb aerosol d'origen antropogènic i també, degut a que la meteorologia local no afavoreix la dispersió de contaminants durant aquests mesos. Tot i que el mètode presenta certes limitacions, els resultats obtinguts al llarg del treball estan d'acord amb la literatura.

#### AGRAÏMENTS

Vull agrair a la Dra. Yolanda Sola per l'assessorament i ajuda en aquest projecte i a la meua família i amics pel seu suport. Voldria donar les gràcies al NOAA Air Resources Laboratory (ARL) la prestació del model de transport i dispersió HYSPLIT i/o el lloc web READY (<https://www.ready.noaa.gov>) usat en aquesta publicació. Voldria donar les gràcies a la xarxa de fotòmetres solars d'AERONET i els seus treballadors per produir un conjunt de dades emprat en aquest estudi (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

#### REFERÈNCIES

- Arias, P., et al., Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, doi:10.1017/9781009157896.002, 2021.
- ARL, HYSPLIT, <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>, últim accés: 25.01.2023, 2022.
- Benkhalifa, J., J. F. León, and M. Chaabane, Aerosol optical properties of western Mediterranean basin from multi-year AERONET data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164, 222–228, doi:10.1016/j.jastp.2017.08.029, 2017.
- Borge, R., J. Lumbreras, S. Vardoulakis, P. Kassomenos, and E. Rodriguez, Analysis of long-range transport influences on urban PM10 using two-stage atmospheric trajectory clusters, *Atmospheric Environment*, 41(21), 4434–4450, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.053, 2007.
- Cachorro, V. E., M. A. Burgos, D. Mateos, C. Toledano, Y. Bennouna, B. Torres, M. de Frutos, and Herguedas, Inventory of African desert dust events in the north-central Iberian peninsula in 2003–2014 based on sun-photometer–AERONET and particulate-mass–EMEP data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(13), 8227–8248, doi:10.5194/acp-16-8227-2016, 2016.
- Carlsaw, K. S., O. Boucher, D. V. Spracklen, G. W. Mann, J. G. Rae, S. Woodward, and M. Kulmala, A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 1701–1737, doi:10.5194/acp-10-1701-2010, 2010.
- Chen, Z., X. Gao, and J. Lei, Dust emission and transport in the Aral sea region, *Geoderma*, 428, 116,177, doi:10.1016/j.geoderma.2022.116177, 2022.
- Cruz, J. A., F. McDermott, M. J. Turrero, R. L. Edwards, and J. Martín-Chivelet, Strong links between Saharan dust fluxes, monsoon strength, and North Atlantic climate during the last 5000 years, *Science Advances*, 7(26), doi:10.1126/sciadv.abe6102, 2021.
- Córdoba-Jabonero, C., et al., Synergetic monitoring of Saharan dust plumes and potential impact on surface: A case study of dust transport from Canary Islands to Iberian

- peninsula, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(7), 3067–3091, doi:10.5194/acp-11-3067-2011, 2011.
- De Longueville, F., Y.-C. Hountondji, S. Henry, and P. Ozer, What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in west Africa compared to other regions?, *Science of The Total Environment*, 409(1), 1–8, doi:10.1016/j.scitotenv.2010.09.025, 2010.
- Dubovik, O., B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and I. Slutsker, Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3), 590–608, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0590:voaaop>2.0.co;2, 2002.
- Emery, W., and A. Camps, The history of satellite remote sensing, *Introduction to Satellite Remote Sensing*, p. 1–42, doi:10.1016/b978-0-12-809254-5.00001-4, 2017.
- Escudero, M., A. Stein, R. Draxler, X. Querol, A. Alastuey, S. Castillo, and A. Avila, Source apportionment for African dust outbreaks over the western Mediterranean using the HYSPLIT model, *Atmospheric Research*, 99(3-4), 518–527, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.002, 2011.
- Foyo-Moreno, I., I. Alados, J. Guerrero-Rascado, H. Lyamani, D. Pérez-Ramírez, F. Olmo, and L. Alados-Arboledas, Contribution to column-integrated aerosol typing based on sun-photometry using different criteria, *Atmospheric Research*, 224, 1–17, doi:10.1016/j.atmosres.2019.03.007, 2019.
- Holben, B., et al., Aeronet — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1–16, doi:10.1016/s0034-4257(98)00031-5, 1998.
- Lafon, S., I. N. Sokolik, J. L. Rajot, S. Caqueneau, and A. Gaudichet, Characterization of iron oxides in mineral dust aerosols: Implications for light absorption, *Journal of Geophysical Research*, 111(D21), doi:10.1029/2005jd007016, 2006.
- Li, J., B. E. Carlson, and A. A. Lacis, Using single-scattering albedo spectral curvature to characterize east Asian aerosol mixtures, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(5), 2037–2052, doi:10.1002/2014jd022433, 2015.
- Mandija, F., et al., Origin and pathways of the mineral dust transport to two Spanish EARLINET sites: Effect on the observed columnar and range-resolved dust optical properties, *Atmospheric Research*, 187, 69–83, doi:10.1016/j.atmosres.2016.12.002, 2017.
- NASA, Aerosol Robotic Network (AERONET), <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, últim accés: 25.01.2023, 2022.
- Qor-el-aïne, A., A. Béres, and G. Géczí, Dust storm simulation over the Sahara desert (Moroccan and Mauritanian regions) using HYSPLIT, *Atmospheric Science Letters*, 23(4), doi:10.1002/asl.1076, 2021.
- Querol, X., A. Alastuey, S. Rodriguez, F. Plana, C. R. Ruiz, N. Cots, G. Massagué, and O. Puig, PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona metropolitan area, Catalonia, Spain, *Atmospheric Environment*, 35(36), 6407–6419, doi:10.1016/s1352-2310(01)00361-2, 2001.
- Rozwadowska, A., T. Zielinski, T. Petelski, and P. Sobolewski, Cluster analysis of the impact of air back-trajectories on aerosol optical properties at Hornsund, Spitsbergen, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3), 877–893, doi:10.5194/acp-10-877-2010, 2010.
- Russo, A., P. Sousa, R. Durão, A. Ramos, P. Salvador, C. Linares, J. Díaz, and R. Trigo, Saharan dust intrusions in the Iberian peninsula: Predominant synoptic conditions, *Science of The Total Environment*, 717, 137,041, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137041, 2020.
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan, NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077, doi:10.1175/bams-d-14-00110.1, 2015.
- Su, L., Z. Yuan, J. C. Fung, and A. K. Lau, A comparison of HYSPLIT backward trajectories generated from two GDAS datasets, *Science of The Total Environment*, 506–507, 527–537, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.11.072, 2015.
- Toledano, C., V. E. Cachorro, A. Berjon, A. M. de Frutos, M. Sorribas, B. A. de la Morena, and P. Goloub, Aerosol optical depth and Ångström exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain), *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(624), 795–807, doi:10.1002/qj.54, 2007.
- Valenzuela, A., F. Olmo, H. Lyamani, M. Antón, A. Quirantes, and L. Alados-Arboledas, Analysis of the columnar radiative properties retrieved during African desert dust events over Granada (2005–2010) using principal plane sky radiances and spheroids retrieval procedure, *Atmospheric Research*, 104–105, 292–301, doi:10.1016/j.atmosres.2011.11.005, 2012a.
- Valenzuela, A., F. J. Olmo, H. Lyamani, M. Antón, A. Quirantes, and L. Alados-Arboledas, Classification of aerosol radiative properties during African desert dust intrusions over southeastern Spain by sector origins and cluster analysis, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6), doi:10.1029/2011jd016885, 2012b.
- Yu, X., et al., Dust aerosol properties and radiative forcing observed in spring during 2001–2014 over urban Beijing, China, *Environmental Science and Pollution Research*, 23(15), 15,432–15,442, doi:10.1007/s11356-016-6727-9, 2016.
- Yus-Díez, J., M. Ealo, M. Pandolfi, N. Perez, G. Titos, G. Močnik, X. Querol, and A. Alastuey, Aircraft vertical profiles during summertime regional and Saharan dust scenarios over the north-western Mediterranean basin: Aerosol optical and physical properties, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(1), 431–455, doi:10.5194/acp-21-431-2021, 2021.