Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2011, **8**, 21–31
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2011.8.03
Revista editada per **ACAM**

Característiques termodinàmiques de masses d'aire al llarg de la vall del Guadalquivir mitjançant un càlcul de trajectòries

M. A. Hernández-Ceballos[1,2], J. A. Adame[1], J. P. Bolívar[2] i B. A. de la Morena[1]

[1]Àrea d'Investigació Atmosfèrica i Instrumentació, Estació de Sondeigs Atmosfèrics "El Arenosillo", Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Crta. Huelva-Matalascañas km 34, 21130 Mazagón, Huelva
[2]Departament de Física Aplicada, Universidad de Huelva, Campus El Carmen, 21007 Huelva

Rebut: 1-VI-2010 – Acceptat: 2-II-2011 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: hernandezma@inta.es

Resum

La presència de la vall del Guadalquivir afavoreix la canalització de masses d'aire des de zones costaneres cap a l'interior d'Andalusia. Per aquest motiu, aquest treball presenta una primera aproximació sobre la variació espacial al llarg de la vall del Guadalquivir d'alguna de les propietats termodinàmiques representatives de les masses d'aire. Amb aquest objectiu s'han seleccionat tres emplaçaments representatius del seu curs baix, mig i alt, analitzant en tots ells les trajectòries diàries i els registres horaris de temperatura potencial, humitat específica i velocitat del vent durant el període 2000-2007. El conjunt de trajectòries ha estat calculat utilitzat el model HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), establint les 12 UTC com a hora d'arribada, una durada de 120 hores i una altura final d'incidència de 500 m. L'anàlisi per clústers ha permès la selecció de deu tipus de masses d'aire, seleccionant d'aquest conjunt aquelles que provenen clarament de l'oest. L'anàlisi en els tres emplaçaments dels cicles diaris de temperatura potencial mostren un refredament progressiu durant el període fred (novembre-febrer) de l'any (3-4 K) i un escalfament durant el període càlid (juny-setembre) en el rang de 5-6 K entre els extrems de la vall. La humitat específica experimenta un descens, independent del període i tipus de massa d'aire, a mesura que la massa d'aire recorre la vall, sent més intens durant el període càlid amb fins a 8 g kg^{-1} pels 1-2 g kg^{-1} del període fred. Els cicles de velocitat del vent mostren un descens progressiu de la mateixa al llarg de la vall, sent més accentuada entre el tram final amb una relació de fins a 3 m s^{-1} cada 100 km, registrant els valors més intensos durant el període càlid de l'any amb valors mitjos de fins a 4 m s^{-1}.

Paraules clau: vall del Guadalquivir, masses d'aire, HYSPLIT, cicles diaris

1 Introducció

Les propietats termodinàmiques de les masses d'aire no són constants en el seu desplaçament sinó que es poden veure modificades segons les característiques de les zones per les quals transiten, siguin continentals o marítimes. Aquesta variació temporal i espacial de les seves propietats termodinàmiques afecta les substàncies que es troben en el seu interior, siguin gasos o partícules (Millán et al., 1997; Evtyugina et al., 2006).

Diversos estudis com el d'Hernández-Ceballos et al. (2010a) i Toledano et al. (2009) han permès identificar i caracteritzar l'arribada de masses d'aire sobre Andalusia occidental, regió situada al sud-oest de la Península Ibèrica. Aquesta es caracteritza per la presència de la vall del Guadalquivir actuant com a canal natural de transport de masses d'aire des de la costa atlàntica cap a l'interior de la regió. A més, destaca la presència d'importants fonts d'emissió de substàncies, tant d'origen natural (Parc Nacional de Doñana, Serra Nord de Sevilla, Vall dels Pedroches) com antropogènic (pol industrial de Huelva, les ciutats de Sevilla i Còrdova), cosa que unida a l'efecte canalitzador de la vall fan possible que aquestes substàncies puguin ser transportades des dels seus focus d'emissió cap a zones de l'interior.

(cc) BY *2011 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".*

En els darrers anys s'han realitzat diversos estudis amb la finalitat d'establir les característiques dels processos de contaminació atmosfèrica, tant per ozó superficial (Adame et al., 2008; 2010) com per material particulat (Rodríguez et al., 2001; Querol et al., 2002) que es desenvolupen al sud-oest de la Península Ibèrica.

Per la importància que les condicions meteorològiques tenen sobre els processos de formació, transport, transformació i eliminació dels gasos o material particulat, l'objectiu d'aquest treball s'ha centrat en la identificació d'escenaris sinòptics que presentin situacions meteorològiques favorables a que es produeixi la canalització i desplaçament de masses d'aire al llarg de la vall del Guadalquivir. Amb els casos seleccionats s'ha estudiat la variació que experimenten els cicles diaris de la velocitat del vent, temperatura potencial i humitat específica en tres emplaçaments representatius, per així obtenir una aproximació sobre la variació espacial d'aquestes variables al llarg de la vall.

2 Àrea d'estudi, emplaçaments de mesura i metodologia aplicada

L'àrea d'estudi és Andalusia occidental, regió situada al sud-oest de la Península Ibèrica, la qual representa una topografia caracteritzada per la presència de la vall del Guadalquivir actuant com a obertura natural a l'oceà Atlàntic (Figura 1). Aquesta posseeix una àrea triangular orientada en la direcció SW-NE, delimitada per Sierra Morena al nord i els sistemes Bètics al sud, que exerceixen d'eix transversal de la regió.

Al llarg de la vall del Guadalquivir s'han seleccionat tres emplaçaments amb la finalitat de: i) disposar d'una òptima cobertura espacial de la vall, ii) tenir representativitat de les tres zones en les quals es divideix el mateix (baix, mig i alt) i iii) disposar d'informació meteorològica de superfície. Com a punt coster ha estat seleccionada l'Estació de Sondeigs Atmosfèrics "El Arenosillo" (37,1°N -6,7°W, 40 metres sobre el nivell del mar (msnm), la ciutat de Còrdova (37,84°N - 4,85°W, 91 msnm) situada a 200 km de la costa com representativa de la seva zona mitja, i la població de Santa Elena (Jaén) (38,37°N -3,51°W, 750 msnm), localitzada a la seva zona alta, a uns 330 km de la franja costanera. En cadascun d'ells, la informació meteorològica és proporcionada per estacions automàtiques que pertanyen a l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) cada 10 minuts.

Cadascun dels emplaçaments presenta una rosa de vents al llarg de l'eix oest/sud-oest - nord-est (Figura 1), representativa de la dinàmica de fluxos de la vall (eix sud-oest - nord-est), garantint d'aquesta manera la seva localització en el mateix. Durant el període fred (novembre-febrer) predominen els fluxos del nord-est amb intensitat moderada inferior a 5 m s^{-1}. En els mesos considerats com a càlids (juny-setembre) els fluxos predominants són aquells que provenen del sud-oest amb intensitat no superior als 7 m s^{-1}.

En cadascun dels emplaçaments s'han utilitzat les dades de velocitat del vent, humitat, temperatura i pressió durant el període 2000-2007. Aquest període ha estat seleccionat en existir una elevada disponibilitat de dades horàries simultàniament en els tres emplaçaments seleccionats. La comparativa dels valors anuals de temperatura d'aquest període amb els registres climatològics anuals proporcionats per l'AEMET per al període 1971-2000 a les estacions de Huelva (18,1°C) i Còrdova (17,6°C) permeten catalogar el període d'estudi com a càlid respecte del citat període climàtic.

L'elecció de la velocitat del vent es justifica per ser un paràmetre que ajuda a estimar la capacitat dispersiva i de ventilació que té l'atmosfera, mentre que la temperatura potencial és una magnitud conservativa per a ascensos i descensos adiabàtics que aporta informació sobre la intensitat dels processos adiabàtics, tals com l'escalfament diürn i el refredament nocturn en absència de nuvolositat significativa que puguin transformar les propietats de la massa d'aire, influint d'aquesta manera sobre la capacitat de mescla vertical i de l'ocurrència de transformacions químiques. En darrer lloc, la humitat específica és també una magnitud conservativa que representa la quantitat absoluta d'humitat existent a l'atmosfera.

El model "*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*" (HYSPLIT) (Draxler i Hess, 1998; Draxler et al., 2009), desenvolupat per la *NOAA's Air Resources Laboratory* (ARL), és àmpliament utilitzat en el càlcul de les trajectòries (Jorba et al., 2004; Shan et al., 2009; Hondura et al., 2010; Davis et al., 2010; Hernández-Ceballos et al., 2010b). S'han utilitzat com a informació d'entrada els fitxers meteorològics FNL (*Final Analysis*) i GDAS (*Global Data Analysis System*) que disposen d'informació precisa sobre l'evolució de la component vertical del vent. Per aquest motiu, s'han calculat trajectòries cinemàtiques (3D) ja que presenten una major precisió que la resta d'opcions de càlcul que permet el model (isobàriques, isentròpiques...) quan es disposa d'aquesta informació per al seu càlcul (Stohl, 1998).

L'obtenció d'una trajectòria diària a les 12 UTC s'ha considerat adequat ja que l'objectiu del treball no és l'estudi de la variabilitat diària de les masses d'aire al llarg de la vall. L'altura final de 500 m ha estat seleccionada amb la finalitat que la seva alçada d'incidència es trobi a dins de la capa límit atmosfèrica (ABL, *Atmospheric Boundary Layer*) (Warneke, 1997), havent estat també utilitzada com a referència a Toledano et al. (2009) per a l'anàlisi d'aerosols sobre El Arenosillo. Per últim, el recorregut previ de 120 hores ha estat seleccionat ja que permetrà conèixer el desplaçament de les masses d'aire amb un origen sinòptic.

Amb l'objectiu d'extreure informació d'un ampli conjunt de trajectòries individuals, és comú aplicar tècniques estadístiques que permetin l'agrupació d'aquelles trajectòries similars en diferents grups, anomenats clústers. D'aquesta manera, cada clúster està format per trajectòries que presenten un recorregut similar, representant el centroide o centre de clúster la mitjana de totes les trajectòries que estan incloses en aquest clúster.

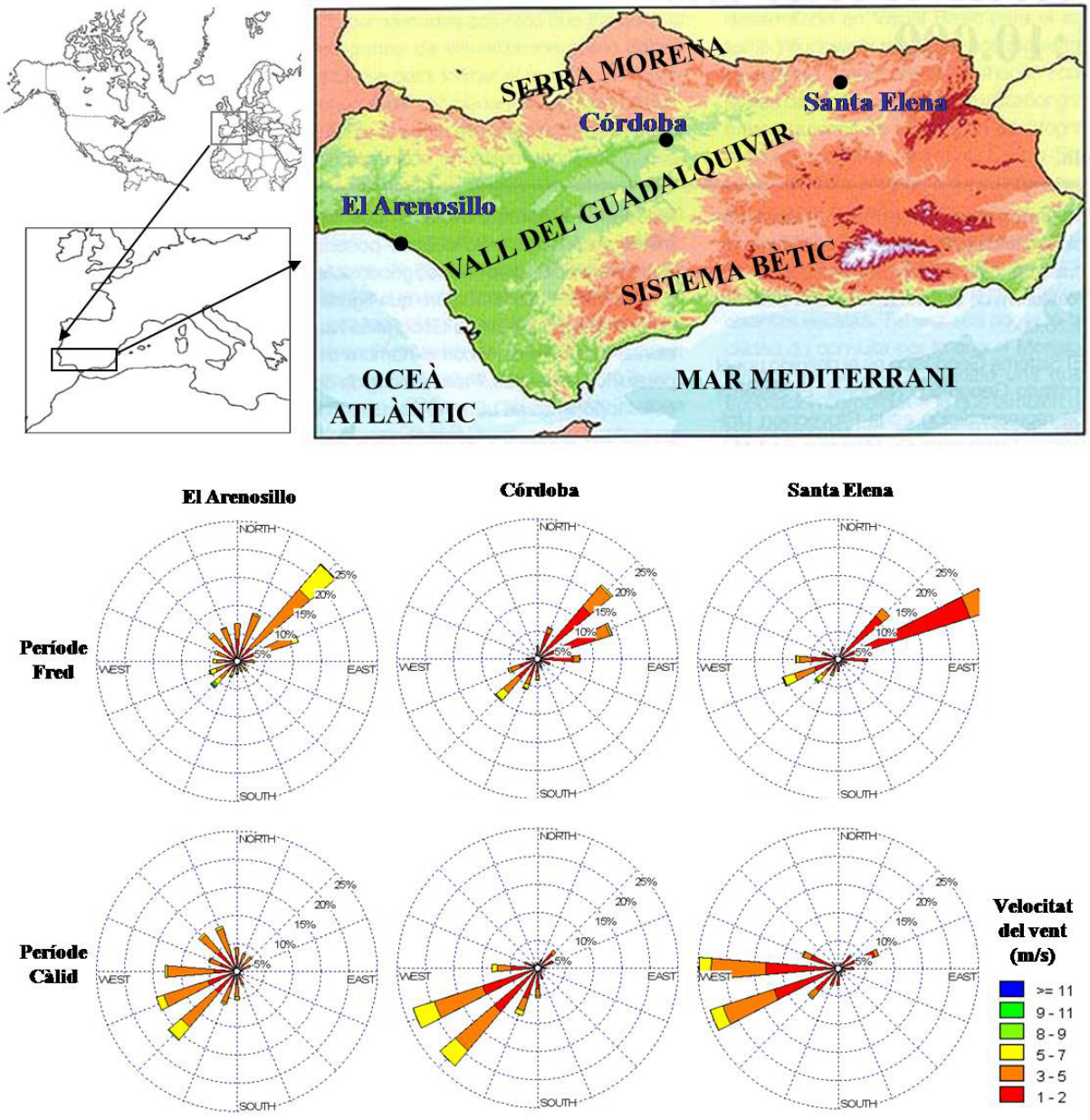

Figura 1. Principals elements topogràfics de l'àrea d'estudi i localització de les estacions meteorològiques seleccionades. Roses de vent a cadascun dels emplaçaments seleccionats corresponents al període fred (novembre-febrer) i període càlid (juny-setembre) calculats durant el període 2000-2007.

El model HYSPLIT disposa d'una eina d'agrupació basada en les variacions tant de la variància total entre clústers (TSV, *Total Spatial Variance*) com de la variància entre cadascun dels elements que els composen (SPVAR, *Spatial Variance*) (Draxler et al., 2009). El primer índex aporta informació sobre el grau de similitud (dissimilitud) que existeix entre els diferents grups o clústers que es formen, mentre que el segon indica el nivell de semblança (diferència) interna que existeix entre els elements que formen cadascun dels grups formats.

El procés d'agrupació s'inicia amb un nombre inicial de trajectòries individuals i finalitza amb la creació d'un únic clúster que les agrupa totes, unint-se en cadascuna de les etapes aquells dos elements que provoquen el mínim increment dels índex TSV i SPVAR. Aquesta variació percentual s'anirà incrementant a mesura que el nombre de clústers es vagi reduint, ja que cada vegada s'han d'unir grups menys similars entre si.

El model HYSPLIT proporciona informació sobre la variació percentual que experimenta l'índex TSV en cada etapa del procés respecte de l'anterior. Aquesta variació

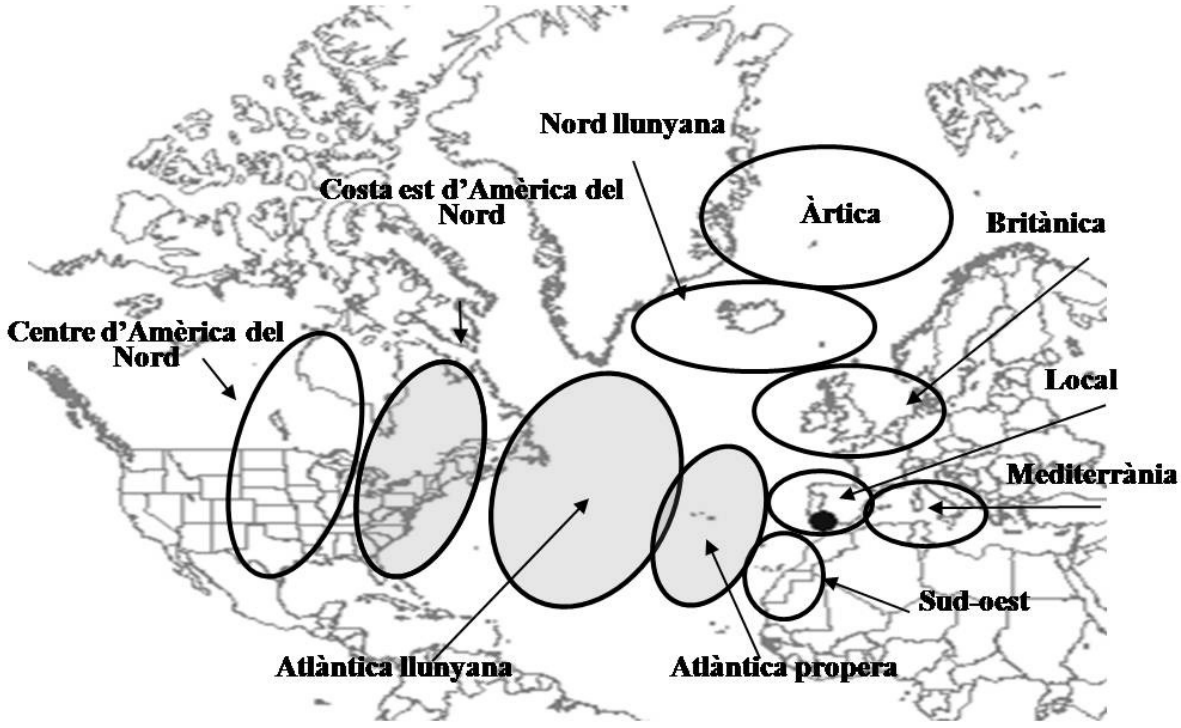

Figura 2. Localització de les zones de procedència de masses d'aire a 120 hores de la seva arribada al golf de Cadis a 500 msnm durant el període 2000-2007.

s'utilitza en la definició del número de clúster òptim (Stunder, 1996), que és el que representa el nombre de patrons de circulació que millor resumeixen la variabilitat existent a dins d'un conjunt inicial de trajectòries. La manera de seleccionar aquest nombre òptim correspondrà a aquella etapa en què se superi primer aquest valor llindar. En aquest treball, considerant el conjunt de resultats obtinguts a Stunder (1996) així com els estudis realitzats a la zona (Toledano et al., 2009; Hernández-Ceballos et al., 2010a), s'ha imposat un valor límit de l'índex TSV del 40% amb l'objectiu d'evitar que la unió de dos clústers molt diferents entre si provoqui una pèrdua d'informació considerable en el desenvolupament del treball.

3 Resultats

3.1 Masses d'aire característiques del golf de Cadis

Durant el període d'estudi, 2000-2007, s'han calculat un total de 2912 trajectòries diàries amb punt final a El Arenosillo (zona costera). D'altra banda, és ben conegut que en aquesta zona costera durant els mesos de primavera i estiu fonamentalment, la dinàmica atmosfèrica de la baixa atmosfera està governada per circulacions de mesoescala. En estudis previs (Adame et al., 2010), a partir dels registres horaris a l'estació costera de El Arenosillo s'han identificat i comptabilitzat els períodes en els quals s'han desenvolupat brises costaneres sobre la costa atlàntica andalusa. A causa de la resolució espacial dels fitxers meteorològics d'entrada utilitzats (190 km i 111 km), el model HYSPLIT no pot reproduir aquestes situacions de mesoescala. Per aquest motiu i amb la finalitat d'evitar una distorsió dels resultats obtinguts, s'ha procedit a l'eliminació d'aquelles trajectòries que pertanyien a períodes durant els quals es va detectar l'establiment i desenvolupament de circulacions de brisa sobre la zona d'estudi. Aplicant el mateix criteri seguit a Adame et al. (2010), es produeix una reducció en el nombre de trajectòries superior al 20% per a cadascun dels anys, utilitzant finalment un total de 2119 trajectòries.

Una vegada definit el nombre inicial de trajectòries, s'ha aplicat la tècnica clúster anteriorment esmentada sobre cada conjunt anual de les mateixes. L'anàlisi i comparativa entre els resultats clústers anuals ha permès la identificació de deu tipus diferents de masses d'aire sobre el Golf de Cadis a 500 m durant el període 2000-2007 (Figura 2). Cadascuna de les zones no es correspon amb regions font de masses d'aire, sinó que són zones representatives de la localització de la massa d'aire 120 hores abans d'incidir sobre el golf de Cadis a 500 m snm, i les podem anomenar zones de procedència. D'entre elles, les masses d'aire locals representen circulacions que es caracteritzen per un recorregut menor a 1200 km. Aquest conjunt de zones estan d'acord amb les obtingudes a Hernández-Ceballos et al. (2010a) durant el període 1997-2007.

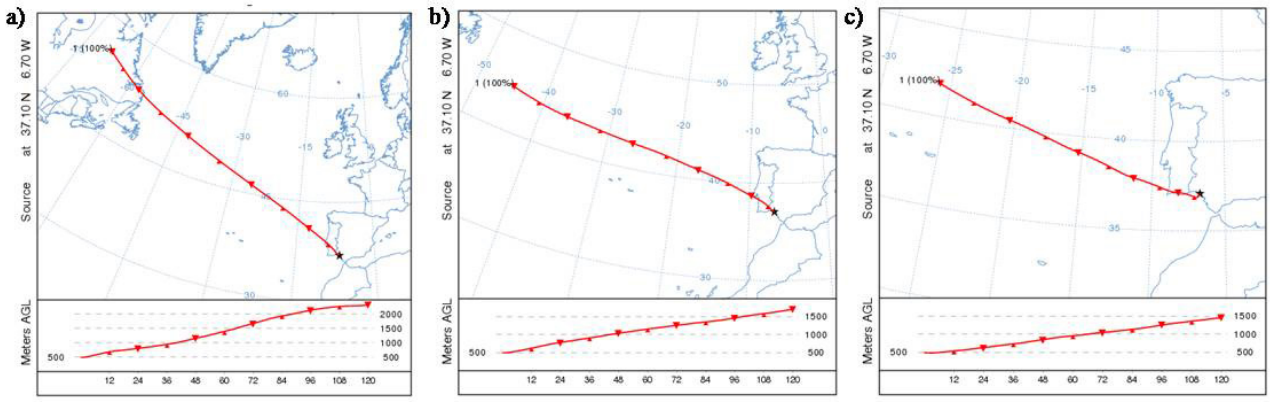

Figura 3. Circulació mitjana (centroide) dels tres tipus de masses d'aire seleccionades: a) costa est d'Amèrica del Nord, b) atlàntica llunyana i c) atlàntica propera.

D'aquest conjunt de masses d'aire s'han seleccionat en aquest treball les que verifiquen: i) circulacions d'origen sinòptic que presenten una homogeneïtat en el tipus d'àrea recorreguda, és a dir, marítim o continental, ii) procedència del sector sud-oest - nord-oest i iii) que presentin uns percentatges d'ocurrència durant el període 2000-2007 superiors al 10%. D'aquesta manera, es garanteix la utilització d'aquelles que no hagin experimentat grans variacions en les propietats termodinàmiques, així com que la seva incidència sigui elevada durant el període d'estudi.

Aplicant els criteris esmentats als deu tipus de masses d'aire, només tres d'elles els verifiquen (Figura 2, àrea gris): circulació de l'est d'Amèrica del Nord (264 dies), atlàntiques llunyanes (501 dies) i atlàntiques properes (446 dies). La Figura 3 mostra el desplaçament horitzontal i vertical mig (centroide) de cadascuna d'elles.

En general, l'arribada de masses d'aire amb origen a Amèrica del Nord es produeix sota un sistema de baixes pressions centrat a l'Atlàntic nord, a latituds semblants a les illes Britàniques i relativament properes a aquestes. Aquesta configuració isobàrica fa que s'afavoreixi el recorregut de masses d'aire des d'Amèrica del Nord fins a Europa travessant tot l'Atlàntic nord. Com a exemple, podem observar a la Figura 4a la trajectòria de la massa d'aire per al dia 17 de febrer de 2006 juntament amb el mapa de pressions en superfície.

Les masses d'aire atlàntiques llunyanes i properes presenten configuracions sinòptiques molt semblants i diferents de les trobades per al primer cas exposat, les nord-americanes. La meteorologia sinòptica associada es caracteritza per la combinació de centres d'altes i baixes pressions a l'Atlàntic, condicionant el recorregut de les masses d'aire, i per tant, la incidència de l'una o l'altra sobre el sud-oest de la Península Ibèrica, a la posició que aquests centres adopten a l'Atlàntic. D'aquesta manera es poden discriminar entre les atlàntiques llunyanes i properes. Com a exemple de circulació atlàntica propera es mostra a la Figura 4b la situació que es va produir el dia 10 d'agost de 2005.

A partir del conjunt de trajectòries obtingudes per als tres tipus de masses d'aire seleccionats, s'ha aplicat un procediment de selecció, amb la finalitat d'extreure'n aquells dies en què es tingui simultàniament el mateix tipus de massa d'aire al llarg de la vall. Amb l'objectiu d'exposar el procediment utilitzat, es pren com a referència la tipologia d'atlàntiques llunyanes. A partir dels dies en què s'ha identificat aquest tipus de circulació sobre El Arenosillo, es calculen les trajectòries per a aquells mateixos dies a Còrdova. A les trajectòries de Còrdova, se'ls aplica la tècnica clúster. Dels clústers obtinguts es selecciona únicament aquell o aquells que vinguin definits per circulacions atlàntiques llunyanes. D'aquesta manera es té un nou conjunt de dies amb la mateixa tipologia de masses d'aire a El Arenosillo i Còrdova. A la fase següent es calculen les trajectòries a Santa Elena per a l'últim conjunt de dies esmentat i es torna a aplicar la tècnica clúster a les trajectòries de Santa Elena. Dels centres dels clústers obtinguts, es seleccionaria únicament el que compleixi el criteri de ser atlàntica llunyana.

L'aplicació d'aquest criteri garanteix que es tingui el mateix tipus de massa d'aire de forma simultània a tota la vall. Tanmateix, no s'hauria de complir en tots els casos que sigui la mateixa massa d'aire. D'aquesta manera, la massa d'aire que assoleix Santa Elena ha recorregut tota la vall però no ha de ser la mateixa que en aquell moment es tingui a El Arenosillo, tot i que amb aquest criteri s'hagi forçat que a tots els emplaçaments es tingui una massa d'aire de la mateixa tipologia.

A la Taula 1 es mostren els resultats obtinguts després d'aplicar aquest procediment a cadascuna de les tres tipologies de masses d'aire. S'observa com la reducció total en percentatge és menor en les masses d'aire que procedeixen de l'Atlàntic, amb un 75% i un 85% respectivament per a les atlàntiques llunyanes i properes, mentre que és del 91% per a les procedents d'Amèrica del Nord. D'aquesta manera, la reducció en la detecció de masses d'aire semblants a la vall del Guadalquivir aniria relacionada amb el propi

Taula 1. Resultats obtinguts del procés de reducció del nombre inicial de jornades en les quals es detecta cada tipus de massa d'aire al Golf de Cadis i nombre total de dies per període càlid (juny-setembre) i fred (novembre-febrer) utilitzats als tres emplaçaments seleccionats per al càlcul de les variacions diàries.

	Amèrica del Nord	Atlàntica llunyana	Atlàntica propera
Nombre de dies inicial	264	501	446
Nombre de dies final	25	124	66
Reducció (%)	91%	75%	85%
Nombre de dies per	- (càlid)	23 dies (càlid)	17 dies (càlid)
període definit	20 dies (fred)	53 dies (fred)	27 dies (fred)

desplaçament previ de les mateixes, i per tant, amb les configuracions sinòptiques que originen la seva arribada sobre el golf de Cadis. Aquelles amb major recorregut, lligades a grans fluxos de l'oest, presenten una major dificultat de canalització al llarg de la vall que aquelles originades en zones més properes.

Així mateix, s'ha observat com els tres tipus de masses d'aire estudiats no presenten la mateixa ocurrència al llarg de l'any (Taula 1) sobre la vall del Guadalquivir. En general s'observa un major recorregut de masses d'aire al llarg de la vall durant el període fred que en el càlid. A més, de manera particular, és necessari indicar l'absència de dies en el període càlid d'aquelles procedents de la costa est d'Amèrica del Nord. Aquests resultats es podrien atribuir a una major homogeneïtzació de les condicions tèrmiques de la vall durant el període fred de l'any. En canvi, durant els mesos més càlids de l'any podria existir un major desacoblament en la dinàmica superficial entre els diferents trams de la vall.

3.2 Evolució diària de la velocitat del vent, temperatura i humitat específica a la vall del Guadalquivir sota escenaris sinòptics amb fluxos de l'oest/sud-oest

Una vegada seleccionats els dies en què s'ha observat la mateixa tipologia de massa d'aire en els tres trams de la vall s'han calculat i analitzat les variacions diàries que experimenten la temperatura potencial, humitat específica i velocitat del vent a cadascun dels emplaçaments representatius i en les dues èpoques de l'any (Figura 5) amb l'objectiu d'establir una primera aproximació a la variació espacial que presenta cadascun dels tipus de masses d'aire a la vall del Guadalquivir, ja que per conèixer amb més exactitud les característiques que presenta aquesta variació seria necessari ampliar el conjunt d'estacions representatives.

A l'hora d'interpretar els resultats exposats a la Figura 5, hem de tenir en compte que aquests han estat obtinguts a partir del conjunt de dies exposats a la Taula 1, que són, principalment, jornades aïllades i, per tant, no consecutives. Per aquest motiu, i malgrat que els resultats són representatius de jornades amb advecció de fluxos del sud-oest durant el període 2000-2007, els cicles diaris presenten una mínima discontinuïtat entre els extrems, registrant a més diferents pics horaris en el cas de la velocitat del vent.

3.3 Temperatura potencial

Els cicles diaris de temperatura potencial mostren l'existència d'un cicle diari ben definit al llarg de l'any en cadascun dels tres trams. En base a aquests resultats, durant el període càlid, s'observa un escalfament de la massa d'aire des de la costa cap a l'interior. Tanmateix, aquesta variació espacial no és contínua ja que es registren valors màxims més elevats a Còrdova que a Santa Elena. Aquests resultats podrien estar associats a la configuració topogràfica que presenta la zona de Còrdova, caracteritzada per un estrenyiment de la vall que afavoreix una major probabilitat d'estancament atmosfèric i com a conseqüència un major escalfament durant els mesos càlids.

En canvi, durant el període fred, es produeix un refredament a mesura que s'amplia la distància respecte de la costa, registrant-se els valors més baixos de temperatura potencial a l'estació de Santa Elena. A dins d'aquest període destaca l'elevada similitud existent entre els cicles diaris de El Arenosillo i Còrdova, amb diferències que no superen un grau. Aquest fet es pot justificar per la major homogeneïtat tèrmica que es registra entre aquests dos trams de la vall durant aquest període.

La influència de l'Atlàntic es reflecteix als trams de la vall a través de les diferències que es tenen entre el màxim i el mínim diari de temperatura. Aquestes diferències són menors a la zona costanera, establint-se entre els 5-10 K, mentre que assoleixen el seu valor màxim a la zona intermèdia amb un rang de 5-15 K, associat a les seves condicions topogràfiques. A la zona alta aquestes diferències són lleugerament inferiors a les intermèdies, oscil·lant entre els 5-13 K. Per tant, es pot indicar l'existència d'una pèrdua progressiva de la influència atlàntica a mesura que s'avança a dins de la vall i per tant, un augment de la continentalitat, més marcada a la zona intermèdia del mateix.

Respecte de la variació espacial que experimenten els valors mínims de temperatura potencial al llarg de la vall, aquests no superen els 2 K de diferència en cap dels tres tipus de masses d'aire, mentre que les diferències per als valors màxims poden assolir valors de fins a 5 K en masses d'aire nord-americanes i de 5-7 K per a les circulacions atlàntiques llunyanes i properes respectivament.

D'una altra banda, els cicles diaris de temperatura potencial són molt semblants en els tres tipus de masses con-

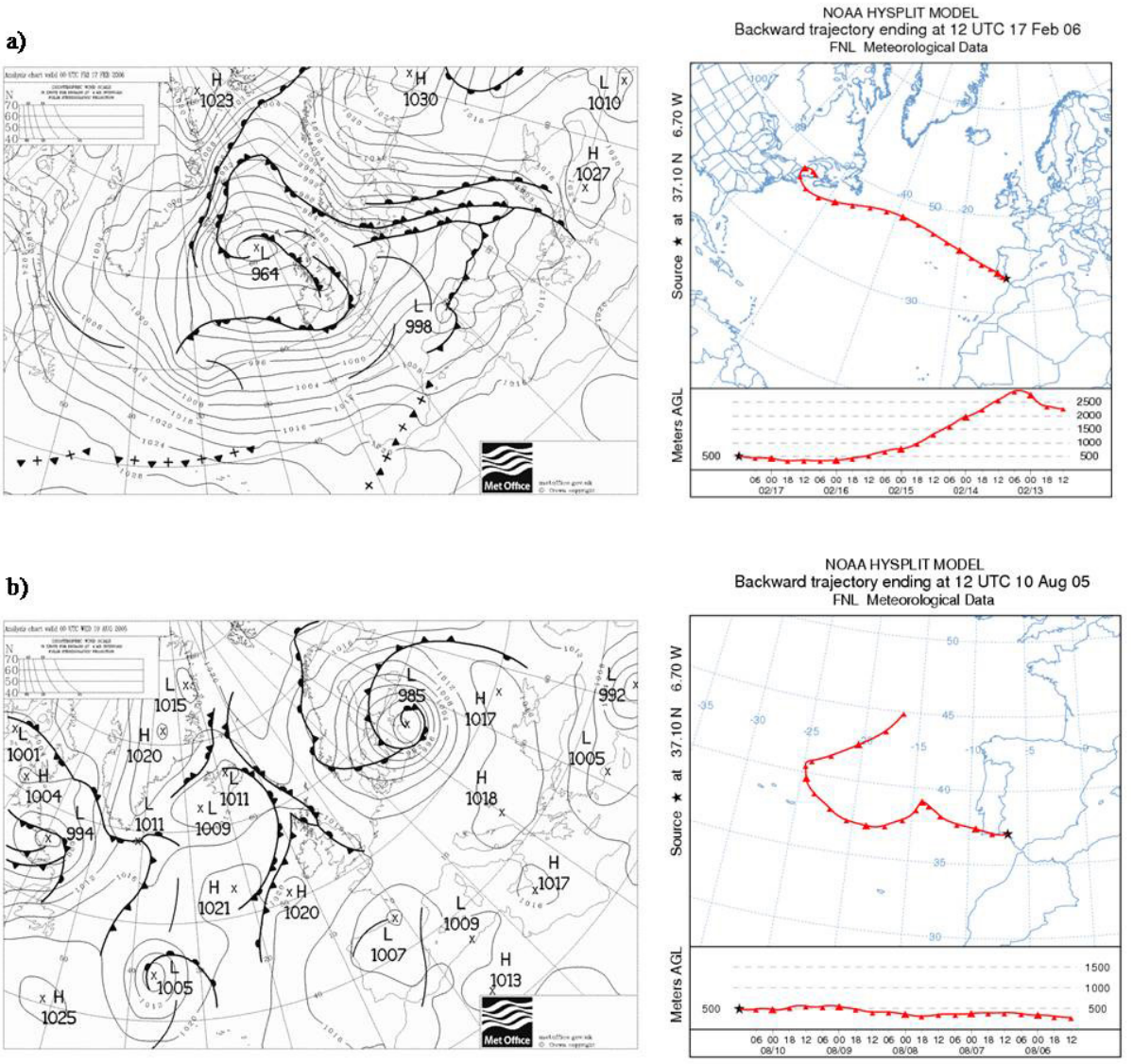

Figura 4. Configuracions sinòptiques (00 UTC) favorables a la incidència sobre el golf de Cadis de a) masses d'aire nord-americanes (17/02/2006) i b) atlàntiques (10/08/2005).

siderats i no es troben diferències apreciables entre ells. Les diferències tèrmiques al llarg de la vall, per tant, vénen definides per l'època de l'any i el tram de la vall considerada però no pel tipus de massa d'aire.

3.4 Humitat específica

L'evolució diària de la humitat específica mostra diferents variacions diàries segons el període considerat. Aquesta variació estaria associada a la pròpia intensitat dels fenòmens d'evaporació o condensació que es registren al llarg de la vall, condicionats per les pròpies característiques tèrmiques, topogràfiques, de cobertura vegetal o d'usos del sòl que presenten els diferents trams de la mateixa, així com per processos d'entrada (*entrainment*) d'aire des de nivells alts cap a l'ABL.

Durant el període fred s'observa a totes les estacions una major homogeneïtat en els cicles diaris en front d'una major variació horària en el càlid. Mentre que el rang en el període fred s'estableix entre els 5-8 g kg^{-1}, durant els mesos càlids assoleix els 5-13 g kg^{-1}. Aquesta diferència entre períodes de l'any pot estar associada a la major homogeneïtzació de les condicions meteorològiques al llarg de la vall que es produeix durant els mesos freds, en front de la major variació que es registra durant el període càlid.

Malgrat aquesta diferència entre períodes, no s'observen grans diferències entre els tres tipus de masses d'aire, i els respectius cicles diaris d'humitat específica són semblants. Només durant el període fred de l'any a l'estació de El Arenosillo s'observa una diferència constant d'1 g kg^{-1} entre el tipus nord-americana i les atlàntiques,

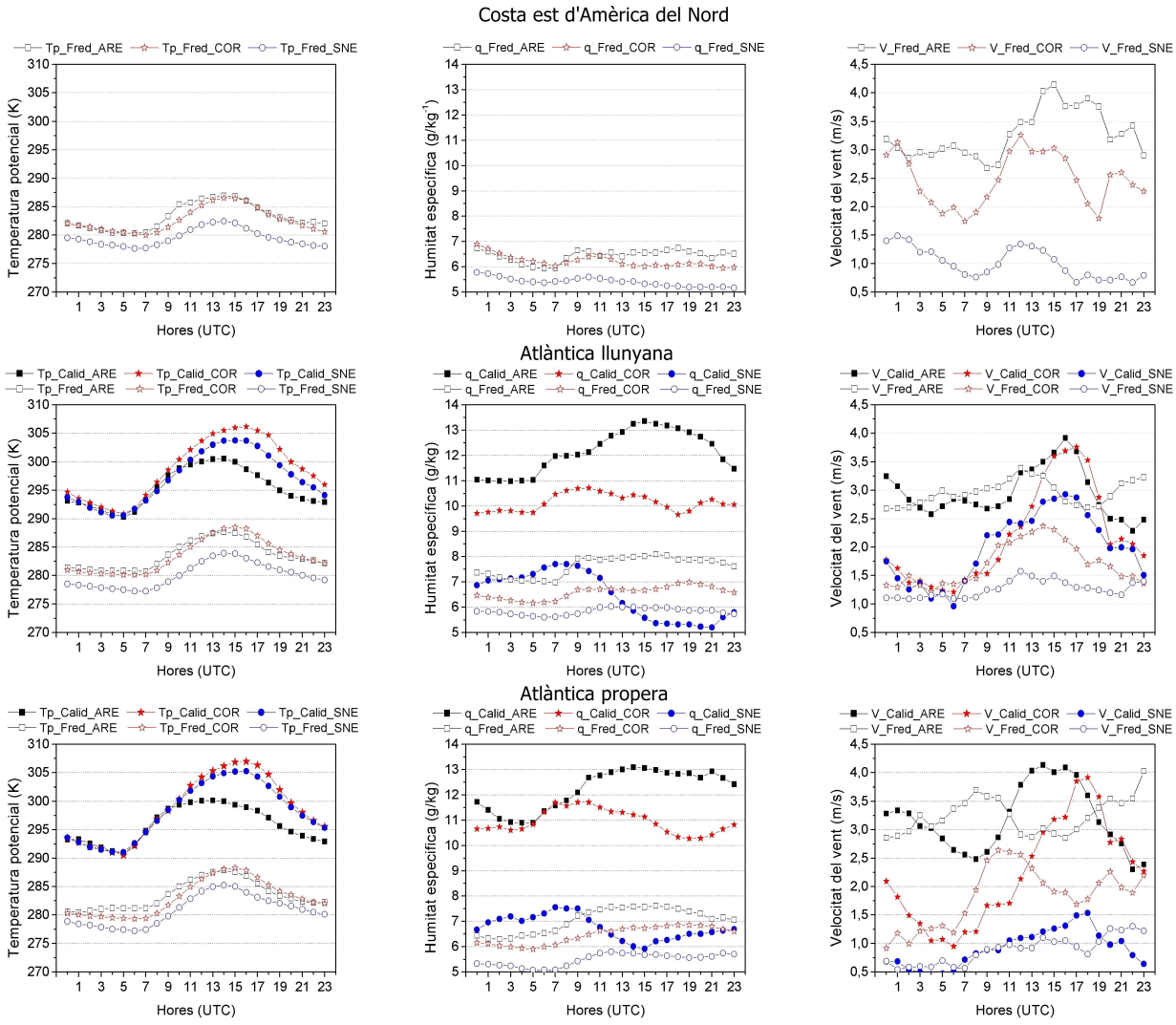

Figura 5. Cicles diaris de temperatura potencial (Tp), humitat específica (q) i velocitat del vent (V) obtinguts per al període fred (*Fred*) (novembre-febrer) i període càlid (*Càlid*) (juny-setembre), a cadascun dels tres emplaçaments, El Arenosillo (*ARE*), Còrdova (*COR*) i Santa Elena (*SNE*) per a cadascun dels tipus de masses d'aire estudiats: costa d'Amèrica del Nord, atlàntica llunyana i atlàntica propera.

mentre que durant el període càlid les majors diferències es registren a l'estació de Còrdova en presentar la massa d'aire atlàntica propera un major contingut de vapor d'aigua, al voltant d'1 g kg^{-1}, respecte de la tipologia atlàntica llunyana.

Independentment de la tipologia i de l'època de l'any considerada s'observa una pèrdua progressiva de contingut de vapor d'aigua a les masses d'aire cap a l'interior de la vall. Tanmateix, a causa de les condicions tèrmiques de la vall, aquesta disminució és molt més gran durant el període càlid, amb diferències de fins a 8 g kg^{-1}, que durant el període fred, durant el qual no es registren variacions superiors als 2 g kg^{-1} entre els extrems de la vall. Desglossant aquestes diferències per zones, s'observa com la pèrdua de vapor d'aigua s'intensifica entre la zona mitja (Còrdova) i de capçalera de la vall (Santa Elena). Així, durant el període càlid, aquesta s'intensifica, establint-se entre aquestes estacions diferències de 5-7 g kg^{-1}, mentre que entre la zona costanera (El Arenosillo) i Còrdova, aquesta diferència oscil·la entre 0-3 g kg^{-1}. Aquesta gran disminució que es registra en el tram final de la vall es podria explicar en el desenvolupament de processos d'entrada de fluxos d'aire des de nivells alts durant la variació diürna de la capa límit.

En el període càlid s'observa un cicle diari invers i una major variació horària entre les estacions extremes de la vall, El Arenosillo i Santa Elena, en front de la menor variabilitat que mostra l'estació localitzada a la zona intermèdia, Còrdova. En aquesta última, els valors obtinguts presenten una menor oscil·lació horària d'1 g kg^{-1}, mentre que a l'estació de El Arenosillo i Santa Elena les diferències entre els seus valors màxims i mínims diaris assoleixen els 2-3 g kg^{-1}.

Taula 2. Rangs de variació dels gradients de temperatura potencial ($\nabla\theta$), humitat específica (∇q) i de velocitat del vent (∇v) cada 100 km als trams de la vall del Guadalquivir. Abreviatures: El Arenosillo (*ARE*), Còrdova (*COR*), Santa Elena (*SNE*).

		Tram ARE $\longrightarrow$ COR	Tram COR $\longrightarrow$ SNE
Període Càlid	$\nabla\theta$	+(2,5-3 K)	-(1-2 K)
	∇q	-(1,5-2 g kg^{-1})	-(5 g kg^{-1})
	∇v	-(0,5 m s^{-1})	-(3,5 m s^{-1})
Període Fred	$\nabla\theta$	-(0,5 K)	-(2-3 K)
	∇q	-(0,5 g kg^{-1})	-(0,5-1 g kg^{-1})
	∇v	-(0,5-1 m s^{-1})	-(1-1,5 m s^{-1})

3.5 Velocitat del vent

El cicle diari de la velocitat del vent mostra tant en els mesos freds com en els càlids i independentment del tipus de massa d'aire, un descens de la velocitat del vent a mesura que s'avança cap a l'interior de la vall. Així, mentre que en el tram costaner, estació de El Arenosillo, s'assolien intensitats del vent superiors als 4 m s^{-1}, en el tram més allunyat de la costa, estació de Santa Elena, aquestes velocitats es mantenen per sota dels 3 m s^{-1}, predominant valors horaris inferiors als 2 m s^{-1}.

Aquest resultat pot ser entès com coherent, ja que a causa dels efectes de fricció amb la superfície es pot produir una pèrdua d'energia i per tant les masses d'aire disminueixen llur velocitat. A més, també s'han de tenir en compte factors com l'intercanvi de moment amb capes superiors i la influència que exerceix el gradient de pressió imperant a cadascuna de les zones, a l'hora de poder justificar aquesta diferència de velocitats. Aquesta menor velocitat del vent a l'estació de Santa Elena, a més, també s'observa a les roses de vent representatives del període complet 2000-2007 (Figura 1).

Tanmateix, aquesta reducció no és constant al llarg de l'any, essent més intensa durant el període fred, ni entre els trams de la vall, essent més accentuada entre el tram intermedi i final que entre els trams costaner i intermedi. Prenent com a referència els valors màxims de velocitat, les diferències durant el període càlid entre l'estació de El Arenosillo i Còrdova són inferiors a 0,5 m s^{-1} mentre que entre Còrdova i Santa Elena oscil·len entre 1-2,5 m s^{-1}. En canvi, durant el període fred, les diferències s'incrementen a 1-1,5 m s^{-1} entre el primer i el segon trams, i a 1,5-2,5 m s^{-1} entre el segon i el tercer trams.

A més dels factors comentats anteriorment, una de les possibles causes a l'hora d'explicar aquesta elevada disminució de la intensitat del vent entre els trams intermedi i final podria justificar-se en el bloqueig que exerciria el refredament dels fluxos que es produiria a la part alta de la vall, i indicaria que la massa d'aire, que flueix vall amunt des de l'àrea mitja, ascendiria sobre l'aire estancat més fred, que actuaria com a falca. Tanmateix, aquesta possible explicació suposaria que la massa d'aire no seria la mateixa i que, per tant, no existiria circulació vall amunt arribant a aquesta estació, produint-se d'aquesta manera una situació de bloqueig a la part alta de la vall.

Així mateix, i motivat per la localització dels valors màxims durant el període càlid de l'any, destaca el fet que a cadascun dels trams de la vall el rang de velocitats durant el període càlid de l'any és superior al que es registra durant el període fred, registrant les diferències més grans entre valors mínims i màxims diaris a l'estació de Còrdova, arribant als 3 m s^{-1} durant el període càlid respecte dels 1,5-2 m s^{-1} en el període fred. En canvi, a les estacions de El Arenosillo i Santa Elena aquestes diferències en qualsevol dels períodes no són superiors als 2 m s^{-1}.

Respecte de les diferències que s'aprecien entre les tipologies de masses d'aire destaca com durant el període càlid i fred, a l'estació de Santa Elena, la massa d'aire atlàntica llunyana registra velocitats més grans, amb diferències màximes de fins a 2 m s^{-1}, respecte de la tipologia atlàntica propera, que mostra intensitats mínimes durant la primera meitat del dia. Així mateix, durant el període fred, les masses d'aire atlàntiques presenten intensitats màximes inferiors a les circulacions procedents d'Amèrica del Nord tant en el primer tram de la vall com en el segon.

3.6 Gradients horitzontals

Amb la finalitat de conèixer la variació espacial que experimenten la temperatura potencial, la humitat específica i la velocitat del vent entre els diferents trams de la vall, s'ha calculat el rang de variació que experimenten cada 100 km considerant conjuntament els tres tipus de masses d'aire (Taula 2). Aquesta unió de resultats es deu a l'escassa diferència existent entre els resultats obtinguts per a cada tipologia de massa d'aire. Aquests gradients han estat calculats a partir de les diferències entre els valors màxims diaris que es registren a cadascun dels emplaçaments per al període càlid i fred de l'any.

D'aquests resultats es pot extreure com està pràcticament generalitzada la pèrdua progressiva de les propietats termodinàmiques de les masses d'aire a mesura que s'avança vall endins (gradient negatiu), sent aquestes més grans en el segon dels trams, fet possiblement associat a la major diferència entre les seves característiques topogràfiques, d'usos del sòl o cobertura vegetal. Aques-

ta generalitat no s'observa en la variació espacial de la temperatura potencial en el primer tram +(2,5-3 K), podent associar-se a les ja comentades característiques topogràfiques de l'àrea on es troba Còrdova. En el cas concret de la temperatura potencial, les diferències entre dues estacions a diferents alçades només es poden associar a gradients horitzontals si l'aire està molt barrejat i això només ha de passar durant el període càlid a les hores centrals dels dia. Si no és així, és molt probable que bona part es deguin a gradients verticals, que poden ser molt importants en casos d'inversió tèrmica.

També s'observa una major variació de les propietats termodinàmiques durant el període càlid que durant el període fred, possiblement associat a la major homogeneïtat tèrmica que governa la vall en aquell període de l'any. Així, a tall d'exemple, al segon tram existeix una reducció a l'humitat específica de 5 g kg^{-1} en el període càlid mentre que en el fred aquest descens oscil·la entre 0,5 i 1 g kg^{-1}.

4 Conclusions

En aquest treball s'han estudiat les variacions que experimenten les propietats termodinàmiques de les masses d'aire procedents de l'oest al llarg de la vall del Guadalquivir. A partir d'un conjunt de trajectòries calculades mitjançant el model HYSPLIT s'han extret aquelles circulacions amb una clara procedència de l'oest, com són la tipologia est d'Amèrica del Nord, de la zona més occidental de l'Atlàntic i d'una àrea més propera a la Península Ibèrica. D'entre elles, són les atlàntiques llunyanes (25%) les que presenten una major freqüència de ser detectades per igual en els diferents trams de la vall seguides de les atlàntiques properes (15%) i nord-americanes (9%).

Quan es tenen escenaris meteorològics que afavoreixen l'arribada sobre la vall dels tres tipus de massa considerats, durant els mesos d'hivern es produeix un descens al llarg de la vall de la seva temperatura potencial (3-4 K), humitat específica (1 g kg^{-1}) i velocitat de desplaçament. És a dir, són més fredes, menys humides i dispersives. En canvi, durant els mesos d'estiu, les masses d'aire augmenten la seva temperatura potencial (5-6 K) i disminueixen la seva humitat (8 g kg^{-1}) i velocitat.

Tant a l'estiu com a l'hivern, quan aquest tipus de masses d'aire són detectades a la vall del Guadalquivir, les substàncies primàries que es troben immerses en elles tindran una menor tendència a la dispersió a mesura que es traslladen cap a l'interior de la vall. Tanmateix, durant els mesos d'estiu i majoritàriament les substàncies secundàries, podrien presentar majors concentracions quan es traslladen cap a l'interior, ja que en augmentar la temperatura i disminuir tant la humitat específica com la velocitat de les masses d'aire que les transporten, s'afavoriran les reaccions fotoquímiques i la seva acumulació a les capes més baixes de l'atmosfera.

Per tot això, els resultats obtinguts en aquest treball tenen com a objectiu convertir-se en una font d'informació útil que ajudi en la interpretació dels problemes atmosfèrics i de qualitat de l'aire en aquesta regió. A més, la metodologia aplicada pot ser utilitzada en altres àrees de característiques topogràfiques semblants.

Agraïments. Els autors del treball volen agrair l'ajuda i col·laboració de la NOAA, en concret l'*Air Resources Laboratory* (ARL), i molt especialment del Dr. Ariel Stein. També agraïm el suport i l'interès de la Conselleria de Medi Ambient de la Junta d'Andalusia en els treballs realitzats per aquest grup i a l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) la possibilitat d'utilitzar les seves bases de dades.

Referències

Adame, J. A., Lozano, A., Bolívar, J. P., De la Morena, B., Contreras, J., i Godoy, F., 2008: *Behaviour, distribution and variability of surface ozone at an arid region in the South of Iberian Peninsula (Seville, Spain)*, Chemosphere, **70**, 841–849.

Adame, J. A., Serrano, E., Bolívar, J. P., i De la Morena, B., 2010: *On the tropospheric ozone variations in a coastal area of the southwestern Europe under mesoscale circulation*, J Appl Meteorol Climatol, **49**, 748–759.

Davis, R., Normile, C., Sitka, L., Hondula, D., Knight, D., Gawtry, S., i Stenger, P., 2010: *A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability*, Atmos Environ, **44**, 64–74.

Draxler, R. R. i Hess, G. D., 1998: *An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition*, Australian Meteorology Magazine, **47**, 295–308.

Draxler, R. R., Stunder, B., Rolph, G., i Taylor, A., 2009: HYSPLIT-4 User's Guide, NOAA Air Resources Laboratory.

Evtyugina, M. G., Nunes, T., Pio, C., i Costa, C. S., 2006: *Photochemical pollution Ander sea breeze conditions, during summer, at Portuguese West Coast*, Atmos Environ, **40**, 6277–6293.

Hernández-Ceballos, M. A., Adame, J. A., Bolívar, J. P., i De la Morena, B., 2010a: *The climatology of air masses in southwestern Europe from 1997 to 2007*, Int J Climatol, p. Submitted.

Hernández-Ceballos, M. A., García-Mozo, H., Adame, J. A., Domínguez-Vilches, E., De la Morena, B., Bolívar, J. P., i Galán, C., 2010b: *Synoptic and meteorological characterization of olive pollen transport in Crdoba province (South-western Spain)*, Int J Biometeorol, pp. doi: 10.1007/s00 484–010–0306–4.

Hondura, D., Sitka, L., Davis, R., Knight, D., Gawtry, S., Deaton, M., Lee, T., Normile, C., i Stenger, P., 2010: *A back-trajectory and air mass climatology for the Northern Shenandoah Valley, USA*, Int J Climatol, **30**, 569–581.

Jorba, O., Pérez, C., Rocandenbosch, F., i Baldasano, J., 2004: *Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002*, J Appl Meteorol, **43**, 887–901.

Millán, M. M., Salvador, R., Mantilla, E., i Kallos, G., 1997: *Photooxidant dynamics in the Mediterranean basin in summer: Results from European research projects*, J Geophys Res, **102**, 8811–8823.

Querol, X., Alastuey, A., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Plana, F., i Ruiz, C., 2002: *Source apportionment analysis of atmospheric particulares in an industrialised urban site in southwestern Spain*, Atmos Environ, **36**, 3113–3125.

Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., i Kakaliagou, O., 2001: *Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain*, Atmos Environ, **35**, 2433–2447.

Shan, W. P., Yin, Y. Q., Lu, H. X., i Liang, S. X., 2009: *A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data*, Atmos Res, **93**, 767–776.

Stohl, A., 1998: *Computation, accuracy and applications of trajectories - A review and bibliography*, Atmos Environ, **32**, 947–966.

Stunder, B., 1996: *An assessment of the Quality of Forecast Trajectories*, J Appl Meteorol, **35**, 1319–1331.

Toledano, C., Cachorro, V. E., de Frutos, A. M., Torres, B., Berjon, A., Sorribas, M., i Stone, R. S., 2009: *Airmass classification and Analysis of Aerosols Types at El Arenosillo*, J Appl Meteorol Climatol, **48**, 962–981.

Warneke, G., 1997: Meteorologie und Umwelt, Springer, Berlin.