



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

La modelización meteorológica como herramienta necesaria para los estudios de calidad del aire: caso del valle del Guadalquivir.

Autor: Miguel Angel Hernandez Ceballos

Institución: Universidad de Huelva

e-mail: hernandezma@inta.es

Otros Autores: José Antonio Adame (Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”, Área de Instrumentación e Investigación de la Atmósfera. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)) ; Juan Pedro Bolívar (Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva); Benito A. De la Morena (Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”, Área de Instrumentación e Investigación de la Atmósfera. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA))

RESUMEN

En la actualidad existe una elevada preocupación social sobre la calidad del aire, debido al deterioro que ésta sufre por las intensas emisiones que se producen mayoritariamente en las zonas urbanas e industriales. La aplicación de medidas de mejora y control de la calidad del aire hace necesario un conocimiento previo de los procesos tanto contaminantes como atmosféricos. La interpretación de la evolución espacial y temporal que presenta la contaminación atmosférica se debe realizar con ayuda de una extensa y detallada información meteorológica. Por tanto, los estudios meteorológicos y de calidad del aire deben estar fuertemente relacionados. En general los estudios meteorológicos se realizan con la información proporcionada por las estaciones meteorológicas de medida, sin embargo, la limitación en su representatividad espacial y la necesidad de conocer con mayor detalle el establecimiento y evolución de los diferentes fenómenos atmosféricos han hecho necesaria la utilización de modelos meteorológicos que permiten disponer de información en zonas donde no existen estaciones. La existencia de fuentes de emisión de sustancias, tanto de origen natural como antropogénica en la parte occidental de Andalucía, han producido en los últimos años eventos de contaminación atmosférica de diferente índole, los cuales son objeto de investigación. Estos hechos hacen necesario disponer de una óptima caracterización meteorológica de la región que permita analizar e interpretar la variabilidad espacial y temporal de los parámetros de calidad del aire de interés especial, como pudieran ser los aerosoles, pólenes y ozono superficial. En este trabajo se presenta la caracterización meteorológica que se está realizando en el valle del Guadalquivir con la información procedente tanto de observaciones (estaciones meteorológicas) como de modelos meteorológicos de mesoescala. Inicialmente, el tratamiento de la base de datos meteorológica, así como el estudio y clasificación de las masas de aire incidentes sobre la región, utilizando el modelo HYSPLIT, ha permitido definir una serie de escenarios meteorológicos típicos. Después de llevar a cabo una serie de trabajos de sensibilidad y validación del modelo de mesoescala WRF-ARW, se ha aplicado éste a periodos representativos de cada uno de los escenarios meteorológicos identificados, con el objetivo de mejorar el conocimiento de los procesos de la baja atmósfera sobre esta región de estudio.

Palabras Clave: Calidad ambiental; Meteorología; Modelización; HYSPLIT; WRF

1. INTRODUCCIÓN.

La creciente preocupación social sobre temas relacionados con la calidad ambiental, y la estrecha vinculación existente entre ésta y la dinámica atmosférica, hace que cada vez sea más necesario disponer de una extensa y detallada información meteorológica que permita interpretar la evolución temporal y espacial de las concentraciones de contaminantes presentes en la atmósfera, tanto procedentes de emisiones antropogénicas como biogénicas. Por este motivo, a la hora de abordar un estudio sobre la calidad ambiental de una zona determinada, es necesario caracterizar previamente las condiciones meteorológicas que la gobiernan (Atkinson, 1989; Stull, 1989; Barry and Chorley, 1992;; Garrat, 1992)

Históricamente, la caracterización meteorológica de un área se ha realizado en base a las observaciones de estaciones meteorológicas pertenecientes a redes de medida. Además, a esta información de superficie hay que añadir la obtenida gracias a la realización de sondeos meteorológicos, ya sean cautivos o libres, aunque los puntos donde se realizan sondeos son muy escasos.

Debido a la imposibilidad de disponer de estaciones de medida que abarquen la extensión total de un territorio, ha hecho necesario la progresiva implantación e utilización de los modelos meteorológicos de predicción (WPS, Weather Prediction System). Éstos permiten trabajar con resoluciones espaciales que proporcionan una información detallada de las características meteorológicas de un área, así como asimilan y tratan una gran cantidad de información meteorológica a la hora de realizar predicciones.

No obstante, la información proporcionada por los modelos necesita las observaciones meteorológicas debido a que éstas son necesarias para validar la información pronosticada por ellos. Por este motivo, la disponibilidad de una base de datos meteorológica fiable es indispensable, ya que permite conocer el grado de fiabilidad de la información pronosticada por el modelo. Además, mediante un análisis de sensibilidad, se debe configurar el modelo, de tal forma que sus resultados sean lo más representativos de la realidad meteorológica del área objeto de estudio (Pielke, 2002; Kalnay, 2003).

La zona occidental de Andalucía es un claro ejemplo entre la relación que se establece entre las condiciones meteorológicas y la dinámica de contaminantes. La presencia del valle del Guadalquivir actuando como canal natural de transporte de masas de aire desde la costa atlántica hacia el interior de la región, en combinación con la presencia de importantes fuentes de emisión de sustancias, tanto de origen natural (Parque Nacional de Doñana, Sierra Norte de Sevilla, Valle de los Pedroches) como antropogénico (polo industrial de Huelva, las ciudades de Sevilla o Córdoba), hacen de esta región un escenario ideal para la ocurrencia de eventos de contaminación atmosférica. Muestra de ello son los diversos estudios realizados con el fin de establecer las características de los procesos de contaminación atmosférica, tanto por ozono superficial (Adame et al., 2008; 2010) como por material particulado (Rodríguez et al., 2001; Querol et al., 2002) que se desarrollan sobre ella.

Teniendo en cuenta las especiales características de esta zona, este trabajo presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos en la caracterización meteorológica de mesoescala que se está llevando a cabo sobre Andalucía occidental, fundamentada tanto

en la utilización de observaciones meteorológicas de superficie y altura como la generada por modelos meteorológicos.

En una primera fase el objetivo se ha centrado en la creación de una base de datos meteorológica, así como en la identificación de escenarios meteorológicos típicos. Se ha realizado un exhaustivo proceso de selección de estaciones meteorológicas con las que conformar la base de datos meteorológica, lo cual ha permitido obtener una primera visión general sobre el régimen de vientos existente en la región. Posteriormente, utilizando el modelo de dispersión Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) se ha realizado un estudio y clasificación de las masas de aire incidentes sobre la región, mediante el empleo de retro-trayectorias, a partir de las cuales se han podido identificar aquellas configuraciones sinópticas más relevantes.

Una vez definidos los escenarios meteorológicos, se han llevado a cabo trabajos de validación del modelo de mesoescala que se iba a emplear, Weather Research and Forecast (WRF-ARW). Tras el proceso de validación se tiene una óptima parametrización del modelo, la cual permite, la simulación de jornadas representativas de cada uno de los escenarios meteorológicos identificados. Con ello se pretende mejorar el conocimiento sobre los procesos de la baja atmósfera que se desarrollan sobre Andalucía occidental.

Por todo ello, los resultados obtenidos en este trabajo tienen como objetivo convertirse en una herramienta que ayude en la interpretación de los problemas atmosféricos y de calidad del aire en esta región. Además, la metodología aplicada puede ser extrapolable a otras áreas de interés, como pudiera ser la región oriental de Andalucía, en la cual se pretende centrar nuestra futura investigación.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS.

El área de estudio de este trabajo es Andalucía occidental, región situada al sudoeste de la Península Ibérica. Esta región presenta una orografía caracterizada por la presencia del valle del Guadalquivir actuando como abertura natural al océano Atlántico y como eje transversal de la región al recorrer las provincias de Jaén, Córdoba, Sevilla, Huelva y Cádiz. Éste posee un área triangular de superficie aproximada de 35.000 km² orientada en la dirección SW-NE, perfectamente delimitada por Sierra Morena al norte y por los sistemas Béticos al sur (Figura 1).

Esta configuración del relieve provoca una mayor influencia del océano Atlántico sobre las condiciones meteorológicas del territorio, debido a su apertura directa y a la posibilidad de transporte de masas de aire desde zonas costeras hacia el interior, favoreciéndose con ello el transporte de sustancias tanto de origen natural como antropogénico.



Figura 1. Área de estudio seleccionada.

2.1. Selección de emplazamientos.

La caracterización meteorológica del área de estudio se ha realizado utilizando la información disponible en la base de datos meteorológica denominada Subsistema de Información de Climatología Ambiental (CLIMA) (Corzo et al., 2005) (<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/WebClima>) gestionada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMAJA). Son varias las funciones principales que tiene esta base de datos, como son la de compilar la totalidad de información meteorológica generada en el territorio andaluz, aplicar controles de calidad para garantizar la óptima representatividad de cada variable registrada, así como la de favorecer la explotación de los datos.

Ante el gran número de redes de información meteorológica que la conforman, se hizo necesario realizar un proceso de selección con el propósito de utilizar una serie de estaciones representativas que permitan obtener la imagen meteorológica más completa de la región occidental de Andalucía. Tanto por el elevado número de emplazamientos como por la elevada disponibilidad temporal de datos meteorológicos, se seleccionaron inicialmente la totalidad de estaciones de medida pertenecientes tanto a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) como las de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). Ambas redes cumplen con las recomendaciones estipuladas por la Guía del Sistema Mundial de Proceso de Datos de la Organización Mundial de Meteorología (WMO-No.8, 1996), como estar situadas en lugares con libre circulación del aire y visibilidad en todas las direcciones, estar suficientemente alejados de obstáculos, edificaciones y árboles que interfieran en las medidas, estar localizada en terreno horizontal y con una cubierta vegetal propia de la zona de altura menor de 10cm, e instalada en recinto 10x10 m con vallado metálico que no impida la libre circulación del aire.

Una vez seleccionadas, de ambas redes, todas aquellas estaciones ubicadas en el interior del área de estudio, se dispuso inicialmente de 96 emplazamientos de medida. Para seleccionar aquellas estaciones que fueran representativas de la zona geográfica, se llevó a cabo un proceso de comparación de las series de datos horarios de dirección y velocidad de viento. De esta forma, se identificaron aquellos emplazamientos que no

muestran un patrón de vientos similar al observado en estaciones próximas, y que por tanto, no reflejan correctamente la dinámica de viento propia de la zona.

Para realizar este estudio se utilizaron diagramas polares, rosas de viento, tanto anual como estacional, a partir de los registros horarios de viento. Estas representaciones permiten mostrar las posibles diferencias y similitudes entre emplazamientos, respecto a su rango de direcciones principales e intensidades, aunque sin abordar su origen bórico.

Previamente, se llevó a cabo un proceso de validación de los registros meteorológicos. El cual tiene como objetivo homogeneizar a valores horarios las series de datos, puesto que en función del tipo de red se tiene una resolución temporal diferente. Así, se tienen registros cada diez minutos en las estaciones de AEMET y semihoraria en aquellas pertenecientes a la RIA. En las estaciones de la AEMET se exigió que cada promedio horario tuviera como base un mínimo de 5 datos diezminutales (75% de disponibilidad), mientras que en las estaciones de la RIA se exigió que cada promedio horario tuviera como base a ambos valores semihorarios (100% de disponibilidad).

Una vez calculadas las rosas de viento a partir de los valores horarios y posteriormente a su comparativa, se eliminaron aquellos emplazamientos en los que sus resultados no fueran coherentes tanto con los obtenidos en las estaciones próximas como acordes con lo esperado para la zona geográfica en la que se encontrasen ubicados.

Por último, y una vez eliminadas, con el propósito de que los resultados obtenidos fueran lo más representativos posibles, este proceso de selección culminó con la elección de aquellas estaciones que registrasen una cobertura de datos horarios superior al 75 % durante el periodo 2000-2007. Esta última reducción derivó, en que el conjunto final de emplazamientos de referencia estuviera formado por 35 estaciones (Figura 2).

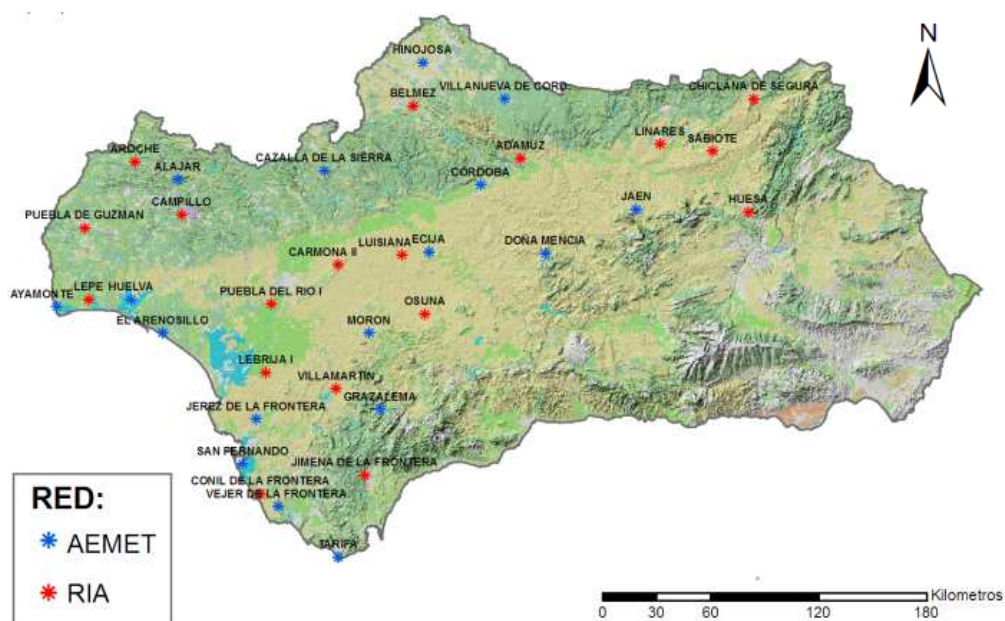


Figura 2. Conjunto de estaciones seleccionadas del binomio compuesto por las redes AEMET y RIA.

3. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y SELECCIÓN DE ESCENARIOS METEOROLÓGICOS.

Uno de los estudios que se han realizado con las observaciones meteorológicas de las estaciones seleccionadas, ha sido el análisis del campo de viento. Por ello, se ha considerado de interés presentar en esta sección la caracterización de la variabilidad espacial y temporal del campo de vientos para el periodo 2000-2007, utilizando los datos horarios. Además, se presenta la clasificación y caracterización del recorrido de las masas de aire incidentes sobre el área de estudio en el periodo 1997-2007, utilizando para ello el modelo HYSPLIT, a partir de la cual permite la identificación de los escenarios sinópticos.

3.1. Caracterización meteorológica: caso de estudio campo de vientos.

La caracterización de la dinámica atmosférica de superficie, campo de vientos, se ha realizado con las rosas de viento estacionales calculadas para la selección de emplazamientos. A la hora de analizar los resultados se debe tener en cuenta que i) la delimitación de cada periodo estacional ha sido establecida en diciembre-febrero para el invierno, marzo-abril para primavera, junio-agosto para verano y septiembre-noviembre para otoño, ii) para cada estación, el porcentaje de calmas fue calculado a partir de los valores horarios con velocidades menores o iguales a 1 m/s, no siendo utilizados posteriormente en el estudio de la frecuencia de direcciones, iii) con objeto de obtener un conocimiento más detallado de la frecuencia de ocurrencia de velocidades, se han establecido seis rangos de velocidad en cada dirección, con incrementos de 2 m/s en el rango entre 1 m/s y 11 m/s, siendo igual al empleado en Adame (2005).

A partir de los resultados obtenidos de la comparativa de las rosas de viento anual y estacional, se han identificado un total de 5 regiones en la que la dinámica de vientos presenta regímenes diferentes, aunque mostrando todos ellos rasgos comunes a la dinámica registrada en propio valle del Guadalquivir. Con ello se destaca la elevada influencia que éste ejerce sobre la dinámica atmosférica superficial de la región de estudio. Además, se ha identificado un conjunto de estaciones correspondientes a los emplazamientos más elevados de la región (Figura 3).

A continuación se presenta de forma breve las principales características que muestra el régimen de viento en las cinco regiones identificadas. El valle del Guadalquivir (Figura 3) es la región en la que el régimen de vientos se encuentra claramente condicionado a la propia orientación del valle (SW-NE), haciendo de esta forma que la combinación de direcciones privilegiadas sea del SW-NE. Sin embargo, dentro de esta homogeneidad se identifica claramente la existencia de un ciclo estacional del régimen de vientos. En invierno se establece una circulación dominante de vientos valle abajo, predominando en todas las estaciones un rango de flujos NNE-NEE. Por su parte, durante la primavera se produce un cambio en la dirección de vientos predominantes a lo largo del valle, estableciéndose un mayor registro de flujos de componente SW, pasando a tener un rol secundario la entrada en el rango NNE-NEE. Durante el periodo estival se completa el giro iniciado en primavera, registrándose un predominio total en la entrada de vientos de componente SW, mientras que en el otoño vuelve a registrarse una entrada similar de viento procedente tanto del primer como del tercer cuadrante.

Otra zona identificada es la correspondiente al Sistema Bético (Figura 3), en la cual su dinámica presenta ciertos paralelismos con la observada en el valle, aunque combinándose con la entrada de vientos no acordes con la orientación del mismo. Como ejemplo de este tipo de dinámica se encuentra la estación de Osuna. En ella durante el invierno predomina la entrada de viento del SE, incrementándose durante el periodo estival la influencia de la dinámica del valle al registrarse la entrada de flujos de componente SW-W, aunque siempre permaneciendo constante la entrada de viento del SE.

Una tercera zona ha sido definida en el entorno de Sierra Morena (Figura 3), en la cual, el conjunto de estaciones poseen un régimen de vientos caracterizado por una entrada de masas de aire de componente S variable en frecuencia a lo largo del año. Pese a esta generalidad, dentro de esta zona, motivado por la compleja orografía en la que se encuentran enclavadas, es posible realizar una subdivisión en tres zonas atendiendo a los resultados estacionales obtenidos. Una primera situada en la zona norte de la provincia de Córdoba destaca por presentar una entrada de flujos del NW permanente a lo largo del año de intensidad variable, combinada con una dinámica de vientos con procedencia del SW más frecuente a partir de primavera. Una segunda localizada en el norte de la provincia de Huelva en la que se registra una entrada constante de flujos de componente SE-E durante todo el periodo, combinada con una variación estacional en los vientos NW. Por último, en la zona central se observan rasgos direccionales característicos de ambas dinámicas, presentando una entrada constante de vientos de componente E junto con flujos del SW.

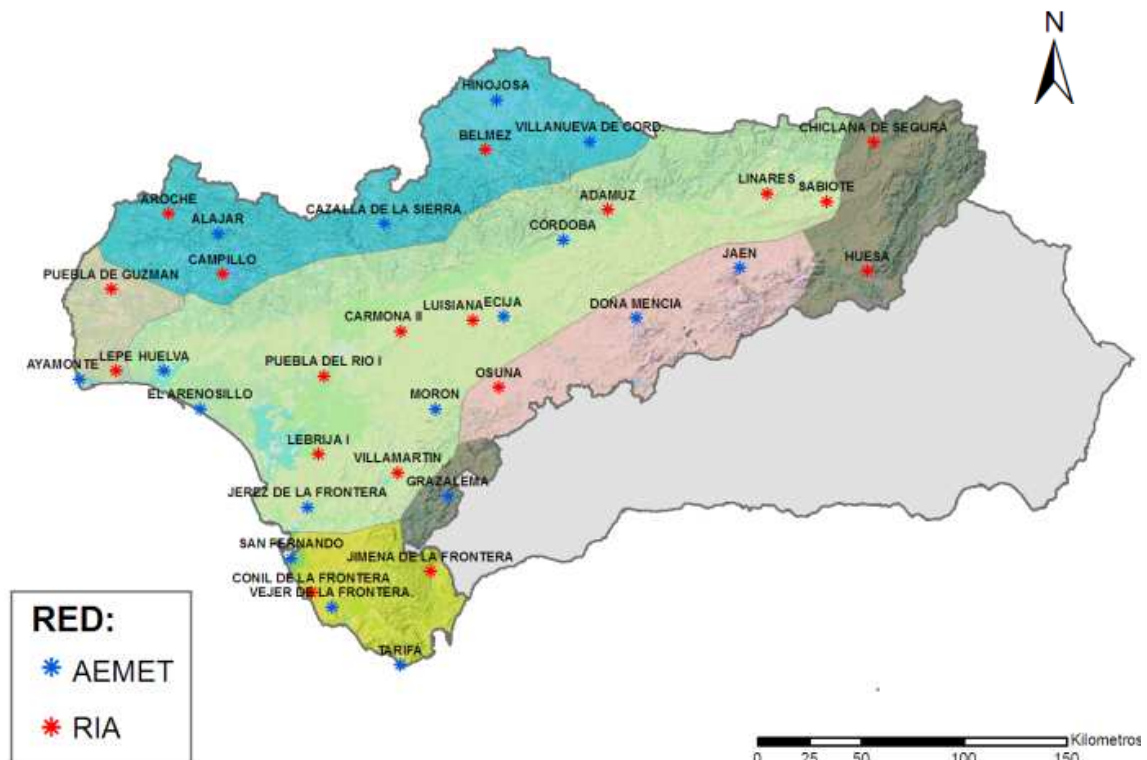


Figura 3. Áreas geográficas de Andalucía occidental en función del campo de vientos.

Al igual que ocurre en el valle del Guadalquivir, la zona localizada en el estrecho de Gibraltar (Figura 3) presenta un régimen de claramente condicionado por su orografía, favoreciendo la canalización y aceleración de los vientos, y por ser un punto de conexión entre dos masas de agua de diferentes características térmicas, océano Atlántico y mar Mediterráneo. De esta forma se establece un claro binómico en el régimen de vientos a lo largo del eje W-E, apreciándose la existencia de una evolución estacional tomando como referencia la entrada de viento de poniente.

Durante el invierno y el otoño se produce una menor incidencia en la entrada de vientos de poniente llegando a alcanzar una intensidad similar a los vientos del este. Sin embargo, durante el periodo central del año se alcanza una mayor persistencia en la entrada de flujos atlánticos, llegándose a equiparar en algunos emplazamientos a la frecuencia de vientos del este.

La dinámica de vientos en la zona occidental de la provincia de Huelva (Figura 3) se encuentra condicionada por la combinación de dos factores orográficos, la propia orientación W-E de la costa y la presencia de la sierra de Aracena y Picos de Aroche al norte unido a la ausencia de barreras orográficas en la zona del Algarbe y bajo Alentejo Portugués al oeste (Figura 3.1). Ante esta disposición orográfica el régimen de vientos que se observa en esta área presenta una combinación de vientos del SW con entrada de flujos del NW, siendo más persistente e intensa la componente NW.

Durante el invierno se registra una mínima entrada de vientos de componente S, predominando flujos del NW/N. En la primavera se observa una mayor entrada de flujos del suroeste permaneciendo similar la ocurrencia de vientos del NW/N. Éste se combina con un mayor incremento en el registro de la componente marítima del SW durante el verano. Durante el periodo otoñal periodo de forma general se vuelven a registrar valores similares a los obtenidos durante la primavera. Por último, se observa un descenso general en la frecuencia de vientos del NW, acompañado de un descenso en la entrada de vientos de componente SW.

Por último, se han identificado un grupo de estaciones, denominadas de altura (Figura 3 en las que la dinámica del viento se caracteriza por ser prácticamente estática a lo largo del año, y por tanto, no registran variabilidad estacional alguna.

3.2. Caracterización de masas de aire.

En la actualidad se puede conocer el recorrido que ha realizado una masa de aire, gracias a la utilización de modelos meteorológicos. Al recorrido previo que ha realizado la masa de aire, antes de llegar a un determinado emplazamiento es a lo que se denomina retro-trayectoria. Su cálculo permite un mejor conocimiento sobre las características generales del conjunto de las masas de aire que afectan a un área, tales como su origen, tipo de recorrido o altura de circulación (Miller, 1981, Jorba et al., 2004). Considerando este amplio conjunto de información que proporciona, se ha calculado una retrotrayectoria diaria, durante un periodo de once años comprendido entre 1997 y 2007, tomando como referencia la estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”. De esta

forma se puede realizar una clasificación y posterior caracterización del conjunto de masas de aire incidentes sobre la costa Atlántica andaluza, Golfo de Cádiz, A su vez, esta información permitirá definir las situaciones sinópticas típicas de esta región.

3.2.1 Metodología.

Como se ha mencionado, se ha calculado una trayectoria diaria (12 UTC) con un recorrido previo de cinco días (120 horas), representativo de desplazamiento de origen sinóptico, y por tanto, válido en la posterior identificación de los escenarios sinópticos asociados a cada tipología identificada. Con el fin de conocer el tipo de masas de aire que circulan en la Capa Límite Planetaria (PBL) y en la troposfera libre de forma simultánea, se calcularon trayectorias en tres alturas diferentes: 500 m (interior de la PBL), 1500 m (en el límite superior de la PBL) y 3000 m (en la troposfera libre).

El modelo “Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory”, version 4 (HYSPLIT) desarrollado por la NOAA’s Air Resources Laboratory (ARL) ([Draxler and Hess, 1998](#); [Draxler et al., 2009](#)) ha sido utilizado para el cálculo de las retro-trayectorias diarias al ser un modelo ampliamente utilizado en investigaciones científicas en la que se utilizan masas de aire ([Weiss-Penzias et al., 2004](#); [Lyamani et al., 2006](#); [Yu et al., 2009](#)). Como información de entrada han sido empleados los ficheros meteorológicos FNL y GDAS (Global Data Analysis System) generados y mantenidos por el propio laboratorio ARL. Así mismo, cada una de las retro-trayectorias cinemáticas (3D) fueron calculadas utilizando un modelo vertical de desplazamiento, permitiendo disponer de una mayor exactitud en el cálculo del recorrido realizado por una masa de aire, frente a otros métodos de cálculo, como el isobárico o el isentrópico ([Stohl., 1998](#)).

Una vez calculadas el conjunto total de trayectorias para cada nivel, a la hora de extraer los patrones de circulación que caracterizan a cada conjunto, se aplican técnicas estadísticas que permiten la agrupación de aquellas trayectorias similares en diferentes grupos, denominados clusters. De esta forma, cada cluster está formado por trayectorias que presentan un recorrido similar y por tanto, cada uno de ellos define un patrón de circulación. Se define el centroide o centro de cluster como el promedio de todas las trayectorias que están incluidas en dicho cluster.

El modelo HYSPLIT dispone de una herramienta de agrupación basada en las variaciones tanto de la varianza total entre cluster (TSV, Total Spatial Variance) como de la varianza entre cada uno de los elementos que los componen (SPVAR, Spatial Variance) ([Draxler et al., 2009](#)). El primer índice aporta información sobre el grado de similitud (disimilitud) que existe entre los distintos grupos o clusters que se forman, mientras que el segundo indica el nivel de semejanza (diferencia) interna que existe entre los elementos que forman cada uno de los grupos formados.

El proceso de agrupación se inicia con un número inicial de trayectorias individuales y finaliza con la creación de un único cluster que agrupa a todas ellas, uniéndose en cada una de las etapas aquellos dos elementos que provoquen el mínimo incremento de los índices TSV y SPVAR. Esta variación porcentual se irá incrementando conforme el número de clusters se vaya reduciendo, al tener que unirse cada vez grupos menos similares entre sí.

El modelo HYSPLIT proporciona información sobre la variación porcentual que experimenta el índice TSV en cada etapa del proceso respecto a la anterior, siendo utilizada esta variación en la definición del número de cluster óptimo (Stunder, 1996), que es aquel que representa el número de patrones de circulación que mejor resumen la variabilidad existente dentro de un conjunto inicial de trayectorias. La forma de seleccionar este número óptimo de clusters es fijar una variación porcentual del índice TSV límite, de tal forma que el número óptimo corresponderá a aquella etapa en la que primero se supere este valor umbral. En este trabajo, considerando el conjunto de resultados obtenidos en Stunder (1996) así como los estudios realizados en la zona (Toledano et al, 2009) ha sido impuesto un valor límite del índice TSV del 40 % con el objetivo de evitar que la unión de dos clusters muy diferentes entre sí provoque una pérdida de información considerable en el desarrollo del trabajo.

3.2.2. Validación de ficheros meteorológicos FNL-GDAS.

Con el propósito de validar la información meteorológica contenida en los ficheros de entrada utilizados en este trabajo, FNL y GDAS, y de esta forma estimar el posible nivel de error asociado al cálculo del recorrido de cada una de las trayectoria, se ha realizado un estudio comparativo entre esta información meteorológica de partida y la obtenida de 45 sondeos meteorológicos lanzados en El Arenosillo. Este proceso se consideró necesario debido a que la resolución espacial de los propios datos podría afectar al proceso de interpolación empleado en el cálculo de las retro-trayectorias. De esta forma, fueron comparados los datos de dirección y velocidad del viento en cuatro niveles (200 m, 800 m, 1500 m y 3000 m) así como la totalidad de los perfiles verticales de temperatura.

Los resultados obtenidos de este estudio comparativo, ponen de manifiesto la fiabilidad de la información meteorológica contenida en los ficheros FNL-GDAS, y por tanto se garantiza una óptima representatividad en la llegada de masas de aire sobre el Golfo de Cádiz.

3.2.3. Evolución interanual y definición de regiones de procedencia.

Se han calculado un total de 3930 trayectorias diarias en cada uno de los tres niveles, obteniéndose un 98 % de disponibilidad durante el periodo completo de 1997- 2007. Por otro lado, es bien conocido que en esta zona costera en los meses de primavera y verano fundamentalmente, la dinámica atmosférica de la baja atmósfera viene gobernada por circulaciones de mesoescala. En estudios previos (Adame et al., 2010) a partir de los registros horarios de dirección y velocidad del viento registrados en la estación costera de El Arenosillo se han identificado y contabilizado los períodos en los cuales se desarrollan brisas costeras sobre la costa atlántica andaluza. Debido a la resolución espacial de los ficheros meteorológicos de entrada utilizados (190 - 111 km), el modelo HYSPLIT no puede reproducir estas situaciones de mesoescala. Por este motivo y con el fin de evitar una distorsión de los resultados obtenidos, se ha procedido a la eliminación de aquellas trayectorias pertenecientes a períodos en las que se detectó el establecimiento y desarrollo de circulaciones de brisa sobre la zona de estudio. Aplicando este criterio, se

produce una reducción en el número de trayectorias superior al 18 % para cada uno de los años, utilizándose finalmente un total de 2942 trayectorias.

Para cada año, aplicando la metodología comentada anteriormente, se obtuvieron los gráficos representativos del desplazamiento de cada centro de cluster. La Figura 4 muestra como ejemplo los resultados obtenidos a 500 m, 1500 m y 3000 m en el año 2000. En ella aparecen representado tanto la evolución promedio en la horizontal como en la vertical, así como el porcentaje de ocurrencia de cada tipología de masa de aire durante el periodo de tiempo considerado.

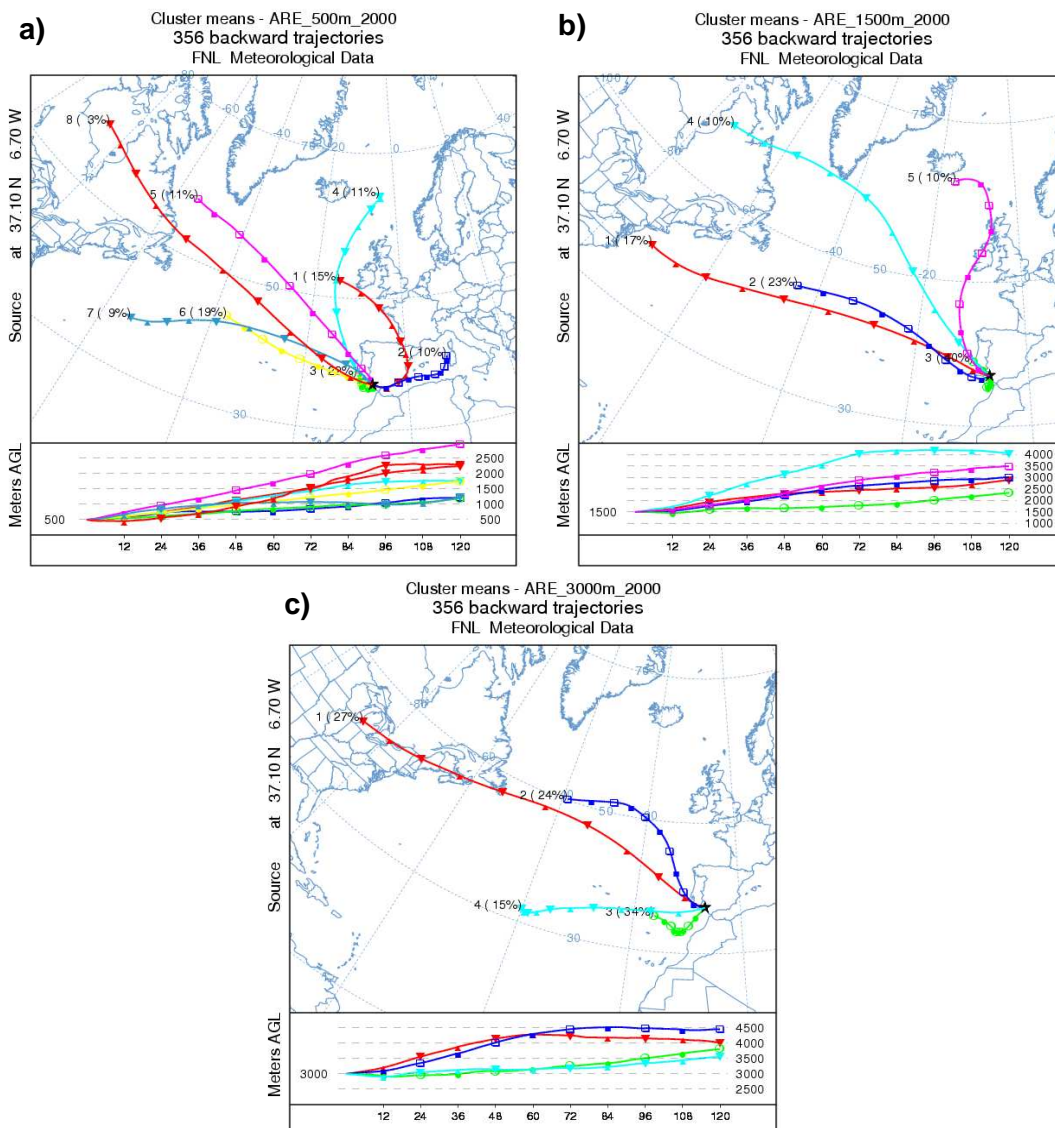


Figura 4. Centroides obtenidos a partir del análisis cluster en a) 500 m, b) 1500 m y c) 3000 m sobre el Arenosillo durante el año 2000. Los números que aparecen en cada gráfico representan tanto el porcentaje de ocurrencia de ese conjunto de trayectorias durante este periodo así como el número identificativo de cada centroide.

De esta forma, a partir de la observación de los resultados anuales, se ha podido establecer una clasificación de ocho regiones de procedencia principales de masas de aire, válida para cada una de las alturas. Estas regiones son zonas representativas de la localización de la masa de aire 120 horas antes de incidir sobre el golfo de Cádiz. Sin embargo, debido al alto rango latitudinal y longitudinal de algunas de esas regiones, se ha considerado oportuno crear una serie de subgrupos, estableciéndose finalmente 13 regiones de procedencia, representativas de otros tantos tipos de masas de aire que inciden sobre el golfo de Cádiz durante el periodo 1997-2007 (Figura 5).

El tipo Mediterráneo tiene una presencia constante en 500 m reduciéndose progresivamente su detección en niveles, estando en consonancia esta evolución con la altura a las propias características térmicas del mar Mediterráneo, capaz de generar flujos principalmente perceptibles a 500 m pero no en alturas superiores. Otro ejemplo de esta dependencia con la altura, pero en este caso alcanzando un mayor desarrollo vertical es el tipo de masas de aire locales, las cuales poseen un elevado y similar porcentaje de ocurrencia en los primeros dos niveles.

En el extremo opuesto a este tipo de masas de aire se encuentran aquellas procedentes del norte de África, que debido a la naturaleza desértica de su origen, son inyectadas en niveles altos al ser capaz su región fuente de crear flujos convectivos intensos y, por tanto, están asociadas a una mayor identificación en niveles superiores, como 1500 m y 3000 m. Un comportamiento similar con la altura, fue detectado en aquellas circulaciones procedentes del suroeste, poseyendo un elevado porcentaje de ocurrencia en el nivel de 3000 m en comparación con el resto de niveles.

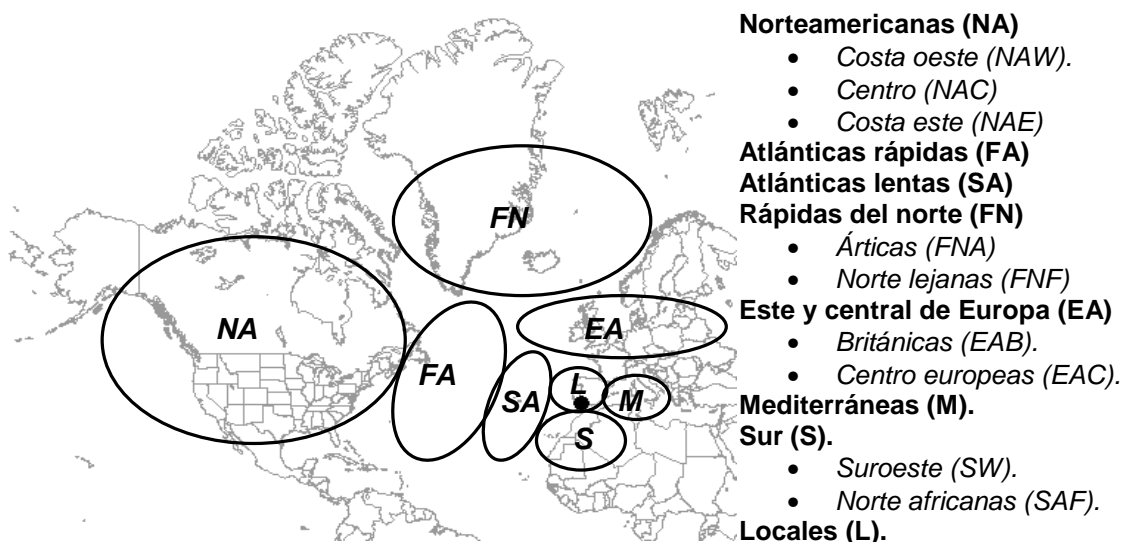


Figura 5. Identificación de las ocho regiones fuente principales de masas de aire incidentes sobre el suroeste de la Península Ibérica y nomenclatura de cada uno de los tipos de masas de aire identificadas a 500 m, 1500 m y 3000 m.

Esta dependencia entre el tipo de fuente y la altura también es observada en las masas de aire procedentes de fuentes frías. Aquellas con un procedencia de latitudes más altas (Árticas) sólo son detectadas en el nivel de 500 m, debido a la escasa intensidad convectiva generada en sus regiones fuente, mientras que aquellas en las que su origen es marino o continental y proceden de latitudes más bajas son identificadas en todos los niveles y en la mayoría de los años, aunque con un mayor porcentaje en el nivel de 500 m decreciendo en altura hasta solo ser identificadas en cuatro años en 3000 m.

Un claro origen continental se encuentra asociado a las procedentes del centro de Europa, siendo únicamente detectadas en 500 m, mientras que aquellas trayectorias procedentes del entorno de las Islas Británicas experimentan un incremento en el nivel de 3000 m respecto a los primeros niveles.

Además de la naturaleza de la fuente, la circulación zonal del oeste es un factor influyente en la variación porcentual de la ocurrencia de las masas de aire sobre el suroeste de la Península Ibérica, ya que un incremento en la altura de referencia, está asociado a un incremento en el recorrido realizado por las circulaciones procedentes del oeste. De esta forma, una mayor ocurrencia del conjunto de masas de aire procedentes de Norteamérica y del Atlántico se ha observado al incrementarse la altura de 500 m a 3000 m. En general, estas circulaciones alcanzan su mayor ocurrencia, en términos globales, en el nivel de 3000 m.

4. MODELIZACIÓN METEOROLÓGICA.

A partir de la identificación de las diferentes masas de aire y de su ocurrencia sobre la zona de estudio, se pueden identificar los escenarios sinópticos que caracterizan la región. Además, con la ayuda de estudios previos también se pueden identificar los procesos de mesoescala. La siguiente fase de la investigación ha consistido en aplicar un modelo meteorológico de mesoescala para cada uno de los escenarios meteorológicos típicos ya sean gobernados por la escala sinóptica o la mesoescala.

Dentro del amplio rango de posibles modelos meteorológicos existentes en la actualidad, teniendo en cuenta la cobertura espacial del área sobre el que se va a ejecutar (Andalucía occidental) así como los tipos de fenómeno atmosféricos a caracterizar, se ha optado por utilizar aquellos denominados de mesoescala, los cuales pueden definirse como aquel modelo cuya resolución horizontal y vertical es suficiente para pronosticar el desarrollo de fenómenos meteorológicos de mesoescala. Dentro de este grupo, por incorporar los últimos avances en modelización mesoescalar y por su progresiva implantación como modelo de referencia en la comunidad científica mundial en estudios de investigación atmosférica ([Kumar et al., 2008](#); [Challa et al., 2009](#); [Jiménez et al., 2010](#)), se ha utilizado para este trabajo el modelo de investigación y previsión del tiempo Weather Research and Forecasting (WRF-ARW) ([Skamarock et al, 2008](#)).

Este modelo se caracteriza por ser un modelo totalmente compresible y no-hidrostático (con opción hidrostática), en el que se utilizan las coordenadas sigma como coordenadas verticales y la malla Arakawa-C en la discretización horizontal, además de incluir la capacidad de trabajar con anidamientos múltiples.

4.1. Estudio de sensibilidad.

A la hora de trabajar con modelos meteorológicos existe un elevado número de posibles configuraciones de simulación (tipo de anidamientos entre dominios, parametrizaciones empleadas,...) que se dejan a la elección del usuario, con el objetivo de adecuar el modelo a las características de la región y de los fenómenos meteorológicos a estudiar. De esta forma, no existe una configuración de trabajo válida para ser empleada en cualquier región y para el análisis de cualquier fenómeno atmosférico, por lo que previamente a su aplicación es necesario realizar un trabajo de validación de los resultados obtenidos, con el fin de obtener una adecuada configuración de modelo

A este trabajo previo, que permite configurar el modelo, de forma que los resultados pronosticados sean los más representativos posibles de la realidad meteorológica, se le denomina estudio de sensibilidad. Este tipo de estudios, por su propia naturaleza, permiten investigar sobre el comportamiento que experimenta el modelo frente a cambios en su configuración de trabajo y por tanto, posibilitan conocer la física interna que gobierna el comportamiento de los diferentes parámetros modificados.

Para llevar a cabo este tipo de estudios de sensibilidad, es aconsejable utilizar información meteorológica tanto de superficie (proporcionada por las estaciones meteorológica) como en altura (proporcionada por sondeos meteorológicos). En el caso que se presenta se ha utilizado como información meteorológica de referencia la generada durante la campaña DOMINO (Diel Oxidant Mechanisms In relation to Nitrogen Oxides), organizada por el Max Planck Institute de Química Atmosférica de Mainz (Alemania) en colaboración con el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) (España) y desarrollada en la estación de Sondeos Atmosféricos "El Arenosillo".

En este trabajo se han llevado a cabo tres estudios de sensibilidad. Un primer estudio se ha realizado variando la información meteorológica de entrada y por tanto, en la definición de las condiciones iniciales y de frontera con el objetivo de conocer la variación que se establece en la información meteorológica de salida ante la utilización de diferentes resoluciones espaciales de entrada. Un segundo estudio se ha centrado en la selección de una de las dos técnicas de anidamiento entre dominios que ofrece el modelo (one-way y two-way) a la hora de obtener y resolver cada uno de ellos. Por último, y empleándose los resultados obtenidos en las dos anteriores etapas, se ha seleccionado, de entre dos opciones, aquella parametrización de la capa fronteriza atmosférica (ABL) que mejor represente su comportamiento y evolución sobre el área de estudio, modificándose además algunos de los parámetros que determinan su comportamiento.

4.2. Simulación del campo de vientos utilizando el modelo WRF-ARW.

Aunque son múltiples las salidas que proporciona el modelo, se ha querido presentar a modo de ejemplo en la presente subsección, los resultados pronosticados por el modelo WRF, bajo la configuración fijada en el apartado anterior, el comportamiento espacial y temporal del campo de vientos en Andalucía occidental. Para ello se han definido un total

de cuatro dominios (Figura 6), disminuyendo la resolución de sus celdas de 27 km a 3 km. De esta forma, es posible obtener, en el dominio más pequeño, información sobre el campo de vientos con una resolución de 3 km.

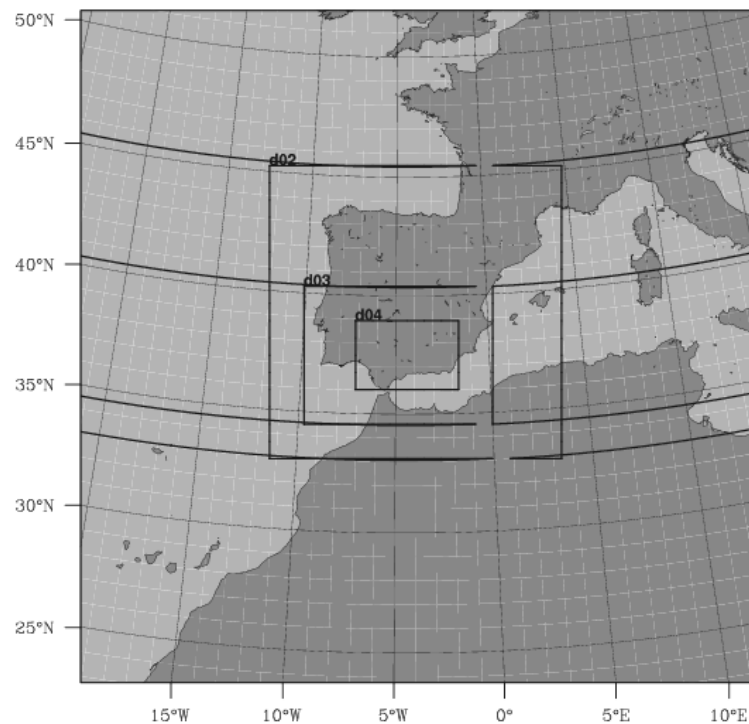


Figura 8. Conjunto de dominios definidos en el modelo WRF-ARW para la región de estudio

El ejemplo que se presenta a continuación corresponde a la modelización realizada del día 30 de Junio de 2006, en la cual se identifica sobre la zona costera flujos procedentes del sur rolando durante la tarde a componente oeste. En la figura 7 se muestra la evolución y características del campo de vientos en Andalucía occidental a partir de los resultados obtenidos para el dominio con mayor resolución.

Gracias a este ejemplo, puede confirmarse la gran influencia que ejerce el valle del Guadalquivir sobre la dinámica superficial de esta zona. Esta influencia se manifiesta en la canalización de las masas de aire que inciden sobre el entorno costero, permitiendo su desplazamiento desde zonas litorales hacia el interior. Este comportamiento se observa tanto para los flujos del sur, que se identifican durante las primeras horas como, para los flujos del oeste incidentes durante la tarde.

Otro aspecto fundamental que se resalta en este ejemplo es la confirmación de los resultados obtenidos a partir de las rosas de viento para Sierra Morena y Sistemas Béticos favorables a la presencia de valles transversales que provocan que no pueda

considerarse a la dinámica del valle como aislada, sino que el valle se puede considerar como una zona de confluencia de masas de aire procedentes de diferente procedencia, y por tanto, de diferentes características.

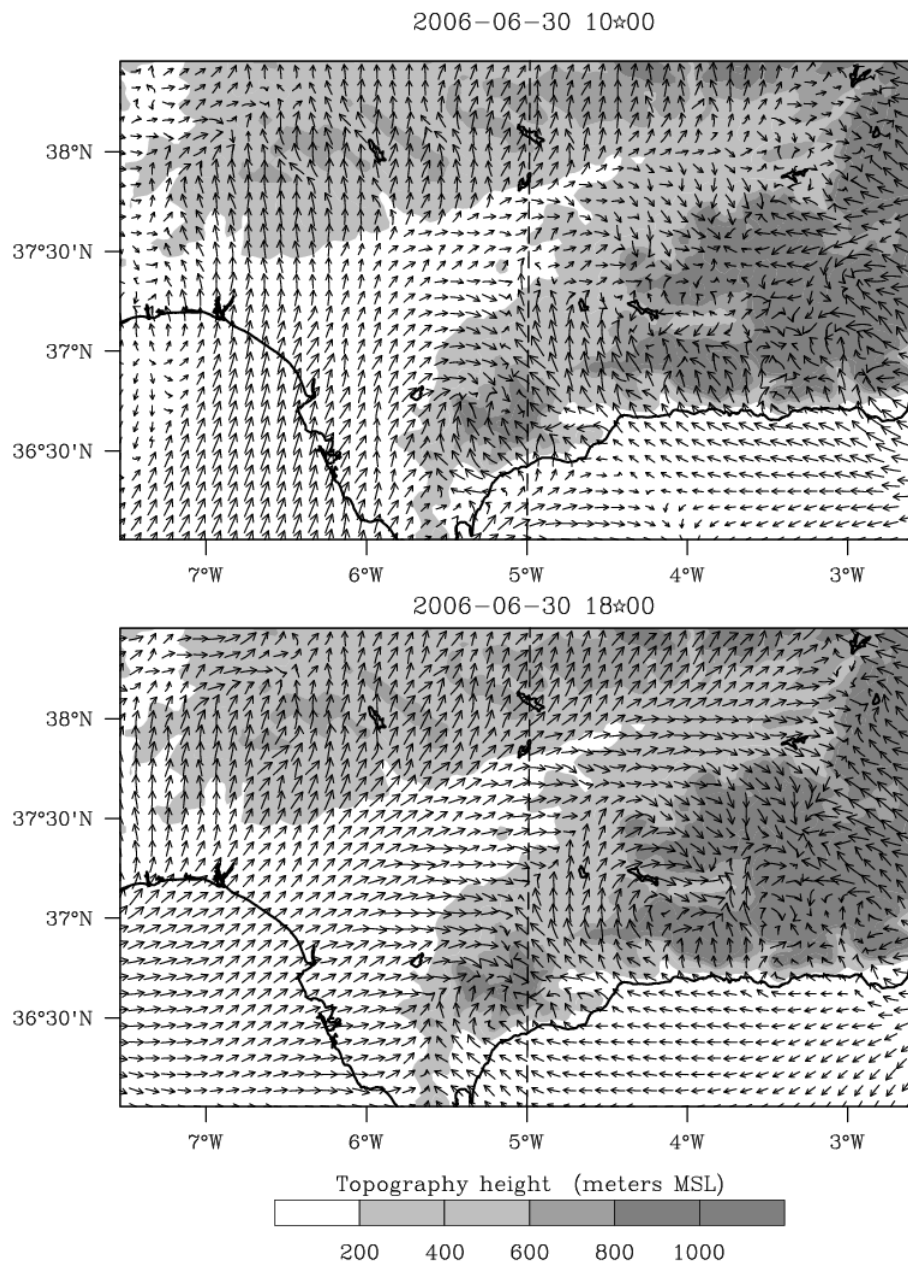


Figura 9. Campo de viento (10 m) sobre Andalucía occidental durante el 30 de Julio de 2006 a 10 UTC y 18 UTC.

Así mismo, también destaca la diferente dinámica superficial que se registra en la zona más occidental de Andalucía, coincidiendo con la provincia de Huelva, la cual, tal y como

se observó mediante la comparativa de las rosas de viento, marca el límite de la dinámica del valle. Puede observarse, como durante la tarde los vientos que en el valle presentan una componente del suroeste, en esta zona presenta una clara dirección del sur.

5. CONCLUSIONES.

Este trabajo presenta la metodología empleada en la caracterización meteorológica de Andalucía occidental. Esta se ha fundamentado tanto en la utilización de observaciones meteorológicas como en la aplicación de dos modelos meteorológicos de predicción, como son el HYSPLIT y WRF-ARW. La combinación de este conjunto de herramientas ha permitido obtener una visión global y fiable de la variación espacial y temporal de las condiciones meteorológicas sobre Andalucía occidental.

Esta metodología ha consistido de diferentes etapas. Una primera, en la que utilizando los registros horarios de dirección y velocidad del viento, se ha realizado un exhaustivo proceso de selección de estaciones meteorológicas con las que conformar la base de datos meteorológica. Esta primera fase ha permitido disponer de información meteorológica robusta y fiable sobre la realidad meteorológica de la región así como identificar una serie de zonas de diferente dinámica superficial.

En una segunda etapa se ha constatado la validez del modelo de dispersión Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) para llevar a cabo un estudio y clasificación de las masas de aire incidentes sobre la región, mediante el empleo de retro-trayectorias. Con ello se ha obtenido un conjunto de configuraciones sinópticas más predominantes sobre la región.

Una última sección ha permitido ampliar el conocimiento sobre los procesos de la baja atmósfera que se desarrollan sobre Andalucía occidental. Para ello, una vez definidos los escenarios meteorológicos, y posterior a la realización de trabajos de validación del modelo utilizando la base de datos meteorológica, se han simulado jornadas representativas de cada uno de los escenarios meteorológicos identificados utilizando el modelo de mesoescala Weather Research and Forecast (WRF-ARW)

Los beneficios de esta metodología radican en el gran volumen de información creado así como en la progresiva reducción de la resolución espacial, permitiendo, de esta forma disponer de una visión tanto a nivel sinóptico, mediante el estudio de masas de aire con el modelo HYSPLIT, como a nivel regional, a partir del estudio de las observaciones, como por último, a nivel más local, aplicando el modelo meteorológico WRF-ARW.

Por los resultados obtenidos sobre la región de Andalucía occidental, esta metodología se considera adecuada como herramienta para la caracterización meteorológica de cualquier zona y por tanto, útil en la generación de información meteorológica que ayude en la interpretación y en la búsqueda de soluciones a los problemas atmosféricos y de calidad del aire de una determinada región. Además, puede ser extrapolable a otras áreas de interés, como pudiera ser la región oriental de Andalucía, en la cual se pretende centrar nuestra futura investigación.

REFERENCIAS.

- Adame, J.A. 2005. Caracterización y comportamiento del ozono superficial en la provincia de Huelva. Tesis Doctoral, Facultad de CC. Experimentales, departamento de Física Aplicada de la Universidad de Huelva.
- Adame, J.A., Lozano, A., Bolívar, J.P., De la Morena, B., Contreras, J., 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., De la Morena, B. 2010. On the tropospheric ozone variations in a coastal area of the southwestern Europe under mesoscale circulation. Accepted for publication in *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- Atkinson, B.W. 1989. *Meso-scale Atmospheric Circulations*. Queen Mary College, University of London.
- Barry, R.G. and Chorley, R.J. 1992. *Atmosphere, Weather and Climate*. Sixth Edition., London, Routledge.
- Challa, V.S., Indracanti, J., Rabarison, M.K., Patrick, C., Baham, J.M., Young, J., Hughes, R., Hardy, M.G., Swanier, S.J., Yerramilli, A. 2009. A simulation study of mesoscale coastal circulations in Mississippi Gulf coast. *Atmospheric Research* 91, 9–25.
- Corzo, M., Moreira, J.M., Rodríguez, J.M., Pita, M.F., Camarillo, J.M., Álvarez, J.I. 2005. El <<clima>>. *Medioambiente*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 48, 12-15.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess. 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., Taylor, A. 2009. *Hysplit_4 User's Guide*. NOAA Air Resources Laboratory.
- Garrat, J.R. 1992. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series.
- Jiménez, P.A., González-Rouco, J.F., García-Bustamante, E., Navarro, J., Montávez, J.P., Vilá-Guerau de Arellano, J., Dudhia, J., Muñoz-Roldán, A. 2010. Surface Wind Regionalization over Complex Terrain: Evaluation and Analysis of a High-Resolution WRF Simulation. *Journal of Applied Meteorology and climatology*. 49: 268:287.
- Jorba, O., C. Pérez, F. Rocandenbosch, and J.M. Baldasano. 2004. Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology* 43, 887-901.

- Kalnay, E. 2003. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press.
- Kumar, A., Dudhia, J., Rotunno, R., Niyogib, D., Mohantyc, U.C. 2008. Analysis of the 26 July 2005 heavy rain event over Mumbai, India using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Q. J. R. Meteorol. Soc. 134: 1897–1910.
- Lyamani, H., Olmo, F.J., Alcántara, A., Alados-Arboledas, L. 2006. Atmospheric aerosols during the 2003 heat wave in southeastern Spain I: Spectral optical depth. Atmospheric Environment 40, 6453-6464.
- Miller, J. 1981. A five-year climatology of five-day back trajectories from Barrow, Alaska. Atmospheric Environment, 15, 1401-1405.
- Pielke, R. 2002. Mesoscale Meteorological Modeling (Second Edition). Academic Press, San Diego, CA.
- Querol, X., Alastuey, A., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Plana, F., Ruiz, C. 2002. Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain. Atmospheric Environment, 36, 19, 3113-3125.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G. and Kakaliagou, O. 2001. Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain. Atmospheric Environment, 35, 2433-2447
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research. NCAR/TN-475+STR.
- Stohl, A. 1998. Computation, accuracy and applications of trajectories- A review and bibliography. Atmospheric Environment, 32, 947-966.
- Stull, R.B. 1989. An introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers.
- Stunder, B. 1996. An assessment of the Quality of Forecast Trajectories. Journal of Applied Meteorology, 35, 1319-1331.
- Toledano, C., Cachorro, V. E., de Frutos, A. M., Torres, B., Berjon, A., Sorribas, M., Stone, R. S. 2009. Airmass classification and Analysis of Aerosols Types at El Arenosillo. Journal of Applied Meteorology and Climatology 48, 962-981.
- Weiss-Penzias, P., Jaffe, D.A., Jaegle, L., Liang, Q. 2004. Influence of long-range-transported pollution on the annual and diurnal cycles of carbon monoxide and ozone at Cheeka Peak Observatory. Journal of Geophysical Research, 109, D23, D23S14.

- World Meteorological Organization. 1996. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Sixth edition.
- Yu, SC., Mathur, T., Kang, DW., Schere, K., Tong, D. A study of the ozone formation by ensemble back trajectories-process analysis using the Eta-CMAQ forecast model over the northeastern US during the 2004 ICARTT period. Atmospheric Environment, 43, 355-363.