

REGIONALIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS ISLAS BALEARES COMO SOPORTE AL DISEÑO DE REDES DE OBSERVACIÓN

CLIMATIC AFFINITY AREAS OF THE BALEARIC ISLANDS AND ITS APPLICATION TO THE DESIGN OF NEW OBSERVATION NETWORKS

R. Romero⁽¹⁾, S. Alonso^(1,2), V. Homar⁽¹⁾, C. Ramis⁽¹⁾,

⁽¹⁾ Departamento de Física, Universidad de las Islas Baleares, romu.romero@uib.es

⁽²⁾ IMEDEA UIB-CSIC

SUMMARY

An accurate mapping of the climatic affinity areas of a certain territory is a very useful product to plan new observation networks, especially in those regions characterized by complex topography. The classical climatic subdivision is derived using the available observations, and therefore its application towards the improvement – in distribution and density– of the observation network, would be questionable. In this work we devise an objective mapping method for the Balearic Islands based on the historical high resolution outputs from the MM5 mesoscale model. Specifically, the method uses the surface outputs of temperature, rainfall, relative humidity and wind speed, every 3 h, during the period September 2004–November 2005. This data is subjected to principal components analysis (PCA) and cluster analysis (CA) under different approaches, producing solutions consisting of 5, 10, 15, ..., 50, 55 and 60 climatic regions. Graphical results of the climatic affinity areas can be found in <http://mm5forecasts.uib.es/OCLIBreg>.

Introducción

El presente estudio tiene su origen en un convenio de colaboración entre la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de las Islas Baleares y la Universidad de las Islas Baleares (UIB) para desarrollar actividades de investigación y formación dentro del área del cambio climático regional. El convenio, todavía en vigor, se firmó en Agosto de 2005 y ha supuesto la realización de distintos estudios, informes y actividades de asesoramiento a la Dirección General de Cambio Climático de la Consejería por parte del Grupo de Meteorología de la UIB. En los años 2005-2006 la Consejería dispuso una partida económica especial para la instalación de 12 estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) sobre el territorio balear con el objeto de monitorizar el clima de la región y servir de referencia al Grupo de Meteorología para las tareas de vigilancia climática contempladas en el anterior convenio. Las perspectivas de ir ampliando en sucesivas acciones dicho número de estaciones y la colaboración iniciada con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y otras Instituciones, que disponen de unas 30-40 EMAs adicionales sobre las islas, permite ser optimista respecto a la posibilidad de lograr algún día una auténtica red regional de estaciones, o *Mesonet*, al estilo de lo que ya funciona en muchas regiones del mundo (p. e. en el estado de Oklahoma, <http://www.mesonet.org>).

El plan de adquisición de las EMAs por parte de la Consejería plantea el problema lógico de su ubicación. En este sentido, la regionalización climática, o subdivisión del territorio en zonas cuyos parámetros climáticos superficiales presentan un comportamiento afín, es un producto de gran valor para la planificación de nuevas redes de observación. Una ubicación de las nuevas estaciones de observación que respete las verdaderas regiones climáticas, casi nunca con geometrías sencillas o tamaños uniformes, especialmente sobre áreas de topografía compleja, permitirá una descripción más realista y eficiente del clima regional que si está guiada por un simple criterio de homogeneidad espacial o por la división político-administrativa del territorio. Las Islas Baleares constituyen un perfecto ejemplo de región con topografía muy compleja (ver Fig. 1). La mayor de las islas, Mallorca, está caracterizada por la Serra de Tramuntana en el norte, cuyas alturas superan ampliamente los 1000 m en su parte central, la Serra de Llevant en el este y un pequeño macizo en el centro-sur de la isla. Entre dichos complejos montañosos se sitúan tres depresiones con salida al mar en forma de amplias bahías. Las islas vecinas de Menorca e Ibiza-Formentera también poseen, a pesar de su pequeño tamaño, orografías muy heterogéneas. La complejidad del relieve, unido a lo irregular de la línea de costa y al carácter insular (p.e. las islas poseen un sistema de brisas muy bien definido,

especialmente Mallorca) determinan una gran variedad climática (Guijarro 1986). A modo de ejemplo, la precipitación media anual en los puntos más altos de la Serra de Tramontana se acerca a los 1500 mm, mientras que en la costa sur de Mallorca y en áreas costeras de Ibiza-Formentera apenas se superan los 350 mm. Las temperaturas también se ven fuertemente afectadas por la altura y por la distancia al mar, que modulan el gradiente general norte-sur. Otro factor que no puede ignorarse es la diferente exposición a los flujos sinópticos

dominantes. Así, el norte de Mallorca y la isla de Menorca están muy expuestos a los intensos nortes y noroestes que acompañan a las borrascas que circulan por latitudes superiores y por lo tanto presentan los vientos más intensos y un mayor número de días nublados o de lluvia (lo que repercute en mayores precipitaciones medias), mientras que los flujos húmedos del este determinan la gran mayoría de episodios lluviosos –a menudo convectivos– que afectan al sur del archipiélago.

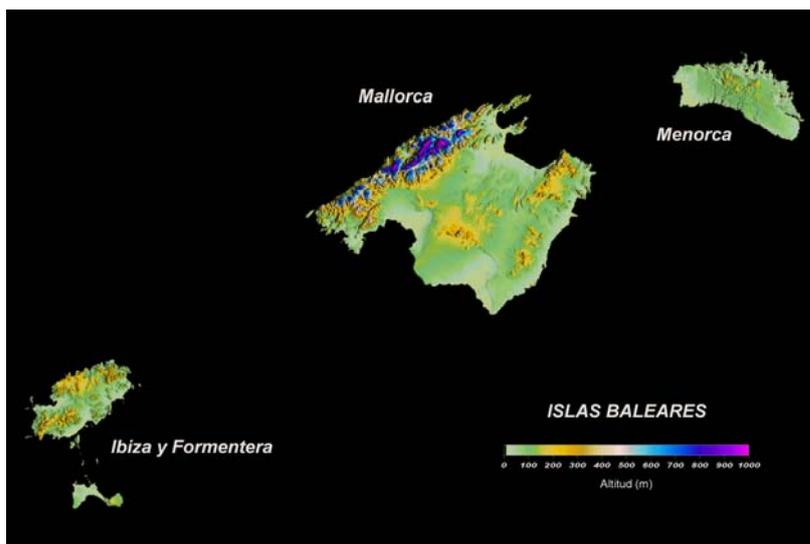


Fig. 1 – Las Islas Baleares, con indicación de su orografía según la escala

Estudios previos se han centrado en derivar regionalizaciones para el conjunto de la zona mediterránea española. Tal es el caso del estudio de Romero et al. (1999) en el que se derivaron las áreas de afinidad de la precipitación diaria empleando técnicas de análisis de componentes principales (PCA) y de análisis de clusters (CA) sobre una base de datos de 410 pluviómetros para el período 1964-1993. En la figura 2 se muestra la regionalización consistente en 20 zonas. El resultado destaca claramente el papel dominante que ejerce la orografía compleja de la región sobre la organización espacial de las lluvias a través de su interacción con los principales flujos y sistemas lluviosos de origen atlántico o mediterráneo. Es decir, aquellas áreas contiguas que comparten los mismos procesos físicos responsables de la activación, intensificación o supresión de la precipitación ante el embate de los flujos húmedos atlánticos o mediterráneos, resultan clasificadas en una misma región pluviométrica. Factores como la extensión geográfica, la altura, la distancia al mar o la orientación de las pendientes resultan decisivos en la definición de las regiones que aparecen en la Fig. 2. La regionalización en la zona sur-oriental de la Península Ibérica es especialmente llamativa, con una gran fragmentación del territorio sin duda

consecuencia de la gran complejidad topográfica de esa zona. En el caso del archipiélago balear surgen tres zonas de afinidad pluviométrica claramente diferenciadas: Ibiza-Formentera, la mitad sur-oeste de la isla de Mallorca, y el resto de la isla junto a Menorca. Dicha subdivisión del territorio balear, aunque enteramente compatible con los modelos conceptuales que manejan los climatólogos y meteorólogos de la región, es excesivamente general como para servir de guía en nuestra misión de asesorar al Gobierno regional acerca de la ubicación idónea de las nuevas EMAs.

Así pues, el Grupo de Meteorología se encargó de realizar una nueva regionalización climática de las Islas Baleares, de muy alta resolución y considerando otras variables además de la precipitación. La metodología empleada se describe en la siguiente sección para, a continuación, presentarse los resultados más relevantes obtenidos.

Metodología

La regionalización climática clásica (p.e. la de Romero et al. 1999 presentada en la Fig. 2) se realiza a partir de las observaciones disponibles, por lo que su aplicación a la mejora –en distribución y densidad– de la red de observación sería

cuestionable. Es decir, no se puede pretender generar una regionalización de gran detalle espacial a partir de una red de observatorios irregularmente repartidos y capaces de resolver únicamente unas escalas espaciales –o temporales– que superan ampliamente las pequeñas escalas de la regionalización deseada. Para salvar esta paradoja, en este trabajo se propone una regionalización objetiva construida a partir de las salidas históricas a muy alta resolución (2.5 km y 3 h en el espacio y el tiempo) sobre la región de Baleares del modelo numérico mesoescalar MM5 (Grell et al. 1995). Se trata de uno de los modelos numéricos de predicción a corto plazo más ampliamente extendidos entre la comunidad internacional de modelización atmosférica, resultado del proyecto de colaboración entre la Pennsylvania State University (PSU) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos. Entre los aspectos interesantes del modelo destacan: (i) capacidad de anidamiento múltiple con interacción en ambas direcciones (*two-way*) entre los dominios, lo que facilita la simulación de fenómenos atmosféricos bajo distintas escalas espaciales y el diseño de predicciones a muy alta resolución; (ii) formulación de una dinámica no hidrostática, la cual permite que el modelo pueda ser empleado eficazmente para representar fenómenos con dimensiones de muy pocos kilómetros; (iii) adaptación informática para múltiples plataformas y para su ejecución en modo multitarea sobre computadoras de memoria compartida o distribuida; (iv) inicialización automática con diferentes fuentes de análisis meteorológicos y observaciones, incluyendo su capacidad de asimilación 4-dimensional de datos;

(v) asimilación variacional de datos convencionales y de satélite durante la predicción; (vi) incorporación de los más modernos y realistas esquemas de parametrización de los procesos físicos relacionados con la radiación atmosférica, microfísica de nubes y precipitación, convección por cúmulos, turbulencia, y flujos de energía y momento sobre la superficie terrestre. El Grupo de Meteorología viene realizando desde hace unos años predicciones numéricas a 48 h con el modelo MM5 anidado en los campos de gran escala suministrados por el modelo global americano GFS. Los resultados diarios pueden consultarse en la página web <http://mm5forecasts.uib.es>. El modelo se ejecuta utilizando tres dominios con resoluciones espaciales de 22.5, 7.5 y 2.5 km que cubren Europa Sudoccidental y Norte de África, la cuenca del Mediterráneo Occidental y las Islas Baleares, respectivamente. La hipótesis de trabajo que sustentaría la elección de los resultados numéricos en los puntos de malla del tercer dominio para la confección de la regionalización balear es que aunque las predicciones individuales del MM5 están sujetas a incertidumbre como consecuencia de los errores en las condiciones iniciales y la formulación del propio modelo (p.e. Davis et al. 2003; Baldwin et al. 2001; Gilmore et al. 2004) el comportamiento estadístico del modelo (esto es, su clima) se aproximará razonablemente a la realidad climática de la región. Efectivamente, un modelo de ecuaciones primitivas y parametrizaciones complejas como el MM5, operando a una resolución de 2.5 km, será capaz de capturar circulaciones y procesos de pequeña escala asociados, por ejemplo, a los elementos del relieve, los distintos tipos de vegetación o la transición tierra-mar (Fig. 1).



Fig. 2 – Regionalización climática de la España Mediterránea atendiendo a la precipitación diaria (Romero et al. 1999), para una solución consistente en 20 regiones. Sombreada, se muestra la orografía de la región

Específicamente, para el trabajo se han considerado las predicciones trihorarias durante el período Septiembre 2004 – Noviembre 2005. Teniendo en cuenta que hubo algunas interrupciones en el funcionamiento del modelo durante dicho período, en total se dispone de series temporales de 2680 datos. A la resolución de 2.5 km se tienen 729 puntos terrestres sobre el archipiélago balear (compárese dicho número con las 30-40 EMAs disponibles) los cuales se han clasificado atendiendo al comportamiento de temperatura, precipitación, humedad relativa e intensidad del viento (regionalizaciones parciales) o al conjunto de variables climáticas (regionalización global).

Existen distintos métodos para la regionalización objetiva de las variables climáticas, desde un simple *linkage analysis* (p.e. Summer and Bonell 1990) hasta técnicas de análisis estadístico multivariante (p.e. Barring 1988 que emplea análisis de factores comunes, White et al. 1991 que aplican PCA y diferentes algoritmos de rotación de las direcciones principales, o Gong and Richman 1995 que ensayan un gran número de métodos de CA, jerárquicos y no jerárquicos). Como en Romero et al. (1999) aquí se ha elegido la combinación de PCA y CA como estrategia para conseguir la regionalización, aunque con una serie de matices (explicados a continuación) que, de hecho, desembocan en la aplicación de cuatro métodos diferentes. A las respectivas regionalizaciones se las denominará SMODE, JSMODE, TMODE y JTMODE.

Considérense las cuatro series climáticas sintéticas de la Fig. 3. Las dos de arriba presentan valores del mismo orden (p.e. representan las temperaturas suaves de dos puntos costeros) aunque están mal correlacionadas (i.e. corresponden a dos puntos muy distantes entre sí). Las dos de abajo describirían las temperaturas más frías de dos puntos montañosos, aunque de nuevo distantes entre sí. En cambio, la comparación de las series en el sentido vertical de la figura permite detectar magníficas correlaciones en ambos casos (entre las dos de la izquierda y entre las dos de la derecha) pero valores de fondo muy dispares, es decir, cada par corresponde a dos series vecinas pero registradas en puntos con altitudes muy diferentes (p.e. uno costero y otro de montaña). ¿Qué criterio de similitud debe determinar la pertenencia de dos series dadas a una misma región climática?, ¿la correlación o el rango básico de los valores? Aquí se han aceptado las dos visiones: (i) si la clasificación de las 729 series del MM5 se basa en los *scores* con que éstas se proyectan sobre la colección de direcciones principales extraídas tras someter a PCA la matriz de correlación entre instantes de tiempo (estrategia T-mode), entonces será una clasificación basada en el rango básico de valores; (ii) si la clasificación se basa en los *loadings* con que participa cada uno de los 729 puntos espaciales en la definición de las direcciones principales que se extraen tras someter a PCA la matriz de correlación entre puntos (estrategia S-mode), entonces será una clasificación basada en la correlación espacial.

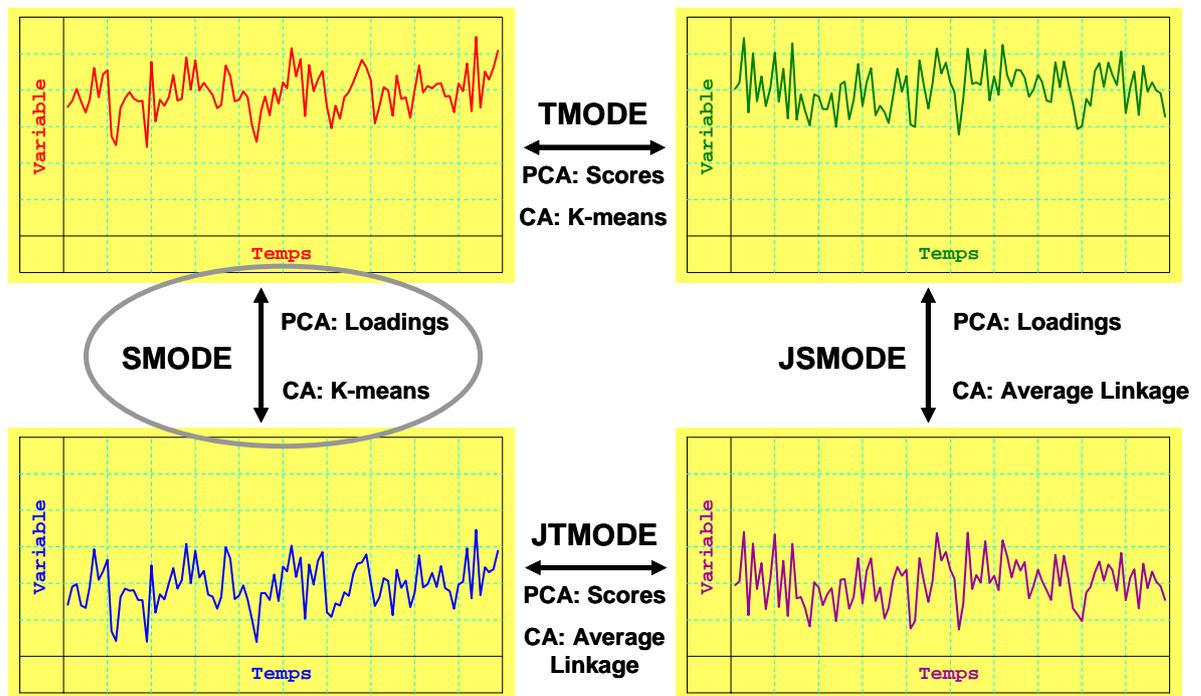


Fig. 3 – Ilustración de la metodología empleada para la regionalización, basada en la aplicación de PCA y CA (ver texto)

La aplicación de PCA a las matrices de correlación T- y S-mode no persigue únicamente una reducción significativa de la dimensionalidad del problema, haciendo la gestión de los datos mucho más manejable, sino el asegurar que las clasificaciones posteriores se construyen sobre los modos fundamentales de variabilidad climática. Por otra parte, existen diferentes métodos de clusterización descritos en la literatura e implementados en los paquetes estadísticos. Nosotros hemos considerado dos de los métodos más populares por su buen comportamiento: un método jerárquico (*Average Linkage*) y uno no jerárquico (*K-means*, Anderberg 1973). Respecto al número de clusters o regiones climáticas a generar sobre las Islas Baleares, se decidió imponer hasta 12 soluciones distintas consistentes en 5, 10, 15, ... 50, 55 o 60 regiones, en función del grado de detalle deseado para la planificación de la red de observación.

Resultados

La metodología anterior supone que el estudio abarca una gran variedad de resultados en función de la estrategia T- o S-mode, la técnica de clasificación jerárquica o no jerárquica (Fig. 3), la variable climática elegida y el grado de resolución o detalle deseado. El lector puede visitar la página web

asociada <http://mm5forecasts.uib.es/OCLIBreg>, la cual integra los resultados de todas las posibles combinaciones metodológicas. Los resultados en dicho enlace pueden ser consultados de un modo interactivo. No obstante, admitimos que de entre todas las regionalizaciones posibles consideramos la solución SMODE (resaltada en el esquema de la Fig. 3) como la más adecuada para nuestros propósitos. Es decir, una regionalización basada en la correlación entre los puntos geográficos (criterio habitual en Climatología Analítica) y construida mediante un método no jerárquico y por lo tanto flexible como es el *K-means*. El resultado de dicha regionalización se muestra en la Fig. 4 para la opción de 50 regiones y considerando toda la colección de parámetros meteorológicos (i.e. temperatura, precipitación, humedad y viento combinados). Las regionalizaciones individualizadas para cada parámetro, aunque interesantes desde el punto de vista climatológico, no resultan prácticas en el contexto del presente trabajo ya que, como es habitual, en las EMAs los correspondientes sensores meteorológicos vienen integrados y no cabe pensar en la posibilidad de una distribución espacial diferente para cada uno de los sensores.

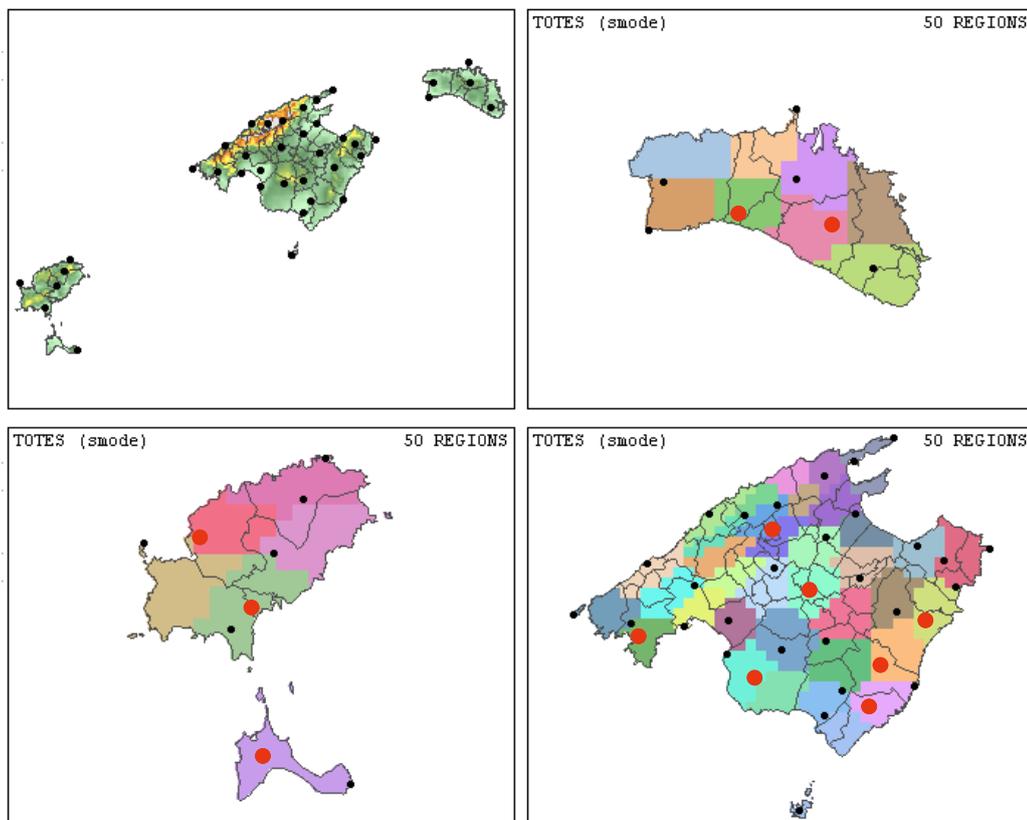


Fig. 4 – Regionalización climática de las Islas Baleares según el método SMODE para una solución de 50 regiones considerando el conjunto de parámetros climáticos. El mapa general de arriba a la izquierda muestra la distribución de EMAs de la AEMET. En los mapas de cada isla se muestra de nuevo dicha distribución, además de las ubicaciones finalmente elegidas para las EMAs de la Consejería (puntos grandes)

El resultado de la Fig. 4 muestra una fragmentación del territorio según regiones de tamaños y formas variables. Así, las regiones climáticas del llano tienden a ser mayores y de geometría cuasi-circular, mientras que las regiones de las zonas montañosas tienden a ser menores en extensión geográfica y de formas alargadas, siguiendo la orientación de las cordilleras (nótese sobre todo el efecto de la Serra de Tramuntana). Los efectos de la topografía y la distancia al mar resultan evidentes, surgiendo como resultado zonas climáticas interiores vs zonas costeras, zonas de montaña vs zonas del llano y, a lo largo de la Serra de Tramuntana, zonas encaradas al noroeste vs zonas encaradas al sudeste.

Esta regionalización resulta mucho más razonable que la provista por el método TMODE, el cual produce una subdivisión del territorio absolutamente dominada por la altura del terreno, de tal manera que en las zonas con fuerte gradiente y variabilidad orográfica (p.e. Serra de Tramuntana y Serra de Llevant) se obtiene una excesiva y caprichosa alternancia de regiones climáticas (no se muestra). Finalmente, los métodos jerárquicos (JSMODE y JTMODE; no mostrados) presentan el inconveniente de que las regiones climáticas para una determinada opción de alta resolución (p.e. 50 regiones) son necesariamente subregiones de las regiones más amplias que definen una solución de menor resolución (p.e. 20 regiones).

Conclusión final

La regionalización climática basada en simulaciones a muy alta resolución con un modelo de ecuaciones primitivas como el MM5 se presenta como una interesante alternativa a la regionalización clásica basada en observaciones, y puede que la única opción válida cuando se trata de fundamentar el diseño o ampliación de la red de observaciones en los complejos procesos físicos reguladores de la variabilidad climática. El ejercicio de este tipo realizado para las Islas Baleares se ha demostrado de gran utilidad en el ámbito de la vigilancia climática regional y ha servido de referencia para elegir la ubicación definitiva de las 12 EMAs adquiridas por la Consejería de Medio Ambiente. En la Fig. 4 se presenta la distribución de las nuevas estaciones junto a la localización de las estaciones de la AEMET. Las nuevas EMAs ayudarán a resolver instrumentalmente algunas regiones climáticas que hasta ahora quedaban infra-representadas. Sería no obstante deseable disponer de un mayor número de estaciones, especialmente sobre zonas montañosas, para una monitorización exhaustiva de la compleja variabilidad climática del archipiélago.

Agradecimientos.- El presente estudio ha sido financiado por la Consejería de Medio Ambiente del

Gobierno de las Islas Baleares y por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno Español a través del proyecto CGL2008-02171 (MEDICANES).

Bibliografía

- Anderberg, M.R., 1973: Cluster Analysis for Applications, Academic Press, New York, 359 pp.
- Baldwin, M. E., S. Lakshmivarahan, and J. S. Kain, 2001: Verification of mesoscale features in NWP models. Preprints, Ninth Conf. On mesoscale Processes, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 255-258.
- Bärring, L., 1988: Regionalization of daily rainfall in Kenya by means of common factor analysis, *J. Climatol.*, 8, 371-390.
- Davis, C. A., K. W. Manning, R. E. Carbone, S. B. Trier, and J. D. Tuttle, 2003: Coherence of warm-season continental rainfall in numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2667-2679.
- Gilmore, M. S., J. M. Straka, and E. N. Rasmussen, 2004: Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2610-2627.
- Gong, X., and M. B. Richman, 1995: On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America east of the Rockies, *J. Clim.*, 8, 897-931.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1995: A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 122pp.
- Guijarro, J. A., 1986: Contribución a la Bioclimatología de Baleares. Tesis Doctoral, Universidad de las Islas Baleares.
- Romero, R., C. Ramis, J. A. Guijarro, and G. Sumner, 1999: Daily rainfall affinity areas in the Mediterranean Spain. *Int. J. Climatol.*, 19, 557-578.
- Sumner, G., and M. Bonell, 1990: The spatial organisation of daily rainfall in Wales during autumn-winter, *Weather*, 45, 174-183.
- White, D., M. Richman, and B. Yarnal, 1991: Climate regionalization and rotation of principal components, *Int. J. Climatol.*, 11, 1-25.