

VALIDACIÓN DE UN MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA EN TERRENO COMPLEJO: CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS

Gorka Pérez-Landa⁽¹⁾, José Luis Palau⁽¹⁾, Millán M. Millán⁽¹⁾, Philippe Ciais⁽²⁾

⁽¹⁾ Fundación CEAM, Charles Darwin 14, 46980 Paterna (Valencia), gorkapl@confluencia.biz

⁽²⁾ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CNRS, (France), ciais@cea.fr

INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos son herramientas de uso frecuente en las ciencias de la Tierra. La evaluación de su habilidad para simular distintos procesos, es esencial tanto para su propio desarrollo como para verificar su aplicabilidad. Willmott y cols. (1985) consideran dos tipos de procedimientos de validación de modelos:

- *Validación Operacional*: tiene como objeto determinar el grado de precisión con el que las predicciones del modelo se ajustan a las observaciones.
- *Validación Científica*: tiene como objeto determinar el grado de consistencia de los resultados del modelo con la teoría científica.

En su aplicación a la modelización meteorológica la *Validación Operacional* precisa la determinación de estadísticos y gráficos adecuados para evaluar la capacidad del modelo en reproducir observaciones de variables escalares (temperatura, humedad, presión,... etc) y vectoriales (viento). La *Validación Científica* ha de determinar el realismo y la consistencia de los procesos básicos simulados por el modelo, conforme al conocimiento a priori de los mismos y de su identificación en las observaciones disponibles. La metodología concreta a emplear en ambos procedimientos de validación dependerá del objeto del estudio, de la herramienta de simulación y de la información experimental disponible.

En este trabajo se presentan resultados de la validación tanto *Operacional* como *Científica* de la simulación meteorológica llevada a cabo mediante el modelo de mesoescala RAMS (Pielke y cols., 1992) en la región de Valencia bajo condiciones de Verano. La simulación tiene como objeto reproducir las condiciones de transporte de dos días seleccionados como representativos de la campaña intensiva de medidas que durante dos semanas del verano de 2001 se llevó a cabo en este área en el marco del Proyecto Europeo RECAB (Regional Assessment and Modelling of the Carbon Balance in Europe) (Pérez-Landa y cols., 2006a). La validación detallada de esta simulación meteorológica permitirá afrontar con confianza la

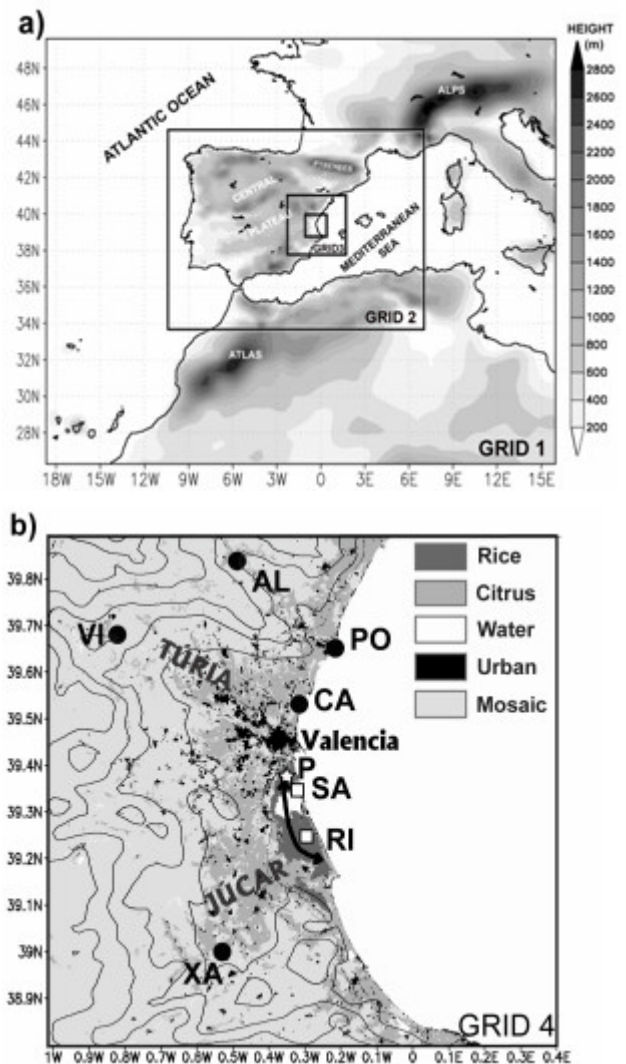


Fig. 1.- a) Orografía del modelo meteorológico en las cuatro mallas anidadas configuradas para este trabajo. b) características geográficas relevantes en la zona de estudio y ubicación de las estaciones de medida (círculos negros), transectos horizontales (flecha negra) y verticales (punto P) realizados por el avión. Los cuadrados blancos indican la ubicación de las estaciones de medida de CO₂ (además de variables meteorológicas) en El Saler Y en El Arrozal. Las líneas de contorno representan curvas de nivel cada 200m.

posterior modelización del transporte del CO₂ en la cuenca de Valencia (Pérez-Landa y cols., 2006b).

AREA DE ESTUDIO Y EMPLAZAMIENTOS DE MEDIDA

La provincia de Valencia se encuentra ubicada en una zona condicionada por la confluencia de dos sistemas montañosos, el Ibérico y el Pre-Bético (Fig. 1 a-b). La altura media de estos sistemas en la región ronda los 1000 m, extendiéndose paralelos a la costa a unos 50 km de distancia. Las cuencas del río Turia y del Júcar en su camino hacia el mar Mediterráneo, configuran una amplia llanura en la que se asientan diferentes cultivos como cítricos, huerta y en la franja litoral arrozales, así como diferentes emplazamientos urbanos que aumentan su densidad conforme nos acercamos hacia la costa. Destaca la ciudad de Valencia junto a la desembocadura del río Turia que en la actualidad, incluyendo conurbaciones, supera el millón de habitantes (Fig. 1b).

Estas características geográficas configuran un entorno en el que es frecuente la presencia de circulaciones de mesoescala de marcado ciclo diurno, consecuencia de la interacción mar, tierra y orografía. Bajo condiciones de Verano, durante el día el calentamiento radiativo genera el desarrollo de circulaciones tierra adentro, combinación de brisas de mar, ladera y de la interacción de escalas mayores. Durante la noche, el enfriamiento nocturno genera vientos de drenaje que descienden hacia el mar a lo largo de las cuencas.

La presencia desde 1999 de una torre micrometeorológica midiendo flujos de CO₂ en continuo sobre un bosque Mediterráneo en el emplazamiento de El Saler (Fig. 1b), centra sobre esta zona el interés de la campaña de Verano del proyecto RECAP (Millán y cols., 2003). Durante la misma se dispone además de otra torre micrometeorológica situada sobre arrozales, así como de una plataforma aerotransportada capaz de medir distintas variables meteorológicas, flujos y concentraciones de CO₂ mediante transectos horizontales o perfiles verticales. Asimismo, se dispone de medidas de estaciones meteorológicas situadas en al cabecera de las cuencas de los ríos Turia y Júcar, con objeto de caracterizar el desarrollo de las circulaciones de mesoescala a lo largo de las mismas (Fig. 1b).

METODOLOGÍA

El modelo meteorológico de mesoescala RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, versión 4.3.0), permite trabajar a diferentes escalas empleando una configuración de mallas de distinta resolución anidadas entre sí (Pielke y cols., 1992). Esto posibilita responder de manera adecuada a las necesidades de modelización de alta resolución, como exige la complejidad orográfica

de la zona. En este trabajo se establecen cuatro mallas de 40.5, 13.5, 4.5 y 1.5 km de tamaño de celda anidadas conforme se indica en la Figura 1a. Se emplean 45 niveles verticales con un grosor de 30 m para el más cercano al suelo, y que va incrementándose de manera geométrica conforme llega a los 17 km de altura del último nivel. La parametrización de cúmulos empleada (Molinari y cols., 1992) solo esta activa en la malla más externa. La turbulencia es parametrizada conforme al esquema de Mellor y Yamada (1982). Las propiedades de la cobertura del suelo se obtienen empleando la base de datos CORINE (Heymann y cols., 1994), reclasificando estas categorías en las 24 establecidas en el modelo RAMS a una resolución de 30". Las condiciones iniciales para cada simulación se obtienen del análisis modelo meteorológico global MRF con una resolución de 1° (Caplan y cols., 1997). Estos mismos análisis con un intervalo de 6 horas, son empleados para proveer al modelo de condiciones laterales variables en función del tiempo a lo largo de la simulación. La temperatura de agua de mar para estas simulaciones es obtenida mediante el procesado de datos del satélite NOAA (Bádenas y cols., 1997) disponibles para los días de campaña.

La *Validación Operativa* se centra en el análisis de simulaciones y observaciones de las variables Temperatura, Humedad y Viento (medidas en las siete estaciones en superficie indicadas en la Fig. 1b), mediante los estadísticos Error Medio, Error Cuadrático Medio, *Index of Agreement* (Willmott, 1981) y Error del vector viento (Stauffer y Seaman, 1995). Adicionalmente, la visualización conjunta de las series temporales de medidas y simulaciones de las variables referidas, completará esta fase de validación.

La *Validación Científica* hace uso del conocimiento a priori de las características típicas de las circulaciones mesoescalares en terreno complejo costero, interpretando la información experimental disponible en términos de los procesos, para evaluar el realismo y la consistencia espacial y temporal del modelo en la simulación de los mismos. La cobertura espacial y temporal de las medidas experimentales disponibles y las propias características conocidas a priori de los procesos de mesoescala determinan el tipo de información a considerar en el análisis. Así, para esta caso, se visualizarán de manera conjunta datos de los transectos horizontales y verticales realizados mediante el avión instrumentado, con las variables correspondientes simuladas por el modelo. Se visualizarán secciones horizontales y transversales del modelo durante la evolución a lo largo del día de las estructuras mesoescalares, con objeto de contrastar el realismo de las mismas en la simulación meteorológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los estadísticos calculados en el marco de la *Validación Operativa*, indican en general un buen comportamiento del modelo en la simulación de las variables meteorológicas para el caso de estudio seleccionado (Tabla 1). La simulación de las variables termodinámicas puede considerarse satisfactoria, con un RMSE de la temperatura muy bajo considerando su amplio rango de oscilación diaria, mientras que la humedad relativa presenta desviaciones apreciables, probablemente debido a la problemática de la inicialización de la humedad del suelo (ver más detalles en Pérez-Landa y cols., 2006a). Las series temporales de estas variables en tres estaciones elegidas como representativas del total (Fig. 2), muestran coherencia con los resultados estadísticos descritos.

Respecto al vector viento, puede observarse una pequeña tendencia en el modelo a sobrepredecir su

Tabla1: Parámetros estadísticos de las variables Vector Viento, Temperatura y Humedad calculadas en las siete estaciones de medida en superficie.

		Wind vector (ms ⁻¹)					Temp. (°C)			Rel. Hum. (%)		
		ME	RMSE	IOA	VWD	N	ME	RMSE	N	ME	RMSE	N
Surface Stations (1 – 2 July)												
All Stations	All	0.36	1.54	0.79	2.18	300	0.04	1.49	300	0.39	18.09	215
	Day	0.52	1.43	0.84	2.28	195	-0.15	1.48	195	2.07	17.72	140
	Night	0.07	1.72	0.61	1.99	105	0.38	1.51	105	-2.76	18.75	75
Coastal Stations	All	0.04	1.47	0.78	2.04	171	-0.03	1.43	171	-12.17	20.42	86
	Day	0.36	1.21	0.86	2.11	111	-0.08	1.31	111	-9.37	20.22	56
	Night	-0.56	1.86	0.63	1.93	60	0.06	1.63	60	-17.41	20.77	30
Inland Stations	All	0.79	1.63	0.80	2.36	129	0.13	1.56	129	8.76	16.35	129
	Day	0.73	1.69	0.84	2.51	84	-0.24	1.67	84	9.70	15.84	84
	Night	0.92	1.51	0.59	2.07	45	0.81	1.34	45	7.00	17.27	45

magnitud (ME=0.36 m/s). El **RMSE** obtenido (1.54) es comparable a los resultados de Zhong y Fast (2003) en la simulación a alta resolución en otra zona de orografía compleja para dos casos de estudio con tres modelos de mesoescala (1.41 y 2.03 para RAMS, 1.57 y 1.98 para MM5 y 1.41 y 2.56 para MesoEta). Otros estudios bajo similares condiciones muestran en general valores superiores de RMSE tanto con el modelo RAMS como con el MM5 (en mayor medida) (Lyons y cols., 1995; Hanna y Yang, 2001; Seaman y Michelson, 2000; Seaman y cols., 1995). El **Index of Agreement** presenta un valor de 0.79, en general superior a los calculados en los estudios referidos. El error del vector viento (**VWD**) es de 2.18, lo que está por debajo de los valores obtenidos por Seaman y cols. (1995) para el modelo MM5 (2.29-4.81) y es del orden de los resultados de Fast (1995) con el modelo RAMS (2.21-2.58). En definitiva, el contraste de los distintos valores estadísticos con los obtenidos en otros estudios mediante modelos y bajo condiciones similares, permite afirmar que el modelo se comporta razonablemente bien en la simulación del viento en el caso de estudio.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P - P_o)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P - P_o)^2}$$

$$IOA = 1 - \frac{N(RMSE)^2}{\sum_{i=1}^N (|P - M_o| + |P_o - M_o|)^2}$$

$$VWD = \sqrt{(u - u_o)^2 + (v - v_o)^2}$$

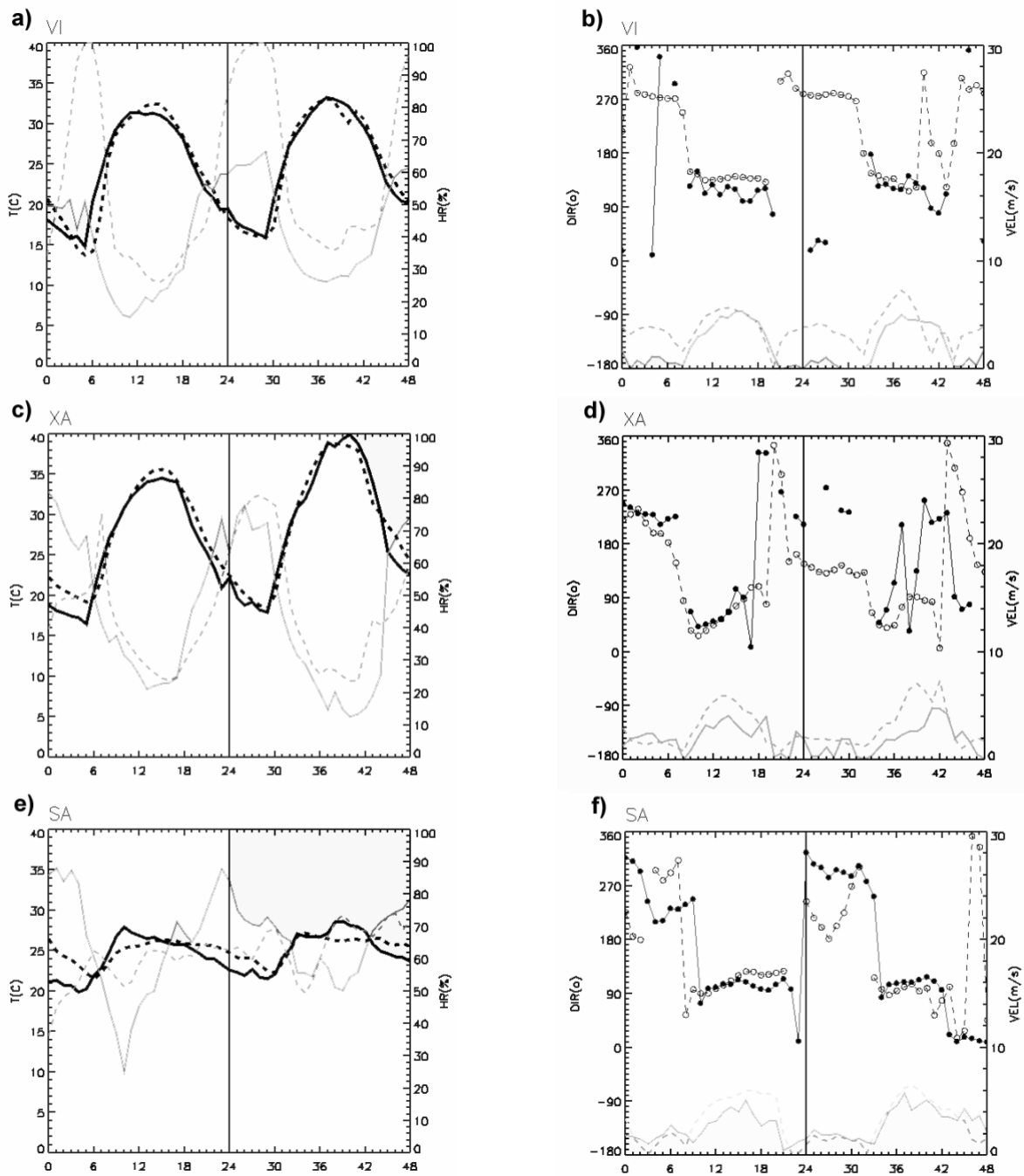


Fig. 2: Series temporales de observaciones (línea continua) y simulaciones (discontinua) en las estaciones de VI, XA y SA (Fig. 1b). A la izda. (a, c y e) temperatura (negro) y humedad (gris). A la drcha. (b, d y f) módulo (negro) y dirección (gris) del viento.

Un análisis más detallado de estos parámetros estadísticos permite extraer más información. Así, la serie temporal del Error del Vector Viento para el total de estaciones (Fig. 3) revela una distribución un tanto anómala con una oscilación importante a lo largo del tiempo, que alcanza un máximo de 4 m/s entorno a las 18 horas del 2 de Julio.

Con objeto de evaluar el realismo y la consistencia espacial y temporal del modelo en la simulación de los procesos de mesoescala típicos de la región bajo estas condiciones, se representan los transectos horizontales (Fig. 4) del avión y la simulación de viento correspondiente, así como la evolución de las líneas de corriente simuladas durante el día 2 de Julio (Fig. 5).

La figura 4 representa la variabilidad horizontal del campo de vientos simulado y observado a 50 m. A pesar de que se da una cierta subpredicción de la magnitud del viento durante la mañana, es interesante verificar que el modelo es capaz de resolver los drenajes correspondientes a las cuencas

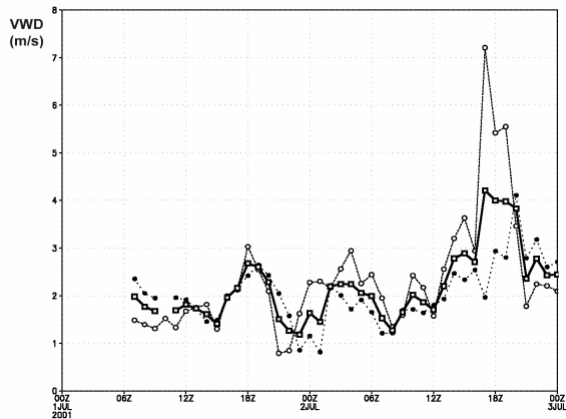
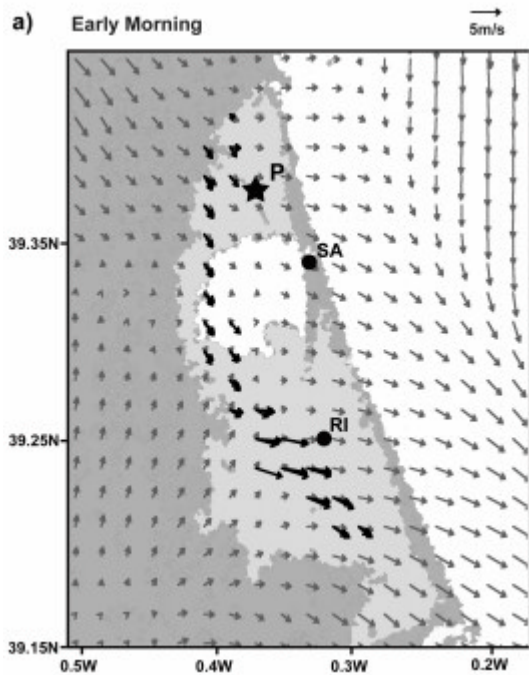


Fig. 3: Series temporales del Error del Vector Viento durante el caso de estudio, para todas las estaciones (Línea gruesa), para las del interior (AL, VI y AL en Fig. 1) con línea continua y para las costeras (PO, CA, SA y RI) en línea discontinua.

del Jucar y Turia (Fig. 4a). A mediodía, el régimen de brisas establecido, presenta una mayor homogeneidad horizontal, que es bien capturada por el modelo, tanto en módulo como en dirección (Fig. 4b).

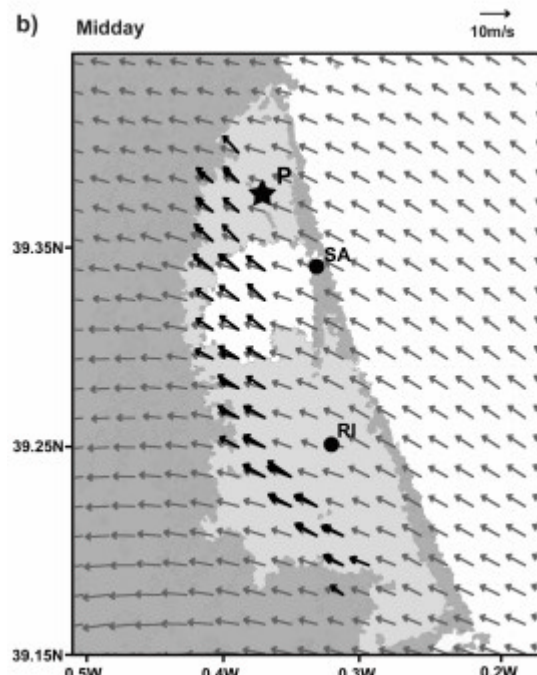
La variabilidad vertical del viento horizontal observada muestra una importante complejidad (no dibujada). A pesar de la compleja cizalladura, el modelo reproduce adecuadamente las celdas de brisa medidas en la región costera. Las mayores discrepancias se observan durante las transiciones de régimen nocturno a diurno.

Fig. 4: Variabilidad horizontal del vector viento simulado (gris) y medido por el avión instrumentado (negro) a 5 m sobre el suelo, a las 06:50 (a) y a las 12:10 UTC (b)

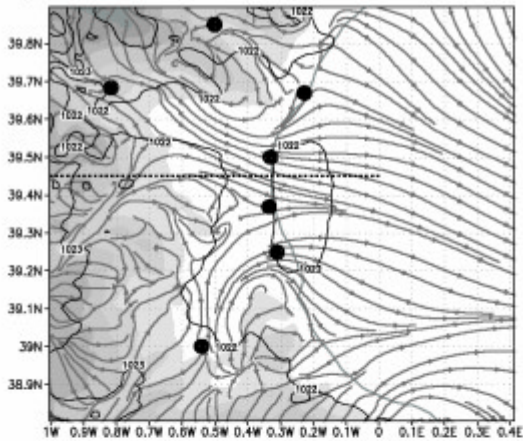


La secuencia de gráficos de la Figura 5 permite comprobar la presencia de una oscilación diaria en el régimen de vientos, con drenajes nocturnos que se dirigen hacia el mar y brisas hacia tierra durante el día. Además a las 08:00 se observa una complejidad importante durante la transición entre ambas circulaciones. Puede comprobarse cómo comienza la interacción entre brisas de ladera y de mar, así como el carácter tridimensional de las celdas en desarrollo (Fig. 6). Posteriormente el régimen se homogeneiza y las líneas de convergencia se desplazan tierra a dentro, incrementándose el gradiente de presión entre el mar y el interior. A las 18:00 se observa una variación en la posición de las líneas de convergencia, paralelamente a una reducción del gradiente de presión. La Figura 6 representa la secuencia de cortes verticales del vector viento, a lo largo de las líneas indicadas en la Fig. 5. Puede observarse la extensión vertical de los vientos de drenaje a las 6:00, o la complejidad tridimensional del flujo a las 8:00. Tres horas más tarde se aprecia la conexión entre brisas de ladera y de mar, finalizando en una importante inyección vertical en la cadena montañosa del interior (Fig. 5c), mientras en la costa la presencia de la subsidencia compensatoria condiciona la mezcla vertical (Fig. 5d).

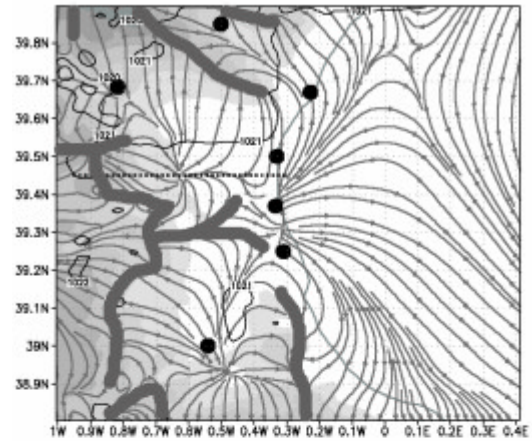
Este mosaico de procesos simulados interaccionando a distintas escalas, encaja con el conocimiento a priori que se tiene de la interacción entre brisas de ladera y mar. La configuración tridimensional descrita, es coherente con las series temporales observacionales (Fig. 2). Asimismo, encaja con otros estudios experimentales y modelísticos cercanos a la región y en otros lugares



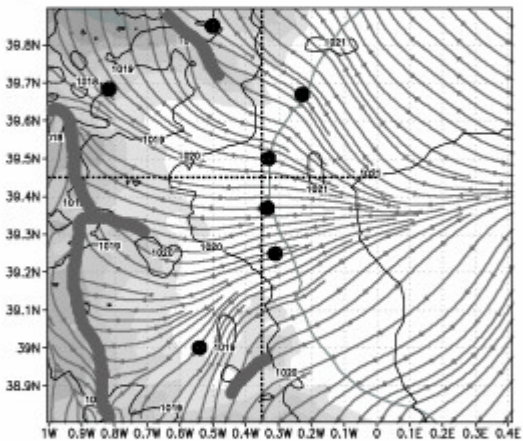
a) 06:00 UTC



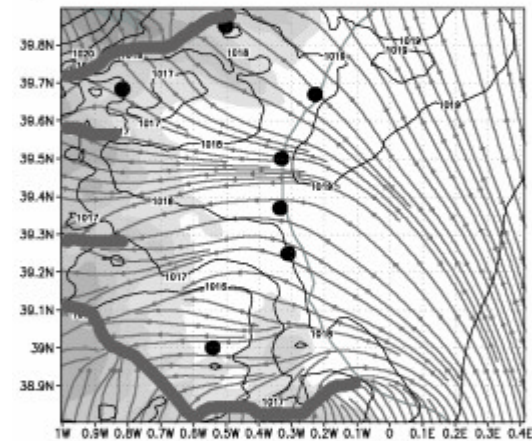
b) 08:00 UTC



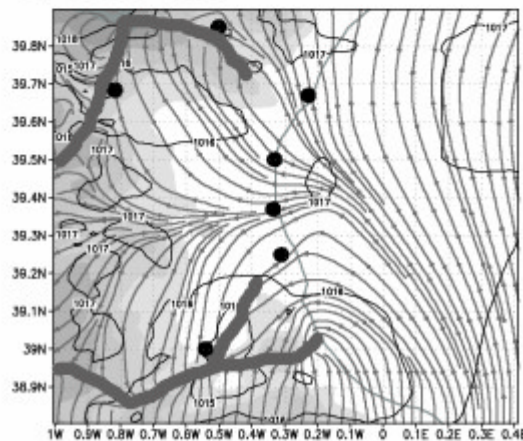
c) 11:00 UTC



d) 15:00 UTC



e) 18:00 UTC



f) 21:00 UTC

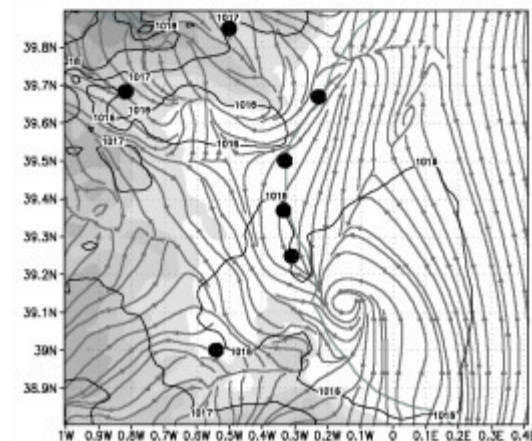


Fig. 5: Líneas de corriente del vector viento simulado a 15m en distintos instantes del día 2 de Julio correspondientes a la malla de mayor resolución. Las líneas gruesas representan líneas de convergencia del flujo. Las líneas continuas en negro, representan el campo de presión al nivel del mar en mb. La escala de grises representa la topografía del modelo en la malla interna.

bajo similares condiciones. Por lo tanto, podemos afirmar que la simulación es físicamente consistente, tanto espacial como temporalmente.

De manera adicional, la *Validación Científica* realizada, sugiere dos pautas a tener en cuenta en el diagnóstico del modelo: Por un lado la presencia de dos regímenes claramente distintos, el nocturno y el

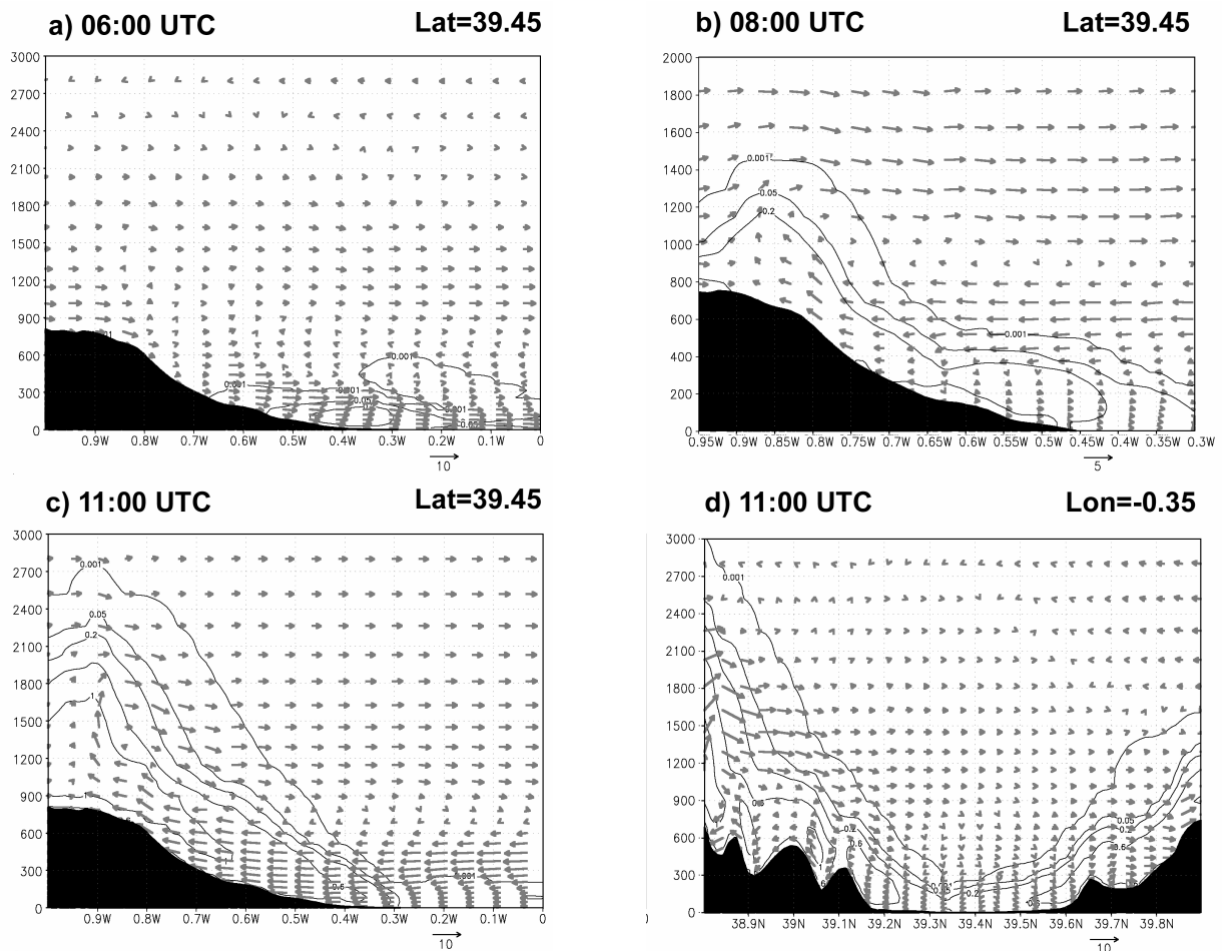


Fig. 6: Sección vertical a lo largo de los transectos indicados en Fig. 5, de la componente del viento proyectado en la dirección de corte y de la componente vertical multiplicada por 10. Las líneas de contorno representan la TKE. simulada

diurno. Por el otro, la diferencia de emplazamientos entre estaciones costeras y del interior, en lo que a su ubicación respecto al flujo se refiere. La inclusión de estos dos criterios en el estudio estadístico permite extraer conclusiones adicionales respecto a las capacidades del modelo (Tabla 1). Analizando únicamente la variable viento, es destacable el hecho de que durante el régimen nocturno se produce una subestimación de su magnitud en las estaciones de la costa ($ME=-0.56$), mientras que en el interior se sobreestima claramente (0.92). Esto parece sugerir un mal comportamiento de la parametrización turbulenta durante el régimen estable.

Otro aspecto a considerar es la sobrepredicción que se observa durante el día en los lugares del interior (0.73), frente a valores más moderados en la costa (0.36). Un análisis de la ubicación respecto al flujo de las estaciones del interior a las 18:00 (Fig. 5e), permite comprobar la cercanía de las líneas de convergencia a los tres emplazamientos de medida. De esta forma, pequeñas desviaciones en la

simulación de la posición de las líneas de convergencia, penalizarán de manera importante los estadísticos en estas estaciones. Este hecho se observa claramente en las series temporales del Error del Vector Viento (Fig. 3). Así, la correspondiente a las estaciones interiores llega a alcanzar un pico de 7 m/s en torno a las 18:00, mientras que en el resto del intervalo se mantiene en valores similares a las de la costa. Por tanto, las características de los procesos simulados y la ubicación de las estaciones de medida interactúan en este caso degradando la representatividad del estadístico para ese instante. Este es un claro ejemplo que muestra la necesidad de realizar la validación estadística conjuntamente con el diagnóstico de los procesos meteorológicos presentes en el caso de estudio.

CONCLUSIONES

La validación tanto *Operacional* como *Científica* de la simulación meteorológica realizada mediante el modelo RAMS en un caso de estudio durante la campaña del proyecto RECAP, indica un buen comportamiento este modelo en términos estadísticos y en términos de realismo y consistencia de los procesos meteorológicos simulados.

El diagnóstico realizado en el marco de la *Validación Científica*, además de incrementar el conocimiento sobre el comportamiento de los procesos en la región, permite profundizar en el análisis estadístico. De esta forma se observa un posible mal comportamiento de la parametrización turbulenta en el régimen estable. Adicionalmente, se identifica una situación a media tarde del segundo día de estudio, en la que las características de los procesos en ese instante y la ubicación de las estaciones condicionan la representatividad del estadístico que diagnostica la capacidad del modelo en la simulación del campo de vientos.

En definitiva, se ha verificado la complementariedad de ambos procedimientos de validación, posibilitando un análisis detallado con un mayor aprovechamiento de la información experimental disponible. Este trabajo es un ejemplo de cómo la caracterización de procesos contribuye a una correcta interpretación de los estadísticos obtenidos, lo que posibilita diagnosticar de manera adecuada las capacidades y carencias de un modelo meso-meteorológico, lo cual es imprescindible para un adecuado manejo de la herramienta y para una posible mejora de la misma.

REFERENCIAS

- Badenas, C., Caselles, V., Estrela, M. J., and Marchuet, R. (1997) Some improvements on the processes to obtain accurate maps of sea surface temperature from AVHRR raw data transmitted in real time. Part. 1. HRPT images. *International Journal of Remote Sensing* 18, 1743-1767
- Caplan, P., Derber, J., Gemmill, W., Hong, S. Y., Pan, H. L., and Parish D.: Changes to the NCEP operational medium-range forecast model analysis/forecast system, *Weat. Forecasting*, 12, 581-594., 1997.
- Fast, J. D., 1995a: Mesoscale modeling and four-dimensional data assimilation in areas of highly complex terrain. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2762-2782.
- Hanna, S.R., and Yang R.: Evaluations of mesoscale model simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths, *J. Appl. Meteor.* 40, 1095- 1104, 2001.
- Heymann, Y., Steenmans, Ch., Croisille, G. and Bossard, M., (1994). *Corine land cover A Technical guide*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Mellor, G.L.; and Yamada, T. (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20, 851-875,
- Millán,M.M., Salvador, R., Mantilla E., and Kallos G.: Photooxidants dynamics in the Mediterranean basin in summer: Results from European research projects, *J. Geophys. Res.*, 102 (D7), 8811-8823, 1997.
- Millán,M.M., Sanz M.J., Cosín S., Pérez-Landa G., Schumacher M., Gioli B. (2003). *Regional assesment and monitoring of the carbon balance within Europe (RECAB)*. Chapter 7: Valencia summer and winter campaigns. Final report of the EC-funded project RECAB
- Molinari, J., and M. Dudek, (1992): Parameterization of convective precipitation in mesoscale and numerical models: A review. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 326-344.
- Perez-Landa G., P. Ciais, M.J. Sanz, B. Gioli, F. Miglietta, J.L. Palau, G. Gangoiti, M.M. Millan, and: *Mesoscale circulations over complex terrain in the Valencia coastal region, Spain. Part 1. Simulation of the diurnal circulation regimes. Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006.(En Prensa)
- Perez-Landa, G., P. Ciais, G. Gangoiti, J.L. Palau, A. Carrara, B. Gioli, F. Miglietta, M. Schumacher, M.M. Millan, and M.J. Sanz: *Mesoscale circulations over complex terrain in the Valencia coastal region, Spain. Part 2. Linking CO2 surface fluxes with observed concentrations. Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005 (En Prensa).
- Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walco, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J., and Copeland, J. H., *A comprehensive meteorological modelling system RAMS*, *Meteor. Atmos. Phys.*, 49, 69-91, 1992.
- Seaman, N. L., and Michelson S. A.: *Mesoscale meteorological structure of a high-ozone episode during the 1995 NARSTO-Northeast study*. *J. Appl. Meteor.*, 39 (3), 384-398, 2000.
- Stauffer, D. R., and Seaman, N. L.: *Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data*. *Mon. Wea. Rev.*, 6, 1250-1277, 1990.
- Willmott, C.J.: *On the validation of models*. *Phys. Geog.*, 2, 184-194, 1981.
- Willmott, C. J., Ackelson S. G., Davis R. E., Feddema J. J., Klink K. M., Legates D. R., O'Donnell J., Rowe C. M.: *Statistics for the evaluation and comparison of Models*. *J. Geophys. Res.* 90, 8995-9005, 1985.
- Zhong, S., and Fast, J.: *An evaluation of MM5, RAMS, and Meso ETA at sub-kilometer resolution using VTMX field campaign data in the Salt Lake Valley*. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1301-1322, 2003.