

Impacto del cambio de uso del suelo en el clima y en el tiempo

Ernesto Rodríguez Camino

INM

RESUMEN

El impacto de las actividades humanas en el tiempo y en el clima ha dado lugar a muchas discusiones entre la comunidad dedicada a los cambios globales. En esta contribución se discuten, desde una perspectiva tanto observacional como de modelización, el impacto en el tiempo y en el clima locales producidos por la modificación del uso del suelo. El efecto de la deforestación en el clima de la Amazonía y el efecto de “isla de calor” en las ciudades son ejemplos clásicos de estos estudios. Comenzamos estudiando los esquemas de superficie utilizados por los modelos de predicción numérica del tiempo y de predicción climática para simular los procesos de superficie terrestre y la sensibilidad de dichos esquemas frente a cambios en los parámetros de suelo y vegetación. A continuación se discute la importancia de una descripción fisiográfica precisa en los modelos operativos de predicción del tiempo con alta resolución. Algunos ejemplos recientes de modelización muestran el impacto de la irrigación sobre terreno previamente seco y el efecto del drenado de humedales para convertirlos en terreno agrícola. También se describen estudios observacionales que muestran el impacto del cambio de uso de suelo en el régimen de precipitaciones.

ABSTRACT

The influence of human activities on climate and weather has aroused many discussions among the global change community. This contribution reviews, both from observation and modelling studies, the local climate and weather impacts due land use modification. Classical examples of such studies are the effect of deforestation on the climate in Amazonia and the “heat island effects” of cities. We start by studying the surface schemes used by NWP and climate models to simulate the land surface processes and the sensitivity of such schemes to changes in soil and vegetation parameters. Then, we proceed to discuss the importance of an accurate physiographic description for the high resolution short-term operational NWP models. Some recent modelling examples show both the impact of irrigation on previously dry terrain and the effect of draining of wetlands to convert them into agricultural land. Also some other observational studies show the impact of land-use change on the precipitation regime.

1. INTRODUCCIÓN

Las características de la superficie terrestre tienen una evolución que está íntimamente ligada a las características de la atmósfera con la que constantemente interacciona. El ciclo vegetativo anual se acomoda perfectamente a la sucesión de las estaciones y a las características atmosféricas (p.e., temperatura, precipitación, insolación, etc.) de las mismas. De hecho, los cambios climáticos naturales de carácter gradual se corresponden con cambios en la vegetación para adaptarse al nuevo ambiente atmosférico. Los cambios de origen antropogénico, tanto en las características de la superficie terrestre (p.e., introducción de nuevos cultivos, deforestación, irrigación, incendios, urbanización, etc.) (Pielke *et al.*, 2002) como en la composición atmosférica (p.e., aumento de CO₂, aerosoles, etc.) y su efecto en la evolución del clima son motivo de gran preocupación en la comunidad que estudia el cambio climático global (IPCC, 2001). El aumento de la temperatura media superficial debido a los dos factores es difícil de separar ya que en muchos casos tienden a actuar en la misma dirección. A modo de ejemplo, se puede citar el trabajo de Kalnay y Cai (2003) que han estimado un calentamiento de 0.27°C por siglo debido sólo al cambio de uso de suelo en los EE.UU.

Se ha prestado particular atención a los efectos en el clima derivados del aumento de gases con efecto invernadero. Sin embargo, los efectos derivados de la acción del hombre para alterar las características de la superficie terrestre no han merecido hasta el momento una atención comparable, salvo en algunos casos muy notables tales como la deforestación de la Amazonía o los efectos de la urbanización.

En este breve trabajo se revisará la importancia de una fina descripción de las características fisiográficas de la superficie terrestre para la predicción tanto del tiempo como del clima. La actual generación de modelos de alta resolución utilizados para la predicción del tiempo presta mucha atención a los procesos superficiales y a las bases de datos fisiográficas que describen la superficie terrestre. De hecho, una línea clara de mejora de dichos modelos está ligada con una mejor descripción de la vegetación y con una mejor inicialización de las variables del suelo.

2. EL USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO Y EN EL CLIMA

Muchos trabajos han estudiado la importancia relativa de los diferentes parámetros que describen la superficie terrestre en la modelización atmosférica (véase, p.e., Rodríguez *et al.* (2003) y las referencias citadas allí). Rodríguez-Camino y Avissar (1998) estudiaron los parámetros de la superficie terrestre más relevantes comparando diferentes esquemas y utilizando una técnica de Fourier (FAST). Este estudio demuestra que cuatro parámetros pueden explicar la mayor parte de la varianza de los flujos de calor superficiales en un amplio rango de condiciones ambientales. El contenido de agua en el suelo juega un papel

predominante en los flujos de calor. El parámetro de rugosidad es el más importante en los flujos de momento. El porcentaje de superficie cubierta por vegetación (veg) determina, en primer lugar, que proceso va a ser predominante en el flujo de calor latente: la evaporación directa desde los primeros cm de suelo o la transpiración de las plantas mediante la extracción de agua a través del sistema radicular. El índice foliar de área (LAI), en el caso de superficie vegetada, y la textura, en el caso principalmente de suelo desnudo, también tienen un impacto significativo en los flujos de calor. La textura determina también la disponibilidad de agua en el suelo. El parámetro de rugosidad es habitualmente más importante para el flujo de calor sensible que para el flujo de calor latente, y es más importante bajo condiciones de estratificación atmosférica estable. El contenido de agua del suelo y los parámetros de vegetación son los parámetros dominantes en condiciones de estratificación atmosférica inestable.

Mediante simulaciones bidimensionales Mahfouf *et al.* (1987) mostraron la sensibilidad atmosférica frente a las inhomogeneidades del suelo y de la vegetación en el caso de ausencia de forzamiento sinóptico y sobre terreno llano. Demostraron la gran influencia de la textura del suelo que a su vez influye en la disponibilidad de agua en el suelo. También demostraron la existencia de circulaciones de mesoscala en las zonas de transición entre suelo desnudo y suelo cubierto con vegetación, favoreciéndose el disparo de los procesos de convección en dichas zonas de transición. Finalmente, mostraron que una cubierta vegetal uniforme puede reducir la circulación de mesoscala producida por heterogeneidades del contenido de humedad del suelo.

Segal *et al.* (1988) estudiaron la generación de flujo térmicamente inducido por el contraste de zonas vegetadas y zonas de suelo desnudo. Demostraron que pueden llegar a alcanzarse intensidades similares a las de las brisas marinas en casos muy favorables de vegetación muy densa cubriendo grandes superficies y con condiciones ambientales favorables.

Blyth *et al.* (1994) demostraron, mediante experimentos de sensibilidad con un modelo de mesoscala en un caso HAPPEX-MOBILHY en el suroeste de Francia, que la precipitación local aumentaba hasta un 30% si el terreno estaba totalmente cubierto por bosque en lugar de ser suelo desnudo. La mitad de este aumento provenía de la retroalimentación positiva del agua interceptada que a su vez se evaporaba muy rápidamente. La mayor rugosidad del bosque, con sus efectos asociados físicos y dinámicos, explica el resto del aumento de precipitación y el aumento de la humedad del suelo. Pielke *et al.* (1998) también demostraron que la distribución de la precipitación puede ser alterada por modificaciones en la superficie terrestre.

3. IMPACTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO Y EN EL CLIMA

La especificación de las condiciones iniciales de contenido de agua en el suelo afecta a las predicciones en todas las escalas temporales desde el corto plazo hasta las integraciones

climáticas (véase, p.e., Garratt, 1993; Rowntree y Bolton, 1983; Rowell y Blondin, 1990; Yang *et al.*, 1994; Mahfouf, 1991; Schär *et al.*, 1999). El contenido de agua en el suelo controla directamente la partición de la energía radiativa neta que llega a la superficie del suelo y que es devuelta a su vez a la atmósfera en forma de calor latente y de calor sensible. Suelos muy húmedos devuelven la energía a la atmósfera en forma de calor latente dando lugar a una capa límite planetaria húmeda y de poca altura, mientras que suelos predominantemente secos devuelven la mayor de la energía en forma de calor sensible formándose una capa límite seca y de gran altitud (Garratt, 1992; Viterbo, 1996).

Se ha demostrado que fuertes gradientes horizontales en el contenido de agua del suelo pueden generar circulaciones de mesoscala de tipo brisa (Ookouchy *et al.*, 1984). De hecho, la intensidad de dichas circulaciones puede llegar a alcanzar la de las brisas marinas. Yan y Anthes (1988) mostraron que la circulación asociada con la brisa marina es considerablemente mayor en el caso de terreno seco que en el de terreno húmedo. Shen (1998) mostró que la humedad del suelo juega en papel relevante en la modificación de las brisas en los lagos. Lanicci *et al.* (1987) demostraron que fuertes variaciones horizontales en la humedad del suelo pueden alterar la localización e intensidad de las tormentas severas. Garret (1982) demostró también que el contenido de agua en el suelo afecta a la localización de las células convectivas vía el desarrollo de la capa límite. Taylor *et al.* (1997) demostraron en HAPEX-Sahel como un extremo gradiente de precipitación originó intensificación local de la convección originada por los temporales de gran escala que atravesaban la zona. Schär *et al.* (1999) demostraron en integraciones climáticas con un modelo regional una marcada retroalimentación positiva entre el contenido de humedad del suelo y la precipitación a través del mecanismo indirecto de aumento de la eficiencia de los procesos de precipitación convectiva en casos de suelo húmedos.

La sensibilidad de las predicciones, a diferentes plazos, realizadas con modelos frente a cambios en las condiciones iniciales de humedad del suelo conjuntamente con la alta incertidumbre con la se especifican dichas condiciones iniciales permite explorar la predecibilidad del sistema de predicción mediante la técnica de integración por conjuntos (EPS), obteniéndose los distintos miembros perturbando las condiciones iniciales de humedad del suelo. Fukutome *et al.* (2001) han utilizado un modelo de área limitada de atmósfera/superficie terrestre en modo acoplado y desacoplado para explorar la incertidumbre asociada a las condiciones iniciales de humedad del suelo en el medio plazo.

4. ESQUEMAS DE SUPERFICIE UTILIZADOS POR LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DEL TIEMPO Y DEL CLIMA

Los procesos en la superficie terrestre y su parametrización en los modelos de predicción del tiempo y del clima son importantes por: (i) redistribuir la energía radiante absorbida por el suelo en forma de calor latente y de calor sensible; (ii) determinar las condiciones de contorno inferior en las ecuaciones de la entalpía y de la humedad; (iii) determinar variables del tiempo tales como la temperatura y humedad relativa a 2 m y el viento a 10 m; y (iv) retroalimentar

otros procesos físicos tales como la formación de nubes bajas y el disparo de procesos convectivos. Para una revisión de las parametrizaciones de superficie terrestre tanto en modelos de predicción del tiempo y del clima véanse los trabajos de Garratt (1993), Schmugge y André (Eds., 1991) y Viterbo (1996). La mayoría de los esquemas actualmente utilizados (Dickinson *et al.*, 1993; Sellers *et al.*, 1986; Chen *et al.*, 1996; Noilhan y Planton, 1989; Giard y Bazile, 2000; Schrodin y Heise, 2001; Best *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2003) imitan la fisiología de las plantas para regular la apertura y cierre de los estomas de las plantas durante el proceso de transpiración. Los estomas son sensibles a ciertas condiciones medioambientales (p.e., la radiación solar, la temperatura, la humedad atmosférica, el dióxido de carbono y el contenido de agua en la zona radicular) y dichas condiciones regulan su apertura y cierre.

5. IMPORTANCIA DE LA DESCRIPCIÓN FISIOGRÁFICA DE LOS MODELOS

Tradicionalmente se han usado dos bases de datos globales para especificar las características fisiográficas en los modelos de predicción del tiempo y del clima: el producido por Wilson y Henderson-Sellers (1985) (WHS) y el producido por el International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP-2) (Hall *et al.*, 2003). La base de datos WHS posee una resolución de 1° y asigna los parámetros de vegetación mediante el uso de tablas. La base de datos ISLSCP-2 está basada en medidas de satélite y tiene una finalidad de uso bastante más amplia (véanse más detalles en <http://islscp2.sesda.com>) . La resolución disponible es de 0.25°, 0.5° y 1°.

En Europa se han realizado recientemente esfuerzos para incrementar la resolución de las bases de datos fisiográficas que se necesitan en la modelización de mesoscala (5-10 km) que está empezando a estar operativa en muchos centros. Champeaux *et al.* (2000) han producido 11 tipos de vegetación con una resolución de 2 km utilizando una técnica cluster automática a partir de valores máximos multitemporales del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtenidos a partir de datos de satélite del AVHRR NOAA. Recientemente, la base de datos ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003) se ha puesto también a disposición de la comunidad de modelización atmosférica. Esta nueva base de datos tiene unas características que hacen que satisfaga las actuales necesidades de los modelos atmosféricos en alta resolución: i) es global; ii) posee una resolución de 1 km; iii) hace uso de la información muy detallada sobre Europa procedente de los proyectos CORINE (Heymann *et al.*, 1993) y PELCOM (Mucher *et al.*, 2000); iv) utiliza mapas con la máxima resolución de NDVI que proporcionan las escalas temporales y espaciales adecuadas; v) clasifica en 215 ecosistemas lo que permite una mejor asignación de los parámetros de la vegetación; vi) incluye reglas de agregación para derivar los parámetros de superficie a la resolución del modelo deseada; y por último vii) admite la clasificación en mosaico para este tipo de esquemas (Avisar y Pielke, 1989).

Como ya se ha mencionado en la Sec. 2, los parámetros fisiográficos asociados a la descripción de la vegetación (porcentaje de vegetación, LAI, parámetro de rugosidad por la vegetación, etc.) son fundamentales para modelizar adecuadamente los procesos superficiales y para obtener flujos superficiales de calor y de momento que reproduzcan los valores observados. Las bases de datos fisiográficas que describen la vegetación se apoyan fundamentalmente en los productos procedentes de satélite. La mayoría de las bases de datos fisiográficas globales que contienen información de las características de superficie se han obtenido a partir de canales AVHRR. El uso de índices de vegetación (como p.e. el NDVI) derivados de datos AVHRR (véase (Huete *et al.*, 1994)), o similares, constituye la única aproximación práctica para obtener bases de datos de características vegetales de la superficie del suelo. No obstante, existen ambigüedades que impiden obtener de forma unívoca datos de vegetación, como *veg*(%) y LAI, a partir únicamente de información de índices de vegetación, como NDVI (Gutman y Ignatov, 1998).

La validación de los datos de vegetación (*veg*, LAI) obtenidos mediante satélite es un tema difícil si pretende hacerse globalmente. Fundamentalmente, porque son valores efectivos que se asignan a un píxel y que difícilmente tienen una correspondencia clara con los valores obtenidos *in situ*. El criterio último para evaluar una base de datos de vegetación utilizable en los modelos atmosféricos numéricos es la mejora de la predicción del tiempo (Fernández y Rodríguez, 2004). Las proporciones adecuadas de los flujos de calor latente y sensible en el balance energético, los valores realistas de la temperatura y humedad relativa a 2 m, etc. son indicativos de la calidad de los datos de vegetación utilizados.

6. IMPACTO DE LA IRRIGACIÓN Y DEL DRENAJE

Tanto la irrigación como el drenaje son dos formas extremas de cambiar el uso de suelo que lógicamente tienen su impacto en las circulaciones de mesoscala e incluso a escala sinóptica. La irrigación y el drenaje alteran el contenido de agua del suelo que se tendría naturalmente al alcanzarse el balance entre los aportes de la precipitación y los gastos por evapotranspiración y escorrentía. A su vez una alteración sustancial de la humedad del suelo propicia un cambio de vegetación que influye en la evapotranspiración, en la escorrentía y en menor medida en la precipitación.

Para buscar los efectos de la irrigación es natural prestar atención a las grandes zonas en las que se ha introducido la irrigación en un corto lapso de tiempo. Este es el caso de las Grandes Llanuras de EE.UU. La irrigación comenzó a principio de los 1940's (con sólo 7500 km² de terreno irrigado), alcanzando en los 1980's una extensión superior a los 60000 km². Barnston y Schickedanz (1984) mediante un análisis estadístico de la precipitación en la región de Texas Panhandle de las Grandes Llanuras encontraron un aumento del 25% en la precipitación que los autores asociaban directamente al fuerte aumento de superficie irrigada. Asimismo, se observó una reducción de las temperaturas máximas en aproximadamente 2° C. Hammer (1970) explicó, en el caso similar de Sudán, los anteriores cambios por la existencia de un embolsamiento de aire frío y húmedo sobre la zona irrigada que es origen de

convergencia, elevación del aire y formación de nubes que disparan más frecuentemente procesos de precipitación. Más recientemente, Moore y Rojstaczer (2001) usaron técnicas de funciones ortogonales empíricas para estudiar los cambios de precipitación inducidos por la irrigación en la totalidad de la región de las Grandes Llanuras y sobre un periodo de tiempo mayor. Contrariamente a las conclusiones de Barnston y Schickedanz (1984), la evidencia de precipitación inducida por la irrigación es en este estudio muy pequeña, siendo algo más grande sobre la región de Texas Panhandle y sobre el periodo reducido 1950-1982.

Otro ejemplo de modificación en la precipitación como consecuencia de la irrigación lo proporcionan Lohar y Pal (1995) para el caso de la precipitación premonzónica en la India. En este caso, el estudio de 20 años de datos (1973-1992) y la simulación numérica demuestran una clara tendencia a la reducción de la precipitación durante los años más recientes. El aumento de la humedad del suelo como consecuencia del incremento de la irrigación impide el desarrollo e intensificación de la circulación mesoscalar de tipo brisa marina, reduciendo a su vez el aporte de humedad en bajos niveles, que es esencial para disparar los procesos convectivos y como consecuencia se produce una reducción en la precipitación. Este caso presenta la peculiaridad de que la irrigación afecta a la circulación mesoscalar, reduciendo como consecuencia la precipitación.

El Sur de Florida es una región que ha experimentado grandes cambios en el uso de suelo a lo largo del siglo XX, incluyendo la conversión de regiones pantanosas de los Everglades en otras para uso agrícola y urbanización. Marshall *et al.* (2002) han demostrado mediante simulaciones numéricas con el modelo RAMS (Pielke *et al.*, 1992) que la zona exhibe una marcada sensibilidad frente a los cambios de uso de suelo. Además, hay evidencias a partir de simulaciones con el citado modelo RAMS de que el drenado de las zonas pantanosas con la intención de usarlas para cultivos de hortalizas de invierno, cítricos y caña de azúcar puede aumentar la frecuencia y severidad de las heladas, potencialmente peligrosas para la agricultura, en el Sur de Florida (Marshall *et al.*, 2003).

7. CONCLUSIONES

Tanto las características de uso de suelo como el contenido de agua del mismo afectan en las escalas temporales y espaciales que son relevantes en la predicción meteorológica a corto plazo y en los efectos climáticos locales y regionales. Las circulaciones mesoscalares pueden verse sensiblemente alteradas por los cambios en el suelo, muchos de ellos de carácter antropogénico. La península Ibérica ha experimentado grandes cambios en el uso de suelo (aumento de las superficies irrigadas, extensión de las zonas urbanizadas, degradación y desertificación del suelo, introducción masiva de cultivos en invernaderos, etc.) en el último medio siglo y es de esperar que muchos de dichos cambios hayan tenido asociados algunos de los efectos que se han mencionado más arriba. Existen muy pocos estudios de sensibilidad de las circulaciones mesoscalares frente a cambios drásticos en las condiciones del suelo en la península Ibérica que pueden ser muy relevantes tanto en temas de predicción como en temas de cambio climático. Una excepción son los trabajos de Moene *et al.* (1995) y de Miao *et al.*

(2003). Moene *et al.* (1995), en un estudio preliminar con el modelo HIRLAM, demuestran que la distribución de precipitación es sensible a las particularidades de la superficie terrestre, en particular a la humedad del suelo. Miao *et al.* demuestran que la degradación del terreno, en el sentido de eliminación de la vegetación, refuerza las brisa marina que incide sobre las cadenas montañosas del Mediterráneo español, pudiéndose facilitar el disparo de la convección cuando se dan las condiciones propicias. Los estudios de este tipo son esenciales para estimar futuros escenarios climáticos que vendrán condicionados no sólo por los efectos globales del incremento de los gases con efecto invernadero, sino también por las modificaciones antropogénicas en el uso del suelo. La limitación y control de los gases de efecto invernadero es un tema supranacional con fuertes repercusiones económicas y políticas globales, mientras que la modificación del uso del suelo, y sus posibles efectos regionales, puede ser controlada a nivel nacional.

REFERENCIAS

- Avissar, R. and Pielke, R.A. 1989. A parametrization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2113-2136.
- Balsamo, G., Bouyssel, F. and Noilhan, J. 2003. A bi-dimensional variational analysis of soil moisture from screen-level observations in a mesoscale numerical weather prediction model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (in press).
- Best, M., Bornemann, F.J., Chalcraft, B.V. and Wilson, C.A. 2000. Mesoscale model upgrade-Introduction of the land surface tile scheme (MOSES2). *Forecasting Research Technical Report No. 341*, UK Met. Office, Bracknell RG122SZ United Kingdom.
- Barnston, A.G. and Schickedanz, P.T. 1984. The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 865-888.
- Blyth, E., Dolman, J. and Noilhan, J. 1994. The effect of forest on mesoscale rainfall: an example from HAPEX-MOBILHY. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 445-454.
- Champeaux, J.L., Arcos, D., Bazile, E., Giard, D., Goutorbe, J.P., Habets, F., Noilhan, J. and Roujean, J.L. 2000. AVHRR-derived vegetation mapping over western Europe for use in numerical weather prediction models. *Int. J. Remote Sens.*, **21**, 1183-1199.
- Chen, F. and co-authors. 1996. Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268.
- Curtis, H.M., Pielke, R.A.Sr and Steyaert, L.T. 2003. Wetlands: Crop freezes and land-use change in Florida. *Nature*, **426**, 29-30.
- Dickinson, R.E. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS). Version 1e as coupled to the NCAR community climate model. *NCAR Technical Note/NCAR TN-387+STR*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Fernández, T. and Rodríguez, E. 2004. Tests with the ECOCLIMAP database in HIRLAM. (to appear in HIRLAM Newsletters).
- Fukutome, S., Prim, C. and Schär, C. 2001. The role of soil states in medium-range weather predictability. *Nonlin. Proc. Geophys.*, **8**, 373-386.
- Garratt, J.R. 1992. *The atmospheric boundary layer*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 316 pp.
- Garratt, J.R. 1993. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary treatment – A review. *J. Climate*, **6**, 419-449.

- Garrett, A.J. 1982. A parameter study of interactions between convective clouds, the convective boundary layer, and a forested surface. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1041-1059.
- Giard, D. and Bazile, E. 2000. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 997-1015.
- Gutman, G. and Ignatov, A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *Int. J. Remote Sensing*, **19**, 1533-1543.
- Hall, F.G., Meeson, B., Los, S. Steyaert, L., Brown de Colstoun, E., Landis, D., eds. 2003. ISLSCP Initiative II. NASA. DVD/CD-ROM NASA.
- Hammer, R.M. 1970. Cloud development and distribution around Khartoum. *Weather*, **25**, 411-414.
- Hess, R. 2001. Assimilation of screen level observations by variational soil moisture analysis. *Meteorolog. Atmos. Phys.*, **77**, 145-154.
- Heymann, Y. and Coauthors. 1993. CORINE land cover: Technical guide. Environment, nuclear safety and civil protection series, Commission of the European Communities, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg, 144 pp.
- Huete, A., Justice, C. And Liu, H. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, **49**, 224-234.
- IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalnay, E. and Cai, M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, **423**, 528-531.
- Lanicci, J.M., Carlson, T.N., and Warner, T.T. 1987. Sensibility of the Great Plains severe storm environment to soil moisture distribution. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2660-2673.
- Lohar, D. and Pal, B. 1995. The Effect of Irrigation on Premonsoon Season Precipitation over South West Bengal, India. *J. Climate.*, **8**, 2567-2570.
- Miao, J.-F., Kroon, L.J.M., Vilà-Guerau de Arellano, J. and Holstlag, A.A.M. 2003. Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over Eastern Spain. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **84**, 157-170.
- Mahfouf, J.-F., Richard, E. and Mascart, P. 1987. The Influence of Soil and Vegetation on the Development of Mesoscale Circulations. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 1483-1495.
- Mahfouf, J.-F. 1991. Analysis of soil moisture from near surface parameters: a feasibility study. *J. Appl. Meteorol.*, **30**, 1534-1547.
- Marshall, C.H.Jr., Pielke, R.A.Sr., Steyaert, L.T., Cronin, T.M., Willard, D.A., Jones, J.W., Smith III, T.J. and Irons, J.R., 2002. Impact of land-use management practices in Florida on the regional climate of South Florida and Everglades. Preprints, Joint Session 8: Surface/Atmosphere Interactions: Joint AMS Session with the 16th Conference on Hydrology and the 13th Symposium on Global Change and Climate Variations, January 13-17, Orlando, FL, J156-158.
- Marshall, C.H., Pielke, R.A.Sr. and Steyaert, L.T. 2003. Wetlands: Crop freezes and land-use change in Florida. *Nature*, **426**, 29-30
- Masson, V. , Champeaux, J.L., Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R. 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *J. Climate*, **16**, 1261-1282.
- Moene, A.F., de Bruin, H.A.R. and Holstlag, A.A.M. 1995. Validation of surface parametrization of HIRLAM, using surface-based measurements and remote sensing data. KNMI Scientific Report, WR 95-07, 63 pp.
- Moore, N. and Rojstaczer, S. 2001. Irrigation-Induced Rainfall and the Great Plains. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1297-1309.
- Mucher, C.A. and Coauthors. 2000. Development of a consistent methodology to derive land cover information on a European scale from remote sensing for environmental modelling. PELCOM Report (ENV4-CT96-0315). European Commission. Directorate General XII-D. 299 pp.
- Navascués, B., Rodríguez, E., Ayuso, J.J. and Järvenoja, S. 2003. Análisis of surface variables and parameterization of surface processes in HIRLAM. Part II: Seasonal assimilation experiment. HIRLAM Technical Report No. 59, Norrköping, Sweden. [Available from <http://hirlam.knmi.nl>].
- Noilhan, J. and Planton, S. 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.

- Ookouchi, Y., Segal, M., Kessler, R.C. and Pielke, R.A. 1984. Evaluation of soil moisture effects of the generation and modification of mesoscale circulations. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2281-2292.
- Pielke, R.A., Walko, R.L., Steyaert, L.T., Vidale, P.L., Liston, G.E., Lyons, W.A. and Chase, T.N. 1998. The influence of anthropogenic landscape changes on weather in South Florida, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1663-1673
- Pielke, R.A. and co-authors. 1999. A comprehensive meteorological modelling system – RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, **49**, 69-91.
- Pielke, R.A. Sr *et al.* 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevancy o climate-change policy beyond the radiative influence of greenhouse gases. *Phil. Trans. R. Soc. Lond, A* **360**, 1-15.
- Rodríguez-Camino, E. and Avissar, R. 1998. Comparison of three land-surface schemes with the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST). *Tellus*, **50A**, 313-332.
- Rodríguez, E., Navascués, B., Ayuso, J.J. and Järvenoja, S. 2003. Análisis of surface variables and parameterization of surface proceses in HIRLAM. Part I: Approach and verification by parallel runs. HIRLAM Technical Report No. 58, Norrköping, Sweden. [Available from <http://hirlam.knmi.nl>].
- Rowell, D.P. and Blondin, C. 1990. The influence of soil moisture distribution on short-range rainfall forecasting in the West African Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 1471-1485.
- Rowntree, P.R. and Bolton, J.A., 1993. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 501-526.
- Schär, C., Lüthi, D., Beyerle, U. and Heise, E. 1999. The soil-precipitation feedback: a process study with a regional climate model. *J. Climate*, **12**, 722-741.
- Schmugge, T.J. and André, J.-C. (Eds.) 1991. *Land Surface Evaporation. Measurement and Parameterization*. Springer-Verlag, New York, U.S.A., 424 pp.
- Schrodin, R. and Heise, E. 2001. The multi-layer version of the DWD soil model TERRA_LM. COSMO Technical Report No.2, DWD, 63004 Offenbach, Germany. [Available from <http://www.cosmo.model.org>].
- Segal, M., Avissar, R., McCumber, M.C. and Pielke, R.A. 1988. Evaluation of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulations. *J. Atmos. Sci.*, **4**, 2268-2292.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A. 1986. A simple biosphere model (Sib) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- Shen, J.-M., 1998. Numerical modelling of the effects of vegetation and environmental conditions on the lake breeze. *Bound.-Layer Meteor.*, **87**, 481-498.
- Viterbo, P. 1996. The representation of surface processes in general circulation models. Thesis submitted for the degree of Doutor em Fisica of the University of Lisbon. ECMWF. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK.].
- Wilson, M.F. and Henderson-Sellers, A. 1985. Cover and soil datasets for use in general circulation models. *J. Climatol.*, **5**, 119-143.
- Yang, R. and Anthes, R.A. 1988. The effect of variation in surface moisture on mesoscale circulations. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 192-208.
- Yang, R., Fennessy, M.J. and Shukla, J. 1994. The influence of initial soil wetness on medium-range surface weather forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 471-485.