APLICACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE VEGETACIÓN DINÁMICA A UNA CUENCA SEMIÁRIDA DEL SURESTE DE ESPAÑA

M. Pasquato[1], C. Medici[1], F. Francés[1]

[1] Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (España)
e-mail: marpas@posgrado.upv.es, chme1@dihma.upv.es, ffrances@hma.upv.es

RESUMEN. En este trabajo se ha implementado a nivel distribuido un submodelo de vegetación dinámica desarrollado a escala de parcela por Quevedo y Francés (2005) y Quevedo (2010); se ha acoplado a un modelo hidrológico ya existente, TETIS (Vélez et al. 2009, 2007; Francés et al., 2007, 2002), dando origen al modelo TETIS-VEG. El modelo TETIS-VEG reproduce los fenómenos de crecimiento de las plantas y de caída de hojas estacional o causada por el estrés hídrico. Tiene en cuenta, además, la regulación de la transpiración por parte de las plantas debida a variaciones de la humedad del suelo. Se ha aplicado el modelo a la cuenca de Valdeinfierno (España), contrastando los resultados obtenidos con imágenes de NDVI provenientes de sensores satelitales. La correlación entre los valores del índice de biomasa relativa (R) calculado por el modelo y los valores de NDVI resulta positiva y significativa. El modelo consigue además reproducir las diferencias de densidad de vegetación entre ladera norte y sur.

ABSTRACT. The aim of this work was to implement at a distributed level a dynamic vegetation model developed at plot scale by Quevedo and Francés (2005) and Quevedo (2010), coupling it with the distributed hydrological model TETIS (Vélez et al. 2009, 2007; Francés et al., 2007, 2002) to obtain the so called TETIS-VEG model. This model reproduces the plant growth and the leaf shedding, caused either by the seasonal cycle or by water stress. Besides, it takes into account the transpiration regulation performed by plants, due to variations in the soil moisture content. The model was tested in the Valdeinfierno catchment (Spain) using MODIS NDVI images. A positive and statistically significant correlation was found between NDVI values and a relative biomass index (R) simulated by the model. The model, furthermore, succeeds in reproducing the differences in vegetation density between northern and southern slopes.

1.- Introducción

La vegetación y el ciclo hidrológico están intrínsecamente asociados. La humedad del suelo constituye la conexión física entre el suelo, el clima y la vegetación (Isham et al., 2005). El balance hídrico local es fundamental para explicar la distribución (Stephenson, 1990) y la productividad (Churkina y Running, 1998; Ciais et al., 2005) de la vegetación. Por otro lado, la composición y distribución de las comunidades vegetales son de fundamental importancia para evaluar la evapotranspiración y la generación de escorrentía (Dunn y Mackay, 1995).

Los ecosistemas en climas áridos y semiáridos están controlados por la disponibilidad de agua: aunque haya otras causas de estrés (fuego, pasto, disponibilidad de nutrientes, etc.), la humedad del suelo es el recurso más importante que afecta a la estructura y a la organización de la vegetación. Las plantas mismas juegan un papel importante en los sistemas áridos y semiáridos: tienen un rol activo en el balance hidrológico y sufren al mismo tiempo las condiciones de aridez y estrés hídrico que ellas mismas producen (Rodriguez-Iturbe et al., 2001). En climas áridos-semiáridos se nota una correlación negativa entre insolación y densidad de vegetación en las comunidades de coníferas y en algunas comunidades arbustivas (García-Pausas y Fons-Esteve, 1992; Gonzáles-Hidalgo et al., 1996a); esto se explica por ser la mayor insolación causa de mayor evapotranspiración y, consecuentemente, menor humedad en el suelo (González-Hidalgo et al., 1996b).

Hoy en día hay varias maneras de enfrentarse al tema de la modelación de la vegetación. La mayoría de los modelos hidrológicos son capaces de representar correctamente los procesos hidrológicos a escala de cuenca, pero consideran la vegetación como un parámetro estático. Los escenarios de cambio climático para el siglo XXI del IPCC predicen modificaciones tanto en el régimen de precipitaciones como de temperaturas, es decir, los principales inputs de los modelos hidrológicos. Cabe esperar que cambios en las temperaturas y contenido de humedad en el suelo den lugar a cambios en la cubierta vegetal. Para tener en cuenta estas eventualidades, se han desarrollado los modelos de vegetación dinámica acoplados a los modelos de superficie. Estos modelos tienen una base física y fisiológica, pero requieren una gran cantidad de datos y parámetros (Dawes et al., 1997; Mackay y Band, 1997; Cao y Woodward, 1998; Montaldo et al., 2005). Quevedo y Francés (2005) y Quevedo (2010) desarrollaron un modelo conceptual dinámico de vegetación-suelo (llamado HORAS), especificadamente diseñado para los ecosistemas áridos y semiáridos, que necesita una limitada cantidad de inputs y utiliza un número reducido de parámetros. El modelo HORAS, pensado a escala de parcela, se utilizará en este estudio a escala distribuida y acoplado al modelo hidrológico conceptual TETIS (Vélez et al. 2009, 2007;

Francés et al., 2007, 2002) para la simulación de la dinámica de la vegetación en la cuenca de Valdeinfierno (España). El acoplamiento de los dos modelos, hidrológico y de vegetación, da origen al modelo TETIS-VEG, modelo conceptual distribuido para la simulación de las diferentes componentes de la escorrentía y de las dinámicas de la vegetación.

2.- Caso de estudio y datos disponibles

La cuenca de Valdeinfierno (latitud 37º48'N, longitud 1º57'O) se sitúa en la provincia de Almería, a excepción de sus extremos oriental, en que se encuentra la presa de Valdeinfierno, y septentrional, que pertenecen a la provincia de Murcia. Tiene una superficie de 429 km² y está drenada por el río Luchena, afluente del río Guadalentín, en la cuenca del río Segura.

El clima es semiárido. La precipitación media anual, registrada en la estación hidrometeorológica de la presa de Valdeinfierno en el período 1933-2009, es de 328 mm. Las temperaturas medias mensuales varían entre los 6ºC en enero y los 23ºC en julio y agosto. La evapotranspiración potencial (ETP) anual, calculada con la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), resulta aproximadamente de 1180 mm, valor notablemente superior al de la precipitación media anual, confirmando el carácter semiárido del clima de la zona.

La cobertura vegetal del suelo se reparte entre bosque de coníferas (33% de la superficie), matorral (9%), matorral mixto bosque (18%) y cultivos agrícolas (39%). Las zonas urbanas y de suelo desnudo ocupan el 1% de la superficie total.

Para la implementación del modelo hidrológico y de vegetación se ha discretizado el dominio espacial en celdas de 250 m de lado.

Fig.1. Delimitación de la cuenca de Valdeinfierno; posición de las estaciones hidrometeorológicas y del embalse de Valdeinfierno.

En la Fig.1 se evidencian los límites de la cuenca de Valdeinfierno y la posición de las estaciones hidrometeorológicas cuyos datos han sido utilizados en este estudio. Los datos de caudal con los que se han contrastado los resultados del modelo hidrológico han sido calculados a partir de los niveles en el embalse de Valdeinfierno.

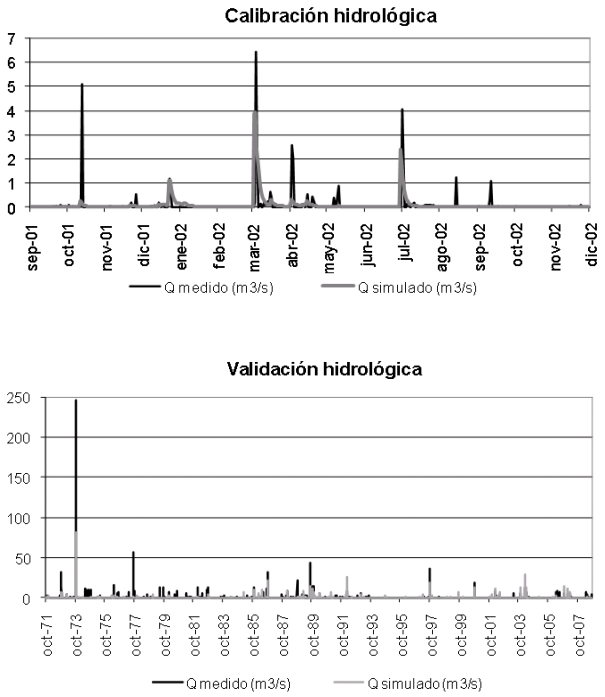

Fig.2. Resultado de la calibración y de la validación hidrológica.

Los datos hidrometeorológicos y de aforo utilizados para la calibración y validación del modelo hidrológico se refieren a los años 1971-2009 (Fig.2). Se consideraron los años 2001-2002 para la calibración (RMSE=0.4, índice Nash-Sutcliffe=0.32) y los demás años para la validación (RMSE=1.8, índice Nash-Sutcliffe=0.38). Desde el punto de vista hidrológico, la calibración no resulta excelente, a causa de errores importantes en los datos de precipitación y de caudal; sin embargo, la reproducción de las características hidrológicas de la cuenca se considera suficiente para el uso de sus simulaciones en el submodelo de vegetación. El hecho de que el índice de Nash-Sutcliffe no empeora en validación indica que la calibración es robusta. El modelo de vegetación se ha calibrado y validado en el período 2001-2009 en el que se dispone de imágenes satelitales MODIS de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; resolución 250 m, 16 días) con las cuales se han podido contrastar los resultados del modelo. En la sección 3 se exponen los resultados obtenidos en el proceso de calibración y validación.

En el intervalo de años 2001-2009 se evidencia una correlación espacial negativa (r medio = -0.18) y significativa (nivel de significancia 1%) entre los valores de NDVI y los valores de insolación en las zonas cubiertas por bosque de coníferas. Esta correlación se ha calculado en cada paso temporal (16 días), comparando los valores de NDVI e insolación de las celdas en las que se ha subdividido la cuenca (250 x 250 m). En las zonas de matorral o matorral mixto bosque no se evidencia una correlación clara.

3.- Descripción del modelo

El modelo TETIS (Vélez et al. 2009, 2007; Francés et al., 2007, 2002) es un modelo hidrológico conceptual y distribuido con parámetros con significado físico. El cálculo de la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, suponiendo que el agua se distribuye en cinco tanques conectados entre sí (almacenamiento estático, subsuperficial, gravitacional, acuífero y cauce). En el modelo acoplado TETIS-VEG, el modelo hidrológico proporciona como input al submodelo de vegetación la cantidad de agua presente en el tanque de almacenamiento estático, que es el agua retenida por las fuerzas de capilaridad en la zona superior del suelo y que sólo puede salir de éste a través de la transpiración de las plantas o de la evaporación directa desde el suelo. Este tanque corresponde a la zona no saturada del suelo; la vegetación actúa directamente sobre el balance de este importante compartimiento, influyendo sobre la distribución del agua en el suelo.

El modelo HORAS, presentado en detalle por Quevedo y Francés (2005) y Quevedo (2010), tiene una estructura similar al modelo TETIS, utilizando dos tanques que representan la interceptación de lluvia por la cubierta vegetal y el agua en la zona capilar del suelo. En HORAS, para simular el desarrollo de la vegetación, se ha definido la variable de estado R, denominada biomasa foliar relativa. Los valores de R están dentro del intervalo [0-1]. Si R es igual a 0 se admite que no hay vegetación y que toda la humedad en el suelo está disponible para la evaporación desde el suelo; por el contrario, si R es igual a 1, la vegetación se halla en su estado de desarrollo máximo y la transpiración T corresponde al valor máximo que le permita la humedad del suelo y la evapotranspiración potencial residual.

La ecuación original se compone de un término de crecimiento que depende de la transpiración y un término de muerte que depende de la misma biomasa foliar relativa R y del estrés hídrico ζ:

$$\frac{dR}{dt} = \alpha\left(\frac{T}{T_{mx}}\right)^{c} - k_{est}\left(1+\zeta^{q}\right)R \qquad (1)$$

Los parámetros a calibrar son α, razón entre la asimilación máxima de carbono y la biomasa potencial de hojas, T_{mx}, intensidad máxima de transpiración, c, coeficiente de forma, q, coeficiente de efectos no lineales y k_{est}, comprende 5 coeficientes de caída estacional de hojas, resultando la primavera subdividida en dos períodos distintos. El estrés hídrico depende de la insolación a través de la ETP, que está corregida para incluir el efecto de la cantidad de radiación solar recibida en cada celda según su orientación de ladera (Medici et al., 2008).

Considerando el funcionamiento del modelo y teniendo en cuenta que la correlación entre insolación y NDVI resulta significativa sólo en el caso de cobertura vegetal de bosque de coníferas, se ha decidido calibrar y testar el modelo sólo en las zonas de pinar. Siendo perennes las especies consideradas, se elimina en la ecuación diferencial de R el término de caída de hojas estacional y se considera un único parámetro k_{ws}, constante en el tiempo, que controla la caída de hojas por estrés hídrico:

$$\frac{dR}{dt} = \alpha\left(\frac{T}{T_{mx}}\right)^{c} - k_{ws}\zeta^{q}R \qquad (2)$$

En este trabajo se ha decidido probar también un modelo que considere un crecimiento logístico de la población, por su amplio uso en la modelización de dinámicas poblacionales (Werker y Jaggard, 1997):

$$\frac{dR}{dt} = \alpha\left(\frac{T}{T_{mx}}\right)^{c}\left(1-R\right)^{a} - k_{ws}\zeta^{q}R \qquad (3)$$

Se introduce de esta forma un sexto parámetro a calibrar, α. Se tendrá que evaluar si este segundo modelo comporta una mejoría en la simulación de la dinámica de la vegetación y, en este caso, si la mejora justifica la introducción de un parámetro adicional, teniendo en cuenta el principio de parsimonia estadística de Occam.

4.- Resultados del proceso de calibración y validación

Como se ha comentado anteriormente, se encontró una correlación significativa entre insolación y NDVI. Se ha considerado por lo tanto oportuno dividir la superficie boscosa en 4 clases, según su insolación. En general, aparte de los casos en los que la topografía influye con efectos de sombra, en la primera clase se hallan las celdas (dimensión 250 x 250 m) con orientación hacia el norte, en la cuarta clase las celdas con orientación hacia el sur, y en la segunda y tercera clase las celdas con orientaciones intermedias. Las celdas de cada clase, por lo tanto, reciben una insolación relativamente homogénea, lo cual nos hace suponer que tendrán un comportamiento similar desde el punto de vista del desarrollo de la vegetación. Se ha decidido analizar estas cuatro clases porque, siendo el modelo conceptual, no se pretende reproducir con nivel de detalle de celda ni los flujos del ciclo hidrológico, ni las dinámicas de la vegetación.

La calibración de los dos modelos propuestos se efectuó manualmente, intentando maximizar en el tiempo la correlación entre el R medio de cada clase y la correspondiente media de NDVI. Cabe destacar que la variable de estado R y el índice de vegetación NDVI no representan exactamente la misma característica física; se simula una capacidad de transpiración respecto a la capacidad potencial máxima de la especie en cuestión, y se mide "cuánto es verde" la superficie considerada. Sin embargo, ambas variables se refieren al estado de la vegetación y por lo tanto se intenta maximizar la correlación entre las dos en el proceso de calibración del modelo de vegetación.

Para reproducir la variabilidad espacial inicial de la vegetación se asignó a la variable de estado R, en cada celda, el respectivo valor de NDVI. Fue necesario consecuentemente considerar el primer año (septiembre 2001 – septiembre 2002) de simulación como período de puesta en marcha del modelo, para que las condiciones iniciales no afectaran demasiado los resultados. Se utilizó el período entre septiembre 2007 y octubre 2009 para la calibración del modelo de vegetación. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos por calibración de los parámetros del modelo descrito por la Ec. (2).

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo descrito por la Ec. (2), resultantes del proceso de calibración.

Parámetro	Descripción	Valor
T_{mx} [mm]	Intensidad máxima de transpiración	4.70
c [-]	Coeficiente de forma	0.054
α [-]	Razón entre asimilación máxima de carbono y biomasa potencial de hojas	0.0026
q [-]	Coeficiente de efectos no lineales	3
k_{ws} [day^{-1}]	Coeficiente de caída de hojas por estrés hídrico	0.004

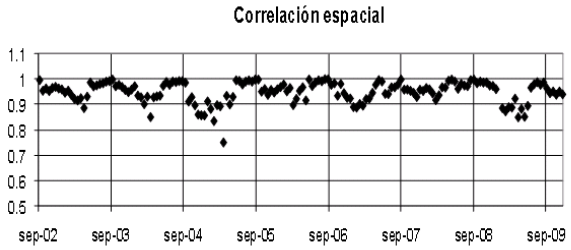

Fig.3. Correlación cruzada de Kendall entre los valores medios de R y de NDVI de cada clase a lo largo del tiempo para el modelo descrito por la Ec. (2).

Los valores del índice de correlación cruzada de Pearson entre las series temporales de los valores medios de R y NDVI para cada clase (desde la menos insolada a la más insolada) en el período de calibración son respectivamente 0.31; 0.41; 0.46; 0.48 ($p<0.01$). En el período de validación la correlación resulta respectivamente 0.20; 0.29; 0.30; 0.26 ($p<0.01$). En la Fig. 4 se visualizan las curvas que han dado origen a estos resultados en calibración y validación. En cada paso de tiempo, se ha además evaluado la capacidad del modelo de reproducir la variabilidad espacial del NDVI observado. Para ello se ha calculado la media de la correlación cruzada de Kendall entre los valores medios de R y de NDVI de cada una de las 4 clases previamente definidas, obteniendo una valor muy alto, de 0.95 (Fig.3), lo cual significa que el modelo logra simular adecuadamente las diferencias entre estas clases en el espacio y a lo largo del tiempo.

En la Fig. 4 se nota un retraso en la simulación de los mínimos y máximos de la variable *R* con respecto a los mínimos y máximos de NDVI, en la mayoría de los años simulados. Este desfase sería aceptable en el caso en que se demostrara que la transpiración de las plantas tuviera una inercia mayor respecto al NDVI, que es una medida más bien de su "aspecto verde" que de biomasa.

Para mejorar la sincronización del *R* y del NDVI se ha probado el modelo logístico, representado por la Ec. (3). En calibración y validación se han utilizado los mismos intervalos temporales elegidos para probar el modelo precedente. En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros del modelo logístico obtenidos por calibración.

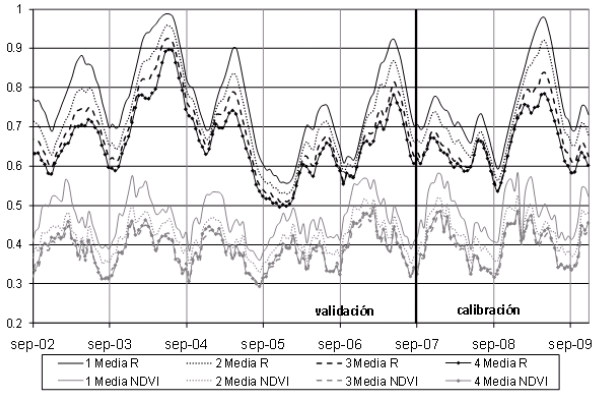

Fig.4. Resultado de calibración y validación del modelo descrito por la Ec. (2). En negro los valores de R, en gris los valores de NDVI medios para cada clase. Las clases son ordenadas desde la menos insolada a la más insolada.

Tabla 2. Valores de los parámetros del modelo descrito por la Ec. (3), resultantes del proceso de calibración.

Parámetro	Descripción	Valor
T_{mx} [mm]	Intensidad máxima de transpiración	5
c [-]	Coeficiente de forma	0.001
a [-]	Exponente del factor (1-R)	0.4
α [-]	Razón entre asimilación máxima de carbono y biomasa potencial de hojas	0.0045
q [-]	Coeficiente de efectos no lineales	3
k_{ws} [day^{-1}]	Coeficiente de caída de hojas por estrés hídrico	0.0033

Los valores del índice de correlación cruzada de Pearson entre las series temporales de los valores medios de R y NDVI en cada clase son respectivamente: 0.51; 0.56; 0.59; 0.56 ($p<0.01$). En el período de validación la correlación resulta respectivamente: 0.40; 0.49; 0.52; 0.48 ($p<0.01$) (Fig. 6).

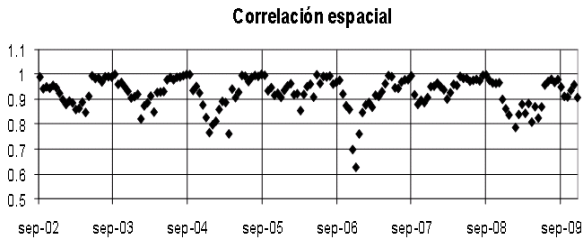

Fig.5. Correlación cruzada de Kendall entre los valores medios de R y de NDVI de cada clase a lo largo del tiempo para el modelo descrito por la Ec. (3).

En este caso el modelo empeora ligeramente la representación espacial, dando una media de la correlación cruzada de Kendall entre los valores medios de R y de NDVI de cada clase a lo largo del tiempo de 0.93 en lugar de 0.95 obtenido con el modelo no-logístico (Fig.5).

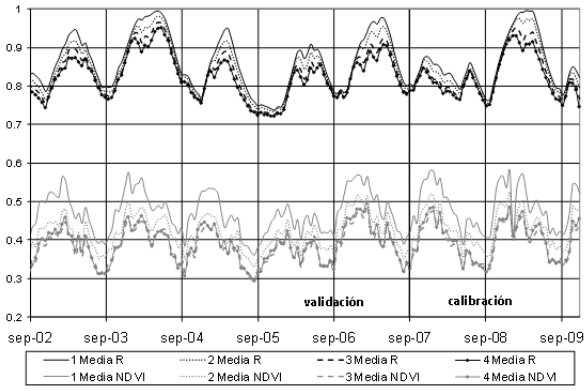

Fig.6. Resultado de calibración y validación del modelo descrito por la Ec. (3). En negro los valores de R, en gris los valores de NDVI medios para cada clase. Las clases son ordenadas desde la menos insolada a la más insolada.

5.- Discusión

Ambos modelos presentan una correlación temporal positiva y estadísticamente significativa entre los valores medios de *R* y NDVI en cada una de las clases consideradas.

Con el primer modelo se nota una separación entre las 4 curvas similar para las dos variables, simulada y medida, denotando un buen comportamiento del modelo a la hora de simular las diferencias en el estado de la vegetación en zonas con insolación diferente (Fig.4). De hecho, la correlación espacial entre las cuatro clases resulta muy buena. Por el contrario, la correlación temporal resulta afectada por un desfase entre las dos variables que se justificaría solamente demostrando que hay un desfase en los valores reales de transpiración, de la que depende el término de crecimiento en la Ec.2, y NDVI. Es necesario efectuar ulteriores análisis para verificar si existe una razón física que explique este aspecto del comportamiento del modelo. Se propone, cómo línea futura de investigación, comparar los mapas de NDVI disponibles con datos de evapotranspiración real obtenidos por satélite.

Por lo que se refiere al segundo modelo (ecuación de tipo logístico) se nota una mejora sustancial respecto al modelo precedente desde el punto de vista de la correlación temporal de las medias de *R* y NDVI de cada una de las clases. El desfase notado en la Fig.4 se presenta en este caso de forma menos acentuada, y solamente en los años 2004 y 2005. La correlación espacial empeora ligeramente y la reproducción de las diferencias en el estado de la vegetación entre las 4 clases no es tan marcada como en el caso del uso de la Ec. (2), a parte en los picos de mayor desarrollo de la vegetación. En particular, en los tramos ascendentes del gráfico de *R* (Fig.6) las cuatro curvas tienden a confundirse entre sí, determinando una disminución de la correlación espacial.

6.- Conclusiones

Se ha presentado el modelo conceptual distribuido TETIS-VEG resultante del acoplamiento del modelo hidrológico TETIS y del modelo de vegetación HORAS.

El modelo simula el crecimiento de la vegetación considerando una dependencia de la transpiración y el decaimiento de las hojas proporcionalmente al estrés hídrico. La ETP, calculada a partir de los datos registrados por las estaciones meteorológicas, se corrige teniendo en cuenta la mayor o menor insolación que cada celda recibe debido a factores topográficos.

Se ha comprobado el funcionamiento del modelo en la cuenca de Valdeinfierno (España), contrastando los resultados de la simulación de las dinámicas de la vegetación con datos de NDVI registrados por sensores satelitales.

En la zona de estudio se evidencia una correlación espacial negativa, estadísticamente significativa, entre el valor de insolación de cada celda y el respectivo valor de NDVI para las zonas con cobertura vegetal de coníferas.

Se han dividido las celdas que presentan cobertura vegetal de coníferas en 4 clases, según la insolación recibida.

Para la modelización de la vegetación se ha testado la ecuación original del modelo HORAS (Ec. (2)) y una ecuación de tipo logístico (Ec. (3)).

La ecuación original demuestra un muy buen comportamiento a la hora de representar las diferencias en la densidad de vegetación según la insolación. La correlación temporal entre los valores de *R* y NDVI es positiva y estadísticamente significativa. Se evidencia, no obstante, un desfase entre máximos y mínimos de las variables simuladas y medidas que se podría explicar solamente si se demostrara un desfase similar entre la transpiración real y el NDVI.

El modelo con ecuación de tipo logístico presenta un desfase temporal entre *R* y NDVI casi nulo; la correlación temporal entre las dos variables resulta, de hecho, más alta que con el modelo original. Sin embargo, empeora la simulación de las diferencias entre densidades de vegetación según la insolación.

Son necesarias ulteriores verificaciones para poder elegir el modelo que mejor reproduzca la dinámica de la vegetación. Puede que, según el objetivo del estudio, sea recomendable el uno o el otro modelo.

Agradecimientos. Este trabajo de investigación se ha financiado a través de los proyectos FLOOD-MED (ref.: CGL2008-06474-C02-02/BTE), SCARECE-CONSOLIDER (ref.: CSD2009-00065), HYDRO-VEG (Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua)

7.- Referencias

Cao, M., y Woodward, F.I.N., 1998. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology* 4, nº. 2: 185–198.

Ciais, P., Cox, P .Friedlingstein, P. , Sitch, S,. Huntingford, C. , Gedney, N., et al., 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology* 14, nº. 9: 2015–2039.

Churkina, G., y Running, S. W., 1998. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems* 1, nº. 2: 206–215.

Dawes, W. R, Zhang, L., Hatton, T. J , Reece, P. H., Beale, G. T. H. y . Packer, I., 1997. Evaluation of a distributed parameter ecohydrological

model (TOPOG_IRM) on a small cropping rotation catchment. *Journal of Hydrology* 191, nº. 1: 64–86.

Dunn, S. M., y Mackay, R. , 1995. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology* 171, nº. 1: 49–73.

Francés, F., Velez, J. I. y Vélez, J. J ., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332, nº. 1: 226–240.

Francés, F., Vélez, J. J., Vélez, J. I., y Puricelli, M., 2002. Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. Presentación Oral. Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Las Vegas, USA.

García-Pausas, J. y Fons-Esteve, J., 1992. Estructura i creixement d'algunes pinedes en diferente situacions topográfiques. *Fot Bot. Mis* nº8: 199–213.

González-Hidalgo, J. C.G, Bonet, A. y Echeverría, M. T., 1996a. Efecto de la orientación de la ladera sobre algunas comunidades arbustivas del semiárido central de la depresión del Ebro.*Mediterránea*. nº15: 21-32.

González-Hidalgo, J. C, Sánchez-Montahud, J. R, y Bellot-Abad. 1996b. Efecto de la vegetación y orientación de la ladera en perfiles de humedad en el suelo de un ambiente semiárido del interior de España. *Cuadernos I. Geografica* nº22: 81-96.

Hargreaves, G. H, y Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1, nº. 2: 96–99.

Isham, V., Cox, D. R., Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A. y Manfreda, S., 2005. Representation of space–time variability of soil moisture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 461, nº. 2064: 4035-4055.

Mackay, D. S, y Band, L. E., 1997. Forest ecosystem processes at the watershed scale: dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth. *Hydrological Processes* 11, nº. 9: 1197–1217.

Medici, C., Butturini, A., Bernal, S., Vázquez, E., Sabater, F., Vélez, J. I. y Francés, F. , 2008. Modelling the non-linear hydrological behaviour of a small Mediterranean forested catchment. *Hydrological Processes* 22, nº. 18: 3814–3828.

Montaldo, N., Rodena, R., Albertson, J. D y Mancini, M., 2005. Parsimonious modeling of vegetation dynamics for ecohydrologic studies of water-limited ecosystems. *Water Resources Research* 41: W10416.1-W10416.16

Quevedo, D. I. 2010. Desarrollo de un modelo conceptual dinámico suelo-vegetación para zonas áridas y semiáridas. Tesis doctoral.

Quevedo, D. I., y Francés, F. . 2005. A conceptual dynamic vegetation-soil model for arid and semiarid zones. *Hydrology and Earth System Science* nº12: 1175-1187.

Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, F. Laio, y L. Ridolfi. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress:: I. Scope and general outline. *Advances in Water Resources* 24, nº. 7: 695–705.

Stephenson, N. L. 1990. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *American naturalist* 135, nº. 5: 649–670.

Vélez, J. 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. PhD Tesis. Universidad Politécnica de Valencia.

Vélez, J. J., Puricelli, M., López Unzu, F., y Francés, F., 2009. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences* nº13: 229-246.

Vélez, J. J., Unzu, L., Puricelli, M., y Francés, F., 2007. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4, nº. 2: 909–956.

Werker, A. R., y Jaggard, K. W., 1997. Modelling asymmetrical growth curves that rise and then fall: applications to foliage dynamics of sugar beet (Beta vulgaris L.). *Annals of Botany* 79, nº. 6: 657-665.