

Relaciones entre los cambios de cubierta vegetal y recursos hídricos en las cuencas hidrográficas: evidencias e incertidumbres

Francesc Gallart, Pilar Llorens

Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) / CSIC, Barcelona
francesc.gallart@idaea.csic.es

1. Introducción

Después de un largo período que podemos denominar pre-científico (Calder, 1998a; Andréassian, 2004), a partir de mediados del siglo XX los trabajos experimentales permitieron asentar las bases fundamentales de las relaciones entre cubierta vegetal y respuesta hidrológica en las cuencas hidrográficas (Hibbert, 1967; Bosch y Hewlett, 1982):

- 1. La reducción de la cubierta forestal aumenta el aporte de agua.*
- 2. El establecimiento de una cubierta forestal sobre tierras escasamente vegetadas disminuye el aporte de agua.*

A pesar de los debates y escepticismos iniciales, la aceptación y desarrollo de este nuevo paradigma entre las comunidades científicas hidrológica y climática ha sido relativamente rápida, con la publicación de varias revisiones posteriores (Sahin y Hall, 1996; Lu et al. 2001; Brown et al, 2005; Cosandey et al. 2005). La comunidad forestal ha sido algo más impermeable, pero recientemente ya ha tomado un claro partido positivo (FAO, 2006; IUFRO, 2007; Birot et al. 2011).

En estos momentos, los distintos aspectos de este paradigma están lo suficientemente establecidos para la toma de decisiones, aunque todavía hay un claro retraso en el conocimiento de algunos aspectos relevantes como el papel de distintas especies o tratamientos forestales en la respuesta hidrológica de las cuencas.

En este trabajo se resumen los efectos de los cambios de la cubierta sobre del balance de agua, resaltando los aportes anuales y los principales aspectos asociados como son los efectos sobre los fenómenos extremos (crecidas y caudales de estiaje), la humedad del suelo y la recarga de acuíferos. Finalmente se plantan las principales

incertidumbres existentes respecto a los efectos sobre la lluvia y el papel de las distintas especies arbóreas y diversos tratamientos forestales.

2. El balance de agua de distintas cubiertas vegetales

Las diferencias biofísicas entre los árboles y la vegetación herbácea determinan distintos patrones de intercambio de masa y energía con la atmósfera y el suelo. Estas diferencias se reflejan en distintos parámetros en las ecuaciones de evapotranspiración (Monteith, 1965) y se suelen simplificar teniendo en cuenta solamente los principales factores limitantes (Calder, 1998b).

Podemos resumir las diferencias entre estos dos tipos de vegetación resaltando que los árboles tienen una mayor altura y biomasa aérea que la hierba, además de que la conexión entre las copas produce una superficie irregular con orificios por donde la radiación penetra pero no sale (efecto de trampa radiativa). Por otra parte, las raíces de los árboles suelen ser más profundas que las de la hierba.

Cuando el principal factor limitante a la evaporación es la energía, el bosque captura normalmente más radiación e intercambia más energía advectiva con la atmósfera que la hierba. Cuando el factor limitante es el agua disponible, las raíces de los árboles suelen aprovechar el agua en un mayor volumen de suelo y en algunos casos llegan a explotar la capa freática. Durante los períodos lluviosos, las copas de los árboles retienen un mayor volumen de agua que la hierba, y el mejor intercambio con la atmósfera permite que el agua interceptada se evapore incluso durante la lluvia o en la noche.

Por estas razones las cubiertas de árboles evaporan en general una mayor cantidad de agua que las cubiertas herbáceas, con una incidencia secundaria de las distintas especies, climas y condiciones edáficas. Los bosques son cubiertas características de zonas húmedas, mientras que en zonas secas solamente pueden vivir árboles o arbustos cuyas raíces tienen acceso a capas profundas del suelo (Domingo et al. 2001) o tienen formas en embudo que les permiten concentrar el agua de lluvia en su pie (Llorens y Domingo, 2007). Por el otro lado, en zonas de neblinas persistentes, el bosque puede favorecer la captación de agua no precipitada (Bruijnzeel et al, 2011).

En algunos casos se hace referencia al efecto del bosque sobre otros aspectos de los procesos hidrológicos que no participan directamente del balance de agua, como pueden ser la permeabilidad de los suelos, la velocidad de la escorrentía o la protección del suelo. En algunos casos estos efectos pueden ser relevantes cuando hay un cambio de uso prolongado en el tiempo, pero en otros casos estos efectos son en realidad artefactos debido a conceptualizaciones que no se corresponden con los procesos reales. Por ejemplo, el 'retraso' de la escorrentía en cuencas forestadas no debe atribuirse a una menor velocidad de la escorrentía superficial (que no suele producirse) sino al hecho de que los suelos forestales suelen estar normalmente más secos que los de pastos (ver más adelante), de modo que requieren un mayor volumen de precipitación antes de iniciar la respuesta hidrológica. Otro ejemplo ha sido dar por supuesto que las menores crecidas observadas en las cuencas forestadas se debían a una mayor infiltración, debiendo originar por lo tanto una mayor recarga de los acuíferos y unos mayores caudales de estiaje; las observaciones contradicen estas especulaciones, ya que la mayor evaporación de los bosques reduce tanto las crecidas como la recarga y los caudales de estiaje.

3. Distintos aspectos de la respuesta de las cuencas hidrográficas.

3.1 Aportes anuales

Los diversos experimentos realizados en cuencas 'pareadas' muestran que el cambio en los aportes anuales de agua después de la forestación/deforestación siempre tiene el mismo sentido, de aumento de la escorrentía al reducir el área forestada y viceversa. Los valores de este cambio en los aportes dependen sobre todo de la precipitación anual y de la fracción de cuenca afectada por el cambio de cubierta. En líneas generales, las coníferas muestran unas tasas más elevadas de evaporación que eucaliptos y caducifolios, y éstos más que las de arbustos (Brown et al. 2005).

Las cifras de estos cambios son relevantes para la gestión de los recursos de una cuenca; como ejemplo, la forestación total de una cuenca de pastos en una zona con una precipitación media de 1000 mm anuales representa la pérdida de un 57% de los aportes totales. En un grupo de 32 cuencas de la cabecera del Ebro se han estimado descensos anuales medios del 0.2% de los aportes en un periodo de 50 años como consecuencia de los cambios de cubierta (Gallart y Llorens, 2004), mientras que en las

cuencas del Cardener, Llobregat y Ter se han estimado respectivamente descensos anuales del 0,5, 0,7 y 0,3 % de los aportes por las mismas causas (Gallart et al. 2011). En el caso de la cuenca del Ebro, estos descensos se añaden a valores similares debidos a la variabilidad climática y al aumento de las áreas de regadío (Gallart y Llorens, 2003), mientras que en las otras tres cuencas la cubierta vegetal es el único factor de cambio.

La Figura 1 muestra una generalización de ambos factores (precipitación media y área forestada) utilizando la ecuación de Zhang et al (2001). Cabe señalar que los ejemplos citados anteriormente siguen aceptablemente las estimaciones de esta ecuación, a pesar de que en su diseño se excluyeron las cuencas con precipitación en forma de nieve.

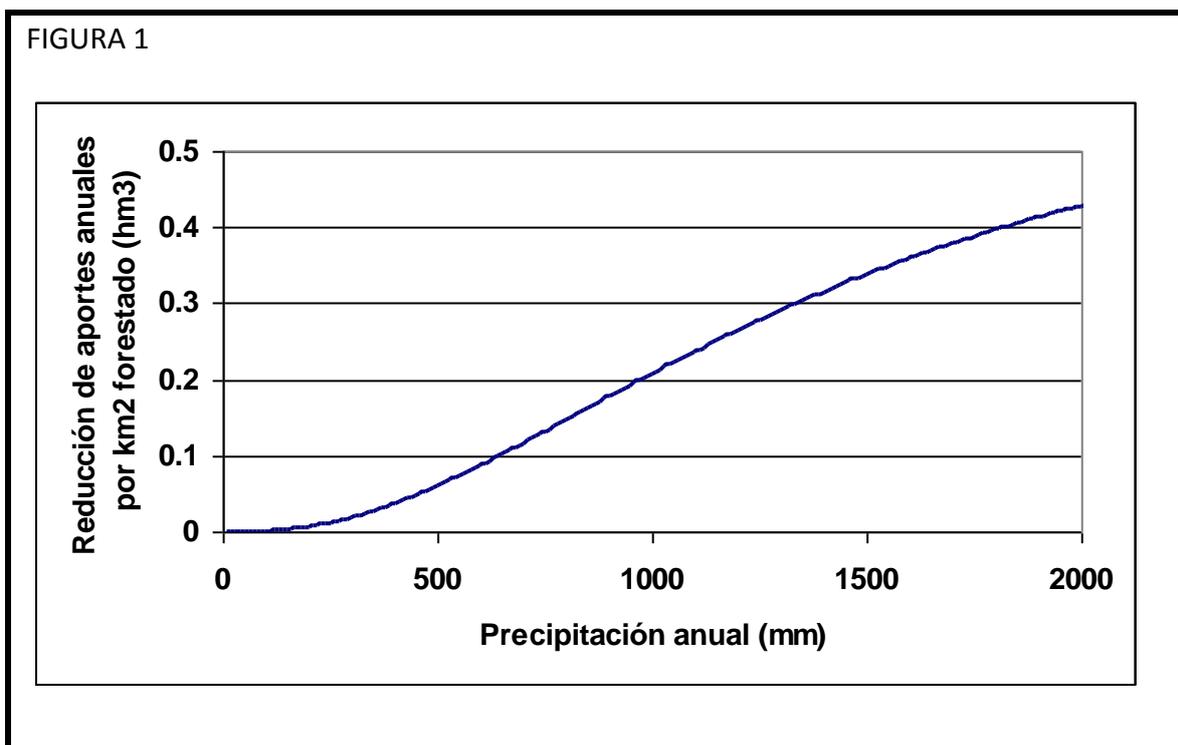


Figura 1. Reducción de los aportes anuales en una cuenca estimados en función de la precipitación media y el área forestada, mediante la ecuación de Zhang et. al (2001).

En los casos de deforestación, la respuesta a largo plazo depende del tipo de cubierta que se instala en la cuenca después del cambio. En líneas generales, el consumo de agua de los bosques jóvenes aumenta rápidamente con la edad, hasta

llegar al cierre de la cubierta; a partir de este momento el consumo se estabiliza y tiende a decrecer con la edad del bosque, siguiendo una pauta similar a la denominada 'curva de Kuczera' (Kuczera, 1987; Brown et al. 2005). Esto significa que explotar los bosques longevos determina en los primeros años un aumento de los aportes de agua, pero a medio plazo los aportes son menores que los iniciales a causa del elevado consumo de los bosques jóvenes.

3.2 Crecidas

Una de las ventajas tradicionalmente atribuidas a la cubierta forestal es la protección ante las crecidas. Diversos estudios han confirmado este hecho, aunque se ha comprobado que el efecto protector es muy marcado para crecidas pequeñas y moderadas y cuencas pequeñas, decreciendo al aumentar la magnitud del evento y el tamaño de la cuenca (Beschta et al. 2000).

Un estudio realizado en el Pirineo central ha mostrado que en los últimos 50 años ha disminuido la relación entre la escorrentía y la precipitación de los mayores eventos anuales, lo que se ha atribuido al aumento de la cubierta forestal (López Moreno et al. 2006).

3.3 Humedad del suelo y recarga de los acuíferos

Normalmente se suele considerar que los suelos forestales tienen una mayor permeabilidad que los suelos de pastos y que por lo tanto favorecen la infiltración y la recarga de los acuíferos. Las observaciones a distintas escalas muestran sin embargo que el efecto de la cubierta sobre el balance de agua es más importante que la calidad del suelo, de modo que los suelos bajo cubierta forestal suelen estar más secos que bajo cubierta herbácea (Gallart et al. 2002; Green et al. 2006), disminuyendo apreciablemente la recarga de los acuíferos (Ladekarl, 1998; Hatton y George, 2000; Calder et al., 2003).

En zonas semiáridas de Australia, África y Norteamérica se ha observado que la deforestación de grandes extensiones para el uso agrícola o ganadero ha favorecido un aumento de la recarga de los acuíferos y un ascenso generalizado de los niveles freáticos (Silberstein et al. 2003; Scanlon et al. 2005; Leblanc et al. 2008). En algunas

de estas zonas, y principalmente en Australia, el ascenso de la capa freática está representado una grave degradación ambiental por el hecho de que las aguas freáticas tienen elevadas concentraciones de sales (Allison et al. 1990; MDBMC, 1999).

3.4 Caudales de base y de estiaje

En consecuencia con lo expresado en el apartado anterior, y contrariamente a lo que se suele opinar, la forestación de una cuenca determina un descenso de los caudales de base y de estiaje similar o mayor (en términos relativos) que los aportes totales (Scott & Smith, 1997; Smakhtin, 2001). Ya en los resultados de uno de los experimentos pioneros de cuencas pareadas se observó un claro aumento de los caudales mínimos (excedidos el 95% del tiempo) después de deforestar una cuenca experimental (Bates y Henri, 1928).

En diversos experimentos de cuencas realizados en Australia, después de deforestar una cuenca se ha observado el cambio de un régimen estacional del flujo a un régimen permanente (Siberstein et al. 2004), mientras que en algunos casos en Sudáfrica se ha observado un desecamiento total de algunas pequeñas cuencas después de su forestación (Scott y Lesch, 1997).

4. Algunas incertidumbres sobre las relaciones entre cubierta vegetal e hidrología

4.1 Efectos del bosque sobre sobre la precipitación

Dentro de la que hemos denominado 'etapa pre-científica' ha sido frecuente afirmar que el bosque 'atrae' la precipitación (Andréassian, 2004). Hay algunas situaciones en las cuales la presencia de bosque puede favorecer un ligero aumento de la precipitación, como el efecto orográfico de bosques de gran altura en áreas llanas o el agua evaporada por interceptación de la lluvia; sin embargo estos aumentos no llegan a compensar el aumento de la evaporación, y son muy difíciles de medir por razones metodológicas (Calder, 1998a).

En realidad, el principal resultado de los trabajos científicos sobre hidrología forestal es la evidencia de que una cubierta forestal determina una mayor evaporación

de agua que una cubierta herbácea; cabe esperar por lo tanto que el aumento del agua evaporada cause un aumento de la precipitación, pero no necesariamente cerca de donde se ha evaporado. Los efectos de la cubierta forestal sobre la precipitación deben por lo tanto analizarse a una escala lo suficientemente extensa para que pueda producirse la precipitación del agua evaporada en exceso.

Este tipo de análisis se ha realizado para investigar los efectos climáticos de la deforestación de grandes masas forestales como la Amazonia, utilizando modelos climáticos (Nobre, 2009). En el caso del Sahel, se ha investigado el efecto de la eliminación de la vegetación arbustiva como consecuencia de la actividad humana y la sequía prolongada de los años 70 (Xue, 1997).

4.2 Papel de distintas especies arbóreas y tratamientos forestales

Las diferencias biofísicas entre distintas especies forestales causan algunas diferencias en los retornos por interceptación y transpiración. Normalmente se considera que las especies de hoja permanente originan una mayor interceptación que las especies caducifolias (Calder, 2003), aunque en áreas donde la precipitación invernal es poco importante y los caducifolios tienen un ramaje abundante la diferencia puede ser escasa (Muzylo et al. 2012).

Si se consideran todos los datos disponibles a escala global, las coníferas muestran unas tasas más elevadas de evaporación que eucaliptos y caducifolios, y éstos más que las de arbustos (Brown et al. 2005). Sin embargo, en algunas áreas se ha observado que especies de eucaliptos tienen un consumo marcadamente más elevado que especies de pinos (Scott & Smith, 1997).

Como se ha comentado anteriormente, el consumo de agua de los bosques jóvenes aumenta rápidamente con la edad, hasta llegar al cierre de la cubierta, lo que suele producirse hacia los 25-27 años de edad (Scott & Smith, 1997; Brown et al. 2005). Posteriormente el consumo se estabiliza y tiende a decrecer con la edad del bosque, aunque el tiempo que tarda en llegar a estabilizarse se estima en unos 150 años en el caso de *Eucalyptus regnans* (Kuczera, 1987; Vertessy et al. 2001).

En términos generales, se ha observado que hay una relación de tipo lineal entre el porcentaje de cambio de cubierta en una cuenca y la modificación de los

aportes anuales (Bosch & Hewlett, 1982; Brown et al. 2005), pero las labores de aclareo (reducción de la densidad de pies) o de obertura de pequeños claros en bosques con cierto estrés hídrico suelen conllevar un aumento de los aportes durante un corto período, retornando a valores cercanos a los originales por regeneración de los árboles o crecimiento del sotobosque (Lane & Mackay, 2001).

La extensión y situación de los claros en un bosque que pueden originar un aumento sensible de los aportes es por lo tanto una cuestión abierta que depende de factores locales como el clima, los suelos y la fisiografía de la cuenca (Siberstein et al. 2004).

Referencias

Allison, G.B., Cook, P.G., Barnett, S.R., Walker, G.R., Jolly, I.D., Hughes, M.W. (1990) Land Clearance and River Salinization in the Western Murray Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 119(1-4): 1-20.

Andréassian, V. (2004) Waters and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27.

Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset, A.E., Surfleet, C.G. (2000) Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233, 102-120.

Birot, Y., Gracia, C. and Palahi, M., Editors. (2011) Water for Forests and People in the Mediterranean – A Challenging Balance. What Science Can Tell Us. EFIMED . http://www.efimed.efi.int/files/attachments/efimed/publications/efi_what_science_can_tell_us_1_2011_en.pdf.

Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J Hydrol* 310:28–61.

Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., Scatena, F.N. (2011) Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 25(3), 465-498.

Calder, I. R. (1998a) Water-resource and land-use issues. SWIM Paper 3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 33pp.
http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM03.PDF

Calder, IR. (1998b) Water use by forest, limits and controls. *Tree Physiology* 18, 625-631.

Calder, I., Reid, I., Nisbet, TR., Green, JC. (2003) Impact of lowland forests in England on water resources: Application of the Hydrological Land Use Change (HYLUC) model. *Water Resources Research*, 39, 1939.

Cosandey ,C., Andreassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. (2005) The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *J Hydrol* 301:235–249.

Domingo, F., Villagarcia, L., Boer, M.M., Alados-Arboledas, L., Puigdefabregas, J., 2001. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. *Journal of Hydrology* 243 (1–2), 17–30.

FAO. (2006) The new generation of watershed management programmes and projects. FAO forestry paper 150. FAO, Rome.
<http://www.fao.org/docrep/009/a0644e/a0644e00.htm>

Gallart, F., Llorens, P., (2003) Catchment management under Environmental Change: impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28, 334-340.

Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Regüés, D. (2002) Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (3), 527 - 537.

Green, J.C., Reid, I., Calder, I.R., Nisbet, T.R. (2006) Four-year comparison of water contents beneath a grass ley and a deciduous oak wood overlying Triassic sandstone in lowland England. *Journal of Hydrology*, 329, 16-25.

Hatton, T., George, R. (2000) The role of afforestation in managing dryland salinity. In: E.K.S. Nambiar & A.G. Brown Plantations, farm, forestry and water. *Water and Salinity Issues in Agroforestry* nº 7, RIRDC/LWA/FWPRDC. RIRDC Pub. Nº 01/20, Melbourne: 28-35. <https://rirdc.infoservices.com.au/downloads/01-020>

IUFRO. (2007) How do Forests influence water?. Research Spotlight, IUFRO fact sheet Nº 2. http://www.iufro.org/download/file/4384/4475/fact-sheet-07-water_pdf

Kuczera, G. (1987). Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology* 94 (3/4), 215–236.

Ladekarl, U.L. (1998) Estimation of the components of soil water balance in a Danish oak stand from measurements of soil moisture using TDR. *Forest Ecology and Management* 104, 227–238.

Lane, P.N.J., Mackay, S.M. (2001) Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. *Forest Ecology and Management*, 143, 131-142.

Llorens, P., Domingo, F. (2007) Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 37-54.

López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M. (2006) Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?. *Hydrological Sciences Journal*, 51(6).

MDBMC 1999, The Salinity Audit of the Murray–Darling Basin: a Hundred-Year Perspective, Murray-Darling Basin Ministerial Council, Canberra. http://www2.mdbc.gov.au/__data/page/303/Final_Salt_Audit2.pdf

Monteith, J.L. (1965) Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19:205--234.

Muzyło, A., Llorens, P., Domingo, F. (2012) Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods *Ecohydrology*. DOI: 10.1002/eco.266

Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, DF., de Almeida, RAF., Giarolla, E. (2009) Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *Journal of climate*, 22, 5686-5697.

Sahin, V., Hall, M.J. (1996) The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology* 178 (1/4), 293–309.

Scott, DF., Lesch, W. (1997) Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology*, 199, 360-377.

Scott, DF., Smith, RE. (1997) Preliminary empirical models to predict reductions in total and low flows resulting from afforestation. *Water SA*, 23,135-140.

Silberstein, R., Best, A., Hickel, K., Gargett, T., Adhitya, A. (2004) The effect of clearing of native forest on flow regime. Technical report 04/4. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Monash University, 59 pp. <http://www.catchment.crc.org.au/pdfs/technical200404.pdf>

Smakhtin, VU. (2001) Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186.

Vertessy, R.A., Watson, F.G.R., O'Sullivan, S.K. (2001). Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management* 143, 13–26.

Xue, Y. (1997) Biosphere feedback on regional climate in tropical north Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 123, 1483–1515.

Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R. (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37 (3), 701–708.