

# Series de vegetación, números de curva y disponibilidades hídricas. Aplicación a la restauración forestal en zonas secas

J. Mongil<sup>1\*</sup>, L. Martín<sup>1</sup>, J. Navarro<sup>2</sup>, A. Martínez de Azagra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Hidrología y Conservación, Universidad Católica de Ávila. Canteros s/n 05005-Ávila

<sup>2</sup> Unidad de Hidráulica e Hidrología, E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid

## Resumen

Las series de vegetación que determinan la sucesión de los ecosistemas llevan asociadas series paralelas de números de curva, de umbrales de escorrentía y de disponibilidades hídricas. Las etapas de vegetación más avanzadas de la serie suelen ir asociadas a mejores condiciones hidrológicas y edafológicas, de tal manera que los números de curva van disminuyendo, los umbrales de escorrentía tienden a aumentar y, por consiguiente, las disponibilidades de agua en el ecosistema se ven favorecidas. En este trabajo se analizan estos postulados con estudios de campo y mediante el modelo hidrológico MODIPÉ. Para ello se ha elegido una serie de vegetación (en concreto, la serie Guadarrámico-Ibérica (supra-meso) silicícola de la encina), se han localizado lugares de vegetación correspondiente a las etapas de la serie (7 puntos de muestreo), y se han elaborado las series de los números de curva y de las disponibilidades hídricas, utilizando el mencionado modelo. Todo ello con el objetivo de aplicar estas consideraciones a la planificación hidrológica y la restauración forestal de terrenos de zonas áridas y semiáridas, donde las crecidas junto con la escasez de agua, controlan el desarrollo urbano, el funcionamiento de los ecosistemas así como su restauración.

**Palabras clave:** Infiltración; escorrentía; repoblación forestal; sucesión vegetal; zonas secas; oasificación; ecohidrología; hidrología.

## Abstract

### Vegetation series, curve numbers and soil water availabilities. Application to forest restoration in drylands

Vegetation series related with plants succession in the ecosystems are associated to hydrologic properties of the land such as runoff curve numbers, runoff thresholds and soil water availability. The most evolved vegetation stages in a successional series usually present better soil and hydrologic conditions. In this way curve numbers decrease meanwhile runoff thresholds increase, and therefore water availability grows in the ecosystem. These postulates are analyzed in this paper using field data (7 sampling points) and a hydrologic model (MODIPÉ). One vegetation series (specifically: "Guadarrámico-Ibérica (supra-meso) holm oak siliceous series") and its successional stages have been chosen to find out its associated curve numbers and ecosystem water availability using MODIPÉ model. The objective is to apply these items to hydrologic planning and forest restoration in drylands, where water floods and water scarcity control urban and ecosystem development and restoration measures.

**Key words:** Infiltration; runoff; reforestation; plant succession; arid and semiarid lands; oasification; Ecohydrology; Hydrology.

## Introducción

El cambio de la vegetación en el tiempo se denomina dinámica de la vegetación (Ruiz de la Torre, 2005). Dentro de ella, se produce la sustitución natural de unas comunidades vegetales o fitocenosis por otras, proceso

que se denomina sucesión vegetal (Sevilla, 2008). La teoría de la sucesión (Clements, 1928) se basa en que se parte de un terreno desnudo y, paulatinamente, la vegetación lo va ocupando, pasando por sucesivas etapas, con un orden definido, en el que las condiciones creadas por una comunidad facilitan la llegada de otra,

\* Corresponding author: [jorge.mongil@ucavila.es](mailto:jorge.mongil@ucavila.es)  
Received: 10-10-2011. Accepted: 13-10-2011.

que la sustituye, hasta llegar a un punto final y “estable” en ausencia de perturbaciones naturales o humanas, denominada “clímax”, que es el último peldaño de la escalera dinámica (Ruiz de la Torre, 2005), y que depende exclusivamente de las condiciones climáticas y edáficas de la estación. A los cambios que experimenta la vegetación en este sentido se denomina sucesión progresiva o progresión (Ruiz de la Torre, 2005). En la referida sustitución, aunque cada investigador establezca una serie de fases diferente, pueden considerarse de forma simplificada las siguientes etapas: suelo desnudo, herbáceas, matorral, bosques pioneros, bosques post-pioneros y bosques sucesores (el último término de la serie corresponde con la vegetación clímax o el bosque climácico). Con esta idea surgió el concepto de serie de vegetación, que pretende definir territorios homogéneos tomando como base la vegetación potencial y serial (Rivas-Martínez, 1987). Estos territorios están caracterizados por unas condiciones homogéneas de aquellos factores ecológicos que determinan la vegetación, como el clima, la geología, la geomorfología, los suelos, etc. De esta manera, las series de vegetación se han convertido en una interesante herramienta de caracterización fitoclimática (Bailey, 1996; Dumé, 1996; Kùchler y Zonnebeld, 1988; Loidi, 1991; Montoya, 1989; Peralta *et al.*, 2003).

Diversos autores han intentado modelizar las series de vegetación presentes en España (Ceballos, 1938; Ortuño y Ceballos, 1977) y Montserrat, Rigueiro y González Hernández (en Montero de Burgos, 1987) y Serrada (1993) realizaron modificaciones y ampliaciones sobre las anteriores. Rivas-Martínez (1987) estableció las series de vegetación para la España peninsular e insular, y confeccionó también las tablas de juicio biológicas y ecológicas para ser utilizadas en la elección de especies en repoblaciones forestales.

Las series de vegetación, si han sido definidas por botánicos expertos, suponen una abstracción útil y práctica —aunque simplificada— de la realidad. En este último sentido conviene señalar que caben distintos caminos hacia una misma clímax: ramificaciones, redes, saltos, transgresiones, alternancias y ciclos son habituales en un mismo territorio (Ruiz de la Torre, 1990). La cuestión se complica aún más si se contempla la posibilidad, cierta, de acceso de especies foráneas. Por ello, las teorías iniciales de Clements se han ido modificando, admitiendo la existencia de comunidades finales no dependientes del clima sino del sustrato, de la topografía, etc. (teoría de la policlímax). Posteriormente estas teorías se han transformado sus-

tancialmente, siendo algunas de las variaciones más importantes las siguientes (Sevilla, 2007, 2008):

— Análisis a varias escalas temporales, ya que la sucesión es sólo uno de los posibles tipos de cambios que suceden en periodos superiores a un año.

— Se cuestiona la asociación automática de mayor avance de la sucesión con bosques mejores o más nobles. Estos adjetivos se emplean en relación a lo que se espera de los bosques (recursos que proporcionan, por ejemplo).

— La etapa final ha perdido determinismo e importancia, habiendo sido desposeída de atributos como la máxima diversidad, estabilidad, naturalidad máxima, máximo de utilidades desde el punto de vista ecológico.

Sin embargo, y a los fines de este artículo, tales circunstancias poco afectan a la metodología y a los resultados que vamos a plasmar. Las formaciones vegetales se componen de “formas de vida” que adoptan los vegetales para el mejor aprovechamiento de sustancias fundamentales para su existencia en las diferentes épocas dentro del año o interanuales de alternancia escasez-abundancia. Estas sustancias necesarias, además de la energía procedente del sol, son el agua, que llega al suelo mediante las precipitaciones, y los nutrientes, que dependen de la naturaleza de la roca madre, el grado de evolución edáfica y el aporte de materia orgánica, y cuyo aprovechamiento —a su vez— está ligado al del agua, puesto que las plantas toman los nutrientes disueltos en el agua. Por otra parte, desde un análisis ecohidrológico, a mayor evolución de la vegetación dentro de la serie de sucesión, mejores son las condiciones hidrológicas y mayores las disponibilidades hídricas en el ecosistema. Esto se justifica analizando los efectos de la vegetación sobre los procesos de infiltración y escorrentía:

— La vegetación forestal ralentiza la escorrentía superficial, al obligar al agua a llevar una trayectoria diferente a la rectilínea que impone la gravedad y al incrementar la rugosidad del contorno. De esta manera se aumenta el tiempo de oportunidad de infiltración del agua, lo que contribuye a incrementar la infiltración respecto a la escorrentía.

— La vegetación forestal aporta materia orgánica al suelo, gracias a las raíces, la hojarasca o la pinocha y a los restos de ramas y cortezas. Este aporte mejora la estructura y porosidad del suelo, favoreciendo la infiltración.

— La materia orgánica sombrea la superficie del suelo y reduce la evaporación. Un espesor de 3 cm de hojarasca, común en muchos bosques, puede conservar

en cinco días unos 20 mm de humedad edáfica; cantidad mucho mayor que el 1 a 5% de lluvia que puede interceptar en una o dos tormentas (Chang, 2003).

Existen numerosos trabajos que muestran que la tala de bosques en pequeñas cuencas lleva asociada un incremento de la escorrentía entre el 8% y el 65% y que este efecto puede prolongarse varias décadas (Chang, 2003), lo que corrobora el positivo efecto del bosque en la infiltración. Por esta razón, en una restauración forestal, cuando las plantas arraigan y se desarrollan adecuadamente, la evolución de la vegetación lleva emparejada una mejora de las condiciones hídricas y edáficas de la ladera o terreno restaurado (Martínez de Azagra, 1996). La mejora del suelo se plasma, por ejemplo, en el incremento de la capacidad de infiltración. Si se considera el método del número de curva de estimación de la escorrentía superficial (SCS, 1991), se puede afirmar que una mejora en las condiciones de infiltración supone una disminución del número de curva. En la restauración forestal, mediante la preparación del suelo (sistematización primaria), debe buscarse un salto en el número de curva equivalente de la unidad sistematizada ( $NEQ$ ), que desde el número de curva de la ladera degradada ( $NAC$ ) puede llegar a igualar al número de curva clímax ( $N_{min}$ ), es decir, el número de curva de la vegetación climácica de la zona (Martínez de Azagra, 1996).

$$NAC > NEQ \geq N_{min} \quad [1]$$

El número de curva puede variar mucho desde la situación de una ladera degradada hasta la situación final restaurada, con el paso de un determinado número de años (por ejemplo 100). Según las tablas generales del número de curva y haciendo una interpretación ecohidrológica, el mayor cambio posible va de 94 a 15. Sin embargo, un intervalo más realista para el mismo periodo de tiempo puede ser de 94 a 54, correspondiente respectivamente con un barbecho sobre suelo de tipo D y un bosque en condición hidrológica muy buena sobre suelo de tipo C (Martínez de Azagra *et al.*, 2004), ya que pasar de un suelo tipo D (un litosuelo) a un suelo profundo (tipo B) o muy profundo (tipo A), con excelentes condiciones para la infiltración, lleva varios siglos, si no milenios. Como ejemplo, en San Cebrián de Mazote (Valladolid), se ha observado que un suelo degradado en ladera, con un horizonte superficial de 14 cm (perfil A/C; suelo tipo D) ha duplicado su profundidad (29 cm), tras 50 años de una repoblación forestal; y su coeficiente de escorrentía ha bajado del 51,7% al 29,8% en ese mismo tiempo (Rojo *et al.*, 2009).

A cada número de curva ( $N$ ) le corresponde un umbral de escorrentía  $P_0$ , que se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} \quad (\text{mm}) \quad [2]$$

Así se pueden obtener los umbrales de escorrentía tanto para la ladera actual degradada ( $PAC$ ) como para la ladera restaurada ( $P_{max}$ ) (Martínez de Azagra *et al.*, 2004). Estos valores pueden ser relacionados fácilmente con la serie histórica de precipitaciones de la zona y su correspondiente periodo de recurrencia (Martínez de Azagra *et al.*, 2006). Si el nivel de degradación de la ladera es elevado, el umbral de escorrentía será muy bajo, de tal manera que buena parte de los aguaceros producirán escorrentía. Por el contrario, en la ladera restaurada el suelo funcionará como un buen sumidero de agua, donde casi todo lo que llueve es interceptado o se infiltra, por lo que el umbral de escorrentía es muy superior. Con estas premisas, y fijando un determinado número de curva objetivo (y su correspondiente umbral de escorrentía), se tiene un criterio adecuado para el diseño de una restauración forestal, dentro de la metodología FO-REST de restauración forestal en zonas secas (Mongil y Martínez de Azagra, 2006). Siguiendo con el mismo planteamiento, al tiempo que se produce la evolución de la vegetación, la disminución de los números de curva y el incremento de sus correspondientes umbrales de escorrentía, las disponibilidades hídricas en la ladera degradada que inicialmente eran escasas —variable denominada *ANTES* en el modelo hidrológico MODIPÉ—, pasan a suponer la práctica totalidad de la precipitación ( $\approx P$ ) cuando se llega a restaurar totalmente el ecosistema, es decir, cuando se llega al bosque climácico.

Antes de proseguir, conviene realizar algunas precisiones sobre el término “disponibilidad hídrica” ( $DH$ ), pues es un concepto que puede prestarse a equívocos. Desde un punto de vista edáfico, la disponibilidad hídrica es la reserva de agua asimilable por las plantas que existe en un momento dado en el perfil del suelo abarcado por las raíces. Con un planteamiento más sencillo, que evita realizar un balance hídrico a nivel edáfico, la disponibilidad hídrica se corresponde con la infiltración ( $DH = I$ ). De acuerdo con este planteamiento:

$$DH = I = P - I_i - E_s \quad [3]$$

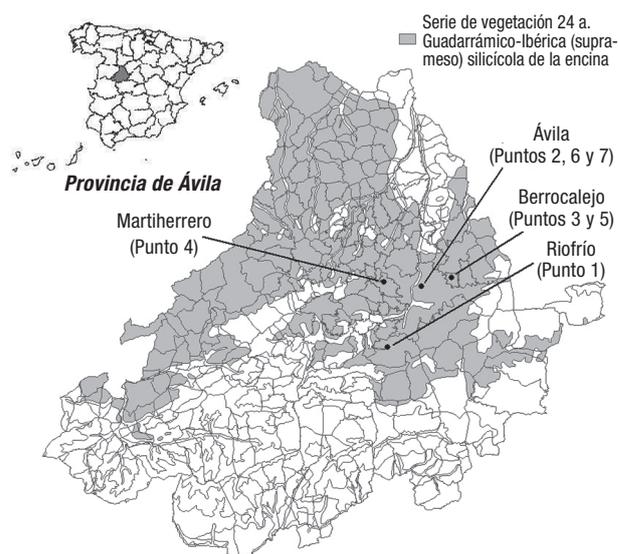
siendo  $I$  la infiltración,  $P$  la precipitación,  $I_i$  la interceptación y  $E_s$  la escorrentía (que estimamos mediante

el método del número de curva). Si la vegetación es muy rala y pequeña, la interceptación es despreciable (como plantea el modelo MODIPÉ). Sin embargo, una flora mayor densa intercepta una cantidad apreciable de lluvia, por lo que reduce la disponibilidad hídrica, es decir: los recursos hídricos de la cuenca para uso humano. Es ésta la visión antropocéntrica imperante en la actualidad. Pero tal planteamiento dista mucho de los ecosistemas naturales: el agua interceptada limpia y lava el follaje de partículas inertes y de organismos nocivos a la vez que reduce la transpiración (economía del agua para las plantas). Las gotas de lluvia que mojan y tapan los estomas no permiten que el agua de las hojas esté accesible a la atmósfera o a la energía calorífica, por lo cual la interceptación reduce la transpiración (Chang, 2003). Por ello, en nuestro desarrollo englobamos a la interceptación dentro de la disponibilidad hídrica de la vegetación: No es que nos olvidemos de un término ( $I_t$ ); es que lo contabilizamos como sumando para las plantas, ya que las protege de la desecación progresiva, proporciona turgencia foliar y es útil para el ecosistema forestal en su conjunto (que alberga numerosas especies epifíticas, cuya principal fuente de agua es la interceptación).

El objetivo de este trabajo es comprobar en una zona semiárida la mejora de las condiciones hidrológicas de las laderas (concretamente a través de su número de curva, de su umbral de escorrentía y, en consecuencia, de sus disponibilidades hídricas) según se evoluciona desde un suelo desnudo hasta el bosque climácico, dentro de la serie de vegetación correspondiente.

## Material y métodos

Para proceder a la selección de las zonas de estudio, se ha elaborado un mapa de series de vegetación de Rivas-Martínez (1987) de la provincia de Ávila mediante un sistema de información geográfica. Posteriormente, se ha elegido la serie Guadarrámico-Ibérica (supra-meso) silicícola de la encina (*Junipero oxycedri-Querceto rotundifoliae sigmetum*) (24a), teniendo en cuenta los siguientes criterios: es la más representativa de la provincia, es la que mayor superficie ocupa en ella (Figura 1), y se sitúa en una zona de precipitaciones escasas, lo que para este estudio es importante puesto que se pretende aplicar a la restauración forestal de zonas áridas. Las zonas o puntos de muestreo se han seleccionado teniendo en cuenta que sean lugares



**Figura 1.** Situación de los puntos de muestreo, junto con la distribución de la serie de vegetación 24a en la provincia de Ávila.

próximos entre sí, para que el tipo de suelo y el clima no difiera demasiado pudiendo alterar el estudio. De esta manera se ha intentado localizar terrenos con vegetación semejante a cada etapa de la serie de vegetación: I. Bosque; II. Matorral denso; III. Matorral degradado y IV. Pastizales (Tabla 1).

El clima en el área estudiada es continental-mediterráneo, con precipitación media de 359 mm y sequía

**Tabla 1.** Serie de vegetación 24a. Guadarrámico-Ibérica (supra-meso) silicícola de la encina (*Junipero oxycedri-Querceto rotundifoliae sigmetum*), modificada de Rivas-Martínez (1987)

I. Bosque	<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> (Desf.) Samp. <i>Juniperus oxycedrus</i> L. <i>Lonicera etrusca</i> Santi <i>Paeonia broteroi</i> Boiss. & Reut.
II. Matorral denso	<i>Cytisus scoparius</i> (L.) Link <i>Retama sphaerocarpa</i> (L.) Boiss <i>Genista cinerascens</i> Lange <i>Adenocarpus aureus</i> (Cav.) Pau
III. Matorral degradado	<i>Cistus ladanifer</i> L. <i>Lavandula stoechas</i> subsp. <i>pedunculata</i> (Miller) Rozeira <i>Rosmarinus officinalis</i> L. <i>Helichrysum serotinum</i> Boiss.
IV. Pastizales	<i>Stipa gigantea</i> Link. <i>Agrostis castellana</i> Boiss. & Reut. <i>Poa bulbosa</i> L.

estival. El factor de erosividad de la lluvia ( $R$ ) está entre  $45 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  y  $69 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , y sólo en uno de los puntos de muestreo (Riofrío), situado a una altitud notablemente superior al resto, se llega a un valor de  $131 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (ICONA, 1988). La temperatura media anual es  $10,4^{\circ}\text{C}$ , la media de las máximas es  $15,5^{\circ}\text{C}$  y la media de las mínimas  $5,4^{\circ}\text{C}$ . Los suelos se han formado por alteración de los granitos infrayacentes, con profundidades muy variables, son de reacción ácida y materia orgánica generalmente escasa dependiendo del tipo de vegetación que sustentan. Su textura es franco-arenosa, con un 62% de arena, un 20% de limo y 18% de arcilla (valores medios).

Los puntos de muestreo establecidos han sido siete, que comprenden roquedos, pastizales, matorrales y bosques (Figura Suplementaria S1). Los principales datos de localización y caracterización de estos puntos de muestreo se exponen en las Tablas 2 y 4, así como en la Figura 1. Los datos de precipitaciones se muestran en la Tabla 3. Para los siete puntos de muestreo se ha determinado la etapa de la serie de vegetación, en función del tipo de formación vegetal y de las especies presentes. Así mismo se ha establecido su número de curva, para lo cual se han tomado datos en campo, para determinar las principales variables de las que depende el número de curva:

1) Tipo de vegetación.—Dejando a un lado los terrenos cultivados, son: pastizales, prados naturales, matorral-herbazal, combinación de arbolado y herbazal, montes con pastos y bosques.

2) Condición hidrológica.—Depende principalmente de una serie de variables que se han evaluado en campo: densidad y fracción de cubierta de la vegetación, proporción de residuos vegetales cubriendo la superficie del suelo y grado de rugosidad superficial; además, para los bosques, se ha medido el espesor de la capa de hojarasca, espesor de humus y compacidad del suelo, para determinar su condición hidrológica con el nomograma de De Morey (1955), citado por Udall y Dominy (1966).

3) Tipo de suelo.—Se diferencian cuatro tipos de suelos que van desde el tipo A, con una alta capacidad de infiltración, hasta el tipo D, con una baja capacidad de infiltración, pasando por los grupos B y C que presentan características intermedias de los anteriores. Para fijar el tipo de suelo se ha determinado su textura (mediante muestras llevadas a laboratorio), se ha evaluado su profundidad (por calicata) y se han realizado ensayos de infiltración (mediante inundación con anillo simple). Si atendemos exclusivamente a la granulometría, las condiciones de infiltración son en general buenas, ya que según el diagrama textural para la determinación del tipo de suelo de Ferrer (2003), se trata de suelos tipo B (suelo de textura franco-arenosa, con 62% de arena, 20% de limo y 18% de arcilla, según USDA). Según los diagramas de Rawls *et al.* (1982), Rawls y Brakensiek (1989) y López Cadenas (1998), nos encontramos con suelos de permeabilidad moderadamente lenta ( $5$  a  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), que pueden considerarse como tipo C. Por otra parte, la infiltración de estos suelos no depende exclusivamente de la textura sino que también influye en gran medida la profundidad del perfil, que es muy variable según las zonas. Así, se pueden encontrar: afloramientos graníticos que, aun parcialmente fisurados, son prácticamente impermeables; suelos someros (hasta  $50 \text{ cm}$ ), que se comportan como suelos tipo D; suelos más profundos (hasta  $75 \text{ cm}$ ), que pueden considerarse como tipo C; y suelos profundos sobre roca madre impermeable (más de  $75 \text{ cm}$ ), que se consideran suelos tipo B.

4) Condición previa o antecedente de humedad, actualmente denominada condición de escorrentía (Hawkins *et al.*, 2009). Se refiere a la condición de humedad que tiene el suelo justo antes del aguacero que se pretende analizar. El modelo distingue tres situaciones diferentes:

— Condición II. El suelo está en condición de humedad media, alejado de la capacidad de campo y del

**Tabla 2.** Datos de las zonas de estudio

Punto de muestreo	Municipio	Coordenadas UTM (huso 30, zona T)	Altitud (m)
1	Riofrío	351160,63; 4490659,63	1.320
2	Ávila	355337,09; 4502787,32	1.088
3	Berrocalejo de Aragón	365201,21; 4506873,07	1.095
4	Martiherrero	351849,28; 4502759,57	1.158
5	Berrocalejo de Aragón	365402,25; 4507369,52	1.086
6	Ávila	358630,00; 4504306,00	1.160
7	Ávila	357704,00; 4504753,00	1.125

**Tabla 3.** Datos de precipitaciones de la estación Ávila-Observatorio (2444). Arriba: Precipitación mensual (mm), precipitación máxima diaria (mm) y número de días de lluvia, para el año de precipitación media (1983) dentro de la serie de años disponible (1963-2004). Abajo: Precipitación máxima diaria (mm) para la estación Ávila-Observatorio (2444), en la serie de años 1951-2004

Mes	Precipitación mensual (mm)	Precipitación máxima diaria (mm)	Días de lluvia apreciable ( $\geq 0,1$ mm)
Enero	0,2	0,2	1
Febrero	8,7	4,7	7
Marzo	3,4	1,4	5
Abril	52,2	8,4	11
Mayo	33,7	8,5	9
Junio	18,8	7,8	5
Julio	8,4	8,4	1
Agosto	89,4	35,1	10
Septiembre	16,4	8,6	2
Octubre	9,6	3,4	6
Noviembre	86,2	27,1	14
Diciembre	40,9	15,0	5

Año	Precipitación máxima diaria (mm)	Año	Precipitación máxima diaria (mm)	Año	Precipitación máxima diaria (mm)
1951	50,0	1969	57,4	1988	24,3
1953	30,9	1970	21,4	1989	74,0
1954	26,1	1971	19,2	1990	23,2
1955	21,8	1972	33,4	1991	33,5
1956	21,2	1973	25,6	1992	17,1
1957	12,2	1974	15,0	1993	20,2
1958	29,9	1975	24,1	1994	20,6
1959	63,0	1976	24,9	1995	31,7
1960	22,2	1977	46,8	1996	44,9
1961	51,8	1978	33,6	1997	88,8
1962	22,7	1979	40,4	1998	29,5
1963	21,7	1980	20,8	1999	16,0
1964	28,1	1981	65,4	2000	28,0
1965	19,3	1982	34,3	2001	29,9
1966	21,3	1983	35,1	2002	23,7
1967	19,0	1986	26,4	2003	29,8
1968	13,3	1987	34,0	2004	34,8

punto de marchitez permanente. Los números de curva que figuran en las tablas se refieren a esta situación. La ponderación del número de curva según superficies a la que se hizo alusión anteriormente debe realizarse siempre en esta condición.

— Condición I. El suelo está muy seco pero sin llegar al punto de marchitamiento. Suele ser la situación ideal para realizar las labores agrícolas.

— Condición III. El suelo se encuentra muy húmedo, saturado o próximo a la saturación. También es aplicable a suelos algo húmedos pero que estén helados.

Una vez reunida toda la información necesaria para determinar el número de curva se han utilizado las tablas generales que pueden consultarse, por ejemplo, en Martínez de Azagra *et al.* (2009). El número de curva de las superficies rocosas se ha deducido de las tablas de Témez (1987), para rocas impermeables y pendiente mayor del 3%, dado que las tablas generales no recogen este tipo de terrenos. Finalmente, para conocer las características hidrológicas de los puntos de muestreo, se han calculado para todos ellos los umbrales de escorrentía y las disponibilidades hídricas. Para estas últimas, se ha considerado un aguacero aislado

**Tabla 4.** Características de la vegetación y determinación de la etapa en la serie de vegetación

Punto de muestreo	Descripción de la vegetación	Etapas en la serie de vegetación
1	Roquedo de granito con vegetación escasa de <i>Cytisus scoparius</i> (L.) Link y <i>Lavandula stoechas</i> subsp. <i>pedunculata</i> (Miller) Rozeira	V
2	Pastizal de gramíneas, con algún ejemplar de <i>Stipa gigantea</i> Link.	IV
3	Pastizal de gramíneas, siendo muy frecuente <i>Stipa gigantea</i> Link., con cardos y algún ejemplar de <i>Rosa canina</i> L.	IV
4	Matorral de <i>Cytisus scoparius</i> (L.) Link, con <i>Lavandula stoechas</i> subsp. <i>pedunculata</i> (Miller) Rozeira y herbáceas	Entre la II y la III
5	Matorral de <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> (Desf.) Samp. y <i>Cytisus scoparius</i> (L.) Link, estando presentes también <i>Rosa canina</i> L., <i>Stipa gigantea</i> Link., <i>Thymus mastichina</i> L. y <i>Centaurea calcitrapa</i> L.	Entre la I y la II, más próxima a la II
6	Monte adhesionado de encina ( <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> (Desf.) Samp.), con <i>Ammophila arenaria</i> (L.) Link y <i>Bromus tectorum</i> L.	Entre la I y la II, más próxima a la I
7	Bosque denso de encina ( <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> (Desf.) Samp.), con matorral de encina, <i>Rosa canina</i> L., <i>Halimium umbellatum</i> , <i>Stipa gigantea</i> Link., <i>Ammophila arenaria</i> (L.) Link y <i>Bromus tectorum</i> L.	Muy próxima a la I

de 48 mm, correspondiente a un periodo de recurrencia de 10 años, y la precipitación del año medio de la serie disponible (1983). Los cálculos se han llevado a cabo con la ayuda del programa informático MODIPÉ (versión 2.0) (Martínez de Azagra y Hospital, 2004), basado en el modelo homónimo, especialmente creado para el diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas. Este modelo permite calcular los umbrales de escorrentía y las disponibilidades hídricas en el suelo de la ladera, antes y después de la intervención restauradora proyectada o realizada.

## Resultados

En la Tabla 4 se realiza la asignación de los puntos de muestreo a la etapa de la serie de vegetación. Algunos de los puntos de muestreo no presentan una

etapa pura, sino que debido a las especies presentes en ellos y a la fisonomía de la vegetación, se les han asignado etapas intermedias. Esto ocurre, por ejemplo, en el punto de muestreo 4 (matorral), que se sitúa entre la etapa II (matorral denso) y III (matorral degradado).

La determinación de los números de curva para cada punto de muestreo, en función del tipo de vegetación, de la condición hidrológica y del tipo de suelo, se muestra en la Tabla 5. Al respecto del tipo de suelo, los ensayos de infiltración, mediante infiltrómetro de anillo simple, han dado tasas finales de infiltración ( $f_c$ ) muy elevadas ( $f_{media} = 484 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Por otra parte, la profundidad de los suelos en las zonas estudiadas es muy variable, pasando en pocas decenas de metros de un afloramiento granítico a suelos de gran espesor, dependiendo fundamentalmente de la posición fisiográfica y de la vegetación desarrollada; por este moti-

**Tabla 5.** Determinación del número de curva

Punto de muestreo	Tipo de vegetación	Condición hidrológica	Tipo de suelo	Número de curva
1	Prácticamente inexistente. Roca impermeable	–	–	96
2	Pastizal o pastos naturales	Regular	D	84
3	Pastizal o pastos naturales	Buena	D	80
4	Matorral-herbazal siendo el matorral preponderante	Buena	C	65
5	Matorral-herbazal siendo el matorral preponderante	Buena	C	65
6	Montes con pastos	Regular	B	60
7	Bosques	Buena (IV)	B	52

**Tabla 6.** Serie progresiva de vegetación, números de curva y disponibilidades hídricas

Punto de muestreo	Etapas	N(II)	$P_0(II)$ (mm)	DHAM (mm,%)		DHAI (mm,%)	
1	V	96	2,1	287,6	78,2	10,7	22,3
2	IV	84	9,7	360,1	97,9	31,1	64,8
3	IV	80	12,7	364,7	99,1	35,4	73,8
4	II-III	65	27,4	367,9	100,0	45,3	94,4
5	I-II	65	27,4	367,9	100,0	45,3	94,4
6	I-II	60	33,9	367,9	100,0	46,9	97,7
7	I	52	46,9	367,9	100,0	48,0	100,0

Etapas: Etapas en la serie de vegetación.  $N(II)$ : Número de curva en condición media de humedad (adimensional).  $P_0(II)$ : Umbral de escorrentía en condición media de humedad (mm). *DHAM*: Disponibilidad hídrica (mm) por las lluvias del año de precipitación media de la serie disponible (1963-2004) y porcentaje respecto a la precipitación caída. El año de precipitación media es 1983, con 367,9 mm, siendo la precipitación anual media de la estación Ávila-Observatorio de 359,1 mm. La disponibilidad hídrica se ha calculado con el programa MODIPÉ (versión 2.0). *DHAI*: Disponibilidad hídrica (mm) calculada con el programa MODIPÉ, para la precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de 10 años (48 mm), y porcentaje respecto a la precipitación caída.

vo los tipos de suelos relacionados corresponden estrictamente al punto muestreado y a la vegetación descrita. Los números de curva obtenidos están comprendidos entre 52 (bosque climácico) y 96 (roquedo granítico con vegetación muy escasa). Aunque la condición hidrológica de los puntos 4 y 5 se considera “buena” por su cubierta vegetal mayor del 75%, la del punto 5 es mucho mejor que la del punto 4. Este hecho tiene su incidencia directa en el número de curva, pero de acuerdo con las tablas se les ha asignado igual valor (65).

Finalmente, en la Tabla 6 se exponen, para cada punto de muestreo, los resultados de la serie progresiva de vegetación, números de curva y disponibilidades hídricas. Estas últimas se han calculado mediante el programa MODIPÉ, tanto para la precipitación del año medio (1983) de la serie disponible (1963-2004), como para la precipitación máxima diaria con periodo de retorno de 10 años.

## Discusión

Las elevadas tasas finales de infiltración obtenidas, que anularían la escorrentía superficial de casi cualquier aguacero en la zona, parecen ser frecuentes al estimar la capacidad de infiltración final por el método del infiltrómetro de anillo (Cerdá, 1995) y generan cierta incertidumbre sobre la asignación correcta del grupo hidrológico. No obstante, nos muestran la alta capacidad de drenaje interno de estos suelos, circunstancia que sopesada con la textura (contenido relativamente

alto en arcilla que ralentiza en parte la infiltración), profundidad y pendiente nos permite asignar un grupo hidrológico coherente, minorando su categoría. Entendemos que debe mejorarse la asignación de los grupos hidrológicos, al usar los valores decisivos propuestos por Ferrer (2003) u otros autores, ligando claramente dichos valores al ensayo de infiltración a que se refieren. Para ello deben realizarse estudios más amplios y sólidos al respecto.

Los números de curva asignados (Tabla 5) se sitúan entre 52 para el bosque climácico, y 96 para roquedo granítico con vegetación muy escasa. A este respecto hay que indicar que Mongil (2004) asignó al encinar basófilo un número de curva de 44, inferior al establecido en este trabajo para el encinar silicícola. Por otra parte, el número de curva asignado al roquedo granítico es el mayor valor que aparece en las tablas de uso más frecuente (en este caso en las tablas de Témez, 1987). En casos poco claros de asignación de la condición hidrológica de suelos se pueden asignar tipos intermedios (A(B), (A)B, B(C), (B)C,...) (Fernández de Villarán, 2006), según predominen las características de un grupo u otro, pero aquí la elección ha resultado bastante directa. Por otra parte, a veces pueden aparecer dudas sobre las unidades de vegetación a escoger en la tabla; en este caso, se recomienda comparar las alternativas de uso, pues suelen ofrecer números de curva muy similares.

Según se muestra en la Tabla 5, el número de curva va descendiendo según avanza la vegetación de la serie. Así, a la etapa V (roquedo con vegetación escasa) le corresponde un número de curva muy elevado (96), los

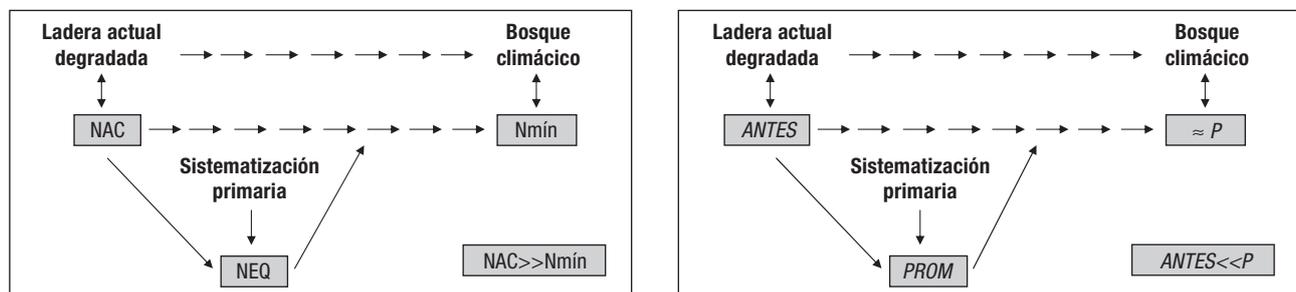
pastizales y matorrales tienen números de curva intermedios (entre 84 y 65), mientras que el monte adehesado de encina y el bosque denso de encina próximo al climácico presentan los números más bajos (60 y 52, respectivamente). Por lo tanto, para la serie del número de curva se cumple que a mayor avance en la serie de vegetación menor número de curva, hipótesis enunciada por Martínez de Azagra (1996), denominada serie progresiva del número de curva, y que puede observarse gráficamente en la Figura 2.

Los umbrales de escorrentía, que dependen directamente del número de curva (ecuación 2), siguen la tendencia inversa que los números de curva. Lo interesante de estos umbrales es que nos indican el estado de degradación de las laderas y, sobre todo, con qué aguaceros se va a producir escorrentía superficial. Por ejemplo, para el punto de muestreo 1 (roquedo) todos los aguaceros mayores de 2,1 mm (es decir, prácticamente todos) producirán escorrentía; mientras que para el bosque climácico sólo los aguaceros de cuantía mayor de 46,9 mm producirán escorrentía (chubascos muy poco frecuentes, por lo que el bosque se comportará como una perfecta esponja).

Las disponibilidades hídricas (Tabla 6), para el año de precipitación media de la serie (año 1983), son iguales a la precipitación en los puntos de muestreo 4 al 7 (desde matorrales hasta los bosques), mientras que los puntos 2 y 3 (pastizales) sufren una ligera reducción frente a la lluvia caída. Para el roquedo, el 21,8% de la precipitación escurre superficialmente. El análisis para un aguacero aislado, es decir, para la precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de 10 años (48 mm), ofrece resultados más diferenciados. En el

roquedo se pierde gran parte del agua que cae (37,3 mm de los 48 mm, un 77,7%). En los pastizales, se infiltrará en el suelo aproximadamente el 70% de la precipitación (31,1 y 35,4 mm respecto a los 48 mm que caen). En los matorrales y en el monte adehesado las pérdidas de agua son muy leves, ya que se infiltran, respectivamente, el 94,4 y el 97,7% de la precipitación. Por último, el bosque climácico es el único que es capaz de aprovechar toda el agua de este aguacero. Por lo tanto, se puede decir que para las precipitaciones habituales en la zona (año de precipitación media o aguacero de pequeña recurrencia) las disponibilidades hídricas son crecientes en la serie de vegetación, según nos vamos acercando a la vegetación climácica. Esto es más patente para el análisis con el aguacero aislado con recurrencia de 10 años que para las precipitaciones anuales del año medio de la serie. Esta hipótesis fue expuesta por Martínez de Azagra (1996) y se muestra gráficamente en la Figura 2. Todo ello se explica por el umbral de escorrentía que posea cada terreno, variable que evalúa de forma clara el grado de degradación del suelo y de la vegetación. Así, mientras las precipitaciones sean menores que el umbral de escorrentía no se producirá escurrimiento superficial y el ecosistema tendrá unas disponibilidades hídricas iguales a esas precipitaciones caídas. En cambio, si se produce un aguacero superior al umbral de escorrentía se generará escurrimiento superficial, que impedirá que una parte de las precipitaciones se infiltre en el suelo y, por lo tanto, las disponibilidades de agua en el suelo serán menores que las precipitaciones.

Desde el punto de vista de la restauración forestal, la comarca abulense estudiada es poco propicia a la



**Figura 2.** Series progresivas del número de curva (arriba) y de las disponibilidades hídricas (abajo) (Martínez de Azagra, 1996). Según avanza la sucesión vegetal desde la ladera actual degradada hasta el bosque climácico, el número de curva va disminuyendo desde  $NAC$  (número de curva de la ladera actual degradada) hasta  $Nmín$  (número de curva del bosque climácico). Si se intenta restaurar la ladera actual mediante una preparación del suelo (sistematización primaria) se genera un salto en el número de curva, desde  $NAC$  hasta el número de curva equivalente ( $NEQ$ ), más próximo a  $Nmín$ . Por otra parte, en la ladera degradada las disponibilidades hídricas son escasas ( $ANTES$ ), mientras que en el bosque climácico se igualan prácticamente a la precipitación caída ( $I \approx P$ ; para ser más exactos:  $I = P - I_r$ ). Al llevar a cabo la sistematización primaria, se conseguirá un salto en las disponibilidades hídricas ( $PROM$ ), con  $ANTES \ll PROM \leq P$ .

escorrentía superficial y, por lo tanto, a la recolección de agua. Esto se debe a que la geología local favorece la formación de suelos franco-arenosos con buena infiltración, y a que el factor  $R$  de la USLE (Wischmeier y Smith, 1978) es relativamente bajo, con valores entre  $45 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  y  $69 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (ICONA, 1988), lo que denota intensidades de lluvia bajas y, por lo tanto, escorrentías pequeñas.

Por otra parte, la determinación de series de números de curva, de umbrales de escorrentía y de disponibilidades hídricas puede precisarse mucho más instalando parcelas o cuencas experimentales y elaborando, a partir de sus datos, correlaciones y tablas específicas. Pero esta opción, por su elevado coste en tiempo y dinero, escapa de las posibilidades del común de los ingenieros e investigadores. Queremos animar a los hidrólogos que poseen cuencas experimentales para que determinen tipos de suelos, condiciones antecedentes de humedad, tipos de vegetación y números de curva en sus cuencas, en sus complejos hidrológicos y en sus laderas.

## Conclusiones

Para una serie de vegetación es posible establecer la serie paralela de los números de curva y de sus correspondientes umbrales de escorrentía, mediante el correcto uso de las tablas del número de curva y de la ecuación que relaciona el umbral de escorrentía con el número de curva. El parámetro umbral de escorrentía es un buen indicador de la degradación del suelo y de la vegetación y, por ello, un buen evaluador de las condiciones hidrológicas de un terreno.

Para la serie de vegetación estudiada (serie silicícola de la encina), un avance en la serie de vegetación supone una disminución del número de curva y un aumento del umbral de escorrentía. Esto implica que, para un mismo aguacero o serie de precipitaciones, una vegetación más evolucionada tendrá menos probabilidad de generar escorrentía superficial y, por lo tanto, menos probabilidad de reducir las entradas de agua al ecosistema.

La evolución progresiva del número de curva en una región hay que concebirla y entenderla como un proceso gradual, es decir: continuo. Los valores indicados en este trabajo son unos puntos de paso de esa serie numérica, que posee como valores extremos 96 y 52, en la serie silicícola de la encina en la provincia de Ávila. La correspondencia de la serie de vegetación

estudiada con la serie de números de curva propuesta es clara y patente aunque no siempre sea biunívoca. Por ejemplo, con la manifestación vegetal tras una roza o incendio es poco evolucionada mientras que el perfil edáfico, arenoso y profundo, nos estará indicando números de curva bajos. Esta circunstancia (hidrológica y edáfica) favorable propiciará la progresión del ecosistema perturbado. Considerando las precipitaciones habituales en las zonas de estudio (año de precipitación media y precipitación máxima con recurrencia de 10 años), la disponibilidad hídrica en el suelo aumenta según se avanza en la serie de vegetación hacia formaciones vegetales más desarrolladas, arbóreas, próximas a la climácica (encinar denso). Las diferencias en la disponibilidad hídrica se deben a las diferencias en los umbrales de escorrentía (y, consecuentemente, en los números de curva), y serán tanto mayores cuanto más copiosos (y menos frecuentes) sean los aguaceros.

## Referencias

- Bailey R.G., 1996. *Ecosystem Geography*. Springer, Nueva York.
- Ceballos L., 1938. Regresión y óptimo de vegetación en los montes españoles (Significación de los pinares). Copia reprográfica sin otra referencia.
- Cerdá, A.; 1995. *Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Monografías científicas nº 5. Geoforma ediciones. Logroño.
- Chang M., 2003. *Forest Hydrology*. CRC Press, Florida.
- Clements F.E., 1928. *Plant succession and indicators*. The H.W. Wilson Company, Nueva York.
- Dume G., 1996. Dossier: 20 ans de typologie des stations forestières. *Forêt-entreprise* 102, 25-31.
- Fernández de Villarán R., 2006. Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Huelva, Huelva.
- Ferrer M., 2003. Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), Madrid.
- Hawkins R.H., Ward T.J., Woodward D.E., Van Mullen J.A. (Eds.), 2009. *Curve number Hydrology. State of the practice*. ASCE, Reston.
- Icona, 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor  $R$  de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza), Madrid.

- Küchler A.W., Zonneveld I.S. (eds.), 1988. Vegetation mapping. Handbook of vegetation science v. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Loidi J., 1991. Vegetation series: its use for small scale geobotanical mapping. *Phytocoenosis* 3, 119-122.
- López Cadenas, F. (Dir.), 1998. Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa, Tragsatec, Madrid.
- Martínez de Azagra A., 1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Mundi-Prensa, Madrid.
- Martínez de Azagra A., Hospital J.M., 2004. Programa informático MODIPÉ (versión 2.0). Disponible en [www.oasificacion.com](http://www.oasificacion.com).
- Martínez de Azagra A., Mongil J., Rojo, L., 2004. Oasificación: a forest solution to many problems of desertification. *Invest Agrar Sist y Recur For* 13 (3), 437-442.
- Martínez de Azagra A., Mongil J., Del Río J., Rojo L., 2006. Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasificación. *Ecología* 20, 453-470.
- Martínez de Azagra A., Mongil J., Navarro J., Del Río J., Rojo L., 2009. Hidrología de conservación de aguas. En: Hidrología de conservación de aguas. Captación de precipitaciones horizontales y de escorrentías en zonas secas (Navarro J., Martínez De Azagra A., Mongil J., (Coords.). Servicio de Publicaciones Universidad de Valladolid. Valladolid.
- Mongil J., 2004. Desarrollo y aplicación de una metodología destinada al dimensionado de sistemas de recolección de agua para la restauración forestal en zonas áridas. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Mongil J., Martínez de Azagra A., 2006. Diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas: Tamaño del microembalse y relación entre el área de impluvio y el área de recepción. *Investigaciones Geográficas* 40, 201-226.
- Montero De Burgos J.L., 1987. La regresión vegetal y la restauración forestal. *Boletín de la Estación Central de Ecología*.
- Montoya J.M., 1989. Aplicación forestal de los mapas de series de vegetación. *Ecología* 3, 117-119.
- Ortuño F., Ceballos A., 1977. Los bosques españoles. Imprenta Sevillana, S.A., Sevilla.
- Peralta J., Olano J.M., Vicente A., Donézar M., 2003. Estudio de las series de vegetación de la cuenca de Pamplona y Valdizarbe (Navarra, Comarca agraria III): interés de su cartografía y aplicación. *Acta Bot Barc* 49, 324-340.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., Saxton K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25(5), 1316-1320, 1328.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Unsaturated flow in Hydrologic Modeling Theory and Practice*. In: *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling-Theory and Practice* (Morel-Seytoux H.J., ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 275-300.
- Rivas-Martínez S., 1987. Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España. Instituto para la Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Rojo A., Navarro J., Del Río J., Gordo F.J., 2009. Estudio integral de la evolución de las cubiertas vegetales en el T.M. de San Cebrián de Mazote (Valladolid). 5º Congreso Forestal Español. Ávila.
- Ruiz De La Torre J., 1990. Mapa forestal de España, escala 1:200.000. Memoria general. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Ruiz de la Torre J., 2005. Mapa forestal de España, escala 1:1.000.000. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- SCS, 1991. Engineering field handbook. Chapter 2, SCS, Washington D.C.
- Serrada R., 1993. Apuntes de repoblaciones forestales. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.
- Sevilla F., 2007. Ecología del bosque. En: Atlas Forestal de Castilla y León (Gil L., Torre M., eds.). Junta de Castilla y León. Valladolid.
- Sevilla F., 2008. Una teoría ecológica para los montes ibéricos. Instituto de Restauración y Medio Ambiente, León.
- Témez J.R., 1987. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU, Dirección General de Carreteras, Madrid.
- Udall S.L., Dominy F.E., 1966. Diseño de presas pequeñas. Ed. Continental, México D.F.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook, nº537.