

Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones

Alfredo Blanco Andray*
Saúl Martínez Ramírez**
Corina Cisneros Cisneros***

Resumen

La relación existente entre el régimen de precipitaciones y los volúmenes de agua disponibles en ríos y arroyos ha suscitado siempre enorme interés. El conocimiento de los flujos superficiales y subterráneos de agua es objeto sistemático de estudio en disciplinas tales como la Hidrología de superficie y la Hidrogeología. Dicho conocimiento tiene gran repercusión en el manejo y gestión de aguas, utilizando la cuenca hidrográfica como unidad.

En el presente trabajo, se examinan los sistemas de balances hídricos de Thornthwaite y otros autores y el método del N° de Curva del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de U.S.A. (U.S.D.A.) para el cálculo de las aguas de escorrentía. Seguidamente, se propone un método que integra ambas líneas de trabajo, cuya finalidad es poder efectuar balances hídricos para cuencas mediante prospecciones sencillas de datos climáticos, edáficos y de vegetación.

Abstract

The relationship between rainfalls and the water existent in rivers and streams has always caused high interest in man. Hidrology and hidrogeology have studied in depth the hydric flow trough surface of soil and subsoil. Such knowledge has had great repercussion on management of watersheds and implementation of projects.

In this study the usual hydric balances are examined, and the Curve Number model Soil Conservation Service (S.C.S.) is discussed. Following a method is proposed to integrate the models above mentioned, whose objective is carrying out hydric balances for watersheds making simple sampling about climatological, pedological and phytological data.

Introducción

En la mayoría de las regiones áridas y semiáridas el agua constituye un recurso escaso cuya disponibilidad resulta esencial para el desarrollo económico y social. Salvo contadas excepciones, en las que el agua de lluvia es captada directamente mediante balsas o depósitos artificiales, normalmente ésta se recupera después de haber circulado superficial o subterráneamente a través de la cuenca hidrográfica.

La relación existente entre el régimen de precipitaciones, sus tasas de infiltración/escorrentía y los volúmenes de agua disponibles en ríos y arroyos de una cuenca, ha sido siempre un factor de incertidumbre y, por tanto, de estudio.

Ya en la década de los treinta los trabajos de R.E. Horton (1933, 1940) postulando que la inadecuación entre la capacidad de infiltración y el aporte de agua de lluvia eran la causa fundamental de la escorrentía superficial, dominaron el pensamiento hidrológico. Otros autores, así mismo, (Kostiaknow, 1932; Philip, 1957) desarrollaron expresiones para evaluar la capacidad de infiltración y su evolución en el tiempo. Se consideraba que el exceso de precipitación sobre la capacidad de infiltración era el origen de la escorrentía superficial y, por ende, de la formación de los picos de avenida rápidos que se observan en los cauces.

Más tarde, se cuestionó esta explicación fundándose en experiencias de campo, en las que se observaba un aumento rápido del caudal de los ríos con posterioridad a las precipitaciones, sin que se detectara escorrentía superficial apreciable. Algunos autores (Kirkham, 1947) propusieron nuevas teorías al movimiento del agua, sugiriendo que ésta podría introducirse en el suelo y luego aflorar en

* Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid

** Profesor-investigador de tiempo completo de la UTM

*** Profesora-investigadora de tiempo completo de la UTM

otro lugar de la cuenca. Por otro lado, se barajaba la posible existencia de flujos subsuperficiales de agua con una velocidad superior hasta la que entonces se les atribuía, asociado a estudios del movimiento en medios porosos (Tischendorf, 1969).

La estrecha dependencia entre las tasas de infiltración y el contenido previo de humedad del suelo, es otro aspecto que ha corrido parejo en la investigación hidrológica. Green y Ampt (1911) adoptaron modelos de infiltración en un perfil homogéneo de suelo con un contenido de humedad determinado, donde la descripción del avance del frente saturado representa un límite claro y definido. Philip (1957) introduce explícitamente el contenido de humedad del suelo como factor regulador de la capacidad de infiltración. Posteriormente, Holtan (1961, 1975) expresó cuantitativamente la capacidad de almacenamiento de humedad disponible en los horizontes superficiales, no obstante, las dificultades que existían para su evaluación, que generalmente había de hacerse directamente sobre el terreno.

En años recientes, ciertos autores (Sánchez y Blanco, 1985; Gandullo, 1985), han establecido métodos indirectos basados en técnicas paramétricas para el cálculo de la capacidad de retención de agua del perfil edáfico, a partir de variables físicas, orgánicas y de disposición de los horizontes del suelo. Este tipo de evaluaciones, basadas en variables fácilmente medibles en el laboratorio mediante análisis metódicos de suelos, deja explícito el camino para efectuar balances hídricos referidos a una estación y, por extensión, al conjunto de un territorio, cuya unidad lógica es la cuenca hidrográfica.

Los balances hídricos aplicados a una estación

Los balances hídricos adquieren auge a raíz de establecerse el concepto de "evapotranspiración potencial" para un terreno (Thornthwaite, 1948, 1955). Este climatólogo norteamericano halló una fórmula para su cálculo mensual, basada en experiencias realizadas con lisímetros. El cálculo pormenorizado, mes a mes, de las entradas de agua al sistema (lluvias), pérdidas por evaporación y trans-

piración de la vegetación, agua retenida en el perfil edáfico y agua percolada a drenaje profundo, permitía establecer balances hídricos para un lugar determinado y a lo largo de un año meteorológico o el año climático medio (Thornthwaite y Mather, 1957). Posteriormente, otros autores (Penman, 1948, 1963; Blaney Criddle, 1950; Blaney, 1955; Turc, 1961; Van Bavel, 1966; etc.) establecieron también métodos paramétricos de cálculo de la "evapotranspiración potencial", que han sido manejados (lo son, en la actualidad) con mayor o menor éxito y que, a su vez, han sido utilizados en los balances hídricos con ligeras variantes (Cerezuela, 1977; Montero de Burgos y González Rebollos, 1974).

El gran escollo de los sistemas de balances hídricos estriba en evaluar con exactitud la capacidad de retención de agua del suelo, dado que la reserva de agua del mismo interviene decisivamente trasladando stocks a los períodos de tiempo sucesivos y paliando, de este modo, déficits hídricos; así mismo, cuando el suelo completa su capacidad de almacenar agua, todos los inputs hídricos subsiguientes, o bien percolan a capas profundas (acuíferos), o bien drenan subsuperficialmente (escorrentía subsuperficial).

A partir de los métodos de cálculo establecidos por Sánchez y Blanco (1985) y Gandullo (1985) para evaluar la capacidad de retención de agua del suelo, este último autor ha puesto a punto un sistema de balances hídricos (Gandullo, 1985, 1994) que recoge básicamente las ideas de Thornthwaite y Mather (1957), perfeccionando su cálculo. De hecho, tales balances hídricos han sido profusamente utilizados por los primeros autores mencionados en investigaciones dirigidas a la autoecología de especies forestales (Blanco et al., 1989; Blanco, 1990; Bañares et al., 1991; Elena y Sánchez, 1991; Gandullo y Sánchez, 1994; Blanco y Sánchez, 1993; Blanco y Rubio, 1996, 1997). En dicha línea de investigación se relacionan las características hídricas de los suelos (extraídas de los balances hídricos) con la presencia y grado de vigor de las especies forestales que sustentan los mismos.

A continuación, se muestra uno de estos balances a partir de unas características prefijadas de suelo y clima.

	Ener	febr	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AÑO
TEM	14.9	16.1	18.3	19.8	20.5	19.8	19.1	19.2	18.6	17.8	16.3	14.8	
ETP	45.7	49.1	70.1	81.5	92.0	84.9	81.9	80.6	71.1	65.2	53.0	45.2	820.2
PRE	6.9	3.1	5.1	17.7	82.0	179.3	105.0	110.4	138.3	60.0	18.4	5.5	731.7
SUP	0.	0	0	0	0	94.4	23.1	29.8	67.2	0	0	0	214.5
DEF	38.8	46.0	65.0	63.8	10	0	0	0	0	5.2	34.6	39.7	303.0
RES	51.9	36.3	22.0	13.4	12.4	106.9	129.4	129.4	129.4	124.2	95.1	70.0	
ETR	25.0	18.6	19.5	26.3	83.0	84.9	81.9	80.6	71.1	65.1	47.5	30.6	634.1
SF	20.7	30.5	50.7	55.2	9.0	0	0	0.0	0	0.1	5.5	14.6	186.1
DR	0	0	0	0	0	0	0.6	29.8	67.2	0	0	0	97.6

Abreviaturas: TEM: temperatura (grados C.); ETP: evapotranspiración potencial (l/m²); PRE: precipitación (l/m²); SUP: superávit (l/m²); DEF: déficit (l/m²); RES: reserva de agua del suelo (l/m²); ETR: evapotranspiración real (l/m²); SF: sequía fisiológica (l/m²); DR: drenaje profundo (l/m²)

BALANCE HÍDRICO

(CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DEL SUELO = 129.4 L/M²)

(Es decir, se conoce la precipitación mensual, temperatura mensual, latitud del lugar -y, con estas dos variables, la evapotranspiración potencial-y capacidad de retención de agua del suelo evaluada, así mismo, a partir de las características físicas y orgánicas de éste).

Todos los valores (expresados en litros/m², excepto los de temperatura, que se expresan en grados C.) reflejan cifras promedio a lo largo de un período prolongado de años, suficiente para representar las características climáticas de la estación considerada.

Determinación del binomio infiltración/escorrentía

Otro aspecto importante que ha acaparado la atención de los investigadores, ha sido el papel que representaban los tipos de cubiertas vegetales en la dinámica hídrica de una cuenca. Resultaba evidente que un terreno correctamente vegetado poseía tasas mayores de infiltración y menores de escorrentía superficial. Autores como Molchanov en Tellerman, Brasov en Kamennaya y Agapova en Derkul (López y Mintegui, 1986), demostraron que la relación entre el coeficiente de escorrentía y el porcentaje de área forestal de una cuenca se asemeja a una hipérbola descendente. Según estos autores, la escorrentía superficial en terrenos forestales podría representar el 1 % de la precipitación total anual, mientras que en terrenos agrícolas análogos, podría ser del orden del

30 % de la precipitación, y en terrenos no cultivados, del orden del 50 %.

Estas cifras dan una idea de la importancia que tiene mantener una proporción suficiente de terreno arbolado en las cuencas con recursos hidráulicos limitados.

El gran problema, también aquí, estriba en el cálculo de los coeficientes de escorrentía. Numerosos autores como Molchanov, Prevert, Nadal, Keler, Munteanu, Boldakov (López y Mintegui, 1986; Mintegui Robredo, 1993) y muchos otros (Horton, 1933, 1940; Musgrave, 1955; Marsh, 1978; Huber et al., 1981; etc.) han puesto a punto métodos, tablas y expresiones basadas en los tipos y calidades de la vegetación, así como en las clases de suelo, para tratar de evaluar los coeficientes de escorrentía. Pero, quizá, el método más utilizado ha sido el método del N° de curva o N° hidrológico, propuesto por el Soil Conservation Service (S.C.S.) del U.S.D.A. (1978); (Ponce, 1989).

Este método trata de determinar la escorrentía superficial que origina un aguacero o lluvia aislada de intensidad conocida. Se basa en la utilización de unos coeficientes tabulados (N° de Curva) que definen el comportamiento del complejo hidrológico suelo-vegetación en relación con los aguaceros. Es decir, determinan la capacidad que posee la cuenca vertiente de producir escorrentía para un aguacero determinado. Dicha capacidad depende, entre otros, de los siguientes factores:

- Clase de recubrimiento del terreno por la vegetación o tipo de cultivo.
- Tratamiento o explotación del terreno. (Si los cultivos se realizan acordes con prácticas de conservación de suelos o no, y en caso afirmativo, del tipo o tipos de prácticas conservacionistas que se utilizan).
- Condición hidrológica para la infiltración en función del grado de humedad previo del terreno.

Este método pretende ser operativo para aguaceros concretos. Sin embargo, las características estandarizadas de los N° de Curva no abarcan la necesaria multiplicidad de situaciones ambientales en que se encuentra cada cuenca; a pesar del esfuerzo realizado, los complejos suelo-vegetación definidos hasta el momento son insuficientes y se encuentran vagamente tipificados (Ponce, 1989). No obstante, es una deficiencia insoslayable en tanto no surjan nuevos ajustes del método aplicados a casos reales, es decir, a cuencas vertientes con complejos suelo-vegetación mucho más diversificados de los que se incluyen en las tablas actuales.

Por otro lado, el seguimiento del funcionamiento hídrico de una cuenca exige lapsos de estudio más prolongados que los meramente reducidos a la duración de un aguacero. Este hecho impide o dificulta el empleo del N° de Curva en los balances hídricos para cuencas, que generalmente deben referirse a períodos anuales e, idealmente, al año climático medio.

Con estas limitaciones, la manera clásica de abordar estudios integrales sobre el funcionamiento hídrico de una cuenca es la instalación de dispositivos en el terreno capaces de medir en el tiempo y en el espacio los flujos hídricos y los ritmos de respuesta de la cuenca. Esto, lógicamente, obliga a la creación de cierta infraestructura y a un seguimiento frecuentemente largo, dada la irregularidad del clima de unos años a otros.

La otra alternativa, sería efectuar estudios de carácter teórico, sin creación de infraestructura mecánica, valiéndose de los registros meteorológicos y modelos de comportamiento hidrológico del suelo y de la cuenca vertiente

existentes en el momento actual. Pero para ello los métodos de evaluación de las escorrentías/infiltraciones han de ser corregidos para adaptarlos a los sistemas de balances hídricos clásicos.

Esta es la vía propuesta en el presente trabajo. Se pretende conjugar dos líneas de investigación independientes (el cálculo de los balances hídricos referidos a una estación concreta, y el cálculo de las escorrentías/infiltraciones referidas a una cuenca concreta), pero con objetivos confluyentes.

El resultado esperado es poder efectuar un balance hídrico global para el conjunto de una cuenca hidrográfica a partir de datos disponibles o fácilmente capturables (información cartográfica editada, datos de clima extraídos de los registros meteorológicos, datos edáfico-vegetales procedentes del muestreo del suelo y de la vegetación y datos ya tabulados).

La ventaja del método consiste en: una reducción notable de los costes y del tiempo requeridos para estudiar el funcionamiento hidrológico de una cuenca.

Determinación de las escorrentías directas

El método del N° de Curva, elaborado por el Soil Conservation Service del United States Department Agriculture establece que la escorrentía que genera una lluvia aislada es:

$$Q = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S)$$

donde:

Q = escorrentía directa (en l/m²)

P = precipitación del aguacero (en l/m²)

S = cantidad máxima de agua infiltrada (en l/m²)

A su vez, S se calcula en función del N° de Curva N:

$$S = (25400 / N) - 254$$

Dicho N° se encuentra tabulado para cada tipo de complejo suelo-vegetación y para tres estados de humedad del suelo en el momento previo a producirse el aguacero: suelo seco (*condición I*); suelo parcialmente húmedo (*condición II*); suelo saturado (*condición III*).

El comienzo de la escorrentía se produce cuando se rebasa una precipitación límite $P_0 = 0.2 S$, por lo que la primera expresión sólo es válida cuando el numerador es positivo, es decir, $P \geq P_0$. De lo contrario, $Q = 0$.

Generalmente, los observatorios meteorológicos más abundantes y extendidos en el mundo sólo proporcionan datos pluviométricos (y, a lo sumo, termométricos); en ellos se suele consignar la cuantía de la precipitación mensual y el n° de días con lluvia habidos en cada mes. No es posible, pues, conocer la cuantía de la precipitación de cada uno de los aguaceros producidos y sólo los principales observatorios (generalmente ubicados en grandes ciudades o aeropuertos) proporcionan dicha información.

Sin embargo, con los datos proporcionados por la red de observatorios pluviométricos y termopluviométricos, es posible efectuar algunos ajustes que hagan razonablemente viable el empleo del método del N° de Curva.

Puesto que dicho método está diseñado para lluvias aisladas, una aproximación válida consiste en evaluar la cuantía del aguacero medio para cada mes:

$$P_a = P / n^\circ$$

siendo:

P_a - aguacero medio mensual (en l/m^2)

P - precipitación media mensual (en l/m^2)

n° - número medio de días de lluvia en el mes

La determinación de N exige conocer las características de la vegetación y del suelo, así como la humedad de éste.

Los dos primeros aspectos no varían sensiblemente a lo largo del año climático. Por lo tanto, son susceptibles de

ser estudiados en cualquier momento, bien mediante información documental de gabinete, si es que existiera, bien mediante muestreo de campo. Pero, la humedad del suelo va cambiando a medida que se producen precipitaciones y la infiltración de éstas, a su vez, se ve condicionada por dicha humedad.

El grado de humedad de un suelo previo a producirse el aguacero es difícil de estimar si no es efectuando mediciones directas. El método del U.S.D.A., aunque establece unas condiciones teóricas (cuantificación de la lluvia caída durante los cinco días anteriores al aguacero considerado) en la práctica, tampoco resulta operativo por la dificultad de acceso a dichos datos en la mayoría de los observatorios; además, la asignación de los mencionados estados de humedad (condiciones I, II y III) es bastante discrecional, ya que los valores frontera varían según la inclusión de cada mes en los llamados período húmedo o período seco. En el método del U.S.D.A. se considera período húmedo al intervalo que abarca de Octubre a Marzo, ambos inclusive; período seco, al resto del año. Pero, la decisión de incluir a cada mes del año en uno de esos dos períodos, debe depender, en buena lógica, de las características de la estación y del régimen climático a lo largo del año.

Por ello, se propone adoptar el criterio tradicional de distinción entre período húmedo y seco seguido en los balances hídricos de Thornthwaite, es decir:

- período húmedo: meses en que la precipitación (P) supera a la evapotranspiración potencial (ETP)
- período seco: meses en que la evapotranspiración potencial (ETP) supera a la precipitación (P)

Así mismo, la estimación de la precipitación caída en los cinco días que preceden al llamado *aguacero medio*, debe descansar, en buena lógica con este último, en un concepto de humedad promedio, es decir, $(P/30)5$.

De este modo y a partir de los intervalos de clase establecidos por el U.S.D.A. para cada condición de humedad, ya sería posible asignar este concepto al suelo en cuestión.

Llegados a este punto, así mismo, ya es posible determinar el No. de Curva, pues se encuentra tabulado para diferentes complejos de suelo-vegetación-humedad edáfica¹.

Por lo tanto, una vez conocido N, la escorrentía superficial generada por el aguacero medio sería:

$$Qa = (Pa, - 0.2 S)^2 / (Pa + 0.8 S)$$

sabiendo que:

$$S = (25400 / N) - 254$$

Entonces,

$$Ia = Pa - Qa$$

siendo:

Ia - agua infiltrada en el terreno más el agua retenida por las copas de las plantas y la superficie del terreno (en lo sucesivo, la llamaremos "interceptada"), referida al aguacero medio del mes considerado (en l/m²).

Refiriendo el resultado al conjunto del mes:

$$I = P (Ia / Pa)$$

donde

I - agua infiltrada + el agua interceptada (en l/m²)

Balance hídrico corregido

Recogiendo las ideas anteriores, el balance hídrico de Thornthwaite y Mather (1957), Sánchez y Blanco (1985) y Gandullo (1985, 1994) queda como sigue:

- a) Si el agua infiltrada e interceptada (I) en un mes supera la evapotranspiración potencial de dicho mes, existe superávit de agua. La evapotranspiración real (ETR) coincide con la potencial. Las plantas no padecen sequía fisiológica (SF). El agua sobrante, bien quedará retenida en el suelo si éste no ha completado su capacidad de retención de agua, bien drenará a profundidad (DR) si no ocurre así.
- b) Si por el contrario, la infiltración e interceptación es inferior a la evapotranspiración potencial, existe déficit de agua. Pero, como la eficacia térmica del clima exige una pérdida de agua superior a la aportada por el sumando infiltración + interceptación, este déficit tiende a ser paliado por el agua existente en el suelo, que reduce sus reservas. La evapotranspiración real (ETR) de ese mes, entonces, es la suma de I y de la reducción de la reserva de agua del suelo. La sequía fisiológica (SF) puede evaluarse a través de la diferencia entre los valores de ETP y ETR.

Puede admitirse que la reserva de agua de un suelo (RES), frente a una demanda climática no compensada con la I, varía de acuerdo con la siguiente fórmula exponencial:

$$RES \text{ (al final del mes } j) = K e^{-S_{dj} / K}$$

siendo K la reserva de agua al final del período húmedo (y cuyo valor coincidirá con la capacidad de retención de agua del suelo si durante este período húmedo ha habido suficientes superávits para completarla), y S_{dj} la suma de los déficits mensuales desde que comenzó el período seco hasta finales del mes j.

Cuando la suma de superávits no llega a completar la capacidad total de retención de agua del suelo, k tiene que deducirse a través de la siguiente ecuación lógica:

$$K e^{-S_{dj} / K} + S_s = K$$

Con arreglo a los razonamientos anteriores ya puede confeccionarse el balance hídrico de una estación referido a los doce meses del año. Como requisitos in-

¹ Algunos autores (Castillo, Martínez-Mena y Albadalejo, 1997) proponen estimar el N "óptimo" para cada cuenca, cuando existen datos de precipitación y escorrentía, efectuando una calibración previa del modelo que liga a S con N.

dispensables de partida, es necesario conocer las características climáticas de la estación y la capacidad de retención de agua del suelo (tal y como se señaló en el apartado precedente).

A continuación, se incluye un ejemplo para una estación ubicada en una región subhúmeda del centro de España. Se observa que el período seco se circunscribe a los meses centrales del año; el período húmedo se extiende de octubre a abril, ambos inclusive. Durante este último, el suelo se encuentra saturado de agua los cuatro primeros meses del año (Enero-Abril), existiendo un sobrante de agua que drena a profundidad. A lo largo del período seco, las plantas padecen sequía fisiológica; los tres últimos meses (Octubre-Diciembre) ya no padecen sequía, pues el sobrante de agua se emplea en incrementar la reserva hídrica del suelo.

Otro ejemplo ilustrativo puede ser el correspondiente a una región semiseca del sur de México, con una precipitación anual parecida a la del caso anterior (también parecida la cifra de infiltración), pero con una distribución mensual de las precipitaciones muy distinta, así como con un suelo de escasa capacidad de retención de agua. En este caso se observa que el período húmedo abarca de Junio a Septiembre, con un leve altibajo en el mes de Julio; en estos meses, el suelo está casi saturado (en Junio y Septiembre, totalmente). El período seco abarca el resto del año, y la reserva hídrica del suelo desciende casi a cero; las plantas, por tanto, padecen una fuerte sequía fisiológica, que se hace máxima en el mes de Abril. Sólo existe drenaje profundo en los meses de máxima infiltración. La recarga de acuíferos, por tanto, será muy escasa. Esta diferencia con respecto al caso anterior hay que explicarla, fundamentalmente, por las elevadas pérdidas que se producen por evapotranspiración.

	Ener	febr	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AÑO
ETP	4.3	13.6	30.5	49.2	74.8	103.8	120.1	119.2	79.9	52.4	28.5	13.1	689.4
INF	90	80	60	50	40	30	15	10	30	70	70	80	625
SUP	85.7	66.4	29.5	0.8	0	0	0	0	0	17.6	41.5	66.9	308.4
DEF	0	0	0	0	34.8	173.8	105.1	109.2	49.9	0	0	0	372.8
RES	200	200	200	200	168.1	116.2	68.7	39.8	31	48.6	90.1	157	
ETR	4.3	13.6	30.5	49.2	71.9	81.9	62.5	38.9	38.8	52.4	28.5	13.1	485.6
SF	0	0	0	0	2.9	21.9	57.6	80.3	41.1	0	0	0	203.8
DR	42.7	66.4	29.2	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	139.4

ETP: evapotranspiración potencial; INF: infiltración + interceptación; SUP: superávit; DEF: déficit; RES: reserva de agua del suelo; ETR: evapotranspiración real; SF: sequía fisiológica; DR: drenaje profundo

* Todos los valores expresados en litros de agua / m²

** Capacidad de retención de agua del suelo = 200 l/m²

	Ener	febr	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AÑO
TEM	14.9	16.1	18.3	19.8	20.5	19.8	19.1	19.2	18.6	17.8	16.3	14.8	
ETP	48.2	51.9	74.4	86.8	98.2	90.4	87.1	85.8	75.5	69.2	56	47.6	871.2
INF	6.5	3.2	5.3	20.7	78.5	155.3	78.1	93.6	100	64.1	18.6	5.3	629.2
SUP	0	0	0	0	0	64.9	0	7.8	24.5	0	0	0	97.2
DEF	41.7	48.7	69.1	66.1	19.7	0	9	0	0	5.1	37.4	42.3	339.2
RES	6.1	2.6	0.8	0.2	0.2	56.7	48.3	56.2	56.7	51.8	26.8	12.7	
ETR	13.1	6.7	7.1	21.2	78.6	90.4	86.4	85.8	75.5	69	43.6	19.4	596.8
SF	35.1	45.2	67.3	65.6	19.6	0	0.7	0	0	0.2	12.4	28.2	274.4
DR	0	0	0	0	0	8.4	0	0	24	0	0	0	32.4

ETP: evapotranspiración potencial; INF: infiltración + interceptación; SUP: superávit; DEF: déficit; RES: reserva de agua del suelo; ETR: evapotranspiración real; SF: sequía fisiológica; DR: drenaje profundo

* Todos los valores expresados en litros de agua / m²

** Capacidad de retención de agua del suelo = 56.7 l/m²

Balance hídrico aplicable a una cuenca

Llegados a este punto y rescatando el objetivo inicial de este trabajo, se trataría de extender la información hidrológica obtenida para puntos concretos de la cuenca al conjunto total de la misma.

La territorialización de los datos debe basarse en una buena planificación/elección de los puntos o estaciones de control. Debe llevarse a cabo un muestreo del complejo suelo-vegetación en el que, a partir de parcelas estratégicamente situadas, pueda extraerse toda la información necesaria del perfil del suelo y de la cubierta vegetal que sustenta dicho suelo; la incorporación de la información climática, a partir de la red observatorios meteorológicos y con las interpolaciones oportunas, permitirá la confección de los balances hídricos para cada parcela en cuestión.

La elección de los puntos de muestreo no puede ser arbitraria. El muestreo debe apoyarse en alguna de las técnicas de segregación de territorios al uso, generalmente basadas en métodos estadísticos divisivos (clustering jerárquicos divisivos) (Hill et al., 1975; Hill, 1979; Frontier, 1983). Sólo de esta manera se tendrá la seguridad de que todos los tipos de vegetación y suelos con apreciable representación superficial en la cuenca van a resultar segregados en los llamados "estratos" territoriales.

Seguidamente, en función de la superficie de cada estrato, grado de homogeneidad del mismo y magnitud de los recursos económicos destinados al estudio, se decidirá el número de muestras (parcelas) a tomar en cada estrato. Su número total debe asegurar una bondad mínima entre la información obtenida y la información que se espera inferir para el territorio global de la cuenca.

Una vez que se dispone de los balances hídricos referidos a cada uno de los puntos o parcelas de muestreo,

puede abordarse el paso final, consistente en dar expresión cartográfica a dicha información.

Para lo anterior, podrían seguirse varios criterios. El más simple consistiría en promediar los valores de los balances, estrato a estrato, y generalizar el valor de dicho promedio al conjunto de cada estrato. De este modo, la carta hidrológica final tendría los mismos recintos (estratos) que la carta de estratos obtenida para el muestreo. Es un método rápido, aunque burdo, pues se pierde información zonal.

El sistema más aconsejable sería construir cartas de isolíneas (líneas que unen puntos de igual valor), bien sea de forma manual o automática. Existen aplicaciones informáticas específicas (SURFER) o herramientas opcionales análogas que incorporan algunos Sistemas de Información Geográfica (GIS), que permiten construir computacionalmente estas cartas, efectuando interpolaciones *ex profeso* en zonas donde la intensidad de muestreo se ha reducido o en áreas críticas donde los valores experimentan fuertes cambios de tendencia.

En el caso que nos ocupa, estos programas informáticos pueden generar tantos mapas como valores, índices o parámetros se asignen a cada punto de muestreo de la cuenca (en general, serían los que se extraigan del balance hídrico).

Aún más. Manipulaciones numéricas de los balances hídricos podrán tener un reflejo cuasi inmediato en las cartas hidrológicas, dada la rapidez con la que es posible generar dichos mapas de isolíneas. Esto confiere una gran versatilidad al modelo hidrológico, siendo posible estudiar el comportamiento de la cuenca ante oscilaciones reales o hipotéticas (por ejemplo, cambios en la cuantía y/o distribución de las precipitaciones, transformaciones de las cubiertas vegetales, etc.) **T**

Bibliografía

Agapova en Derkul., Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.

BLANEY, H.F. Water and our crops. *USDA Year-book of Agriculture*. USDA. Washington, 1955, p. 341-345.

- BAÑARES, A., BLANCO, A., CASTROVIEJO, M., FEMÁNDEZ, A., GANDULLO, J.M., MUÑOZ, L.A., SÁNCHEZ P., O. y SERRADA, R. *Estudio ecológico de la laurisilva canaria*. ICONA. Colección Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1991.
- BLANCO, A., CASTROVIEJO, M., FRAILE, J.L., GANDULLO, J.M., MUÑOZ, L.A. y SÁNCHEZ P., O. *Estudio ecológico del pino canario*. ICONA, Serie Técnica nº 6. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1989.
- BLANCO, A. Aplicación de un modelo de balances hídricos al suelo para el control de la infiltración en escombros de residuos radioactivos. *I Congreso Internacional de Química de la ANQUE: sólidos y líquidos*, Puerto de la Cruz, Tenerife, 1990.
- BLANCO, A. y RUBIO, A. Caracterización del hábitat edáfico de los castaños de Navarra. *Actas del IV Congreso Nacional de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, Lérida, 1996.
- BLANCO, A. y RUBIO, A. Autoecología de los castaños navarros. *Actas del I Congreso Forestal Hispano Luso. II Congreso Forestal Español*, Pamplona, 1997.
- BLANCO, A. y SÁNCHEZ P., O. Caracterización y evolución de los suelos bajo pinar (*Pinus pinaster* Ait) en la Sierra de Filabres (Almería). *Actas del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Salamanca, 1993. Tomo III, p. 1617-1622.
- BLANEY, H.F. y CRIDDLE, W.F. *Determining water requirements in irrigated areas*. Soil Conservation Service TP 96. Washington, 1950.
- BOLDAKOV,. Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- BRASOV en Kamennaya,. Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- CASTILLO, V., MARTÍNEZ-MENA, M. y ALBADALEJO, J. Validez del método del N° de Curva para el cálculo de caudales de escorrentía en áreas mediterráneas semiáridas. *I Congreso Forestal Hispano Luso: "Irati 97"*. Pamplona, 1997.
- CEREZUELA, F. *Evaporación y microclimas de la vertiente mediterránea del sur de España*. Universidad de Málaga. Málaga, 1977.
- ELENA, R. y SÁNCHEZ P. O. *Los pinares españoles de Pinus nigra Arn: síntesis ecológica*. Comunicaciones I.N.I.A. nº 81. Madrid, 1991.
- EZCURRA, E., "El problema del agua en las zonas áridas" en *El agua, recurso vital*. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Acatlima. Huajuapán de León, Oax., México, 1993.
- FRONTIER, S. (ed.). *Stratégies d'échantillonnage en écologie*. Masson. Paris, 1983.
- GANDULLO, J.M. *Ecología vegetal*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid, 1985.
- GANDULLO, J.M. *Climatología y ciencia del suelo*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid, 1994.
- GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ P., O. *Estaciones ecológicas de los pinares españoles*. ICONA, Colección Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 1994.
- GREEN y AMPT,. 1911. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HILL, M.O., et al. Indicator species analysis. A divisive polythetic method of classification, and its implications to a survey pinewoods in Scotland. *Journal of Ecology*, nº 63: 597-613, 1975.
- HILL, M.O. TWINSPAN: *A Fortran Program for Arranging Multivariate data in an ordered Two way Table by Classification of the Individuals and Attributes*. Cornell University. New York, 1979.
- HOLTAN, H.N. 1961. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HOLTAN, H.N. A formulation for quantifying the influence of soil porosity and vegetation on infiltration. UNESCO SC 75WS/100. Paris, 1975.
- HORTON, R.E. 1933, 1940. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HUBERT et al. 1981. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990. Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- KELER,. Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- KIRKHAM,. 1947. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- LÓPEZ Cadenas, F. y MINTEGUI, J.A. *Hidrología de Superficie. Tomo I*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. Ingenieros de Montes. Madrid, 1986.
- MARH, W.M. *Environmental analysis for land use and site planning*. Mc Graw-Hill. New York, 1978.
- MINTEGUI, J.A. y LÓPEZ, F. *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz, 1990.

- MOLCHANOV en Tellerman, Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A. 1986.
- MONTERO de BURGOS, J.L. y GONZÁLEZ REBOLLAR, J.L. *Diagramas bioclimáticos*. ICONA. Madrid, 1974.
- MUNTEANU, S.A., GASPAS, R., CLINCIU, I. et LAZAR, N. *Sur le calcul des débits maximums des torrents*. Groupe de Travail de l'Aménagement des bassins versants de montagne, 12-ème session-FAO. Roma, 1978.
- MUSGRAVE, G.V. "How much of the rain enters the soil?" In *The Yearbook of Agriculture*. U.S. Dept. Agriculture, p. 151-159. Washington, 1955.
- NADAL, . Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., A* 193. p. 120, 1948.
- PENMAN, H.L. *Vegetation and Hydrology*. Franham Royal Book C.A.B. Commonwealth Agricultural Bureaux, London, 1963.
- PHILIP, 1957, Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- PONCE, V.M. *Engineering Hydrology*. Principles and Practices. Prentice Hall. New Jersey, 1989.
- PREVERT, Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- SÁNCHEZ P., O. y BLANCO, A. Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. *Montes*, nº 4, p. 26-30. Madrid, 1985.
- U.S.D.A. Soil Conservation Service. *Predicting rainfall erosion loesses. A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. Washington D.C., 1978.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 21, p. 55-94. Washington, 1948.
- THORNTHWAITE, C.W y MATHER, J.R. The water budget and its use in irrigation, *USDA Yearbook of Agriculture*, USDA, p. 346-358. Washington, 1955.
- THORNTHWAITE, C.W. y MATHER, J.R. *Instructions and tables for computing potencial evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology, Publication nº 10. Centertown, N.J., 1957.
- TURC, L, Evaluation des besoins en eau d'irrigation: evapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, p. 13-46., 1961.
- VAN BAVEL, C.H.M. Potential evapotranspiration: the combination concept and its experimental verification. *Water Res. Research*, 2 p. 455-467., 1966.