

DESARROLLO DE UN MODELO SOBRE RECOLECCION DE AGUA APLICABLE A LA RESTAURACION FORESTAL*

A. MARTÍNEZ DE AZAGRA¹

RESUMEN

El presente artículo desarrolla un modelo matemático que cuantifica el volumen de agua que se infiltra en una ladera, es decir: la disponibilidad hídrica del ecosistema desde el punto de vista de la Hidrología de Superficie.

Con vistas al diseño de estructuras colectoras de agua que aseguren el éxito de las restauraciones forestales en zonas áridas (microcuencas, acaballonados, aterrazados) se desarrolla el concepto de sistematización primaria, unidad de terreno que incluye dos zonas bien diferenciadas: una exportadora de escorrentía superficial y la otra recolectora de tales aguas y equipada de un alcorque (o microembalse) del tamaño apropiado para recoger dichos suplementos hídricos.

La aplicación de un balance hídrico puntual a la ladera original (degradada) y a la ladera sistematizada—distinguiendo entre áreas productoras y receptoras de escorrentía— constituye el núcleo central de este trabajo. Las ecuaciones que surgen de este análisis permiten simular el comportamiento hidrológico de cualquier terreno en pendiente y cuantificar las disponibilidades hídricas en las distintas situaciones y lugares de un territorio a reforestar, tema de innegable interés para el restablecimiento de nuestros depauperados campos y montes aquejados de graves procesos de desertificación.

Con el fin de facilitar el uso de las mencionadas ecuaciones generales, éstas se particularizan para dos de los modelos más utilizados dentro de la Hidrología: la ecuación de infiltración de Horton y el método del número de curva. El sistema de ecuaciones resultante—en ambos casos harto prolijo— ha aconsejado su informatización, lo que da lugar a dos programas: HYDNUM y MODIPÉ. A través de un ejemplo práctico se aclara el funcionamiento y la utilidad del primero de los programas. El segundo modelo ha sido dado a conocer con anterioridad.

Palabras clave: Cosecha de agua, unidad sistematizada, microembalse, microcuenca endorreica, restauración de zonas áridas, modelo hidrológico, simulación, informatización.

INTRODUCCION

Un sistema de recolección de agua consiste básicamente en dos partes: un área donde se induce y genera la escorrentía superficial (el área de impluvio o productora) y un área en donde se recogen y almacenan dichos aportes hídricos (el área de recepción o colectora). Es en este área donde se cultiva o se realiza la plantación, que

germina, arraiga y crece mejor gracias al microclima favorable inducido. (Véase la Figura 1).

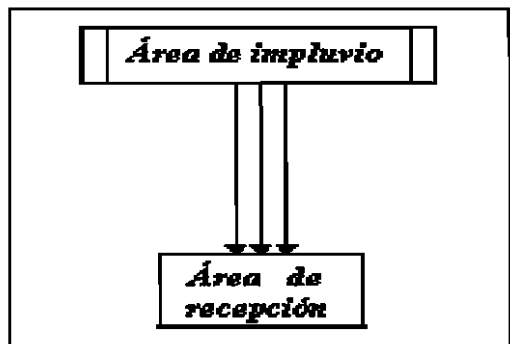


Fig. 1. Principio de la recolección de agua.

* Este trabajo ha sido financiado por la DGCONA en el ámbito de su proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo).

¹ Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. E.T.S. de Ingenierías Agrarias (U. de Valladolid). Avda. de Madrid, 57. 34004 Palencia.

Existen bastantes propuestas metodológicas que tratan de resolver el problema. Es a mediados de los años setenta cuando aparece el primer modelo de simulación para una técnica de cultivo que aprovecha la escorrentía superficial (la *desert strip farming* en el desierto de Arizona). Desde entonces y hasta la fecha se han propuesto nuevos e interesantes modelos [ANAYA *et al.* (1976); SMITH (1978); BOERS *et al.* (1986); NAMDE (1987); ORON & ENTHOVEN (1987); VILLANUEVA *et al.* (1987); GIRÁLDEZ *et al.* (1988); CADOT (1989); HARI (1989); BOERS (1994); etcétera] que ayudan a comprender y a diseñar sistemas de recolección de agua.

El funcionamiento de todos los modelos es análogo: para satisfacer las necesidades hídricas requeridas por las plantas que vegetan en la zona de cultivo, el área de impluvio debe tener el tamaño adecuado. En consecuencia y para el diseño de cualquier sistema de recolección de agua, se parte de las necesidades hídricas del cultivo y se define el tamaño del área productora (S_1) y del área receptora (S_2) o una relación idónea entre ambas (S_1/S_2). Los parámetros fundamentales de partida para el diseño son: las lluvias del lugar (tanto su cantidad como su distribución) y la escorrentía superficial provocada por tales chubascos en el área de impluvio. Mediante una ecuación de continuidad se simula el funcionamiento del área de recepción, siempre con la idea de que variando la superficie del área de impluvio se pueda conseguir que el volumen de escorrentía aportado complete las necesidades hídricas del cultivo.

Así, el balance hídrico básico que plantean estos modelos agrícolas es:

$$DESP = P + E_{s1}$$

siendo P la lluvia caída, E_{s1} la escorrentía aportada por el área productora y DESP la cantidad de agua disponible en el área receptora (o de cultivo).

Este balance cabe plantearlo a nivel diario, semanal, mensual o anual introduciendo datos de cantidades o de intensidades de lluvia. La forma de estimar la escorrentía en el área de impluvio también puede ser abordada de distinta manera (coeficientes de escorrentía, método de los complejos hidrológicos, utilización de regresiones lineales, sistema de la onda cinemática, etcétera).

Por otro lado, la ecuación de continuidad anterior cabe complementarla con otras relaciones de índole edáfica (capacidad de retención de agua en el suelo), de naturaleza fisiológica (necesidades hídricas del cultivo, descenso tolerable de humedad), de tipo hidráulico (caudales, velocidad del flujo de escorrentía) y/o de contenido técnico-económico (tamaño de los aperos, superficie mínima cultivable, etc.).

La sencillez de algunos modelos (los que buscan fijar órdenes de magnitud, como por ejemplo: VILLANUEVA *et al.*, 1987) contrasta con la complejidad de otros que persiguen precisión a cambio de muchos parámetros de entrada (vg.: BOERS *et al.*, 1986, BOERS, 1994). Pero ninguno de los modelos nombrados resulta aplicable a la restauración forestal por dos importantes razones: porque no consideran la infiltración en el área de impluvio y porque no dimensionan el tamaño de los alcorques.

En los sistemas de recolección de agua para la agricultura se trata de crear microclimas artificiales más húmedos a modo de oasis en donde cultivar. Cuanto más impermeable sea el área productora mayor será su eficiencia de escurrido, lo que se trata de lograr mediante tratamientos físicos, químicos o biológicos (compactación y alisado del terreno, eliminación de las piedras en superficie, utilización de sales, ceras o riegos asfálticos, supresión de la vegetación, etc.). En el sector forestal los objetivos son bien distintos pues el área de impluvio tiene sólo ese carácter de forma coyuntural y transitoria. El volumen que se infiltra en dicho terreno ayuda al restablecimiento de la ladera degradada y facilita la proliferación de una cubierta vegetal permanente más tupida, razón por la que debe ser cuantificado y hasta incentivado.

Pero con ser importante esta consideración, la razón fundamental por la que los modelos desarrollados hasta la fecha no son aplicables en el sector forestal estriba en que presuponen que todo el agua de escorrentía generada en el área de impluvio se infiltra sin más problemas en el área de recepción. Esta suposición dista mucho de la realidad si no se crean trampas de agua del tamaño adecuado en superficie (microembalses). Ante precipitaciones intensas el agua no tiene tiempo de infiltrarse en el terreno, menos aún si se con-

centra en zonas de recepción. Tal vez en terrenos agrícolas bien mullidos y profundos pueda admitirse esa simplificación (aunque siempre será arriesgada sin cálculos que la confirmen) pero en modo alguno puede darse por válida tal suposición en los suelos pobres y esqueléticos que suelen ser objeto de restauración o recuperación.

DESCRIPCION DEL MODELO

Por lo anteriormente expuesto y desde el punto de vista de la Hidrología de Superficie, las cuatro ecuaciones a considerar para desarrollar un modelo forestal específico sobre recolección de agua son:

-1- $DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$

-2- $PIMP = P - E_{s1}$

-3- $PROM = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2}{S_1 + S_2}$

-4- $\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t)$

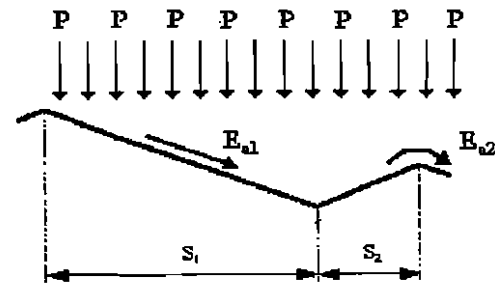


Fig. 2. Visión esquemática de una unidad sistematizada.

- en donde: P es la precipitación del agua-cero analizado;
 DESP, la infiltración o disponibilidad hídrica del área de recepción;
 PIMP, la disponibilidad hídrica del área de impluvio;
 PROM, la disponibilidad hídrica media en la unidad sistematizada (\approx en la ladera);
 E_{s1} , la lluvia neta o escorrentía superficial que se produce en el área de impluvio;

- E_{s2} , la escorrentía superficial que escapa de la unidad sistematizada;
 S_1 , la superficie correspondiente al área de impluvio;
 S_2 , la superficie del área de recepción;
 S , el tamaño de la unidad sistematizada ($S = S_1 + S_2 = 1/\text{densidad de la repoblación}$)
 $\frac{dV}{dt}$, la variación del volumen de agua acumulado en el microembalse durante dt;
 $I(t)$, el caudal de entrada al área de recepción;
 $Q(t)$, el caudal de salida fuera del microembalse.

La correcta ordenación y el aprovechamiento del agua de escorrentía en laderas que padecen procesos de desertificación por aridez edáfica (MARTÍNEZ DE AZAGRA & CALVO, 1996) resulta una estrategia muy eficaz para invertir la sucesión regresiva que amenaza a tales ecosistemas. La preparación del suelo debe crear áreas de impluvio y áreas recepción. Gran parte de las técnicas forestales de preparación del suelo originan este efecto definiendo una parcelación en la ladera en donde cabe identificar un área productora y otro área receptora de escorrentía (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996). Denominamos unidad sistematizada a cada compartimento formado en la preparación del suelo.

Por la pendiente del terreno y por el reducido tamaño de estas unidades ($S = S_1 + S_2 \leq 100 \text{ m}^2$) el tiempo de circulación del agua es muy reducido dentro de ellas (escasos minutos como máximo) por lo que no se precisa hacer uso de ecuaciones hidráulicas del flujo en ladera. Por otro lado, cabe asumir que las unidades sistematizadas funcionan independientes entre sí. Ambas hipótesis simplifican el fenómeno real; conducen a resultados con una ligera desviación por defecto del agua infiltrada en la ladera. Pero este sesgo resulta apropiado si se desea estar del lado de la seguridad a la hora de estimar la disponibilidad hídrica de un terreno árido.

El esquema conceptual de funcionamiento de una unidad sistematizada queda reflejado en la

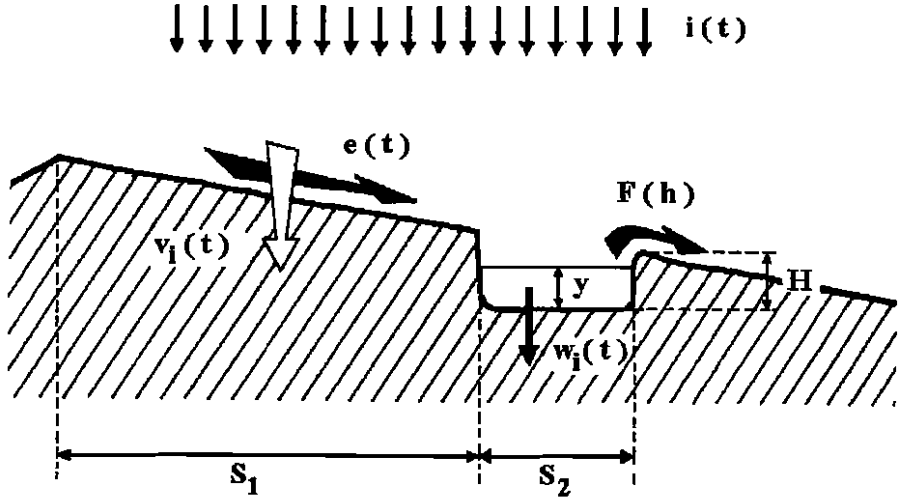


Fig. 3. Funcionamiento de una microcuenca con poceta.

Figura 3. En ella se aprecia que llueve con una intensidad de lluvia, $i(t)$, lo que provoca una velocidad de infiltración, $v_1(t)$, en el área de impluvio [inferior a la lluvia] y una escoorrentía, $e(t)$, que alimenta al área de recepción. Para asegurar la recolección de agua hay una poceta (microembalse) que acumula los excedentes que no pueden ser infiltrados de forma inmediata. Si la lámina de agua supera la altura H , el agua rebosa y se pierde fuera de la unidad. En caso contrario, el sistema hidrológico resulta endorreico al aguacero ($E_{s2} = 0 \text{ mm}$).

Gracias a la hipótesis de independencia, el volumen de agua infiltrado en el área de impluvio (PIMP) puede determinarse fácilmente:

$$\text{PIMP} = \int_0^D v_1(t) \cdot dt = \int_0^D [i(t) - e(t)] \cdot dt$$

siendo: D la duración del aguacero, $v_1(t)$ la velocidad de infiltración de agua en el área de impluvio, $i(t)$ la intensidad de lluvia y $e(t)$ la intensidad de escoorrentía instantánea generada por el aguacero.

Como se deduce por la ecuación anterior, no contemplamos la posibilidad de que el proceso de infiltración se prolongue por más tiempo que la duración del aguacero, es decir: suponemos un área de impluvio sin depresiones que puedan

haber almacenado agua. Tampoco consideramos la posibilidad de que una parte de la lluvia neta surgida en un periodo de tiempo pueda infiltrar en el mismo área de impluvio ante una disminución de la intensidad de lluvia, por ser el tiempo de tránsito hasta el área de recepción muy pequeño. En definitiva y a nivel práctico, suponemos que toda la lluvia neta generada por el aguacero en el área de impluvio llega al área de recepción como escoorrentía superficial. En consecuencia:

$$E_{s1} = S_1 \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt$$

siendo E_{s1} el volumen de escoorrentía superficial generado por el aguacero en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción. Si se desea dar este resultado en litros por metro cuadrado de área receptora, habrá que escribir:

$$E_{s1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt$$

La infiltración que se produce en el área de recepción resulta más compleja de calcular y pasa indefectiblemente por establecer una ecuación de continuidad en el microembalse con la que obtener el volumen de escoorrentía que escapa de la unidad sistematizada (E_{s2}).

$$\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t)$$

en donde: $I(t) = i(t) \cdot S_2 + e(t) \cdot S_1$
son las entradas de agua al microembalse;

$Q(t) = w_i(t) \cdot S_2 + F(h)$
son las salidas de agua con $w_i(t)$ = tasa o velocidad de infiltración en el área de recepción y $F(h)$ = caudal de salida a través del vertedero o rebosadero de la estructura que es función de la carga de vertido (h).

En consecuencia, la ecuación del microembalse se escribe:

$$\frac{dV}{dt} = i(t) \cdot S_2 + e(t) \cdot S_1 - w_i(t) \cdot S_2 - F(h)$$

o bien de esta otra manera (MARTÍNEZ DE AZA-
GRA, 1994):

$$\frac{S(y) \cdot dy}{dt} = \frac{i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - w_i(t) \cdot S_2 - k \cdot (y - H)^x}{dt}$$

siendo: y la profundidad de la lámina de agua en el microembalse, $S(y)$ la superficie anegada y $k \cdot (y - H)^x$ la ecuación de descarga del rebosadero [con k = coeficiente de gasto, $(y - H) = h$ = carga de vertido y x = exponente de descarga que vale 1,5 para vertidos no sumergidos].

Se trata de una ecuación diferencial no separable cuya integración sólo es posible bajo determinados supuestos. Una vez integrada podemos obtener el volumen de escorrentía superficial que escapa de la unidad sistematizada (E_{s2}) con lo que tenemos resuelto el sistema.

$$E_{s2} = \frac{1}{S_2} \int_0^{D+t_v} F(h) \cdot dt$$

siendo t_v el tiempo final de vertido o de rebosadura

$$DESP = P + \frac{S_1}{S_2} \int_0^D e(t) \cdot dt - \frac{1}{S_2} \int_0^{D+t_v} F(h) \cdot dt$$

También y para hallar el volumen de agua infiltrado en el área de recepción (DESP) podemos acudir a esta otra ecuación:

$$DESP = \int_0^{D+t_v} w_i(t) \cdot dt + \frac{V_f - V_i}{S_2}$$

pero también en este caso y para determinar V_f (volumen de agua acumulado al final del chubasco) y V_i (volumen de agua inicial en el microembalse), hemos de apoyarnos en la ecuación diferencial.

TIEMPOS CARACTERISTICOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MICROEMBALSE

Al inicio de un chubasco tanto el área de impluvio como el área de recepción suelen ser capaces de infiltrar todo el agua que precipita. Transcurrido un cierto tiempo se alcanza el punto de encharcamiento en el área de impluvio. A partir de este momento el sistema empieza a producir escorrentía para el área de recepción. El episodio de lluvia resulta rentable para la economía del área colectora, que se ve enriquecida con aguas ajenas además de las pluviales que le son propias.

El encharcamiento del área receptora puede demorarse o adelantarse a la llegada de las aguas de escorrentía donadas por el área de impluvio. Cabe distinguir así dos puntos de encharcamiento: uno correspondiente al área productora (t_i) y que define el instante en el que la lluvia empieza a ser eficaz a la sistematización planteada; el otro correspondiente al área de recepción (t_r) y que marca el comienzo de llenado del microembalse.

Siempre que la capacidad de infiltración del área de impluvio sea menor que la capacidad de infiltración del área de recepción, la formación de escorrentía en la primera zona se adelantará con respecto a la aparición de los primeros charcos en la segunda (para $t_i < t_r$). Esta situación denota una mayor capacidad de acogida de agua por parte del área de recepción, lo que resulta ventajoso para los objetivos perseguidos: sin necesidad de crear una represa o poceta la disponibilidad hídrica del área colectora tiende a ser mayor que la del área de impluvio.

El funcionamiento del microembalse queda reflejado con la ecuación diferencial enunciada en el epígrafe anterior. Para un aguacero sencillo (es decir, con sólo dos tiempos de encharcamiento, t_i

y t_c) que sea mayor que la precipitación límite de la unidad sistematizada, cabe distinguir cuatro situaciones diferentes que se corresponden con otras tantas particularizaciones de la mencionada ecuación diferencial: una fase inicial de llenado sin vertido, una segunda etapa de llenado con rebosadura, una tercera fase de vaciado con rebosadura tras la conclusión del aguacero, y —por último— una fase de vaciado sin vertido hasta que concluye la infiltración del agua almacenada. Acortando cada una de estas etapas existen unos tiempos característicos que pasamos a describir:

$t_0 = 0$; inicio del aguacero

t_1 = tiempo de encharcamiento del área de impluvio

t_r = tiempo de encharcamiento del área de recepción

t_l = tiempo límite para la unidad sistematizada (momento en el que comienza E_{s2})

D = duración del aguacero

t_v = tiempo final de rebosadura (lapso entre el final del chubasco y la conclusión del vertido)

t_f = tiempo de conclusión (= duración de la infiltración en el microembalse)

En la Figura 4 esquematizamos las etapas de funcionamiento del microembalse, indicamos la ecuación diferencial válida para cada caso y señalamos los tiempos característicos. Existe un programa informático (FUMIC.EXE) desarrollado por J. del Río y R. Fernández de Villarán en 1995 que visualiza en pantalla todas estas circunstancias (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996). Para aguaceros complejos en los que se produzcan importantes variaciones de la intensidad de lluvia podrá haber etapas intermedias de vaciado y/o llenado, como se comprende fácilmente.

Las diferencias que existen entre los planteamientos clásicos de la Hidrología de Superficie y los contemplados en este trabajo son manifiestas y pueden resumirse en una simple frase: lo importante para un ecosistema árido en ladera no es el agua que se va sino el agua que se queda. Así, en nuestro caso destacamos los tiempos previos al comienzo de la rebosadura y el tiempo total de infiltración mientras que nos olvidamos de los habituales tiempos característicos del hidrograma (excepción hecha del tiempo base al

que denominamos periodo de rebosamiento y que tratamos de anular con las trampas de agua). Establecemos con ello un nuevo campo dentro de la Hidrología Forestal de zonas áridas, más cercano al monte y algo más alejado de la red de drenaje.

PARTICULARIZACIONES AL MODELO GENERAL

Las ecuaciones generales desarrolladas en los apartados anteriores pueden concretarse para distintas sistematizaciones y aguaceros. Los diferentes casos que cabe plantear son muy numerosos y se obtienen por combinación de las siete (u ocho) variables de entrada que tiene el problema planteado: la superficie del área de impluvio (S_1) y del área de recepción (S_2) así como la capacidad máxima del microembalse ($CAPA \approx S_2 \cdot H$) son constantes mientras que el resto de parámetros varían con el tiempo. La velocidad de infiltración del área productora [$v_1(t)$] y del área colectoras [$w_1(t)$], la ecuación de descarga de las demasías [$F(h)$], y la superficie anegada en el microembalse [$S(y)$] dependen de la intensidad de lluvia [$i(t)$] y están interrelacionadas a través de la tan mencionada ecuación diferencial.

Se comprende que las posibilidades sean pocas o muchas, razón por la que sólo vamos a esbozarlas. A nivel de aguacero cabe trabajar con yetogramas de chubascos realmente acaecidos o —por el contrario— con precipitaciones sintéticas que posean alguna significación estadística que convenga analizar. La particularización más sencilla consiste en trabajar con aguaceros de intensidad constante [$i(t) = k$].

Para caracterizar el proceso de infiltración en el área de impluvio y en el área de recepción caben distintas posibilidades: desde trabajar directamente con los datos experimentales obtenidos sobre el terreno con infiltrómetros o con simuladores de lluvia, hasta utilizar modelos generales sencillos y semicalibrados, como por ejemplo el método del número de curva, o tabajar con tasas de infiltración constantes (vg. la capacidad de infiltración media para un determinado lapso de tiempo). Una solución intermedia consiste en ajustar los valores experimentales obtenidos a ciertos modelos de infiltración (ecuación de Horton, o de Kostiaikov, o de Philip, etc.). A este res-

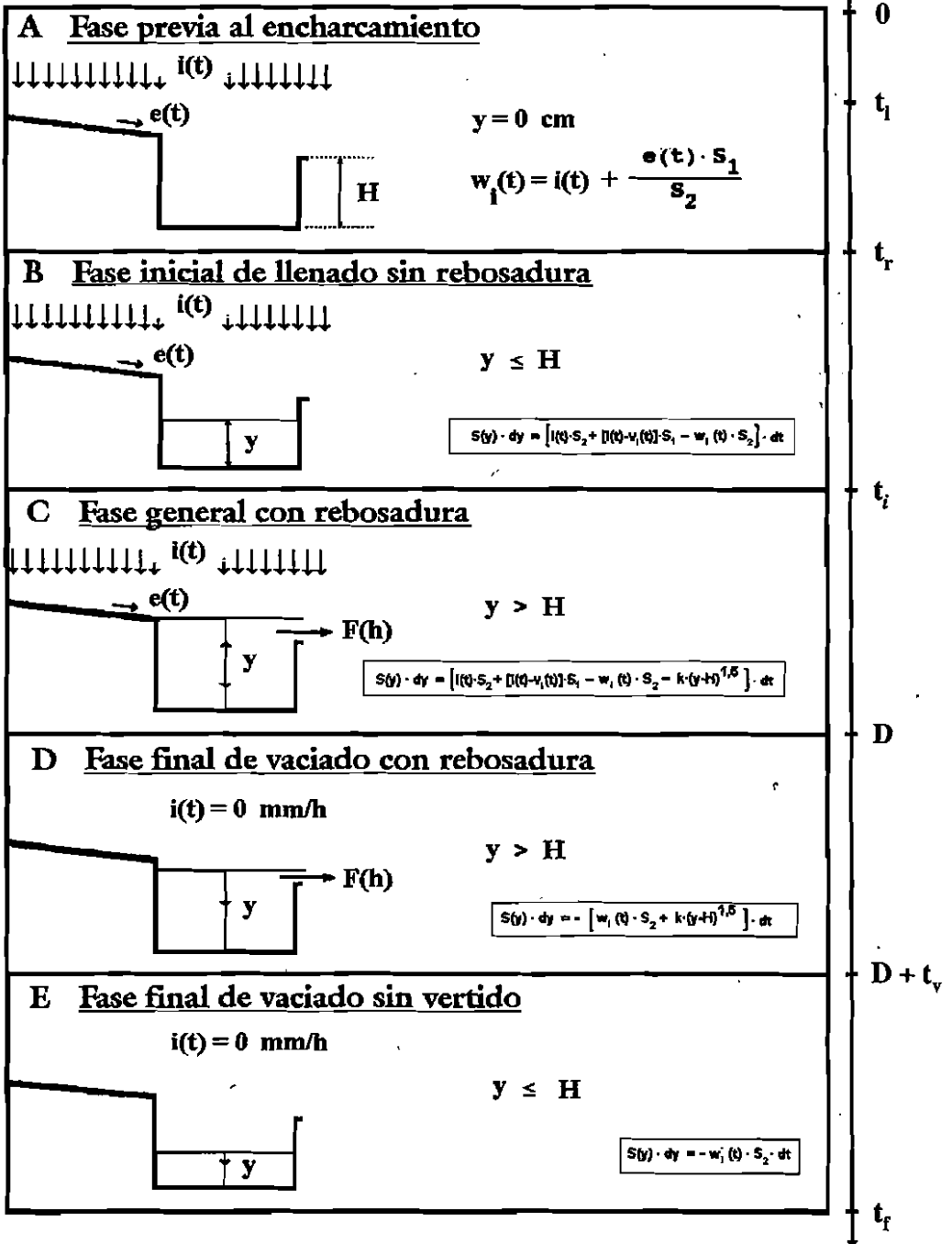


Fig. 4. Tiempos característicos de funcionamiento de un microembalse.

pecto conviene indicar que aquellos modelos que fijan la capacidad de infiltración en función del tiempo y del volumen de agua precedente infiltrado (ecuación de Green-Ampt, o de Holtan, etc.) no resultan útiles para este estudio ya que precisan de un dato de entrada que es la incógnita principal buscada.

La rebosadura de agua, de producirse, sigue la ecuación de descarga a través de un vertedero. Una hipótesis simplificada de trabajo consiste en admitir que el vertido de las demasías es instantáneo en cuanto el agua alcanza la coronación del rebosadero, suposición que vuelve a estar del lado de la seguridad.

Por último, la superficie anegada (o el volumen de agua almacenado en la microdepresión) son muy sencillos de conocer bajo la suposición de horizontalidad de la superficie libre del agua. Basta con conocer el calado y la topografía del vaso del microembalse para tener resuelta la cuestión. Una simplificación que conviene contemplar es la de suponer que la superficie anegada es constante y que coincide con el área de recepción en todo momento: $S(y) = \text{cte} = S_2$.

Como primeras particularizaciones del modelo general hemos desarrollado dos: una de ellas utiliza el método del número de curva para estimar escorrentías y evaluar infiltraciones. Es la metodología más sencilla y fácil de aplicar. Ha sido dada a conocer en detalle a través de un libro que incorpora un disquete con el modelo informatizado (programa MODIPÉ; MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996).

La segunda particularización trabaja con el modelo de infiltración de HORTON (1940) asumiendo para el cálculo de los tiempos de encharcamiento las hipótesis de MLS (1980), KUTÍLEK (1980) y VERMA (1982). Concibe dos curvas de capacidad de infiltración diferentes para así poder simular los efectos de la preparación del suelo: una ecuación para el área de impluvio [$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$] y otra para el área de recepción [$g(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t}$]. Por lo tanto y para caracterizar el proceso de infiltración, este modelo trabaja con seis parámetros de entrada [capacidad de infiltración inicial (f_0 y g_0), capacidad de infiltración final (f_c y g_c) y exponente de decrecimiento (α y β , respectivamente)] frente a

los dos parámetros que utiliza MODIPÉ [a saber: los números de curva del área de impluvio (NI) y del área de recepción (NR)].

Este segundo modelo (HYDNUM) trabaja con una lluvia de intensidad constante y de duración variable ($i(t)=k$; D). Para un aguacero con estas características cuya intensidad de lluvia esté comprendida entre las tasas de infiltración máxima y mínima del suelo (es decir: $f_c < k < f_0$), el tiempo de encharcamiento en el área de impluvio (t_i) se obtiene mediante la expresión:

$$t_i = \frac{1}{\alpha \cdot k} \cdot \left[f_0 - k + f_c \cdot \ln \frac{f_0 - f_c}{k - f_c} \right]$$

(VERMA, 1982)

Para conocer la tasa de infiltración una vez alcanzado el tiempo de encharcamiento hay que calcular un cambio cronológico o desplazamiento temporal (Δt) que tiene por expresión:

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha \cdot k} \cdot \left[f_0 - k + f_c \cdot \ln \frac{f_0 - f_c}{k - f_c} \right] + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{k - f_c}{f_0 - f_c}$$

Este desfase temporal encuentra plena justificación física en el hecho de que el suelo infiltra al comienzo de la lluvia menos de lo que es capaz (k en vez de f_0), ahorro que conduce a un tiempo de encharcamiento posterior al que se deduce igualando la capacidad de infiltración con la intensidad de lluvia.

Una vez calculado Δt , la velocidad de infiltración en el área de impluvio resulta:

$$v_i(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)}$$

con lo que estamos en condiciones de obtener el volumen de agua infiltrado en el área de impluvio a raíz del aguacero:

$$PIIMP = \int_0^D v_i(t) \cdot dt = \int_0^t k \cdot dt + \int_t^D [f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)}] \cdot dt$$

$$PIIMP = k \cdot t_i + f_c \cdot (D - t_i) + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} \cdot$$

$$\cdot e^{-\alpha \cdot t_i} - \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot D}$$

De forma análoga se puede obtener el tiempo de encharcamiento en el área de recepción (t_r) y el volumen de agua infiltrado (DESP). En este caso las expresiones resultan bastante más complicadas. Así y para obtener t_r , hay que considerar que el área colectora está recibiendo la lluvia directa junto con la escorrentía del área de impluvio (a partir del instante t_i). La intensidad de lluvia equivalente valdrá:

$$i(t) = k + [k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)}] \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

Por otro lado, la ecuación diferencial del microembalse se escribe de la forma siguiente:

$$S(y) \cdot dy = [k \cdot S_2 + \Theta \cdot \{k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)}\} \cdot S_1 - (g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\Phi t)}) \cdot S_2 - \Omega \cdot k \cdot h^x] \cdot dt$$

en donde todos los términos son conocidos a excepción de los operadores Θ y Ω y del desplazamiento temporal Φt , concepto análogo al visto para el área de impluvio (Δt). Los operadores toman el valor cero o uno dependiendo de si se han alcanzado (o no) determinados tiempos característicos. En concreto: Θ vale cero hasta $t = t_i$, uno a partir de dicho momento y hasta el instante $t = D$, y de nuevo cero al finalizar el chubasco; Ω vale cero hasta que no se alcanza el tiempo límite (t_r), uno hasta el instante $D+t_v$ y nuevamente cero a partir de este momento.

Esta ecuación diferencial rige el proceso de acumulación de agua e infiltración en el área de

recepción desde que se alcanza el tiempo de encharcamiento del área colectora (t_i) hasta el tiempo de conclusión (t_r) en que finaliza la infiltración.

Para la resolución del problema el programa informático HYDNUM supone que la superficie anegada ($S(y)$) coincide con el área de recepción: $S(y)=S_2$ y que al comienzo del aguacero no hay volumen alguno de agua almacenado en el microembalse, es decir: $y = 0 (\Leftrightarrow V_i=0)$. Como ecuación de descarga el modelo utiliza la del gasto a través de un vertedero:

$$F(h) = k \cdot h^x = c \cdot L \cdot (y-H)^{1.5}$$

siendo c el coeficiente de gasto y L el ancho medio del vertedero de demasías.

Como se puede apreciar, las ecuaciones adquieren un aspecto bien poco amigable. En especial es a la hora de resolver la ecuación diferencial del microembalse cuando surgen las expresiones más prolijas. Así, la obtención del tiempo límite (t_r) requiere de aproximaciones sucesivas. El tiempo final de rebosadura (t_v) tampoco queda muy a la zaga pues precisa de bastantes artificios matemáticos. Pero la resolución de las ecuaciones del sistema para definir todos los tiempos característicos (t_i , t_r , t_p , t_v y t_f) no ofrece dificultad conceptual alguna.

Como resumen comparativo de las dos particularizaciones desarrolladas (HYDNUM y MODIPÉ) ofrecemos la Tabla I.

TABLA I
RESUMEN SOBRE LAS DOS PARTICULARIZACIONES DESARROLLADAS POR MARTÍNEZ DE AZAGRA (1995)

| Datos de entrada | Programa HYDNUM | Programa MODIPÉ |
|--|----------------------------------|--|
| Área de impluvio | S_1 | S_1 |
| Área de recepción | S_2 | S_2 |
| Capacidad de embalse | H | CAPA |
| Características de la infiltración en el área de impluvio | f_0, f_c y α | NI |
| Características de la infiltración en el área de recepción | g_0, g_c y β | NR |
| Ecuación de descarga de demasías | $F(h) = c \cdot L \cdot h^{1.5}$ | vertido instantáneo |
| Situación original (ladera inalterada) | — | NAC |
| Aguacero | $i(t) = k$ | 1) aguacero 2) serie de aguaceros 3) año |

Para finalizar incluimos un caso práctico resuelto con el programa HYDNUM que puede resultar bastante ilustrativo. Se trata de una ladera arcillosa y degradada en la comarca de Almazán (Soria). Una vez realizados los ensayos de infiltración los hemos ajustado la ley de Horton por mínimos cuadrados. El resultado ha sido el siguiente: $f_0 = 94$ mm/h; $f_c = 5$ mm/h; $\alpha = 0,05$ min^{-1} . Las unidades sistematizadas tienen una superficie de 10 m^2 (\Leftrightarrow densidad de plantación: 1000 pies/ha). Nueve metros cuadrados constituyen el área de impluvio (en donde no se actúa sobre la vegetación ni sobre el suelo), el metro cuadrado restante es el área de recepción que posee una represa de $H = 200$ mm de altura (luego $\text{CAPA} = 200$ l). La preparación del suelo en la banqueta ha resultado beneficiosa para la infiltración lo que se pone de manifiesto al observar los nuevos parámetros de ajuste a la ley exponencial de Horton: $g_0 = 203$ mm/h ($> f_0$); $g_c = 5$ mm/h ($= f_c$) y $\beta = 0,04$ min^{-1} ($< \alpha$). El vertido de las demasías se produce por los laterales de la banqueta a través de dos rebosaderos a los que hemos asignado un ancho total (L) de medio metro con un coeficiente de gasto (c) de 0,3.

Para un aguacero de intensidad 20 mm/h el tiempo límite de la unidad sistematizada alcanza los 187 min, lo que equivale a una precipitación de $62,3 \text{ l/m}^2$. Este dilatado intervalo de tiempo para la intensidad de lluvia elegida nos da una primera orientación sobre el funcionamiento del sistema, que resulta endorreico para la mayor parte de los algarazos. Las curvas de intensidad - frecuencia de la zona pueden definir el periodo de retorno de la precipitación límite (62,3 mm) de manera precisa. Con similar criterio podemos buscar una garantía de endorreísmo para una serie de años, periodo que deberá relacionarse con la velocidad de crecimiento del repoblado.

De acuerdo con los resultados de la simulación realizada mediante el programa HYDNUM deducimos que para una duración de 50 minutos la precipitación resulta débil. No se producen cosechas de agua. Todo lo que llueve se infiltra en donde cae; así: $\text{PIMP} = \text{DESP} = \text{PROM} = \text{P} = 16,7 \text{ l/m}^2$ pues no se alcanza el tiempo de encharcamiento del área de impluvio: $t_i = 83$ min.

Si duplicamos la duración del chubasco ($D = 100$ minutos) la precipitación resulta eficaz. Provoca

una cosecha de agua de 12,6 litros en el área de recepción (\Rightarrow $\text{PIMP} = 31,9$ mm; $\text{DESP} = 45,9$ mm; $\text{PROM} = \text{P} = 33,3$ mm). Esta cosecha de agua se consigue sin necesidad de represas merced a la buena preparación del suelo en el área colectora ($t_r = 118$ min $> D$, de acuerdo con los resultados del modelo HYDNUM).

Para un aguacero con una duración de 150 min ($P = 50$ mm), la precipitación resulta eficaz pero requiere de unas represas mínimas de 111 mm. Con esta lluvia la aportación del área de impluvio (E_{s1}) es de 107,5 litros. De esta manera una buena parte del agua caída se concentra e infiltra en el área de recepción: $\text{DESP} = 157,5$ mm frente a los $38,1 \text{ l/m}^2$ del área de impluvio.

Si prolongamos la duración del algarazo por encima del tiempo límite ($D > t_l = 187$ min) la microcuenca dejará de ser endorreica. Así, una intensidad de lluvia de 20 mm/h durante 200 min resulta excesiva para la unidad sistematizada. Dicho de otra manera: se precisan unas represas mayores de las proyectadas (233 mm en vez de 200 mm) si pretendemos un aprovechamiento pleno de esta lluvia en la ladera. El desbordamiento conduce a una disponibilidad hídrica promedio inferior a la precipitación incidente: $\text{PROM} = 65,5$ mm frente a los $66,7 \text{ l/m}^2$ registrados en un pluviómetro. La cantidad de agua que escapa de la sistematización vale $E_{s2} = 32,7$ litros. Por otro lado, la escorrentía que recibe el microembalse desde el área de impluvio es de 218,6 litros. Como resultado de estos dos procesos se produce un reparto muy desigual del agua de lluvia: $\text{PIMP} = 42,4$ mm; $\text{DESP} = 273,7 \text{ l/m}^2$. Conviene señalar por último, que debido a las bajas tasas finales de infiltración ($g_0 = 5$ mm/h) el tiempo de conclusión se dilata más de día y medio ($t_c = 2601$ min) lo que puede generar problemas de anoxia en las raíces de las plantas situadas en el microembalse.

CONCLUSIONES

La recolección de agua es una estrategia fundamental para la restauración o recuperación de laderas degradadas en zonas áridas. Además de los procesos erosivos que pueden estar padeciendo, se presenta en ellas una desertificación simultánea por aridez edáfica que conviene invertir mediante trampas de agua (microembalses) con-

venientemente distribuidas y dimensionadas. Las bajas tasas de infiltración de tales laderas pueden ser aprovechadas favorablemente para concentrar el agua y su infiltración en los lugares de plantación. Estos riegos suplementarios en puntos estratégicos ayudan a reducir las marras por estrés hídrico durante las etapas más críticas de arraigo y primer crecimiento de los brinzales.

El aprovechamiento y la ordenación de la escorrentía para beneficio del repoblado deben ser proyectados y ejecutados con esmero ya que concentrar el agua sin realizar cálculos resulta peligroso, sobre todo si se trabaja con densidades de repoblación pequeñas (= unidades sistematizadas grandes). El riesgo de incrementar los procesos erosivos con una intervención improvisada es ele-

vado, tanto mayor cuanto más torrencial sea el clima.

Dado que los modelos agrícolas existentes sobre recolección de agua no son aplicables a la restauración forestal, hemos tenido que desarrollar un modelo hidrológico específico para nuestro sector. Este modelo hidrológico y sus dos particularizaciones abren un nuevo campo dentro de la Hidrología Forestal, más comprometido con la economía del agua de una ladera. Los dos programas informáticos surgidos del proyecto de investigación (denominados HYDNUM y MODIPÉ) permiten tecnificar la preparación del suelo atendiendo a las disponibilidades hídricas requeridas por el ecosistema para progresar hacia asociaciones vegetales más rupidas y evolucionadas.

SUMMARY

A mathematical model to quantify the infiltration in a slope (i.e. the availability of water in an ecosystem from the standpoint of its surface hydrology) is developed in this study. To that fact a new local water balance is worked out.

For the design of water harvesting structures ensuring a successful afforestation of arid lands (micro-catchments, ridging, terracing), the concept of primary systematization is developed. This term refers to a unit area with two markedly different sections: one exporting surface run-off and the other collecting surface run-off by means of an appropriately sized micro-pond receiving the excess water.

At the core of this study lies the application of the local water balance both to the original (degraded) slope and to the systematized slope separating run-off producing from run-off collecting areas. The equations generated through this analysis make possible to simulate the hydrological behaviour of any sloping land and to quantify the available water under different conditions and at specific points of an area intended for afforestation. This, no doubt, should be of help in the rehabilitation of some of our degraded fields and shrublands ravaged by a severe process of desertification.

To assist in the use of these equations, they are spelt out with particular reference to two of the most common models in hydrology: Horton's infiltration equation and the curve number method. The resulting system of equations—fairly lengthy and elaborate in both cases—made computerization advisable. Thus, two programmes, HYDNUM and MODIPE, have been developed. The final part of the study is taken up by an example which shows the potential usefulness of the first program. The second one has been described in a previous work.

Key Words: Water harvesting, systematized unit, micropond, endorheic microcatchment, reforestation of arid zones, hydrologic model, simulation, informatization.

BIBLIOGRAFIA

- ANAYA M., TOVAR S. & MACÍAS A. 1976: *Métodos de captación de lluvia para zonas agrícolas con temporal deficiente*. Colegio de Postgraduados de Chapingo (México)
- BOERS T.M. 1994: *Rainwater harvesting in arid and semi-arid zones*. ILRI Publications (Wageningen).

- BOERS T.M., DE GRAAF, M., FEDDES R.A. & BEN-ASHER J. 1986: «A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones». *Agricultural Water Management*, 11: 187-206.
- CADOT P.D. 1989: *Development of a model for design of water harvesting systems in small scale rainfed agriculture*. Tesis Doctoral. University Microfilms International (Michigan).
- GIRÁLDEZ J.V., AYUSO J.L., GARCÍA A., LÓPEZ J.G. & ROLDÁN J. 1988: «Water harvesting strategies in the semiarid climate of southeastern Spain». *Agricultural Water Management*, 14: 253-263.
- HARI KRISHNA J. 1989: «Modelling the effects of tied-ridging on water conservation and crop yields». *Agricultural Water Management*, 16: 87-95.
- HORTON R.E. 1940: «An approach toward a physical interpretation on infiltration capacity». *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.
- KUTÍLEK M. 1980: Constant rainfall infiltration. *Journal of Hydrology*, 45: 289-303.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A. 1994: *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera. - Fundamentos del modelo*. Informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA, Madrid).
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A. 1995: *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera*. Tesis Doctoral. E.T.S.I. de Montes. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A. 1996: *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Editorial MundiPrensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A. & CALVO POLANCO M. 1996: «Desertización por aridez edáfica». In: *Actas del I Congreso Regional del Agua*. pp. 111-117. Valladolid.
- MILS J. 1980: «Effective rainfall estimation». *Journal of Hydrology*, 45: 305-311.
- NAMDE N.N. 1987: *Simulation of micro catchment water harvesting systems*. Tesis Doctoral. University Microfilms International (Michigan).
- ORON G. & ENTHOVEN G. 1987: «Stochastic considerations in optimal design of a microcatchment layout of runoff water harvesting». *Water Resources Research*, 23: 1131-1138.
- SMITH G.L. 1978: *Water harvesting technology applicable to semiarid, subtropical climates*. Agency for International Development (Washington, D.C.). Bibliographic input sheet: 1-6; Colorado State University. Fort Collins. Colorado.
- VERMA S.C. 1982: «Modified Horton's infiltration equation». *Journal of Hydrology* 58: 383-388.
- VILLANUEVA DÍAZ J., SÁNCHEZ COHEN I. & VELASCO MOLINA H.A. 1987: «Propuesta metodológica para determinar la relación área -siembra- escurrimiento en cultivos de temporal». In: *Symposium on strategies for classification and management of native vegetation for food production in arid zones*. pp. 201-206; Tucson. Arizona.