

## El modelo hidrológico MODIPÉ<sup>1</sup>

*Andrés Martínez de Azagra Paredes  
Dr. Ingeniero de Montes  
Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología  
E.T.S. de Ingenierías Agrarias  
Avda. de Madrid, 57  
34071 Palencia (España)*

### Resumen

El modelo hidrológico MODIPÉ (MODificación de Precipitaciones) pretende mejorar y tecnificar el diseño de las preparaciones del suelo con vistas a la reforestación de zonas áridas. Para ello se centra en la economía del agua de una ladera y plantea el dimensionado de trampas de agua con las que crear microcuencas endorreicas.

Gracias a la recolección del agua proveniente del área de impluvio, el edafoclima del alcorque resulta más húmedo lo que ayuda a reducir las marras por estrés hídrico.

Por el enfoque práctico del trabajo, el modelo hidrológico general se ha particularizado para el método del número de curva en lo que constituye la primera versión del programa informático MODIPÉ.

### 1. Introducción

La obtención de cosechas de agua es una técnica usada por el hombre desde los tiempos más remotos que sigue teniendo gran utilidad en la lucha contra la desertificación por aridez edáfica. Consiste en ordenar y aprovechar la escorrentía superficial alterando el microrrelieve de la ladera hasta conseguir una dotación de agua suficiente en las proximidades del repoblado para su arraigo y primer desarrollo. La creación de alcorques (microembalses) bien dimensionados aumenta la infiltración, reduce la escorrentía superficial y disminuye la erosión hídrica de forma notable.

Pese a ser un método tradicional con un marcado interés actual, hasta la fecha no existe ningún modelo hidrológico que resuelva el problema satisfactoriamente. Con el presente trabajo tratamos de paliar esta sorprendente carencia.

MODIPÉ es un modelo hidrológico que puede resultar muy útil para el correcto diagnóstico de muchos procesos de desertificación y para una acertada toma de decisiones a la hora de restaurar laderas degradadas. Así:

- a) Sirve para caracterizar microclimas de ladera;
- b) ayuda a comprender los procesos de desertificación por aridez edáfica;
- c) permite simular el comportamiento de cualquier unidad sistematizada;
- d) evalúa el efecto hídrico que tienen los distintos procedimientos de preparación del suelo en repoblaciones forestales;
- e) posibilita el diseño técnico de trampas de agua con las que incrementar la infiltración y así facilitar el arraigo y primer crecimiento del repoblado en climas mediterráneos.

Este modelo hidrológico ha sido informatizado para simplificar y acelerar los cálculos.

### 2. Funcionamiento del programa

MODIPÉ calcula la disponibilidad hídrica (= infiltración) en un punto de una ladera originada por un aguacero aislado o por una serie de aguaceros. También puede operar a nivel anual.

Para ello hay que definir las características hidrológicas y topográficas de la ladera así como las precipitaciones a estudiar. A partir de estos datos, el programa cuantifica la escorrentía superficial generada por los aguaceros y estima la altura de agua que queda residente en un punto de la ladera. Este valor refleja la disponibilidad hídrica en ese punto.

El programa contempla la posibilidad de laderas sistematizadas y distingue en tal caso entre zonas que reciben escorrentía (áreas de recepción) y zonas que aportan escorrentía (áreas de impluvio).

Como resultado final se obtiene la cantidad de agua (en l/m<sup>2</sup>) disponible en un punto de la ladera (tanto si es un punto favorecido como desfavorecido a acumular e infiltrar agua por razones intrínsecas y/o de contorno). Estos resultados se ofrecen a través de la pantalla del ordenador y pueden ser sacados por impresora apretando a la tecla Impr Pant. Otra posibilidad consiste en captar tales imágenes con la ayuda de conocidos paquetes informáticos para su posterior interpretación o edición.

<sup>1</sup> Este trabajo ha sido financiado por el proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo)

MODIPÉ es un programa conversacional de manejo muy sencillo que está ideado para ser corrido en cualquier ordenador personal compatible.

Como datos de entrada el modelo y el programa MODIPÉ requieren:

- el número de curva de la ladera actual (en condiciones medias de humedad), NAC
- el área de impluvio,  $S_1$  (en  $m^2$ )
- el área de recepción,  $S_2$  (en  $m^2$ )
- el número de curva del impluvio (para una humedad media, condición dos), NI
- el número de curva de la recepción (en condición dos), NR
- la capacidad de embalse, CAPA (en litros)
- los datos sobre las lluvias y las condiciones previas de humedad del terreno

A este respecto caben tres posibilidades distintas:

-a- Para un aguacero aislado

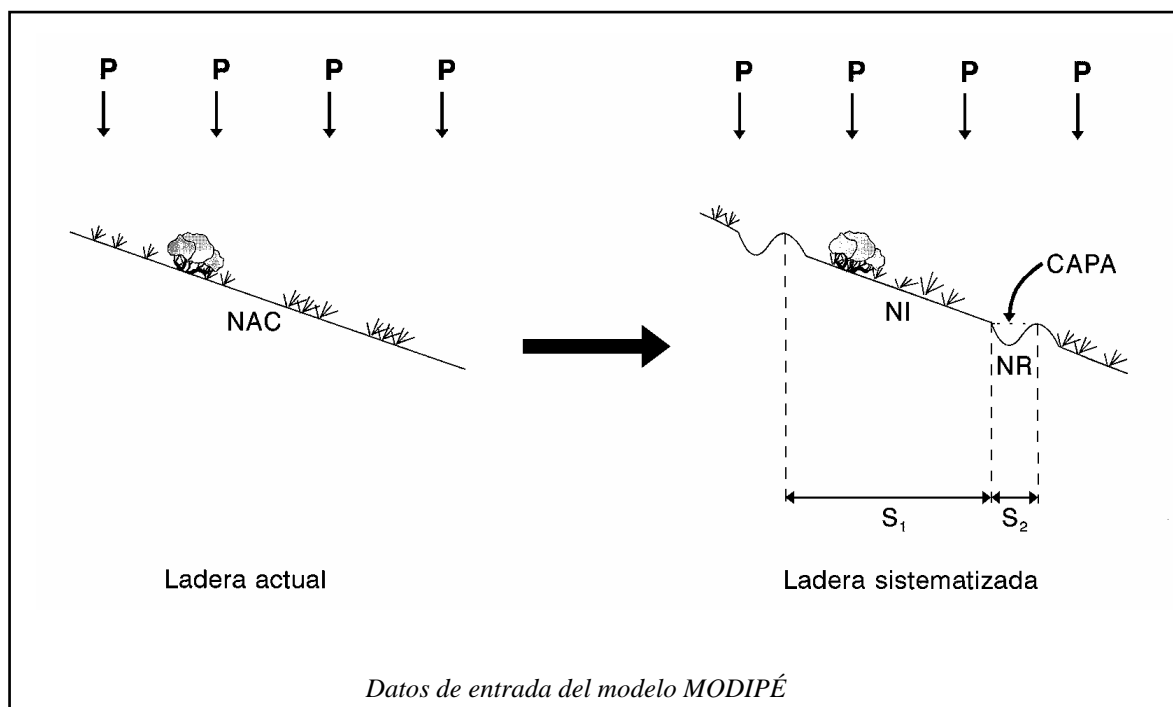
- la precipitación caída, P (en mm)
- la condición previa de humedad, J [1, 2 o 3]

-b- Para una serie de aguaceros consecutivos

- la precipitación de cada uno, P(I) (en mm)
- las condiciones previas de humedad, J(I)

-c- Para un año

- la precipitación mensual, PM(I) (en mm)
- la precipitación máxima diaria del mes, MM(I) (en mm)
- el número de días con precipitación apreciable<sup>2</sup>, DM(I)



Como resultado principal el programa obtiene las disponibilidades hídricas de la ladera:

- sin sistematización primaria: ANTES
- con la sistematización proyectada:
  - a) en el área de impluvio: PIMP
  - b) en el área de recepción: DESP
  - c) en la unidad sistematizada: PROM

También interesa calcular la capacidad mínima (CAPAL) que debe tener el alcorque para retener toda la escorrentía, es decir: para conseguir *endorreísmo* en la unidad sistematizada.

<sup>2</sup> Apreciable significa mayor o igual a 0,1 mm según el Instituto Nacional de Meteorología.

Otros resultados complementarios de importancia, son:

- los números de curva y sus umbrales de escorrentía (para las tres condiciones de humedad que contempla el método del número de curva)
  - a) en la ladera sin actuar:  $NAC(J) \leftrightarrow PAC(J)$
  - b) en el área productora:  $NI(J) \leftrightarrow P1(J)$
  - c) en el área receptora:  $NR(J) \leftrightarrow PR(J)$
  - d) en la unidad sistematizada:  $NEQ(J) \leftrightarrow P2(J)$
- la capacidad mínima aconsejada para el microembalse (sólo si  $NI < NR$ ): CAPMIN

### 3. Bases del modelo

En este artículo sólo vamos a esbozar las ideas e hipótesis fundamentales del modelo. Para más detalles pueden consultarse los trabajos citados en bibliografía.

#### - A -

La ecuación que calcula la infiltración en un punto (es decir: la disponibilidad hídrica del lugar, a falta de un balance hídrico edáfico) es:

$$H = I = P - I_t - E + E_{s1} - E_{s2}$$

siendo  $H$  = disponibilidad hídrica del lugar;  $I$  = volumen de agua infiltrado;  $P$  = precipitación;  $I_t$  = intercepción;  $E$  = evaporación física desde la superficie del suelo;  $E_{s1}$  = agua que llega al lugar por escorrentía superficial y  $E_{s2}$  = agua que escapa del lugar por escorrentía superficial.

En terrenos degradados puede prescindirse de la intercepción y de la evaporación directa como primera aproximación, con lo que obtenemos:

$$H = I = P + E_{s1} - E_{s2}$$

#### - B -

Con la sistematización primaria de una ladera lo que se hace es dividir la misma en una serie de unidades menores. Para ello se altera el microrrelieve del terreno por medio de muretes, caballones, surcos, regueros, plataformas a nivel o en contrapendiente, hoyas, pocetas, alcorques u hondonadas artificiales. Se consigue así una parcelación de la ladera. Cada compartimento constituye una unidad sistematizada en la que, a ser posible, todo el agua de escorrentía debe quedar retenida en la parte inferior de la unidad. A dicha zona, favorecida por la escorrentía superficial, la denominamos área de recepción (o área colectora). A la superficie que aporta dicho agua de escorrentía se le llama área de impluvio (o área productora). Ambas constituyen la unidad sistematizada.

Aunque no sea objeto de este trabajo, debemos mencionar que ante episodios de lluvia extraordinarios hay que perfilar en la ladera una red de drenaje que evacúe los excedentes de agua de manera ordenada, red que denominamos sistematización secundaria y que sirve de protección para la parcelación primaria diseñada.

#### - C -

- a) Para evaluar las disponibilidades hídricas de la ladera antes de la sistematización se utiliza la siguiente ecuación:

$$ANTES = P - \Delta E_s$$

en donde  $\Delta E_s$  es la escorrentía superficial (o lluvia neta) que provoca el aguacero ( $P$ ) en la ladera original.

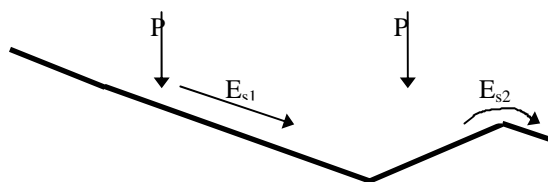
Distinguimos aquí entre precipitaciones *total* y *parcialmente aprovechables* por la ladera, según el valor que tome  $\Delta E_s$ .

b) Las tres ecuaciones que estiman las disponibilidades hídricas en la ladera sistematizada son:

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

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

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



siendo: P, la precipitación del aguacero analizado

DESP, la disponibilidad hídrica del área de recepción

PIMP, la disponibilidad hídrica del área de impluvio

PROM, la disponibilidad hídrica media de 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

$S_1$ , superficie correspondiente al área de impluvio

$S_2$ , superficie del área de recepción

c) Los aguaceros pueden ser clasificados en cuatro bloques de acuerdo con el comportamiento hidrológico de la sistematización de la ladera: precipitaciones *débiles*, *idóneas*, *excesivas* y *dañosas*.

1) **Precipitación débil**, si es menor que la precipitación mínima (P1) que provoca escorrentía en el área de impluvio.

$$\text{Si } P < P1 \Rightarrow E_{s1} = E_{s2} = 0 \text{ mm} \\ \text{PROM} = \text{DESP} = \text{PIMP} = P$$

2) **Precipitación idónea**, si está comprendida entre la precipitación mínima y la precipitación límite (P2) que aún no provoca escorrentía fuera de la unidad.

$$\text{Si } P1 < P \leq P2 \Rightarrow E_{s1} > 0 \text{ mm y } E_{s2} = 0 \text{ mm} \\ \text{PIMP} < P \text{ y } \text{DESP} > P \text{ y } \text{PROM} = P$$

3) **Precipitación excesiva**, si está comprendida entre la precipitación límite (P2) y la precipitación máxima (P3) que aún puede ser evacuada de forma ordenada a través de la sistematización secundaria.

$$\text{Si } P2 < P \leq P3 \Rightarrow E_{s1} > 0 \text{ mm y } E_{s2} > 0 \text{ mm} \\ \text{PIMP} < P \text{ y } \text{DESP} \leftarrow ? \rightarrow P \text{ y } \text{PROM} < P$$

4) **Precipitación dañosa**, si es superior a la que admite la sistematización secundaria (P3); existiendo peligro de ruina de la parcelación por flujos incontrolados y fuertemente erosivos.

$$\text{Si } P > P3 \Rightarrow E_{s1} > 0 \text{ mm y } E_{s2} > 0 \text{ mm} \\ \text{PIMP} < P \text{ y } \text{DESP} \leftarrow ? \rightarrow P \text{ y } \text{PROM} < P$$

d) Siempre que  $\text{ANTES} < \text{PROM}$  la sistematización será conveniente para la economía del agua en la ladera.

#### 4. Ejemplo práctico aclaratorio

Vamos a considerar una ladera degradada cuyo número de curva en condición dos ( $J = 2$ ) valga 89 (por ejemplo: un herbazal pobre en un suelo de tipo D).

La sistematización consiste en microcuencas formadas por un área de impluvio de  $9 \text{ m}^2$  y por un área de recepción de  $1 \text{ m}^2$  con una capacidad de embalse de 200 litros, lo que supone una altura de los muretes de 200 mm.

La preparación del terreno es puntual y afecta únicamente al área de recepción, de manera que el número de curva del área de impluvio en condición dos coincide con el de la ladera actual (89). Por la labor efectuada en el área de recepción, su número de curva vale 86 (equivalente al mismo herbazal pero con un cambio en el tipo de suelo [C], mejorado gracias a la labor de mullido y profundización realizada).

Mediante el programa MODIPÉ<sup>3</sup> se puede simular el comportamiento hídrico del ecosistema de ladera descrito así como evaluar la eficacia de la intervención proyectada.

De acuerdo con los resultados del modelo se aprecia que estamos ante un ecosistema degradado, con una baja capacidad de acogida de agua debido a sus elevados números de curva. Sus umbrales de escorrentía así lo reflejan: Con que lluevan 6,3 mm en unas condiciones medias de humedad en la ladera se produce escorrentía. Si llueve sobre mojado (condición tres de humedad), el umbral se reduce hasta 2,7 mm. Sobre suelo bien seco (condición uno de humedad) la escorrentía superficial comienza con aguaceros superiores a 14,9 mm. Esta circunstancia propicia una sequedad en la zona que no concuerda con la pluviometría del lugar. En especial, la situación se agrava en climas torrenciales en los que los episodios de lluvia suelen ser escasos pero muy intensos y agresivos. La pérdida de los recursos hídricos y la erosión consiguiente pueden provocar un proceso irreversible de desertificación.

Con la sistematización del terreno, el comportamiento hidrológico de la ladera cambia sustancialmente. Los umbrales de escorrentía se elevan. Para la unidad sistematizada pasan a valer: 65,9 mm en suelo seco; 43,8 mm en condiciones medias y 32,3 mm en suelo húmedo. Como consecuencia inmediata tenemos que el ecosistema va a poder aprovechar mejor ese bien escaso llamado agua. Las posibilidades de incrementar la cobertura vegetal son ahora mayores, especialmente en los lugares donde se acumule el agua, es decir: en las áreas de recepción. Esta cosecha de agua alóctona, procedente de las áreas de impluvio, llega a crear zonas con más disponibilidades hídricas que las indicadas por los pluviómetros.

Si por ejemplo cae una fuerte tormenta estival de  $50 \text{ l/m}^2$  bajo un suelo inicialmente seco (condición de humedad 1): En la ladera actual la tormenta genera una elevada escorrentía superficial, lo que se traduce en unas disponibilidades hídricas finales bajas en comparación con la lluvia caída ( $38,8 \text{ mm}$  frente a los  $50 \text{ l/m}^2$ ). Por contra, con la sistematización se consigue retener todo el volumen de lluvia precipitado (los  $50 \text{ l/m}^2$ ). Dado que el área de impluvio posee el mismo número de curva que el terreno actual (inalterado), la tormenta genera escorrentía en dicho área. Sin embargo, las labores previstas en el área de recepción permiten retener esa escorrentía. De acuerdo con el programa MODIPÉ, bastará un microembalse de 107,3 litros de capacidad para evitar toda escorrentía fuera de cada unidad sistematizada. Con el alcorque previsto (de 200 l de capacidad) esta exigencia queda ampliamente satisfecha. Así la disponibilidad hídrica promedio del ecosistema coincide con la precipitación caída aunque su distribución sea heterogénea. En el área de impluvio sólo permanecen  $38,8 \text{ mm}$  (igual que en la ladera actual) mientras que el área de recepción retiene y almacena esa escorrentía lo que se traduce en unas disponibilidades hídricas de  $150,7 \text{ l/m}^2$  (mayores que la lámina de agua caída en la tormenta). La importancia táctica de este hecho a la hora de repoblar terrenos áridos en pendiente no precisa de más comentarios. Tan sólo quizás sugerir un nuevo término forestal: el de *oasificación*, antonimia del vocablo desertificación (término acuñado con éxito en épocas bien recientes y que encuentra seguro remedio en nuestro sector).

<sup>3</sup> El programa MODIPÉ y su manual de usuario pueden conseguirse a través de la publicación señalada con asterisco en bibliografía.

5. Salidas principales del programa MODIPE

Número de curva de la ladera actual en condición 2 : 89.0  
 Área de impluvio ( en m<sup>2</sup> ): 9.0 || Número de curva en condición 2 : 89.0  
 Área de recepción ( en m<sup>2</sup> ): 1.0 || Número de curva en condición 2 : 86.0  
 Capacidad de embalse del área de recepción ( en l ): 200.0

Umbrales de escorrentía en la ladera actual  
 En condición 1 el umbral vale 14.9 mm  
 En condición 2 el umbral vale 6.3 mm  
 En condición 3 el umbral vale 2.7 mm

Umbrales de escorrentía para el área de impluvio  
 En condición 1 el umbral vale 14.9 mm  
 En condición 2 el umbral vale 6.3 mm  
 En condición 3 el umbral vale 2.7 mm

Umbrales de escorrentía para el área de recepción  
 En condición 1 el umbral vale 19.7 mm  
 En condición 2 el umbral vale 8.3 mm  
 En condición 3 el umbral vale 3.6 mm

Umbrales de escorrentía para una unidad de terreno sistematizada  
 En condición 1 el umbral vale 65.9 mm  
 En condición 2 el umbral vale 32.0 mm  
 En condición 3 el umbral vale 32.0 mm

PROGRAMA MODIPE  
 DATOS DE LA SISTEMATIZACION DEL TERRENO

	S en m <sup>2</sup>	N1	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	-----	77	15	89	6	95	3
AREA DE IMPLUVIO	9.0	77	15	89	6	95	3
AREA DE RECEPCION	1.0	72	20	86	8	93	4
UNIDAD SISTEMATIZADA	10.0	44	66	54	44	61	32

S = superficie  
 N(i) = número de curva [ en condición de humedad i ]  
 P0(i) = umbral de escorrentía [ en condición de humedad i ]  
 CAPACIDAD DE EMBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 200.0 l


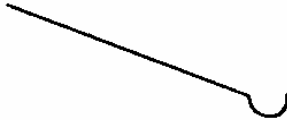
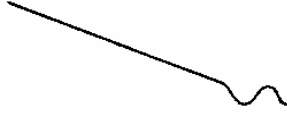


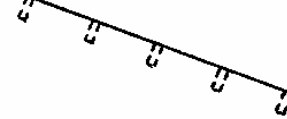
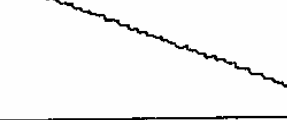
PROGRAMA MODIPE

Precipitación aguacero 50.0 mm	Condición previa de humedad: 1
-----------------------------------	--------------------------------------

Disponibilidades hídricas ( en mm )	
en terreno llano .....	50.0
en la ladera actual .....	38.8
en la ladera sistematizada ...	50.0
en el área de recepción .....	150.7

CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE PARA RECOGER TODA LA ESC. SUP.: 107.3 l

6. Efectos hidrológicos inmediatos de las diferentes técnicas de preparación del suelo en repoblaciones forestales (según el modelo MODIPÉ)

	LABOR	ESQUEMA	NUMEROS DE CURVA	CAPA
0	ladera inalterada		$NI = NR = NAC$	0
1	ahoyado con alcorque; microcuencas		$NI = NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
2	acaballonado (alomado según curvas de nivel)		$NI = NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
3	acaballonado superficial		$NI > NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
4	aterrazado en contrapendiente		$NI > NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
5	subsolado lineal subsolado pleno		$NI = NAC$ $NR < NAC$ (2)	$\approx 0$
6	laboreo pleno (según curvas de nivel)		$NI = NR > NAC$ (3)	$\approx 0$
<p>Notas: (1): A falta de ensayos de campo y para estar del lado de la seguridad <math>NR &gt; NAC</math></p> <p>(2): en litosuelos y estando el terreno seco [a tempero]</p> <p>(3): efecto hidrológico global negativo, pues el aumento del número de curva predomina sobre <math>CAPA (\approx 0)</math></p>				

## 7. Bibliografía

- BOERS, T.M. y BEN ASHER, J.;1982. A review of rainwater harvesting. *Agricultural Water Management*, 5: 145-158
- GIRÁLDEZ, J.V.; AYUSO, J.L. et al.;1989. Recursos hidráulicos alternativos. Algunos remedios para controlar la desertización en la cuenca mediterránea; en "Degradación de zonas áridas en el entorno Mediterráneo": 91 - 104; edita MOPU, Madrid
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.;1994. Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- I. Fundamentos del modelo; informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA, Madrid); 37 p.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.;1994. Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- II. Particularización de las ecuaciones generales al modelo de Horton. Programa HYDNUM; informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA, Madrid); 65 p.
- T MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.;1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal; 70 p. más disquete; edita MundiPrensa, Madrid
- REIJ, C.; MULDER, P. & BEGEMANN, L.;1988). Water harvesting for plant production. Volume I: A comprehensive review of the literature; 123 p.; edita The World Bank (Washington)
- VELASCO-MOLINA, H.A.;1991. Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo.; 563 - 606; editorial Limusa, México