

Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ

Con objeto de uniformar criterios y facilitar el uso del modelo hidrológico MODIPÉ ofrecemos esta pequeña guía, en la que concretamos el procedimiento a seguir para fijar sus datos de entrada.

-1- Datos de entrada del modelo

Los datos de entrada de MODIPÉ son: el número de curva de la ladera actual (NAC), el tamaño del área de impluvio (S_1), del área de recepción (S_2), los números de curva de ambas superficies (NI y NR , respectivamente) y la capacidad de la trampa de agua ($CAPA$). A estos seis datos de entrada hay que agregar los datos sobre la precipitación (P). Todo ello puede observarse en la figura 1.

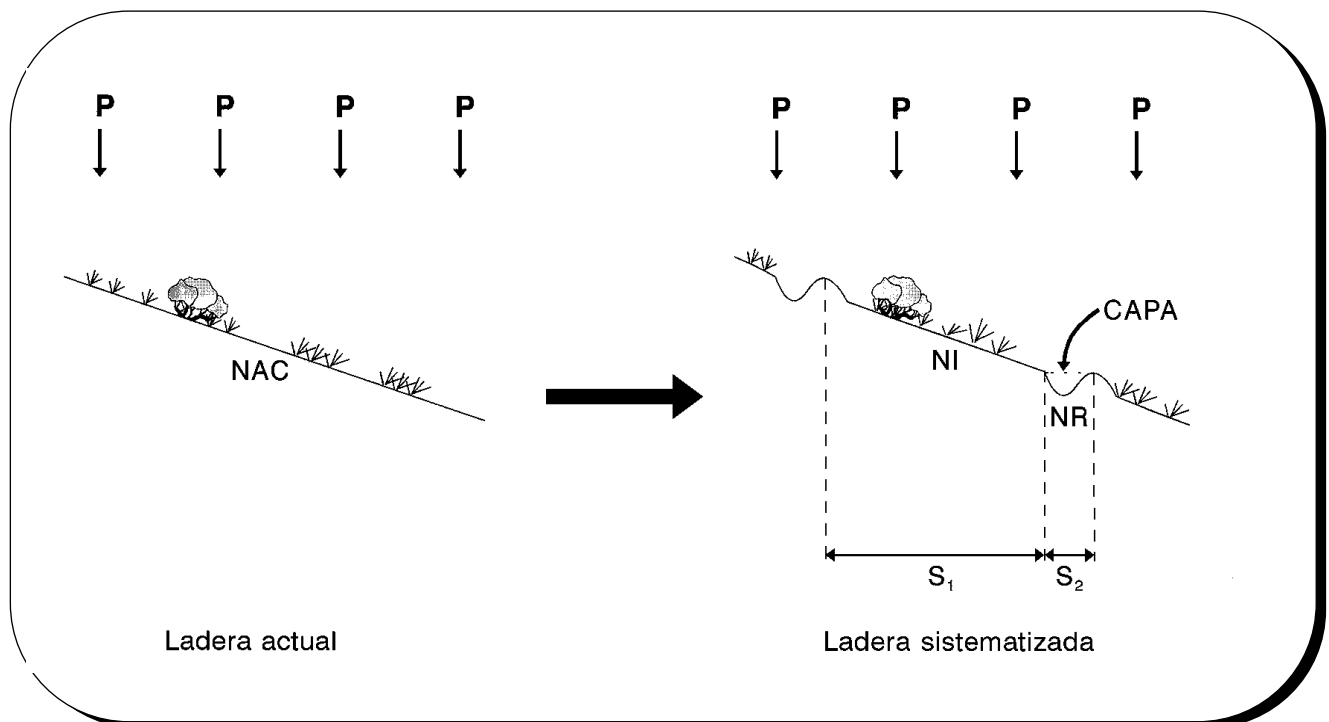


Figura 1. Datos de entrada del modelo MODIPÉ

-2- Determinación del número de curva de la ladera actual

Cuando se pretenda restaurar una ladera degradada en una zona árida o semiárida mediante reforestación, la herramienta que se presenta aquí —el modelo hidrológico MODIPÉ— requiere que se estime el número de curva de esta ladera (NAC). Para ello hay que estudiar diversos aspectos de la misma, a saber: el suelo, la vegetación, la forma de explotación del terreno y su condición hidrológica.

El proceso operativo a seguir es el siguiente:

- ① Fijar el tipo de suelo.
- ② Identificar la cubierta vegetal existente con un tipo de vegetación considerado en el método de los números hidrológicos.
- ③ Determinar la condición hidrológica y la forma de explotación del terreno.
- ④ Obtener el número de curva de la ladera actual (NAC) utilizando las tablas que figuran en las páginas 11 a 13 de este manual.

① Fijación del tipo de suelo:

El método del número de curva distingue cuatro tipos de suelos: A, B, C y D.

El tipo A tiene una alta capacidad de infiltración; el tipo D posee una baja capacidad de infiltración, es decir: produce escorrentía fácilmente. Los suelos de tipo B y C tienen unas propiedades hidrológicas intermedias. De una forma más concreta el National Resources Conservation Service de Estados Unidos (NRCS, 2002) hace la siguiente descripción para los cuatro tipos de suelos:

- Grupo A.- Suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aún cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa).
- Grupo B.- Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas van de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa).
- Grupo C.- Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables.
- Grupo D.- Suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto.

Para fijar el tipo de suelo de una forma más concreta, caben varias alternativas:

- Obtener la tasa mínima de infiltración del suelo (f_c) de forma directa mediante un ensayo de infiltración prolongado hasta que la tasa de infiltración se

estabilice (duración: varias horas; equipo: infiltrómetro de doble anillo o simulador de lluvia).

Una vez conocido f_c basta con acudir a la tabla adjunta (nº 1) para determinar el tipo de suelo.

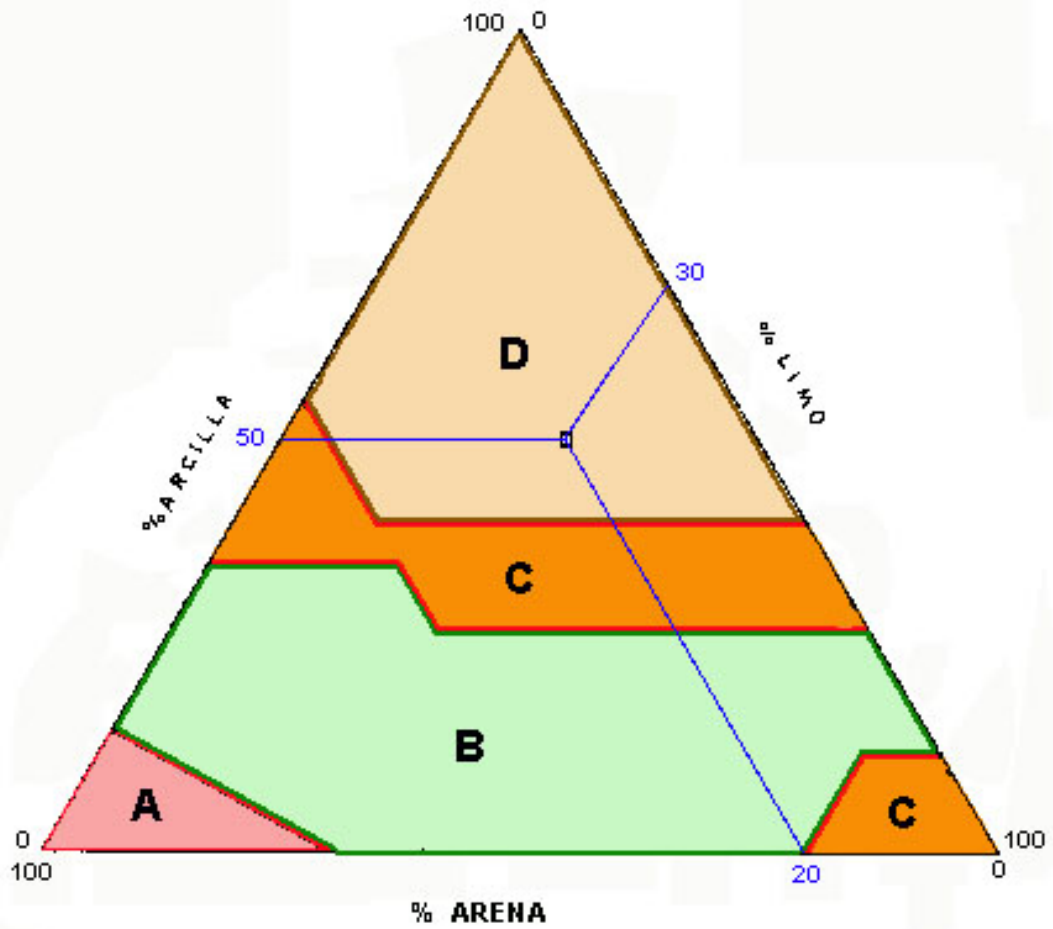
Tabla 1. Tipos de suelo según sea su tasa mínima de infiltración

GRUPO	TASA DE INFILTRACIÓN MÍNIMA (f_c según el modelo de Horton) ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
A	7,62 - 11,43
B	3,81 - 7,62
C	1,27 - 3,81
D	0,00 - 1,27

- Otro método alternativo consiste en obtener la conductividad hidráulica a saturación (k_s) con un permeámetro a partir de una muestra inalterada de suelo llevada a laboratorio.

La tasa mínima de infiltración resulta inferior a la conductividad hidráulica por las interferencias que provoca el aire confinado en ciertos poros del suelo. La relación de Bouwer (1966) establece que: $f_c \approx 0,5 \cdot k_s$, ecuación que podemos utilizar para fijar f_c si tenemos k_s .

- Si sólo disponemos de la clasificación textural del suelo (¡se debe utilizar la clasificación USDA!) podemos acudir al diagrama triangular que aparece en la página siguiente (figura 2) y obtener el tipo de suelo directamente. También incluimos un segundo diagrama textural con las isopermeabilidades (figura 3), que combinado con la ecuación de Bouwer nos permite estimar la tasa de infiltración mínima del suelo y –con ello– el tipo de suelo.



- Tamaño de las partículas (en mm):
- arcilla < 0,002
 - limo 0,002 - 0,05
 - arena 0,05 - 2,0

Esquema de lectura en el diagrama:

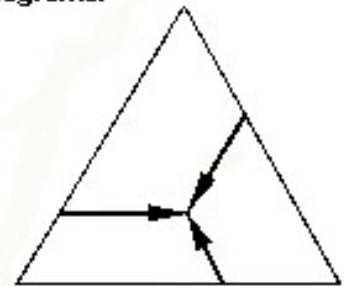


Figura 2. Diagrama textural para la determinación del tipo de suelo (según MOPU, 1990)

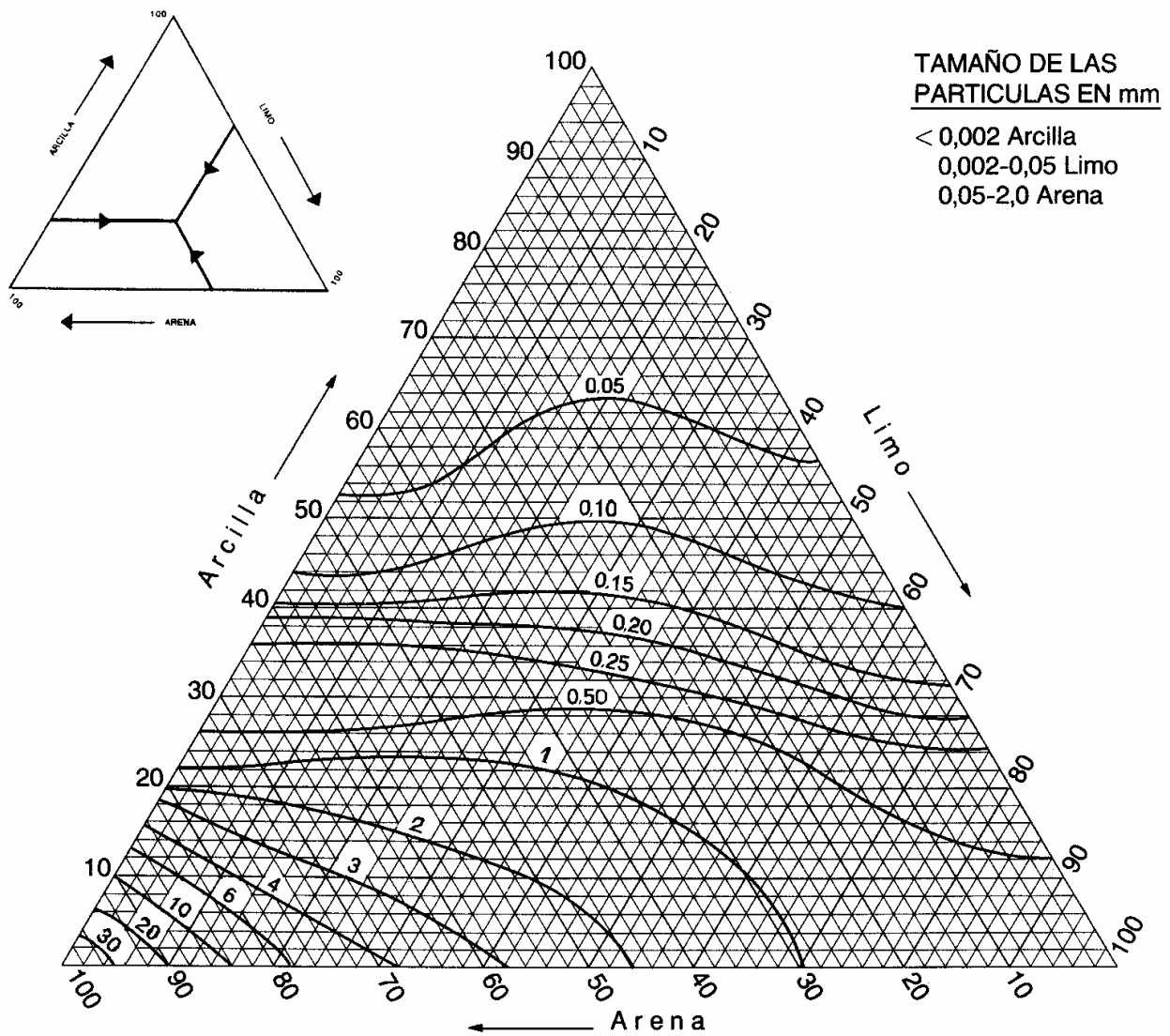


Figura 3. Conductividad hidráulica a saturación (k_s en cm/h)

Entrando en este diagrama triangular con los datos de textura del horizonte menos permeable, hallamos la conductividad hidráulica (k_s) del terreno. Posteriormente y con la relación de Bouwer obtenemos f_c para, por último, fijar el tipo de suelo utilizando la tabla 1.

A la hora de asignar un tipo de suelo para una ladera degradada, conviene considerar que:

a) No es estrictamente necesario acudir a ensayos directos de infiltración o permeabilidad. Los dos métodos simplificados propuestos son suficientemente precisos para los fines perseguidos.

- b) El horizonte a considerar dentro del perfil debe ser siempre el más impermeable.
- c) La presencia de pedregosidad en superficie (no contemplada en la información textural de la tierra fina) facilita la infiltración.
- d) En sentido contrario obran las tasanos (= costras) que reducen notablemente la infiltración. Así, en suelos desnudos o con vegetación muy rala la infiltración queda limitada en superficie por el encostramiento formado, lo que conduce a suelos de tipo D aunque su textura pueda estar indicando otra cosa. Un ejemplo muy conocido al respecto lo encontramos en los suelos desnudos de tipo *loess*, que forman costras superficiales con las primeras gotas de lluvia.
- e) Los suelos salinos (con cloruro sódico, sulfato sódico, yeso u otras sales similares) deben asignarse al grupo D.
- e) La profundidad del suelo y la permeabilidad de la roca madre también deben ser consideradas a la hora de fijar el tipo de suelo. Así, suelos someros (con profundidad menor de 30 cm) y suelos poco profundos ($30 \text{ cm} \leq \text{profundidad} \leq 50 \text{ cm}$) sobre una roca madre impermeable (pizarras y esquistos, dolomías y calizas masivas, basaltos, granitos, margas arcillosas, arcillas compactas, etc.) se comportan como suelos de tipo D.

Como resumen de este apartado se ofrece la tabla 2, donde se definen los tipos de suelos que considera el método del número de curva, diferenciados entre sí por cinco características: capacidad de infiltración, tasa de infiltración mínima, profundidad, textura y drenaje.

Tabla 2. Grupos hidrológicos de suelos según las definiciones del NRCS. Modificada de López Alonso (2001)

SUELO	CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN CON HUMEDAD ELEVADA	TASA DE INFILTRACIÓN ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	PROFUNDIDAD	TEXTURA	DRENAJE
A	Alta	7,62-11,43	Elevada	Arenosa Areno-limosa	Excesivo
B	Moderada	3,81-7,62	Mediana a elevada	Franca-arenosa Franca Franco-arcillo-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Escasa	1,27-3,81	Mediana a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy escasa	0-1,27	Con horizontes arcillosos. Litosuelos. Suelos con nivel freático permanentemente alto	Arenosa	Pobre o muy pobre

② y ③ Tipo de vegetación, condición hidrológica y forma de explotación

La identificación de la vegetación existente en la ladera a restaurar con el tipo de vegetación descrito en las tablas del número de curva (tablas 3 y 4) se realiza atendiendo a las descripciones y comentarios que figuran en las mencionadas tablas. Con un poco de experiencia y con unos conocimientos botánicos adecuados, la tarea resulta bastante sencilla.

En la tabla 3 se diferencian catorce tipos de vegetación o uso, que pasamos a describir:

- 1) **Barbecho.**- Los terrenos agrícolas no cultivados pueden estar desnudos o tener una cubierta de residuos vegetales que proteja el suelo, procedente de cultivos anteriores.
- 2) **Cultivos alineados.**- Cuando las labores agrícolas se realizan en líneas pueden ejecutarse en la dirección de la pendiente, según curvas de nivel, o incluso en terrenos aterrizados. En todos estos casos se considera la posibilidad de que el suelo esté protegido por restos vegetales.
- 3) **Cultivos no alineados o con surcos pequeños y mal definidos.**- Se clasifican en las mismas categorías que en el caso anterior.
- 4) **Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia.**- En este caso sólo se consideran las posibilidades de cultivos a favor de la pendiente, según curvas de nivel y aterrizados según curvas de nivel.
- 5) **Pastizales o pastos naturales.**- Se clasifican en tres grupos (pobres, regulares y buenos) teniendo en cuenta consideraciones hidrológicas y no la producción de forraje. Se consideran *pobres* los que soportan una alta carga ganadera por lo que tienen escasa materia orgánica sobre el terreno; también aquéllos en los que las plantas cubren menos del 50 % de la superficie total. Los *regulares* son los que tienen una cubierta vegetal que alcanza entre un 50 % y un 75 % de la superficie del terreno y son moderadamente pastados. Y, finalmente, los *buenos* son aquéllos cuya cubierta vegetal supera el 75 % de la superficie del terreno y son ligeramente pastados.
- 6) **Pastizales.**- Se dividen en las mismas tres condiciones hidrológicas que en el caso anterior, pero siempre considerando que las labores se efectúan sobre curvas de nivel.
- 7) **Prados permanentes.**- Este tipo de formaciones no son pastadas. Su vegetación es permanente, cubriendo el 100 % de la superficie del terreno. Son prados de siega para henificar.
- 8) **Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante.**- Dentro de este grupo se hacen también tres subdivisiones, en función de la superficie cubierta. Así, se distingue entre *pobre* (si la cubierta del suelo es inferior al 50 %), *regular* (del 50 % al 75 % de la cubierta vegetal) y *bueno* (si hay una cubierta vegetal superior al 75 %).

9) Combinación arbolado-herbazal- Los números de curva que se indican se refieren a un 50 % de la cubierta proporcionada por el arbolado y un 50 % por el herbazal. Para otros porcentajes hay que ponderar entre los valores que se ofrecen en los epígrafes de “pastizales” y “montes con pastos”.

10) Montes con pastos.- Se establecen también tres clases basadas en factores hidrológicos y no de producción (NRCS, 2002). La diferenciación, como en los casos anteriores, se realiza mediante observación del terreno. De esta manera, los montes con pastos se consideran *pobres* cuando se dan labores al terreno o cuando son abundantemente pastados o incluso quemados, de modo que el monte está sin arbustos, matas, pastos y restos vegetales. Se consideran *regulares* cuando son pastados pero nunca labrados o quemados, de manera que la superficie del terreno presenta pastos y mantillo. Por último, son *buenos* aquéllos en que, protegidos del pastoreo, el terreno aparece cubierto de matas abundantes, pastos naturales y restos orgánicos de toda clase.

En la versión más reciente del número de curva (Mishra & Singh, 2003) esta categoría pasa a denominarse “bosques”, englobando al tipo de vegetación que se describe a continuación.

11) Bosques.- La versión de la tabla del número de curva recogida por Ponce (1989) y adaptada al español por Martínez de Azagra (1996) establece cinco clases hidrológicas para los bosques (véase la tabla 3), desde muy pobre hasta muy buena. Se basan en la consideración de la profundidad y el grado de consolidación de las capas de mantillo del bosque, de modo que cuanto mayor sea el espesor de dichas capas y menos compactas e impermeables aparezcan tanto mejor será la condición hidrológica resultante para la infiltración. En este caso, la clase hidrológica se determina mediante un nomograma creado por Morey (1955), citado por Udall & Dominy (1966), y que se inserta como figura 4.

12, 13 y 14) Caseríos, caminos en tierra y caminos con firme.- No nos detenemos en su descripción, al no ser objeto de este trabajo. Baste con agregar, que existen tablas específicas del número de curva desarrolladas para zonas urbanas (consúltese Ponce, 1989).

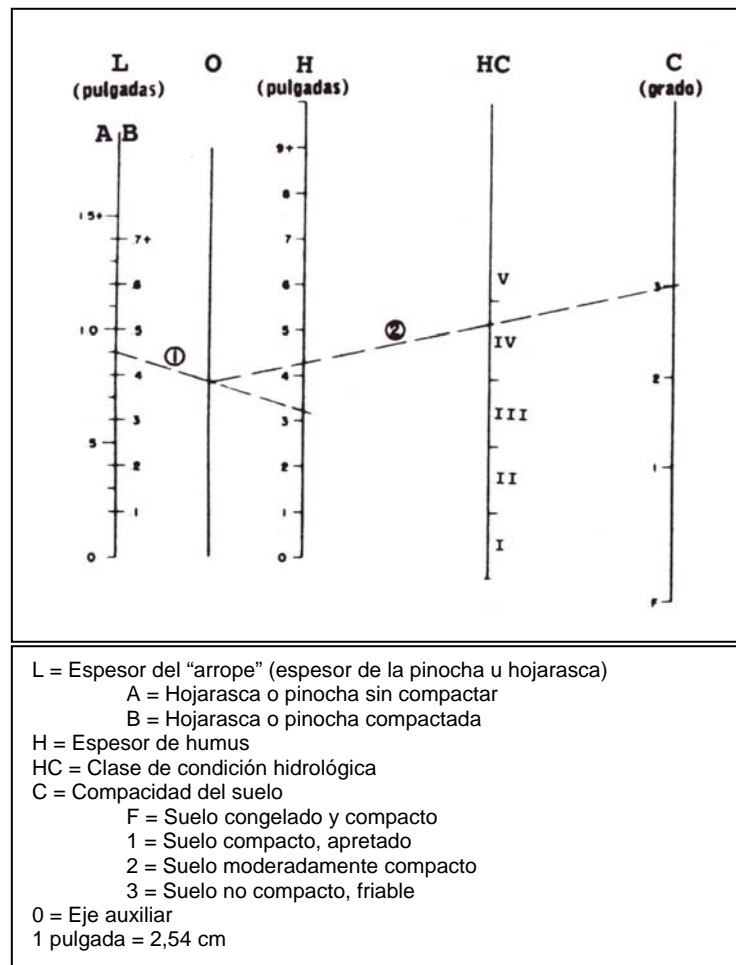


Figura 4. Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de un bosque. De Morey (1955), citado por Udall & Dominy (1966)

Respecto a la condición hidrológica de un terreno agrícola (para los bosques acabamos de explicarla) hay que decir que se basa en una combinación de factores que afectan a la infiltración y a la escorrentía superficial. Estos factores son:

- Densidad y fracción de cabida cubierta de la vegetación
- Grado de cubierta vegetal a lo largo del año
- Número de cultivos de leguminosas y otras pratenses en la rotación
- Porcentaje de residuos vegetales cubriendo la superficie del suelo (valores superiores al 20 % implican una buena condición hidrológica del suelo)
- Grado de rugosidad superficial.

La condición hidrológica es pobre si los factores antes indicados dificultan la infiltración y facilitan la escorrentía superficial; y es buena en la situación contraria.

Además, la forma de explotación del terreno influye en el valor del número de curva a asignar a una parcela agrícola. Los casos que contempla el método son los siguientes:

- Cubierta de residuos vegetales que ocupen al menos el 5 % de la superficie de suelo durante todo el año (*CR*)
- Labores de la tierra (labrar, gradear, sembrar, etc.) en línea recta sin considerar la pendiente del terreno (*R*)
- Cultivo siguiendo las curvas de nivel (*C*)
- Terrenos aterrazados (terrazas abiertas con desagües para la conservación del suelo).

En terrenos de pendiente inferior a un 2 % se considera siempre que el cultivo es según curvas de nivel (aunque se realice en surcos rectos).

Antes de ofrecer las tablas del número de curva y para tener una primera interpretación sobre dicho número, conviene saber que:

- a) El número de curva va desde 0 a 100 (cien para terrenos impermeables y lisos).
- b) A mayor número de curva (*NAC*) mayor escorrentía superficial cabe esperar para un mismo aguacero.
- c) En condiciones medias de humedad un número de curva superior a 80 denota terrenos degradados con un bajo umbral de escorrentía ($P_0 < 12,7$ mm) lo que posibilita abundantes cosechas de agua.

Tabla 3. Determinación del número de curva en condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$

TIPO DE VEGETACIÓN	TRATAMIENTO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R + CR	Pobre	71	80	87	90
	R + CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82
	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
C + T + CR	Buena	61	70	77	80	
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	R + CR	Pobre	64	75	83	86
	R + CR	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
	C + CR	Buena	60	72	80	83
	C + T	Pobre	61	72	79	82
	C + T	Buena	59	70	78	81
	C + T + CR	Pobre	60	71	78	81
C + T + CR	Buena	58	69	77	80	
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	Pobre	66	77	85	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C + T	Pobre	63	73	80	83
C + T	Buena	51	67	76	80	
Pastizales o pastos naturales	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
Pastizales	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobres	48	67	77	83
	-	Regulares	35	56	70	77
	-	Buenas	≤ 30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Pobres	57	73	82	86
	-	Regulares	43	65	76	82
	-	Buenas	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques	-	I Muy pobre	56	75	86	91
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos en firme	-	-	74	84	90	92

CR = Cubierta de residuos; R = Labores en línea recta; C = Labores en curvas de nivel; T = Terrazas

Si se utiliza la tabla general (nº 3) para zonas áridas y subdesérticas, el método del número de curva se desajusta. Para solventar esta limitación, el SCS (1991) ha desarrollado una tabla específica para estas regiones, que ha sido adaptada para España por Martínez de Azagra (1996).

Tabla 4. Números de curva para zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos (para condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$). Según SCS (1991), adaptada por Martínez de Azagra (1996).

TIPO DE VEGETACIÓN	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
1. Herbazal con algo de matorral	Pobre	70	80	87	93
	Media	60	71	81	89
	Buena	50	62	74	85
2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"	Pobre	55	66	74	79
	Media	37	48	57	63
	Buena	25	30	41	48
3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea	Pobre	60	75	85	89
	Media	45	58	73	80
	Buena	25	41	61	71
4. "Sagebrush" con cubierta herbácea	Pobre	55	67	80	85
	Media	40	51	63	70
	Buena	25	35	47	55
5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc.	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

Especies mencionadas en la descripción del tipo de vegetación:	
<p><u>Tipo 2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - "Oak brush" = <i>Quercus gambelii</i> - "Aspen" = <i>Populus tremuloides</i> y <i>P. fremontii</i> - "Mountain mahogany" = <i>Cercocarpus ledifolius</i> - "Bitter brush" = <i>Purshia tridentata</i> - "Maple" = <i>Acer grandidentatum</i> <p><u>Tipo 3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - "Pinyon" = <i>Pinus edulis</i> y <i>Pinus monophylla</i> - "Juniper" = <i>Juniperus osteosperma</i> 	<p><u>Tipo 4</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - "Sagebrush" = <i>Artemisia tridentata</i> <p><u>Tipo 5</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - "Saltbrush" = <i>Atriplex reptans</i> - "Greasewood" = <i>Ambrosia dumosa</i> - "Creosotebrush" = <i>Larrea tridentata</i> - "Blackbrush" = <i>Coleogyne ramosissima</i> - "Bursage" = <i>Bursera californica</i> - Palo verde = <i>Cercidium americanum</i> - Mesquite = <i>Prosopis glandulosa</i> - Cactus = <i>Carnegiea gigantea</i>; <i>Opuntia</i> spp.
<p>El significado de los adjetivos de la condición hidrológica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pobre.- Si menos del 30 % del suelo está cubierto por hojarasca, hierba o matorral. - Media.- Si la cobertura está comprendida entre el 30 y el 70 %. - Buena.- Si la protección vegetal del suelo es superior al 70 %. <p>* Valores añadidos por Smith & Maidment (1995)</p>	

Martínez de Azagra (1996) propone una correspondencia hidrológica entre asociaciones vegetales americanas y españolas, basada en consideraciones fitoclimáticas y morfológicas referidas a la estructura aérea y a la cobertura del suelo (véase la tabla 5). Esta tabla debe tomarse como meramente orientativa, puesto que lo más correcto será crear una tabla específica para este tipo de vegetación en España, a partir de datos de campo.

Tabla 5. Correspondencia entre las asociaciones vegetales americanas y españolas para la determinación del número de curva en zonas áridas y subdesérticas españolas (según Martínez de Azagra, 1996).

TIPO DE VEGETACIÓN DE ZONAS ÁRIDAS AMERICANAS	EQUIVALENCIA PARA LAS ZONAS ÁRIDAS ESPAÑOLAS
1. Herbazal con algo de matorral	Herbazal de <i>Brachypodium retusum</i> con algo de matorral subdesértico
2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"	Coscojar, monte bajo de rebollo (aunque en condiciones de mucha más sequedad). <i>Rhamnus lycioides</i>
3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea	Enebral claro de <i>Juniperus thurifera</i> con <i>Pinus nigra</i> dispersos. Sabinar de <i>J. phoenicea</i> con <i>Pinus halepensis</i>
4. "Sagebrush" con cubierta herbácea	<i>Artemisia herba-alba</i> <i>Artemisia campestris</i>
5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc.	Vegetación del semiárido murciano y almeriense: <i>Thymelaea hirsuta</i> , <i>Atriplex glauca</i> , <i>Zizyphus lotus</i> , <i>Rhamnus lycioides</i>

-3- Definición de la unidad sistematizada

La unidad sistematizada queda definida a partir de sus parámetros fundamentales, que son su tamaño (S), la relación entre área de impluvio y área de recepción (S_1/S_2) y la capacidad del microembalse ($CAPA$).

Una de las principales novedades que plantea MODIPÉ en la preparación del suelo, estriba en dotar a cada planta de un microembalse y de un área de impluvio. Esta estrategia, basada en la recolección de agua, tiene implicaciones técnicas de gran interés para la restauración forestal en zonas áridas y semiáridas.

La superficie puesta a disposición de cada planta (S_p) depende de la densidad de la repoblación:

$$S_p = \frac{10.000}{n}$$

siendo n el número de pies por hectárea.

Por otra parte, el tamaño de la unidad sistematizada (S) es la suma del área de impluvio y del área de recepción:

$$S = S_1 + S_2$$

La sistematización primaria se denomina plena o completa cuando asegura que toda la escorrentía de S_p llegue al área de recepción. En caso contrario se habla de sistematización primaria incompleta o parcial. En esta última la obtención de cosechas de agua pasa a un segundo término, puesto que una parte de la escorrentía generada en la ladera no se dirige hacia los alcorques, pudiéndose perder.

En parcelaciones completas el tamaño de la unidad sistematizada (S) coincide con la superficie destinada a cada planta (S_p). No ocurre así en sistematizaciones primarias incompletas, pues existen pasillos de escorrentía que reducen el tamaño de la unidad sistematizada respecto de la superficie puesta a disposición para cada planta (S_p). De esta forma:

- Para una sistematización completa: $S = S_1 + S_2 = S_p$

- Para una sistematización primaria incompleta: $S = S_1 + S_2 < S_p$

En muchas de las intervenciones forestales de restauración, la preparación del suelo debe ir enfocada como un diseño de sistemas de recolección de agua. La economía del agua es trascendental para invertir la mayor parte de los procesos de desertificación bajo clima mediterráneo.

El tamaño del área de recepción (S_2) y su forma dependen de la preparación del suelo (apero utilizado y refinado o acondicionado). También puede depender del tiempo que se desee que tenga el brinzal un microclima mejor, más húmedo. Este es el caso de las microcuencas. Como caso extremo, si se pretende que el microclima favorable se prolongue durante toda la vida del árbol, el área de recepción ha de tener una superficie que abarque el tamaño de las raíces del árbol adulto, con lo que se llegará a los bancales del ámbito agrícola (tan abundantes en la geografía del sureste español, plantados con olivos, almendros, algarrobos, vides, etc.).

Para preparaciones lineales del suelo, el área de recepción debe referirse a la longitud que corresponde a cada planta dentro de la línea. Así:

$$S_2 = b \cdot e$$

siendo b el ancho de la labor (por ejemplo, el ancho de la plataforma en terrazas en contrapendiente o el ancho del brazo del subsolador para un subsolado lineal) y e la equidistancia entre plantas contiguas siguiendo una curva de nivel.

El área de impluvio se obtiene restando al tamaño de la unidad sistematizada el área de recepción:

$$S_1 = S - S_2.$$

Un criterio técnico para fijar S_1 consiste en elegir un área de impluvio de un tamaño tal que proporcione una determinada dotación de agua al área de recepción. Algunos modelos agrícolas sobre cosechas de agua pueden orientar sobre la relación S_1/S_2 a tomar, aunque no sean directamente aplicables al sector forestal.

El tamaño de la trampa de agua superficial que se obtiene modificando el microrrelieve de la ladera en el área de recepción se denomina *CAPA* en el modelo MODIPÉ, y se calcula por:

$$CAPA \approx H \cdot S_2$$

siendo H la profundidad de la poceta o la altura de las represas que delimitan el área de recepción (S_2).

Conviene señalar, que con las primeras lluvias y cosechas de agua se produce un asentamiento en las represas y un aterramiento parcial de las pocetas. Con objeto de considerar este efecto, recomendamos reducir en los cálculos el valor de *CAPA* respecto del volumen máximo del microembalse recién perfilado en un pequeño porcentaje (por ejemplo, en un 10 %). Dicho de otra manera: se debe trabajar con un resguardo o rebaje de unos pocos centímetros.

Nunca hay que perder de vista que la alteración del relieve debe desaparecer a los pocos años de la intervención, una vez resulte innecesaria para la evolución progresiva de la ladera. Resulta lamentable recorrer terrenos

repoblados hace muchos años en los que perdura un relieve artificial incómodo y – a todas luces – innecesario. La ecuación universal de pérdidas de suelo (el modelo USLE y sus variantes) puede servir para estimar este lapso de tiempo.

-4- Estimación de los números de curva del área de impluvio y del área de recepción

Para determinar los números de curva del área de impluvio y del área de recepción, a falta de datos o experiencias más precisas, se aconseja fijar estos valores a partir del número de curva de la ladera actual (*NAC*). Se pueden dar al respecto las siguientes indicaciones:

a) Sobre *NI*

- Si la preparación del suelo no actúa sobre el área de impluvio: $NI = NAC$.
- Si se realiza una eliminación parcial o total de la vegetación por quema, uso de herbicidas, roza al aire, decapado o descuaje, se produce una evolución hacia barbecho, y por lo tanto: $NI > NAC$.
- Si se utilizan técnicas para incrementar la eficiencia de escurrido (compactación y alisado del terreno, eliminación de piedras superficiales, supresión de la vegetación, utilización de sales, ceras o riegos asfálticos): $NI > NAC$.
- Si se realiza laboreo del área de impluvio y se prevé (debido a la textura del suelo) la formación de un encostramiento superficial o tastana: $NI \geq NAC$.
- Si se crean desmontes y/o terraplenes en el área de impluvio (área de impluvio compuesta, como en el caso de las terrazas de absorción): $NI \geq NAC$.
- Si se practican incisiones profundas con un subsolador en un suelo somero, cabe esperar que el suelo mejore (por ejemplo, de un tipo D a un tipo C), y por ello: $NI < NAC$.

b) Sobre *NR*

Por un lado, la eliminación de la vegetación preexistente en este área la aproxima hacia un barbecho. Por otro lado, el mullido, la profundización del perfil y la aplicación de enmiendas mejoran el tipo de suelo. Se tienen, pues, dos efectos antagónicos (figura 5) y hay que decidir cuál de los dos en cada caso particular es preponderante. Así, el número de curva puede aumentar o disminuir respecto de la situación de partida (*NAC*), dependiendo del tipo de suelo (textura, pedregosidad y materia orgánica), del tipo de vegetación preexistente, del tipo de labor practicada, del tipo de tempero que tenga el terreno al realizar la misma y de las enmiendas incorporadas.

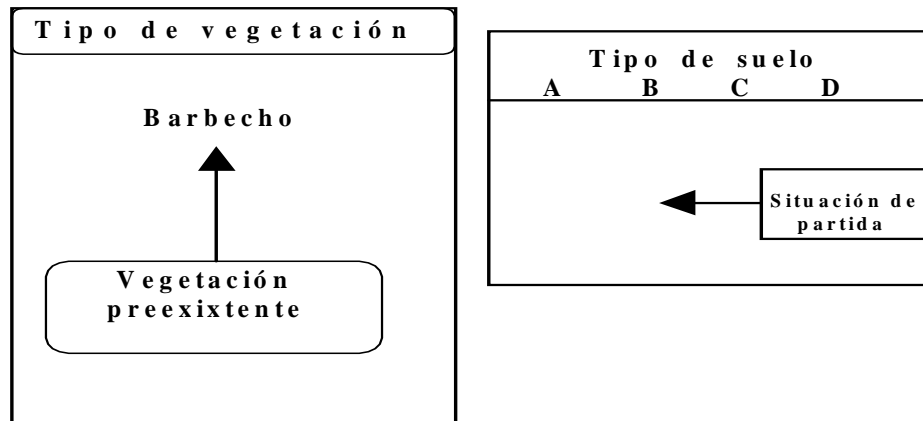





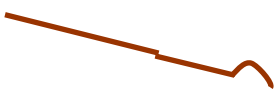
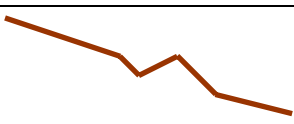
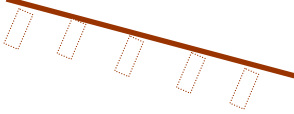

Figura 5. Flechas indicando la evolución del número de curva (tabla nº 3) al realizar una labor profunda en un suelo somero (litosuelo)

Se pueden considerar dos situaciones diferentes:

- $NR \geq NAC$ suele ser una hipótesis pesimista, que está del lado de la seguridad y que obliga a la construcción de microembalses mayores para lograr endorreísmo (o para conseguir un determinado número de curva equivalente de la unidad sistematizada, *NEQ*).
- $NR = NAC$ es el criterio general recomendado, en el caso de no disponer de datos o experiencias más precisas (véase Martínez de Azagra, 1996).

En la tabla nº 6 se hace un análisis de los números de curva del área de impluvio y del área de recepción que corresponden a diferentes preparaciones del terreno utilizadas en España.

Tabla 6. Consideraciones acerca del número de curva en el área de impluvio y en el área de recepción para diferentes preparaciones del terreno en repoblaciones forestales

LABOR	ESQUEMA	NÚMERO DE CURVA	CAPA
Ladera inalterada		$NI = NR = NAC$	0
Ahoyado con alcorque; Microcuencas		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acaballonado según curvas de nivel; Subsulado con rejón modificado		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acaballonado superficial		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Aterrazado en contrapendiente		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Subsulado lineal; Subsulado pleno		$NI = NAC$ $NR < NAC^2$	≈ 0
Laboreo pleno según curvas de nivel		$NI = NR > NAC^3$	≈ 0

¹ A falta de ensayos de campo y para estar del lado de la seguridad: $NR > NAC$
² En litosuelos y estando el terreno seco (a tempero)
³ El efecto hidrológico global es negativo, pues el aumento del número de curva predomina sobre $CAPA (\approx 0)$.

Como ya hemos mencionado con anterioridad, el método del número de curva ha sido calibrado para cuencas de varios kilómetros cuadrados. Los números de curva a la escala de trabajo que manejamos con MODIPÉ (unidades sistematizadas de pocos metros cuadrados) resultan algo más altos que los indicados en las tablas, al tener el agua un menor tiempo de oportunidad de infiltración cuando circula por áreas tan reducidas. A falta de ensayos de calibrado, que sería muy conveniente emprender, se aconseja utilizar las tablas generales sin modificación, pero siendo conscientes de esta distorsión por efecto de la escala. A nivel práctico, se estarán infravalorando las cosechas de agua o, lo que es lo mismo, se estará reduciendo el tamaño de las trampas de agua necesario para conseguir endorreísmo. Los resultados así obtenidos tendrán un sesgo por defecto, que conduce a unos menores movimientos de tierra. Si se desea soslayar esta distorsión se puede trabajar con precipitaciones de cálculo con periodos de retorno mayores: un incremento del periodo de recurrencia en 5 años puede ser suficiente.

¡Cuánto interesaría calibrar el modelo MODIPÉ para poder orientar con conocimiento de causa sobre los efectos hidrológicos de cualquier intervención sobre el número de curva (*NAC*)! Por el contrario y a nuestro juicio, querer crear y desarrollar modelos bi- o triparamétricos es del todo ilusorio, si no hemos sido capaces de calibrar un modelo uniparamétrico primero. Son ganas de complicar las cosas, antes de haberlas resuelto primero de forma aproximada.

-5- Determinación del número de curva para la vegetación clímax

Conviene conocer el número de curva de la vegetación clímax o, simplemente, el de la vegetación que se quiere alcanzar (N_{min}). Para ello deben hacerse mediciones en campo en laderas similares con bosques o vegetaciones que se asemejen al objetivo. Este N_{min} puede determinarse con la ayuda de las tablas generales del número de curva, previa clasificación del tipo de bosque según su condición hidrológica (véase el apartado 2).

El rango de variación del número de curva puede ser bastante amplio si se parte de una ladera altamente degradada y se consigue su plena restauración con el paso de los años. De acuerdo con las tablas del número de curva, se obtiene un intervalo máximo de 94 -15. No obstante, un intervalo más realista, dentro de un lapso de tiempo habitual (unos 50 años), puede ser el de 94 - 54, que se corresponde con un barbecho sobre suelo de tipo D transformado en un bosque con condición hidrológica buena sobre suelo de tipo C. Surge de esta forma el concepto de series progresivas y regresivas del número de curva, que afectan directamente a la disponibilidad hídrica (a la infiltración) y a la escorrentía de una ladera (véanse las figuras 6 y 7).

Puesto que a cada número de curva (N) se le puede asignar un umbral de escorrentía (P_0) mediante la ecuación:

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N}$$

se pueden obtener los umbrales de escorrentía para la ladera actual degradada (PAC) y para la ladera restaurada ($P_{máx}$). Estos valores cabe relacionarlos con los datos de precipitaciones de la zona y sus correspondientes periodos de recurrencia (tabla 7).

Tabla 7. Relación genérica entre números de curva, umbrales de escorrentía y periodos de retorno

Situación	Número de curva	Umbral de escorrentía	Periodo de retorno
Ladera actual	NAC	PAC	t
Ladera restaurada	N_{min}	$P_{máx}$	T

Si la ladera está muy degradada el umbral resultará tan bajo que t representa el número de veces al año en que se produce escorrentía. Por el contrario, T puede corresponderse con un periodo de retorno muy amplio. En tal caso concluiremos que la ladera restaurada actúa como un perfecto sumidero de agua; es decir: todo lo que llueve se infiltra (o es interceptado) lo que favorece la recarga de acuíferos además de mejorar la dotación de agua del suelo para beneficio directo del ecosistema.

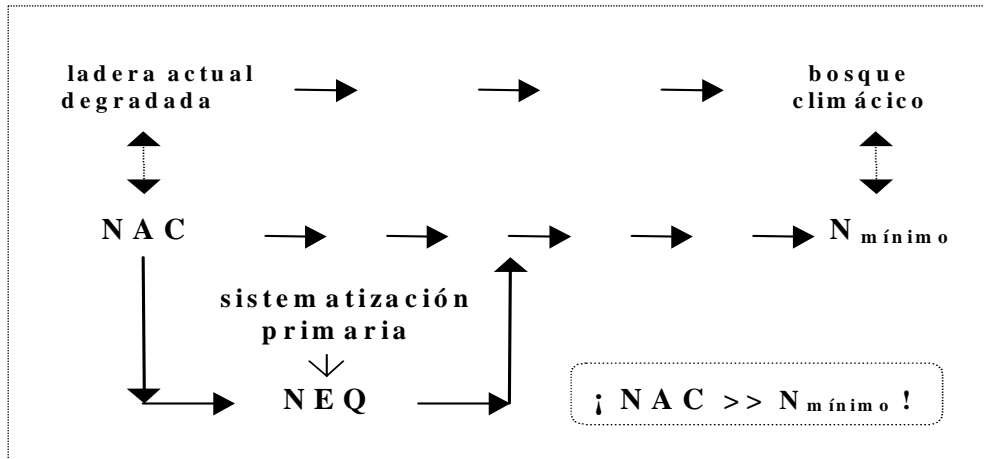


Figura 6. Serie progresiva del número de curva (Martínez de Azagra, 1996)

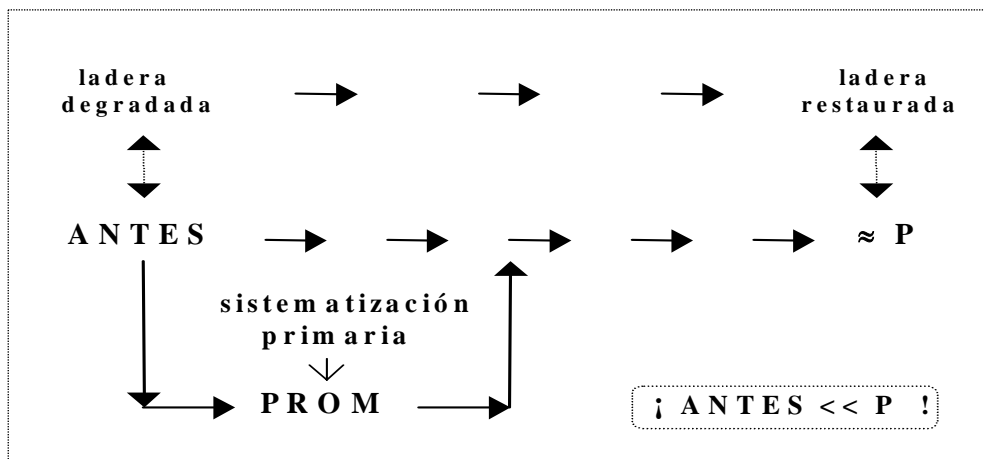


Figura 7. Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (según Martínez de Azagra, 1996)

-6- Acerca de la conveniencia o necesidad de sistematizar una ladera

En el ámbito de aplicación del modelo MODIPÉ, las preparaciones deben ordenar y aprovechar la escorrentía superficial en las siguientes situaciones:

- Climas áridos y torrenciales, caracterizados por llover poco ($P_{anual} \leq 500$ mm) y muy concentrado en el tiempo (con pocos días de lluvia al año).
- Laderas con un número de curva elevado (por ejemplo, cuando $NAC(2)$, en condiciones medias de humedad, sea superior o igual a 80).
- Cuando la mayor parte de los episodios de lluvia provoquen escorrentía en la ladera. Para estudiar esta cuestión basta con comparar el umbral de escorrentía de la ladera actual degradada ($PAC(2)$, en condiciones medias de humedad) con las precipitaciones máximas diarias de los distintos meses del año. Otra forma de abordar el tema consiste en hallar $PFIC$ (la precipitación anual dividida entre el número de días de lluvia al año), y compararlo con el umbral de escorrentía de la ladera (el mencionado $PAC(2)$).
- Cuando la precipitación anual esté en el límite de la que precisa la especie a implantar y se tenga una ladera degradada con escasa capacidad de infiltración (NAC elevado), lo que facilita la acumulación de las aguas llovedizas en los lugares de implantación (concepto de cosecha de agua). Es ésta una sabia manera de aprovechar la degradación de un ecosistema en su propio beneficio para lograr su restauración.
- La sistematización primaria será tanto más necesaria cuanto más seca sea la ladera (por ejemplo, en orientaciones de solana). En estos casos el retículo habrá de ser pleno y endorreico, con caballones-guía que conduzcan la escorrentía y con alcorques de gran capacidad.
- Las trampas de agua son muy convenientes cuando existen procesos de desertificación por aridez edáfica. Indicios reveladores de un proceso de desertificación por aridez edáfica son los siguientes:
 - Una red de drenaje densa, con infinidad de regueros de erosión
 - La aparición o el avance de cárcavas, erosiones remontantes
 - Una vegetación muy rala y alejada de la climática
 - El descalce de la vegetación leñosa.

Frente a este problema se apuesta por el proceso contrario, es decir, la **oasificación**. Se trata de dotar a la ladera de una sistematización primaria bien diseñada, es decir, de pequeñas estructuras en tierra que recojan e infiltren la escorrentía, modificando levemente su fisiografía. De esta forma se consiguen mejorar las condiciones de humedad del suelo y se posibilita el desarrollo de una vegetación forestal, invirtiéndose el temido proceso de desertificación.

-7- Criterios para fijar el tamaño del microembalse

El tamaño del microembalse (*CAPA*) puede fijarse atendiendo a diferentes criterios. Muchos de ellos están íntimamente relacionados entre sí, otros son complementarios y hasta opuestos. Una adecuada conjugación de los mismos conduce a la solución más oportuna en cada caso.

a) Criterio hidrometeorológico.- Consiste en lograr endorreísmo para una determinada precipitación, serie de precipitaciones o año (aguaceros, meses o año de cálculo). Siendo menos exigentes, sin necesidad de llegar al endorreísmo pleno, podemos perseguir una determinada dotación de agua en el área de recepción (donde se encuentra el repoblado) merced a la capacidad del microembalse (o lo que es lo mismo, lograr un número suficiente de riegos copiosos antes del estío).

b) Criterio hidráulico.- Se trata de construir un microembalse en el que quede un resguardo ante el aguacero de cálculo, o una cierta reserva de seguridad frente al desbordamiento (equivalentes a la disminución del número de curva en varios puntos). La finalidad de este resguardo puede ser la de estar del lado de la seguridad en la consecución de endorreísmo, pero también corregir el efecto de la distorsión debido a la escala que manejamos (el modelo del número de curva está calibrado para cuencas de varios km²) o considerar el aterramiento parcial y el achatamiento de los muretes con las primeras lluvias.

c) Criterio edafológico.- Primeramente, hay que decir que la altura del microembalse (*H*) y la profundidad del suelo (del alveolo, del subsolado o de las raíces) deben estar relacionadas:

$$H = h \cdot p_u$$

(siendo *h* la profundidad del suelo y *p_u* la porosidad útil)

También debe existir una ligazón entre el volumen de agua que puede contener el alcorque lleno y la capacidad de retención de agua (*CRAD*) que tiene el suelo abarcado por la rizosfera de las plantas introducidas:

$$\text{alcorque lleno} \Leftrightarrow \text{dosis de riego} = \text{CRAD} \cdot h$$

d) Criterio ecológico.- Mediante la creación de un alcorque, se intenta conseguir un salto en el número de curva equivalente de la unidad sistematizada. Este criterio se basa en la serie progresiva del número de curva (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996).

e) Criterios fisiológicos.- Hay que elegir un tamaño de microembalse (*CAPA*) tal que sea capaz de almacenar y suministrar un "caudal regulado" equivalente a la evapotranspiración potencial (*ETP*) de los meses de verano o de un solo mes (como por ejemplo el más caluroso):

$$\text{CAPA} = \text{ETP} \cdot S_2$$

Un objetivo más modesto es el que persigue satisfacer las necesidades mínimas del brinjal durante el verano:

$$CAPA = ET_{min} \cdot S_2$$

f) Limitación fisiológica.- Deben reducirse tanto el tiempo máximo de embalse de agua como el tiempo máximo mensual de encharcamiento, para evitar problemas de anoxia en las raíces.

g) Criterio paisajístico o topográfico.- Interesa alterar el relieve lo mínimo indispensable para invertir el proceso de desertificación. Debemos reducir el movimiento de tierras al máximo, cumpliendo el doble objetivo de asegurar la instalación del repoblado y minimizar el impacto negativo que se provoca con la preparación del terreno sobre el suelo y el paisaje. Una postura sensata consiste en comprobar si el microrrelieve artificial queda atenuado a los pocos años de realizada la intervención. Para tal fin cabe usar algún modelo de erosión hídrica (como la ecuación USLE) admitiendo que el alcorque es una "perfecta trampa de sedimentos" (de hecho, lo será mientras haya endorreísmo).

h) Criterios mecánicos.- Siempre debe asegurarse la estabilidad y estanqueidad de los muretes de tierra, por lo que su altura no debe ser superior a 50 cm. Unos microrrelieves artificiales inestables, además de resultar inútiles como trampas de agua, pueden enterrar a los brinzales provocando su muerte. A ello hay que agregar el riesgo de estar propiciando fuertes procesos erosivos en un futuro inmediato.

i) Criterio económico.- Los trabajos de refinado y conformación del alcorque no deben reducir excesivamente el rendimiento de la plantación, a no ser que se justifique tal necesidad por consideraciones microclimáticas de extrema aridez.

-8- Relación entre el área de impluvio y el área de recepción

Normalmente, la relación entre el área de impluvio y el área de recepción viene determinada por la decisión sobre el método de preparación del suelo y la densidad de plantación. Sin embargo, para zonas áridas y semiáridas cabe definir criterios al respecto que, lógicamente, influyen en la densidad de la repoblación. Se trata, por tanto, de un proceso inverso de cálculo, donde la densidad no es un dato de partida y sí la disponibilidad hídrica en el área de recepción.

Existen interesantes modelos agrícolas para fijar la relación S_1/S_2 (ANAYA *et al.*, 1976; SMITH, 1978; VELASCO-MOLINA, 1983; FINKEL, 1985; VILLANUEVA *et al.*, 1987; CADOT, 1989; HARI-KRISHNA, 1989; CRITCHLEY *et al.*, 1991; PALOMO, 1990; BOERS, 1994; OWEISS *et al.*, 1999; etcétera) pero no son directamente aplicables para repoblaciones forestales (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1998).

La idea fundamental para fijar el cociente S_1/S_2 estriba en que el tamaño del área de impluvio sea el adecuado para proporcionar una determinada cantidad de agua que permita (o asegure) la subsistencia del repoblado durante su fase más crítica de arraigo y primer crecimiento; es decir: que el área de recepción tenga una dotación de agua suficiente gracias al área de impluvio. Además del objetivo obvio de la supervivencia de los brinzales, pueden perseguirse otros fines, como conseguir un determinado crecimiento de las plantas u obtener una determinada producción de frutos.

Existen dos planteamientos bien diferentes, ya queramos un microclima temporal durante los primeros años (el planteamiento clásico de las repoblaciones forestales) ya un microclima permanente con mayor disponibilidad hídrica (típico de los cultivos leñosos en zonas abancaladas: olivos, algarrobos, almendros, vides, pistachos, etc.).

-9- Referencias bibliográficas

Anaya, G.M.; Tovar, S.; Tovar, a.; Macías, L.; 1976. *Métodos de captación de lluvia para zonas agrícolas con temporal deficiente*. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Chapingo.

Boers, Th. M.; 1994. *Rainwater harvesting in arid and semi-arid zones*. ILRI Publications. Wageningen.

Bouwer, H.; 1966. Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water resources research*, 2: 729-738.

Cadot, P.D.; 1989. *Development of a model for design of water harvesting systems in small scale rainfed agriculture*. University of Arizona. U.M.I. Ann Arbor.

Critchley, W.; Siegert, K.; 1991. *Water harvesting*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.

Finkel, M. (Ed.); 1985. *Turkana water harvesting manual*. Finkel and Finkel Ltd. Norad.

Hari-Krishna, J.; 1989. Modelling the effects of tied-ridging on water conservation and crop yield. *Agric. Water Manage.*, 16: 87-95.

López Alonso, R.; 2001. Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva del Soil Conservation Service. *Montes*, 66: 92-97.

Martínez de Azagra, A.; 1996. *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Martínez de Azagra, A.; 1998. Desarrollo de un modelo sobre recolección de agua aplicable a la restauración forestal. *Ecología* 12: 93-104

Mishra, S.K.; Singh, V.P.; 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology*. Kluwer Academic Publishers. Dodrecht.

MOPU; 1990. *Instrucción 5.2-I.C. Drenaje superficial*. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

NRCS; 2002. *Part 630. Hydrology. National Engineering Handbook*. Washington D.C.

Oweis, Th.; Hachum, A.; Kijne, J.; 1999. *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas*. SWIM Papers. Colombo.

Palomo, M.; 1990. *Obtención del intervalo de siembra entre bordos antierosivos mediante un modelo simplificado de balance hídrico para zonas semiáridas*. Tesis de Maestría. Colegio de Graduados - Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar". Ciudad Juárez.

Ponce, V.M.; 1989. *Engineering hydrology. Principes and practices*. Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs.

SCS; 1991. *Engineering field handbook. Chapter 2*. Washington D.C.

Smith, G.L.; 1978. *Water harvesting technology applicable to semiarid, subtropical climates*. Agency for International Development. Washington D.C.

Smith, P.N.; Maidment, D.R.; 1995. *Hydrologic data development system*. Center of Research in Water Resources. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/docs/reports/smith/sect2.pdf>

Udall, S.L.; Dominy, F.E.; 1966. *Diseño de presas pequeñas*. Ed. Continental. México D.F.

Velasco-Molina, H.A.; 1983. *Uso y manejo del suelo*. Ed. Limusa. México D.F.

Villanueva, J.; Sánchez, I.; Velasco-Molina, H.; 1987. A method to determinate the relation of water harvesting area to planting area on seasonal crops. *Symposium on strategies for classification and management of native vegetation for food production in arid zones*, Tucson (Arizona).