



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS DE PALENCIA

Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal

TESIS DOCTORAL

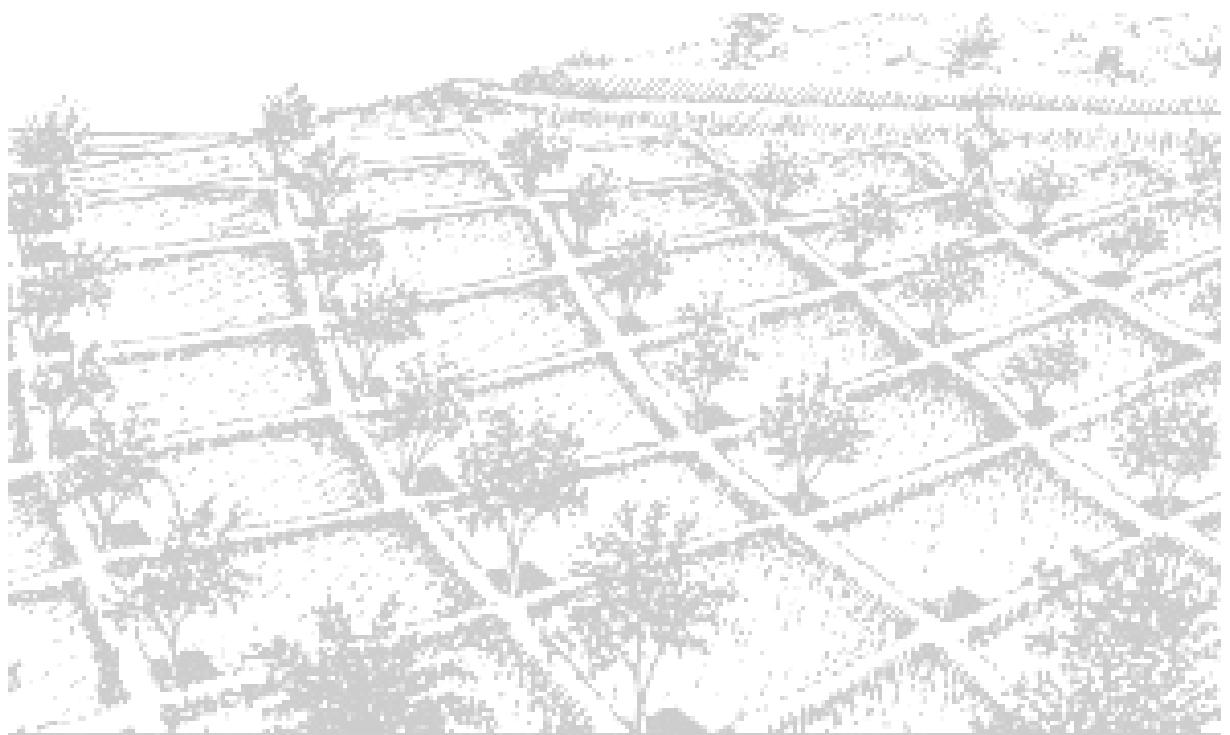
**Desarrollo y aplicación de una metodología
destinada al dimensionado de sistemas de
recolección de agua para la restauración
forestal en zonas áridas**

DOCTORANDO: **Jorge Mongil Manso**
Ingeniero de Montes

DIRECTOR: **Andrés Martínez de Azagra Paredes**
Doctor Ingeniero de Montes

Palencia, Junio 2004

A mi familia



“Lo que hace bello al desierto es que guarda agua en su interior”

AGRADECIMIENTOS

A Andrés Martínez de Azagra Paredes, director de esta tesis, por dedicarme su tiempo y regalarme su experiencia, sus buenos consejos y sus melodías.

A Joaquín Navarro Hevia, por sus valiosas aportaciones poco erosivas y sus filosofías de la vida.

A Víctor M. Ponce (Universidad de San Diego) y a Froilán Sevilla (Servicio Territorial de Medio Ambiente de León, Junta de Castilla y León) por las recomendaciones bibliográficas.

A la Universidad de Valladolid, por su ayuda económica que, aunque muy exigua, sirvió para dar los primeros pasos por el desierto.

A mis compañeros de la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de Palencia y de la Universidad Católica de Ávila, porque ellos, como yo, saben bien de la dureza de la labor docente e investigadora.

A mis familiares y amigos, por su comprensión y apoyo.

ÍNDICE

RELACIÓN DE FIGURAS

RELACIÓN DE TABLAS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	19
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA GENERAL	23
2.1. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	23
2.2. LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS Y SU PROBLEMÁTICA.....	24
2.2.1. Criterios de delimitación de zonas áridas.....	24
2.2.2. Distribución mundial de las zonas áridas.....	28
2.2.3. Distribución de las zonas áridas en España	30
2.2.4. Degrado del territorio en zonas áridas. Desertificación	30
2.2.5. La desertización en España. El proyecto LUCDEME y el PAND.....	32
2.3. LAS COSECHAS DE AGUA	33
2.4. LA REPOBLACIÓN FORESTAL EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS.....	35
2.5. EL MODELO HIDROLÓGICO MODIPÉ.....	38
2.5.1. Introducción.....	38
2.5.2. Funcionamiento de la unidad sistematizada.....	40
2.5.3. Bases e hipótesis del modelo.....	40
2.5.4. Ecuaciones generales.....	43
2.5.5. Etapas de funcionamiento de un microembalse.....	44
2.5.6. Particularización al método del número de curva (MODIPÉ).....	47
2.5.7. Hipótesis y limitaciones del modelo MODIPÉ.....	49
3. METODOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DE REPOBLACIONES FORESTALES ...	51
3.1. TAMAÑO DEL MICROEMBALSE	51
3.1.1. Introducción.....	51
3.1.2. Revisión bibliográfica.....	51
3.1.3. Metodología propuesta.....	52
3.2. RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN.....	91
3.2.1. Introducción.....	91
3.2.2. Revisión bibliográfica.....	91
3.2.3. Metodología propuesta.....	104
3.3. DENSIDAD DE PLANTACIÓN.....	111

Índice

3.3.1. Introducción.....	111
3.3.2. Revisión bibliográfica.....	111
3.3.3. Metodología propuesta.....	118
3.4. PROCEDIMIENTO INTEGRADO DE CÁLCULO.....	127
3.5. DATOS NECESARIOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	129
4. ESTUDIO DE CASOS.....	131
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	131
4.2. TAMAÑO DEL MICROEMBALSE.....	139
4.3. RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN.....	171
4.4. DENSIDAD DE PLANTACIÓN.....	185
4.4.1. Microcuencas y subsolado (sistematización completa).....	185
4.4.2. Ahoyado (sistematización incompleta).....	185
5. CONCLUSIONES.....	189
5.1. EL DISEÑO DE REPOBLACIONES FORESTALES EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS.....	189
5.2. TAMAÑO DEL MICROEMBALSE.....	189
5.3. RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN.....	193
5.4. DENSIDAD DE PLANTACIÓN.....	195
5.5. PROCEDIMIENTO INTEGRADO DE CÁLCULO.....	196
6. BIBLIOGRAFÍA.....	197

ANEXOS

- I. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE AGUA
- II. TÉCNICAS DE REPOBLACIÓN FORESTAL EN ZONAS ÁRIDAS
- III. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA
- IV. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE)
- V. PROTOCOLO DE UTILIZACIÓN DEL MODELO MODIPÉ
- VI. GLOSARIO
- VII. RELACIÓN DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 2.1: Mapa de las zonas áridas y semiáridas de la Península Ibérica, según Elías (1978) citado por Porta *et al.* (1999).
- Figura 2.2: Principio de la recolección de agua
- Figura 2.3: *Oasificación* contra desertificación (Martínez de Azagra & Mongil, 2001)
- Figura 2.4: Balance hídrico propuesto por el modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura 2.5: Delimitación del área de impluvio y del área de recepción en varias preparaciones del terreno para repoblaciones forestales (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura 2.6: Explicación gráfica de las ecuaciones fundamentales de los modelos MODIPÉ e HYDNUM
- Figura 2.7: Esquema conceptual de funcionamiento de una microcuenca con poceta
- Figura 2.8: Etapas de funcionamiento de un microembalse, según Martínez de Azagra (1998)
- Figura 3.1: Esquema conceptual de la relación entre el área de impluvio, el área de recepción y el tamaño del microembalse
- Figura 3.2: Zonas de almacenamiento y delimitación del resguardo de un microembalse para repoblación forestal (basado en Ayuso, 1990)
- Figura 3.3: Formas de los bulbos húmedos en función de la textura del suelo (arenosa, arcillosa y franca). La situación 4 se produce cuando existe una capa impermeable a poca profundidad, que interviene en el movimiento vertical del agua y provoca un ensanchamiento lateral del bulbo (Medina, 2000).
- Figura 3.4: Explicación gráfica del criterio edáfico de la porosidad útil
- Figura 3.5: Serie progresiva del número de curva (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura 3.6: Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura 3.7: Balance hídrico en una ladera con microembalse
- Figura 3.8: Conductividad hidráulica a saturación ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) en función de la granulometría del horizonte
- Figura 3.9: Dimensiones de un murete o caballón
- Figura 3.10: Reducción de la capacidad del microembalse buscando una mayor estabilidad del caballón
- Figura 3.11: Volúmenes de desmonte y terraplén en diferentes preparaciones del suelo (de arriba abajo: ahoyado, acaballonado o subsolado con rejón modificado y aterrazado)
- Figura 3.12: Volúmenes definitivo, provisional y de excavación de un caballón
- Figura 3.13: Explicación de la ley de Darcy
- Figura 3.14: Integración de los criterios de diseño del microembalse
- Figura 3.15: Explicación del modelo de Smith (1978), según Velasco-Molina (1991)
- Figura 3.16: Explicación del modelo de Velasco-Molina (1983), según Velasco-Molina (1991)
- Figura 3.17: Situación de W_0 y W_e respecto a los períodos seco y húmedo, para la aplicación del método de Oweis *et al.* (1999)
- Figura 3.18: En las preparaciones del suelo, como las microcuenca (arriba) u operaciones lineales (abajo), el área de impluvio (S_1) debe tener un tamaño adecuado para dotar de agua suficiente al área de recepción (S_2).
- Figura 3.19: En laderas preparadas mediante microcuenca, áreas de impluvio pequeñas implican densidades de plantación elevadas (arriba), mientras que áreas de impluvio grandes implican densidades menores (abajo).
- Figura 3.20: Representación esquemática de una sistematización incompleta consistente en ahoyado con alcorques
- Figura 3.21: Construcción de caballones laterales que dirigen el agua de escorrentía hacia el área de recepción
- Figura 3.22: Secuencia integrada de cálculo de la capacidad del microembalse, relación S_1/S_2 y densidad de plantación
- Figura 4.1: Climodiagrama de Walter-Lieth, para las zonas estudiadas del término municipal de Geria (Valladolid)
- Figura 4.2: Ladera de Geria (Valladolid) cuya cubierta vegetal pretende restaurarse

- Figura 4.3: Ajuste de la función de distribución de Gumbel (en rosa) para las precipitaciones máximas diarias observadas (en azul) en la estación de Geria, durante el periodo 1964-2001
- Figura 4.4: Salida de resultados del programa MODIPÉ, correspondiente al año medio (1965) en Geria, en la que se determina el aguacero más desfavorable y que se utilizará como precipitación de cálculo. En este caso corresponde al mes de septiembre, en el que hubo una precipitación máxima de 40,1 mm en condición de humedad I.
- Figura 4.5: Salida de resultados del programa MODIPÉ en la que se observan los umbrales de escorrentía según la sistematización utilizada y las diferentes condiciones de humedad. En el caso que se trata, el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada en condición I es 15 mm.
- Figura 4.6: Salida de resultados del programa MODIPÉ en la que se observan los umbrales de escorrentía según la sistematización utilizada y las diferentes condiciones de humedad. En el caso que se trata, el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada en condición I es 15 mm.
- Figura 4.7: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año medio en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.8: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año medio en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.9: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año seco en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.10: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año seco en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.11: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año húmedo en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.12: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año húmedo en Geria y sistematización por microcuenca
- Figura 4.13: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año medio en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.14: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año medio en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.15: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año seco en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.16: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año seco en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.17: Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año húmedo en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.18: Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año húmedo en Geria y sistematización por subsolado
- Figura 4.19: Representación esquemática de la sistematización incompleta consistente en un ahoyado, que se estudia en este caso.
- Figura I.1: Modelo conceptual de las cosechas de agua, según Oweis *et al.* (1999)
- Figura I.2: *Runoff farming* en Avdat Farm, desierto de Negev (Israel) (Evenari, 1987)
- Figura I.3: Clasificación de las técnicas de recolección de agua; según Siegert (1994)
- Figura I.4: Selección del sistema de cosecha de agua; según Siegert (1994)
- Figura I.5: Configuración general de las microcuenca Negarim; según Critchley & Siegert (1991)
- Figura I.6: Detalle de una unidad de microcuenca Negarim; según Critchley & Siegert (1991)
- Figura I.7: Microcuenca en forma de "V" (según Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.8: Microcuenca Negarim con árboles plantados (Rocheleau *et al.*, 1988)
- Figura I.9: Caballones según curvas de nivel para árboles (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.10: Construcción de caballones según curvas de nivel cerca de Farmington (Utah, Estados Unidos) por el U.S. Forest Service en 1933 (Ponce, 2003b)
- Figura I.11: Configuración general de los caballones según curvas de nivel para árboles (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.12: Caballones semicirculares, en sus dos variantes de diseño; según Critchley & Siegert (1991)
- Figura I.13: Caballones semicirculares después de un aguacero (FAO, 1994)
- Figura I.14: Caballones semicirculares construidas con el apero "dolphin" (FAO, 1994)
- Figura I.15: Caballones según curvas de nivel para cultivos (Critchley & Siegert, 1991)

- Figura I.16: Configuración general de los caballones trapezoidales (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.17: Configuración general de los caballones de piedra (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.18: Perfil de un caballón de piedras (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.19: Vista general de presas permeables de rocas (según Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.20: *Wadis* aterrazados (Evenari, 1987)
- Figura I.21: Perfil de un dique de rocas. Según Critchley & Siegert (1991)
- Figura I.22: Caballones de extensión de agua (Critchley & Siegert, 1991)
- Figura I.23: Terraza de banco o bancal (López Cadenas, 2003)
- Figura I.24: Tipos de terrazas según el proceso de construcción (López Cadenas, 2003)
- Figura I.25: Terrazas argelinas o mediterráneas, según Roose (1994)
- Figura I.26: Terrazas con los taludes recubiertos de piedra en un olivar de la provincia de Granada
- Figura I.27: Bancales de piedras en Caimari (Mallorca)
- Figura I.28: *Meskat*, según Achouri (1994)
- Figura I.29: *M'gouds*, estructuras desarrolladas en Túnez (Achouri, 1994)
- Figura I.30: Boquera con presa de desviación perpendicular o “de malecón”, según la construcción tradicional del sureste español (Morales, 1969)
- Figura I.31: Riego de boqueras a partir de una rambla
- Figura I.32: Descripción de los tradicionales bancales
- Figura III.1: Interpretación física de las variables que considera el modelo del número de curva
- Figura III.2: Diagrama textural para la determinación de la conductividad hidráulica en saturación (k en $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$). Los datos texturales de entrada deben ser los del horizonte menos permeable.
- Figura III.3: Diagrama textural para la determinación del tipo de suelo para el método del número de curva (MOPU, 1990)
- Figura III.4: Diagrama textural para la determinación del tipo de suelo para el método del número de curva (Ferrer-Julià, 2003)
- Figura III.5: Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de un bosque; de Morey (1955), citado por Udall & Dominy (1966)
- Figura III.6: Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de terrenos forestales (Mishra & Singh, 2003)
- Figura III.7: Ábaco para determinar el número de curva de bosques, en base al tipo de suelo y su condición hidrológica (Mishra & Singh, 2003)
- Figura III.8: Ábacos para la estimación del número de curva para formaciones vegetales típicas de zonas áridas de Estados Unidos (Mishra & Singh, 2003)
- Figura III.9: Ábaco para la obtención de la escorrentía superficial. Se entra en abscisas con la precipitación del aguacero y se traza una vertical hasta alcanzar la curva correspondiente al número hidrológico hallado. Este nivel indica la escorrentía superficial generada, dato que se lee en la escala de ordenadas.
- Figura III.10: Determinación del número de curva mediante pares de valores de precipitación y escorrentía
- Figura IV.1: Zonificación de la Península Ibérica para la determinación del factor R (ICONA, 1988)
- Figura IV.2: Nomograma para la determinación del factor K en unidades métricas; según Morgan (1997), siguiendo a Wischmeier *et al.*, (1971)
- Figura IV.3: Nomograma para el cálculo del factor $L \cdot S$ (Wischmeier & Smith, 1978)
- Figura V.1: Datos de entrada del modelo MODIPÉ
- Figura V.2: Flechas indicando la evolución del número de curva (tabla III.6) al realizar una labor profunda en un suelo somero (litosuelo)
- Figura V.3: Serie progresiva del número de curva (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura V.4: Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (Martínez de Azagra, 1996)
- Figura V.5: Ladera en la que se ha realizado un aterrazado con subsolado. Se identifican el área de impluvio y el área de recepción de la unidad sistematizada.
- Figura V.6: Esquema en el que se destacan las principales magnitudes geométricas de la preparación del suelo analizada
- Figura V.7: Datos geométricos de la unidad sistematizada
- Figura V.8: Salida gráfica del programa MODIPÉ, en el que se comparan los números de curva de la ladera actual, del área de impluvio y del área de recepción
- Figura V.9: Esquema de una repoblación mediante ahoyado con subsolador

- Figura V.10: Unidad sistematizada y pasillos de escorrentía
Figura V.11: Disposición de los hoyos en el terreno, en una preparación de ahoyado con *bulldozer*
Figura V.12: Dimensiones de la sistematización del caso 7
Figura V.13a: Dimensiones de la sistematización del caso 8
Figura V.13b: Dimensiones de la sistematización del caso 8

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 2.1:	Índices fitoclimáticos habituales usados para la delimitación de las zonas áridas, según Porta <i>et al.</i> (1999), Elías & Castellví (2001) y FAO (1989)
Tabla 2.2a:	Climas áridos, semiáridos o subhúmedos secos, según la taxonomía fitoclimática de Allué (1990)
Tabla 2.2b:	Grupos de asociaciones vegetales climáticas, por orden de frecuencia, según Allué (1990)
Tabla 2.3:	Superficie mundial bajo clima subhúmedo, semiárido, árido y extremadamente árido; modificado de Porta <i>et al.</i> (1999)
Tabla 2.4:	Tabla 2.4. Superficie ocupada por las zonas áridas en cada continente y en España; según Heatcote (1983) (citado por Porta <i>et al.</i> , 1999)
Tabla 2.5:	Utilización forestal de algunas técnicas de cosechas de agua (elaboración propia a partir de Prinz, 2001)
Tabla 3.1:	Números de curva para formaciones forestales típicas en las laderas de la provincia de Valladolid, obtenidos mediante muestreos aleatorios y utilizando el nomograma de Morey (1955)
Tabla 3.2:	Número de curva y umbral de escorrentía, con sus correspondientes períodos de retorno, para la ladera actual y la restaurada
Tabla 3.3:	Coeficientes de cultivo (k_c) para algunas especies ecológicamente próximas a las que pueden utilizarse en repoblaciones forestales en zonas áridas y semiáridas
Tabla 3.4:	Valores orientativos de superficie de copa a los 10 años, de varias especies utilizadas en repoblaciones forestales
Tabla 3.5:	Interpretación de la conductividad hidráulica saturada, según FAO (1963) y Kutílek & Nielsen (1994); (modificada de Porta <i>et al.</i> , 1999)
Tabla 3.7:	Ángulos de los taludes de desmonte y terraplén, según la naturaleza del terreno, para suelo seco y húmedo (modificada de García Salmerón, 1995)
Tabla 3.8:	Valores del coeficiente de esponjamiento (en tanto por uno) para diferentes tipos de terreno (modificada de García Salmerón, 1995)
Tabla 3.9:	Dimensiones del área de captación y de cultivo en microcuenca para árboles; modificada de Critchley & Siegert (1991)
Tabla 3.10:	Relaciones entre área de impluvio y área de recepción según la técnica de cosechas de agua (Prinz, 2001)
Tabla 3.11:	Coeficientes de escorrentía, según Benítez <i>et al.</i> (1980), citado por Lemus & Navarro (2003)
Tabla 3.12:	Coeficientes de escorrentía, según Velasco-Molina (1991)
Tabla 3.13:	Coeficientes de precipitación efectiva, según el método de Blaney-Criddle (Velasco-Molina, 1991), a aplicar para cada tramo de precipitación mensual observada
Tabla 3.14:	Densidad de plantación en repoblaciones forestales, según Serrada (1993)
Tabla 3.15:	Marco y densidad de referencia para distintos tipos de repoblaciones en la provincia de León; modificado de Sevilla (2001)
Tabla 3.16:	Densidad y marco de plantación indicados por el Programa Regional de Forestación de Tierras Agrarias de Castilla y León (JCyL, 1994), para las comarcas centrales de la Comunidad Autónoma
Tabla 3.17:	Densidades iniciales de repoblación para varias especies, según Pemán & Navarro (1998)
Tabla 3.18:	Datos que se precisan para la aplicación de la metodología propuesta, ordenados según su utilización
Tabla 3.19:	Datos necesarios para la aplicación de la metodología propuesta, ordenados según su naturaleza
Tabla 4.1:	Datos generales de las estaciones meteorológicas utilizadas
Tabla 4.2:	Precipitación media mensual y precipitación anual media (mm) en las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)
Tabla 4.3:	Datos termométricos (°C) de las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)

- Tabla 4.4: Resumen de datos climatológicos medios en las parcelas situadas en el término municipal de Geria (Valladolid)
- Tabla 4.5: Datos que pueden extraerse del climodiagrama de Walter-Lieth para las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)
- Tabla 4.6: Valores que toman en Geria (Valladolid) los principales índices climáticos que sirven para clasificar las zonas áridas y semiáridas
- Tabla 4.7: Precipitación máxima diaria ($P_{máx}$) para la estación de Geria, en la serie 1964-2001, indicándose el mes en que se ha producido
- Tabla 4.8: Test de Kolmogorov-Smirnov para la serie de datos de la estación de Geria
- Tabla 4.9: Precipitación máxima diaria ($P_{máx}$) para el periodo de retorno T , calculada a partir de la distribución de Gumbel
- Tabla 4.10: Precipitaciones límite o umbrales de escorrentía (P_{lim}) en condiciones medias de humedad y sus periodos de retorno asociados (T), para el caso de microcuenca de 10 m^2 , con diferentes tamaños de embalse (CAPA)
- Tabla 4.11: Precipitaciones límite o umbrales de escorrentía (P_{lim}) en condiciones medias de humedad y sus periodos de retorno asociados (T), para el caso de subsolado lineal, con diferentes tamaños de embalse (CAPA)
- Tabla 4.12: Altura del murete (H) en centímetros y capacidad del microembalse (CAPA) en litros, en base a los criterios hidrometeorológico e hidráulico, para la preparación mediante microcuenca y subsolado
- Tabla 4.13: Aplicación del criterio edáfico de la capacidad de retención para la ladera de Geria
- Tabla 4.14: Aplicación del criterio edáfico de la porosidad útil para la ladera de Geria
- Tabla 4.15: Precipitación límite (P_{lim}), periodo de retorno con que se produce (T) y número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ), para diferentes tamaños de alcorque (CAPA) en Geria, con preparación de microcuenca
- Tabla 4.16: Precipitación límite (P_{lim}), periodo de retorno con que se produce (T) y número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ), para diferentes tamaños de alcorque (CAPA) en Geria, con preparación de subsolado
- Tabla 4.17: Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse por el criterio fisiológico, para el año medio (1965) en la ladera de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)
- Tabla 4.18: Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse por el criterio fisiológico, para el año seco (1980) en la ladera de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)
- Tabla 4.19: Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse por el criterio fisiológico, para el año húmedo (1960) en la ladera de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)
- Tabla 4.20: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año medio y preparación por microcuenca en la ladera de Geria
- Tabla 4.21: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año seco y preparación por microcuenca en la ladera de Geria
- Tabla 4.22: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año húmedo y preparación por microcuenca en la ladera de Geria
- Tabla 4.23: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año medio y preparación por subsolado en la ladera de Geria
- Tabla 4.24: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año seco y preparación por subsolado en la ladera de Geria
- Tabla 4.25: Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año húmedo y preparación por subsolado en la ladera de Geria

- Tabla 4.26: Tiempos máximos de embalse para microcuenca de diferentes capacidades de embalse
- Tabla 4.27: Tiempos máximos de embalse para subsolado de diferentes capacidades de embalse
- Tabla 4.28: Tiempo máximo mensual de encarcamiento para microcuenca y subsolado en la ladera de Geria
- Tabla 4.29: Resultados obtenidos para el tamaño del microembalse, calculado por todos los criterios propuestos en el caso de la preparación por microcuenca
- Tabla 4.30: Resultados obtenidos para el tamaño del microembalse, calculado por todos los criterios propuestos en el caso de la preparación por subsolado
- Tabla 4.31: Precipitación media anual (P) para la estación de Geria, en la serie 1964-2001
- Tabla 4.32: Test de Kolmogorov para el ajuste a la distribución de Goodrich de la serie de datos de la estación de Geria
- Tabla 4.33: Precipitaciones mensuales del año seco (1980), precipitaciones mensuales adaptadas y evapotranspiración potencial de cálculo
- Tabla 4.34: Cálculo de las deficiencias de agua mensuales
- Tabla 4.35: Cálculo de la precipitación efectiva según el método de Blaney-Criddle (citado por Velasco-Molina, 1991)
- Tabla 4.36: Cálculo de la demanda evapotranspirativa diaria por estrato ($DEDE$) y del tiempo de abatimiento de la humedad disponible (TA)
- Tabla 4.37: Cálculo de la escorrentía por el método del número de curva
- Tabla 4.38: Resultados obtenidos de la aplicación de los métodos de cálculo de la relación entre área de impluvio y área de recepción (R). Se calculan también los valores del área de impluvio (S_1) correspondientes a áreas de recepción (S_2) de 1 m^2 (microcuenca) y de $0,73\text{ m}^2$ (subsolado).
- Tabla 4.39: Relación entre el área de impluvio y el área de recepción calculada por el método propuesto (R_{\min} y R_{\max}), para los tres casos de aguaceros virtuales.
- Tabla 4.40: Resultados obtenidos de la aplicación de los métodos de cálculo de la relación entre área de impluvio y área de recepción (R), con $e = 0,10$
- Tabla 4.41: Densidad de plantación (N) en pies/ha en función de la distancia entre líneas de ahoyado (D)
- Tabla I.1: Principales tratamientos empleados para incrementar la escorrentía en el área de captación y su influencia en la eficiencia de escorrentía; según Frasier (1994)
- Tabla I.2: Cuadro resumen de técnicas de cosechas de agua; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.3: Altura del caballón (cm) en función de la pendiente; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.4: Características constructivas de las microcuenca *Negarim*; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.5: Características constructivas de los caballones según curvas de nivel para árboles; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.6: Características constructivas de los caballones semicirculares; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.7: Características constructivas de los caballones trapezoidales; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.8: Espacio entre presas permeables de roca; según Critchley & Siegert (1991)
- Tabla I.9: Clasificación de las terrazas, según López Cadenas (2003)
- Tabla II.1: Técnicas de preparación del terreno para repoblación forestal empleadas en España
- Tabla III.1: Tipos de suelo para el método del número de curva, según la tasa mínima de infiltración (f_{\min}) y la conductividad hidráulica saturada (k); recopilación realizada por Ferrer-Julià *et al.* (2003).
- Tabla III.2: Equivalencias entre clases texturales del USDA y los grupos hidrológicos
- Tabla III.3: Grupos hidrológicos de suelos según las definiciones del NRCS; modificada de López Alonso (2001)
- Tabla III.4: Determinación de las condiciones iniciales de humedad, para la aplicación del método del número de curva
- Tabla III.5: Conversión del número de curva según las diferentes condiciones de humedad (I, II y III)
- Tabla III.6: Determinación del número de curva en condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$; según Martínez de Azagra & Navarro (1996)

- Tabla III.7: 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 & Navarro (1996)
- Tabla III.8: Correspondencia entre las asociaciones vegetales americanas y españolas en la determinación del número de curva para zonas áridas y subdesérticas (según Martínez de Azagra & Navarro, 1996)
- Tabla III.9: Valores del número de curva a partir de los umbrales de escorrentía de Témez (1987); según Ferrer-Julià (2003)
- Tabla IV.1: Valores del exponente m para el cálculo del factor de longitud de ladera, en función de la pendiente (Wischmeier & Smith, 1978)
- Tabla IV.2: Primera aproximación para determinar el factor C (ICONA, 1982)
- Tabla IV.3: Valores del factor C para pastizales, matorrales y arbustos (Wischmeier & Smith, 1978)
- Tabla IV.4: Factor C para bosques (Wischmeier & Smith, 1978)
- Tabla V.1: 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
- Tabla V.2: Resumen de resultados que ofrece el programa MODIPÉ para el ejemplo de sistematización por microcuenca
- Tabla V.3: Datos de la sistematización del terreno según el programa MODIPÉ
- Tabla V.4: Diferentes casos posibles de diseño de ahoyado con subsolador

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una metodología dirigida al diseño de la preparación del suelo para la restauración forestal en zonas áridas y semiáridas. En estas áreas, donde las precipitaciones son escasas, la instalación artificial de una vegetación leñosa resulta más difícil, puesto que la insuficiente cantidad de un recurso fundamental para el desarrollo de las plantas como es el agua, pone en serio peligro su supervivencia inicial.

Por esta razón, la intervención en el terreno debe concebirse como un sistema de recolección de agua. Así, la ladera a reforestar se divide en microcuencas o unidades sistematizadas, compuestas por un área de impluvio (o productora de escorrentía) y un área de recepción. Es en esta última donde, dentro de un microembalse, se instala la planta, que disfrutará de un microclima más húmedo, merced al aporte suplementario de agua de escorrentía generada en el área de impluvio. De esta forma puede restaurarse la vegetación de la ladera original degradada, gracias a un óptimo aprovechamiento de sus recursos hídricos.

En primer lugar debe dimensionarse la capacidad del microembalse o alcorque situado en el área de recepción y que va a acoger a la planta. Para que este microembalse cumpla eficazmente su función, debe tener un tamaño tal que recoja toda la escorrentía generada en el área de impluvio, es decir, debe asegurarse el endorreísmo dentro de la unidad sistematizada. Sin embargo, no es éste el único criterio a tener en cuenta a la hora de diseñar el alcorque. Es necesario atender también a aspectos edáficos, mecánicos, fisiológicos, paisajísticos y económicos, entre otros, para que el microembalse resulte completamente útil para los brizales.

Por otra parte, hay que fijar la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, y por tanto el tamaño de la unidad sistematizada. El área productora de escorrentía debe tener un tamaño suficiente para aportar un volumen de agua que asegure la supervivencia de las plantas recién instaladas. Tamaños inferiores incrementan el riesgo de marras por estrés hídrico a unas niveles indeseados. Por el contrario, tamaños excesivos resultan innecesarios y generan una masa forestal muy rala.

El tercer elemento de diseño de una repoblación forestal en zona árida es la densidad de plantación. Esta variable cobra especial relevancia en zonas con escasez de precipitaciones, puesto que la densidad –en estas áreas- debe ser proporcional a la cantidad de agua disponible para cada árbol. Por lo tanto, el orden de cálculo es el inverso al de las repoblaciones tradicionales: no es una densidad prefijada la que condiciona el espacio que corresponde a cada planta, sino que son las disponibilidades hídricas las que determinan la densidad.

A través del estudio de varios casos prácticos se aclara la manera de aplicar la metodología expuesta. Así mismo, a lo largo de todo el estudio se esbozan algunas líneas de trabajo que quedan abiertas y que deberán abordarse en un futuro próximo.

Palabras clave: Recolección de agua, cosechas de agua, restauración forestal, reforestación, preparación del suelo, zonas áridas, zonas semiáridas

1. INTRODUCCIÓN

La repoblación forestal en zonas áridas, semiáridas y secas subhúmedas supone un instrumento básico de lucha contra la desertificación. Con ella se consigue la protección del suelo y la conservación del agua en estas zonas, que superficialmente ocupan unos dos tercios de nuestro país y muchos millones de hectáreas en todo el mundo.

Para que la repoblación tenga éxito, se requiere una preparación previa del terreno, que garantice la satisfacción de las necesidades hídricas de las plantas instaladas en sus primeros años de desarrollo, que suelen ser los más críticos. La preparación pretende mejorar las condiciones del suelo para favorecer la instalación de los pequeños árboles recién implantados. Es decir, es un medio transitorio y necesario para lograr que se establezca una comunidad vegetal ecológicamente estable.

Es preciso dimensionar bien la repoblación en cuanto a tres aspectos fundamentales: el tamaño o volumen del microembalse de agua en el cual se sitúa la planta, la relación entre el área de impluvio y el área de recepción (es decir, el cociente óptimo entre una superficie productora de escorrentía que alimenta a otra receptora de agua) y la densidad de plantación. Estos tres datos cruciales, aunque conocidos, nunca han sido objeto de un estudio exhaustivo en el ámbito de las repoblaciones forestales, sino que más bien se han venido fijando en base a la experiencia del ingeniero o a ciertas recetas bibliográficas dudosamente extrapolables fuera de las condiciones ecológicas donde surgieron.

España tiene una gran tradición y experiencia en la revegetación de laderas degradadas, y ha empleado numerosos tratamientos de preparación del suelo (Navarro, 1977; García Salmerón, 1991, 1995; Serrada, 1993; Pemán & Navarro, 1998). Con la creación, hace más de cien años, de las Divisiones Hidrológico-Forestales se inició la época de las grandes repoblaciones forestales en nuestro país. Su trabajo, aunque no extenso en cuanto a superficie, puede calificarse de ejemplar sobre todo en lo que a la protección contra la erosión se refiere. Sirvan como ejemplos, dentro de ámbitos de aridez, las labores realizadas en las cuencas del Guadalmedina y Guadalhorce (en Málaga) o Andaras (en Almería).

En muchas restauraciones hidrológico-forestales se han empleado técnicas de cosechas de agua. Este término, introducido en inglés –*water harvesting*– por Geddes (1963), ha sido desde entonces ampliamente utilizado (Boers & Ben-Asher, 1982; Critchley & Siegert, 1991; entre otros) y adaptado a la lengua hispana por Villanueva *et al.* (1987), Giráldez *et al.* (1988), De Simón (1990), Martínez de Azagra (1995b), García Latorre (1998), etc. La mencionada técnica consiste en recoger la escorrentía superficial y concentrarla en determinadas zonas, modificando el microrrelieve de una ladera, con la finalidad de conseguir un aporte de agua suficiente para la supervivencia y el correcto desarrollo de las plantas. Con la modificación de la topografía de la vertiente, mediante la creación de alcorques o microembalses bien dimensionados, se consigue incrementar la infiltración, frenando la escorrentía y reduciendo la erosión hídrica.

A pesar de tratarse de un método tradicional con amplias posibilidades actuales, como se ha dicho, hasta hace pocos años no existía ningún modelo hidrológico que resolviera de manera satisfactoria el dimensionado de las estructuras captadoras de escorrentía para su utilización en repoblaciones forestales, sino que se navegaba en el más absoluto empirismo. Es en 1995 cuando aparece, dentro del marco del proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo), el modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1995b, 1996), que palió en gran medida la carencia señalada. El uso de este modelo se ha ido extendiendo de manera paulatina, tanto en el ámbito universitario (Pemán & Navarro, 1998) como en el ámbito de la gestión forestal, pero aún es bastante desconocido por ingenieros y gestores de montes, pese a su innegable interés. Al mismo tiempo, después de varios años de existencia, se ha constatado la necesidad de incorporar MODIPÉ a un programa más amplio de diseño de repoblaciones forestales, que no se quede en el dimensionado del microembalse –y no sólo utilizando para este fin el criterio de economía del agua-, sino que trate también otras cuestiones importantes como por ejemplo la densidad de plantación. En este sentido, las bases del nuevo planteamiento han sido esbozadas por Martínez de Azagra & Mongil (2001) y constituyen los objetivos a desarrollar en el presente trabajo, a saber:

- 1) Establecer unos criterios para fijar el dimensionado del microembalse en repoblación forestal de zonas áridas, desarrollando metodologías, según cada uno de los criterios anteriores, que una vez integradas lleven a la determinación del tamaño adecuado del alcorque. Con ello se pretende llegar a una solución óptima, que permita la supervivencia y desarrollo de la repoblación, alterando lo mínimo posible el microrrelieve de la ladera original.
- 2) Elaborar una metodología para determinar la adecuada proporción entre el área de impluvio y el área de recepción. Es decir, fijar la superficie productora de escorrentía, que provea de agua a la superficie colectora en la que se construye el microembalse y se instala la planta.
- 3) Plantear las ecuaciones que permitan, a partir de los datos anteriores, calcular la densidad de plantación, que vendrá determinada en gran medida por la relación entre el área de impluvio y el área de recepción.

Este trabajo se centra en las repoblaciones forestales, y lo hace utilizando como patrones algunas técnicas de cosechas de agua desarrolladas tradicionalmente en puntos concretos del planeta situados en zonas muy castigadas por el clima (con escasísimas precipitaciones) y por ello muy empobrecidas. El desierto de Negev (Israel), Afganistán, muchos países africanos (Burkina Faso y Níger, entre otros) o desiertos de América del Sur, han servido como enormes campos experimentales que han aportado a este trabajo innumerable y valiosísima información.

Por ello, los avances tecnológicos que se hayan podido alcanzar con esta Tesis Doctoral, por modestos que sean, deben volver a sus lugares de origen; ya no tanto para la repoblación forestal (aunque muy útil también en estos países para evitar la degradación de las tierras y para producir combustible y forraje leñoso) sino también para el establecimiento de cultivos agrícolas de subsistencia que contribuyan a paliar la lacra inmoral del hambre en el mundo.

Organismos internacionales como la FAO, con abundantes publicaciones al respecto –muchas de ellas pueden consultarse en FAO (1998)- y un importante número de proyectos, están contribuyendo a la innovación y al desarrollo de nuevas técnicas recolectoras de agua en el denominado Tercer Mundo. Y los resultados son esperanzadores, como ocurre por ejemplo en la aldea de Ranawa (Burkina Faso), en donde mediante la creación de caballones de piedra según curvas de nivel se ha conseguido recoger agua para producir cosechas aceptables, al tiempo que se reduce la pérdida de fertilidad del suelo por erosión hídrica¹.

En esta línea habrá que seguir trabajando. Es de justicia.

¹ Lange, K.E.; 2003. El desierto retrocede. *National Geographic*, vol. 13, núm. 11.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA GENERAL

2.1. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Debido a la heterogeneidad de los temas a tratar para el cumplimiento de los objetivos del presente estudio, la revisión bibliográfica se ha dividido en dos niveles. En primer lugar se ha realizado una revisión general, en la que se exponen los principales pilares sobre los que se asienta este trabajo: situación de las zonas áridas y semiáridas, repoblación forestal en estas zonas, cosechas de agua y modelo hidrológico MODIPÉ. En segundo lugar, dentro de cada apartado de este trabajo se han revisado los conocimientos técnicos y científicos sobre cada temática concreta.

La revisión bibliográfica se ha realizado de la siguiente manera:

a) Búsqueda en bibliotecas.- La búsqueda se ha centrado en la biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid) y en la biblioteca de la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología Forestal, cuya base de datos está integrada en la anterior.

Las palabras clave introducidas han sido: Cosechas de agua, repoblación forestal, desertificación, desertización, zonas áridas y semiáridas, y sus correspondientes traducciones en inglés.

Se ha hecho un repaso, así mismo, de los artículos sobre técnicas y métodos de repoblación forestal en España aparecidos en la revista *Montes* (entre 1945 y 2003), utilizando para tal fin la colección depositada en la biblioteca de la Universidad Católica de Ávila, y en la *Revista Forestal Española* (entre 1991 y 2003).

b) Bases de datos.- Fueron consultadas en enero de 1998 las bases de datos AGRICOLA, CAB Abstracts, Pascal, AGRIS, FLUIDEX y Dissertation Abstracts Online, utilizando las siguientes palabras clave: *Water harvesting, runoff farming, microcatchment, contour catchment, forest terrace y curve number method*.

c) Búsqueda en *Internet*.- La búsqueda se ha centrado en el buscador generalista “Google” (www.google.com), en el buscador forestal español “Bibliofor Revistas y Actas” (www.grn.es/bibliofor) y en “Sciedirect” (www.sciencedirect.com), que agrupa a numerosas publicaciones científicas internacionales.

Las palabras clave empleadas en los tres casos han sido: Cosechas de agua, repoblación forestal, desertificación, zonas áridas y semiáridas, y sus correspondencias en inglés. Se ha practicado también una búsqueda por autor, introduciendo nombres de expertos de relevancia tales como Critchley, Siegert y Boers.

2.2. LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

Las zonas áridas –en las que este trabajo tiene principal aplicación- son uno de los territorios más extensos del mundo. Aproximadamente un tercio de la superficie terrestre está incluido bajo esta condición. En estas regiones el agua llega a ser causa de conflictos políticos de calibre internacional, y su manejo constituye un tema de importancia estratégica (Porta *et al.*, 1999). La agricultura en estas zonas es, lógicamente, muy limitada en la mayoría de los casos. A la falta de productividad por la escasez de precipitaciones, hay que añadir problemas ambientales muy graves como la salinización de los suelos por cultivos intensivos, sobrepastoreo e incendios, entre otros (Martín de Santa Olalla, 2001).

2.2.1. Criterios de delimitación de zonas áridas

Existen diferentes relaciones numéricas entre elementos del clima, para expresar de forma cuantitativa su influencia sobre los vegetales, que se denominan índices fitoclimáticos. Los de uso más generalizado son los que citan Porta *et al.* (1999) y Elías & Castellví (2001), y se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Índices fitoclimáticos habituales usados para la delimitación de las zonas áridas, según Porta *et al.* (1999), Elías & Castellví (2001) y FAO (1989)

ÍNDICE	DELIMITACIÓN DE ZONAS ÁRIDAS
Índice de Lang $I = \frac{P}{T}$ <p><i>P</i> = Precipitación anual media <i>T</i> = Temperatura media anual</p>	0-20 Desértico 20-40 Zona árida 40-60 Zona húmeda de estepa o sabana
Índice de Martonne $I = \frac{P}{T + 10}$ <p><i>P</i> = Precipitación anual media <i>T</i> = Temperatura media anual</p>	0-5 Desértico 5-10 Semidesértico 10-20 Estepas y países secos mediterráneos 20-30 Región de olivo y cereales
Índice de aridez FAO (1989) $I = \frac{P}{ETP}$ <p><i>P</i> = Precipitación anual media <i>ETP</i> = Evapotranspiración potencial anual</p>	< 0,03 Clima hiperárido 0,03-0,20 Clima árido 0,20-0,50 Clima semiárido. 0,50-0,75 Clima subhúmedo

Tabla 2.1. (Continuación) Índices fitoclimáticos habituales usados para la delimitación de las zonas áridas, según Porta *et al.* (1999), Elías & Castellví (2001) y FAO (1989)

ÍNDICE	DELIMITACIÓN DE ZONAS ÁRIDAS
Índice de Meyer $I = \frac{P}{DSA}$ $DSA = \frac{100 - H}{100} \cdot T$ <p> P = Precipitación anual media DSA = Déficit de saturación absoluta H = Humedad relativa media % T = Tensión máxima de vapor de agua correspondiente a la temperatura media </p>	0-100 Aridez, desiertos, estepas 100-275 Semiárido
Índice de Dantín-Revenga $I = \frac{T}{P} \cdot 100$ <p> P = Precipitación anual media T = Temperatura media anual </p>	>6 Subdesértico 3-6 Árido 2-3 Semiárido
Índice de Emberger $I = \frac{P}{M^2 - m^2} \cdot 100$ <p> P = Precipitación anual media M = Temperatura media de las máximas del mes más cálido m = Temperatura media de las mínimas del mes más frío </p>	

Por otra parte, existen clasificaciones climáticas que se utilizan para delimitar las zonas áridas. Las más importantes son:

- **Clasificación de Thornthwaite:**

- Clima árido $-60 < I_h < -40$
- Clima semiárido $-40 < I_h < -20$
- Clima seco-subhúmedo $-20 < I_h < 0$

Siendo I_h el índice de humedad:

$$I_h = \frac{100 \cdot \sum s - 100 \cdot \sum d}{\sum ETP}$$

$\sum s$ = Suma de los superávits mensuales

$\sum d$ = Suma de los déficits mensuales

$\sum ETP$ = Suma de las evapotranspiraciones potenciales mensuales

(Todo ello calculado a partir del balance hídrico de Thornthwaite y Matter)

- **Clasificación de Köppen:**

- | | | |
|----------------------|------------------------------------|-----------------|
| • Desierto | Lluvias en invierno | $P \leq T$ |
| | Lluvias uniformemente distribuidas | $P \leq T + 7$ |
| | Lluvias en verano | $P \leq T + 14$ |
| • Estepa (semiárido) | Lluvias en invierno | $P > T$ |
| | Lluvias uniformemente distribuidas | $P > T + 7$ |
| | Lluvias en verano | $P > T + 14$ |

Siendo:

P = Precipitación anual media (mm)

T = Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)

- **Clasificación bioclimática de la FAO:**

- Clima desértico $d > 300$
- Clima subdesértico acentuado $250 < d < 300$
- Clima subdesértico atenuado $200 < d < 200$
- Clima xeromediterráneo $150 < d < 200$

Siendo d el índice xerotérmico (número de días secos según el diagrama ombrotérmico).

- Clasificación de Allué (1990):

Los principales tipos fitoclimáticos se muestran en la tabla 2.2a.

Tabla 2.2a. Climas áridos, semiáridos o subhúmedos secos, según la taxonomía fitoclimática de Allué (1990)

SÍMBOLO	CLIMA	<i>T_m</i>	<i>a</i>	<i>T_f</i>	HELADAS	<i>P</i>
III(IV)	Sahariano submediterráneo	>-7	≥11	-	-	<200
IV(III)	Mediterráneo subsahariano	>0	3-11	>9,5	Sólo probables	≤450
IV ₁	Mediterráneo genuino estépico	>0	3-11	5-9,5	Sólo probables	≤450
IV ₂	Mediterráneo genuino extraílico-ílico	>0	3-11	>9,5	Sólo probables	>450
IV ₃	Mediterráneo genuino ílico típico más seco	>0	3-11	5-9,5	Sólo probables	400-500
IV ₄	Mediterráneo genuino ílico típico menos seco	>0	3-11	5-9,5	Sólo probables	>500
IV(VI)	Mediterráneo subnemoral meseteño	>-7 y ≤0	3-11	2-5	Seguras	-
IV(VII)	Mediterráneo subestepario	>-7 y ≤0	3-11	≤2	Seguras	-

T_m = Temperatura media de las mínimas del mes más frío; *a* = Periodo seco en meses según Gaussen; *T_f* = Temperatura media del mes más frío; *P* = Precipitación media anual.

La correspondencia de los tipos fitoclimáticos con grupos de asociaciones vegetales climáticas es la que se expone en la tabla 2.2b.

Tabla 2.2b. Grupos de asociaciones vegetales climáticas, por orden de frecuencia; según Allué (1990)

CLIMA	GRUPOS DE ASOCIACIONES CLIMÁCICAS
III(IV)	Espinares de azufaifo, cornicales, lentscales.
IV(III)	Lentiscares, espinares de azufaifo, cornicales, coscojares.
IV ₁	Coscojares, acebuchales, lentscales, encinares, alsinares.
IV ₂	Acebuchales, encinares, alsinares, lentscales, coscojares.
IV ₃	Encinares, coscojares, acebuchales, quejigares, melojares, alsinares, lentscales
IV ₄	Encinares, coscojares, acebuchales, quejigares, melojares, alsinares, lentscales
IV(VI)	Encinares, coscojares, acebuchales, quejigares, melojares, alsinares, lentscales
IV(VII)	(Vegetación no descrita por el autor)

2.2.2. Distribución mundial de las zonas áridas

Las zonas áridas de la Tierra aparecen localizadas entre los 20° y los 40° de latitud de los dos hemisferios, debido a que son regiones que reciben corrientes de aire descendentes totalmente deshidratadas (Velasco-Molina, 1991). Pero, independientemente de que una región esté situada en esta franja, existen dos mecanismos que pueden provocar en ella unas condiciones de escasa precipitación:

- La influencia de cordilleras costeras y perpendiculares a la dirección de los vientos marinos húmedos dominantes.
- La penetración a los continentes de vientos fríos y deshidratados procedentes de aguas oceánicas de baja temperatura.

Para delimitar con claridad la distribución en el mundo de las regiones áridas, la UNESCO (1977) (citado por Porta *et al.*, 1999) ha confeccionado un mapa mundial de zonas áridas, cuyos resultados aparecen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Superficie mundial bajo clima subhúmedo, semiárido, árido y extremadamente árido; modificado de Porta *et al.* (1999)

HOMOCLIMAS	PRECIPITACIÓN ANUAL MEDIA (mm)	POTENCIALIDAD AGRÍCOLA	% SUPERFICIE MUNDIAL
Subhúmedo	> 500	Apto para cultivos	
Semiárido	200 a 500	Apto sólo para algunos cultivos y pastos naturales	13,3
Árido, desierto, sabana	25 a 200	No apto para cultivos	13,7
Extremadamente árido, desierto	< 25	Totalmente inapto para el cultivo	5,8

En sentido amplio puede decirse que las regiones áridas forman una banda continua, desde el norte de África al suroeste asiático, están representadas en el oeste de Estados Unidos, en la parte interior de Australia y en América del Sur (en una franja de norte a sur desde Colombia hasta Chile y Argentina). En la tabla 2.4 se muestra la evaluación realizada por Heatchcote (1983) (citado por Porta *et al.*, 1999) sobre la distribución de las zonas áridas a nivel global.

Tabla 2.4. Superficie ocupada por las zonas áridas en cada continente y en España; según Heatchcote (1983) (citado por Porta *et al.*, 1999)

CONTINENTE/PAÍS	SUPERFICIE (%)
África	37
Asia	34
Australia	13
América del Norte	8
América del Sur	6
España	2

Para precisar en la terminología, se pueden definir:

- Zonas de desierto.- Son aquellas que, observadas en fotografía aérea, muestran una vegetación escasa y dispersa (Porta *et al.*, 1999). Desde un punto de vista climático, Smith & Smith (2001) las definen como tierras en las que la evaporación excede a la precipitación. Si se presta atención exclusivamente a las precipitaciones, Porta *et al.* (1999) indican que la precipitación anual que se produce en estas zonas es inferior a 200 mm, mientras que para Le Houérou (1976) (citado por Porta *et al.*, 1999) estaría por debajo de 100 mm y para Meigs (1953) (citado por Porta *et al.*, 1999) sería menor de 25 mm. En cualquier caso, su origen es esencialmente climático.

En África se distinguen los *regs* o pavimentos de desierto, las *hamadas* o desiertos de piedra y los *ergs* o desiertos de arena, a los que hay que añadir los desiertos de montaña. Como ejemplos pueden mencionarse la región Saharo-Arábiga, con una precipitación menor de 100 mm, o la zona de El Cairo, donde caen menos de 28 mm al año.

- Zonas áridas.- Se caracterizan por una falta acentuada de agua para los seres vivos, lluvias escasas y extremadamente irregulares espacial y temporalmente. Además, estas precipitaciones suelen ser de tipo torrencial, con elevadas intensidades y corta duración, por lo que se producen pérdidas importantes de agua de lluvia por escorrentía superficial. Para Le Houérou (1976) estas zonas se sitúan entre las isoyetas de 100 y 400 mm, mientras que para Meigs (1953) en ellas llueve entre 25 y 200 mm al año.

La agricultura de secano no es posible en las zonas áridas, a menos que los suelos, por la posición topográfica que ocupen, puedan recibir un suplemento de agua procedente de escorrentía superficial. Esto es lo que ocurre en los *oueds* o fondos de valle con cursos temporales de agua. Sí que pueden existir pastos, si la aridez no es extrema.

Ejemplos de estas zonas se encuentran en la estepa norteafricana, en la región del Sahel (al sur del desierto del Sáhara), en el sureste almeriense y en la parte central del Valle del Ebro.

López Bermúdez *et al.* (1989) afirman que, debido a las especiales condiciones climáticas, los ecosistemas de las zonas áridas son especialmente frágiles y vulnerables por las actuaciones humanas.

- Zonas semiáridas.- Corresponden a medios en los que es posible una agricultura de secano (cereales, olivo, almendro, etc.), aunque con riesgo para las cosechas por fenómenos periódicos de sequía. Permiten una cubierta vegetal continua de bosque, matorral y herbáceas. Para Le Houérou (1976) los límites de precipitación anual están situados en 400-600 mm, mientras que Meigs (1953) los sitúa entre 200 y 500 mm.

2.2.3. Distribución de las zonas áridas en España

Las zonas de mayor aridez en España, límite con el desierto o de desierto, se sitúan en el archipiélago canario, más concretamente en las islas de Lanzarote y Fuerteventura. En la Península corresponden a la banda árida y moderadamente árida (Almería-Cartagena y parte central del Valle del Ebro), con extensas áreas adyacentes bajo condiciones semiáridas (véase la figura 2.1).

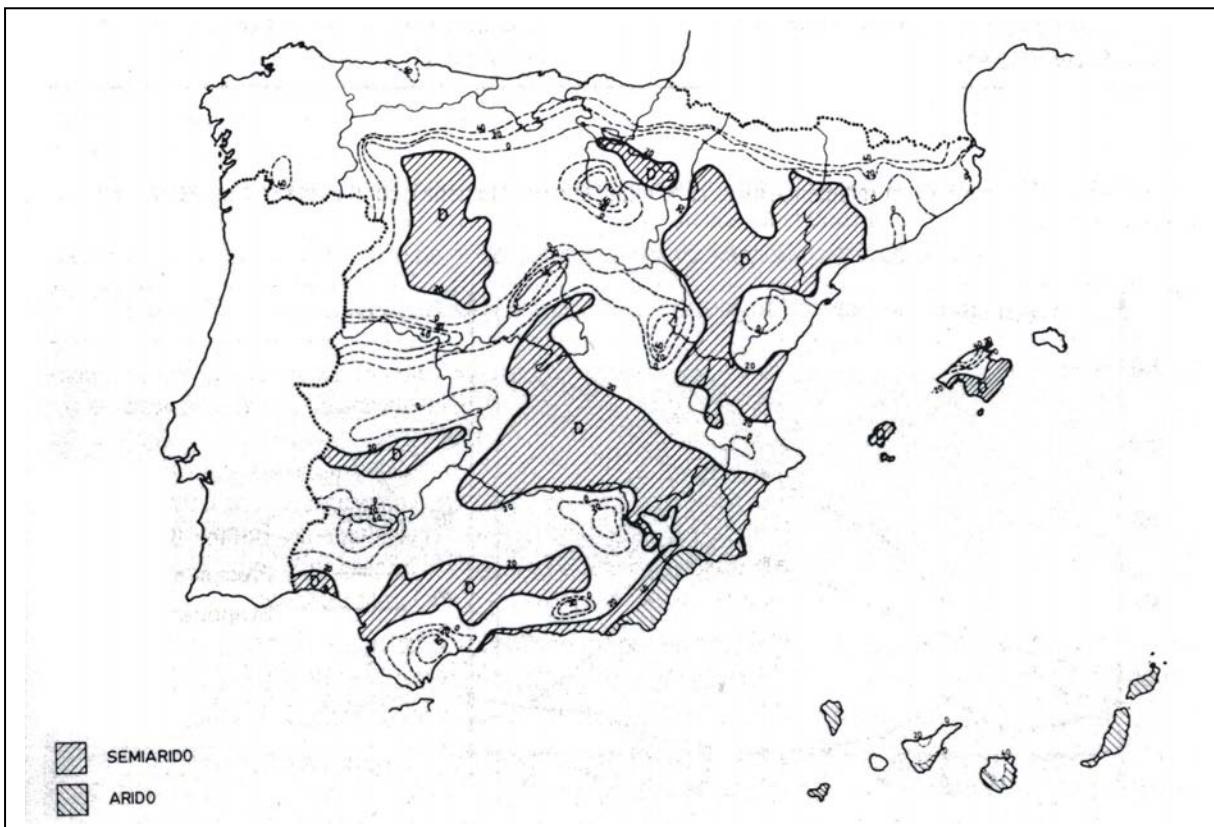


Figura 2.1. Mapa de las zonas áridas y semiáridas de la Península Ibérica, según Elías (1978) citado por Porta *et al.* (1999)

2.2.4. Degradación del territorio en zonas áridas. Desertificación

La aridez se corresponde con una falta de agua disponible para los seres vivos, que se debe a factores meteorológicos ligados a una zona geográfica concreta y tiene un carácter permanente. La sequía también es una falta de agua, pero es temporal e inesperada, frente a unas expectativas de suministro consideradas habituales en una zona determinada (Porta *et al.*, 1999).

Unas condiciones generalizadas de aridez favorecen la degradación del territorio, por el desarrollo de mecanismos de desertificación. La desertificación puede definirse como un proceso complejo que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales, en el contexto específico de condiciones climáticas áridas,

semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de variaciones climáticas y actuaciones humanas adversas (UNCCD, 1994).

Este concepto de desertificación fue introducido por Aubreville (1949), aunque ha sido desde entonces controvertido y mal utilizado o, cuando menos, su significado no ha cristalizado de manera precisa ni siquiera a nivel técnico (Puigdefábregas, 1995). En español es equivalente al de desertización, que según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua es la “acción y efecto de desertizar”. Desertizar, por su parte, significa “convertir en desierto, por distintas causas, tierras, vegas, etc.”. No obstante, y aunque en este trabajo se emplearán indistintamente ambas palabras, algunos autores, como García Camarero (1989), estiman que existe una diferencia entre desertificación y desertización, que consiste en que esta última está causada exclusivamente por agentes naturales.

Pero volviendo a los sustantivos, la desertificación es un conjunto de procesos o la manifestación de fenómenos implicados en el empobrecimiento y degradación de los ecosistemas terrestres por impacto humano. No es un problema meteorológico o ambiental aislado (como puede ser la sequía o la desaparición de una especie vegetal) en un territorio más o menos extenso, sino, como argumenta López Bermúdez (2001), es una patología surgida de la ruptura del equilibrio entre el sistema de producción de los geoecosistemas naturales y el sistema de explotación humana.

Las principales consecuencias ambientales de la desertificación son, entre otras, las siguientes (López Bermúdez, 2001):

- Alteración del sistema atmósfera-suelo-planta.
- Perturbación en la regulación del ciclo hidrológico.
- Cambios y deterioro de la biodiversidad terrestre.
- Reducción de la biomasa y degradación de la cubierta vegetal. Deterioro del patrimonio forestal, resultando el bosque sustituido por formaciones secundarias de arbustos y matorral, cada vez más abiertas, que pueden dejar de existir. Modificación de la composición florística, favoreciendo a especies típicas de suelos degradados.
- Deterioro e incluso pérdida de la estabilidad estructural del suelo y formación de compactaciones y costras. Disminución de la porosidad, capacidad de infiltración y contenido de humedad del suelo, a la vez que se incrementan las escorrentías superficiales y su poder erosivo.
- Degradación biológica del suelo: pérdida de nutrientes en calidad y cantidad.
- Aceleración de la erosión eólica e hídrica. Decapitación de los horizontes superiores, con acumulaciones de sedimentos en las partes bajas y afloramiento en superficie del material parental.
- Pérdida de la base de sustentación de las raíces de las plantas.

- Proliferación de incisiones en el terreno (surcos, cárcavas, etc.), movimiento en masa en laderas, hundimientos y generalización de la morfología abarrancada (malpaíses, lo que en la bibliografía anglosajona se denomina *bad-lands*).
- Salinización de las áreas irrigadas con aguas de mala calidad.
- Acidificación del suelo.
- Cambios en el microclima del suelo (aumento de la temperatura y de la evaporación, entre otros).
- Degradación de los recursos hídricos e incremento de la variabilidad en el régimen de los cursos de agua. Reducción del agua disponible por el deterioro de los flujos hídricos y la sobreexplotación de acuíferos. Degradación y desaparición de humedales y manantiales.

2.2.5. La desertización en España. El proyecto LUCDEME y el PAND

Según la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, las zonas susceptibles de sufrir desertificación son las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, es decir, aquellas áreas en las que la proporción entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,05 y 0,65 (MIMAM, 2001). Así, amplias zonas de la geografía española se pueden ver afectadas por este proceso (véase la figura 2.1). Dos terceras partes del territorio nacional se encuentran incluidas dentro de las categorías de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas: además de la mitad sur, está la meseta norte, el valle del Ebro y la costa catalana (MIMAM, 2001).

Si se analizan los Mapas de Estados Erosivos elaborados por el ICONA, puede llegar a la conclusión de que en cerca del 48 % del territorio nacional -unos 22 millones de hectáreas- la intensidad del proceso de erosión supera los límites tolerables. Las zonas más afectadas por las pérdidas de suelo son las cuencas hidrográficas del Sur, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro (López Bermúdez, 2001).

El ambicioso Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME) nace a raíz de la Conferencia de Nairobi de 1977, pero se pone plenamente en marcha en 1981 (Rojo, 1998). Su finalidad se puede sintetizar en conseguir el control de la desertificación en el área mediterránea (Carrera, 1989). Aunque el área englobada dentro del proyecto fuera toda la cuenca mediterránea española, en una primera fase se seleccionaron las provincias de Murcia, Almería y Granada, por ser las más afectadas por procesos de desertificación. Los principales objetivos del Proyecto LUCDEME son:

1) Análisis de los distintos recursos y factores implicados en los procesos de desertificación.

2) Determinación de los sistemas y técnicas aplicables para la lucha contra la desertificación. Planificación integrada de las acciones de ordenación y restauración de cuencas torrenciales.

3) Formación, capacitación y extensión sobre la temática del proyecto.

En el año 2001 se inicia la redacción del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), cuyo objetivo fundamental es contribuir al desarrollo sostenible de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas del territorio nacional y, en particular, la prevención o la reducción de la degradación de las tierras, la rehabilitación de tierras parcialmente degradadas y la recuperación de tierras desertificadas (MIMAM, 2001).

Según el PAND, todos los países del entorno mediterráneo, incluida España, presentan como principales características la fragilidad de sus ecosistemas y la prolongada explotación a que han sido sometidos por el hombre. Dentro de los factores naturales que inciden en el fenómeno, hay tres que presentan condiciones especialmente desfavorables en nuestro país: el relieve, las precipitaciones y la cubierta vegetal (MIMAM, 2001). Además existen causas importantes de degradación, que son la aridez, la sequía, la erosión, los incendios forestales y la degradación de suelos vinculada al uso no sostenible de los recursos hídricos (MIMAM, 2001).

2.3. LAS COSECHAS DE AGUA

El concepto de cosecha de agua (*water harvesting* en la bibliografía anglosajona) puede definirse como un método para inducir, recoger, almacenar y conservar escorrentía local y superficial para la agricultura en zonas áridas y semiáridas (Boers & Ben-Asher, 1982). Aunque esta definición se circunscriba al ámbito agrícola, los objetivos de la recolección de agua pueden ampliarse al uso doméstico, ganadero y forestal. De esta forma, más modernamente, Critchley & Siegert (1991) definen cosecha de agua como la recolección de escorrentía para su uso productivo.

Todos los métodos de cosechas de agua tienen en común tres características:

- 1) Se aplican en zonas áridas y semiáridas, donde la escorrentía tiene un carácter intermitente.
- 2) Aprovechan aguas de origen local, como es el caso de la escorrentía superficial producida en un área cercana y pequeña.
- 3) Son operaciones a pequeña escala, tanto por el tamaño del área de captación como por el volumen de almacenamiento.

Un sistema de recolección de agua consiste básicamente en dos partes (véase la figura 2.2):

- Área de impluvio (de captación o productora).- Zona en la que se induce y genera escorrentía superficial.

- Área de recepción (o colectora).- Donde se recogen y almacenan los aportes hídricos del área de impluvio.

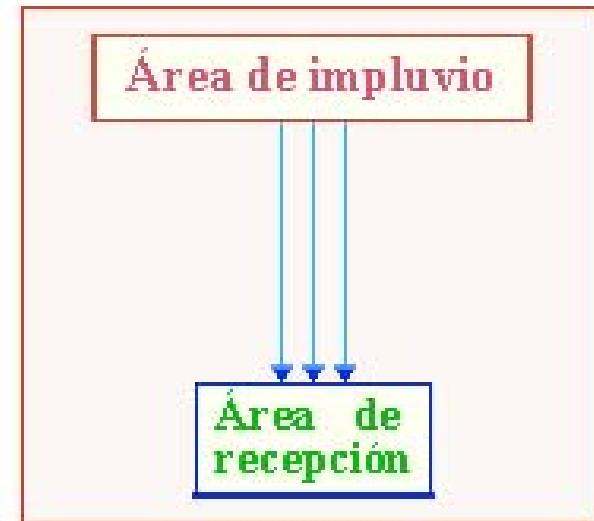


Figura 2.2. Principio de la recolección de agua

Existen numerosas técnicas de cosechas de agua que se utilizan actualmente en zonas áridas y semiáridas de todo el mundo. Critchley & Siegert (1991), y más recientemente la FAO (1994), recogen y describen muchas de ellas, haciéndose una revisión de las mismas en el anexo I de este trabajo.

A mediados de los años setenta del siglo pasado, aparece el primer modelo de simulación para una técnica de cultivo que aprovecha la escorrentía superficial (Morin & Matlock, 1975). Desde entonces se han desarrollado nuevos modelos que pueden ser de gran ayuda para comprender y diseñar sistemas de recolección de agua (Villanueva *et al.*, 1987; Giráldez *et al.*, 1988; Hari-Krishna, 1989; Cadot, 1989; Boers, 1994; Martínez de Azagra, 1995b), aunque la mayor parte de ellos están destinados a los cultivos agrícolas y son, excepto el último, de dudosa aplicación en el ámbito forestal.

Las técnicas de cosecha de agua pueden aplicarse a la repoblación forestal de zonas áridas y semiáridas. En ellas, donde las precipitaciones son insuficientes para asegurar la supervivencia y el desarrollo de los briznales, estas labores aprovechan la escorrentía ofreciendo a los vegetales una cantidad suplementaria de agua. En la tabla 2.5 se resumen algunos casos de utilización de las técnicas de recolección de agua para el cultivo de árboles frutales y para repoblación forestal.

Las cosechas de agua suponen -además- una recolección de tierra y de nutrientes. El área de recepción se ve favorecida por tres motivos diferentes que se ayudan entre sí: más agua, más suelo y más nutrientes.

Tabla 2.5. Utilización forestal de algunas técnicas de cosechas de agua (elaboración propia a partir de Prinz, 2001)

TÉCNICA DE COSECHA DE AGUA	APLICACIÓN EN REFORESTACIÓN
Caballones según curvas de nivel <i>Contour bunds/Contour ridges</i>	En el Lago Baringo (Kenia) se utiliza en reforestación con árboles
Caballones triangulares y semicirculares <i>Semi-circular and triangular bunds</i>	Ampliamente utilizado para el establecimiento de árboles. Por ejemplo, almendros, albaricoqueros, melocotoneros, pistachos, olivos, granados y arbustos para hacer ramón (este último por ejemplo en el noroeste de Siria)
Terrazas de ceja o terrazas de plataforma <i>Eyebrow terraces</i>	Para aportar agua a árboles y arbustos de forma individual. Por ejemplo, así se han plantado miles de olivos en Túnez
Microcuenca <i>Negarim</i> <i>Negarim microcatchments</i>	En Oriente Medio se utilizan en la plantación de frutales (albaricoqueros, olivos, almendros, vides, granados y pistachos), y también de árboles y arbustos para ramoneo
<i>Meskat</i>	Empleada para cultivos arbóreos en Túnez desde tiempo inmemorial, con una extensión actual de unas 300.000 ha
Terrazas sobre curvas de nivel <i>Contour bench terraces</i>	Utilizadas en cultivos arbóreos en Túnez, Camerún, Sudán, Etiopía, Nigeria, y otros países subsaharianos
Microcuenca tipo "Vallerani" <i>Vallerani-type microcatchments</i>	Realizadas mediante un arado especial, han sido utilizadas en repoblación forestal en el Mediterráneo y en países africanos (Níger)
Microcuenca de ladera <i>Hillslope microcatchments</i>	Sirven para aportar agua de forma individual a árboles y arbustos. Por ejemplo, se han empleado en reforestación en el desierto Negev (Israel)
<i>Jessour</i>	Utilizado en plantaciones de almendros, olivos, palmeras y otros árboles en Túnez

2.4. LA REPOBLACIÓN FORESTAL DE ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS EN ESPAÑA

La lucha contra la erosión y la desertización es desde hace mucho tiempo un objetivo esencial de la sociedad española. Para lograrlo puede comprobarse que los bosques juegan un importante papel, ya que actúan como enormes colchones que sostienen el suelo y tampones muy esponjosos que regulan eficazmente el régimen hidrológico (Del Cerro & Briongos, 2001). Por esta razón se idearon las técnicas de forestación que se han empleado en la recuperación de cubiertas forestales arbóreas (reforestación) y en la repoblación forestal (establecimiento artificial de bosques en terrenos que desde por lo menos 50 años no han sostenido bosques).

La especial preocupación que para los forestales españoles ha supuesto siempre la repoblación de zonas áridas y semiáridas, cuya dificultad requería el desarrollo de nuevas técnicas que aprovecharan las aguas de escorrentía producidas por los aguaceros típicos de estas zonas -escasos en número pero abundantes en volumen precipitado-. Antes de que Giráldez *et al.* (1988) introdujeron en el vocabulario forestal español el término "recolección de escorrentía" (que arraigó con fuerza, por cierto, con numerosas publicaciones: De Simón *et al.* (1989); Fernández Yuste (1989); Martínez de Azagra (1995b), etc.), existían ya varias obras ingenieriles que dan testimonio de la utilización de esta técnica. Así por ejemplo, están las primeras repoblaciones realizadas en las Sierras de Espuña y Ricote a partir de 1891 mediante diques de

reconstitución (Montiel, 1955) o la restauración forestal de las ramblas del río Jiloca (García Cañada, 1924).

En 1901 se constituyeron las Divisiones Hidrológico-Forestales, que fueron los organismos que se encargaron de ejecutar las primeras grandes repoblaciones. Aunque la superficie total repoblada por estas divisiones no fue demasiado extensa, su labor puede calificarse de ejemplar, en lo que se refiere a la protección y defensa contra la erosión. Sirvan como ejemplos los trabajos realizados en las cuencas del Guadalmedina y Guadalhorce (Málaga), Andaras (Almería) y Motril y Guadalefo (Granada).

En 1940 se creó el Patrimonio Forestal del Estado (PFE), organismo que puso en marcha un ambicioso plan de repoblación forestal. Desde este momento y hasta 1945, las técnicas empleadas fueron similares a las comentadas anteriormente (García Salmerón, 1995). Sin embargo, la organización en 1945 del PFE en Brigadas, como equipo técnico y funcional, casi siempre de ámbito provincial, supuso una cierta especialización del personal técnico que generó a su vez un propósito de mejora en las actuaciones. De esta manera comenzó un intento de mecanización de las labores, entre otras razones debido al escaso éxito de los desbroces y ahoyados manuales, sólo limitado por la precaria situación económica del país después del periodo bélico.

Las labores manuales dieron variados resultados según la localización de las repoblaciones. Así, en zonas secas estos procedimientos fueron en general insatisfactorios, debido al escaso volumen de suelo mullido y, consecuentemente, a la escasa mejora en las propiedades hidrológicas del suelo; en estos casos se intentó contrarrestar el elevado porcentaje de marras mediante la utilización de planta cultivada en envase (García Salmerón, 1995). En las zonas húmedas del norte de España, los resultados fueron más satisfactorios, y se intentó economizar mediante la eliminación de matorral de forma simultánea a la plantación.

A partir de 1953 se entró en un periodo de mecanización incipiente (García Salmerón, 1995). En esta etapa se mantuvo un importante intercambio de información entre técnicos de diferentes provincias, culminando en 1962 con la organización de la II Asamblea Técnica Forestal en la que la mecanización de los trabajos ocupó un elevado número de ponencias (García Salmerón, 1995).

Los métodos utilizados se modificaron considerablemente, apareciendo al principio la tracción animal con bueyes y al final la tracción mecánica pesada. En las zonas abruptas se generalizó la formación de banquetas mediante tracción animal. Y también surgió en esta época la plantación mecanizada.

Desde 1967 y hasta nuestros días, la mecanización ha sido preponderante. Se extendió en un primer momento la ejecución de aterrazados en vastas superficies, mediante maquinaria pesada de obras públicas (tractores de orugas) poco adaptada al trabajo en el medio natural, que han sido duramente criticados desde diversos sectores sociales, debido a los fuertes impactos paisajísticos que producen.

La labor repobladora en el siglo XX ha sido eficaz y ha contribuido a paliar los graves problemas de erosión y desertización del territorio español, aunque se cometieran algunos errores. Sin embargo, ha sido criticada y desprestigiada por

determinados grupos sociales, argumentando una excesiva monoespecificidad de las masas creadas (criticándose además la elección de especies de pinos) y la utilización de técnicas muy impactantes como las terrazas. En los últimos años las diferentes administraciones autonómicas han trabajado en estos dos sentidos, fomentando repoblaciones más variadas en cuanto a especies y mediante técnicas con menor impacto negativo (Mongil, 2002).

Conviene significar que la mayor parte de los métodos de preparación del suelo empleados en el sector forestal español persiguen obtener cosechas de agua con las que invertir procesos de desertificación por aridez edáfica (Martínez de Azagra, 1996). Al aumentar la infiltración en la ladera se favorece la instalación de una vegetación más tupida, especialmente en climas áridos. En la figura 2.3 se muestra un esquema que explica el proceso con bastante claridad.

Oasificación, un neologismo propuesto por Martínez de Azagra (2000) y Martínez de Azagra & Mongil (2001), trata de aclarar la cuestión. Es el antónimo de desertificación por aridez edáfica. Mediante una correcta preparación del suelo e introduciendo las especies vegetales adecuadas, se puede densificar y lignificar la cubierta vegetal, o lo que es lo mismo, se puede revertir el proceso de degradación hídrica, edáfica y botánica que padece una ladera. Pero para ello hay que acudir a sistemas de recolección de agua, es decir: hay que aprovechar la propia degradación de la ladera para acumular el agua de escorrentía en los puntos de repoblación mediante microembalses (alcorques) convenientemente dimensionados.

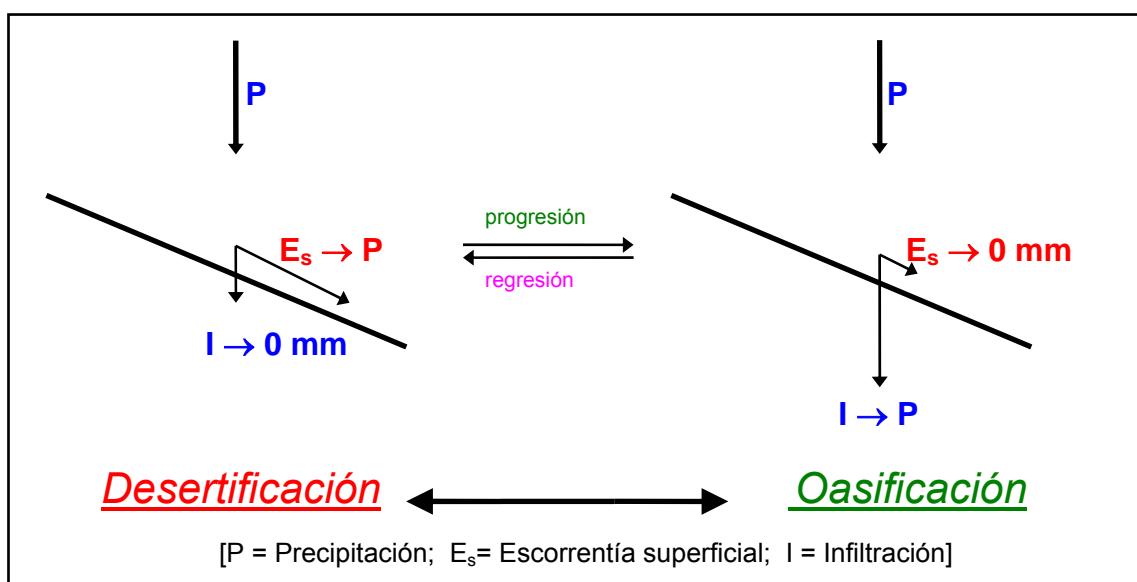


Figura 2.3. *Oasificación* contra desertificación (Martínez de Azagra & Mongil, 2001)

Pero la *oasificación* no es solamente la recogida de agua, puesto que incluye también la captación de suelo (materia orgánica, partículas minerales, nutrientes) (Martínez de Azagra *et al.*, 2004). De forma natural, en las laderas áridas y semiáridas existen unas zonas que debido a sus características geomorfológicas (forma y pendiente) o a los sumideros que contienen (matas de vegetación, por ejemplo, en un

determinado número, tamaño y distribución), funcionan capturando, concentrando y conservando el agua y el suelo (Ludwig *et al.*, 1997; Tongway, 2003; Puigdefábregas, 2003). De esta manera, los lugares que actúan como sumideros se ven beneficiados por una mayor cantidad de agua y nutrientes. Es lo que Ludwig *et al.* (1997) denominan “Robin Hood a la inversa”, es decir: se roba agua y nutrientes a las zonas pobres para entregárselos a las zonas ricas en estos elementos. En las zonas beneficiarias puede desarrollarse una vegetación cada vez más evolucionada, puesto que existen mejores condiciones hídricas y edáficas. Imitando a la naturaleza, si se crean de forma artificial trampas que recojan agua y suelo, se contribuirá a la restauración ecológica las laderas degradadas.

En el anexo II se describen los métodos de preparación del suelo utilizados actualmente en el sector forestal para hacer repoblaciones. Se presta especial atención a los efectos hidrológicos y de recolección de agua que pueden estar propiciando.

2.5. EL MODELO HIDROLÓGICO MODIPÉ

2.5.1. Introducción

El modelo hidrológico MODIPÉ (acrónimo de “modificación de precipitaciones”), desarrollado por Martínez de Azagra (1995a, 1995b), puede resultar muy útil para el correcto diagnóstico de muchos procesos de desertización y para una acertada toma de decisiones a la hora de restaurar laderas degradadas. En este sentido, sirve para:

- 1) Caracterizar microclimas de ladera
- 2) Comprender los procesos de desertificación por aridez edáfica
- 3) Simular el comportamiento hidrológico de cualquier unidad sistematizada
- 4) Evaluar el efecto hídrico que tienen los distintos procedimientos de preparación del suelo en repoblaciones forestales.
- 5) Diseñar trampas de agua con las que incrementar la infiltración y así facilitar el arraigo y primer crecimiento del repoblado en climas mediterráneos
- 6) Calcular el volumen mínimo de tierras a remover en una ladera degradada para propiciar su “oasificación” (Martínez de Azagra, 2000; Martínez de Azagra & Mongil, 2001; Martínez de Azagra *et al.*, 2004). Es decir, para invertir el proceso de desertificación mediante la instalación de una vegetación leñosa.

El balance hídrico local que propone este modelo (figura 2.4) contrasta con otros balances que poco tienen que ver con el objetivo de cuantificar el agua que llega a la planta en una repoblación forestal. Para poder conocer las disponibilidades hídricas en un punto, entendidas estas como el agua infiltrada en el suelo, el modelo establece el siguiente balance:

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

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

E_{s2} = Agua que escapa del lugar por escorrentía superficial.

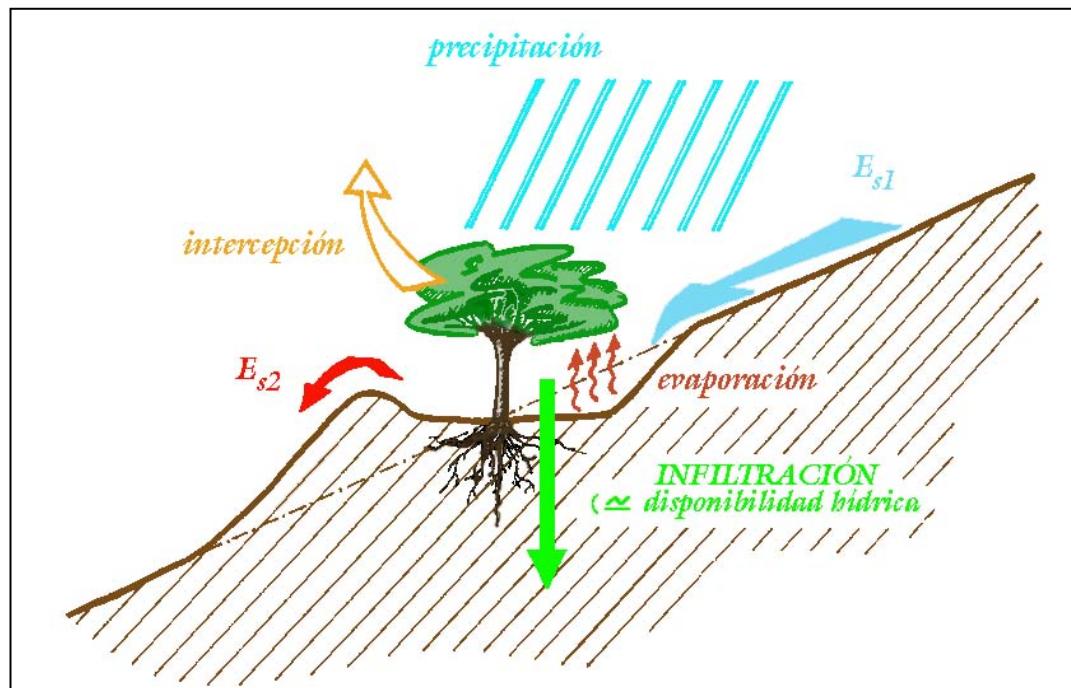


Figura 2.4. Balance hídrico propuesto por el modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1996)

Este balance hídrico constituye el punto de partida del modelo, y puede particularizarse a diferentes situaciones o simplificarse, sin que con ello se produzca merma en los objetivos planteados, prescindiendo de la intercepción y de la evaporación directa, que son componentes de escasa relevancia respecto al resto, en terrenos degradados. Por contra, la escorrentía (E_{s1} y E_{s2}) es indispensable para conocer la disponibilidad hídrica en un punto de una ladera. Así, queda finalmente la ecuación:

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

2.5.2. Funcionamiento de la unidad sistematizada

La sistematización primaria de una ladera consiste en dividirla artificialmente en unidades menores, mediante la alteración del microrrelieve con caballones, muretes, surcos, hoyos, etc. Cada compartimento constituye una unidad sistematizada en la que, a ser posible, todo el agua debe quedar retenida. Cada unidad sistematizada consta de un área de impluvio, productora y exportadora de escorrentía, y un área de recepción, que recoge la escorrentía y permite su infiltración, en beneficio de la planta que se instale allí.

El primer paso para poder analizar el efecto hidrológico de un método de preparación del terreno en repoblaciones consiste en la identificación de la unidad sistematizada. En la figura 2.5 se definen las áreas de impluvio y de recepción de microcuenca, acaballonados y subsolados.

Existe otro tipo de sistematización de la ladera, denominada sistematización secundaria, que consiste en una red de drenaje artificial dentro de la ladera, para desaguar las demás procedentes de lluvias excepcionales. La necesidad de esta sistematización se fundamenta en la evacuación ordenada de los excedentes de agua sin que se destruya la parcelación realizada y sin que se produzcan procesos erosivos.

El comportamiento hidrológico de cualquier sistematización queda definido por tres precipitaciones características:

- Precipitación mínima (P_1).- Aguacero de menor cuantía e intensidad que aún no genera escorrentía en el área de impluvio.
- Precipitación límite (P_2).- Aguacero que genera un volumen de escorrentía máximo capaz de ser retenido en su totalidad por el área colectora.
- Precipitación máxima (P_3).- La que aún puede ser evacuada con orden a través de la sistematización secundaria (rebosaderos, vertederos, canales y/o zanjas).

2.5.3. Bases e hipótesis del modelo

Antes de plantear las ecuaciones fundamentales del modelo, es necesario enunciar sus seis bases e hipótesis:

- 1) Una ladera sistematizada con el fin de incrementar las disponibilidades hídricas se compone de un conjunto de unidades que se comportan como pequeñas cuencas endorreicas en la mayor parte de los episodios de lluvia.
- 2) En cada unidad sistematizada hay un área de impluvio (exportadora de escorrentía) y un área de recepción (importadora). Esta última debe poseer un rebosadero o emisario para fuertes aguaceros.

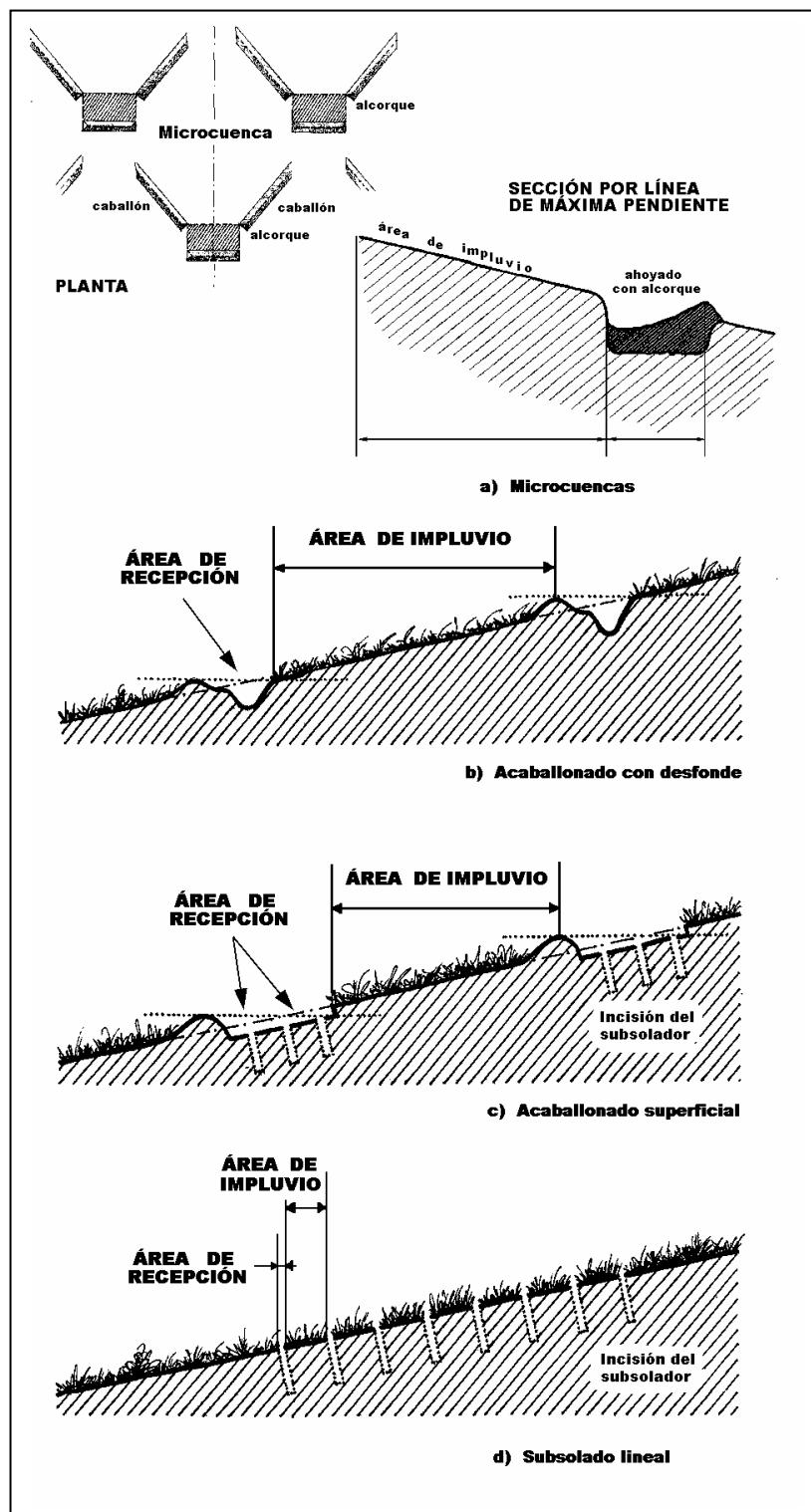


Figura 2.5. Delimitación del área de impluvio y del área de recepción en varias preparaciones del terreno para repoblaciones forestales (Martínez de Azagra, 1996)

3) Las unidades sistematizadas se suponen independientes entre sí, de manera que el agua que se escapa de una de ellas no puede quedar retenida en una unidad inferior.

4) El modelo desarrolla tres ecuaciones que estiman las disponibilidades hídricas en el área de impluvio (*PIMP*), en el área de recepción (*DESP*) y el promedio de ambas (*PROM*). Estas ecuaciones se enuncian en el epígrafe siguiente.

5) Los aguaceros se clasifican según su efecto hidrológico en los siguientes tres grupos:

- Precipitación débil.- Menor que la precipitación mínima (*P1*), que provoca escorrentía en el área de impluvio.

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

$$PROM = DESP = PIMP = P$$

- Precipitación idónea.- Comprendida entre la precipitación mínima (*P1*) y la precipitación límite (*P2*), que aún no provoca escorrentía fuera de la unidad.

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

$$PIMP < P \text{ y } DESP > P \text{ y } PROM = P$$

- Precipitación excesiva.- 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.

$$\text{Si } P2 < P \leq P3 \Rightarrow E_{s1} > 0 \text{ mm y } E_{s2} > 0 \text{ mm}$$

$$PIMP < P \text{ y } DESP \xleftarrow{?} P \text{ y } PROM < P$$

- Precipitación dañosa.- Si es superior a la que admite la sistematización secundaria (*P3*). Existe peligro de ruina de la parcelación por flujos incontrolados y erosivos.

$$\text{Si } P > P3 \Rightarrow E_{s1} > 0 \text{ mm y } E_{s2} > 0 \text{ mm}$$

$$PIMP < P \text{ y } DESP \xleftarrow{?} P \text{ y } PROM < P$$

6) La evaluación de las disponibilidades hídricas antes de la sistematización (variable denominada *ANTES*) se realiza de la siguiente manera:

$$ANTES = P - \Delta E_s$$

Donde ΔE_s es la escorrentía superficial que provoca el aguacero en la ladera original. Siempre que *ANTES* sea menor que *PROM*, la sistematización será conveniente en zonas áridas y semiáridas.

2.5.4. Ecuaciones generales

Las tres ecuaciones que calculan las disponibilidades hídricas en la ladera sistematizada se explican en la figura 2.6, y son las siguientes (Martínez de Azagra, 1996):

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

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

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

siendo:

P = Precipitación del aguacero analizado

$DESP$ = Disponibilidad hídrica del área de recepción

$PIMP$ = Disponibilidad hídrica del área de impluvio

$PROM$ = Disponibilidad hídrica media de la ladera

E_{s1} = Lluvia neta o escorrentía superficial que se produce en el área de impluvio

E_{s2} = Escorrentía superficial que escapa de la unidad sistematizada

S_1 = Superficie correspondiente al área de impluvio

S_2 = Superficie del área de recepción.

Estas ecuaciones han sido particularizadas al método de estimación de escorrentía del número de curva (SCS, 1991), constituyendo el modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1995a, 1995b, 1996, 1999), y al modelo de infiltración de Horton (1940), resultando el modelo HYDNUM (Martínez de Azagra, 1994b, 1995b, 1998).

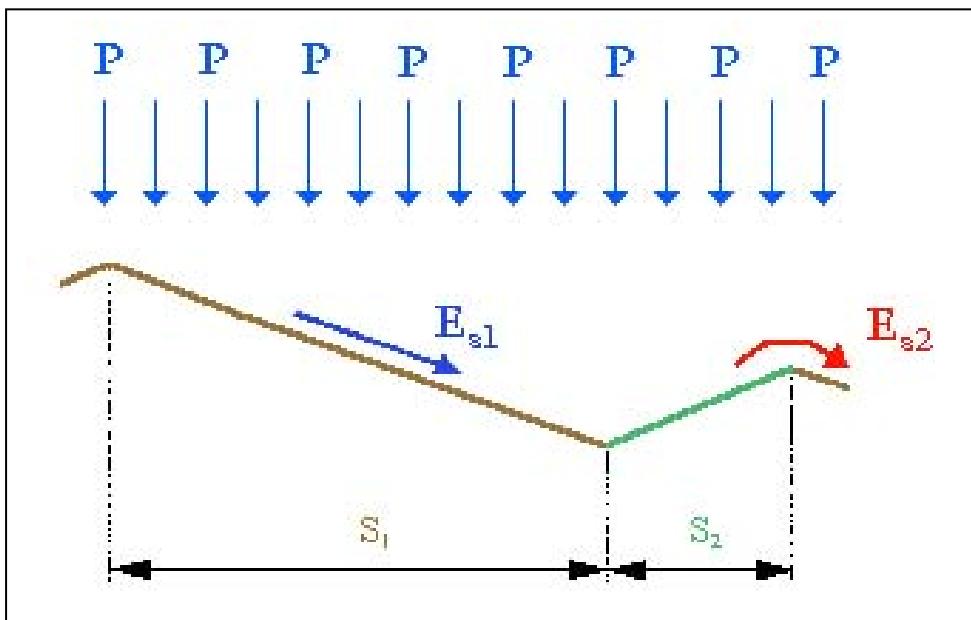


Figura 2.6. Explicación gráfica de las ecuaciones fundamentales de los modelos MODIPÉ e HYDNUM

2.5.5. Etapas de funcionamiento de un microembalse

Cuando se inicia un aguacero, tanto el área de impluvio como el área de recepción son capaces, en general, de infiltrar toda el agua que cae. Después de un cierto tiempo se alcanza el punto de encharcamiento en el área de impluvio, comenzando el sistema a formar escorrentía hacia el área de recepción (E_{s1}). Esta situación es, por lo tanto, bastante favorable para la economía del área colectora, puesto que se ve enriquecida por aportes de agua ajenos, además de la precipitación propia (Martínez de Azagra, 1998).

La formación de charcos en el área de recepción puede ser anterior o posterior a la llegada de agua de escorrentía proveniente del área de impluvio. De esta forma se pueden distinguir dos puntos de encharcamiento: uno del área productora (t_i) y otro del área de recepción (t_r). 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 respecto a la aparición de charcos en la segunda.

El funcionamiento del microembalse (véase la figura 2.7) se explica mediante la siguiente ecuación diferencial (Martínez de Azagra, 1994b):

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

Donde:

y = Profundidad de la lámina de agua en el microembalse
 $S(y)$ = Superficie anegada
 $i(t)$ = Intensidad de precipitación
 $v_i(t)$ = Velocidad de infiltración en el área de impluvio
 $w_i(t)$ = Velocidad de infiltración en el área de recepción
 $k \cdot (y-H)^x$ = Ecuación de descarga del rebosadero
 k = Coeficiente de gasto
 $y-H$ = Carga de vertido
 x = Exponente de descarga.

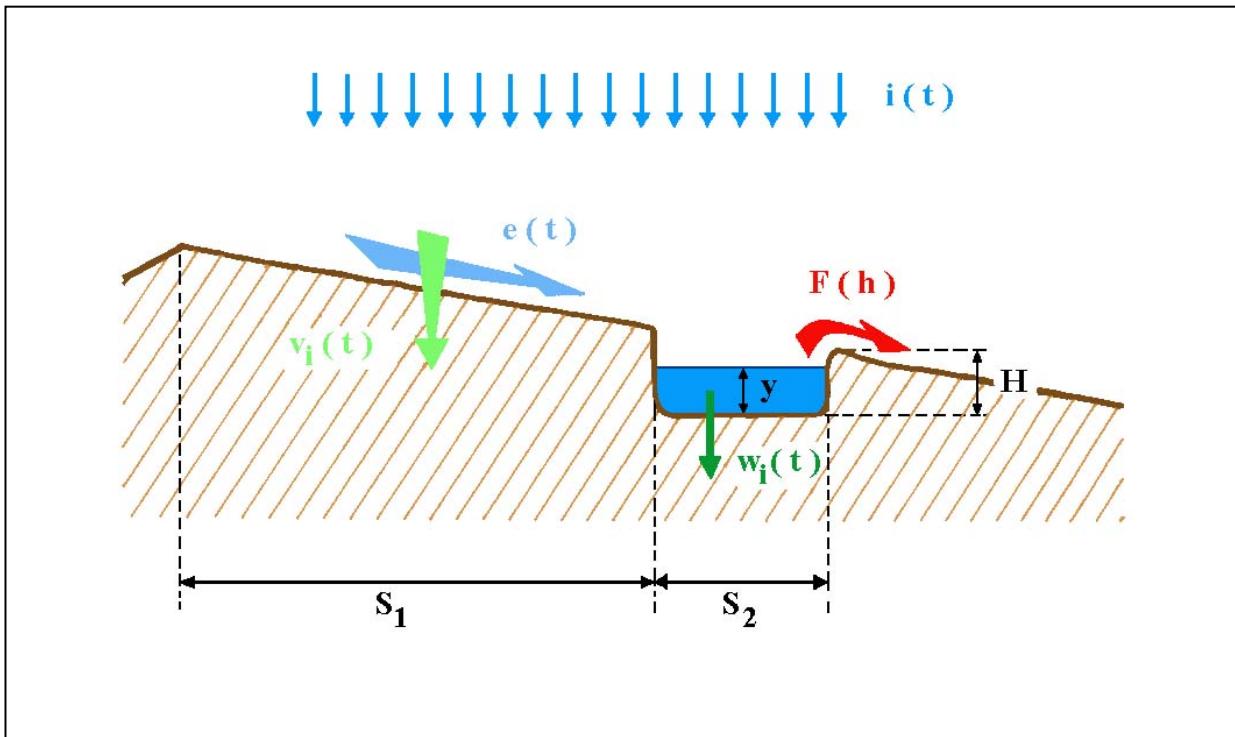


Figura 2.7. Esquema conceptual de funcionamiento de una microcuenca con poceta

En líneas generales en el funcionamiento de un microembalse, después de una fase previa al encharcamiento, se distinguen cuatro etapas: una fase inicial de llenado sin rebosadura, una segunda de llenado con rebosadura, una tercera fase de vaciado con rebosadura después de finalizado el aguacero y una última etapa de vaciado sin vertido hasta que concluye la infiltración del agua encharcada. Existen unos tiempos característicos que delimitan todas estas etapas, y son:

- Inicio del aguacero ($t_0 = 0$)
- Tiempo de encharcamiento del área de impluvio (t_i)
- Tiempo de encharcamiento del área de recepción (t_r)
- Tiempo límite para la unidad sistematizada, que es el momento en que comienza $E_{s2}(t_i)$
- Duración del aguacero (D)
- Tiempo final de rebosadura o lapso entre el final del aguacero y la conclusión del vertido (t_v)

- Tiempo de conclusión, que equivale a la duración de la infiltración en el microembalse (t_f)

En la figura 2.8 se presenta un esquema de las etapas de funcionamiento del microembalse, indicándose la ecuación diferencial válida en cada caso y los tiempos característicos.

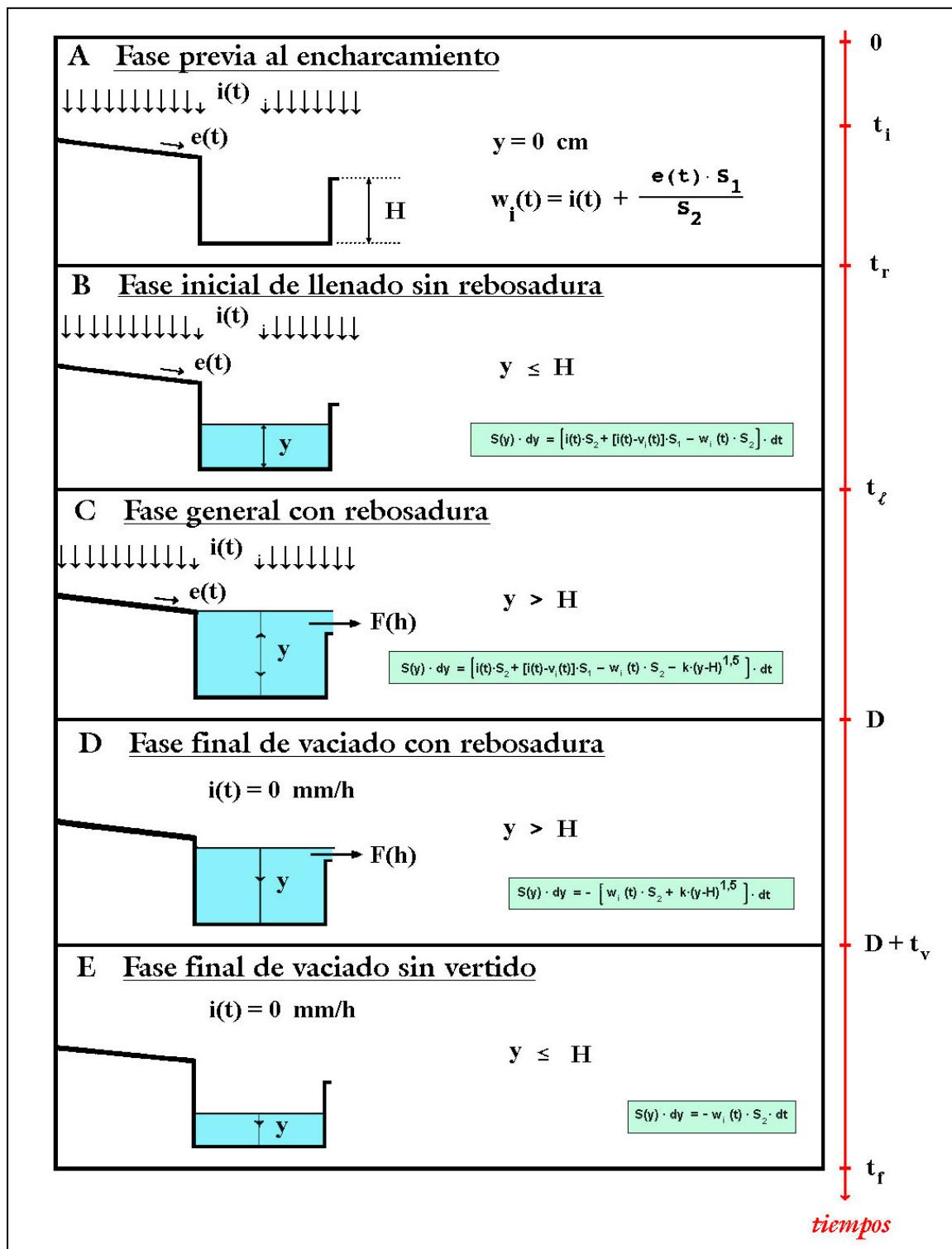


Figura 2.8. Etapas de funcionamiento de un microembalse, según Martínez de Azagra (1998)

2.5.6. Particularización al método del número de curva (MODIPÉ)

Uno de los modelos de uso más generalizado para estimar la escorrentía superficial es el método del número de curva (SCS, 1991) (véase el anexo III). Se trata de un sencillo modelo empírico que, pese a sus carencias y limitaciones, es suficientemente preciso a nivel práctico siempre que se emplee correctamente y por personas conocedoras del modelo. En MODIPÉ se utiliza para cuantificar el volumen de agua que se infiltra en el terreno, por diferencia entre el volumen de agua de precipitación llovida y escurrida.

De esta forma, las ecuaciones generales expuestas anteriormente se concretan en:

$$PIMP = P - E_{s1} = P - L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1}$$

en donde:

$PIMP$ = Disponibilidad hídrica en el área de impluvio (mm)

P = Precipitación del aguacero (mm)

$P1$ = Umbral de escorrentía del área de impluvio (mm) que se calcula a partir del número de curva correspondiente (NI)

$$P1 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI}$$

L = Operador que vale cero si la precipitación es menor que el umbral de escorrentía y uno en caso contrario.

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2} = P + L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot \frac{S_1}{S_2} - \begin{cases} 0 & \text{si } MAX \leq CAPA \\ \frac{MAX - CAPA}{S_2} & \text{si } MAX > CAPA \end{cases}$$

MAX se calcula según el caso, dependiendo de los valores relativos del número de curva entre el área de impluvio y el área de recepción:

$$MAX = K \cdot \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (S_1 + S_2) \quad \text{si } NI \geq NR$$

$$MAX = LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot S_1 \quad \text{si } NI < NR$$

en donde:

$DESP$ = Disponibilidad hídrica en el área de recepción (mm)

S_1 = Superficie del área de impluvio (m^2)

S_2 = Superficie del área de recepción (m^2)

MAX = Escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo (l)

$CAPA$ = Capacidad del microembalse (l)

$P0$ = Umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto alcorque (mm)

$P1$ = Umbral de escorrentía del área de impluvio (mm)

PR = Umbral de escorrentía del área de recepción (mm)

NI = Número de curva del área de impluvio

NR = Número de curva del área de recepción

K = Operador que vale uno si la precipitación rebasa el umbral de escorrentía promedio de la unidad ($P0$), o cero en caso contrario.

LL = Operador que vale uno si la precipitación es mayor que el umbral de escorrentía del área de recepción (PR), o cero si es igual o menor.

Para calcular la precipitación límite de la unidad sistematizada ($P2$) hay que imponer:

$$MAX = CAPA$$

Una vez conocida esta precipitación límite, la obtención del número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ) es inmediata:

$$NEQ = \frac{5.080}{P2 + 50,8}$$

siendo $P2$ el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada (o precipitación límite) y NEQ su número de curva equivalente.

$$ANTES = P - M \cdot \frac{(P - PAC)^2}{P + 4 \cdot PAC}$$

en donde:

ANTES = Cantidad de agua que se infiltra en la ladera degradada antes de la sistematización (mm)

P = Precipitación del aguacero (mm)

PAC = Umbral de escorrentía de la ladera degradada (mm) que se calcula por medio de la expresión:

$$PAC = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NAC}{NAC}$$

siendo:

NAC = Número de curva de la ladera actual degradada

M = Constante que vale cero si la precipitación es inferior al umbral **PAC** y uno en el caso contrario.

2.5.7. Hipótesis y limitaciones del modelo MODIPÉ

Para la correcta utilización de un modelo hidrológico y para saber interpretar sus resultados, hay que conocer las hipótesis en las que se basa y las restricciones que subyacen en su desarrollo. Con este fin se enumeran a continuación:

- 1) MODIPÉ considera que la intercepción y la evaporación directa son magnitudes desdeñables. La intercepción será próxima a 0 mm en laderas muy degradadas que sustenten una vegetación muy rala. La evaporación directa desde el suelo será mínima si el microembalse es pequeño, con tiempos de encharcamiento reducidos.
- 2) MODIPÉ asume que con el método del número de curva se puede estimar la infiltración, mediante la ecuación:

$$I \approx P - \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0}$$

Se está admitiendo, a su vez, que $P_0 = 0,2 \cdot S$ para poder trabajar con un modelo uniparamétrico de fácil aplicación universal (sin tener que calibrarlo y validarla en cada ocasión), siendo P_0 el umbral de escorrentía y S las pérdidas máximas posibles (segundo parámetro del método de los complejos hidrológicos).

- 3) El método del número de curva ha sido calibrado en cuencas de varios kilómetros cuadrados y no en microcuencas. Se desconoce la distorsión que se puede estar produciendo por el cambio de escala que se realiza.
- 4) Hipótesis de independencia: Las unidades sistematizadas se suponen independientes entre sí, de manera que el agua que escapa de una de ellas no puede quedar retenida en una unidad inferior. Esto exige unidades sistematizadas

iguales y conduce a una infravaloración del volumen de agua infiltrado en las unidades sistematizadas inferiores (pues poseen un tiempo de oportunidad de infiltración mayor en los aguaceros que superen la precipitación límite). Esta hipótesis está del lado de la seguridad a la hora de estimar la infiltración.

- 5) El tiempo de circulación del agua dentro de una unidad sistematizada no influye en el proceso. Para dar por válida tal suposición, la unidad sistematizada debe ser pequeña. Como tamaño máximo se sugiere 500 m^2 ($S \leq 500 \text{ m}^2$), aunque en este límite superior también juegue la pendiente de la ladera un importante papel.
- 6) Así mismo, existe un límite inferior para S , S_1 y S_2 . Parece inconveniente, por ejemplo, aplicar MODIPÉ en una unidad sistematizada inferior a 1 m^2 ($S \geq 1 \text{ m}^2$).
- 7) Se supone un vertido instantáneo y total del agua nada más se rebase el volumen CAPA. Esta ecuación de descarga para las demásías de agua infravalora la infiltración en el área de recepción.
- 8) Se prescinde del efecto redistributivo que pueda tener la escorrentía hipodérmica, fenómeno que en ciertos suelos es importante.
- 9) En el caso de áreas de recepción muy pequeñas (inferiores al área abarcada por el sistema radicular de la planta), sólo el parámetro *PROM* (disponibilidad hídrica de la unidad sistematizada) tiene significación ecológica. *DESP* (disponibilidad hídrica en el área de recepción) no la tiene.

3. METODOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DE PREPARACIONES DEL SUELO DESTINADAS A LA REPOBLACIÓN FORESTAL

3.1. TAMAÑO DEL MICROEMBALSE

3.1.1. Introducción

Cuando se pretenda proyectar una repoblación forestal en una zona árida situada en ladera, la economía del agua debe jugar un papel preponderante. La obtención de cosechas de agua para los brizales en sus primeras etapas de vida resulta fundamental para el éxito de la empresa.

La mayor parte de los métodos de preparación del suelo utilizados en el sector forestal persiguen obtener cosechas de agua con las que invertir procesos de desertificación por aridez edáfica. Al aumentar la infiltración en la ladera se favorece la instalación de una vegetación más tupida, especialmente en climas áridos.

Pero para lograr el objetivo restaurador deseado con una repoblación, conviene dimensionar correctamente el microembalse, es decir el recipiente creado mediante un movimiento de tierras que dotará de agua a la planta. El tamaño del microembalse puede fijarse atendiendo a diferentes criterios. Muchos de ellos están íntimamente relacionados entre sí, otros son complementarios y hasta opuestos. Una adecuada conjugación de estos criterios conduce a la solución más oportuna en cada caso. Estos criterios deben servir para orientar al técnico encargado de la restauración sobre el tamaño de los alcorques a realizar, todo ello con la intención de aumentar la supervivencia del repoblado reduciendo la alteración del microrrelieve a lo mínimo indispensable.

Por todo lo expuesto, los objetivos que se persiguen en este capítulo son los siguientes:

- 1) Establecer una serie de criterios para el dimensionado de microembalses con vistas a la repoblación forestal de zonas áridas.
- 2) Desarrollar, según cada uno de esos criterios, una metodología que permita determinar el tamaño más adecuado del microembalse.
- 3) Integrar todos esos criterios para establecer una metodología conjunta.

3.1.2. Revisión bibliográfica

La mayor parte de los trabajos consultados sobre cosechas de agua no prestan especial atención al tamaño que debe tener el microembalse que se sitúa en el área colectora. Los diferentes autores que se han ocupado de este tipo de técnicas han

hecho especial hincapié en la superficie de este área y su relación con el área de impluvio, pero en pocos casos tratan de la altura que deben tener los muretes o caballones que conforman la estructura recolectora de escorrentía. En esta línea se sitúa el excelente trabajo recopilatorio de Boers & Ben-Asher (1982), por ejemplo.

Critchley & Siegert (1991) van algo más lejos, haciendo recomendaciones de las dimensiones que deben tener los caballones en las diferentes estructuras tradicionales de recolección de agua que describen. Así, por ejemplo, para las microcuenca *Negarim* (véase en el anexo I la tabla I.3), recomiendan, desde la experiencia, alturas de caballón desde 25 hasta 55 cm, dependiendo del tamaño de la microcuenca y de la pendiente del terreno.

Por otra parte, el modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1995a) cuantifica el tamaño del microembalse a través de la variable denominada *MAX*, que es la capacidad mínima de embalse para recoger toda la escorrentía superficial que se produce en la unidad sistematizada, es decir, para conseguir endorreísmo. Las ecuaciones que se utilizan para calcular esta capacidad de alcorque pueden consultarse en el apartado 2.5 del presente trabajo.

No obstante, el modelo MODIPÉ atiende exclusivamente a razones de economía del agua a la hora de aconsejar el tamaño del embalse, resultando interesante tener en cuenta otros aspectos. Y, por otro lado, no desarrolla una metodología completa sobre el particular. Por este motivo, Martínez de Azagra & Mongil (2001), basándose en este modelo, han esbozado unos criterios a seguir para el adecuado dimensionado de un microembalse, que son los que ahora se desarrollan en profundidad.

3.1.3. Metodología propuesta

El método que se propone para determinar el tamaño óptimo del microembalse se basa en diez criterios diferentes. Se trata de una serie de condicionantes o factores que deben considerarse en el diseño del alcorque. Algunos de ellos están íntimamente relacionados entre sí, otros son complementarios y hasta antagónicos. Por ello, sólo una correcta conjugación de todos los criterios lleva a la solución más adecuada en cada caso concreto.

Como complemento al desarrollo teórico que sigue, en el capítulo 4 de este trabajo (Estudio de casos) se presentan ejemplos de utilización de la metodología propuesta, con el fin de clarificarla y ponerla en práctica.

3.1.3.1. CRITERIO HIDROMETEOROLÓGICO

Para que un microembalse cumpla plenamente con su finalidad, es necesario lograr endorreísmo para una determinada precipitación, serie de precipitaciones o conjunto de precipitaciones anuales (aguaceros, meses o año de cálculo). El endorreísmo consiste en que toda el agua que llegue al área de recepción por

precipitación y escorrentía se quede e infiltre en ella, mediante la construcción de un microembalse de tamaño suficiente.

Siendo menos exigentes, es decir, sin llegar a la consecución de un endorreísmo pleno, se puede pretender conseguir una determinada dotación de agua en el área de recepción, gracias a la capacidad del microembalse. Utilizando un símil agrícola, se trata de lograr un número suficiente de riegos abundantes antes de la época seca. Con el riego de boqueras, técnica utilizada desde tiempo inmemorial en el levante español, se pretendía esto mismo: aprovechar el agua que corre por las ramblas durante un aguacero para conseguir una cantidad de agua suficiente para los cultivos.

Bajo estas premisas, se propone una metodología que permite obtener un tamaño de microembalse con el que se consigue endorreísmo en el área de recepción. El procedimiento consta de los siguientes pasos:

1º) Ajuste de la serie de precipitaciones máximas diarias anuales a la distribución de Gumbel, que es la más utilizada para valores extremos de precipitaciones (Martínez de Azagra & Navarro, 1996), y realización del correspondiente test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

2º) Mediante el modelo MODIPÉ, obtención de una tabla en la que se relacionen las precipitaciones límites (umbráles de escorrentía de la unidad sistematizada en condición de humedad II¹) para diferentes capacidades de microembalse (CAPA), con sus correspondientes períodos de retorno calculados con la distribución de Gumbel.

3º) Cálculo de la capacidad del embalse, y por tanto de la altura de los muretes, para lograr endorreísmo con un periodo de retorno de 10 años. Se fija este periodo de retorno como cifra aproximada a la vida útil de la preparación del suelo, es decir, del tiempo que se precisa de la eficacia de dicha preparación para el establecimiento de la repoblación.

* * * * *

Con el mismo objetivo de consecución de endorreísmo, y sin necesidad de emplear precipitaciones de diseño obtenidas estadísticamente, el modelo hidrológico MODIPÉ da la posibilidad de calcular la capacidad del alcorque. Este nuevo criterio, estrechamente ligado al anterior, se basa en que el área de impluvio o productora y el tamaño del microembalse deben estar relacionados, ya que el volumen de agua producido en la primera debe quedar retenido en un microembalse de volumen adecuado (figura 3.1). En base a esta idea, a este criterio se le ha denominado **criterio de proporcionalidad con el área de impluvio**.

En el modelo MODIPÉ, el tamaño necesario o de referencia para el microembalse se determina mediante la variable denominada MAX, que es el volumen de agua que escurriría de la unidad sistematizada si la capacidad del microembalse

¹ El concepto de condición de humedad puede consultarse en el anexo III.

fuese nula (con $CAPA = 0$). MODIPÉ calcula MAX de dos maneras diferentes, dependiendo de si el número de curva del área de impluvio es mayor o menor que el del área de recepción (Martínez de Azagra, 1995):

$$MAX = K \cdot \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (S_1 + S_2) \quad \text{si } NI \geq NR$$

$$MAX = LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot S_1 \quad \text{si } NI < NR$$

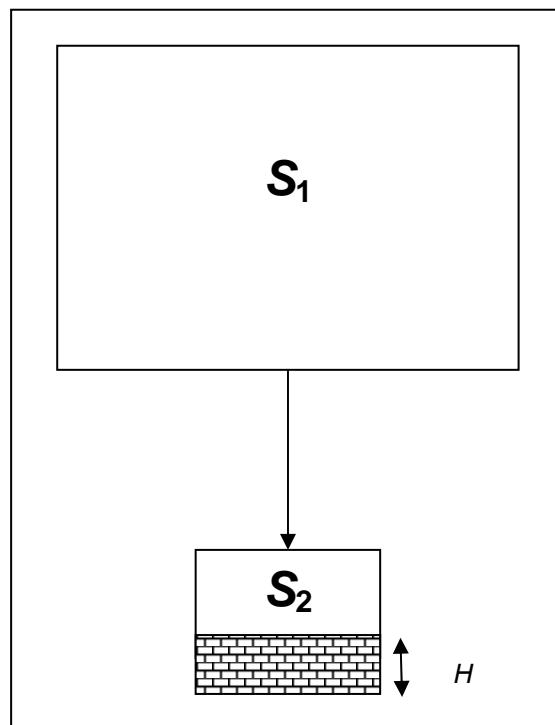


Figura 3.1. Esquema conceptual de la relación entre el área de impluvio, el área de recepción y el tamaño del microembalse

en donde:

MAX = Escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo (l)

S_1 = Superficie del área de impluvio (m^2)

S_2 = Superficie del área de recepción (m^2)

P = Precipitación de cálculo (mm)

$P0$ = Umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto alcorque (mm)

$P1$ = Umbral de escorrentía del área de impluvio (mm)

PR = Umbral de escorrentía del área de recepción (mm)

NI = Número de curva del área de impluvio

NR = Número de curva del área de recepción

K = Constante que vale uno o cero, según que la precipitación rebase o no el umbral de escorrentía promedio de la unidad ($P0$)

LL = Constante que vale uno o cero, según se supere o no el umbral de escorrentía del área de recepción (PR)

L = Constante que vale uno o cero, según se supere o no el umbral de escorrentía del área de impluvio ($P1$)

Si se denomina R a la relación entre el área de impluvio y el área de recepción,

$$R = \frac{S_1}{S_2}$$

y se supone que se produce una precipitación de cálculo mayor que los correspondientes umbrales de escorrentía (K, L y $LL = 1$), entonces las ecuaciones anteriores se pueden desarrollar de la siguiente forma:

a) Para $NI \geq NR$

$$MAX = 1 \cdot \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (S_1 + S_2) = \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (R \cdot S_2 + S_2)$$

$$\frac{MAX}{S_2} = \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot R + \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} = \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} (R + 1)$$

Se obtiene la ecuación de una recta ($y = a \cdot x + b$), quedando la variable MAX en función de R .

b) Para $NI < NR$

$$MAX = 1 \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + 1 \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot S_1 = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot (R \cdot S_2)$$

$$\frac{MAX}{S_2} = \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot R + \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR}$$

Resultando también la ecuación de una recta.

Con estas ecuaciones y conociendo la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, o los valores de estos, la precipitación de cálculo y los umbráles de escorrentía, se calcula el tamaño necesario del microembalse proporcional al área de impluvio.

La capacidad resultante del microembalse será exactamente la necesaria para recoger toda la escorrentía producida y no infiltrada para unas determinadas precipitaciones de cálculo. Si se diseña el alcorte en base a un año de cálculo de precipitaciones exigüas, éste resultará de un tamaño inferior a si se hace en base a un año más lluvioso. Si durante el año de la plantación las precipitaciones son mayores que las del año de cálculo, se escapará escorrentía del embalse diseñado, lo cual no es positivo para los objetivos de la sistematización. Consecuentemente, el tamaño del microembalse fijado mediante este criterio debe ser un límite inferior al tamaño finalmente establecido por el técnico. Con este criterio se asegura recoger toda la escorrentía que se produce y no se infiltra en unas determinadas condiciones de pluviosidad, sin tener en cuenta las necesidades fisiológicas de la planta.

3.1.3.2. CRITERIO DE RESGUARDO HIDRÁULICO

En base a lo establecido por el criterio hidrometeorológico, se trata ahora de construir un microembalse algo mayor de lo estrictamente necesario. Es decir, una micropresa con un resguardo ante un determinado aguacero de cálculo o un cierto volumen de seguridad frente al desbordamiento, que suponga una disminución del número de curva equivalente (NEQ) en varios puntos. Si el agua vertiera por encima del dique de tierra del caballón, debido a que está construido con materiales sueltos, los daños serían cuantiosos, reduciéndose considerablemente su vida útil.

Haciendo un paralelismo con los sistemas constructivos de una presa tradicional (véase la figura 3.2), se entiende por resguardo la diferencia entre el nivel de agua del microembalse en una situación concreta (en este caso, el nivel correspondiente al aguacero de cálculo) y la coronación del murete (Ayuso, 1990).

En las presas de tierra de tamaño normal el principal objetivo del resguardo es hacer frente al oleaje que puede producir el viento (Aguiló, 1985); sin embargo esto no se tiene en cuenta en presas de pequeño tamaño. En el caso del murete de un microembalse para repoblación forestal, los objetivos del resguardo son:

- Permanecer del lado de la seguridad en la consecución de endorreísmo en la microcuenca.
- Corregir el efecto de la distorsión que puede producirse debido a la escala manejada, ya que el método del número de curva, empleado por el modelo MODIPÉ, está calibrado para cuencas de varios kilómetros cuadrados.
- Considerar la reducción de la capacidad del microembalse que se produce debido al aterramiento parcial del microembalse y al achatamiento de los muretes con

las primeras lluvias (aunque esta segunda circunstancia se tiene en cuenta en el criterio mecánico de asentamiento, que se expondrá posteriormente).

Con estas justificaciones, debe fijarse un resguardo de varios centímetros sobre la altura de los muretes o un determinado porcentaje de seguridad por encima de la misma, para dotar de mayor seguridad a la estructura en su función de retener toda el agua de escorrentía. Después de la observación de un elevado número de preparaciones del suelo en repoblaciones forestales para la realización de este trabajo, un resguardo de entre el 15 y el 25 % de la altura del murete se estima suficiente para asegurar el cumplimiento de los objetivos marcados. No obstante, la experiencia del técnico es de capital importancia a la hora de fijar esta altura o porcentaje de resguardo.

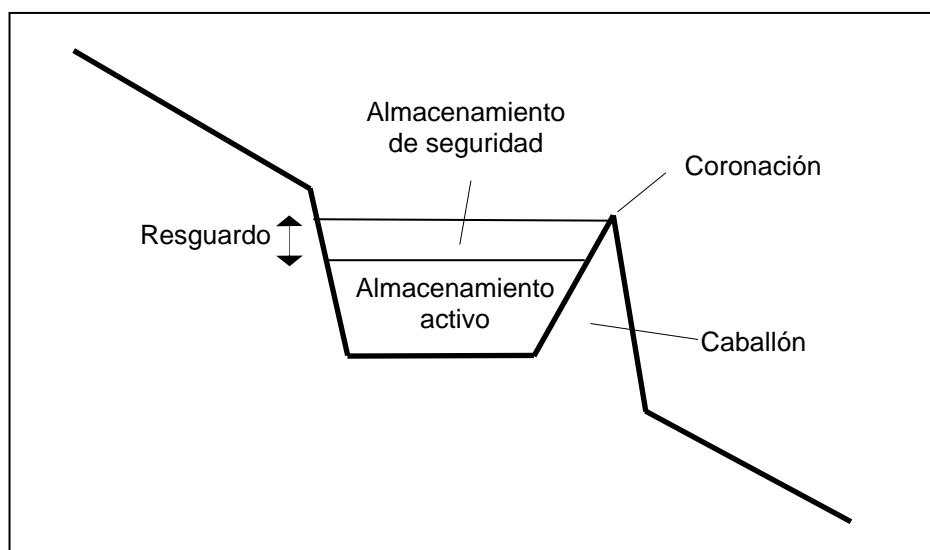


Figura 3.2. Zonas de almacenamiento y delimitación del resguardo hidráulico de un microembalse para repoblación forestal (basado en Ayuso, 1990)

3.1.3.3. CRITERIOS EDÁFICOS

3.1.3.3.1. Relación volumen de alcorque-capacidad de retención

A) La capacidad de retención de agua disponible

El concepto de capacidad de retención de agua disponible (CRAD) parte de una clasificación biológica del agua del suelo que considera como asimilable por las plantas el agua retenida entre dos situaciones de “cuasi-equilibrio”, la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La principal crítica a estos conceptos es que su significación física es dudosa, pudiéndose comprobar, por ejemplo, que el punto de marchitez permanente varía con la especie y con factores del medio (Porta *et al.*, 1999). No obstante y pese a las numerosas críticas que soporta, este modelo simplificador sobre el agua en el suelo sigue teniendo plena vigencia en la actualidad.

Según estos mismos autores, la capacidad de campo puede definirse como:

- El contenido de agua que tiene el suelo después de 48 horas de un riego o lluvia abundante. Se supone que transcurrido este tiempo concluye el drenaje rápido y empieza el drenaje lento del agua contenida en el suelo.

- En cierto modo, se trata del contenido máximo de agua que puede retener un suelo cuando la mayor parte de la macroporosidad está ocupada por aire.

- Por la dificultad de medición, se suelen realizar estimaciones a partir del contenido de agua que retiene una muestra de suelo en equilibrio con una presión de 33 kPa, en un equipo de placas de presión. Sin embargo, esto puede llevar a errores importantes, puesto que en la capacidad de campo influyen las condiciones de drenaje del suelo. Por este motivo es más recomendable que la capacidad de campo sea medida *in situ*.

Por su parte, el punto de marchitamiento permanente es:

- El contenido de agua por debajo del cual las plantas mesofíticas (en concreto el girasol enano) no son capaces de extraer agua del suelo. Se corresponde con el límite inferior del agua retenida por fuerzas capilares absorbible por las raíces.

- Se estima como el contenido de agua que retiene una muestra de suelo equilibrada con una presión de 1.500 kPa en un equipo de placas de presión.

La capacidad de retención de agua disponible tiene una gran importancia en el suministro de agua a las plantas, ya que actúa como un almacén o reserva de agua del que las plantas pueden hacer uso según sus necesidades. Por este motivo, sigue siendo muy utilizado especialmente en trabajos de riego. Según lo expuesto, esta variable puede calcularse mediante la expresión:

$$CRAD = \frac{(CC - PMP) \cdot d_a \cdot p}{1.000}$$

siendo:

$CRAD$ = Capacidad de retención de agua disponible en el perfil (mm)

CC = Capacidad de campo (tanto por uno en masa)

PMP = Punto de marchitamiento permanente (tanto por uno en masa)

d_a = Densidad aparente del suelo seco ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

p = Espesor del perfil edáfico considerado (mm).

La estimación de los dos parámetros que componen la capacidad de retención puede hacerse por medidas experimentales o por ecuaciones empíricas. En el primer caso, existen diferentes técnicas, generalmente complejas y laboriosas, escasamente empleadas hasta el momento en estudios forestales. Entre ellas están el tensímetro, la placa de succión, el equipo de placa de presión, el psicrómetro de termopar y el desecador de vacío (Porta *et al.*, 1999).

Para el caso de las ecuaciones empíricas, en la bibliografía puede encontrarse un importante número de ellas, ajustadas para muy diferentes tipos de suelo y climas, como las ecuaciones de Gardner (USBR, 1964), Gras (1957), etc. Concebida expresamente para su utilización en el medio forestal es la ecuación de humedad equivalente de Sánchez Palomares & Blanco (1985), que Gandullo (1985) integra en la expresión por la cual calcula la capacidad de retención de agua. Todas las ecuaciones mencionadas, y las que se describen seguidamente, han sido testadas en un trabajo anterior sobre el contenido hídrico del suelo en repoblaciones forestales, habiéndose obtenido buenos resultados al realizar comparaciones con valores medidos en campo (Mongil, 1995).

En el presente trabajo se emplean las ecuaciones propuestas por Fuentes & Cruz (1990) que, pese a su utilización eminentemente agrícola, también pueden aplicarse a repoblaciones forestales:

$$CC = 0,48 \cdot Ac + 0,162 \cdot L + 0,023 \cdot Ar + 2,62$$

$$PMP = 0,302 \cdot Ac + 0,102 \cdot L + 0,0147 \cdot Ar$$

donde CC es el contenido másico de humedad del suelo a capacidad de campo (%); PMP el contenido de agua en el punto de marchitamiento permanente (%); Ac , L y Ar son los porcentajes de arcilla, limo y arena, respectivamente, según la clasificación del U.S.D.A.

La bibliografía consultada sobre cosechas de agua sí tiene en cuenta, en general, la capacidad de retención de agua en el establecimiento de modelos y criterios de diseño. Especial atención a este asunto prestan Boers & Ben-Asher (1982), Cadot (1989) y Critchley & Siegert (1991), aunque en ningún caso relacionan esta cualidad del suelo con el tamaño del alcorque. Evenari (1987), sin embargo, tras largos años de estudio sobre los sistemas tradicionales de recolección de agua, llega a la conclusión de que los antiguos agricultores navateos construyeron los muros de aterrazado de los *wadi* sobresaliendo siempre unos 30 cm de altura, lo que basta para que 3 m de terreno alcancen un contenido de agua igual a la capacidad de campo².

² Curiosamente, el autor hace referencia a esta importante cuestión de forma accesoria en uno de sus últimos trabajos recopilatorios, no mencionándola en ninguna de sus anteriores publicaciones: "Cuando iniciamos nuestras mediciones de campo estábamos muy extrañados de que los muros de las terrazas tuvieran una altura aproximada de 30 cm. Por aquella época éramos muy simples, y pensamos que los antiguos agricultores eran tontos por no retener más agua por medio de muros más altos. Posterioremediciones nos mostraron que los antiguos agricultores eran mejores hidrólogos que nosotros al comienzo de nuestro trabajo, porque descubrimos que los 30 cm de lámina de agua retenida en superficie son suficientes para llevar a los suelos de loess de las terrazas hasta su capacidad de campo en una profundidad de 3 m (estos suelos no suelen ser más profundos). En consecuencia, carecería de sentido conseguir retener más agua con muros más altos, y de esa forma incrementar el riesgo de rotura y de ruina de esa infraestructura" (cita textual traducida del alemán).

B) El volumen del alcorque no debe exceder la CRAD

Como se ha dicho anteriormente, el suelo constituye una reserva de agua cuya medida es la capacidad de retención. Partiendo de una situación inicial en la que esta reserva esté agotada, si durante un aguacero llueve más de lo que el suelo es capaz de retener, el agua sobrante se perderá por percolación profunda hacia la capa freática (este agua recibe la denominación de gravitacional). Por este motivo, el alcorque que se diseñe no debe recoger más agua del que pueda ser almacenado en la reserva del suelo. Por lo tanto, el volumen del alcorque lleno deberá ser, como máximo, igual a la capacidad de retención.

Es difícil, por otra parte, que la reserva llegue a estar totalmente agotada, por lo que casi siempre, inevitablemente, se va a perder agua por percolación profunda. No obstante, en los meses más secos esta reserva será muy escasa mientras no llueva, y por ello, si cae un aguacero convendrá que el alcorque sea capaz de recoger todo el agua necesaria para llenar el depósito edáfico.

Por esta razón deben estar relacionados el volumen de agua que puede contener el alcorque lleno y la capacidad de retención de agua que tiene el suelo abarcado por la rizosfera de las plantas introducidas. Esto equivale a una dosis de riego, si de un cultivo agrícola se estuviera hablando (Martínez de Azagra & Mongil, 2001). En conclusión, es necesario que se cumpla la siguiente inecuación:

$$\text{Volumen alcorque lleno} \leq \text{CRAD}$$

C) Consideraciones finales

La capacidad de retención de agua disponible es una característica del suelo que puede modificarse mediante la preparación del mismo (Mongil, 1995). Ingelmo & Cuadrado (1986) afirman que a potenciales cercanos al punto de marchitamiento permanente la textura del suelo juega un papel principal, mientras que la estructura tiene mayor influencia en valores de potencial cercanos a la capacidad de campo. Con estas premisas, es fácil deducir que preparaciones del suelo como subsolado, ahoyado o acaballonado, producen una remoción del suelo y por lo tanto una mezcla de partículas de diferentes tamaños granulométricos, así como cambios en la estructura, porosidad y distribución de la materia orgánica. Estas circunstancias mejoran la capacidad de retención de agua y otros parámetros hidrológicos del suelo (la infiltración, por ejemplo), que conducen a un mayor contenido de agua disponible para las plantas.

Para finalizar este apartado, y a pesar de lo expresado hasta ahora, el hecho de que exista una pequeña diferencia entre el volumen del microembalse y la capacidad de retención a favor del primero puede ser también recomendable. Si se sobrepasa la capacidad de la reserva del suelo, se creará un frente húmedo de agua que drena, escapando de la rizosfera, que puede estimular el desarrollo de las raíces, lo que posibilita la provisión de agua para el futuro y favorece la supervivencia de las plantas ante sequías prolongadas.

3.1.3.3.2. Relación porosidad-altura de muretes

A) Porosidad, porosidad eficaz y porosidad útil

El espacio de huecos de un suelo queda definido por el volumen de las fases líquida y gaseosa, o sólo de esta última si el suelo está seco. La relación entre el volumen de huecos (V_V) y el volumen total se denomina porosidad (que incluye los poros y otros tipos de huecos). Esta porosidad puede calcularse a partir de la densidad real y aparente (Porta *et al.*, 1999):

$$p_T = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_V}{V_V + V_S} \quad p_T = \frac{V_T - V_S}{V_T} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)$$

donde:

- p_T = Porosidad total (en tanto por uno: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), que a partir de ahora se denominará p
- V_V = Volumen de huecos (m^3)
- V_T = Volumen total (m^3)
- V_S = Volumen de la fase sólida (m^3)
- ρ_a = Densidad aparente del suelo secado en estufa ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- ρ_s = Densidad real o absoluta de la fase sólida del suelo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Los poros de un suelo pueden clasificarse según la eficacia para la trasferencia de fluidos, y así tenemos:

- Porosidad efectiva o comunicante: Formada por los poros de transmisión, que son los mayores de 50 μm .
- Porosidad de almacenamiento: Constituida por los poros entre 0,5 y 50 μm .
- Porosidad residual: Compuesta por los poros muy finos, menores de 0,5 μm y huecos ocluidos (cavidades).

Aunque habitualmente se exprese la mayor o menor eficacia para participar en los procesos de transferencia mediante la distinción entre macroporosidad y microporosidad, esto no tiene una base física real. El límite entre ambas se suele fijar en un diámetro aparente de 50 μm (entre 30 y 60 μm , según Porta *et al.*, 1999). No obstante, la geometría de los poros y huecos y de sus interconexiones es la que controla el comportamiento del agua en el suelo, y proporciona más información acerca de los procesos de transferencia que el valor numérico de la porosidad (Porta *et al.*, 1999). Todos estos conceptos deben ser tenidos en cuenta en el estudio hidrológico del suelo, ya que el agua que entra en el medio edáfico circula por el espacio de macroporos y pasa a ocupar total o parcialmente los microporos, donde puede ser retenida.

La porosidad efectiva o eficaz, mencionada anteriormente, se refiere a los poros interconectados a partir de los cuales puede fluir el agua (Custodio & Llamas, 1983) y, por lo tanto, se cuantifica como la relación entre el volumen de poros eficaces (generalmente se toman como tales los macroporos, aunque esto sea una simplificación) y el volumen total. Este parámetro puede medirse por saturación de una muestra de suelo y posterior drenado, o calcularlo mediante la siguiente expresión:

$$p_e = p_T - r_e$$

donde:

p_e = Porosidad eficaz o efectiva (en tanto por uno)

p_T = Porosidad total (en tanto por uno)

r_e = Retención específica o agua que no drena (en tanto por uno). Esta variable es función de la textura, de la estructura y de la materia orgánica, entre otros factores. Puede determinarse con exactitud midiendo la humedad residual (por desecación en estufa) del suelo tras ser centrifugado con una fuerza de 1.000 veces la gravedad (drenaje forzado). Una aproximación puede obtenerse mediante la ecuación de Briggs & Shantz (citada por Custodio & Llamas, 1983), en la que sólo se tiene en cuenta la textura:

$$r_e = \frac{0,03 \cdot Ar + 0,35 \cdot L + 1,65 \cdot Ac}{100}$$

Conviene aclarar que la pretendida eficacia de esta porosidad se refiere a la perspectiva de los hidrogeólogos, que persiguen la recarga de sus acuíferos. Por eso es posible definir otro tipo de porosidad “eficaz”, que se puede llamar “útil”, y que es aquélla que retiene agua en forma utilizable por las plantas. Para determinar esta porosidad útil hay que volver a los conceptos de capacidad de campo y de punto de marchitamiento permanente. Aplicando la ley de Jurin, se puede calcular el diámetro que deben tener los poros capilares del suelo para que retengan agua a capacidad de campo y en el punto de marchitamiento permanente:

$$h_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \Rightarrow r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot h_c}$$

donde:

h_c = Ascenso o descenso capilar (m). En este caso se trata de la presión de succión (en metros de columna de agua) a capacidad de campo (33 kPa = 3,37 m.c.a.) y en el punto de marchitamiento permanente (1.500 kPa = 152,96 m.c.a.)

r = Radio del capilar (m) ($2 \cdot r \approx$ Diámetro del poro)

ρ = Densidad absoluta del agua (= 1.000 kg·m⁻³)

g = Aceleración de la gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

θ = Ángulo de contacto del menisco con el capilar (se supone 0° en los cálculos que siguen)

σ = Coeficiente de tensión superficial del agua, que a 15°C es $73,49\cdot10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$.

Introduciendo los datos en la ecuación, se obtiene que la porosidad útil es la compuesta por poros de diámetro comprendido entre $0,1960\ \mu\text{m}$ (punto de marchitamiento permanente) y $8,90\ \mu\text{m}$ (capacidad de campo). Las simplificaciones realizadas para obtener estos valores a través de la ley de Jurin, permiten redondear estas cifras orientativas a $0,2$ y $9\ \mu\text{m}$ (Gandullo, 1985).

Por lo tanto:

$$p_u = \frac{V_u}{V_T}$$

donde:

p_u = Porosidad útil (tanto por uno)

V_u = Volumen de huecos entre $0,2$ y $9\ \mu\text{m}$ de diámetro

V_T = Volumen total.

B) La altura de los muretes

La altura de los muretes del microembalse y la profundidad del suelo (del subsolado, de las raíces) son variables que deben estar relacionadas (Martínez de Azagra & Mongil, 2001):

$$H \Leftrightarrow p$$

Si se asocia el criterio edáfico explicado anteriormente con el nuevo concepto de porosidad útil, obtenemos la siguiente igualdad (que se explica gráficamente en la figura 3.4):

$$\text{Volumen del alcorque lleno} = \text{Volumen de poros útiles}$$

desarrollando:

$$S_2 \cdot H = S_3 \cdot h \cdot p_u$$

siendo:

$$S_2 = \text{Área de recepción (m}^2\text{)}$$

$$H = \text{Altura de los muretes (m)}$$

$$S_3 = \text{Área que en proyección horizontal ocupa el bulbo húmedo (m}^2\text{), siendo}$$

$S_3 \geq S_2$. El “bulbo húmedo” es el nombre que recibe en la terminología del riego localizado el volumen de suelo humedecido por un emisor (Fuentes, 1998). Llevado este concepto a las cosechas de agua, la región húmeda del suelo posee una gran importancia, pues en ella se desarrolla el sistema radical de las plantas. Su forma depende del movimiento del agua en el suelo, que a su vez está condicionado por:

- Textura del suelo.- En suelos arenosos, con gran cantidad de poros grandes, el agua circula con mayor facilidad verticalmente, mientras que en suelos arcillosos el agua se extiende con más facilidad horizontalmente. En consecuencia, en suelos arenosos el bulbo tiene forma alargada y en suelos arcillosos tiene forma achatada (véase la figura 3.3).

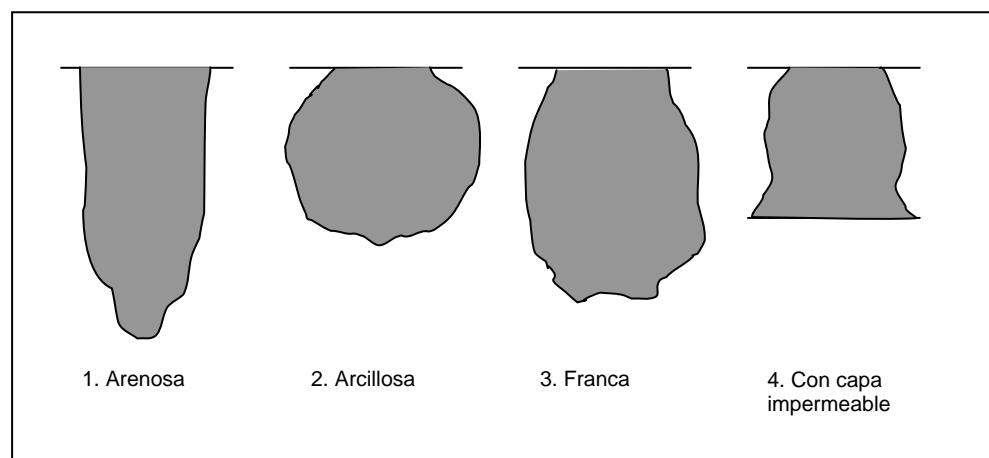


Figura 3.3. Formas de los bulbos húmedos en función de la textura del suelo (arenosa, arcillosa y franca). La situación 4 se produce cuando existe una capa impermeable a poca profundidad, que interviene en el movimiento vertical del agua y provoca un ensanchamiento lateral del bulbo (Medina, 2000)

- Intensidad de precipitación.- Transcurrido un cierto tiempo desde el inicio de la lluvia (o del riego), se forma un pequeño charco en la superficie del suelo, infiltrándose el agua en toda la superficie del mismo. El tamaño del charco depende de la intensidad de lluvia: a mayor intensidad mayor será la superficie del charco y, por tanto, el bulbo estará más extendido en sentido horizontal.
- Duración del aguacero.- Suponiendo una intensidad de lluvia constante, a medida que aumenta la duración del aguacero (o riego) el bulbo húmedo aumenta en profundidad, pero apenas aumenta su extensión en sentido horizontal. Sin embargo, con duraciones largas de aguacero no se aprovecha mejor el agua, pues la parte más importante de la masa radicular está en la parte de arriba (Medina, 2000).

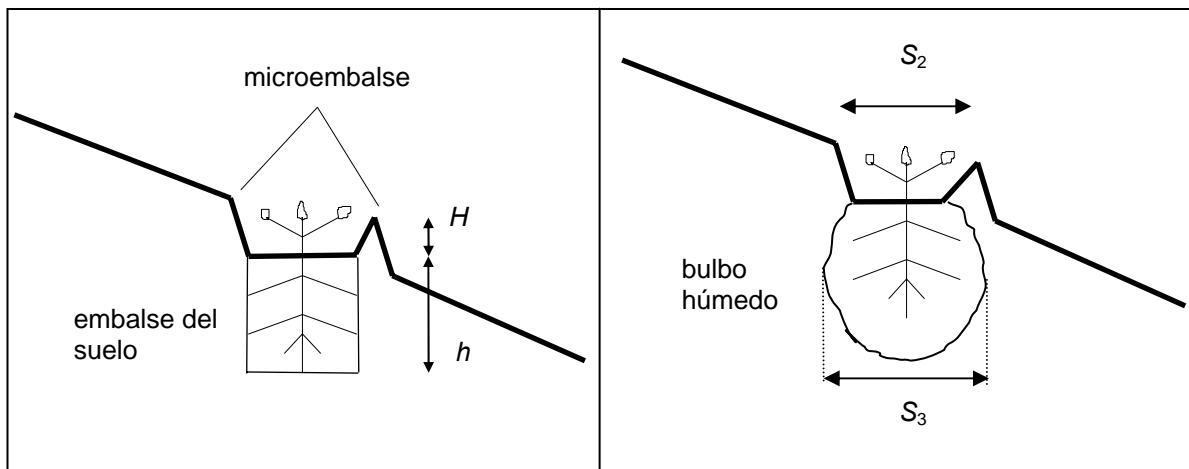


Figura 3.4. Explicación gráfica del criterio edáfico de la porosidad útil

h = Profundidad del “embalse del suelo” (m). Para la elección de esta profundidad pueden seguirse tres criterios diferentes:

- 1º Profundidad del sistema radical. En un principio, la profundidad a la que llegan las raíces en 2 ó 3 años parece un criterio acertado. No obstante, es posible que sea necesario un afinamiento mayor, debido a que la instalación de la repoblación no puede darse por asegurada con esa edad de las plantas, a que la vida útil de la preparación del suelo se estima en 10 años y porque las raíces pueden tomar agua gracias a otros fenómenos, como se indica a continuación.
- 2º Profundidad actual del sistema radical más el efecto de la capilaridad. Ya que mediante este fenómeno físico se pone a disposición de las plantas una cierta cantidad de agua del suelo que no está en contacto directo con las raíces en un principio, lo que equivale a una extensión de las raíces.
- 3º Profundidad necesaria para el desarrollo normal del repoblado. Acudiendo a la bibliografía o mediante experimentación puede conocerse la profundidad de suelo necesaria para un adecuado desarrollo de los sistemas radicales del repoblado. Así por ejemplo, Montoya (1996) indica que para el establecimiento adecuado de una repoblación de *Quercus* es preciso disponer de una profundidad de suelo fácilmente accesible por las raíces de 1,2 a 1,5 m. Esta profundidad tiene relación con la forma en que se desarrolla el sistema radical. En este sentido, el mencionado autor señala que las especies del género *Quercus* se caracterizan por un sistema radical vertical y pivotante, cuyo eje principal profundiza rápidamente. Datos similares para otras especies del Arido Español pueden encontrarse en Carreras *et al.* (1996).

p_u = Porosidad útil (en tanto por uno).

Despejando la altura de los muretes:

$$H = \frac{S_3}{S_2} \cdot h \cdot p_u$$

Como $S_3 \geq S_2$,

$$H \geq h \cdot p_u$$

Mediante esta inecuación, es posible calcular la altura de los muretes del microembalse a través de dos variables, que son la porosidad útil del suelo y la profundidad del mismo que se considere deba contener agua utilizable por las plantas.

Por último, hay que advertir que la determinación del tamaño de los poros es compleja, efectuándose mediante el método del porosímetro, basado en la intrusión con mercurio con muestras secas al aire (Klock *et al.*, 1969; citado por Porta *et al.* 1999 y por Boersma *et al.*, 2001). Por razón de esta complejidad, la aplicación para el criterio edáfico de la porosidad útil se presenta como difícil a nivel práctico. No obstante, a falta de metodologías más exactas, como una aproximación de la porosidad útil puede utilizarse la retención específica, explicada anteriormente. En este caso se estaría del lado de la seguridad, ya que se sobredimensionaría el microembalse.

4.1.3.4. CRITERIO ECOLÓGICO

En una repoblación forestal, si las plantas arraigan y se desarrollan de forma adecuada, con el paso del tiempo la evolución progresiva de la vegetación lleva emparejada una mejora en las condiciones hídricas y edáficas (Martínez de Azagra, 1996). Estas evoluciones paralelas pueden observarse de forma gráfica en las figuras 3.5 y 3.6. La mejora edáfica se manifiesta por ejemplo en un incremento de la capacidad de infiltración, que implica una disminución del número de curva, lo que puede cuantificarse mediante las tablas III.5 y III.6 del anexo III. Se trata, por lo tanto, de conseguir gracias a la preparación del suelo un salto en el número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ), que puede llegar incluso a igualar al número de curva clímax ($N_{mín}$), es decir, el número de curva de la vegetación climática de la zona:

$$NAC > NEQ \geq N_{mín}$$

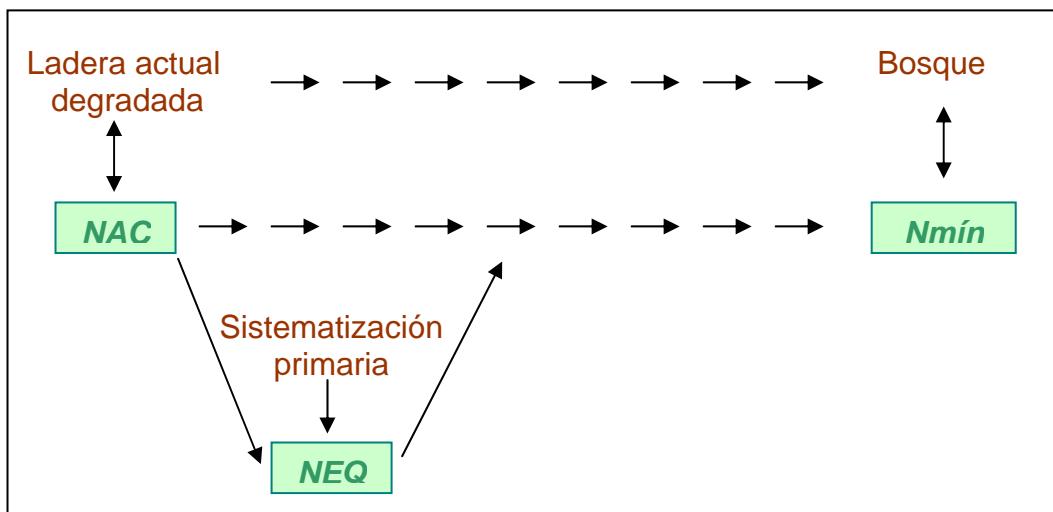


Figura 3.5. Serie progresiva del número de curva (Martínez de Azagra, 1996)

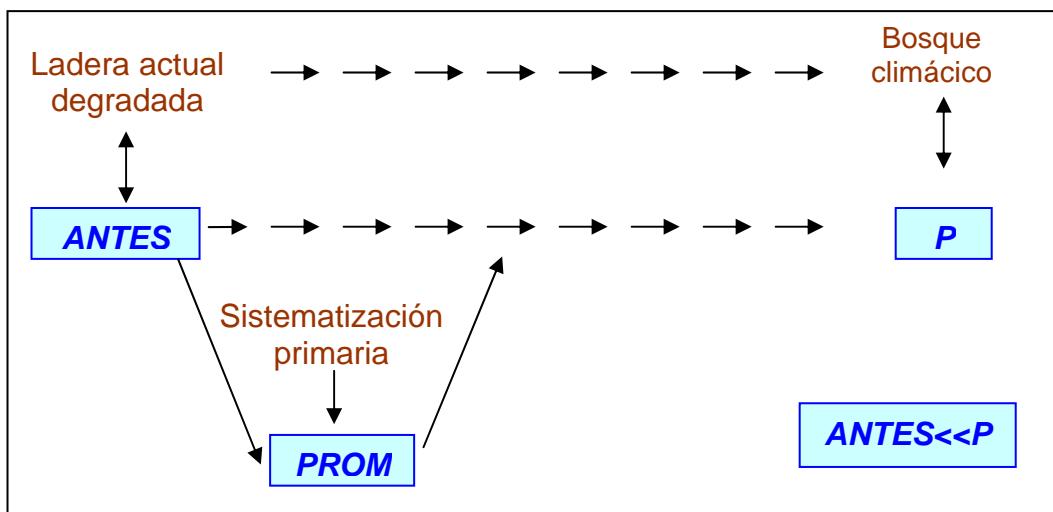


Figura 3.6. Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (Martínez de Azagra, 1996)

Al mismo tiempo, las disponibilidades hídricas en la ladera degradada que inicialmente eran de cuantía muy escasa –variable denominada ANTES en MODIPÉ, pasan a suponer la totalidad de la precipitación cuando se llega a restaurar totalmente el ecosistema, es decir, cuando se llega al bosque climático.

La determinación del número de curva para la vegetación climática de la ladera o, simplemente, el de la formación forestal a conseguir con la repoblación proyectada, transcurrido un cierto tiempo desde la instalación (por ejemplo, 50 años), requiere de mediciones en laderas de la zona de estudio con una vegetación similar a la que se pretende conseguir, y la aplicación de las tablas del número de curva (a este respecto puede consultarse el anexo III). Algunos ejemplos de números de curva en formaciones forestales de zonas semiáridas pueden observarse en la tabla 3.1.

3. Metodologías

Tabla 3.1. Números de curva para formaciones forestales típicas en las laderas de la provincia de Valladolid, obtenidos mediante muestreros aleatorios y utilizando el nomograma de Morey (1955)

FORMACIÓN	LOCALIDAD	N
Bosque denso mixto de encinas, quejigos y enebros (vegetación potencial)	-	44
Pinares de <i>P. pinea</i> de repoblación en estado de monte bravo ($Fcc=50-75\%$)	Camporredondo	70
Montes bajos de <i>Quercus ilex</i> ($Fcc=50\%$)	Villanueva de los Infantes	76
Pinar de <i>Pinus halepensis</i> sobre suelos de arcillas y conglomerados, $Fcc=90-100\%$	Valladolid	52
Pinar de <i>Pinus halepensis</i> bien desarrollado y alta densidad ($Fcc = 80-90\%$) sobre margas calizas o yesosas	Geria	63
Pinares naturales de <i>Pinus pinea</i> en cuestas margosas, con <i>Quercus faginea</i> (5-20%) y <i>Q. ilex</i> (0-5%)	Portillo	63
Monte bajo y alto de <i>Q. faginea</i> , con $Fcc=10-80\%$	Zaratán	63
Monte claro ($Fcc=25-50\%$) de <i>Q. ilex</i> (75%) y <i>Q. faginea</i> (25%) de porte medio y bajo	Villanueva de los Infantes	69
Enebrales de <i>Juniperus thurifera</i> en laderas margosas, con presencia de <i>J. communis</i> , <i>Pinus pinea</i> y <i>Rosa canina</i> . $Fcc=25-50\%$	Aldealbar	70
Pinar de <i>P. halepensis</i> bien desarrollado sobre suelo de margas calizas o yesosas, un año después de tratamiento selvícola (poda y clareo)	Geria	76
Pinar de <i>P. halepensis</i> de escaso desarrollo y baja densidad ($Fcc < 25\%$) sobre margas calizas o yesosas	Geria	84

Fcc = Fracción de cabida cubierta; N = Número de curva.

El rango de variación del número de curva entre la situación actual degradada (N_{AC}) y la situación final restaurada (N_{min}) puede ser muy amplio, partiendo de una ladera gravemente degradada y llegando a la restauración plena de la misma después de un determinado número de años. Según las tablas del número de curva para zonas no urbanas, el mayor cambio posible va de 94 a 15. No obstante, un intervalo más realista para un periodo de tiempo normal (como el mencionado de 50 años), puede ser de 94 a 54, correspondiente respectivamente con un barbecho sobre suelo de tipo D y un bosque en condición hidrológica muy buena sobre suelo de tipo C.

A cada número de curva N le corresponde un umbral de escorrentía P_0 , que se define mediante la ecuación siguiente:

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

De esta manera se pueden obtener los umbrales de escorrentía tanto para la ladera actual degradada (P_{AC}) como para la ladera restaurada ($P_{máx}$). Estos valores pueden ser relacionados fácilmente con la serie histórica de precipitaciones de la localidad y su correspondiente recurrencia o periodo de retorno (véase la tabla 3.2). Si el nivel de degradación de la ladera es elevado, el umbral de escorrentía será tan bajo que t representará el número de veces al año en que se produce escorrentía. Por contra, T puede significar un periodo de retorno muy extenso, situación en la cual el suelo de la ladera restaurada funciona como un perfecto sumidero de agua: todo lo que llueve se infiltra o es interceptado, lo que implica una mayor cantidad de agua en el suelo y también la recarga de los acuíferos.

Tabla 3.2. Número de curva y umbral de escorrentía, con sus correspondientes períodos de retorno, para la ladera actual y la restaurada

SITUACIÓN	NÚMERO DE CURVA	UMBRAL DE ESCORRENTÍA	PERÍODO DE RETORNO
Ladera actual	N_{AC}	P_{AC}	t
Ladera restaurada	N_{min}	$P_{máx}$	T

3.1.3.5. CRITERIO FISIOLÓGICO

El objetivo de este criterio es elegir el tamaño del microembalse de tal forma que sea capaz de almacenar y suministrar un “caudal regulado” equivalente a la evapotranspiración que se produce a lo largo del año. Es decir, se trata de cubrir las necesidades fisiológicas de agua de la repoblación (de ahí el nombre del criterio) con el agua aportada por el alcorque. En este apartado se establece un paralelismo entre un embalse para el abastecimiento de agua de riego o uso humano y un microembalse para repoblación forestal, adaptando para el diseño de este segundo los métodos más habituales de dimensionado del primero (métodos hidráulicos de regulación).

3.1.3.5.1. Aportaciones frente a demandas anuales

A) Identificación y determinación de las variables

En todos los métodos que calculan la capacidad que debe tener un embalse intervienen dos grupos de variables: las aportaciones (A) y las demandas (D). Existen claras diferencias en los componentes de estas variables según se trate de diseñar un embalse o, como es nuestro objetivo, un microembalse para repoblación forestal. En el caso de un embalse habitual, las demandas a considerar serán las necesidades de los regadíos o de consumo humano, mientras que las aportaciones estarán constituidas por el caudal que llega al pantano. En una repoblación forestal, sin embargo, el microembalse deberá compensar con precipitación y recolección de agua las necesidades hídricas de la planta a instalar:

- Aportaciones

Como se muestra en la figura 3.7, que representa el balance hídrico en una ladera con microembalse, las aportaciones que alimentan al alcorque son las precipitaciones sobre el área de recepción (P) y la escorrentía que llega a dicha área (E_{s1}); recursos que hay que corregir, no obstante, con la intercepción (I_t), la evaporación física desde la superficie del suelo (E) y la escorrentía que escapa de la unidad sistematizada (E_{s2}):

$$A = P + E_{s1} - (I_t + E + E_{s2})$$

De todas estas componentes se pueden despreciar la intercepción y la evaporación, por ser de poca cuantía respecto al resto. Tampoco debe ser tenida en cuenta la escorrentía que escapa de la unidad sistematizada, ya que la finalidad del microembalse es retener todo el agua de lluvia y la escorrentía dentro de la unidad. Así pues:

$$A = P + E_{s1} \text{ en } l \cdot m^{-2} \text{ ó bien}$$

$$A = P \cdot S_2 + E_{s1} \cdot S_1 \text{ en } l$$

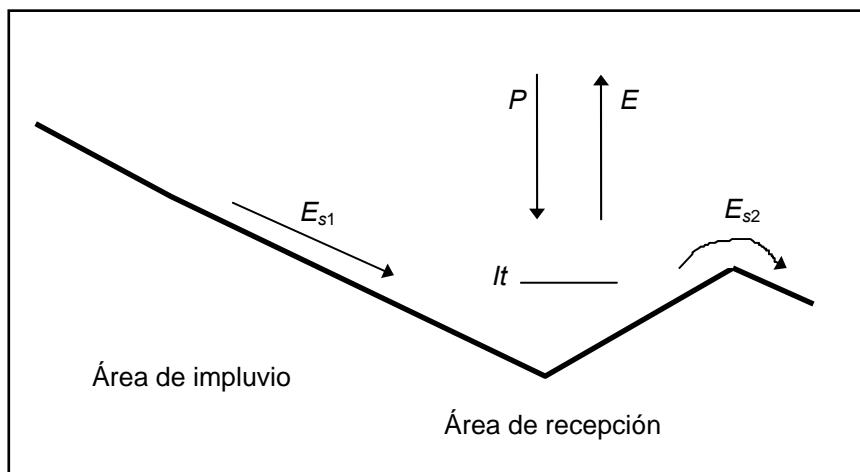


Figura 3.7. Balance hídrico en una ladera con microembalse

- Demandas

El microembalse deberá proporcionar a las plantas un “caudal regulado” igual a las necesidades fisiológicas de agua de la misma. La estimación de estas necesidades es quizás uno de los puntos débiles de los modelos sobre cosechas de agua existentes. En algunos casos, la falta de criterios científicos plenamente contrastados lleva a establecer unos valores empíricos orientativos (Critchley & Siegert, 1991).

Los requerimientos hídricos de los cultivos agrícolas han sido ampliamente estudiados en los numerosos trabajos publicados sobre diseño agronómico de riegos. En cuanto a especies forestales la situación es bien diferente. Ya sea por las carencias investigadoras existentes en el sector, o por la poca importancia que la mayor parte de los científicos forestales han dado a este tema hasta el momento, no se encuentran suficientes estudios al respecto.

No obstante, tanto para cultivos agrícolas como para repoblaciones forestales, los autores coinciden en que la evapotranspiración, es decir, la pérdida de agua en forma de vapor a través de la vegetación y desde la superficie del suelo hacia la atmósfera, resulta fundamental para el conocimiento de las necesidades hídricas de las plantas (Montero de Burgos & González Rebollar, 1983).

Los vegetales pierden por transpiración, fundamentalmente a través de los estomas de las hojas, la práctica totalidad del agua que absorben por las raíces. El

sistema suelo-planta-atmósfera se considera como un continuo hidrodinámico, en el que el agua fluye a favor del gradiente de los potenciales hídricos (de más a menos potencial). Este proceso de absorción y pérdida de agua está controlado fundamentalmente por las raíces y los estomas de las plantas (Sánchez-Toribio, 1992).

La evapotranspiración potencial (*ETP*) se define como el agua que retorna a la atmósfera en forma de vapor a partir de un suelo completamente cubierto de vegetación y suponiendo que no existe limitación de humedad en el suelo, es decir, en el que exista plena disponibilidad hídrica (Martínez de Azagra & Navarro, 1996). Es, por lo tanto, un límite superior de la evapotranspiración real (*ETR*) que realiza una determinada vegetación:

$$ETR \leq ETP$$

$$ETR = ETP \cdot k_c$$

Siendo k_c el denominado coeficiente de cultivo, que será menor o igual a uno. Se trata, por lo tanto, de fijar ese coeficiente que permita transformar la evapotranspiración potencial (hallada por medición directa o por los métodos más usuales: entre otros, Thorthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Turc (1961), todos ellos citados por Sánchez-Toribio (1992)) en la evapotranspiración real necesaria para la vegetación. En este sentido, existen en la bibliografía valores orientativos de coeficientes de cultivo para diversas especies, pero no existen datos acerca de las especies más interesantes para la restauración de la vegetación en zonas áridas y semiáridas. En la tabla 3.3 se ofrecen algunos valores de k_c correspondientes a especies agrícolas leñosas, con ecología similar a la de las especies que pueden utilizarse en repoblaciones.

Tabla 3.3. Coeficientes de cultivo (k_c) para algunas especies ecológicamente próximas a las que pueden utilizarse en repoblaciones forestales en zonas áridas y semiáridas

ESPECIE	k_c	FUENTE
Olivo	0,55	Fuentes & Cruz (1990)
Olivo	0,4-0,6	Velasco-Molina (1991)
Olivo	0,45-0,65	Barranco <i>et al.</i> (2001)
	0,6-0,75	
	0,55-0,65	
	0,75	
Vid	0,5 al principio y final del periodo, 1 en la mitad	Fuentes & Cruz (1990)
Vid	0,55-0,75	Velasco-Molina (1991)
Almendro y otros frutales	0,85 al principio y final del periodo, 1,15 en la mitad	Fuentes & Cruz (1990)
	0,50 al inicio, 0,90 en la mitad y 0,65 al final	

Sin embargo, la exigencia de evapotranspiración real que se acaba de establecer resulta excesiva, especialmente en algunas épocas del año, por tratarse de una repoblación forestal y no de un cultivo agrícola a plena actividad vegetativa. En este sentido es útil acudir a la definición de evapotranspiración residual (e), que es la evapotranspiración cuando la savia se para (la actividad vegetativa se detiene) por razón de la sequía (Montero de Burgos & González Rebollar, 1983). Según estos autores puede considerarse que la relación entre la evapotranspiración potencial y la residual es constante y próxima a 0,2:

$$\frac{ETP}{e} = \varphi \approx 0,2$$

$$e = ETP \cdot \varphi$$

Para un año completo, puede afirmarse que la evapotranspiración real de la repoblación (ET_{rep}) se sitúa entre dos límites:

$$ETP \cdot k_c \geq ET_{rep} \geq ETP \cdot \varphi$$

Y si se necesita una mayor precisión, es posible establecer un patrón como el que sigue:

- Meses de invierno, siempre que $P \geq ETP$: $ET_{rep} = ETP$
- Meses de primavera (2 meses), una vez que $P < ETP$: $ET_{rep} = ETP \cdot k_c$
- Meses de verano y otoño, hasta que de nuevo $P \geq ETP$: $ET_{rep} = ETP \cdot 0,2$

De este modo, los arbolillos crecerán moderadamente durante los dos meses de primavera y sobrevivirán el resto del verano.

Para la aplicación de los métodos que se explicarán posteriormente, es preciso referir las demandas calculadas en $l \cdot m^{-2}$ a una determinada superficie para que aparezcan en litros. Esta superficie es la de la proyección de la copa de la planta al final de la vida útil de la sistematización (unos 10 años), que se halla por observación de repoblaciones análogas de la misma especie (en la tabla 3.4 se muestran algunos ejemplos). Por lo tanto, las demandas se obtendrán mediante el producto de la evapotranspiración real de la repoblación y la mencionada superficie:

$$D = ET_{rep} \cdot S_{copa10}$$

Tabla 3.4. Valores orientativos de superficie de copa a los 10 años, de varias especies utilizadas en repoblaciones forestales

ESPECIE	$S_{copa10} (m^2)$	s	n	LOCALIZACIÓN
<i>Pinus halepensis</i>	0,71	0,54	24	Velliza (Valladolid)
<i>Pinus halepensis</i>	0,48	0,46	16	Pedrajas (Valladolid)
<i>Rosmarinus officinalis</i>	0,94	0,70	15	Velliza (Valladolid)
<i>Cupressus arizonica</i>	0,16	0,14	12	Velliza (Valladolid)

S_{copa10} = Superficie de copa a los 10 años; s = Desviación típica; n = Tamaño de la muestra.

B) Método de diagrama de masa

Éste es un método sencillo de dimensionado hidráulico de embalses, desarrollado por Rippl (1883) (citado por Zapata, 2001). También es utilizado en zonas residenciales de regiones secas de Colombia para el diseño de aljibes (Materón, 1997).

Una vez determinadas para cada mes las aportaciones y las demandas, se elabora una tabla de cuatro columnas que contiene la siguiente información:

- 1) Aportaciones mensuales.
- 2) Demandas mensuales.
- 3) Diferencias entre las demandas y las aportaciones.
- 4) Diferencias positivas acumuladas de la columna anterior.

El mayor valor de esta última columna representa el volumen máximo necesario para satisfacer la demanda y, por lo tanto, será el volumen que deberá tener el microembalse a construir.

C) Método gráfico de diferencias acumuladas

Este método determina también la máxima desviación entre las curvas de demandas y de aportaciones. Es una de las metodologías más empleadas en el dimensionado de embalses para el abastecimiento de poblaciones y riego (Heras, 1983; Rodríguez *et al.*, 1988).

En primer lugar, se dibujan las curvas de aportaciones acumuladas (A_A) y demandas acumuladas (D_A), que en el caso que nos ocupa serán variables a lo largo del año (mes a mes). Para que la repoblación pueda llegar a establecerse con éxito, las aportaciones deben ser superiores a las demandas en todo momento, lo cual puede conseguirse con el manejo de la escorrentía formada en el área de impluvio (E_{S1}): se incrementará la aportación si se aumenta dicha superficie, o también si se hace mayor el tamaño del microembalse, evitando vertidos ($E_{S2} = 0$).

A continuación se dibuja un nuevo gráfico, en el que se representan en el eje de ordenadas las diferencias entre las aportaciones acumuladas y las demandas acumuladas en cada momento ($A_A - D_A$). En este gráfico, cuando la curva crece las aportaciones superan a las demandas y lo contrario ocurre cuando la curva decrece. Durante los tiempos correspondientes a dichos decrecimientos las diferencias aportaciones-demandas hay que compensarlas con desembalses sucesivos de un determinado volumen de agua. El mayor de estos volúmenes será la capacidad de embalse necesaria para poder hacer frente a la demanda solicitada.

3.1.3.6. LIMITACIÓN FISIOLÓGICA POR ENCHARCAMIENTO

En suelos muy impermeables, y después de aguaceros de gran intensidad o larga duración, o temporadas de elevada y continua precipitación, las preparaciones del terreno en repoblaciones pueden quedar completamente anegadas, con el consiguiente perjuicio para las plantas recién instaladas. Por ejemplo, el periodo comprendido entre septiembre de 2000 y marzo de 2001 en la provincia de Valladolid fue muy lluvioso, siendo la precipitación registrada en estos siete meses en la estación de Geria³ de 507,4 mm (la precipitación anual media es de 450 mm). Las repoblaciones realizadas en esta provincia sobre suelos arcillosos o margosos sufrieron un elevado porcentaje de marras debido al encharcamiento prolongado en preparaciones de ahoyado y subsolado. Las continuadas lluvias terminaron por matar a las plantas por exceso de humedad, por falta de oxígeno en el sistema radical. Por este motivo, se plantea la necesidad de establecer una limitación fisiológica fundamentada en la reducción tanto del tiempo máximo de embalse de agua como del tiempo máximo mensual de encharcamiento, para evitar problemas de anoxia de las raíces.

El tiempo máximo de embalse puede definirse como el tiempo durante el cual existe agua en el microembalse tras un aguacero copioso. Se puede estimar suponiendo el microembalse lleno y una tasa de infiltración mínima, mediante la inecuación:

$$T_{\max} \leq \frac{H}{f_{\min}}$$

siendo:

- T_{\max} = Tiempo máximo de embalse después de un episodio de lluvia (h)
 H = Altura de los muretes del microembalse (aproximadamente igual a CAPA/S₂) (en cm)
 f_{\min} = Tasa de infiltración mínima del suelo en el área de recepción (cm·h⁻¹).
Coincide con el parámetro f_c del modelo de infiltración de Horton (1940).
Este parámetro se estima a partir de la permeabilidad, utilizando la

³ Información sobre la localización de esta estación termopluviométrica puede consultarse en el apartado 4.1.

relación orientativa propuesta por Bouwer (1966) (citado por Martínez de Azagra, 1995b):

$$f_{min} = 0,5 \cdot k$$

Donde k es la permeabilidad o conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable del perfil, que puede estimarse, en una primera aproximación y para terrenos sin pedregosidad, a partir de los datos de textura del horizonte (véase la figura 3.8).

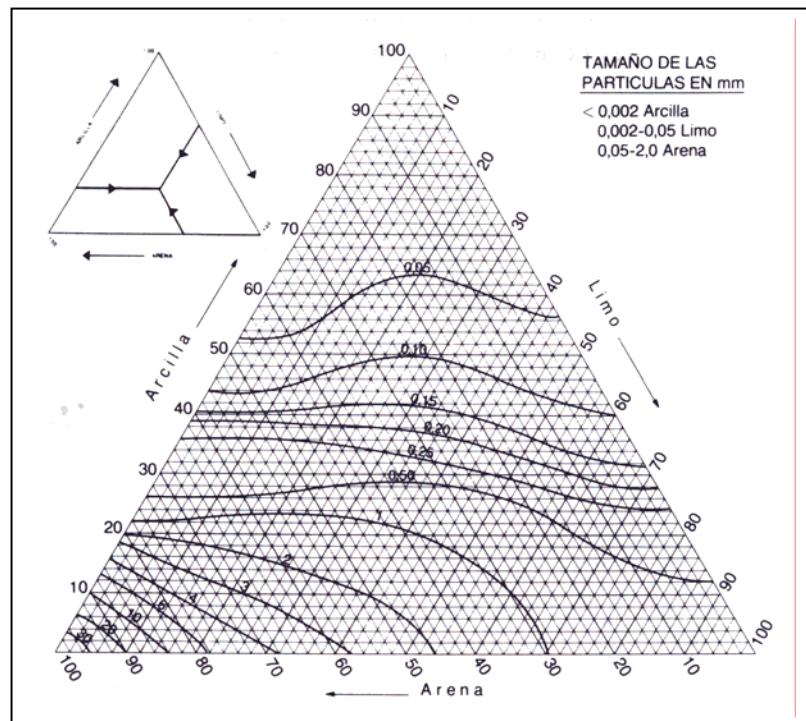


Figura 3.8. Conductividad hidráulica a saturación ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) en función de la granulometría del horizonte

Este concepto de conductividad hidráulica saturada es de vital importancia en estudios en los que se deba tener en cuenta la infiltración. Por ello, en la tabla 3.5 se dan unas orientaciones sobre este parámetro que pueden relacionarse inmediatamente con el tiempo de embalse de una preparación del terreno.

Tabla 3.5. Interpretación de la conductividad hidráulica saturada, según FAO (1963) y Kutílek & Nielsen (1994); (modificada de Porta *et al.*, 1999)

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm·h ⁻¹)		INTERPRETACIÓN
FAO (1963)	Kutílek & Nielsen (1994)	
< 0,08	< 0,04	Muy baja
0,08-2,09	0,04-0,36	Baja
2,09-5,76	0,36-3,60	Media
5,76-7,92		Media-Alta
7,92-2,60	3,60-36,00	Alta
> 12,60	> 36,00	Excesiva

En otro orden de cosas, también debe ponerse un límite al tiempo máximo mensual de encharcamiento, que será un porcentaje del tiempo total del mes:

$$t_{máx} = \frac{DESP}{f_{mín}}$$

$$X = \frac{t_{máx}}{720} \cdot 100$$

expresión en la que:

$t_{máx}$ = Tiempo máximo mensual de encharcamiento (h)

$DESP$ = Disponibilidad hídrica del área de recepción (mm)

$f_{mín}$ = Tasa de infiltración mínima del suelo en el área de recepción (mm·h⁻¹)

X = Tiempo máximo mensual de encharcamiento (%).

Este porcentaje del tiempo del mes puede fijarse con carácter orientativo, por ejemplo, en un 50 % (360 horas) si las plantas se encuentran en parada vegetativa, o en un 20 % (144 horas) si están en plena actividad fisiológica. Pero, como es lógico, estos límites deben ajustarse a tenor de investigaciones que puedan desarrollarse en este sentido o según la experiencia del técnico.

A nivel práctico, además de limitar el tamaño del microembalse, es muy recomendable plantar en un alturón o isleta de tierra –es decir, por encima del nivel general del suelo-, en vez de hacerlo en la parte baja del alcorque, para paliar el efecto de los encharcamientos. Así lo recomienda también García Salmerón (1991), indicando para tal fin labores mecanizadas (como caballones o albitanas) o manuales (como simples montículos).

3.1.3.7. CRITERIO PAISAJÍSTICO O TOPOGRÁFICO

A) Impacto paisajístico de las preparaciones del terreno

Algunas técnicas de preparación del terreno en repoblaciones forestales han sido muy criticadas debido al negativo efecto paisajístico que provocan. Las labores que constituyen la repoblación afectan al paisaje de modos diversos, desde el impacto prácticamente nulo de hoyos de pequeña dimensión hasta la importante alteración generada por las terrazas (González Alonso, 1998). En el caso de esta última técnica, Serrada (1993) afirma que produce un impacto paisajístico elevado y duradero, motivo por el cual se ha convertido en una de las técnicas que mayor rechazo social ha provocado, dándose la circunstancia, además, de que se utilizó de forma generalizada en repoblaciones de los años 70 y 80, y no siempre con los resultados esperados. Chaparro *et al.* (1993), analizando aterrazados del sureste español, concluyen que la geomorfología de la ladera se ve alterada no sólo con la ejecución de las terrazas, sino también por posteriores procesos erosivos que se han observado en muchos casos.

Los principales efectos que causa la preparación del terreno sobre el paisaje son las siguientes (González Alonso, 1998):

- Dejar al descubierto el suelo o la roca que antes permanecían ocultos, como en el caso de producirse remoción del suelo, eliminación de la vegetación o aportes en el perfil del terreno.
- Modificar la forma topográfica de la ladera alterando su perfil, por aterrazados, modificación o destrucción de la red de drenaje o vaguadas, etc.

Lo que sí parece evidente, es que interesa alterar el relieve natural lo mínimo indispensable para invertir el proceso de desertificación (Martínez de Azagra & Mongil, 2001). Es obligado, por lo tanto, reducir al máximo el movimiento de tierras, con el objetivo de minimizar los impactos negativos sobre el paisaje y sobre el suelo que se provocan con la remoción del suelo, pero siempre asegurando la instalación del repoblado. Y ello se consigue basando el dimensionado de la preparación en la economía del agua (Martínez de Azagra *et al.*, 2002). De hecho, los criterios desarrollados en este trabajo van encaminados a reducir el microembalse a un tamaño mínimo.

B) Atenuación del relieve artificial

Cuando se diseña una sistematización primaria, es importante comprobar si el microrrelieve artificial queda atenuado a los pocos años de realizada la intervención. Para tal fin, se puede acudir a algún modelo de erosión hídrica, por ejemplo la ecuación USLE, admitiendo que el alcorque es una perfecta trampa de sedimentos (que de hecho lo será mientras haya endorreísmo).

El modelo USLE (*Universal Soil Loss Equation*) fue enunciado de forma definitiva por Wischmeier & Smith (1978), siendo la ecuación fundamental la siguiente:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

- A = Valor promedio de las pérdidas de suelo anuales ($t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)
 R = Factor de erosividad de la lluvia y la escorrentía, o índice de erosión pluvial ($\text{hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
 K = Factor de erosionabilidad del suelo ($t \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
 L = Factor longitud de la ladera (adimensional)
 S = Factor pendiente de la ladera (adimensional)
 C = Factor cubierta vegetal o cultivo (adimensional)
 P = Factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)

La explicación detallada de estos factores puede consultarse en Almorox *et al.* (1994), Morgan (1997) y Navarro (2002), entre otros, o en el anexo IV de este trabajo. Además del modelo mencionado, pueden aplicarse también otros métodos como la RUSLE (Renard *et al.* 1997).

A partir de la USLE, se puede llegar a una ecuación que estima la cantidad de sedimentos que, después de ser removidos del área de impluvio, se depositan en el microembalse durante la vida útil de la sistematización:

$$A_1 = \frac{R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot t \cdot S_1 \cdot 100}{\delta} \cdot (1 - C_e)$$

Siendo:

A_1 = Volumen de sedimentos que se depositan en el microembalse durante la vida útil de la sistematización (l)

R, K, L, S y C son los factores de la USLE, comentados anteriormente. Se ha omitido el factor de prácticas de conservación de suelos (P), pues toma como valor la unidad en este caso (véase el anexo IV).

t = Lapso de tiempo en el que se desea que el relieve artificial quede completamente atenuado o vida útil de la sistematización primaria (años)

S_1 = Superficie del área de impluvio (m^2)

δ = Densidad aparente de los sedimentos removidos, transportados y depositados en S_2 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Para determinar con exactitud esta densidad, hay que realizar mediciones en campo mediante el método tradicional de cilindros de acero. Si esto no fuera posible, pueden tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- La densidad de los sedimentos removidos es menor que la densidad aparente del suelo natural, con la única salvedad de las costras o tastanas, que pueden tener una densidad aparente superior a la del suelo natural.
- Aunque sea una aproximación un tanto grosera, la densidad aparente de los sedimentos rondará los $1.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Puede acudirse a valores orientativos que aparezcan en la bibliografía o en trabajos desarrollados en las cercanías del área de trabajo. Por ejemplo, en un estudio desarrollado en la comarca semiárida del Cerrato palentino se han obtenido densidades de $970 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para sedimentos cuaternarios (procedentes de la meteorización de unas margas miocénicas pliocuaternarias con una densidad aparente original de $1.700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Navarro, 2002).

C_e = Coeficiente de emisión de sedimentos (en tanto por uno). Este coeficiente cuantifica los sedimentos que escapan del microembalse. Si, como se pretende, existe endorreísmo en la unidad sistematizada, el coeficiente de emisión es nulo, es decir, todos los sedimentos que llegan al área de recepción se quedan en ella.

Para determinar el volumen máximo que puede tener el microembalse, se impone la siguiente condición:

$$\text{CAPA} \leq A_1$$

De esta forma se asegura que la preparación del suelo quede completamente atenuada al quedar el microembalse colmatado de sedimentos.

3.1.3.8. CRITERIOS MECÁNICOS

Cuando se prepara una sistematización primaria, debe asegurarse siempre la estabilidad y estanqueidad de los muretes de tierra, así como diseñar los muretes teniendo en cuenta el asentamiento de la tierra removida.

Unos microrrelieves inestables, además de resultar inútiles como trampas de agua, pueden enterrar a los brizales provocando su muerte (Martínez de Azagra & Mongil, 2001). Así mismo, los muretes no deben dejar pasar agua a su través, cuando el microembalse se encuentre encharcado, ya que esto supondría pérdidas de tanpreciado elemento. Tampoco será válida la preparación del terreno si se dimensiona sin considerar que, con el paso del tiempo, verá reducida su altura debido al asentamiento del suelo removido.

3.1.3.8.1. Estabilidad

Las preparaciones del suelo pueden ser de dos tipos: aquéllas que se construyen embutidas en el terreno (una poceta o un surco en trinchera, por ejemplo) y las que están constituidas por muretes o caballones elevados sobre el terreno circundante. Desde el punto de vista de la estabilidad son mucho más seguras las primeras, puesto que los taludes excavados en el terreno natural (desmontes) son más estables que los construidos con tierra transportada (terraplén).

En el caso de los muretes o caballones, para que éstos cumplan su función de forma adecuada, debe evitarse en lo posible su desmoronamiento. La estabilidad viene condicionada por las dimensiones del caballón: pendiente de los taludes, anchura en coronación (e), anchura en la base (b) y altura (H) (véase la figura 3.9).

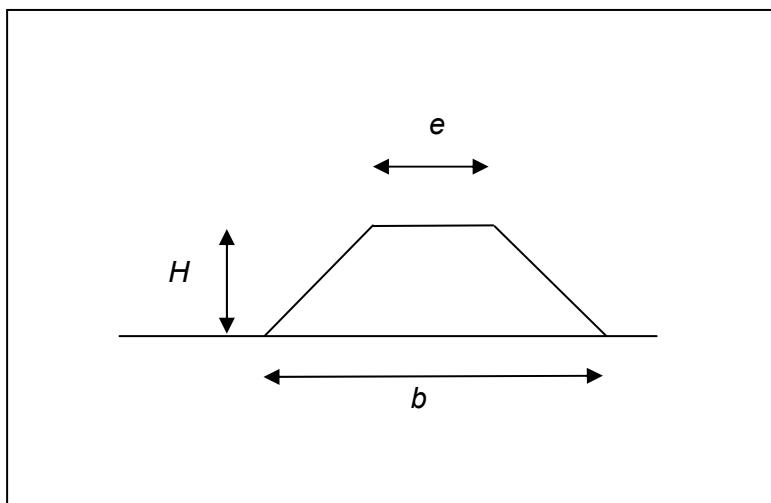


Figura 3.9. Dimensiones de un murete o caballón

Respecto a estas dimensiones pueden hacerse algunas recomendaciones:

- Pendiente de los taludes.- La más recomendable es una pendiente 1:1 (Critchley & Siegert, 1991). Taludes más tendidos no suelen ser necesarios, y sí, en cambio, podrían empinarse más en terrenos arcillosos no conflictivos (hasta llegar por ejemplo hasta 0,5:1).

- Anchura en coronación.- Es aconsejable que se encuentre entre 0,10 y 0,30 m. Critchley & Siegert (1991) recomiendan 0,25 m.

- Anchura en la base.- Se recomienda que sea:

$$b = 2 \cdot H + e$$

- Altura del murete.- No conviene construir caballones menores de 0,25 m, puesto que sería difícil que cumplieran su función. Por otra parte, alturas de murete por encima de 0,75 m no son recomendables porque suponen un riesgo para su estabilidad.

García Salmerón (1995), aplicando la mecánica de suelos al movimiento de tierras que se efectúa en los aterrazados, establece diferentes valores para los ángulos que deben tener los taludes de desmonte y terraplén.

Los ángulos de terraplén deben fijarse en base a las características granulométricas del suelo y de su grado de humedad. Si se denomina i al ángulo de inclinación del talud ($\tan i = \text{altura}/\text{base}$), este ángulo debe ser inferior a un cierto límite llamado ángulo de reposo de tierras, que se define como aquél que toma por sí mismo el material abandonado por tiempo prolongado a la acción de los agentes atmosféricos.

En el diseño de un microembalse y también en su ejecución, conviene determinar el ángulo de inclinación de sus taludes, con el fin de que su funcionamiento hidrológico como elemento óptimo de retención de escorrentía sea compatible con su estabilidad. De esta forma podrá asegurarse que el microembalse cumple su función de forma adecuada durante toda su vida útil. En la tabla 3.7 se dan los valores orientativos del ángulo de inclinación, en función de la naturaleza del suelo y de su grado de humedad.

Tabla 3.7. Ángulos de los taludes de desmonte y terraplén, según la naturaleza del terreno, para suelo seco y húmedo (modificada de García Salmerón, 1995)

NATURALEZA DEL TERRENO	TALUD DE DESMONTE		TALUD DE TERRAPLÉN	
	SUELO SECO	SUELO HÚMEDO	SUELO SECO	SUELO HÚMEDO
Roca dura	80º	80º	45º	45º
Roca blanda o fisurada	55º	55º	45º	45º
Detritus rocosos, guijarros	45º	40º	45º	40º
Suelo adherente con piedra y tierra vegetal	45º	30º	35º	30º
Suelo arcilloso, arcillas, margas	40º	20º	35º	20º
Grava, arena gruesa no arcillosa	35º	30º	35º	30º
Arena fina, no arcillosa	30º	20º	30º	20º

Suelo húmedo: Completamente saturado de agua, por abundantes filtraciones.

Suelo seco: En caso contrario, pero se tiene en cuenta la acción normal de las lluvias.

El grado de humedad es sumamente importante, ya que si el suelo está completamente seco se pueden admitir mayores inclinaciones, que podrían desmoronarse, sin embargo, en la estación húmeda. Este fenómeno se acentúa en el caso de los suelos arcillosos, porque la presencia mayoritaria de esta fracción granulométrica hace que los suelos se mantengan estables en tiempo seco y que sea más fácil su desmoronamiento cuando están embebidos en agua.

Este criterio de estabilidad de los taludes influye directamente en el tamaño del microembalse, ya que si se llega a la conclusión de que la anchura del caballón

resulta exagerada, habrá que reducirla, reduciéndose a la vez su altura y, por tanto, el tamaño del alcorque, como puede observarse en la figura 3.10.

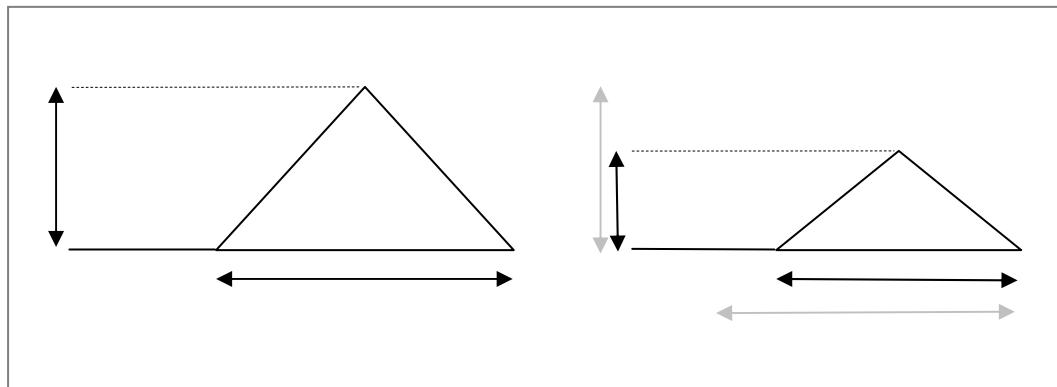


Figura 3.10. Reducción de la capacidad del microembalse buscando una mayor estabilidad del caballón

También por razón de la estabilidad de los muretes, es muy aconsejable compactarlos con el pie en el momento de su construcción o refinado, para consolidar la tierra removida. De esta forma se reducen los asentamientos naturales (que se tratan en el apartado siguiente) y se impide la formación de las peligrosas brechas de agua.

Así mismo, no en todos los suelos se pueden hacer represas. Es imposible hacerlas, por ejemplo, en suelos que contengan una proporción elevada de arcillas expansivas (del tipo de la montmorillonita). Se trata de los denominados vertisoles, con mucha tendencia al agrietamiento por retracción que impide la estanqueidad y pone en riesgo la estabilidad de los muretes. Tampoco se recomienda la formación de caballones en suelos fácilmente erosionables, suelos de estructura pobre o suelos de textura muy arenosa (sin apenas arcilla ni materia orgánica) puesto que las represas se desmoronarían con las primeras lluvias.

3.1.3.8.2. Asentamiento de la tierra removida

Cuando se hacen movimientos de tierra en un terreno natural, el volumen aparente de tierra una vez excavada es mayor. Esta variación de volumen se denomina esponjamiento, y se cuantifica por el coeficiente de esponjamiento (García Salmerón, 1995). Este concepto es en realidad la consecuencia de una separación relativa, mayor que la que tenían en su estado natural, de las distintas partículas que constituyen el suelo; es decir, cuanto más se disgregue mayor será su esponjamiento (Dal-Re, 1994). Por el contrario, si los materiales excavados se abandonan a la acción de los agentes atmosféricos, estos disminuyen de volumen y se asientan, es decir, el coeficiente de esponjamiento disminuye. Estos conceptos intuitivos (visualizados en la figura 3.11) pueden concretarse en forma de ecuaciones:

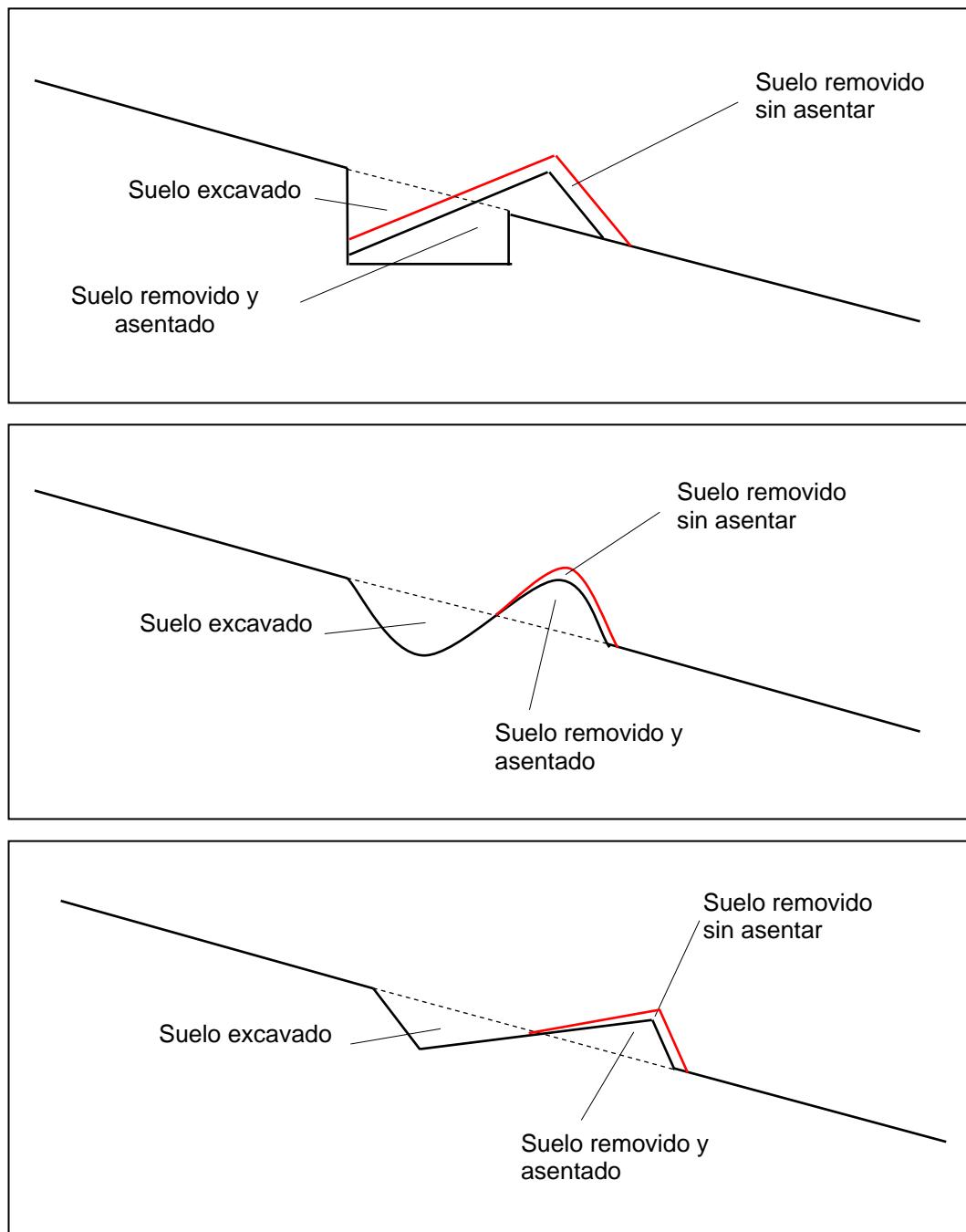


Figura 3.11. Volúmenes de desmonte y terraplén en diferentes preparaciones del suelo (de arriba abajo: ahoyado, acaballonado o subsolado con rejón modificado y aterrazado)

- Esponjamiento inicial:

$$E = \frac{V - V_0}{V_0}$$

- Esponjamiento persistente:

$$E' = \frac{V' - V_0}{V_0}$$

- Asentamiento:

$$T = \frac{V' - V}{V} = \frac{E - E'}{1 + E'}$$

Donde:

V_0 = Volumen de terreno natural.

V = Volumen de los materiales excavados antes de su asentamiento.

V' = Volumen después del asentamiento.

Los coeficientes E , E' y T varían con la naturaleza del terreno, y como orientación pueden utilizarse los aportados por García Salmerón (1995), que se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores del coeficiente de esponjamiento (en tanto por uno) para diferentes tipos de terreno (modificado de García Salmerón, 1995)

NATURALEZA DEL TERRENO	COEFICIENTE DE ESPONJAMIENTO		COEFICIENTE DE ASENTAMIENTO (T)
	INICIAL (E)	PERSISTENTE (E')	
Tierra vegetal, arena	0,10-0,15	0,01-0,015	0,08-0,12
Grava	0,15-0,20	0,015-0,02	0,12-0,15
Tierra mezclada con arena	0,20-0,25	0,02-0,04	0,15-0,17
Tierra arcillosa	0,25-0,30	0,04-0,06	0,17-0,19
Arcilla	0,30-0,35	0,06-0,07	0,19-0,21
Margas	0,35-0,40	0,07-0,08	0,21-0,23
Arcillas y margas muy compactas	0,40-0,65	0,08-0,15	0,23-0,30
Conglomerados	0,30-0,40	0,08-0,15	0,17-0,18
Roca compacta	0,40-0,65	0,10-0,25	0,10-0,15

Los conceptos anteriores pueden aplicarse a preparaciones del terreno en repoblaciones forestales; de hecho, García Salmerón (1995) los aplica a la construcción de terrazas, que requieren grandes volúmenes de desmonte y terraplén. Para construir un murete de tierra o un caballón de volumen definitivo V' , es necesario obtener un volumen provisional esponjado antes del asentamiento (véase la figura 3.12), que será:

$$V = \frac{V'}{1 - T}$$

y, aunque tenga menos interés para el fin que se plantea aquí, deberá excavarse un volumen natural:

$$V_0 = \frac{V}{1 + E}$$

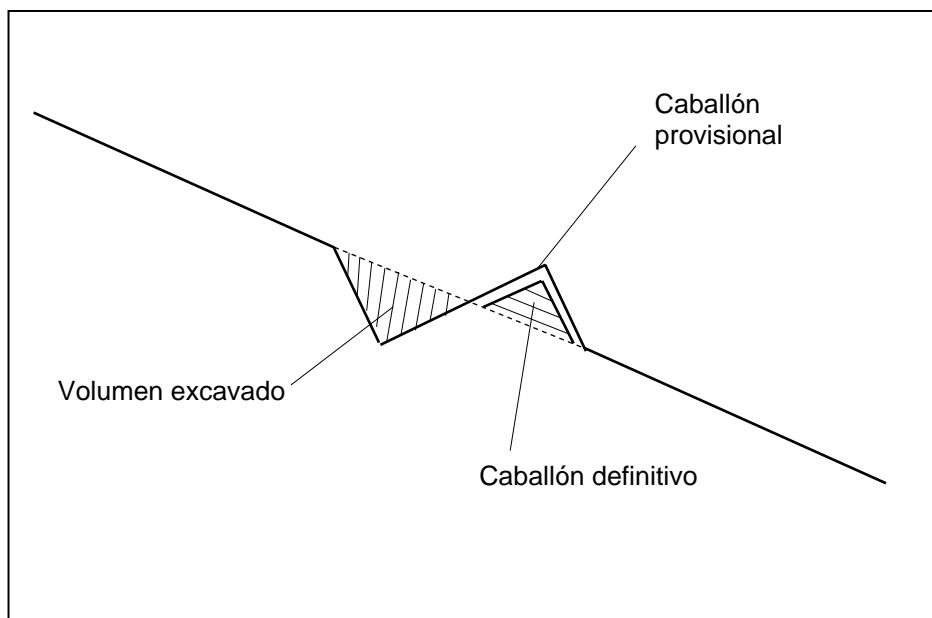


Figura 3.12. Volúmenes definitivo, provisional y de excavación de un caballón

Por último, conviene hacer las siguientes aclaraciones:

- a) Este criterio carece de sentido si la trampa de agua se hace exclusivamente mediante excavación o en trinchera (las denominadas zanjas de infiltración).
- b) Muchas veces la trampa de agua se compone, como se ha visto, de dos partes: una excavada y otra con terreno mullido que se va a asentar. Por este motivo, si se considera que todo el murete se ha conformado con suelo removido, los valores que se estimen por este criterio resultarán mayores que los reales.

3.1.3.8.3. Estanqueidad

A) El flujo de agua a través del microembalse

Todas las grandes presas de tierra presentan pérdidas por filtración (Aguiló, 1985). Del mismo modo, las micropresas que constituyen las estructuras de recogida de agua en repoblaciones forestales pierden agua, al estar conformadas por un material poroso y, casi siempre, sin compactar.

Cuando el flujo de agua se produce en suelo saturado (es decir, cuando el espacio poroso está completamente lleno de agua), el caudal que pasa a través de una columna de material poroso puede calcularse por la ley de Darcy (1865) de la siguiente manera (De Paco, 1969):

$$v = \frac{Q}{S} = k \cdot \frac{H_1 - H_2}{l} = k \cdot i$$

Donde (véase la figura 3.13):

v = Velocidad de flujo

Q = Caudal volumétrico (constante; régimen estacionario)

S = Sección transversal atravesada por el flujo

k = Permeabilidad (o conductividad hidráulica a saturación). Que se puede estimar a partir de la textura mediante el ábaco que se expuso en la figura 3.8, siempre que el suelo no haya sido compactado al conformar el caballón

$H_1 - H_2$ = Diferencia de carga (o potencial hidráulico)

l = Longitud de la columna del medio poroso

$i = (H_1 - H_2)/l$ = Gradiente hidráulico

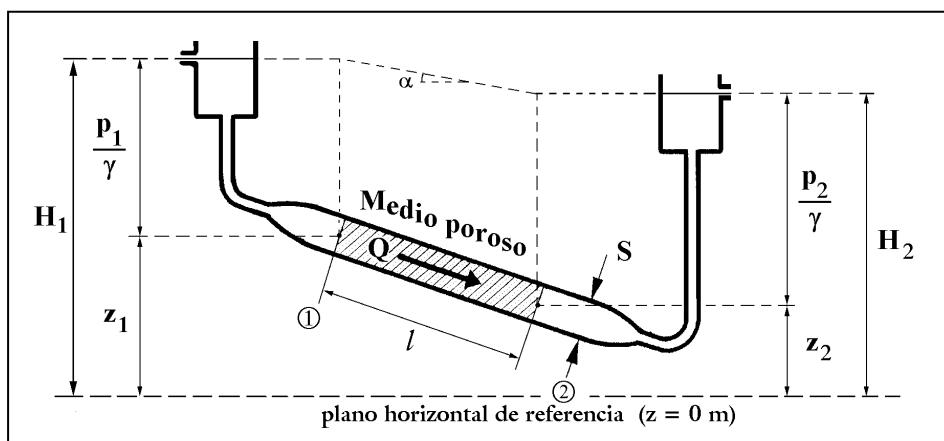


Figura 3.13. Explicación de la ley de Darcy

El Número de Reynolds (Re) del flujo de agua a través de un medio poroso se puede definir como:

$$Re = \frac{v \cdot d_{50}}{\nu}$$

Siendo:

v = Velocidad de flujo

d_{50} = Diámetro medio de las partículas del medio poroso

ν = Viscosidad cinemática del agua.

Cuando $Re \leq 1$, el régimen es laminar y se cumple la ley de Darcy, pudiéndose expresar:

$$Q = k \cdot i \cdot S = k \cdot i \cdot D \cdot B$$

Donde D es la altura y B la longitud del acuífero (de la sección).

Si se define la transmisividad del acuífero (T) como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario, y a una temperatura fija determinada (sus dimensiones son: $[T] = L^2/T$):

$$T = k \cdot D$$

entonces la ley de Darcy se escribe:

$$Q = T \cdot i \cdot B$$

Lógicamente, las pérdidas de agua fuera del microembalse, por pequeño volumen que supongan, no son deseables para el objetivo de dotar al árbol de una buena cantidad de este elemento. Sin embargo, debido al ámbito en el que se trabaja, no es necesario el cálculo con precisión de estas salidas utilizando las ecuaciones anteriores. Bastará con tomar algunas sencillas medidas, basadas en las apreciaciones que se hacen a continuación.

B) Algunas consideraciones empíricas

En las técnicas de riego por gravedad, el agricultor construye unos caballones de tierra entre surcos por los que circula el agua, de una anchura tal que no traspase el agua al surco contiguo, para conseguir que la mayor cantidad de agua posible se infiltre en el surco, dentro del cual está establecido el cultivo.

De la misma forma, el caballón o murete de una preparación del terreno para repoblación debe ser lo suficientemente ancho como para no tener pérdidas de agua por flujos laterales. En otras palabras, el caballón debe ser estanco para que toda el agua que llega al área de recepción se infiltre en la misma. En este proceso tiene influencia tanto el suelo removido del caballón (su capacidad para transmitir agua o conductividad hidráulica, como se vio anteriormente) como el suelo sin alterar que se encuentra justo debajo del área de recepción (que determinará la infiltración).

En suelos arenosos el agua penetra más en profundidad que lateralmente. Por el contrario, en arcillosos el agua penetra con más rapidez en sentido horizontal que en vertical. Por este motivo, en riegos por gravedad se recomienda que la separación entre surcos (o lo que es lo mismo, la anchura del caballón) no sea mayor de 50 cm en suelos arenosos, 100 cm en suelos de textura media y 150 cm en suelos arcillosos (Fuentes, 1998). El suelo del caballón ha sufrido cambios en su estructura (está removido), hecho que favorece la conductividad hidráulica (Porta *et al.*, 1999). Por otra parte, cuanto mayor sea el tiempo de encharcamiento del microembalse mayor posibilidad existe de que el agua escape de forma lateral.

A nivel práctico, cuanto más arenoso sea un suelo, más estrecho puede ser el caballón, y cuanto más arcilloso más ancho debe ser. Si con este criterio la anchura del caballón resulta inconveniente, habrá que reducir la altura del mismo, por consiguiente, también disminuirá el tamaño del microembalse.

En cualquier caso, en suelos excesivamente arenosos carece de sentido diseñar un sistema de recolección de agua, puesto que no se consiguen en ellos cosechas de agua, son poco estables y no sirven como almacén de agua.

3.1.3.9. CRITERIO ECONÓMICO

La preparación del terreno y el posterior refinado y conformación del alcorque, según los criterios propuestos en este trabajo, no deben incrementar de manera considerable los costes de la repoblación. Si esto ocurriera, debe justificarse plenamente su necesidad por razones tales como:

- Que la ladera haya sufrido intentos infructuosos de repoblación por métodos tradicionales.
- Que la erosión en la ladera ponga en peligro poblaciones o asentamientos humanos.
- Que exista riesgo para infraestructuras cuya destrucción suponga grandes pérdidas económicas (presas, carreteras, vías de ferrocarril, puentes, etc.).
- Que se trate de una zona muy degradada que requiera de todos los esfuerzos que puedan hacerse.

En cualquier caso, el técnico proyectista será el que tomará la decisión de la viabilidad económica de la preparación del suelo elegida. Y hay que tener en cuenta, finalmente, que la mecanización de las preparaciones del suelo reduce de forma considerable los costes de esas operaciones, por lo que habrá que recurrir a sistemas mecanizados siempre que sea posible.

3.1.3.10. INTEGRACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO

Una vez analizados los criterios propuestos para el diseño de microembalses de manera individualizada, es conveniente dar algunas indicaciones acerca del orden más adecuado de efectuar los cálculos y de la forma correcta de integrar todos los criterios (véase la figura 3.14). Para ello, se han agrupado de la forma siguiente:

- a) Criterios fundamentales.- Se trata de criterios que sirven como punto de partida al método propuesto de dimensionado del microembalse, y comprenden condiciones o principios de vital importancia en el diseño.

- Criterio hidrometeorológico.- Este criterio constituye uno de los pilares del diseño, debido a que asegura (añadiendo el resguardo hidráulico) el endorreísmo en la unidad sistematizada, que es uno de los principales objetivos de las cosechas de agua. Es decir, mediante este criterio se garantiza un mejor aprovechamiento de la precipitación que cae en la ladera.

Si se sigue el criterio de proporcionalidad con el área de impluvio, se obtiene un alcorque capaz de recoger toda la escorrentía formada en el área de impluvio, cuestión muy relacionada con el objetivo de endorreísmo. Es decir, el valor al que se llegue será un límite mínimo para lograr endorreísmo.

- Criterio ecológico.- También es éste un criterio fundamental, puesto que ofrece un tamaño adecuado para lograr, en un periodo de tiempo razonable, la formación forestal a la que se pretende llegar (que será un límite máximo en el caso de considerar la vegetación climática).

- b) Criterios de referencia.- Son también muy importantes, por lo que se consideran como referentes en el diseño del microembalse.

- Criterio edáfico.- Mediante este criterio se establece un límite mínimo para el tamaño de embalse (cuando se realizan los cálculos considerando una profundidad del suelo igual a dos veces la profundidad del contenedor) y un valor de referencia si se considera una profundidad del suelo de 1 m.

- Criterio paisajístico.- Según que la preparación del suelo afecte negativamente al paisaje y el relieve artificial creado quede atenuado o no con el paso del tiempo, se recomienda la reducción del tamaño del microembalse. Fija un valor de referencia importante, puesto que estima la recolección de suelo que toda cosecha de agua lleva emparejada.

- Limitación fisiológica por encharcamiento.- El tamaño de la trampa de agua queda limitado por el tiempo máximo de embalse para que no se produzcan daños por anoxia de las raíces.

- Criterio fisiológico.- Éste sería un criterio fundamental si se conocieran las necesidades reales de agua del poblado. Al no ser así, pasa a un segundo orden de importancia. Como se trata de una regulación hidráulica, cabría denominarlo criterio hidráulico.

- c) Criterios recomendatorios.- Simplemente aconsejan modificaciones del tamaño del embalse en función de aspectos relevantes de diseño, pero no fundamentales.

- Criterios mecánicos.- Que en base a la estabilidad, estanqueidad o asentamiento del suelo removido, como se ha explicado, pueden aconsejar la variación de las dimensiones finales del murete del alcorque.

El criterio mecánico de asentamiento está muy relacionado con el de resguardo hidráulico; pero, debido a que suele imponer un incremento de la capacidad del alcorque inferior a éste, tiene un carácter meramente comprobatorio.

d) Criterio económico.- Este criterio, al no ser meramente técnico, se sitúa al final del proceso, condicionando la decisión definitiva.

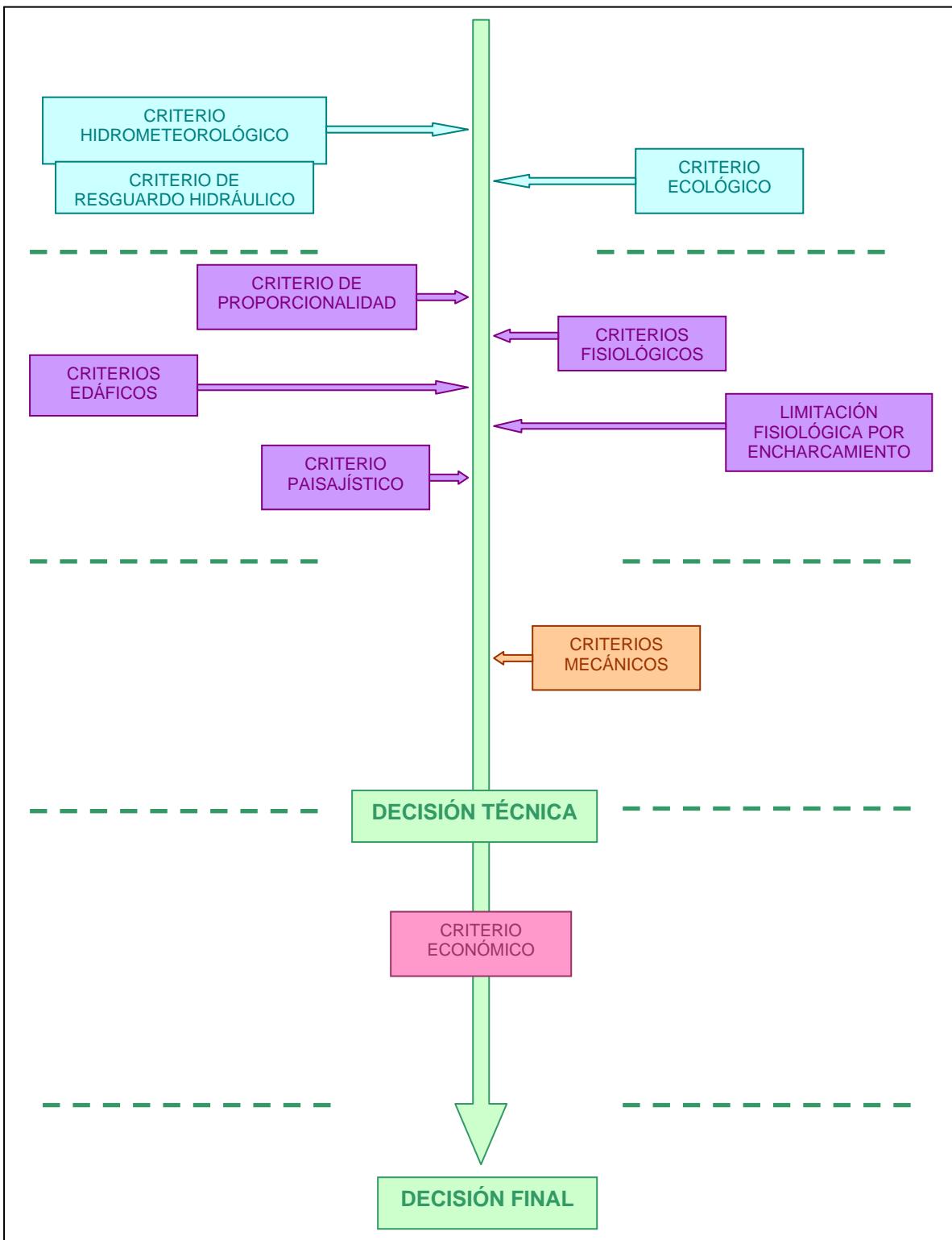


Figura 3.14. Integración de los criterios de diseño del microembalse

3.2. RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN

3.2.1. Introducción

Un sistema de recolección de agua consta de un área de impluvio (área productora de escorrentía, de escurrimiento, de contribución o de captación) (S_1) y un área de recepción o de infiltración (S_2), en la que se establece el cultivo o, en el caso de la repoblación forestal, se plantan árboles o se siembran sus semillas.

Tradicionalmente, en las repoblaciones forestales 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, tendrán su influencia sobre la densidad de la repoblación finalmente lograda. 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, por consiguiente, tres niveles sobre los que actuar: tamaño del microembalse, relación S_1/S_2 y densidad de plantación. La variación de uno de ellos influirá en los demás. Habrá entonces que encontrar el equilibrio entre los tres niveles, que debe fijarse en función de las necesidades hídricas del repoblado.

En este apartado se describen los modelos de mayor aceptación (a nivel mundial) que tratan de determinar la relación óptima entre S_1 y S_2 , casi todos ellos destinados a cultivos agrícolas. Posteriormente se desarrolla un método específico de cálculo, indicado para su aplicación en el diseño de repoblaciones forestales en laderas de zonas áridas y semiáridas, basado en la economía del agua y en las premisas expuestas.

3.2.2. Revisión bibliográfica

La relación S_1/S_2 óptima, según la bibliografía consultada, puede obtenerse de forma directa por experimentación en campo para unos determinados cultivos (o, en nuestro caso, para unas determinadas especies forestales), o indirectamente mediante la utilización de modelos matemáticos desarrollados con este fin. Existen numerosos trabajos que aportan información orientativa al respecto. Así, Boers & Ben-Asher (1982) encuentran tamaños de microcuencas comprendidos entre 0,5 y 1.000 m², para árboles, arbustos y cultivos. Aseguran estos autores que la relación entre el área de contribución y el área de infiltración, depende del clima, de las características edáficas y de los requerimientos hídricos del cultivo. Esta relación varía generalmente entre 1 y 6, aunque citando a Newman (1966), mencionan una proporción máxima de 25 en unas microcuencas instaladas en Australia.

Critchley & Siegert (1991) recogen datos de microcuencas para uso arbóreo, de zonas tan distantes como Kenia, Israel o India, que se transcriben en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Dimensiones del área de captación y de cultivo en microcuenca para árboles; modificada de Critchley & Siegert (1991)

ESPECIES	LOCALIZACIÓN	ÁREA DE IMPLUVIO (m ²)	ÁREA DE RECEPCIÓN (m ²)	RELACIÓN S ₁ /S ₂
<i>Ziziphus mauritiana</i>	Rajastán, India	31,5-72	36	0,9-2
<i>Punica granatum</i>	Negev, Israel	160	16	10
<i>Prunus dulcis</i>	Negev, Israel	250	10	25
Especies forrajeras y para leñas	Baringo, Kenia	-	-	10-20
Especies forrajeras	Turkana, Kenia	93,75	6,25	15
Especies para leñas y otros fines	Guesselbodi Forest, Nigeria	-	-	64
Especies para leñas y otros fines	Keita Valley, Nigeria	12	1,8	6,7

Tadmor *et al.* (1960), tras un pormenorizado estudio de estructuras tradicionales de cosechas de agua en el desierto de Negev (Israel), concluyen que la relación entre el área de captación y la tierra cultivada varía entre 15:1 y 30:1, siendo usuales relaciones alrededor de 20:1. Finkel (1985) encuentra relaciones entre 5,5:1 y 11:1 en plantaciones de árboles en la región de Turkana (Kenia). Frasier (1994) menciona cocientes que van de 1:1 a 20:1, dependiendo de la cantidad de agua que puede ser recogida e infiltrada en el perfil del suelo. Valores parecidos recoge Prinz (1999) en el oeste de Rajastán (India), que con un sistema de abancalamiento denominado *khadin*, observa relaciones 15:1. Bastante menores relaciones (originariamente 2:1) se emplean en un tipo de microcuenca denominadas *meskat*, tradicionales en Túnez para el cultivo de frutales y olivos (Tobbi, 1994). Prinz (2001) también recoge diferentes relaciones en función del método de cosecha de agua empleado (véase la tabla 3.10).

Tabla 3.10. Relaciones entre área de impluvio y área de recepción según la técnica de cosechas de agua (Prinz, 2001)

TÉCNICA	RELACIÓN S ₁ /S ₂
Caballones según curvas de nivel	5:1
Terrazas de ceja (eyebrow terraces)	5:1 a 10:1
Microcuenca <i>Negarim</i>	1:1, 10:1, hasta 25:1
<i>Meskat</i>	2:1
<i>Jessour</i>	100:1 a 10.000:1

En zonas áridas y semiáridas de México se han realizado diversas experiencias para obtener la relación área de impluvio/área de recepción, generalmente con cultivos agrícolas, pastos y frutales (Martínez & Cepeda, 1970; Elizondo, 1977; Carranza, 1978, 1979; Núñez, 1982). Más interesante para nuestros objetivos es el trabajo de Gutiérrez (1975), que concluye que la relación 7:1 es la más eficiente en cuanto al volumen de agua aportado, para el establecimiento de especies de *Pinus*, *Cupressus* y *Chilopsis*.

Una relación elevada entre las superficies de impluvio y recepción puede provocar pérdidas de agua por percolación profunda. Hay que tener en cuenta también la necesidad de construir muretes de gran altura para almacenar la escorrentía de grandes aguaceros, y que pueden producirse problemas de anoxia en los cultivos debido a un prolongado encharcamiento en el área de infiltración, cuestiones éstas que ya han sido tratadas en el apartado 3.1. Por otro lado, relaciones altas favorecen la infiltración, reduciendo las pérdidas por evaporación (Boers & Ben-Asher, 1982).

Entre los factores que influyen en la producción de escorrentía, además del tipo de suelo (que condiciona su capacidad de infiltración) y la vegetación, se encuentra el tamaño del área de impluvio, que además está íntimamente relacionado con la pendiente de la ladera.

Investigaciones en parcelas experimentales (Sharma *et al.*, 1986, citado por Critchley & Siegert, 1991) muestran que pendientes más abruptas implican una mayor producción de escorrentía. Al mismo tiempo, la escorrentía disminuye con el incremento de la longitud de la ladera (Critchley & Siegert, 1991), en el caso de unidades sistematizadas, con la longitud del área de impluvio. Esto es debido principalmente a la mayor longitud de recorrido y, en consecuencia, a un aumento del tiempo de concentración (definido como el tiempo necesario para que una gota de agua llegue a la sección de cierre de la cuenca desde el punto más lejano). Cuanto mayor sea el tiempo de concentración, más tiempo queda el agua expuesta a la infiltración y evaporación, antes de que llegue al área de recepción.

En consecuencia, la eficiencia de escorrentía (volumen de escorrentía por unidad de superficie) se incrementa con la reducción del tamaño del área de impluvio, es decir, un gran tamaño del área productora implica un elevado tiempo de concentración y, a su vez, una pequeña eficiencia de escorrentía (Critchley & Siegert, 1991).

Con el objetivo de dar una idea conjunta del estado de la cuestión y teniendo presentes las anteriores consideraciones, se muestran seguidamente los modelos existentes, de carácter agrícola fundamentalmente, para definir la relación óptima o necesaria entre el área de impluvio y el área de recepción, así como un análisis crítico de los mismos. En la descripción de estos modelos se respeta la nomenclatura y notación empleada por los autores en sus trabajos originales.

3.2.2.1. MODELOS EXISTENTES

a) Modelo de Anaya *et al.* (1976)

$$A_c = A_s + \frac{1}{C} \cdot \left(\frac{UC - P}{P} \right) \cdot A_s$$

siendo:

A_c = Superficie total de la cuenca

A_s = Área de siembra (área de recepción)

C = Coeficiente de escorrentía en el área de escurrimiento (área de impluvio)

$UC - P$ = Total de deficiencias mensuales de agua durante el ciclo vegetativo del cultivo

P = Lluvia que cae durante el tiempo que tarda en desarrollarse el cultivo, bajo una determinada probabilidad de ocurrencia

UC = Uso consuntivo (demanda de agua para conseguir una buena cosecha).

b) Método de Smith (1978)

El área de escurrimiento o área de impluvio (A_w) (véase la figura 3.15) se calcula por la siguiente ecuación:

$$A_w = \left(\frac{n \cdot ET - PP}{Q} \right) \cdot A_c$$

donde:

n = Número de días entre lluvias

ET = Evapotranspiración diaria (mm)

PP = Precipitación pluvial (mm)

Q = Escurrimiento hacia el área de cultivo (mm).

A_c = Área de cultivo (área de recepción)

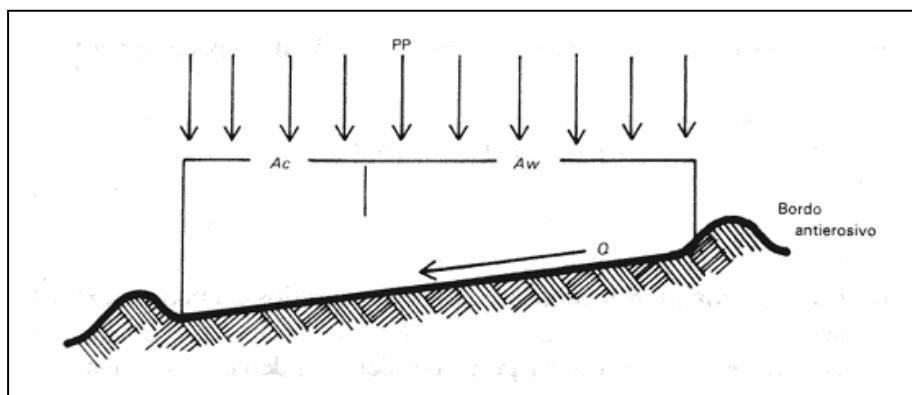


Figura 3.15. Explicación del modelo de Smith (1978), según Velasco-Molina (1991)

c) Modelo de Velasco-Molina (1983)

Este método se basa en la idea de que el agua requerida por el cultivo es igual a la suma del volumen de agua escurrido y el volumen de lluvia recibido en el área de cultivo (véase la figura 3.16). Esta idea queda plasmada en la siguiente ecuación:

$$CE \cdot [\%P \cdot PP \cdot (LT - L) \cdot A] + \%P \cdot PP \cdot L \cdot A = E_v \cdot L \cdot A$$

Volumen de agua escurrido durante el ciclo vegetativo	Volumen de lluvia recibido en el área de cultivo durante el ciclo vegetativo	Volumen de agua requerido para el desarrollo del cultivo
---	--	--

Donde:

CE = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

$\%P$ = Porcentaje probable de precipitación pluvial durante el ciclo vegetativo

PP = Precipitación promedio anual según la isoyeta del lugar (m)

LT = Longitud total entre bordos antierosivos (m)

L = Longitud del área de cultivo o área de recepción (m)

A = Ancho del área del escurrimiento (o de impluvio) y del área de cultivo (o de recepción) (m)

E_v = Uso consuntivo o evapotranspiración (m) del cultivo considerado.

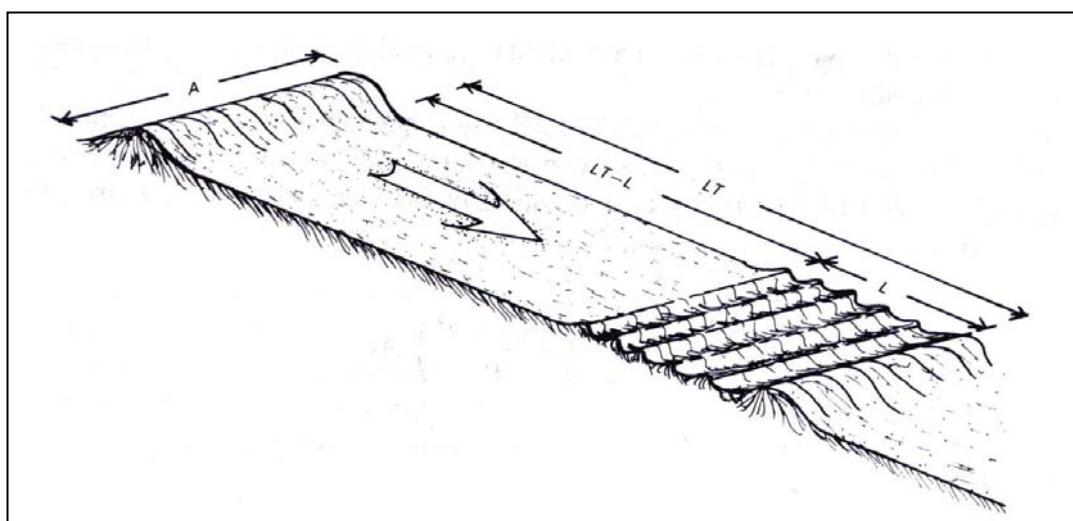


Figura 3.16. Explicación del modelo de Velasco-Molina (1983), según Velasco-Molina (1991)

A partir de la expresión anterior se despeja L , para conocer la longitud que debe tener el área de cultivo:

$$L = \frac{CE \cdot \%P \cdot PP \cdot LT}{\%P \cdot PP \cdot (CE - 1) + E_v}$$

d) Método de Finkel (1985)

El modelo propuesto por este autor, recogido también por Critchley & Siegert (1991), es quizás el más conocido y utilizado a nivel mundial. Se basa en la siguiente igualdad:

$$\text{Agua recogida} = \text{Agua extra requerida}$$

$$C \cdot PD \cdot k \cdot E = CA \cdot (RH - PD)$$

Operando se llega a la ecuación habitual:

$$\frac{C}{CA} = \frac{RH - PD}{PD \cdot k \cdot E}$$

Donde:

C = Área de captación (o de impluvio)

CA = Área de cultivo (o de recepción)

RH = Requerimientos de agua que tiene el cultivo

PD = Precipitación de diseño

k = Coeficiente de escorrentía. Depende, entre otros factores, de la pendiente, el tipo de suelo, la vegetación, la condición previa de humedad del suelo y de la intensidad y duración de la precipitación. Varía normalmente entre 0,1 y 0,5 (según Critchley & Siegert, 1991).

E = Factor de eficiencia, que tiene en cuenta las pérdidas de agua por evaporación y percolación profunda. La eficiencia es alta en sistemas con área de impluvio pequeña y área de recepción nivelada y lisa. El factor varía entre 0,25 y 0,85 (según Finkel, 1985), aunque Critchley & Siegert (1991) fijan el intervalo en 0,5-0,75.

Para el caso de árboles, Critchley & Siegert (1991) argumentan que lo más importante es calcular el tamaño total de la microcuenca (conjuntamente área de captación y área de cultivo), porque generalmente el árbol se instalará en un hoyo de plantación de reducidas dimensiones, que será el área de cultivo. Esta situación la resuelven los autores de la siguiente forma:

$$MC = Ar \cdot \left(\frac{RH - PD}{PD \cdot k \cdot E} \right)$$

Siendo:

MC = Tamaño de la microcuenca
 Ar = Área explotada por el sistema radical
 RH = Requerimientos de agua que tiene el cultivo
 PD = Precipitación de diseño
 k = Coeficiente de escorrentía (varía entre 0,1 y 0,5)
 E = Factor de eficiencia (entre 0,25 y 0,85).

e) Modelo Velsavill (Villanueva *et al.*, 1987)

Este modelo supone un desarrollo del de Velasco-Molina (1983) visto anteriormente. Se sustenta en que el volumen de agua requerido por el cultivo es igual a la suma del volumen de lluvia recibido desde el área de escurrimiento y el caído directamente en el área de cultivo:

$$CE \cdot [PP \cdot (LT - L)] \cdot A + PP_e \cdot L \cdot A = L \cdot A \cdot [(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n$$

Volumen de lluvia	Volumen de	Volumen de agua de lluvia
recibida desde el área	lluvia	requerido por el cultivo
de escurrimiento	recibida en	
	el área de	
	cultivo	

Siendo:

CE = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)
 PP = Precipitación pluvial, según una probabilidad anual de ocurrencia y un cierto periodo de retorno (m)
 LT = Espaciamiento entre bordos antierosivos (m)
 L = Longitud del área de cultivo o de recepción (m)
 A = Ancho del área de escurrimiento (o de impluvio) y de cultivo (o de recepción) (m).
 PP_e = Precipitación efectiva (m); es decir, la parte de la precipitación que puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas
 cc = Capacidad de campo (%)
 pmp = Punto de marchitez permanente (%)
 D_a = Densidad aparente del suelo ($g \cdot cm^{-3}$)
 P_r = Profundidad efectiva de enraizamiento del cultivo (m)
 n = Número de eventos de lluvia de magnitud $(cc-pmp) \cdot Da \cdot Pr$ necesarios para satisfacer las demandas hídricas del cultivo

A partir de esta ecuación, se puede despejar la longitud del área de cultivo:

$$L = \frac{CE \cdot PP \cdot LT}{[(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n + CE \cdot PP - PP_e}$$

f) Modelo de Cadot (1989)

Este modelo desarrollado en Arizona (Estados Unidos) establece que la relación entre la superficie productora de escorrentía y la superficie cultivada (CCAR) debe ser igual al cociente entre el déficit hídrico y la escorrentía aportada por el área productora, imponiendo que la relación entre ambas superficies no pueda ser mayor de 10.

$$CCAR = \frac{\text{déficit}}{\text{escorrentía}} = \frac{ET - \text{precipitaciones}}{\text{precipitaciones} - \text{pérdidas}}$$

g) Modelo de Palomo (1990)

$$CE \cdot PP \cdot (IH - IS) \cdot A + PP_e \cdot IS \cdot A = IS \cdot A \cdot ET$$

Volumen de agua recibido en el área de escorrentamiento y en condiciones de fluir aguas abajo	Volumen que cae directamente en el área de cultivo	Volumen de agua requerido por el cultivo
---	--	--

Donde:

CE = Coeficiente de escorrentamiento (adimensional)

PP = Precipitación pluvial al 75 % de probabilidad de ocurrencia (m)

IH = Intervalo horizontal o separación entre bordos antierosivos (m)

IS = Intervalo de siembra (m)

A = Longitud del borde antierosivo que sigue una misma cota del terreno (m)

PP_e = Precipitación efectiva al 75 % de probabilidad de ocurrencia (m)

ET = Demanda evapotranspirativa del cultivo (m)

Desarrollando esta ecuación, se llega a que el intervalo de siembra debe valer:

$$IS = \frac{CE \cdot PP \cdot IH}{CE \cdot PP - PP_e + ET}$$

h) Método de Oweis *et al.* (1999)

El criterio que sugieren estos autores para fijar la mejor relación área de impluvio/área de recepción es asegurar que la reserva del suelo esté llena en el área de recepción al final de la estación lluviosa. La ecuación que proponen es:

$$r = \frac{ET + W_e - W_0 - S}{S \cdot E_r}$$

Donde:

r = Relación entre el área de captación y al área de cultivo

ET = Evapotranspiración estacional estimada del cultivo

W_e = Agua disponible en la zona radical al final de la estación de seca

W_0 = Agua disponible en la zona radical al principio de la estación seca

S = Precipitación de diseño

E_r = Coeficiente de escorrentía del sistema.

3.2.2.2. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EXISTENTES

Los modelos anteriormente descritos se analizan y comparan en este apartado, para determinar cuáles son sus puntos fuertes y débiles. La comparación se realiza en base a seis aspectos:

1) Precisión

La mayor parte de los modelos analizados establecen balances hídricos anuales o para el periodo vegetativo del cultivo. Un balance anual lo establecen Velasco-Molina (1983), Finkel (1985), Villanueva *et al.* (1987), Palomo (1990) y Oweis *et al.* (1999). El método de Anaya *et al.* (1976) calcula diferencias mensuales entre demandas y precipitaciones, pero considera el ciclo vegetativo de las especies. Smith (1978) emplea la evapotranspiración diaria, pero durante el periodo de tiempo que transcurre entre lluvias, y recomienda realizar el balance hídrico para una serie de años. Por último, el modelo propuesto por Cadot (1989) establece balances hídricos diarios.

Para repoblaciones forestales, se considera innecesaria la precisión que dan balances hídricos diarios. Es suficiente con un balance mensual o anual, debido a que el objetivo principal de las repoblaciones en zonas áridas y semiáridas es simplemente el arraigo y supervivencia de los árboles, que con el tiempo puedan llegar a formar un bosque. No se busca, en cambio, la obtención de grandes cosechas, como ocurre en los cultivos agrícolas. Además, y por la capacidad de obtener y economizar agua que tienen las especies leñosas de zonas áridas, carece de sentido plantear balances hídricos diarios cuando estos vegetales enlazan largos periodos de sequía con cortos

3. Metodologías

eventos lluviosos. Será con esos largos lapsos de tiempo con los que deban trabajar los modelos y no con espacios de tiempo diarios, más propios de plantas herbáceas, hidrófitas o mesófitas.

2) Sencillez

La mayor parte de los métodos se caracterizan por su sencillez y, en general, utilizan variables de fácil obtención.

Los modelos de Velasco-Molina (1983), Villanueva *et al.* (1987) y Palomo (1990), los tres muy relacionados entre sí, establecen sencillas correspondencias entre las aportaciones (escorrentía y precipitaciones) y las necesidades del cultivo. Sin embargo, algunos parámetros, como la precipitación efectiva (PP_e) o el número de eventos de lluvia necesarios para satisfacer las demandas hídricas del cultivo (n), presentan algunas dificultades de estimación. Similares ecuaciones plantean Finkel (1985) y Oweis *et al.* (1999), aunque con ciertas diferencias que se explican posteriormente.

3) Estimación de las necesidades hídricas

La mayor parte de los modelos utiliza la evapotranspiración como estimadora de las necesidades hídricas del cultivo (Smith, 1978; Velasco-Molina, 1983; Cadot, 1989; Palomo, 1990; Oweis *et al.*, 1999). Anaya *et al.* (1976) y Finkel (1985), hablan respectivamente de uso consuntivo (UC) y requerimientos hídricos (RH), pero implícitamente se refieren también a la evapotranspiración. A su vez, el modelo Velsavill tiene en cuenta la evapotranspiración a través de las variables precipitación efectiva (PP_e) y número de eventos necesarios para satisfacer las demandas del cultivo (n).

4) Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la relación entre el volumen de escurrimiento y la precipitación caída. Este coeficiente sirve para calcular la escorrentía generada, y - por ende- sirve para estimar la recolección de agua que cabe obtener del área de impluvio. Con este fin se emplea en los modelos de Anaya *et al.* (1976), Velasco-Molina (1983), Finkel (1985), Villanueva *et al.* (1987), Palomo (1990) y Oweis *et al.* (1999).

La utilización de coeficientes de escorrentía es la forma de determinar la escorrentía más directa y sencilla, pero es menos precisa que otros métodos, por ejemplo el del número de curva, cuyas tablas abarcan una mayor cantidad de situaciones (para diferentes suelos, tipos de vegetación y condiciones hidrológicas), que las que contemplan las tablas existentes de coeficientes de escorrentía.

5) Utilización original

Todos los modelos han sido elaborados para su empleo en zonas áridas y semiáridas con cultivos agrícolas tradicionales (en especial maíz y trigo), salvo la adaptación que Critchley & Siegert (1991) hacen para árboles. El modelo Velsavill, además de emplearse originalmente para cultivos herbáceos, se ha aplicado a plantaciones de árboles frutales.

6) Posible adaptación al diseño de repoblaciones forestales

La aplicación de los modelos descritos para el diseño de repoblaciones forestales es posible, con las precauciones que se han mencionado y teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- En la ecuación del modelo de Smith (1978) se puede despejar la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, resultando:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{n \cdot ET - PP}{Q}$$

Esta ecuación guarda bastante similitud con otros modelos, como el de Finkel (1985), por ejemplo.

Lo más recomendable para los fines de la repoblación forestal es hacer varios balances hídricos (anual, semestral, trimestral o mensual), sustituyendo en la ecuación anterior la evapotranspiración diaria por la que corresponda al periodo elegido. Por otra parte hay que decidir la forma de calcular la escorrentía (Q), siendo aconsejable hacerlo por el método del número de curva o por el de los coeficientes de escorrentía.

- Para poder adaptar el modelo de Velasco-Molina (1983), lo mejor es establecer el balance en función del área de impluvio y del área de recepción, y considerar el año completo (por lo que no se emplea la variable %P sino PP):

$$CE \cdot PP \cdot S_1 + PP \cdot S_2 = E_V \cdot S_2$$

Operando, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_V - PP}{CE \cdot PP}$$

- Algo similar puede hacerse para el modelo Velsavill (Villanueva *et al.*, 1987):

$$CE \cdot PP \cdot S_1 + PP_e \cdot S_2 = [(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n \cdot S_2$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{[(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n - PP_e}{CE \cdot PP}$$

- Igualmente para el modelo de Palomo (1990):

$$CE \cdot PP \cdot S_1 + PP_e \cdot S_2 = ET \cdot S_2$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{ET - PP_e}{CE \cdot PP}$$

- La ecuación final del método de Finkel (1985) es similar a las que se acaban de deducir de los modelos de Velasco-Molina (1983) y Palomo (1990). No obstante, conceptualmente tiene una leve diferencia, puesto que el método primero establece:

$$\text{Agua recogida} = \text{Agua extra requerida}$$

mientras que los otros dos:

$$\text{Escorrentía generada en } S_1 + \text{Precipitación en } S_2 = \text{Necesidades del cultivo}$$

Pese a que, como ha quedado apuntado, el resultado final es muy similar, este segundo balance hídrico es conceptualmente más correcto, puesto que el agua recogida es la lluvia caída directamente en el área de recepción y la escorrentía producida en el área de impluvio, y no sólo esta última.

- La variante al método de Finkel (1985) que proponen Critchley & Siegert (1991) para árboles, no se considera adecuada para repoblaciones forestales, ya que no divide la unidad sistematizada en un área de impluvio y un área de recepción. La mayor parte de las sistematizaciones del terreno para repoblación forestal crean un área de recepción, que recoge el agua de lluvia y escorrentía y en la cual se instalan los briznales. Con todo y aunque para la repoblación no parezca el método útil, sí puede llegar a ser muy ilustrativo con un horizonte temporal más amplio en montes adehesados y, sobre todo, en terrenos abancalados.

- El método propuesto por Oweis *et al.* (1999) es también muy próximo al de Finkel (1985). Considera, sin embargo, dos variables más: los contenidos de agua en

el suelo al inicio y al final de la estación seca (véase la figura 3.17). Esta interesante aportación puede llevarse a la práctica de dos modos diferentes. En primer lugar, W_0 y W_e pueden considerarse iguales (esta posibilidad la contemplan los autores), por lo que la ecuación resultará idéntica a la de Velasco-Molina (1983). Por otro lado, puede suponerse que al inicio de la estación seca el contenido de humedad del suelo se encuentra a capacidad de campo ($W_0 = CC$), mientras que al final de esta estación se ha producido un descenso del contenido de humedad hasta un nivel admisible para la especie implantada:

$$W_e = CC - (CRAD \cdot d_t)$$

Siendo:

d_t = Descenso tolerable de humedad (%), dependiente de la especie
 $CRAD$ = Capacidad de retención de agua disponible

Lo que esta fórmula indica es que se ha producido una reducción del contenido de humedad del suelo tolerable por las plantas. Si este descenso es del 100 % se ha llegado al punto de marchitez permanente ($W_e = PMP$), lo que supone la muerte de todo tipo de plantas. Sin embargo muchas especies mueren antes de que se alcance ese punto, y soportan descensos de humedad muy inferiores para producir buenas cosechas y crecimientos (por ejemplo, 25-55 % para la vid ó 40 % para frutales de hoja caduca; en Martínez de Azagra, 1990).

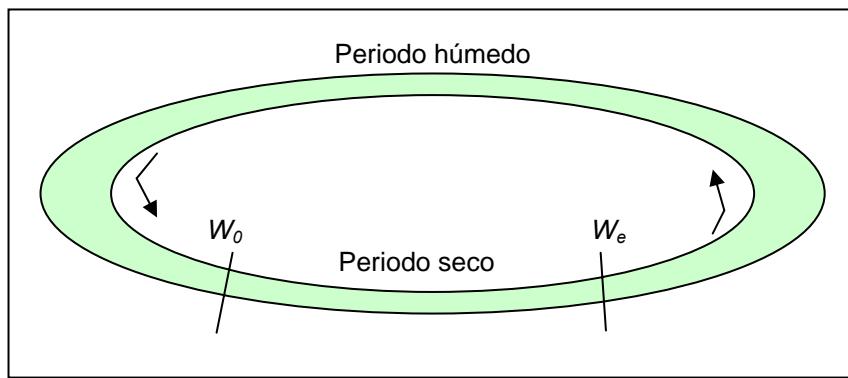


Figura 3.17. Situación de W_0 y W_e respecto a los períodos seco y húmedo, para la aplicación del método de Oweis *et al.* (1999)

- A partir del modelo de Anaya *et al.* (1976) puede deducirse lo siguiente:

$$\frac{S_1 + S_2}{S_2} = \frac{UC - P}{C \cdot P}$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{UC - P}{C \cdot P} - 1$$

- El modelo de Cadot (1989) no se considera el más adecuado para los fines perseguidos en este trabajo, debido a que el balance diario que plantea le confiere una minuciosidad innecesaria, según lo ya explicado anteriormente. Con todo, su ecuación de partida toma un aspecto muy semejante al resto de modelos:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{ET - \text{precipitaciones}}{\text{precipitaciones} - \text{pérdidas}}$$

3.2.3. Metodología propuesta

Fundamentado en la economía del agua, la idea principal del método que se presenta es que el tamaño del área de impluvio debe ser el adecuado para proporcionar una determinada cantidad de agua para permitir (o asegurar) la subsistencia del poblado durante su fase más crítica (arraigo y primer crecimiento). Es decir, se pretende que exista una dotación de agua suficiente en el área de recepción gracias al área de impluvio; bajo la premisa de que se produce un mayor aporte de agua a mayor área de impluvio (véase la figura 3.18).

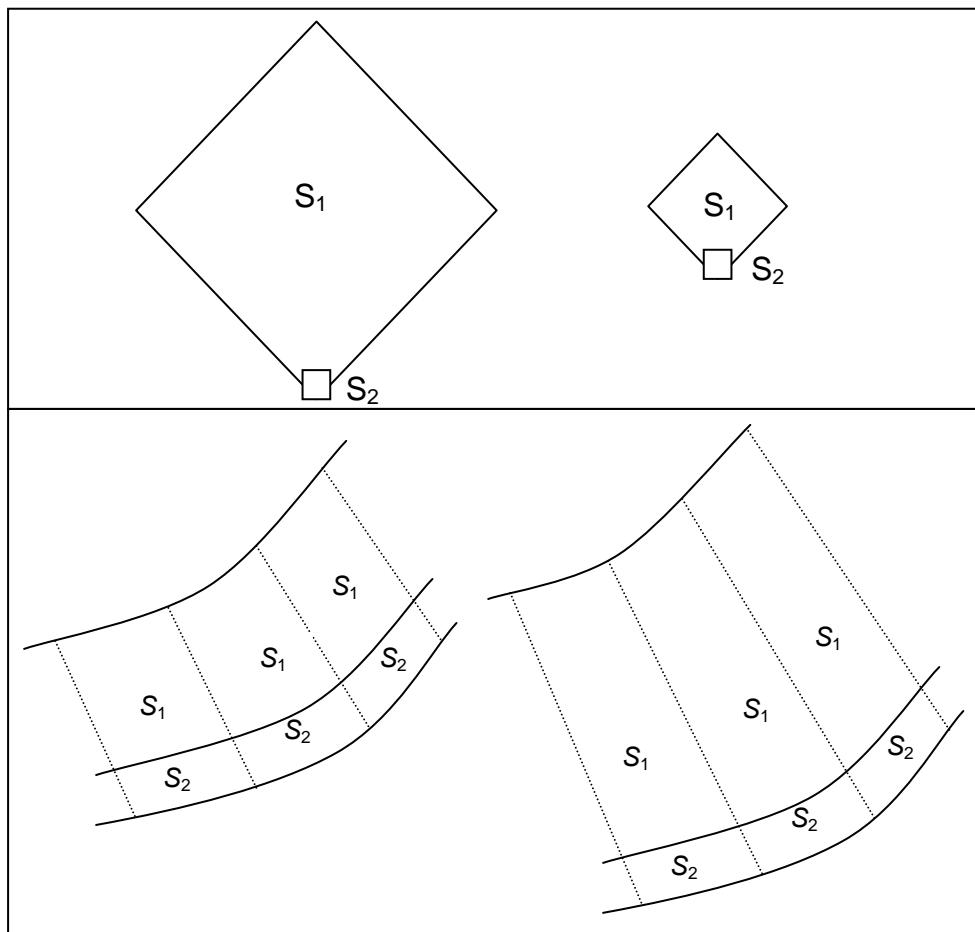


Figura 3.18. En las preparaciones del suelo, como las microcuenca (arriba) u operaciones lineales (abajo), el área de impluvio (S_1) debe tener un tamaño adecuado para dotar de agua suficiente al área de recepción (S_2).

Además del objetivo obvio de la supervivencia de los brizales, que es el que se tratará en este trabajo, pueden plantearse otros fines, como conseguir un determinado crecimiento de las plantas u obtener una determinada producción.

El método que se propone parte del siguiente balance hídrico:

$$E_{S1} \cdot S_1 + P \cdot S_2 = ET_{rep} \cdot S_2$$

Siendo:

$$\begin{aligned} E_{S1} &= \text{Escurriente formada en el área de impluvio que llega al área de recepción (l·m}^{-2}\text{)} \\ P &= \text{Precipitación de diseño (l·m}^{-2}\text{)} \\ ET_{rep} &= \text{Evapotranspiración real de la repoblación (l·m}^{-2}\text{)} \\ S_1 &= \text{Área de impluvio (m}^2\text{)} \\ S_2 &= \text{Área de recepción (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Si del balance anterior se despeja la relación entre el área de impluvio y el área de recepción ($R = S_1/S_2$), queda la siguiente ecuación:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{S1}}$$

Para una total claridad, conviene explicar cada uno de los componentes de la ecuación:

a) Evapotranspiración real de la repoblación.- La evapotranspiración de la repoblación se considera en este método estimadora de los requerimientos hídricos de las plantas, al igual que hacen otros autores como Smith (1978), Velasco-Molina (1983), Cadot (1989), Palomo (1990) u Oweis *et al.* (1999), o con otro tipo de fines Thornthwaite & Matter (véase, por ejemplo, en Martínez de Azagra & Navarro, 1996) en su balance hídrico y Montero de Burgos & González Rebollar (1983) en los diagramas bioclimáticos, entre otros.

En el apartado 3.1.3.5 se justifica un patrón anual de necesidades hídricas mínimas de la repoblación, con el fin de que las plantas sobrevivan en verano y tengan al menos crecimientos moderados en primavera. La evapotranspiración real mínima (o de subsistencia) de la repoblación se puede considerar entonces:

- Meses de invierno, siempre que $P \geq ETP$: $ET_{rep} = ETP$
- Meses de primavera (al menos 2 meses), una vez que $P < ETP$: $ET_{rep} = ETP \cdot k_c$

3. Metodologías

- Meses de verano y otoño, hasta que de nuevo $P \geq ETP$: $ET_{rep} \geq ETP \cdot 0,2$

Sin embargo, este patrón minoriza en exceso las necesidades hídricas de los brinzales, lo cual va en detrimento de su crecimiento y de las posibilidades de éxito de la repoblación. Las cosechas de agua persiguen la abundancia de este elemento en el área de recepción, por lo que un planteamiento de mínimos no parece acertado en esta ocasión. Más bien es el opuesto ($ET_{rep} = ETP$) el que resulta más atinado, aunque tal vez mitigado de alguna manera por encontrarnos en zonas áridas y con especies xerófilas, ahorradoras de agua ($ET_{rep} = k_c \cdot ETP$, con $k_c < 1$).

¿Cuál es entonces la medida de los requerimientos de agua de la repoblación? La respuesta a esta pregunta hay que buscarla en la propia Naturaleza. Aquellos años en los que se produzca una exitosa regeneración en las masas naturales análogas a la que se quiere crear, tendrán unas determinadas precipitaciones y una gran cantidad de semillas germinadas, y se habrá producido una evapotranspiración real que será idónea para satisfacer las necesidades de las nuevas plantas instaladas. Sin embargo, esta forma de proceder es bastante poco operativa a nivel general, por lo que una aproximación práctica y del lado de la seguridad, que llevará al dimensionado de áreas de impluvio de superficie holgada para cubrir las demandas del repoblado, puede ser la ETP . Por otra parte, es la variable que utilizan la mayor parte de los métodos que en este capítulo se han descrito.

b) Precipitación de diseño.- Se utiliza como tal la precipitación anual que tiene una probabilidad de ocurrencia del 33 % (equivalente a un periodo de retorno de 1,5 años, lo que supone que, de media, dos de cada tres años lloverá más que la precipitación calculada), determinada mediante el ajuste de los datos de precipitación anual de la serie disponible a la función de distribución de Goodrich (recomendada para valores medios).

c) Escorrentía en el área de impluvio.- La escorrentía que se forma en el área de impluvio y que contribuye a incrementar las disponibilidades hídricas del área de recepción se puede calcular por el método del número de curva o empleando coeficientes de escorrentía medios anuales.

Por el método de los complejos hidrológicos, la escorrentía se calcula como:

$$E_{s1} = \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1}$$

Siendo:

$P1$ = Umbral de escorrentía en el área de impluvio (mm):

$$P1 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI}$$

Nl = Número de curva del área de impluvio

P = Precipitación de un aguacero individual (mm). En este caso hay que considerar todos los aguaceros que ocurren en el año de cálculo, utilizando una distribución de precipitaciones obtenida por el método de los aguaceros virtuales (a este respecto puede consultarse Martínez de Azagra, 1996). Existen tres casos posibles de distribución de las precipitaciones, que generan respectivamente una escorrentía máxima, mínima y media.

Por otro lado, mediante el coeficiente de escorrentía (e) y la precipitación anual de diseño (P), la escorrentía puede calcularse del siguiente modo:

$$E_{S1} = P \cdot e$$

En la bibliografía existen diversas tablas que orientan sobre los coeficientes de escorrentía a elegir. Dos de ellas se transcriben en las tablas 3.11 y 3.12. Los coeficientes que aparecen en estos cuadros son muy generales y para un pequeño número de situaciones (según el tipo de suelo, la cobertura del mismo y la pendiente del terreno). Por este motivo, y siempre que sea posible, es mucho más recomendable el cálculo de la escorrentía superficial por el método de los complejos hidrológicos.

Tabla 3.11. Coeficientes de escorrentía, según Benítez *et al.* (1980), citado por Lemus & Navarro (2003)

COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE SUELO	PENDIENTE (%)				
		> 50	20-50	5-20	1-5	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,55	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,35	0,20	0,15
Hierba	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Tabla 3.12. Coeficientes de escorrentía, según Velasco-Molina (1991)

VEGETACIÓN	PENDIENTE (%)	TEXTURA DEL SUELO		
		Arenosa	Arcillosa y limosa	Arcilla
Bosques	0-5	0,10	0,30	0,40
	5-10	0,25	0,35	0,50
	10-30	0,30	0,50	0,60
Pastizales	0-5	0,10	0,30	0,40
	5-10	0,16	0,36	0,55
	10-30	0,22	0,42	0,60
Terrenos de cultivo	0-5	0,30	0,50	0,60
	5-10	0,40	0,60	0,70
	10-30	0,52	0,72	0,82

En aras a permanecer del lado de la seguridad en la estimación de la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, puede hacerse una modificación a la ecuación expresada anteriormente para el cálculo de R . Esta variación consiste en sustituir la precipitación de diseño por la precipitación efectiva, como hacen Villanueva *et al.* (1987) y Palomo (1990), e incluir un factor de eficiencia, empleado por Finkel (1985) y Critchley & Siegert (1991):

- Precipitación efectiva (P_e).- La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación que puede llegar a estar disponible en la zona del suelo ocupada por las raíces de las plantas. Los factores que la determinan son: intensidad, duración y distribución de la lluvia, velocidad de infiltración del suelo, cubierta vegetal y topografía (Velasco-Molina, 1991). Para el cálculo de la precipitación efectiva se parte de la precipitación de diseño (con probabilidad de ocurrencia del 33 %) y se utiliza alguno de los métodos aplicables a regiones secas, por ejemplo el de Blaney-Criddle, que aconseja Velasco-Molina (1991). Este método consiste en aplicar un coeficiente de aprovechamiento, específico para cada magnitud o tramo de lluvia. En la tabla 3.13 se muestran estos coeficientes.

Tabla 3.13. Coeficientes de precipitación efectiva, según el método de Blaney-Criddle (Velasco-Molina, 1991), a aplicar para cada tramo de precipitación mensual observada

PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm)	COEFICIENTE DE APROVECHAMIENTO
≤ 25	0,95
50	0,90
75	0,82
100	0,65
125	0,45
150	0,25
> 150	0,05

- Factor de eficiencia (E).- Este coeficiente cuantifica la desigual distribución del agua de escorrentía sobre el terreno, así como las pérdidas debidas a la evaporación y a la percolación profunda. La elección del factor de eficiencia es una decisión que debe tomar el técnico que proyecta la repoblación en base a su experiencia y a la técnica de sistematización elegida. Finkel (1985) considera factores de eficiencia entre 0,25 y 0,85; mientras que Critchley & Siegert (1991) utilizan un valor de 0,5 para métodos de preparación del suelo con áreas de impluvio grandes (por ejemplo, caballones trapezoidales) y de 0,75 para técnicas que implican pequeñas áreas de impluvio (como es el caso de microcuenca *Negarim* o caballones según curvas de nivel).

Estos dos parámetros, precipitación efectiva y factor de eficiencia, aumentan R (y en consecuencia, disminuyen la densidad de plantación). Su empleo puede parecer arbitrario e innecesario, e incluso puede producir cierta incertidumbre en el cálculo de R . No obstante, su utilidad radica en que introduce una ecuación que calcula una R mayor, que crea un intervalo de confianza a la hora de elegir la R definitiva de la repoblación. Así pues, se puede calcular la relación entre el área de impluvio y el área de recepción por la ecuación vista anteriormente:

$$R_{\min} = \frac{ET_{\text{rep}} - P}{E_{S1}}$$

Y también, empleando la precipitación efectiva y el factor de eficiencia:

$$R_{\text{mayor}} = \frac{ET_{\text{rep}} - P_e}{E_{S1} \cdot E}$$

Esta segunda ecuación permite situarse del lado de la seguridad respecto a la cantidad de agua de escorrentía que se aporta a las plantas, y por tanto garantiza con mayor probabilidad de éxito la supervivencia de la repoblación.

En el apartado 4.3 (Estudio de casos) se muestra un ejemplo de la aplicación de este método propuesto.

3.3. DENSIDAD DE PLANTACIÓN

3.3.1. Introducción

La elección de la densidad, es decir, del número de pies por unidad de superficie, es una de las primeras decisiones que el técnico debe adoptar a la hora de proyectar una repoblación forestal protectora, junto con el marco de plantación. Éste es uno de los principales temas de debate en la actualidad (Pemán & Navarro, 1998), debido a que no existe un criterio técnico operativo para fijar este dato fundamental en toda repoblación, como ya expresara García Salmerón (1991). Por esta razón, normalmente se acude a la experiencia (re poblaciones pretéritas realizadas por otros técnicos) o a cifras de referencia que pueden encontrarse en la bibliografía.

En las repoblaciones forestales de zonas áridas y semiáridas, la densidad de plantación toma mayor importancia, si cabe, puesto que hay un factor limitante que es el agua, recurso fundamental y escaso de las masas forestales (Oliver & Larson, 1996), por el que deben competir las plantas introducidas en la repoblación. De ahí la trascendencia de encontrar un método sencillo, que dé soluciones justificadas y que sirva de guía al técnico en el momento de tomar sus decisiones.

3.3.2. Revisión bibliográfica

3.3.2.1. EXPERIENCIA EN REPOBLACIONES

El criterio general básico empleado hasta la fecha consiste en elegir una densidad tal que en un plazo breve de 5, 10 ó 15 años -6 ó 7 según García Salmerón (1991)- la vegetación introducida junto con la inducida proteja al suelo suficientemente frente a la erosión. Sin embargo, cuando la plantación es densa se disminuye considerablemente el espacio edáfico y aéreo disponible para cada planta, por lo que se frena su desarrollo más rápidamente. Por eso deben armonizarse dos aspectos: la formación de una cubierta completa de copas y el espacio necesario para el crecimiento.

El criterio selvícola clásico para fijar la densidad mínima consiste en elegir aquella densidad de plantación que permita, sin marras, llegar a un fustal maduro en espesura normal. Se trata entonces de fijar el número de árboles que son necesarios para ocupar de manera rápida el espacio destinado a su desarrollo (Smith *et al.*, 1997). Desde este punto de vista meramente selvícola, lo ideal es una repoblación densa en la que se vayan haciendo sucesivos clareos para que siempre queden satisfechos los requerimientos de espacio, agua y nutrientes, según éstos aumentan al hacerlo el tamaño de la población de árboles (García Salmerón, 1991).

Este mismo autor señala otras dos ideas a tener en cuenta al respecto:

- Las repoblaciones protectoras deben ser más densas que las productoras, ya que deben proteger el suelo frente a la erosión.

- Las especies de temperamento de sombra necesitan una mayor densidad que las especies de luz.

Serrada (1993) recoge estos dos criterios y los amplía, proponiendo que la densidad se elija en función de factores selvícolas y económicos:

a) Selvícolas

- Temperamento de la especie
- Posibilidad de la especie de brotar de cepa o de raíz
- Porte de la especie

b) Económicos

- Objetivo de la repoblación
- Existencia de mercado de maderas finas
- Coste de las operaciones de repoblación
- Previsión de que se efectuarán claras o clareos. La cuestión de si se aclarará la masa es crucial a la hora de elegir la densidad inicial, según Smith *et al.* (1997).

Sin embargo, en repoblaciones en las que la función protectora sea la fundamental, deberán considerarse exclusivamente los factores ecológicos, dejando a un lado los aspectos económicos. Por este motivo, Serrada (1993) afirma que la densidad en repoblaciones protectoras debe ser más alta (véase la tabla 3.14), debido a que se debe conseguir la protección del suelo en el menor tiempo posible. Hace la salvedad de repoblaciones en las que se pretenda avanzar en la sucesión vegetal e incrementar la biodiversidad, en las que la densidad suele ser baja para favorecer la colonización espontánea de otras especies.

Tabla 3.14. Densidad de plantación en repoblaciones forestales, según Serrada (1993)

TIPO DE REPOBLACIÓN	ESPECIE	DENSIDAD (Pies/ha)
Protectora	Coníferas	2.000-3.000 (pudiendo bajar a 1.600)
	Frondosas	400-1.000
Productora	<i>Eucalyptus</i> sps.	625-1.600
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1.500-2.000
	<i>Pinus radiata</i>	2.000-2.200
	<i>Populus</i> sps.	278-400
	<i>Castanea sativa</i>	625-1.000
	<i>Fagus sylvatica</i> y <i>Quercus</i> sps.	1.000
	<i>Pinus sylvestris</i> y <i>P. nigra</i>	2.000
	<i>Pinus pinaster</i> y <i>P. pinea</i>	1.000-2.000
	<i>Pinus halepensis</i>	1.600

Sevilla (2001) da una relación de posibles razones para elegir entre una densidad elevada o baja. Por ejemplo, en estaciones secas –lógicamente por la falta de agua- se aconsejan densidades bajas; si se desea un rápido establecimiento de los sistemas radicales para el control de la erosión, la densidad debe ser alta; y la densidad también tendrá que ser baja si se realizan preparaciones puntuales en vez de areales. Por otro lado, este mismo autor da densidades y marcos de referencia que se utilizan en determinadas situaciones para repoblaciones en la provincia de León (véase la tabla 3.15).

Tabla 3.15. Marco y densidad de referencia para distintos tipos de repoblaciones en la provincia de León; modificado de Sevilla (2001)

TIPO DE REPOBLACIÓN	DENSIDAD (Pies/ha)	MARCO
Objetivo múltiple en zona seca	1.100	Real y/o tresbolillo
Protección	1.100	Real y/o tresbolillo
Zonas adehesadas (para pastos)	100	Sin alineación

Desde un punto de vista diferente al meramente ecológico, existe en la actualidad una tendencia a reducir la densidad de plantación, por varios motivos (Martínez de Azagra & Mongil, 2001):

- La planta producida actualmente en viveros es de mejor calidad, y por lo tanto con mayor garantía de supervivencia (planta más cuidada, endurecida, con cepellón, micorrizada).
- Las preparaciones del terreno son ahora también de mayor calidad, debido a la potencia de la maquinaria utilizada.
- Los clareos no son económicamente rentables.
- Las altas densidades inducen un mayor peligro de incendios, debido a que las masas densas sin aclarar se convierten en grandes acumulaciones de combustible con continuidad horizontal y vertical.
- La consecución de espesura completa es imposible en climas áridos y semiáridos, por razón de la escasez de agua. En general, a mayor calidad de estación mayor cantidad de recursos y, por lo tanto, mayor número de árboles por unidad de superficie pueden establecerse (Smith *et al.*, 1997). Si se concreta esta idea para el recurso agua, en un lugar seco el espaciamiento debe ser mayor para lograr un reparto satisfactorio de este recurso escaso.

Deteniéndose en cifras concretas, y haciendo un repaso histórico y geográfico de las mismas, García Salmerón (1991) explica que en Centroeuropa ha existido una clara preferencia por las altas densidades (superiores a 6.000 pies/ha), con una tendencia actual a reducirlas hasta los 2.500 ó 3.000 pies/ha. Algo diferente era la situación en Estados Unidos, donde se postulaban inicialmente espesuras ligeramente

superiores a las europeas (del orden de 7.000 pies/ha), llegando en la actualidad a unos 1.800 pies/ha en zonas secas y unos 2.900 pies/ha en las zonas más húmedas.

Frente a estos criterios tradicionales aparece el criterio mediterráneo, que se debate entre la pequeña densidad que recomienda la escasez de humedad y la solución contraria, aconsejada por la tendencia a la ramificación y tortuosidad de fustes de la vegetación xerófila como respuesta a la sequedad. La tendencia actual, considerando la degradación de los suelos forestales, pobres en nutrientes, y sobre todo apoyándose en la escasez de precipitaciones, es pensar que nuestros montes no pueden soportar espaciamientos pequeños.

El Patrimonio Forestal del Estado, antiguo órgano encargado de las repoblaciones forestales en España, proyectaba 3.000 hoyos/ha en terrenos húmedos y 2.500 hoyos/ha en zonas secas. Posteriormente, el ICONA redujo esas densidades a 1.500 y 1.100 pies/ha, respectivamente, para ambientes húmedos y secos. Una buena referencia a los espaciamientos utilizados en la actualidad en nuestro país puede encontrarse en el programa de forestación de Castilla y León (JCyL, 1994), de los que algunos ejemplos se muestran en la tabla 3.16, o en los datos ofrecidos por Pemán & Navarro (1998) que se exponen en la tabla 3.17.

Tabla 3.16. Densidad y marco de plantación indicados por el Programa Regional de Forestación de Tierras Agrarias de Castilla y León (JCyL, 1994), para las comarcas centrales de la Comunidad Autónoma

CONDICIONES	DENSIDAD (Pies/ha)	MARCO (m)
Plantaciones de pinos con % de frondosas y enebros inferior al 50 %	1.600	2,5x2,5
Plantaciones de frondosas o enebros con planta pequeña	1.100	3x3
Preparación del terreno con retroaraña	1.100	3x3
Preparación mediante ahoyado manual	800	3,5x3,5
Frondosas, ahoyado con retroexcavadora y planta grande	600	-
Nogales de producción de madera	400	-
<i>Populus x euramericana</i>	278 ó 333	6x6 ó 5x6
<i>Populus x interamericana</i>	400	-
Nogales de producción de fruto	100	10x10

3.3.2.2. VENTAJAS DE LAS DENSIDADES BAJAS

En la bibliografía consultada puede encontrarse, como defensor firme y clásico de las densidades bajas en zonas áridas y semiáridas, a Messines (1952), que cree que, considerando los datos de evapotranspiración de estas zonas, sería absurdo intentar crear un dosel forestal completo. Por ejemplo, para la región norteafricana de Tripolitania, este autor recomienda plantar los árboles muy espaciados, como se hizo en la Reserva Forestal de Gasr-el-Hag con *Acacia tortilis*. En las plantaciones de *Acacia cyanophylla* la densidad empleada fue como máximo 800-900 plantas/ha en esta región árida, mientras que en Túnez, que es una zona algo más húmeda, se empleó el doble o triple número de plantas (2.000 a 2.500 pies/ha). Otro ejemplo es el

de las repoblaciones con eucaliptos en suelos arenosos estables, donde se plantaron solamente unos 150 pies/ha, con espaciamiento de 8 x 8 m.

Tabla 3.17. Densidades iniciales de repoblación para varias especies, según Pemán & Navarro (1998)

ESPECIES	DENSIDAD MÍNIMA (Pies/ha)	DENSIDAD MÁXIMA (Pies/ha)	TIPO DE PLANTACIÓN
<i>Pino nigra</i> ssp. <i>laricio</i>	1.100	2.000	Pura o mixta
<i>Pinus pinaster</i>	1.100	2.000	Pura o mixta
<i>Pinus pinea</i>	625	1.100	Pura o mixta
<i>Pinus halepensis</i>	1.100	1.600	Pura o mixta
<i>Pinus sylvestris</i>	1.100	2.000	Pura o mixta
<i>Cupressus sempervirens</i>	Lineal		Pura o mixta
<i>Cedrus</i> ssp.	625	1.100	Pura o mixta
<i>Populus</i> ssp.	Lineal	278/400	Pura o mixta
<i>Salix</i> ssp.	Lineal		Mixta
<i>Alnus glutinosa</i>	Lineal		Mixta
<i>Ulmus</i> ssp.	Lineal		Mixta
<i>Celtis australis</i>	Lineal		Mixta
<i>Acer</i> ssp.	Enriquecimiento		Mixta
<i>Fraxinus</i> ssp.	Lineal		Pura o mixta
<i>Olea europaea</i> var. <i>sylvestris</i>	Enriquecimiento		Pura o mixta
<i>Juniperus</i> ssp.	Enriquecimiento		Mixta
<i>Corylus avellana</i>	Enriquecimiento	625	Pura o mixta
<i>Castanea sativa</i>	Enriquecimiento	625/1.000	Pura o mixta
<i>Laurus nobilis</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Sorbus</i> ssp.	Enriquecimiento		Mixta
<i>Prunus avium</i>	Lineal		Pura o mixta
<i>Pistacia terebinthus</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Buxus sempervirens</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Abies pinsapo</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Quercus pyrenaica</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Quercus faginea</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Quercus canariensis</i>	Enriquecimiento		Pura o mixta
<i>Quercus suber</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Quercus ilex</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Tamarix</i> ssp.	Lineal		Mixta
<i>Ceratonia siliqua</i>	Enriquecimiento	1.100	Pura o mixta
<i>Pistacia lentiscus</i>	Enriquecimiento		Mixta
Palmeras	Lineal		Pura
<i>Taxus baccata</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Juglans regia</i>	Lineal		Pura o mixta
<i>Arbutus unedo</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Tetraclinis articulata</i>	700	1.100	Pura o mixta
<i>Crataegus monogyna</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Prunus spinosa</i>	Enriquecimiento		Mixta
<i>Ilex aquifolium</i>	Enriquecimiento		Mixta

Una crítica frecuente a altas densidades se centra en que con un elevado número de plantas por hectárea se crean bosques monótonos y, en muchas ocasiones, monoespecíficos, con una escasa biodiversidad. Quienes así argumentan

contemplan a los oquedales o dehesas como las formaciones óptimas a imitar en una restauración bajo clima mediterráneo.

Ruiz de la Torre (2001) destaca el papel de las cubiertas claras en la regulación de las aguas. En primer lugar, los denominados “parques”, estructuras con árboles o arbustos espaciados sobre fondo de matorral, pastizal o mezcla de ambos, están representados en España principalmente por los montes adehesados, los sabinares y los enebrales. A efectos de regulación hidrológica, su influencia es baja y la cuantía de la erosión depende de la tasa de cubierta del estrato bajo, mientras que el gasto consuntivo de agua es, en general, reducido, mayor en dehesas con pastizal denso.

Por otro lado se encuentran los matorrales, que suponen la formación infraarbórea más extendida en España. Entre ellos, la mancha cerrada es un matorral arbustivo muy denso, con erosión despreciable, elevada regulación de agua y escaso consumo. La garriga, matorral alto, generalmente de espesura incompleta, da erosión muy reducida, regulación importante y bajo gasto de agua. Los restantes tipos de matorrales son mayoritariamente de cubierta media a baja (entre el 35 % y el 65 %), con erosión apreciable que varía según el tipo de aprovechamiento (muy elevada en el caso de sobrepastoreo de caprino), regulación muy baja y escaso consumo de agua, siendo éste mayor en brezales, escobonales y agrupaciones afines.

Por su parte, los herbazales densos, como los prados de diente y siega y otros pastizales higrófilos, protegen de la erosión pero no producen regulación apreciable y tienen elevado gasto consuntivo de agua. Los pastizales xerófilos y estacionales, de cubierta incompleta y de duración parcial en el tiempo, proporcionan limitada protección frente a la erosión y la regulación es baja, igual que el gasto consuntivo de agua por evapotranspiración.

Finalmente, las cubiertas rastreras y claras de zonas semiáridas, como tomillares y jaguarcillares (con *Helianthemum*, *Fumana*, etc.) degradados no producen defensa apreciable frente a la erosión, la regulación es baja y muy reducido el gasto de agua.

Con esta breve descripción de las formaciones vegetales no arbóreas más frecuentes en España se pretende resaltar que no sólo mediante el establecimiento de un bosque denso se consigue la restauración de una ladera degradada y erosionada en una zona árida o semiárida, sino que en algunas ocasiones puede ser muy efectiva la combinación de varios tipos de formaciones, en especial si se desea favorecer el paisaje y la caza.

Es muy interesante también conocer que, con frecuencia, las repoblaciones forestales en zonas áridas, planteadas según esquemas tradicionales, no han demostrado ser eficaces en cuanto a la recuperación del ecosistema original. Chirino *et al.* (2003), en base a experiencias recientes, aseguran que formaciones vegetales de la sucesión vegetal (pastizal seco o matorral) pueden reducir la escorrentía superficial y la erosión al igual que las formaciones resultantes de repoblaciones con pino carrasco (pino con matorral o pino con pastizal seco). González Alonso & Encinas (1995) proponen la plantación dispersa de árboles o la repoblación en rodales para ampliar el efecto borde (por lo tanto se crean ecotonos, es decir, zonas de transición entre bosques y otro tipo de formaciones) y, en consecuencia, se aumenta la

biodiversidad y la generación de suelo. Según estos autores, atendiendo al punto de vista ecológico, interesan densidades de repoblación bajas (no crear bosques sino dehesas o montes huecos). De hecho, en muchos lugares del sureste español, la aridez y la litología impiden una espesura arbórea completa.

Los mismos autores, en un estudio llevado a cabo en Las Bardenas Reales (Navarra), han comprobado que las repoblaciones tradicionales con pino carrasco no contribuyen a la formación de suelo y han supuesto una disminución de la biodiversidad. Sin embargo, en la misma área, en bosquetes adehesados de pino carrasco situados en los límites de las repoblaciones, así como en las áreas naturales degradadas de matorral mediterráneo con vegetación arbórea dispersa, se producen las siguientes circunstancias:

- Un aumento de la humedad relativa debido al efecto de sombra de la vegetación arbórea, con disminución de la insolación y de la evaporación respecto al biotopo abierto.

- Un depósito de materiales minerales transportados por el viento y, aunque los autores citados no lo mencionan, también por el agua (Ludwig *et al.*, 1997).

- Una disminución relativa del aporte de materia orgánica en forma de acículas y un aumento de su heterogeneidad (al incrementarse la diversidad de especies vegetales) en comparación con las áreas repobladas.

En opinión de González Alonso & Encinas (1995), si se llegase a demostrar que en las transiciones entre las repoblaciones de pino y el matorral mediterráneo se produce un incremento de la biodiversidad, podrían plantearse las repoblaciones en zonas áridas mediterráneas, sobre todo para aquéllas en las que se ha abandonado el uso agrícola, con unos criterios más ecológicos. De esta manera, mediante la repoblación no necesariamente arbórea, se constituiría una base para el estudio de un sistema de recuperación de las zonas áridas basado en una plantación dispersa de árboles o rodales, que amplíe el efecto ecotonal y, en consecuencia, aumente la biodiversidad y la generación de suelo.

Las densidades muy bajas también tienen algunos inconvenientes, por ejemplo que el efecto visual de artificialidad de las plantaciones alineadas es muy duradero (Sevilla, 2001). Por eso, este autor recomienda, en el caso de que la densidad sea menor de 250 pies/ha, distribuir las plantas de forma más o menos homogénea en toda la superficie, o bien concentrarlas en determinadas zonas como, por ejemplo, en las vaguadas.

Como principal conclusión de lo expuesto hasta ahora, puede decirse que la cantidad de agua disponible para cada árbol en una repoblación es inversamente proporcional a la densidad de plantación (FAO, 1989). Por lo tanto, para que los briznales no entren en competencia por el agua edáfica, deben diseñarse las plantaciones con amplios espaciamientos.

3.3.3. Metodología propuesta

Según lo visto hasta ahora, lo importante de la cuestión es que el número de plantas introducido sea el más ajustado a la cantidad del recurso escaso (agua) existente en la zona. No es conveniente, por tanto, una espesura excesiva, pero tampoco una espesura defectiva que no aproveche completamente toda la potencialidad de la estación y que favorezca procesos erosivos.

Se echa en falta, como ya ha sido expresado anteriormente, una recopilación de datos y una reflexión profunda que conduzca a criterios sólidos. Sería preciso promover una línea de investigación experimental para desarrollar criterios sobre la densidad de introducción de plantas (mediante siembra a voleo, hidrosiembra o plantación) en repoblaciones protectoras. En este sentido, las disponibilidades hídricas del repoblado y sus necesidades pueden servir de guía en muchos casos. De lo contrario, se continuará por mucho tiempo en el puro empirismo, sin llegar a profundizar en las relaciones existentes entre la densidad de repoblación y la disponibilidad hídrica, la profundidad y fertilidad del suelo, las especies vegetales a introducir, la selvicultura a aplicar, los aprovechamientos a conseguir, la economía, etc.

Para paliar en parte las carencias expresadas, se propone un método basado en el modelo MODIPÉ, en el cual las disponibilidades hídricas que tienen las plantas son el principal factor para determinar la densidad de plantación. Continuando con la terminología y la filosofía empleada en capítulos anteriores, puede afirmarse que densidades de implantación bajas (hasta 1.000 pies/ha) conducen a áreas de impluvio grandes, es decir, la cantidad de agua que irá a parar a cada planta será mayor (véase la figura 3.19).

Pasando ya a la descripción del método, en una repoblación con una densidad de N pies/ha la superficie disponible para cada planta en m^2 , es:

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

Pero dentro de un sistema de recolección de agua, esta superficie hay que dividirla entre el área de impluvio y el área de recepción:

$$S_p = S_1 + S_2 \quad (\text{para el caso de sistematizaciones completas})$$

$$S_p > S = S_1 + S_2 \quad (\text{en sistematizaciones incompletas})$$

Una sistematización es completa si recoge toda la escorrentía que se produce en la ladera, mientras que es incompleta si, aun recogiendo escorrentía, existe una parte de la misma que se pierde. El establecimiento de un método que calcule la

densidad adecuada en base a la economía del agua, es preciso distinguir entre estos dos tipos de sistematizaciones primarias.

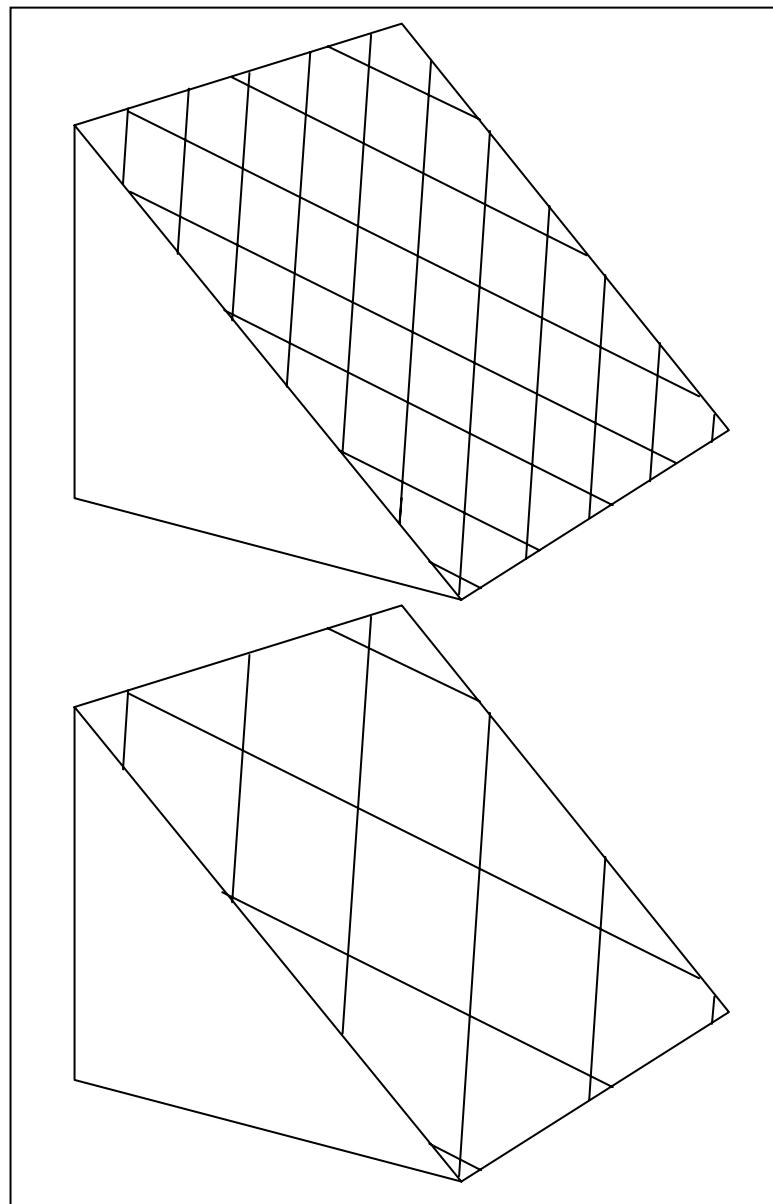


Figura 3.19. En laderas preparadas mediante microcuenca, áreas de impluvio pequeñas implican densidades de plantación elevadas (arriba), mientras que áreas de impluvio grandes implican densidades menores (abajo).

3.3.3.1. SISTEMATIZACIÓN COMPLETA

El cálculo de la densidad de plantación para este tipo de sistematización se basa en las siguientes afirmaciones:

- 1) La ladera está preparada de manera que todo lo que no sea área de recepción se comporte como área de impluvio.

2) La relación entre área de impluvio y área de recepción calculada de la forma descrita en el apartado 3.2 es la más adecuada desde el punto de vista de la economía del agua.

Uniendo las dos premisas anteriores, y extendiendo la relación S_1/S_2 desde la unidad sistematizada a toda la ladera, se llega a la densidad de plantación óptima.

Conociendo la superficie que ocupa el microembalse (superficie del área de recepción, S_2) y la relación entre el área de impluvio y el de recepción (R), puede determinarse la superficie de la ladera que corresponde a cada planta, por la expresión vista anteriormente:

$$S_p = S_1 + S_2 = S_2 \cdot R + S_2 = (1 + R) \cdot S_2$$

Si ésta es la superficie ocupada por un pie o árbol, los pies que entran en una hectárea, es decir, la densidad de plantación, se obtiene de manera inmediata:

$$N = \frac{10.000}{S_p} \quad (\text{Pies/ha})$$

3.3.3.2. SISTEMATIZACIÓN INCOMPLETA

En una sistematización primaria incompleta no toda la superficie de la ladera que no sea área de recepción es área de impluvio, sino que hay una cierta superficie que queda ajena a la unidad sistematizada. Por ello, el cálculo de la densidad óptima es más complejo y la densidad de plantación será menor que en una sistematización completa a igualdad de R , puesto que al espaciamiento normal correspondiente a la unidad sistematizada hay que añadir el espacio perdido que no está asignado a ninguna planta en concreto.

Así mismo, en una sistematización incompleta no se recoge la escorrentía superficial de toda la superficie de la ladera, sino que una parte de la escorrentía se descuida, no pudiendo preverse cuál va a ser su destino. Como ejemplo de este tipo de preparaciones del suelo, se puede citar el ahoyado en cualquiera de sus variantes, método en el cual se crean unos alcorques sin que existan estructuras laterales que guíen la escorrentía hacia ellos.

En este caso, el microembalse sólo aprovecha un cierto porcentaje de escorrentía que se produce en la superficie que corresponde a cada planta. Para estimar este porcentaje, hay que fijarse en la longitud de la ladera que queda interceptada por los hoyos siguiendo una curva de nivel, o en la superficie que aporta obligatoriamente escorrentía al área de recepción. Esta área de impluvio resulta inferior a la diferencia entre la superficie que corresponde a cada planta y la superficie del área de recepción, como puede apreciarse en la figura 3.20.

$$S_1 < S_p - S_2$$

La superficie que corresponde a cada pie (S_p) puede calcularse como el producto de la distancia entre líneas (D) por la distancia entre hoyos (e):

$$S_p = D \cdot e = \frac{10.000}{N}$$

Pero también, siendo S_{in} la superficie correspondiente a cada árbol que produce escorrentía incontrolada:

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in}$$

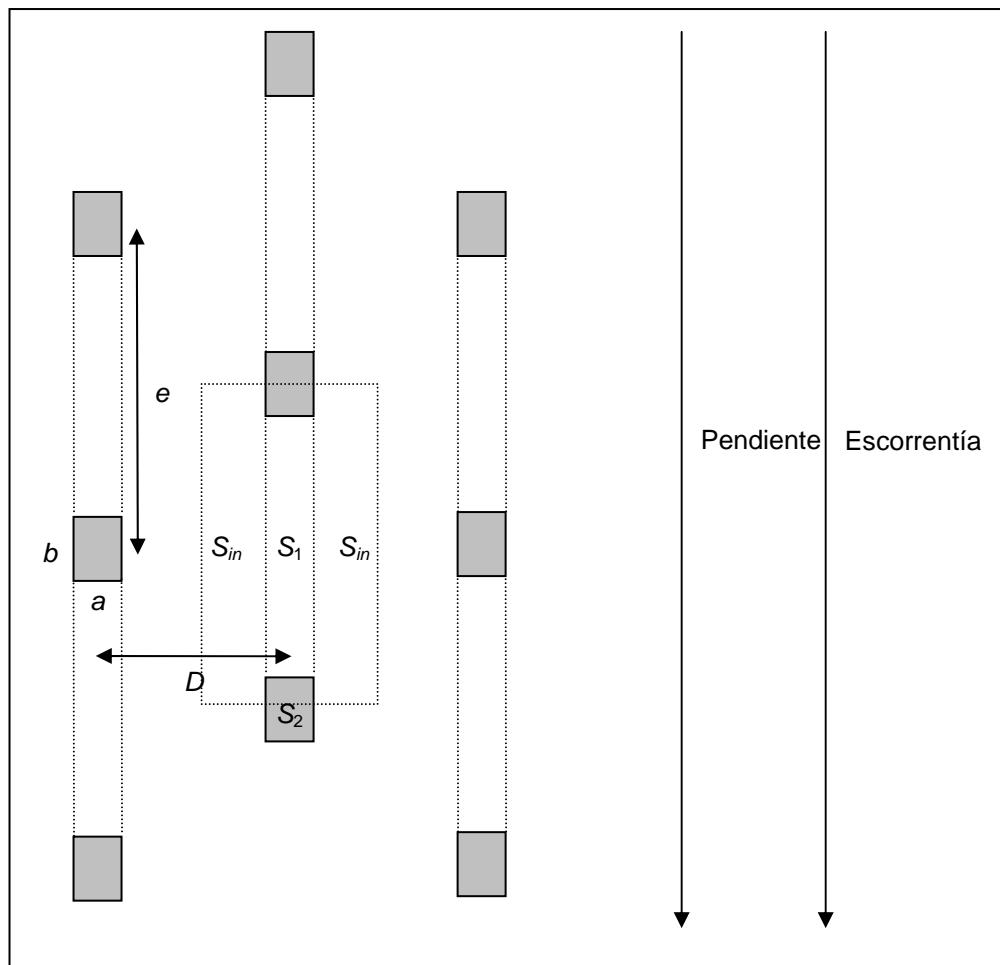


Figura 3.20. Representación esquemática de una sistematización incompleta consistente en ahoyado con alcorques

Resultando, a la vista de la figura 3.20:

$$S_1 = a \cdot (e - b)$$

$$S_2 = a \cdot b$$

$$S_{in} = e \cdot (D - a)$$

Por lo tanto:

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in} = a \cdot (e - b) + a \cdot b + (D - a) \cdot e$$

Y finalmente la densidad (pies/ha) puede calcularse por:

$$N = \frac{10.000}{S_p} = \frac{10.000}{D \cdot e} = \frac{10.000}{a \cdot (e - b) + a \cdot b + (D - a) \cdot e}$$

Determinación de los parámetros de la sistematización incompleta

a y *b*: Los determina el tamaño del microembalse, que a su vez viene definido normalmente por la técnica de preparación del suelo empleada. Estos dos parámetros pueden variarse mientras se mantenga el tamaño del microembalse (CAPA), calculado por los criterios ya vistos en el apartado 3.1.

e: Lo fijan las superficies de impluvio y recepción y la anchura del microembalse:

$$e = \frac{S_1 + S_2}{a}$$

Si *a* es pequeña, *e* resulta muy grande, por lo que el área de impluvio es estrecha y larga. Desde el punto de vista de la recolección de agua conviene aumentar *a* (manteniendo CAPA) para acortar *e*.

D: La distancia entre líneas no tiene relación con las cosechas de agua, no influye ni en *S₁* ni en *S₂* (cada planta con su *S₂* lleva asociada su *S₁*). Por lo tanto *D* sólo define los pasillos de escorrentía -el flujo que escapa de la sistematización-, y también modifica la densidad de plantación: a mayor *D*, menor densidad.

Interesa disminuir *D* cuando se quiera aumentar la densidad, es decir:

- Cuando se deseé conseguir rápidamente la cubierta del suelo por las copas y que todo el suelo quede fijado por las raíces.
- Cuando las copas de los árboles sean recogidas, columnares o fusiformes, para conseguir cuanto antes la tangencia de copas.
- En caso de especies de temperamento umbrófilo.
- Cuando exista la posibilidad de realizar tratamientos tempranos para reducir la densidad (clareos).
- Cuando exista un claro riesgo de erosión en los pasillos (escasa vegetación, fuerte pendiente, suelos fácilmente erosionables...)

Interesa aumentar D cuando se quiera disminuir la densidad:

- Si las especies pueden brotar de raíz
- En caso de especies heliófilas
- Por razones económicas.

En algunos casos, D queda condicionado por la forma de preparación del terreno. Por ejemplo, si se trata de un ahoyado con subsolador, la distancia entre las líneas de ahoyado vendrá determinada por la distancia entre rejones (con un apero de 2 ó 3 rejones), o se fijará libremente en el caso de un solo rejón.

Cuanto más seco sea un clima, o mayores las necesidades hídricas que tenga la repoblación, más conviene reducir los pasillos de escorrentía. En el caso extremo, si el clima es muy árido habrá que anular esta superficie improductiva, y pasar a una sistematización primaria completa.

Por último, conviene señalar que los pasillos de escorrentía siempre pueden suprimirse (sea cual sea la densidad de plantación) mediante unas sencillas obras accesorias consistentes en unos caballones o regueros laterales que dirijan el agua hacia las áreas de recepción (véase la figura 3.21).

* * * * *

A partir del desarrollo precedente puede establecerse el procedimiento a seguir para determinar la densidad óptima, que es el que sigue:

1º) Obtención de S_1 y S_2 (mediante el método que se indicó en apartados anteriores).

2º) Cálculo de S_{in} :

$$e = \frac{S_1 + S_2}{a}$$

$$S_{in} = e \cdot (D - a)$$

El valor de D se fija *a priori* y puede modificarse en sucesivos cálculos según la densidad resultante.

3º) Determinación de la superficie que corresponde a cada pie

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in}$$

4º) Cálculo de la densidad

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

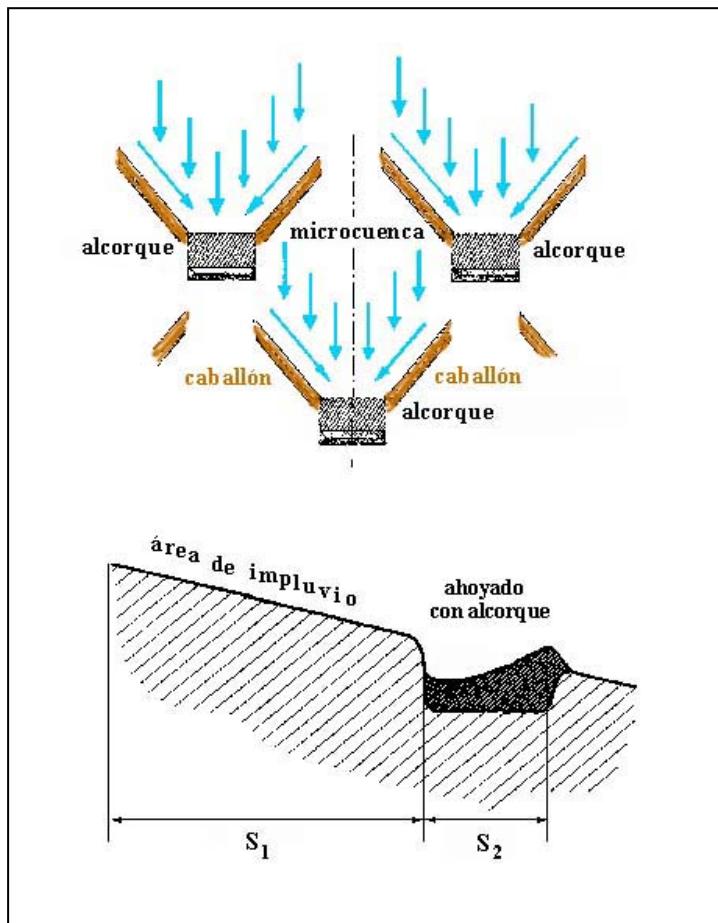


Figura 3.21. Construcción de caballones laterales que dirigen el agua de escorrentía hacia el área de recepción

* * * * *

Las sistematizaciones incompletas no aprovechan toda la escorrentía producida en la ladera, por lo que los alcorques pueden ser más pequeños, ya que éstos no van a recoger toda el agua posible. El hecho de que exista una parte de escorrentía descontrolada, correspondiente a los denominados pasillos de escorrentía, produce:

- Cosechas de agua menores (por lo que este tipo de sistematizaciones no son las más adecuadas para zonas muy secas).
- Indeterminación del agua infiltrada como promedio en la ladera (trampas de agua parciales).
- Mayor riesgo de formación de regueros de erosión en las zonas de pasillos y de rotura de hoyos (por acumulación no prevista de escorrentía, procedente de mayores superficies, en algunos hoyos).

No obstante, la decisión de elegir este tipo de preparaciones del suelo puede ser técnicamente acertada, en zonas en las que las cosechas de agua no sean cruciales para la consecución de la repoblación.

3.4. PROCEDIMIENTO INTEGRADO DE CÁLCULO

Ya se ha mencionado la relación existente entre la capacidad del microembalse, el cociente S_1/S_2 y la densidad de plantación. En base a estas relaciones se ha diseñado un procedimiento integrado de cálculo de las tres variables (véase la figura 3.22), que consta de las siguientes etapas:

- 1) Cálculo de la capacidad óptima del microembalse en función de los criterios desarrollados en el apartado 3.1.
- 2) Determinación de la relación S_1/S_2 , de acuerdo a la metodología propuesta en el apartado 3.2.
- 3) Establecimiento de la densidad de plantación, según lo planteado en el apartado 3.3.

Este es el procedimiento a seguir en zonas áridas y semiáridas, donde no es la densidad la que se fija primero, sino que ésta se supedita a la producción y recolección de una cantidad suficiente de agua.

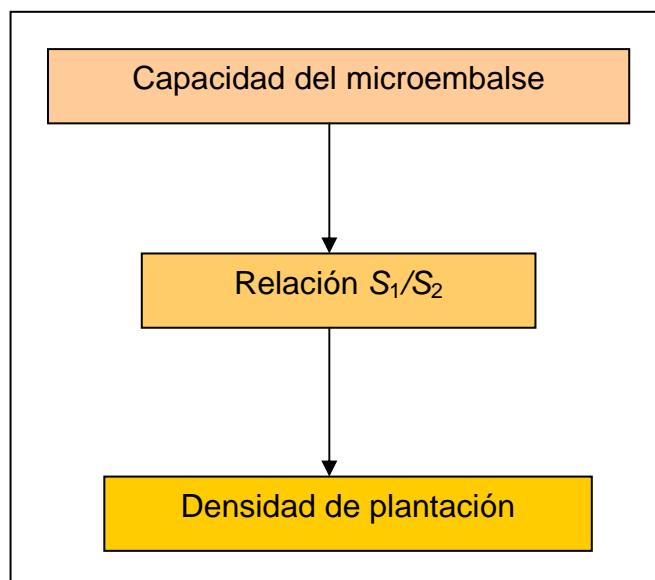


Figura 3.22. Secuencia integrada de cálculo de la capacidad del microembalse, relación S_1/S_2 y densidad de plantación

Otras consideraciones metodológicas

Como se verá en el siguiente apartado, algunos de los criterios establecidos para la determinación del tamaño óptimo del microembalse, así como las

metodologías propuestas para el cálculo de la relación S_1/S_2 y de la densidad de plantación, requieren como dato inicial las dimensiones de la preparación del terreno. Es decir, al mismo tiempo las dimensiones de la sistematización primaria son un dato de partida y la incógnita a inquirir.

La solución a este problema es, pese a lo que pudiera parecer, bien sencilla. Consiste primeramente en fijar una superficie de impluvio y otra de recepción en base a la experiencia de situaciones similares o según las prácticas habituales en el lugar. Éstas se emplearán como información inicial para la aplicación de la metodología, resultando finalmente unas dimensiones de la preparación del suelo que posiblemente nada tendrán que ver con las tomadas inicialmente.

Debido a que los cálculos pueden ser engorrosos y a que algunas veces será necesario realizar éstos de forma reiterada para llegar a una solución óptima, lo más conveniente es automatizar las metodologías, creando una hoja de cálculo o un programa informático.

3.5. DATOS NECESARIOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Se consignan en las tablas 3.18 y 3.19 los datos de partida para aplicar las metodologías de diseño de repoblaciones forestales (en lo referente al tamaño del microembalse, la relación entre el área de impluvio y el área de recepción y la densidad de plantación), que se proponen en este trabajo.

Tabla 3.18. Datos que se precisan para la aplicación de la metodología propuesta, ordenados según su utilización

UTILIZACIÓN	DATOS
Criterio hidrometeorológico Criterio hidráulico	Precipitación máxima diaria anual Números de curva: <i>NAC, NI, NR</i> Dimensiones de la preparación del suelo
Criterios edáficos	Capacidad de retención de agua del suelo (a partir de su textura o de su curva característica de humedad)
Criterio ecológico	Vegetación potencial (mapa de series de vegetación)
Criterio fisiológico	Precipitación mensual, precipitación máxima diaria mensual, número de días con precipitación y <i>ETP</i> , para el año seco, medio y húmedo Números de curva: <i>NAC, NI, NR</i> Dimensiones de la preparación del suelo
Criterio de proporcionalidad	Números de curva: <i>NAC, NI, NR</i> Dimensiones de la preparación del suelo
Limitación fisiológica	Textura del suelo
Criterio paisajístico	Textura del suelo Estructura Permeabilidad Longitud de la ladera Pendiente Cubierta vegetal Factor de erosividad de la lluvia Vida útil de la sistematización Densidad aparente de los sedimentos Coeficiente de emisión de sedimentos Área de impluvio
Criterios mecánicos	Naturaleza del terreno (para el cálculo del ángulo de taludes y del coeficiente de esponjamiento) Textura del suelo
Relación S_1/S_2	Evapotranspiración potencial Precipitación de diseño Números de curva: <i>NAC, NI, NR</i> Coeficiente de escorrentía del área de impluvio
Densidad de plantación	Relación S_1/S_2 calculada Dimensiones de la preparación del suelo (para sistematización incompleta)

Tabla 3.19. Datos necesarios para la aplicación de la metodología propuesta, ordenados según su naturaleza

TIPO	DATOS
Climáticos	Precipitación máxima diaria anual Precipitación mensual, precipitación máxima diaria mensual, número de días con precipitación y <i>ETP</i> , para el año seco, medio y húmedo Factor de erosividad de la lluvia
Edáficos	Capacidad de retención de agua del suelo (a partir de su textura o de su curva característica de humedad) Textura del suelo Estructura Permeabilidad Densidad aparente del suelo Densidad aparente de los sedimentos Naturaleza del terreno (para el cálculo del ángulo de taludes y del coeficiente de esponjamiento)
Observación de la ladera	Vegetación potencial (mapa de series de vegetación) Números de curva: <i>NAC</i> , <i>NI</i> , <i>NR</i> Dimensiones de la preparación del suelo Longitud de la ladera Pendiente Cubierta vegetal Dimensiones de la preparación del suelo (para sistematización incompleta) Coeficiente de cultivo de la repoblación Coeficiente de escorrentía del área de impluvio
Otros	Coeficiente de emisión de sedimentos Vida útil de la sistematización
Parámetros calculados	Volumen del microembalse calculado Relación S_1/S_2 calculada

4. ESTUDIO DE CASOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1. Localización

Esta área experimental está situada en el término municipal de Geria (Valladolid), dentro del monte conveniado nº 8267084 de esta provincia, denominado “Eriales de Geria” y en zonas limítrofes. El municipio se localiza en el centro de la Cuenca del Duero, en el borde sur de la comarca natural de Montes Torozos.

4.1.2. Climatología

En general, se puede decir que el clima de la comarca coincide plenamente con el genérico que es propio del resto de la región y en concreto de las llanuras de la Cuenca del Duero. Un clima mediterráneo frío, con inviernos largos y fríos, veranos secos y moderadamente cálidos, continentalizado por la localización interior de la región al resguardo de influencias marítimas por la orla montañosa que la rodea, pero con un frío acentuado como consecuencia de la inexistencia de obstáculos al movimiento del viento y de la mayor altitud del páramo en relación a las llanuras circundantes. Además, las precipitaciones son bastante escasas, casi ausentes en verano, lo que marca una sequedad estival importante.

El invierno de la comarca, al igual que en el resto de la región, excede ampliamente del astronómico. La diferencia no estriba solamente en la duración del invierno, sino también en la intensidad del frío, que es más evidente en la comarca, con una temperatura media de los meses invernales que está en conjunto un grado por debajo de la de las estaciones circundantes. Si se toman las medias de las mínimas, ya sea sólo del invierno o de todo el año, son también sensiblemente más reducidas, no tanto en el conjunto de meses invernales como en el resultado anual.

El periodo libre de heladas se reduce prácticamente a tres meses: junio, julio y agosto, siendo en los restantes de mayor o menor intensidad y tomando más fuerza entre los meses de noviembre a marzo. Además, esta prolongación del frío tiene como consecuencia una interrupción considerable de la actividad vegetativa de las plantas, llegando en esta comarca la primavera con cierto retraso.

La primavera y el otoño son estaciones muy cortas en esta región, donde se reducen a los meses de mayo y octubre respectivamente. También es cierto que habría que sumar la primera quincena de junio a la primavera y la segunda de septiembre al otoño. El verano no es más corto que en zonas vecinas, pero sí más fresco, pues las medias mensuales en el mes más cálido -julio- no suelen sobrepasar en mucho los 20 °C.

La característica que define las precipitaciones en el centro de la Cuenca del Duero es su escasez. En esta comarca la precipitación anual se sitúa ligeramente por encima de los 450 mm, aunque en muchos lugares de la región no se llega a esta cantidad. Este ligero incremento en las precipitaciones se explica por la disposición del páramo, perpendicular en líneas generales a los vientos dominantes en los días de lluvia, viéndose estos obligados a superar en poco espacio el desnivel existente entre la campiña y la culminación del páramo, originándose una corriente ascendente de aire que trae como consecuencia un incremento en las precipitaciones medible en las estaciones situadas encima del páramo, funcionando las cuestas como pantallas condensadoras de humedad.

Las precipitaciones durante los meses de julio y agosto son muy exigüas, no superando los 30 mm de precipitación mensual, e incluyendo en algunos lugares bajo este umbral el mes de septiembre. Se define de esta forma un periodo en el que la sequedad estival se hace patente durante dos o tres meses

Si se exceptúan los meses de verano, caracterizados como se ha visto por lo reducido de sus precipitaciones, en el resto del año se observa una relativa uniformidad de las lluvias, periodo en el que tan sólo destacan los máximos que se producen en los meses de mayo y noviembre-diciembre. Para toda la región lo que realmente existe es un periodo de lluvias que comienza a finales de septiembre o principios de octubre, y que en la comarca estudiada es más significativo de enero a mayo, meses en los que se acumula el grueso de las precipitaciones.

Una vez reseñado el clima general de la comarca se pasa a dar información de las principales variables climáticas de la zona en la que están instaladas las parcelas. Las estaciones meteorológicas utilizadas han sido las de Geria (pluviométrica) y Villanueva de Duero (temperatura), cuya información más destacada se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos generales de las estaciones meteorológicas utilizadas

ESTACIÓN	Geria	Valladolid 'Observatorio'
IDENTIFICADOR	2427	2422
ALTITUD	719	735
LATITUD	41º 33' 45"N	41º 39' 00" N
LONGITUD	4º 52' 37" W	4º 46' 00" W
Nº AÑOS DE LA SERIE	32	52
DATOS	Precipitación	Temperatura

En las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 pueden observarse los valores que toman las principales variables climáticas en la zona de estudio, mientras que en la figura 4.1 y en la tabla 4.5 se expone el climodiagrama de Walter-Lieth y sus resultados.

Tabla 4.2. Precipitación media mensual y precipitación anual media (mm) en las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
47,7	38,0	31,7	43,1	50,1	35,0	11,1	12,7	33,6	45,7	52,4	50,2	451,3

Tabla 4.3. Datos termométricos ($^{\circ}$ C) de las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
T_m	4,0	5,7	8,3	10,2	13,9	18,1	21,4	21,1	17,9	12,7	7,5	4,6	12,1
$TMMC_i$	7,9	10,6	14,2	16,1	20,3	25,3	29,5	28,9	24,8	18,5	12,1	8,2	18,0
$TMMF_i$	0,2	0,7	2,5	4,2	7,6	10,9	13,4	13,5	11,0	7,0	2,9	1,0	6,2
C_i	17,0	24,8	28,8	28,4	34,4	37,6	40,2	38,6	38,2	30,2	24,0	36,8	40,2
F_i	-16,1	-11,5	-10,2	-6,0	-1,7	2,6	3,2	3,6	0,0	-3,4	-6,5	-11,3	-16,1

T_m : Temperatura media mensual

$TMMC_i$: Temperatura media de las máximas

$TMMF_i$: Temperatura media de las mínimas

C_i : Temperatura máxima absoluta

F_i : Temperatura mínima absoluta

Tabla 4.4. Resumen de datos climatológicos medios en las parcelas situadas en el término municipal de Geria (Valladolid)

VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
Temperatura media anual	12,1
T. m. de las máximas del mes más cálido	29,5
T.m. de las mínimas del mes más frío	0,2
ETP anual	698,9
Precipitación anual	451,3
Clasificación según Allué (1990)	IV ₇ (VI) ₁ Nemoromediterraneo genuino

Tabla 4.5. Datos que pueden extraerse del climodiagrama de Walter-Lieth para las parcelas situadas en el municipio de Geria (Valladolid)

SÍMBOLO	VARIABLE	VALOR
K	Intensidad de la sequedad	0,282
A	Número de meses secos ($2T_i > P_i$)	3,15
PE	Precipitación estival mínima (precipitación media del mes con temperatura media más alta) (mm)	11,1
HS	Número de meses de helada segura (media de las mínimas menor de 0° C)	0
HP	Número de meses de helada probable (mínima absoluta inferior a 0° C)	9

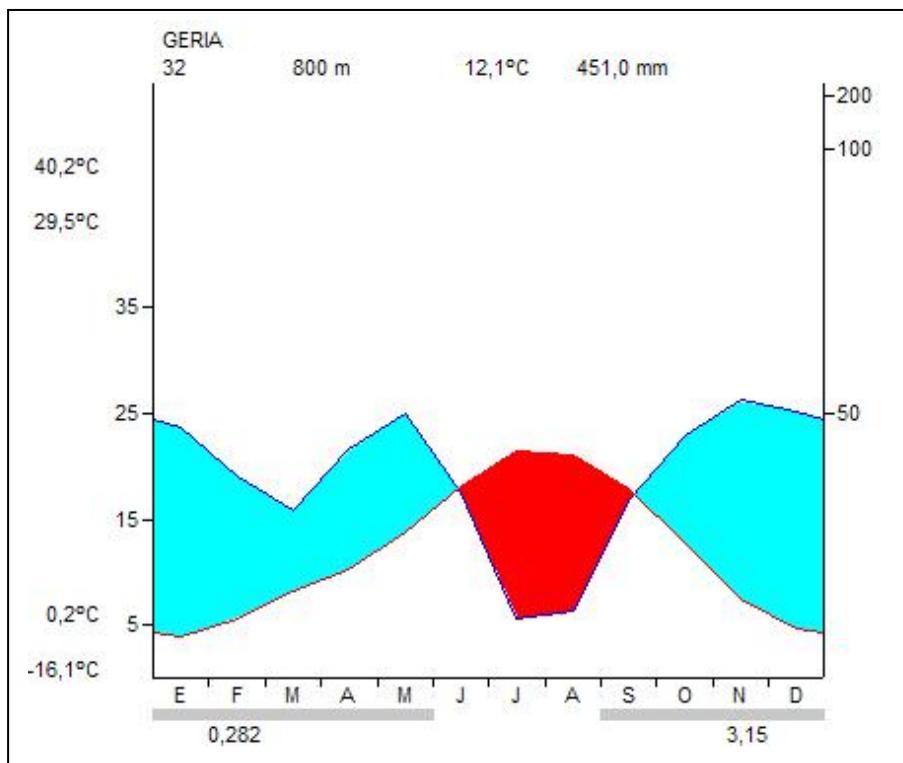


Figura 4.1. Climodiagrama de Walter-Lieth, para las zonas estudiadas del término municipal de Geria (Valladolid)

Tabla 4.6. Valores que toman en Geria (Valladolid) los principales índices climáticos que sirven para clasificar las zonas áridas y semiáridas

ÍNDICE	VALOR	CLASIFICACIÓN
Índice de Lang	37,30	Zona árida
Índice de Dantín-Revenga	2,68	Semiárido
Índice de Martonne	20,42	Región de olivo y cereales
Índice de Emberger	51,86	Piso mediterráneo templado
Índice de humedad (Thorntwaite)	-35,46	Semiárido

4.1.3. Geología

Las parcelas situadas en el municipio de Geria se localizan sobre afloramientos de sedimentos miocénicos, más concretamente de la denominada “Facies de las Cuestas s.s.” que constituye uno de los subtramos de los que consta la “Facies de las Cuestas s.l.”.

Se trata fundamentalmente de margas calizas, aunque en algunos lugares son frecuentes los yesos diagenéticos, de color gris blanquecino. La potencia de esta unidad es aproximadamente de 70 m y su edad es Astaraciense superior a Vallesiense superior (Mioceno).

4.1.4. Geomorfología

El relieve de esta comarca se define como dos superficies horizontales (páramos y campiñas) unidas mediante otra superficie inclinada (cuestas). La parcela se encuentra en una de estas cuestas, de perfil cóncavo, que descienden desde el páramo hasta el valle de un arroyo que algunos kilómetros más abajo desagua en el río Pisuerga. La altitud de la parte alta de la vertiente (a la altura del páramo) es de 850 m, mientras que la de la parte inferior es de 680 m. La pendiente media de la ladera es del 32 %.

Antes de que las laderas se reforestaran con coníferas, los procesos erosivos en las cuestas eran intensos y frecuentes. Estos eran de tipo laminar y en regueros, fundamentalmente, aunque existían también numerosos barrancos y cárcavas, la mayor parte de ellos inactivos en la actualidad, salvo en aquellos lugares donde los árboles no han prosperado.

4.1.5. Edafología

El suelo de la ladera que nos ocupa es un suelo poco evolucionado, del tipo Regosol calcáreo (según la clasificación de la FAO). Presentan un perfil AC, con un horizonte A de pocos centímetros y de color ligeramente más oscuro que el C. Éste no es más que la roca madre ligeramente alterada, en este caso la marga caliza descrita anteriormente.

En base al análisis de laboratorio, el suelo objeto de estudio tiene textura arcillosa gruesa. Su contenido en materia orgánica es muy bajo (0,59 %) y su capacidad de intercambio catiónico se considera baja, llegando a los 11,41 meq/100 g. El pH es alcalino (8,89), debido fundamentalmente a la roca madre, que condiciona también que el porcentaje de carbonatos sea muy alto (66,37 %) y el de caliza activa alto (13,12 %). En cuanto a los principales nutrientes, el contenido en nitrógeno y fósforo es muy bajo, normal el de potasio y calcio y alto el de magnesio (este último llega a los 3,47 meq/100 g).

4.1.6. Vegetación natural y potencial

La vegetación natural de la ladera está compuesta por lo que podría definirse como un tomillar mixto (véase la figura 4.2), en el que están presentes, entre otras, las siguientes especies: *Coronilla minima*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Euphorbia platyphyllos*, *Helianthemum croceum*, *Helichrysum italicum*, *Helichrysum stoechas*, *Koeleria vallesiana*, *Linum sufruticosum*, *Ononis fruticosa* ssp. *tridentata* y *Salvia lavandulifolia*. Se trata de matas leñosas o herbáceas de entre 15 y 80 cm de altura, repartidas por la ladera, ocupando una cabida de aproximadamente el 30 %.

La vegetación potencial de estas laderas se corresponde, según Rivas-Martínez (1987), con un bosque denso de encinas, enebros y, en algunos casos, quejigos (serie Supramediterránea castellano-maestrazgo-manchega basófila de la encina, *Juniperus thuriferae-Querceto rotundifoliae sigmetum*).



Figura 4.2. Ladera de Geria (Valladolid) cuya cubierta vegetal pretende restaurarse

4.1.7. Trabajos de repoblación

En la ladera degradada (que tiene un número de curva igual a 89), se pretenden llevar a cabo tres preparaciones del suelo diferentes, con el fin de lograr su restauración. Las dos primeras se emplearán en todos los cálculos, mientras que la tercera se utiliza para explicar preparaciones incompletas en el cálculo de la densidad de plantación.

La primera consiste en unas microcuenca con densidad de plantación de 1.000 pies/ha y con una banqueta de 1 m^2 dentro de la que hay que realizar una trampa de agua de tamaño adecuado. Las dimensiones de la unidad sistematizada que inicialmente se fijan son 9 m^2 para el área de impluvio y 1 m^2 para el área de recepción. Los números de curva del área de impluvio y del área de recepción son 89, siendo ésta una hipótesis del lado de la seguridad, puesto que el laboreo de la banqueta por somero que sea siempre mejora la capacidad de infiltración, con el consiguiente descenso en el número de curva.

La segunda preparación es un subsolado lineal sobre curvas de nivel con un apero de dos rejones separados entre sí 2 metros, a los que se han acoplado unas aletas para perfilar un caballón de altura adecuada. En principio, el área de recepción tiene una superficie de $0,73\text{ m}^2$ y el área de impluvio de $5,52\text{ m}^2$. El número de curva del área de impluvio en este caso es 89, mientras que el del área de recepción es 86 (considerando una mejora en el suelo por la labor profunda del subsolador).

Por último se ensaya una sistematización incompleta consistente en un ahoyado mecanizado mediante un tractor de cadenas equipado con dos rejones modificados. La modificación de los rejones consiste en soldarles una pieza (cuchara) a la altura de la bota con forma triangular, para abrir el hoyo, y otra sobre la anterior con forma de ala de avión para empujar la tierra e impedir que caiga al interior del hoyo. Entre las dos piezas hay un hueco para no compactar la pared inferior. El ala se

sitúa 20 cm por encima de la cuchara, tiene una anchura de 60 cm y una altura de 30 cm en el centro y 20 cm en los extremos. La cuchara es plana y triangular, con 30 cm de altura y 40 cm de profundidad. Estas dimensiones son las que recomienda Torre (1995).

Las especies elegidas para repoblar la ladera son *Pinus pinea* L., *Quercus ilex* L. y *Quercus faginea* Lam., que se plantarán con una savia y estarán producidas en contenedor de 17 cm de profundidad.

4.2. TAMAÑO DEL MICROEMBALSE

A) Criterio hidrometeorológico

Con la información aportada anteriormente, en cuanto a los dos tipos de repoblación que se quiere emplear –microcuencas y subsolado-, sus dimensiones y los números de curva de la ladera actual y de las respectivas áreas de impluvio y área de recepción, se aplica el procedimiento descrito en el apartado 3.1:

1º) Ajuste de las precipitaciones máximas diarias anuales a la distribución de Gumbel y test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

Se ha tomado la serie de precipitaciones máximas diarias anuales de la estación pluviométrica de Geria (véase la tabla 4.7). Con ellas se procede al ajuste a la distribución de Gumbel.

Tabla 4.7 Precipitación máxima diaria ($P_{máx}$) para la estación de Geria, en la serie 1964-2001, indicándose el mes en que se ha producido

AÑO	$P_{máx}$	MES	AÑO	$P_{máx}$	MES
1964	34,5	Febrero	1983	59,0	Agosto
1965	40,1	Septiembre	1984	65,0	Noviembre
1966	47,4	Octubre	1985	25,5	Julio
1967	32,4	Noviembre	1986	36,7	Septiembre
1968	31,0	Marzo	1987	26,2	Febrero
1969	27,5	Noviembre	1988	32,5	Junio
1970	23,4	Enero	1989	54,3	Diciembre
1971	22,7	Mayo	1990	38,9	Agosto
1972	25,6	Diciembre	1991	20,5	Marzo
1973	22,0	Noviembre	1992	23,5	Diciembre
1974	60,0	Junio	1993	35,6	Octubre
1975	13,3	Enero	1994	21,0	Octubre
1976	30,0	Septiembre	1995	42,5	Diciembre
1977	43,0	Enero	1996	41,5	Diciembre
1978	59,0	Septiembre	1997	53,0	Mayo
1979	35,0	Julio	1998	29,0	Diciembre
1980	30,0	Octubre	1999	45,5	Septiembre
1981	20,0	Febrero	2000	23,7	Mayo
1982	30,0	Septiembre	2001	26,5	Enero

Los resultados del ajuste son los que se exponen a continuación, quedando reflejados en la gráfica de la figura 4.3:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}$$

donde:

$$\alpha = 1,28255 \cdot \frac{1}{S} = 0,0992 \text{ mm}^{-1}$$

$$\mu = \bar{P}_{\max} - \frac{0,5772}{\alpha} = 29,1115 \text{ mm}$$

$$\bar{P}_{\max} = 34,93 \text{ mm} \quad (\text{media aritmética de las } P_{\max})$$

$$S = 12,93 \text{ mm} \quad (\text{cuasi-desviación típica})$$

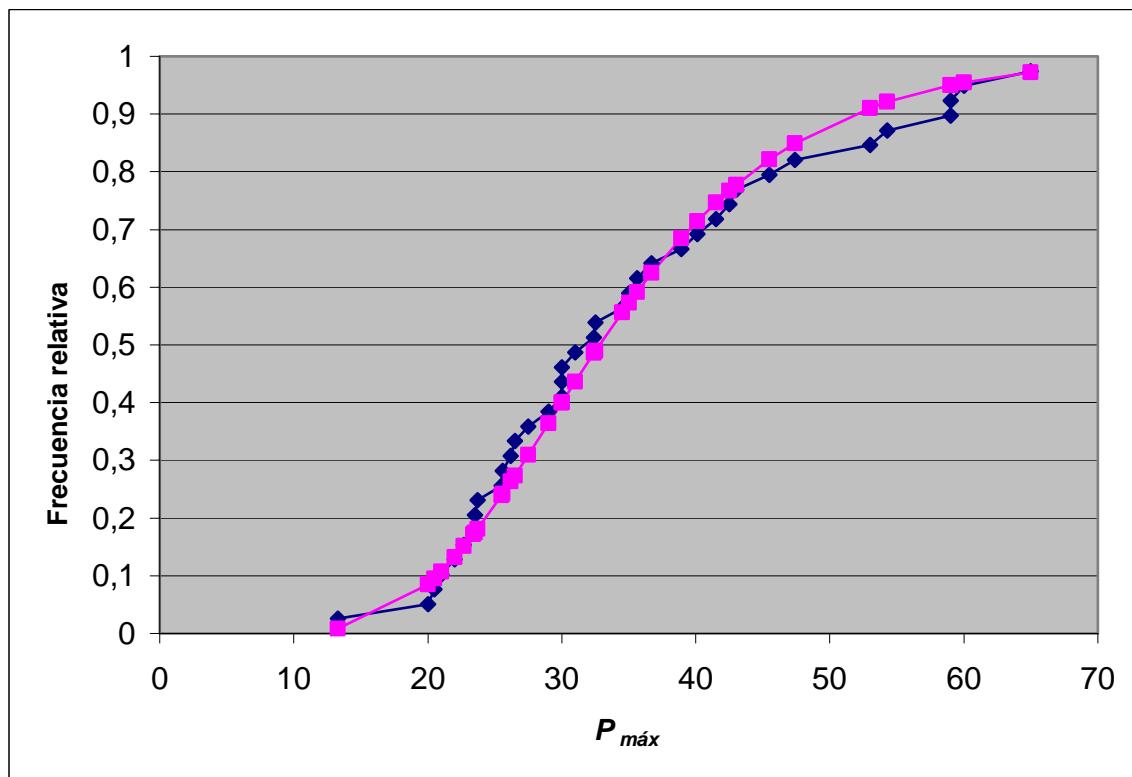


Figura 4.3. Ajuste de la función de distribución de Gumbel (en rosa) para las precipitaciones máximas diarias observadas (en azul) en la estación de Geria, durante el periodo 1964-2001

Para confirmar la bondad del ajuste realizado se plantea el test de Kolmogorov-Smirnov, cuyos cálculos se desarrollan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Test de Kolmogorov-Smirnov para la serie de datos de la estación de Geria

<i>n</i>	<i>P_{máx}</i>	<i>F_{Ri}</i>	<i>F(x)</i>	<i>/Δ/</i>
1	13,3	0,02564103	0,00823430	0,01740673
2	20,0	0,05128205	0,08465954	0,03337749
3	20,5	0,07692308	0,09540380	0,01848072
4	21,0	0,10256410	0,10689182	0,00432772
5	22,0	0,12820513	0,13202295	0,00381782
6	22,7	0,15384615	0,15123061	0,00261555
7	23,4	0,17948718	0,17166141	0,00782577
8	23,5	0,20512821	0,17467356	0,03045464
9	23,7	0,23076923	0,18076454	0,05000469
10	25,5	0,25641026	0,23910829	0,01730197
11	25,6	0,28205128	0,24250936	0,03954193
12	26,2	0,30769231	0,26319699	0,04449531
13	26,5	0,33333333	0,27370276	0,05963057
14	27,5	0,35897436	0,30932972	0,04964464
15	29,0	0,38461538	0,36381048	0,02080490
16	30,0	0,41025641	0,40026301	0,00999340
17	30,0	0,43589744	0,40026301	0,03563442
18	30,0	0,46153846	0,40026301	0,06127545
19	31,0	0,48717949	0,43641466	0,05076483
20	32,4	0,51282051	0,48595124	0,02686927
21	32,5	0,53846154	0,48942520	0,04903634
22	34,5	0,56410256	0,55658286	0,00751971
23	35,0	0,58974359	0,57258984	0,01715375
24	35,6	0,61538462	0,59133861	0,02404601
25	36,7	0,64102564	0,62434288	0,01668276
26	38,9	0,66666667	0,68475315	0,01808648
27	40,1	0,69230769	0,71448263	0,02217494
28	41,5	0,71794872	0,74631851	0,02836980
29	42,5	0,74358974	0,76722907	0,02363933
30	43,0	0,76923077	0,77712974	0,00789897
31	45,5	0,79487179	0,82138267	0,02651088
32	47,4	0,82051282	0,84962084	0,02910802
33	53,0	0,84615385	0,91073336	0,06457952
34	54,3	0,87179487	0,92109523	0,04930036
35	59,0	0,89743590	0,94974324	0,05230734
36	59,0	0,92307692	0,94974324	0,02666632
37	60,0	0,94871795	0,95437938	0,00566143
38	65,0	0,97435897	0,97196560	0,00239337

n = Número de individuo dentro de la muestra*P_{máx}* = Precipitación máxima diaria, en mm*F_{Ri}* = Frecuencia observada, calculada por la fórmula de Weibull: $F_{Ri} = \frac{n}{N+1}$ *N* = Número total de individuos de la muestra*F(x)* = Frecuencia calculada por la función de Gumbel*/Δ/* = Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia observada y calculadaSe localiza el valor máximo del estadístico */Δ/*:

$$D_{\max} = \supremo (|\Delta|) = 0,06457952$$

Se busca en la tabla de valores críticos de Kolmogorov-Smirnov el valor correspondiente a un tamaño de muestra de 38 y un nivel de significación de 0,20; es decir, $D(38; 0,20)$, y como:

$$D_{\max} < D(38; 0,20) = 0,17357692$$

se admite el ajuste como válido.

Mediante la función de distribución obtenida se han calculado las precipitaciones máximas diarias para diferentes períodos de retorno (véase la tabla 4.9), de la siguiente manera:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad P_{\max} = \frac{-\ln|\ln F(x)|}{\alpha} + \mu$$

Tabla 4.9. Precipitación máxima diaria (P_{\max}) para el periodo de retorno T , calculada a partir de la distribución de Gumbel

T (años)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
P_{\max} (mm)	44,2	51,8	56,1	59,1	61,4	63,2	64,8	66,2	67,4	68,4

2º) Obtención de las precipitaciones límite y de sus períodos de retorno

Introduciendo en el programa MODIPÉ los datos hidrológicos de la ladera y las dimensiones de las preparaciones del suelo proyectadas, se obtienen las precipitaciones límite (es decir, los umbráles de escorrentía en condiciones de humedad medias) de la unidad sistematizada para diferentes capacidades del microembalse (véanse las tablas 4.10 y 4.11). Posteriormente se calculan los períodos de retorno asociados a dichas precipitaciones, mediante la expresión:

$$T = \frac{1}{1 - F(x)}$$

3º) Cálculo de la capacidad del microembalse y de la altura de los muretes

Interpolando en la tabla 4.10, en el caso de las microcuenca, y para un periodo de retorno de 10 años, se obtiene una capacidad de embalse de 269,56 litros, que corresponde a unos muretes de 26,96 cm. Para el subsolado lineal, se interpola en la

tabla 4.11, y se obtiene que la capacidad del embalse debe ser 159,43 litros, para el mismo periodo de retorno, equivalente a muretes de 21,84 cm.

Tabla 4.10. Precipitaciones límite o umbrales de escorrentía (P_{lim}) en condiciones medias de humedad y sus periodos de retorno asociados (T), para el caso de microcuenca de 10 m^2 , con diferentes tamaños de embalse (CAPA)

CAPA (I)	P_{lim} (mm)	T (años)
0	6	-
50	22	1,15
100	30	1,67
150	37	2,72
200	43	4,49
250	49	7,70
300	55	13,55
350	61	24,15
400	67	43,39

Tabla 4.11. Precipitaciones límite o umbrales de escorrentía (P_{lim}) en condiciones medias de humedad y sus periodos de retorno asociados (T), para el caso de subsolado lineal, con diferentes tamaños de embalse (CAPA)

CAPA (I)	P_{lim} (mm)	T (años)
0	7	-
50	27	1,41
100	39	3,20
150	49	7,70
200	59	19,90
250	68	47,85
300	77	116,11
350	86	282,80
400	94	624,71

* * * * *

Según el **criterio de proporcionalidad con el área de impluvio**, y sabiendo que en el caso de las microcuenca los números de curva del área de impluvio y del área de recepción coinciden (89), y que sus respectivas superficies elegidas inicialmente son 9 y 1 m^2 , se aplica la ecuación correspondiente a $NI \geq NR$, es decir:

$$\frac{MAX}{S_2} = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} (R + 1)$$

Lo primero de todo es determinar P y P_0 , ya que R es conocida ($S_1/S_2 = 9$). La precipitación de cálculo se determina por el método de los aguaceros virtuales, que explica Martínez de Azagra (1996). El programa MODIPÉ utiliza este método y expone los resultados en una tabla que, para este caso es la que se muestra en la figura 4.4. La precipitación de cálculo será la precipitación máxima que tenga una condición de humedad mayor, por ser este aguacero el más desfavorable. En esta ocasión, se trata de los 40,1 mm que caen en el mes de septiembre, en condición de humedad I.

RESULTADOS PARCIALES										[III]
	P.mes	P.máx	N	PV1	N1	PV2	N2	P5	J	
1) ENERO		37.6	10.0	9	3.4	2.6	6.7	2.8	9.1	1
2) FEBRERO		45.6	15.4	8	4.3	2.5	9.9	2.0	12.0	1
3) MARZO		79.8	17.0	13	5.2	4.2	11.1	3.7	16.1	2
4) ABRIL		0.8	0.8	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1
5) MAYO		8.5	8.5	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1
6) JUNIO		27.9	14.5	3	6.7	0.5	10.6	0.9	9.3	1
7) JULIO		0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
8) AGOSTO		0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
9) SEPTIEMBRE		79.9	40.1	4	13.3	1.0	26.7	1.0	26.6	1
10) OCTUBRE		60.1	21.0	10	4.3	3.6	12.7	1.9	14.6	2
11) NOVIEMBRE		66.2	12.6	17	3.3	5.9	8.0	4.3	12.0	1
12) DICIEMBRE		40.7	9.4	13	2.6	4.3	6.0	3.3	8.4	1
Precipitación anual (en $1/m^2$): 447.1										
P. máx. diaria considerada (en mm): 40.1										
Número de días de lluvia en el año: 79										

Figura 4.4. Salida de resultados del programa MODIPÉ, correspondiente al año medio (1965) en Geria, en la que se determina el aguacero más desfavorable y que se utilizará como precipitación de cálculo. En este caso corresponde al mes de septiembre, en el que hubo una precipitación máxima de 40,1 mm en condición de humedad I.

Para determinar el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada (P_0) puede acudirse también a los cálculos que realiza MODIPÉ (véase la figura 4.5). A la vista de esta tabla, se comprueba que el umbral de escorrentía en condición de humedad I vale 15 mm.

Aplicando la ecuación correspondiente, se obtiene:

$$\frac{MAX}{S_2} = \frac{(40,1 - 15)^2}{40,1 + 4 \cdot 15} \cdot (9 + 1) = 62,94 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2}, \quad \text{ó } 62,94 \text{ l para } S_2 = 1 \text{ m}^2$$

PROGRAMA MODIPE DATOS DE LA SISTEMATIZACIÓN DEL TERRENO							
	S en m ²	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	77	15	89	6	95	3
UNIDAD SISTEMATIZADA	10.0	77	15	89	6	95	3

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: 0.0 1

Figura 4.5. Salida de resultados del programa MODIPÉ en la que se observan los umbrales de escorrentía según la sistematización utilizada y las diferentes condiciones de humedad. En el caso que se trata, el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada en condición I es 15 mm.

Para el caso del subsolado, el área de impluvio es 5,52 m² y el de recepción 0,73 m². Los números de curva varían con esta preparación (89 en la ladera actual y en el área de impluvio, y 86 en el área de recepción), mientras que el umbral de escorrentía (véase la figura 4.6) vale también 15 mm.

PROGRAMA MODIPE DATOS DE LA SISTEMATIZACIÓN DEL TERRENO							
	S en m ²	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	5.5	77	15	89	6	95	3
AREA DE RECEPCION	0.7	72	20	86	8	93	4
UNIDAD SISTEMATIZADA	6.3	77	15	89	7	95	3

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: 0.0 1

Figura 4.6. Salida de resultados del programa MODIPÉ en la que se observan los umbrales de escorrentía según la sistematización utilizada y las diferentes condiciones de humedad. En el caso que se trata, el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada en condición I es 15 mm.

La ecuación a aplicar en este caso es igualmente la indicada para $NI \geq NR$, obteniéndose el siguiente resultado:

$$\frac{MAX}{S_2} = \frac{(40,1-15)^2}{40,1+4 \cdot 15} \cdot \left(\frac{5,52}{0,73} + 1 \right) = 53,89 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2}, \quad \text{ó } 39,34 \text{ l} \text{ para } S_2 = 0,73 \text{ m}^2$$

El tamaño de embalse resultante tanto en el caso de microcuenca (62,94 l) como en el de subsolado (39,34 l), es exactamente el necesario para que se produzca la recogida de toda la escorrentía generada y no infiltrada, para la precipitación de cálculo que se eligió (40,1 mm). La correcta elección del año de cálculo (en este caso fue 1965, el año de precipitación media de la estación), como se explicó en el apartado 3.1.3.1., resulta crucial. Si el año en que se realiza la plantación llueve más que la precipitación de cálculo, se escapará agua de la unidad sistematizada.

B) Criterio de resguardo hidráulico

Continuando con lo expuesto para el criterio hidrometeorológico, en la tabla 4.12 se dan las dimensiones que deben tener los muretes del microembalse y el volumen resultante, tanto para las microcuenca como para el subsolado, aplicando el resguardo hidráulico recomendado (en este caso se ha incrementado la altura del murete en un 25 %).

Tabla 4.12. Altura del murete (H) en centímetros y capacidad del microembalse (CAPA) en litros, en base a los criterios hidrometeorológico y de resguardo hidráulico, para la preparación mediante microcuenca y subsolado

PREPARACIÓN	$H(\text{cm})$	$H(\text{cm})$ con resguardo	CAPA (l)	CAPA (l) con resguardo
Microcuenca	26,96	33,70	269,56	337,00
Subsolado	21,84	27,30	159,43	199,29

C) Criterios edáficos

Para la aplicación de estos criterios, se ha partido de una muestra de suelo de la ladera en cuestión, se ha analizado su textura y se ha estimado su capacidad de retención mediante las fórmulas de Fuentes & Cruz (1990) ya mencionadas en el apartado 3.1. Se van a considerar dos profundidades de raíces, a las cuales se va a referir la capacidad de retención:

- 34 cm.- Correspondiente al desarrollo a los dos años de edad (si en un año las raíces tienen 17 cm, porque ésta es la profundidad del contenedor, puede suponerse que en el año siguiente deberán tener, al menos, un crecimiento similar.

- 100 cm.- Que corresponde a una profundidad de raíces a partir de la cual la vegetación leñosa comienza a prospectar suelo fuera del alcance de las raíces de las plantas herbáceas (fuerte reducción de competencia por el agua).

Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 4.13. Según el criterio propuesto, el microembalse debe tener una capacidad entre 34,85 y 102,50 l (en el caso de microcuenca) o entre 25,44 y 74,83 l (en el caso de subsolado), lo que supone una altura de muretes entre 3,5 y 10,3 cm.

Tabla 4.13. Aplicación del criterio edáfico de la capacidad de retención para la ladera de Geria

MUESTRA DE SUELO	<i>h</i> (cm)	CRAD (l·m ⁻²)	CAPA (I)		H (cm)	
			Microcuenca	Subsolado	Microcuenca	Subsolado
GE51	34	34,85	34,85	25,44	3,5	3,5
	100	102,50	102,50	74,83	10,3	10,3

h = Profundidad del sistema radical considerado (cm)

CRAD = Capacidad de retención de agua disponible (l·m⁻²), calculada por las fórmulas de Fuentes & Cruz (1990)

CAPA = Capacidad del microembalse (l), para áreas de recepción de 1 m² (microcuenca) y 0,73 m² (subsolado)

H = Altura de los muretes del microembalse (cm)

Si se aplica el criterio de la porosidad útil a la ladera de Geria, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 4.14. La capacidad del microembalse puede variar entre 210,0 y 617,2 l (en el caso de microcuenca) o entre 153,3 y 450,4 l (para subsolado).

Tabla 4.14. Aplicación del criterio edáfico de la porosidad útil para la ladera de Geria

MUESTRA DE SUELO	<i>h</i> (cm)	<i>r_e</i> (tpu)	<i>p_u</i> (tpu)	H (cm)		CAPA (I)	
				Microcuenca	Subsolado	Microcuenca	Subsolado
GE51	34	0,6172	0,6172	21,0	21,0	210,0	153,3
	100	0,6172	0,6172	61,7	61,7	617,2	450,4

h = Profundidad del sistema radical (cm); *r_e* = Retención específica (en tanto por uno)

p_u = Porosidad útil (en tanto por uno), como aproximación a partir de la retención específica

H = Altura de los muretes del microembalse (cm); CAPA = Capacidad del microembalse (l), para un área de recepción de 1 m² (microcuenca) y de 0,73 m² (subsolado)

Se ha considerado que el área de proyección del bulbo húmedo (*S₃*) es igual al área de recepción.

D) Criterio ecológico

Como ya se dijo anteriormente, para el relieve y clima descrito, la vegetación potencial de la ladera de Geria corresponde, según Rivas Martínez (1987), a un bosque denso de encinas, enebros y, en algunos casos, quejigos (serie denominada Suprameditánea castellano-maestrazgo-manchega basófila de la encina, o *Juniperus thuriferae-Querceto rotundifoliae sigmetum*). A este tipo de bosque climálico puede

serle asignado un número de curva de 44 (o lo que es igual, un umbral de escorrentía de $65 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$, en condiciones medias de humedad).

Ajustando las precipitaciones máximas diarias a la distribución de Gumbel, como se hizo para el criterio hidrometeorológico (véase la tabla 4.9), se comprueba interpolando en la tabla que sólo se producirá escorrentía superficial con un periodo de retorno superior a 36 años. Esto quiere decir que el bosque será capaz de interceptar e infiltrar toda el agua de lluvia que le llega, a excepción de turbiones muy poco frecuentes.

Para la preparación del suelo consistente en microcuenca (véase la tabla 4.15), un número de curva igual al del bosque climático (NEQ) se consigue con una capacidad de embalse de 375 l, es decir, con una altura de muretes de 37,5 cm. En el caso de subsolado (tabla 4.16), el número de curva de 44 se consigue con un embalse de menor capacidad, concretamente de 233,3 l, con muretes de 32 cm.

Tabla 4.15. Precipitación límite (P_{lim}), periodo de retorno con que se produce (T) y número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ), para diferentes tamaños de alcorque (CAPA) en Geria, con preparación de microcuenca

CAPA (l)	P_{lim} (mm)	T (años)	NEQ
0	6	-	89
50	22	1,15	70
100	30	1,67	63
150	37	2,72	58
200	43	4,49	54
250	49	7,70	51
300	55	13,55	48
350	61	24,15	45
400	67	43,39	43

Tabla 4.16. Precipitación límite (P_{lim}), periodo de retorno con que se produce (T) y número de curva equivalente de la unidad sistematizada (NEQ), para diferentes tamaños de alcorque (CAPA) en Geria, con preparación de subsolado

CAPA (l)	P_{lim} (mm)	T (años)	NEQ
0	7	-	89
50	27	1,41	65
100	39	3,20	57
150	49	7,70	51
200	59	19,90	46
250	68	47,85	43
300	77	116,11	40
350	86	282,80	37
400	94	624,71	35

A pesar de lo expuesto hasta ahora, las dimensiones de embalse resultantes no dejan de tener un carácter de valor máximo, que desde el punto de vista de las disponibilidades hídricas aseguran la instalación del bosque climático. No obstante, sería posible conseguir resultados muy satisfactorios reduciendo estas dimensiones. Pero, por otra parte, existen, además del ecológico, otros muchos factores que condicionan el éxito de la empresa, a los que también es preciso prestar atención.

E) Criterio fisiológico

Este criterio se aplica utilizando datos de precipitaciones de la estación de Geria. Por otro lado, la evapotranspiración potencial se calcula por el método de Thornthwaite, empleando los datos termométricos de la estación de Valladolid-Observatorio, que entre las más próximas a las laderas a restaurar es la que mayor serie de datos fiables tiene. Para realizar los cálculos se elige el año de la serie disponible (1964-2002) que tiene una precipitación anual media (1965), el año más seco de la misma (1980) y el año de mayor precipitación (1960). Todos los datos utilizados se muestran en las tablas 4.17, 4.18 y 4.19.

Tabla 4.17. Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse según el criterio fisiológico, para el año medio (1965) en las laderas de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)

MES	P	$P_{máx}$	n	E_{s1}		ETP
				MICROCUENCAS	SUBSOLADO	
Enero	37,6	10,0	9	0,0	0,0	7,2
Febrero	45,6	15,4	8	0,0	0,0	6,0
Marzo	79,8	17,0	13	5,1	5,1	31,8
Abril	0,8	0,8	1	0,0	0,0	44,2
Mayo	8,5	8,5	1	0,0	0,0	88,5
Junio	27,9	14,5	3	0,0	0,0	115,6
Julio	0,0	0,0	0	0,0	0,0	119,5
Agosto	0,0	0,0	0	0,0	0,0	119,4
Septiembre	79,9	40,1	4	7,9	7,9	69,8
Octubre	60,1	21,0	10	6,7	6,7	53,7
Noviembre	66,2	12,6	17	0,0	0,0	21,5
Diciembre	40,7	9,4	13	0,0	0,0	14,5

E_{s1} calculada por el método del número de curva según una distribución de precipitaciones obtenida por el método de aguaceros virtuales. Para las microcuenas: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 89$; Para el subsolado: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 86$

ETP calculada por el método de Thornthwaite

4. Estudio de casos

Tabla 4.18. Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse según el criterio fisiológico, para el año seco (1980) en las laderas de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)

MES	P (mm)	$P_{máx}$ (mm)	n	E_{s1} (mm)		ETP (mm)
				MICROCUENCAS	SUBSOLADO	
Enero	23,0	7,0	9	0,0	0,0	11,8
Febrero	31,0	10,5	7	0,0	0,0	20,3
Marzo	43,0	14,5	10	0,0	0,0	29,2
Abril	54,5	16,5	8	0,0	0,0	39,0
Mayo	46,0	15,0	9	0,0	0,0	61,7
Junio	19,0	8,0	4	0,0	0,0	94,6
Julio	3,0	2,0	2	0,0	0,0	119,8
Agosto	19,0	12,5	5	0,0	0,0	128,3
Septiembre	6,5	4,0	3	0,0	0,0	97,7
Octubre	37,5	30,0	4	10,8	10,8	51,9
Noviembre	52,0	19,5	10	5,2	5,2	19,8
Diciembre	4,0	2,5	2	0,0	0,0	5,6

E_{s1} calculada por el método del número de curva según una distribución de precipitaciones obtenida por el método de aguaceros virtuales. Para las microcuenas: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 89$; Para el subsolado: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 86$.

ETP calculada por el método de Thornthwaite

Tabla 4.19. Datos necesarios para el cálculo del tamaño del microembalse según el criterio fisiológico, para el año húmedo (1960) en las laderas de Geria: Precipitación mensual (P), precipitación máxima diaria ($P_{máx}$), días de precipitación apreciable (n), escorrentía calculada que llega al área de recepción (E_{s1}) y evapotranspiración potencial (ETP)

MES	P (mm)	$P_{máx}$ (mm)	n	E_{s1} (mm)		ETP (mm)
				MICROCUENCAS	SUBSOLADO	
Enero	54,0	16,5	7	4,1	4,1	10,5
Febrero	98,0	19,3	17	7,5	7,5	16,0
Marzo	53,8	11,3	9	1,2	1,2	34,2
Abril	6,7	6,7	1	0,0	0,0	47,0
Mayo	51,8	17,5	7	0,1	0,1	84,9
Junio	28,8	25,5	2	1,3	1,3	117,5
Julio	4,9	3,4	2	0,0	0,0	119,2
Agosto	13,4	8,1	2	0,0	0,0	107,0
Septiembre	43,4	16,2	6	0,0	0,0	81,4
Octubre	159,7	41,5	21	70,0	70,0	37,9
Noviembre	100,1	17,8	14	7,3	7,3	24,9
Diciembre	55,8	17,2	10	4,1	4,1	7,7

E_{s1} calculada por el método del número de curva según una distribución de precipitaciones obtenida por el método de aguaceros virtuales. Para las microcuenas: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 89$; Para el subsolado: $NAC = 89$, $NI = 89$ y $NR = 86$.

ETP calculada por el método de Thornthwaite

Debido a que los números de curva y las superficies del área de impluvio y del área de recepción son diferentes según se trate de una sistematización por microcuenca o por subsolado, los cálculos se hacen por separado para cada tipo de preparación:

Microcuenca

En las tablas 4.20, 4.21 y 4.22 se expone el proceso de cálculo del tamaño del microembalse por los dos métodos descritos, para el año medio, el año seco y el año húmedo.

Tabla 4.20. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año medio y preparación por microcuenca en la ladera de Geria

1 MESES	2 D (l)	3 A (l)	4 D-A (l)	5 Acumulado positivo (l)	6 A_A (l)	7 D_A (l)	8 A_A-D_A (l)
Enero	7,2	37,6	-30,4		37,6	7,2	30,4
Febrero	6,0	45,6	-39,6		83,2	13,2	70,0
Marzo	31,8	125,7	-93,9		208,9	45,0	163,9
Abril	22,1	0,8	21,3	21,3	209,7	67,1	142,6
Mayo	44,3	8,5	35,8	57,1	218,2	111,4	106,9
Junio	23,1	27,9	-4,8		246,1	134,5	111,6
Julio	23,9	0,0	23,9	23,9	246,1	158,4	87,7
Agosto	23,9	0,0	23,9	47,8	246,1	182,3	63,9
Septiembre	69,8	151,0	-81,2		397,1	252,1	145,1
Octubre	53,7	120,4	-66,7		517,5	305,8	211,8
Noviembre	21,5	66,2	-44,7		583,7	327,3	256,5
Diciembre	14,5	40,7	-26,2		624,4	341,8	282,7

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copia10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

Para el año medio, si se aplica el método del diagrama de masa (columnas 4 y 5 de la tabla 4.20), se puede observar que se obtienen valores positivos de las diferencias entre la demanda y la aportación en los meses de abril-mayo y julio-agosto. Por lo tanto, la mayor de estas cantidades acumuladas da el volumen que debe tener el microembalse; en este caso ese volumen es de 57,1 l. Por el método gráfico de diferencias acumuladas, los resultados son los que se muestran en las columnas 6 a 8 de la tabla 4.20 y en las figuras 4.7 y 4.8. En la figura 4.8 puede observarse que la gráfica A_A-D_A desciende entre los meses de marzo y mayo y entre junio y agosto. En estos periodos es necesario desembalsar un volumen de agua igual al descenso de la curva, para cubrir las necesidades. El mayor de este volumen resulta de restar el valor de la gráfica en marzo (163,9 l) y mayo (106,9 l), es decir, 57,0 l.

Tabla 4.21. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año seco y preparación por microcuenca en la ladera de Geria

1 MESES	2 D (l)	3 A (l)	4 D-A (l)	5 Acumulado positivo (l)	6 A_A (l)	7 D_A (l)	8 A_A-D_A (l)
Enero	11,8	23,0	-11,2		23,0	11,8	11,2
Febrero	20,3	31,0	-10,7		54,0	32,1	21,9
Marzo	29,2	43,0	-13,8		97,0	61,3	35,7
Abril	39,0	54,5	-15,5		151,5	100,3	51,2
Mayo	30,9	46,0	-15,2		197,5	131,2	66,4
Junio	47,3	19,0	28,3	28,3	216,5	178,5	38,1
Julio	24,0	3,0	21,0	49,3	219,5	202,4	17,1
Agosto	25,7	19,0	6,7	56,0	238,5	228,1	10,4
Septiembre	19,5	6,5	13,0	69,0	245,0	247,6	-2,6
Octubre	10,4	134,7	-124,3		379,7	258,0	121,7
Noviembre	19,8	98,8	-79,0		478,5	277,8	200,7
Diciembre	2,8	4,0	-1,2		482,5	280,6	201,9

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copa10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

En el caso del año seco, se comprueba en las columnas 4 y 5 de la tabla 4.21 que las diferencias entre la demanda y la aportación son positivas entre junio y septiembre. El acumulado de estas cantidades da el volumen del microembalse: 69,0 l. Por otro lado, el método de diferencias acumuladas (columnas 6 a 8 de la tabla 4.21 y figuras 4.9 y 4.10) da como resultado que la curva A_A-D_A desciende entre los meses de mayo y septiembre. El decrecimiento hay que compensarlo con un desembalse de un determinado volumen de agua, siendo este volumen el resultado de sumar (en este caso, al ser uno de los valores negativo) el valor de mayo (66,4 l) y el de julio (-2,6 l): 69,0 l.

Tabla 4.22. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año húmedo y preparación por microcuenca en la ladera de Geria

1 MESES	2 <i>D</i> (l)	3 <i>A</i> (l)	4 <i>D-A</i> (l)	5 Acumulado positivo (l)	6 <i>A_A</i> (l)	7 <i>D_A</i> (l)	8 <i>A_A-D_A</i> (l)
Enero	10,5	90,9	-80,4		90,9	10,5	80,4
Febrero	16,0	165,5	-149,5		256,4	26,5	229,9
Marzo	34,2	64,6	-30,4		321,0	60,7	260,3
Abril	23,5	6,7	16,8	16,8	327,7	84,2	243,5
Mayo	42,5	52,7	-10,3		380,4	126,7	253,8
Junio	23,5	40,5	-17,0		420,9	150,2	270,8
Julio	23,8	4,9	18,9	18,9	425,8	174,0	251,8
Agosto	21,4	13,4	8,0	26,9	439,2	195,4	243,8
Septiembre	16,3	43,4	-27,1		482,6	211,7	270,9
Octubre	37,9	789,7	-751,8		1272,3	249,6	1022,7
Noviembre	24,9	165,8	-140,9		1438,1	274,5	1163,6
Diciembre	7,7	92,7	-85,0		1530,8	282,2	1248,6

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copia10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

Para el año húmedo (véanse las columnas 4 y 5 de la tabla 4.22), en los meses de abril y julio-agosto es positiva la diferencia entre las demandas y las aportaciones. La mayor de esas cantidades acumuladas (es decir, la correspondiente al periodo julio-agosto) es por tanto la capacidad del microembalse: 26,9 l. También en la tabla 4.22, en las columnas 6, 7 y 8, y en las figuras 4.11 y 4.12 se muestra el método de diferencias acumuladas. El volumen adecuado del microembalse se obtiene restando el valor de *A_A-D_A* correspondiente a junio (270,8 l) menos el de agosto (243,8 l), es decir, 27,0 l.

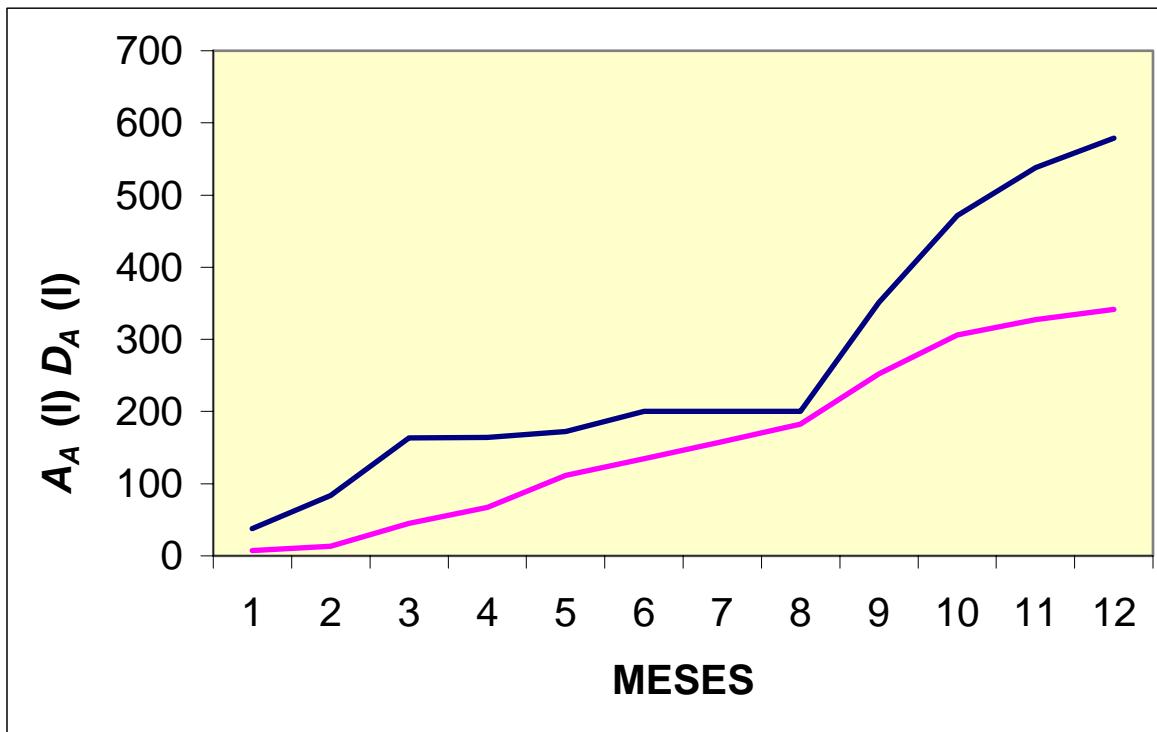


Figura 4.7. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año medio en Geria y sistematización por microcuentas

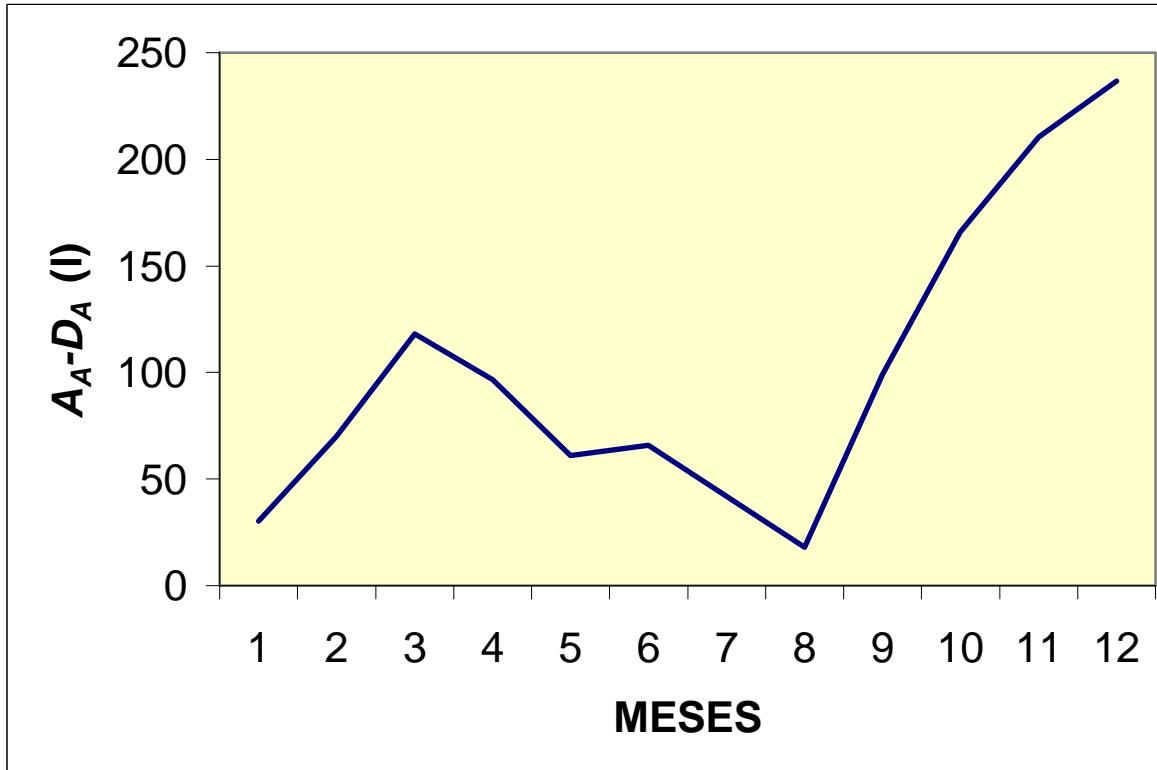


Figura 4.8. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año medio en Geria y sistematización por microcuentas

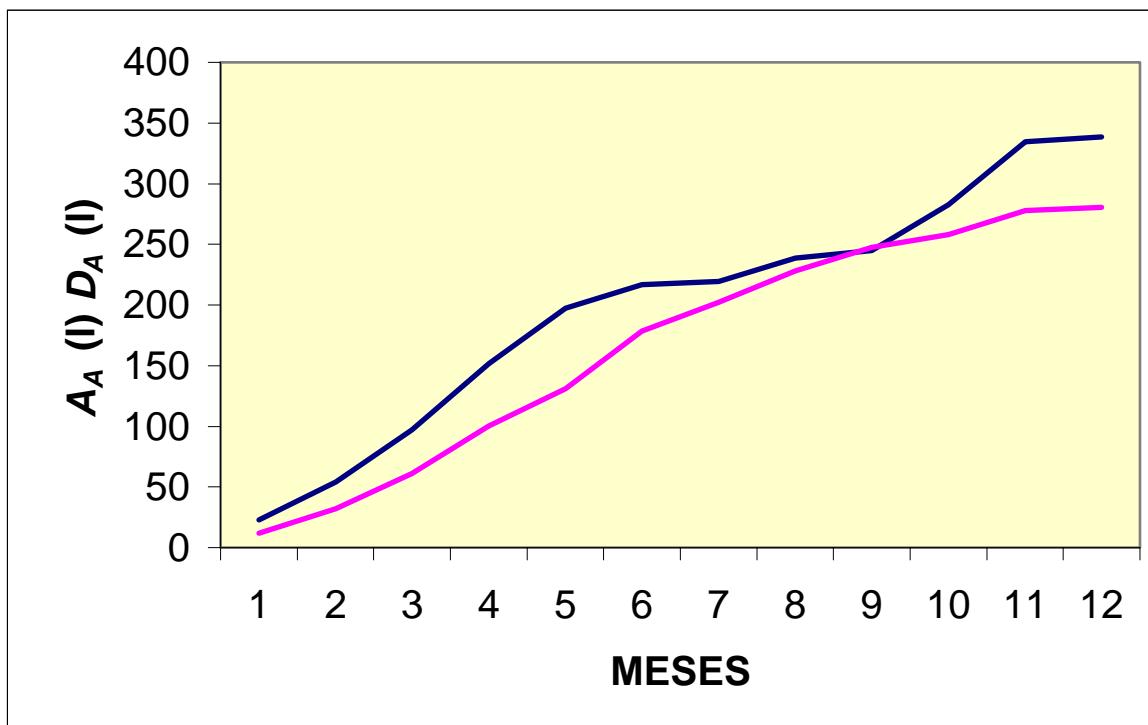


Figura 4.9. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año seco en Geria y sistematización por microcuencas

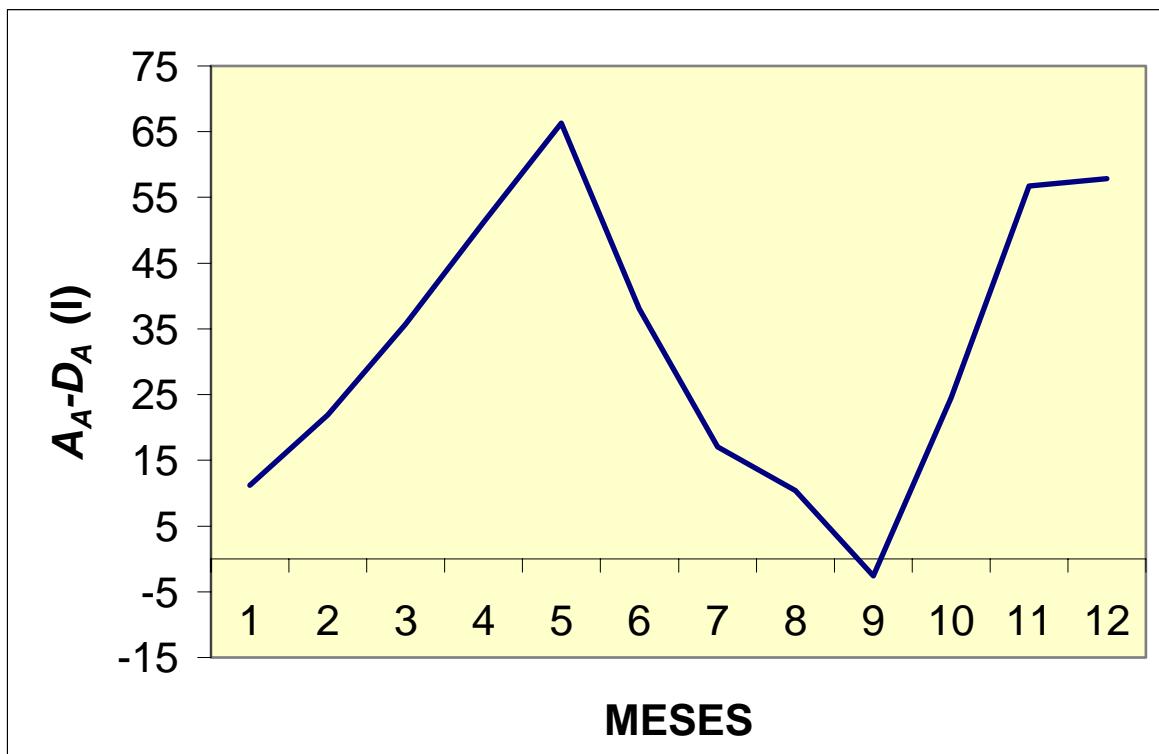


Figura 4.10. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año seco en Geria y sistematización por microcuencas

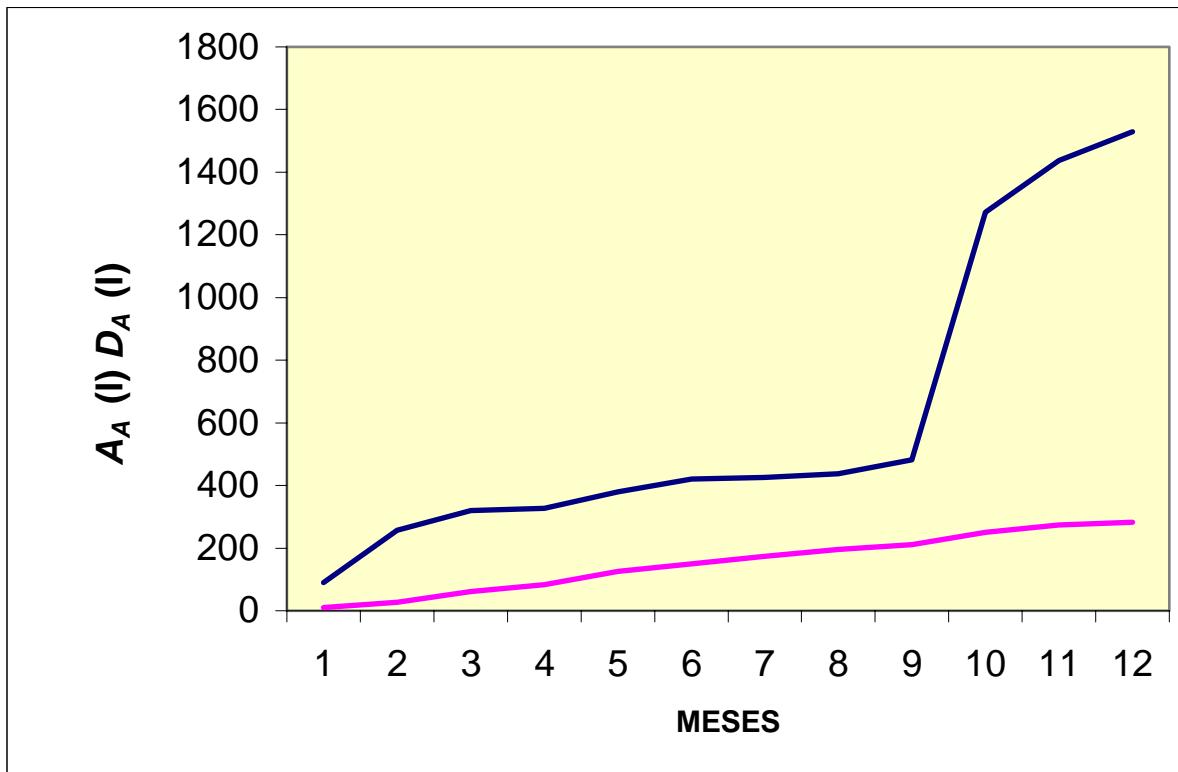


Figura 4.11. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año húmedo en Geria y sistematización por microcuentas

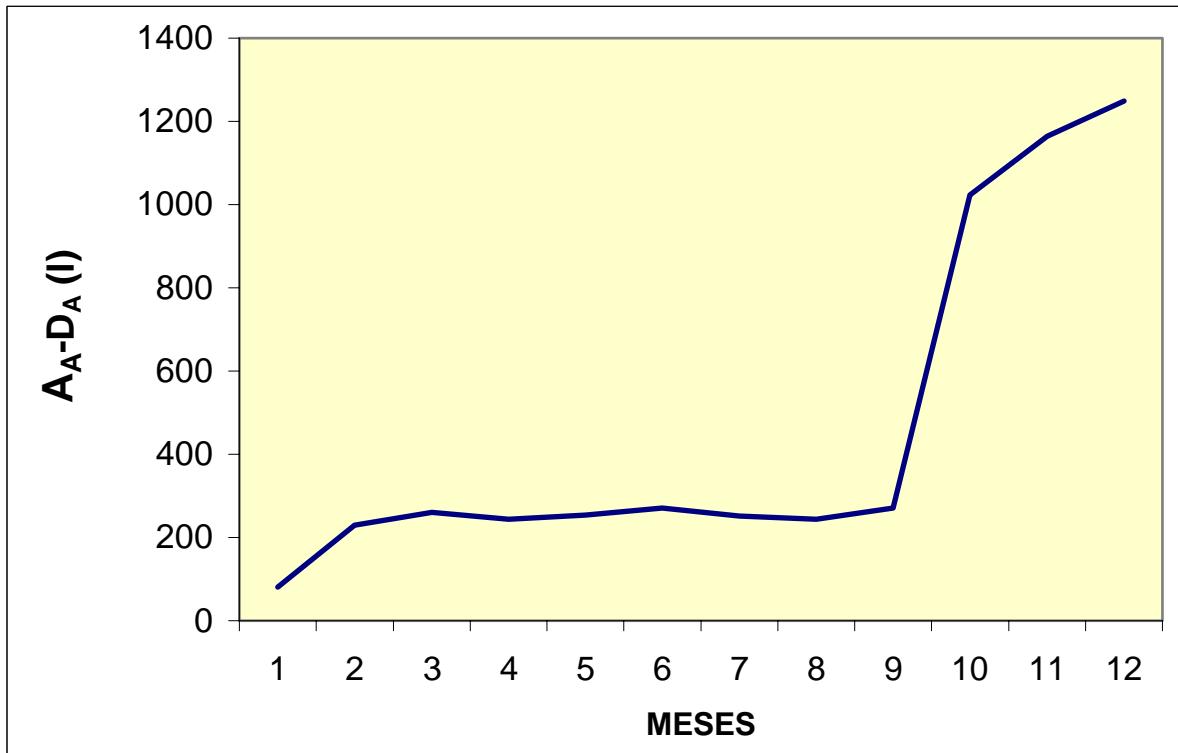


Figura 4.12. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año húmedo en Geria y sistematización por microcuentas

Subsolado

Siguiendo el mismo esquema se calcula el tamaño del microembalse para una preparación del suelo consistente en un subsolado lineal con formación de caballón. Los resultados se muestran en las tablas 4.23, 4.24 y 4.25.

Para el año medio (véanse la tabla 4.23 y las figuras 4.13 y 4.14) se obtiene un volumen del microembalse de 110,1 l. En el caso del año seco (tabla 4.24 y figuras 4.15 y 4.16), el microembalse necesario resulta ser de 81,8 l. Y por último, para el año húmedo, la tabla 4.25 y las figuras 4.17 y 4.18 sirven para llegar a que el tamaño del microembalse debe ser de 31,9 l.

Tabla 4.23. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año medio y preparación por subsolado en las laderas de Geria

1	2	3	4	5	6	7	8
MESES	D (l)	A (l)	D-A (l)	Acumulado positivo (l)	A _A (l)	D _A (l)	A _A -D _A (l)
Enero	7,2	27,4	-20,2		27,4	7,2	20,2
Febrero	6,0	33,3	-27,3		60,7	13,2	47,5
Marzo	31,8	58,3	-26,5		119,0	45,0	74,0
Abril	22,1	0,6	21,5	21,5	119,6	67,1	52,5
Mayo	44,3	6,2	38,0	59,5	125,8	111,4	14,4
Junio	23,1	20,4	2,8	62,3	146,1	134,5	11,7
Julio	23,9	0,0	23,9	86,2	146,1	158,4	-12,2
Agosto	23,9	0,0	23,9	110,1	146,1	182,3	-36,1
Septiembre	69,8	101,9	-32,1		248,1	252,1	-4,0
Octubre	53,7	80,9	-27,2		328,9	305,8	23,2
Noviembre	21,5	48,3	-26,8		377,3	327,3	50,0
Diciembre	14,5	29,7	-15,2		407,0	341,8	65,2

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copia10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

4. Estudio de casos

Tabla 4.24. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año seco y preparación por subsolado en las laderas de Geria

1	2	3	4	5	6	7	8
MESES	D (l)	A (l)	D-A (l)	Acumulado positivo (l)	A _A (l)	D _A (l)	A _A -D _A (l)
Enero	11,8	16,8	-5,0		16,8	11,8	5,0
Febrero	20,3	22,6	-2,3		39,4	32,1	7,3
Marzo	29,2	31,4	-2,2		70,8	61,3	9,5
Abril	39,0	39,8	-0,8		110,6	100,3	10,3
Mayo	30,9	33,6	-2,7		144,2	131,2	13,0
Junio	47,3	13,9	33,4	33,4	158,0	178,5	-20,4
Julio	24,0	2,2	21,8	55,2	160,2	202,4	-42,2
Agosto	25,7	13,9	11,8	67,0	174,1	228,1	-54,0
Septiembre	19,5	4,7	14,8	81,8	178,9	247,6	-68,8
Octubre	10,4	87,0	-76,6		265,8	258,0	7,9
Noviembre	19,8	66,7	-46,9		332,5	277,8	54,7
Diciembre	2,8	2,9	-0,1		335,4	280,6	54,8

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copia10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

Tabla 4.25. Proceso de cálculo del volumen del microembalse por el método de curva de masas y por el método de diferencias acumuladas, para el año húmedo y preparación por subsolado en las laderas de Geria

1	2	3	4	5	6	7	8
MESES	D (l)	A (l)	D-A (l)	Acumulado positivo (l)	A _A (l)	D _A (l)	A _A -D _A (l)
Enero	10,5	62,1	-51,6		62,1	10,5	51,6
Febrero	16,0	112,9	-96,9		175,0	26,5	148,5
Marzo	34,2	45,9	-11,7		220,9	60,7	160,2
Abril	23,5	4,9	18,6	18,6	225,8	84,2	141,6
Mayo	42,5	37,9	4,6	23,2	263,7	126,7	137,0
Junio	23,5	28,2	-4,7		291,9	150,2	141,7
Julio	23,8	3,6	20,3	20,3	295,4	174,0	121,4
Agosto	21,4	9,8	11,6	31,9	305,2	195,4	109,8
Septiembre	16,3	31,7	-15,4		336,9	211,7	125,2
Octubre	37,9	503,0	-465,1		839,9	249,6	590,3
Noviembre	24,9	113,4	-88,5		953,2	274,5	678,8
Diciembre	7,7	63,4	-55,7		1016,6	282,2	734,4

D = Demandas (véase el apartado 3.1.3.5). Se ha tomado $S_{copia10} = 1 \text{ m}^2$ y $k_c = 0,5$ (asemejando la repoblación a un cultivo leñoso).

A = Aportaciones

D_A = Demandas acumuladas

A_A = Aportaciones acumuladas

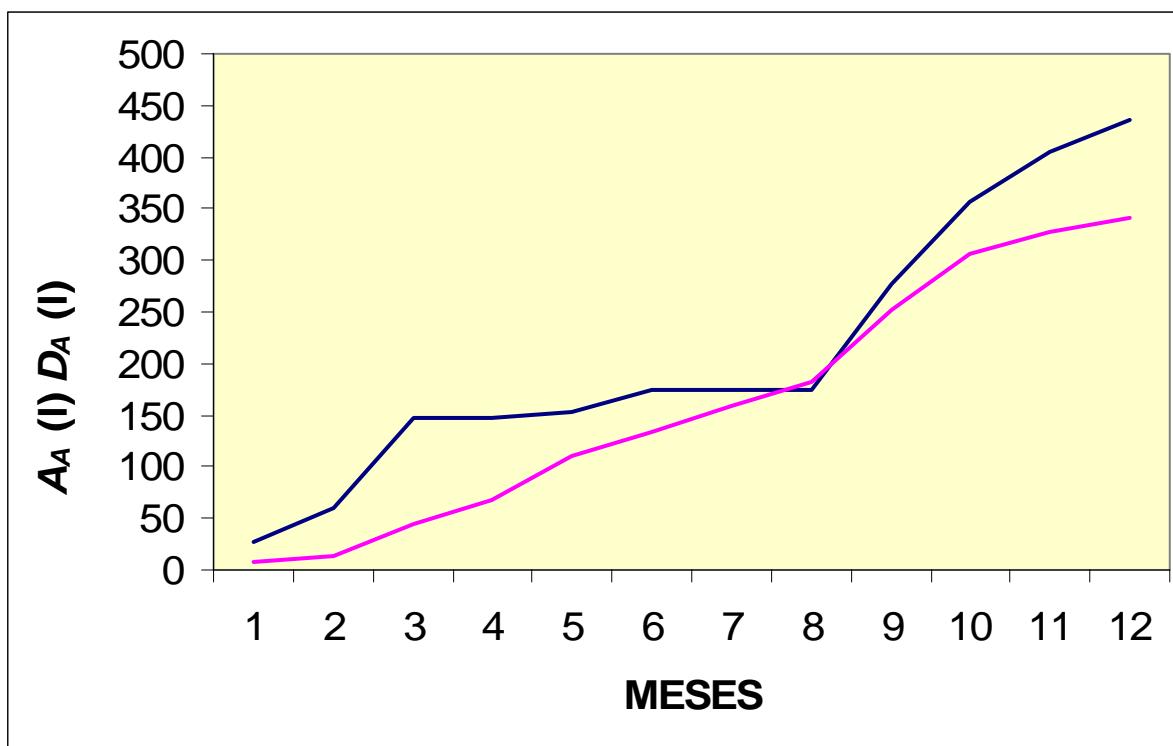


Figura 4.13. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año medio en Geria y sistematización por subsolado

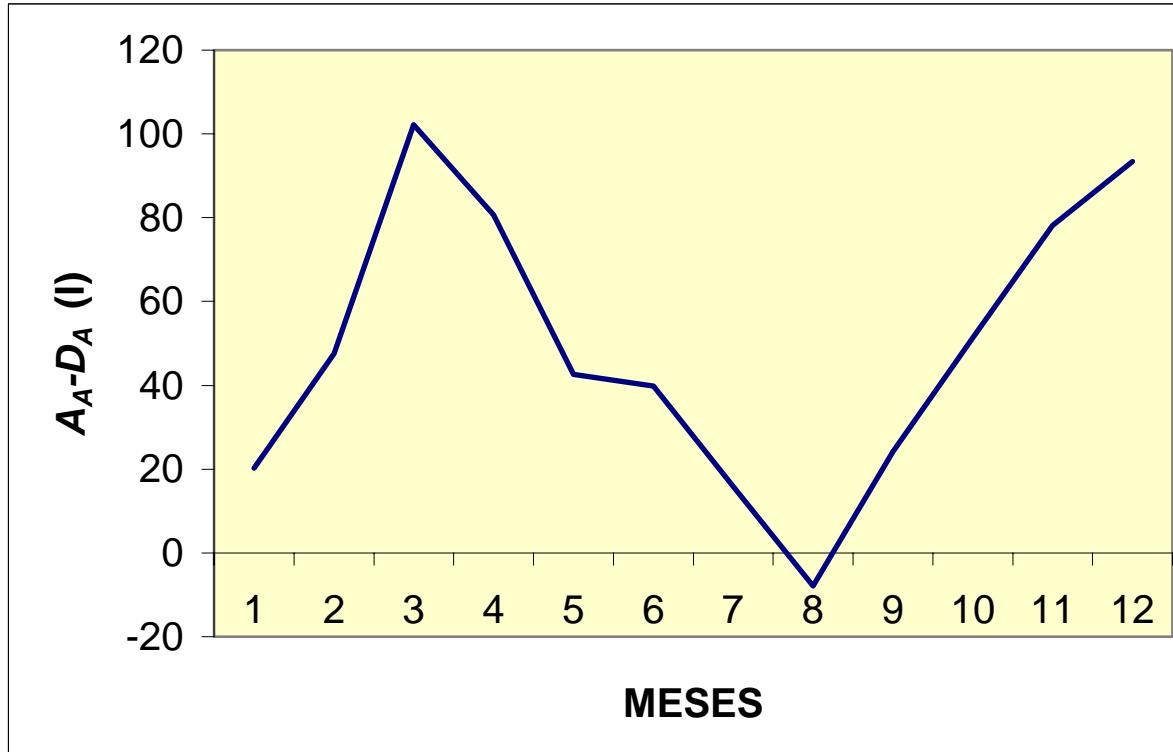


Figura 4.14. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año medio en Geria y sistematización por subsolado

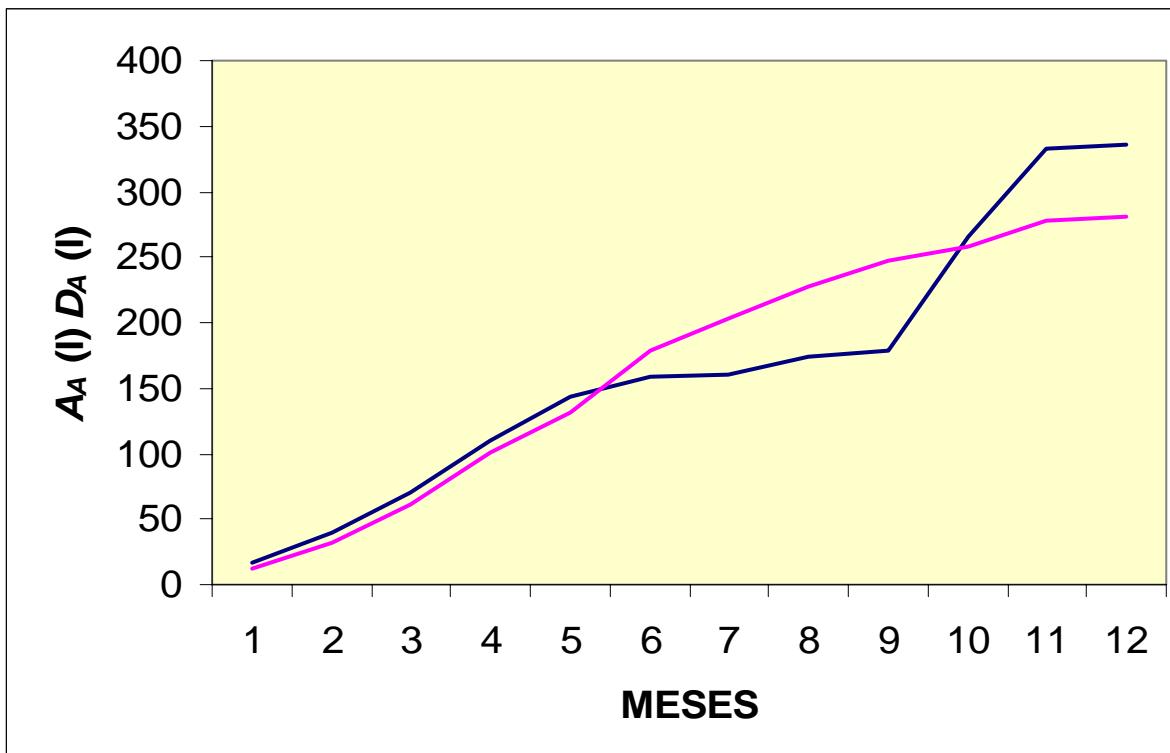


Figura 4.15. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año seco en Geria y sistematización por subsolado

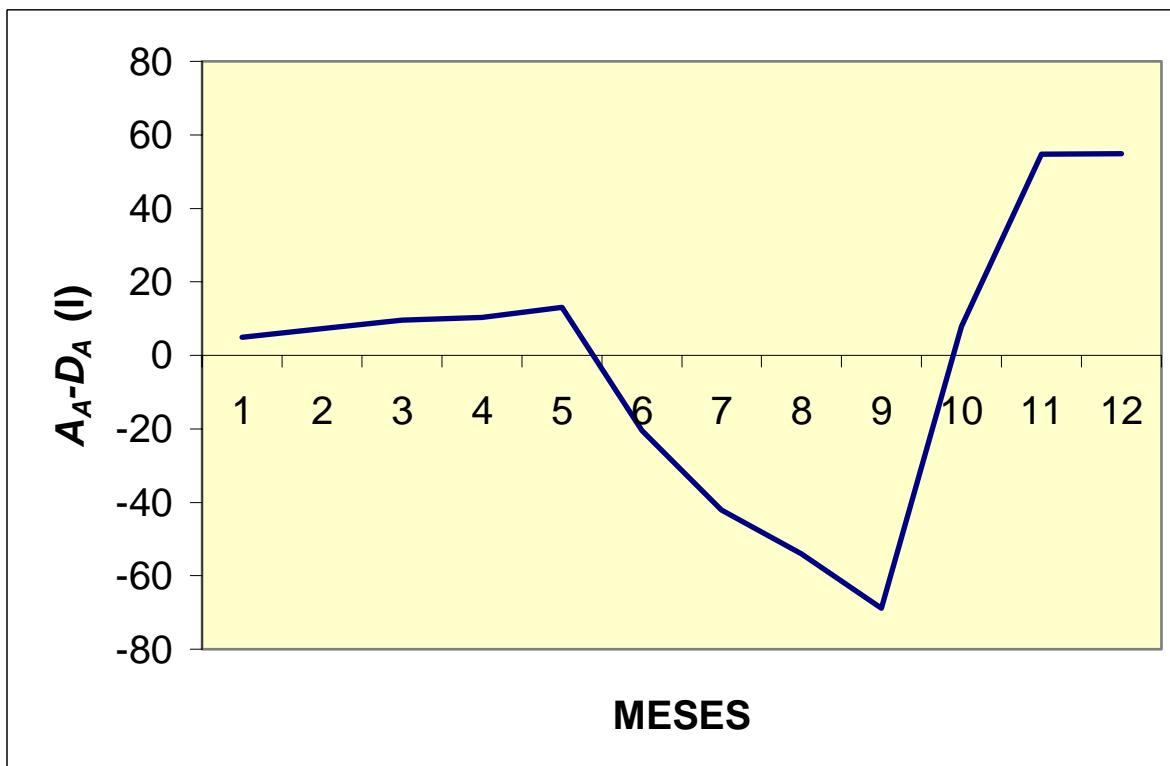


Figura 4.16. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año seco en Geria y sistematización por subsolado

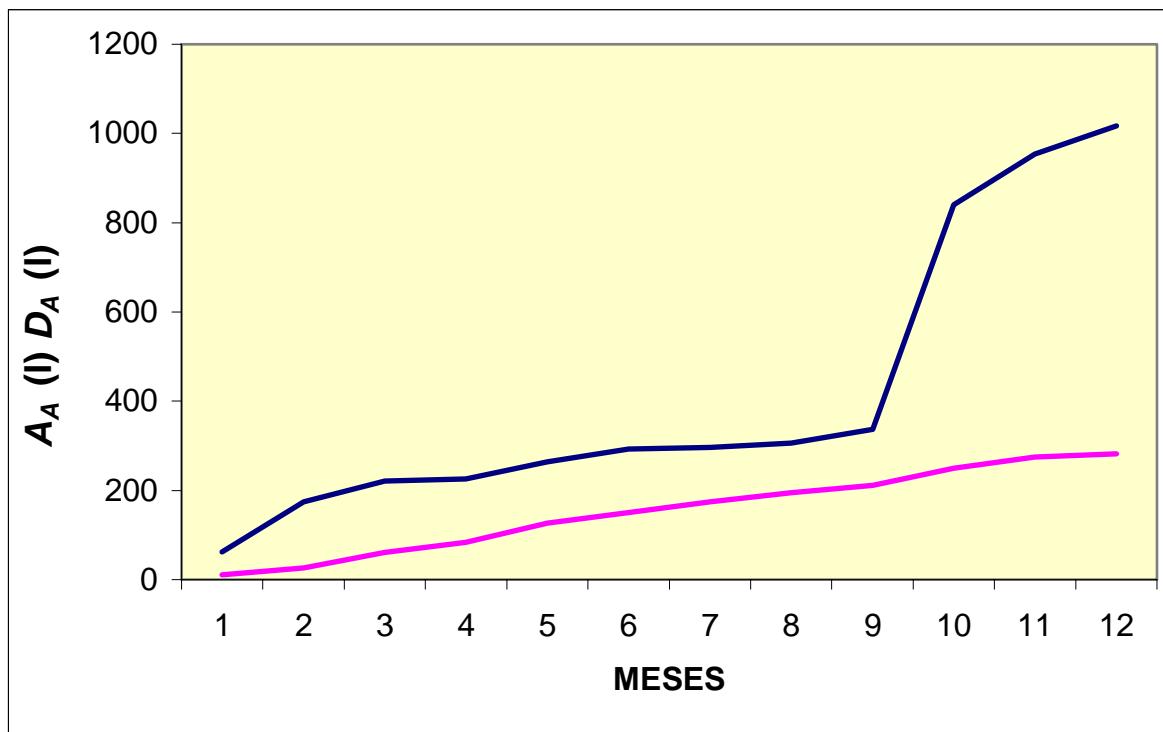


Figura 4.17. Evolución mensual de las aportaciones acumuladas (azul) y de las demandas acumuladas (rosa) para el año húmedo en Geria y sistematización por subsolado

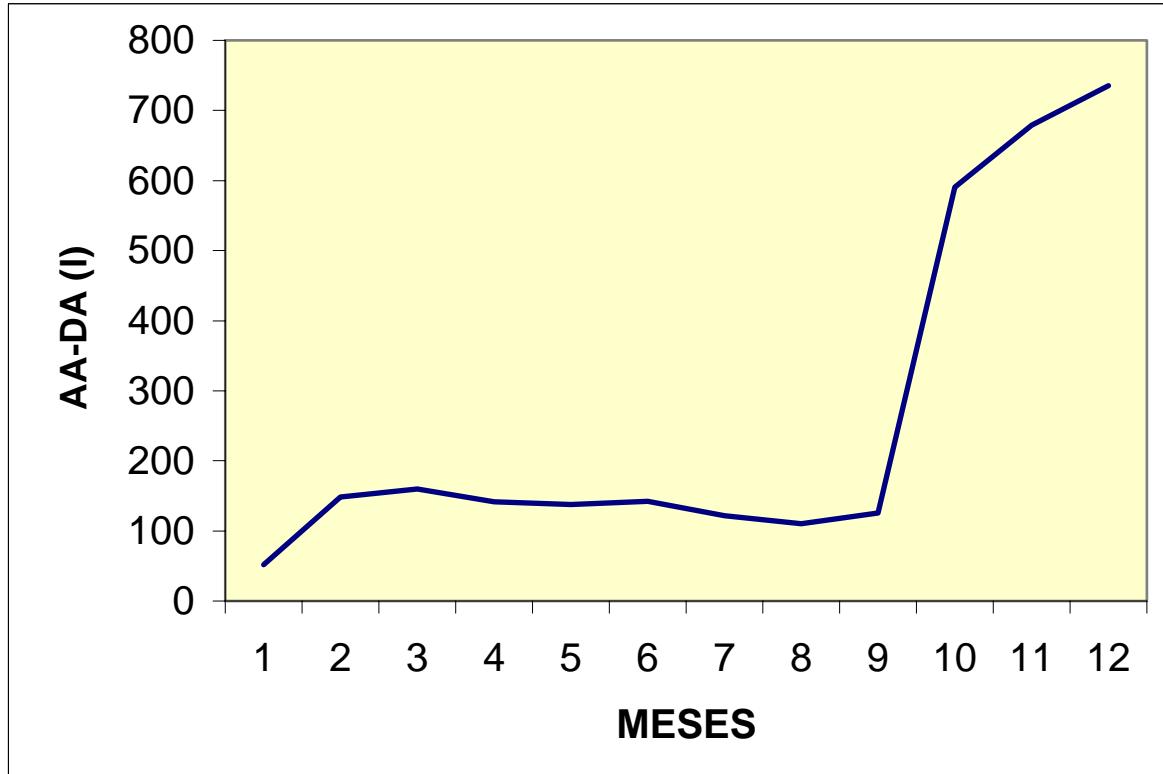


Figura 4.18. Evolución mensual de la diferencia entre aportaciones acumuladas y demandas acumuladas para el año húmedo en Geria y sistematización por subsolado

G) Limitación fisiológica por encharcamiento

La conductividad hidráulica a saturación del suelo presente en las laderas de Geria es aproximadamente, según el diagrama de la figura 3.8 del apartado 3.1.3.6, de $0,55 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ y, por consiguiente, f_{\min} resulta ser igual a $0,28 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. Con este dato se ha calculado el tiempo máximo de embalse para capacidades que van desde los 0 hasta los 400 litros, tanto para microcuenca como para subsolado, mostrándose los resultados en las tablas 4.26 y 4.27. Estas tablas orientan en el momento en que se tenga que tomar una decisión definitiva sobre el tamaño del microembalse.

Tabla 4.26. Tiempos máximos de embalse para microcuenca con diferentes capacidades de embalse

CAPA (l)	H (cm)	T_{\max} (h)
0	0	0,00
50	5	17,86
100	10	35,71
150	15	53,57
200	20	71,43
250	25	89,29
300	30	107,14
350	35	125,00
400	40	142,86

Tabla 4.27. Tiempos máximos de embalse para subsolado con diferentes capacidades de embalse

CAPA (l)	H (cm)	T_{\max} (h)
0	0	0,00
50	7	24,46
100	14	48,92
150	21	73,39
200	27	97,85
250	34	122,31
300	41	146,77
350	48	171,23
400	55	195,69

Si se interpola en la tabla 4.26 con el tamaño de microembalse obtenido por el criterio ecológico para microcuenca (375 l) el tiempo máximo de encharcamiento es de 133,93 horas. Haciendo lo mismo para subsolado, en el que el microembalse debería tener una capacidad de 233,3 l, el tiempo máximo de embalse resulta de 114,14 horas. Estos tiempos de embalse son muy grandes, debido a la escasa permeabilidad del suelo. Por este motivo, y aunque atendiendo a otros factores fuese interesante utilizar alcorques de mayor tamaño, habrá que reducir las capacidades de embalse hasta valores que impliquen tiempos de embalse mucho menores.

Si se establece un tiempo máximo de embalse de 72 horas (3 días), y se interpola en las tablas 4.26 y 4.27, se obtienen unos microembalses de 202,6 l y 147,2 l, respectivamente para microcuencas y subsolado. El tiempo elegido como referencia (3 días de existencia de agua dentro del microembalse tras un aguacero) puede parecer también excesivo, pero hay que tener en cuenta que:

1º) Si las precipitaciones más abundantes se producen en la zona de estudio durante la parada vegetativa, se reducirá considerablemente la posibilidad de daños. En el caso analizado, si bien se observa una importante disminución de las precipitaciones en los meses finales de primavera y de verano (de junio a septiembre), no es menos cierto que el principio de la primavera suele ser lluvioso, lo que podría acarrear perjuicios al repoblado.

2º) De la observación de la tabla 4.10 se deduce que, para las microcuencas, el periodo de retorno de una precipitación máxima que llenara el embalse de 202,6 l es de 4,66 años, lo que supone riesgo de daños en dos ocasiones a lo largo de la vida útil de la preparación (estimada en 10 años). En el caso del subsolado (véase la tabla 4.11), la recurrencia es de 7,45 años, que supone un riesgo menor.

* * * * *

También interesa estimar el tiempo máximo mensual de encharcamiento, tanto para microcuencas como para subsolado (véase la tabla 4.28). En ambos casos se está muy lejos del 50 % del mes con el suelo encharcado, y tampoco se alcanza el 20 % del mes (6 días), que es el límite que no conviene superar si no se desea poner en peligro la repoblación (para el periodo de actividad fisiológica).

Tabla 4.28. Tiempo máximo mensual de encharcamiento para microcuencas y subsolado en la ladera de Geria

PREPARACIÓN DEL SUELO	CAPA (l)	DESP (mm) ¹	$t_{máx}$ (h)	X (%)
Microcuencas	375,0	151,1	54,0	7,5
Subsolado	233,3	139,7	49,9	6,9

¹DESP calculada mediante el programa MODIPÉ para el mes de mayor precipitación del año medio de la serie disponible (este año es 1965, cuyos datos completos se muestran en la tabla 4.17).

* * * * *

Aunque con volúmenes del microembalse calculados según el criterio ecológico (375 y 233 l, respectivamente para microcuencas y subsolado) no cabe esperar problemas para la repoblación atendiendo al tiempo máximo mensual de encharcamiento, es conveniente reducir estas capacidades de embalse en base a la limitación del tiempo máximo de embalse. Según lo dicho anteriormente, para evitar la muerte de las plantas recién instaladas, se establece que después de un aguacero el microembalse sólo puede contener agua durante 72 horas; y, con esta precaución, es

aconsejable que los alcorques no superen los 202,6 l para microcuencas, ni los 147,2 l para el caso del subsolado.

H) Criterio paisajístico o topográfico

Según lo descrito en el apartado 3.1, se calcula el volumen de sedimentos que llega al área de recepción en toda la vida útil de la sistematización. Para ello, en primer lugar, y siguiendo las indicaciones expuestas en el anexo IV, se determinan los valores que toman los diferentes factores de la ecuación USLE:

- Factor de erosividad de la lluvia (R).- Interpolando en el mapa de isolíneas de R de España (ICONA, 1988), para la zona en estudio $R = 70 \text{ hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.
- Factor de erosionabilidad del suelo (K).- Calculando este factor mediante la expresión que se muestra en el anexo IV, toma el siguiente valor:

$$K = 2,71 \cdot 10^{-6} \cdot 4.976,49^{1,14} \cdot (12 - 0,59) + 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot (3 - 2) + 3,23 \cdot 10^{-2} \cdot (4 - 3) = \\ = 0,58 \text{ t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

- Factor topográfico ($L \cdot S$).- Se emplea la ecuación siguiente:

$$L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \cdot (0,0065 \cdot s^2 + 0,045 \cdot s + 0,065)$$

En la que la longitud de la ladera (λ) es en este caso la longitud del área de impluvio en proyección horizontal, es decir 4,24 m en el caso de microcuencas y 2 m para el subsolado; m vale 0,5, puesto que la pendiente de la ladera es mayor del 5 % (concretamente $s = 32 \%$).

Microcuencas: $L \cdot S = 3,59$

Subsolado: $L \cdot S = 2,47$

- Factor de la cubierta vegetal (C).- Interpolando en la tabla IV.3 del anexo IV, y teniendo en cuenta que el área de impluvio tiene una cubierta vegetal formada por plantas herbáceas y matojos de entre 0,3 y 0,6 m de altura, con recubrimiento aproximado del 30 %, en contacto con el suelo todo él y el humus en el suelo tiene un espesor de no más de 3 cm, resulta que $C = 0,159$.

El resto de datos que se requieren son:

- Vida útil de la sistematización (t): Se fija en 10 años
- Área de impluvio (S_1): 9 m² (para microcuenca) y 5,52 m² (para subsolado)
- Densidad aparente de los sedimentos (δ): 1.000 kg·m⁻³
- Coeficiente de emisión de sedimentos (C_e): Se supone que existe endorreísmo en la unidad sistematizada, por lo que este coeficiente es nulo.

Se puede calcular el volumen de sedimentos que se depositan en el microembalse durante los t años considerados, mediante la ecuación:

$$A_l = \frac{R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot t \cdot S_1 \cdot 100}{\delta} \cdot (1 - C_e)$$

Distinguiendo para las dos preparaciones del suelo:

$$\text{Microcuenca: } A_l = \frac{70 \cdot 0,58 \cdot 3,59 \cdot 0,159 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 100}{1.000} \cdot (1 - 0) = 208,57 \text{ l}$$

$$\text{Subsolado: } A_l = \frac{70 \cdot 0,58 \cdot 2,47 \cdot 0,159 \cdot 10 \cdot 5,52 \cdot 100}{1.000} \cdot (1 - 0) = 88,01 \text{ l}$$

Por último, se establecen los límites máximos para el volumen del microembalse:

Microcuenca: CAPA \leq 208,57 l

Subsolado: CAPA \leq 88,01 l

Si se cumplen estas inecuaciones, se asegura que el microrrelieve artificial creado por las preparaciones del suelo queda completamente atenuado, debido a que los microembalses quedan aterrados por los sedimentos.

Por último, conviene significar que este planteamiento es un tanto simplista y que no se ajusta plenamente con el proceso de atenuación del relieve, en el que intervienen otros fenómenos adicionales y más complejos. Sin embargo, se trata de un procedimiento de referencia que, por su interés y sencillez, interesa plantear siempre.

I) Criterios mecánicos

I.1.- Estabilidad

El tamaño de embalse para microcuenca calculado por el criterio ecológico es de 375 l, lo que supone una altura de muretes de 0,38 m. Para un suelo formado sobre margas, en razón de la estabilidad, se recomienda un ángulo de inclinación de los taludes del caballón de 35º, para suelo seco (véase la tabla 3.7 del apartado 3.1.3.8.). Con estos datos y con un caballón en forma de prisma triangular, la base del triángulo tendrá una longitud de 1,09 m.

Para la preparación mediante subsolado el microembalse, según el criterio ecológico, debe ser de 233,3 litros (muretes de 0,32 m). Tomando el ángulo de taludes expresado de 35º, la base del caballón tendrá una longitud de 0,91 m.

En las preparaciones del terreno habitualmente empleadas en España, la anchura en la base no suele sobrepasar los 0,80 m, por lo que la altura del caballón en este caso, con ángulos de los taludes de 35º, no debe ser mayor de 0,28 m. Por lo tanto, por razón de la estabilidad del murete, debe reducirse la altura y también, consecuentemente, el tamaño del microembalse. La reducción conduce a unas trampas de agua de 280 l para microcuenca y de 204 l para subsolado.

I.2.- Asentamiento

El punto de partida es también la altura de los muretes según el criterio ecológico, es decir, 0,38 m en el caso de microcuenca. Se quiere calcular el volumen definitivo de los muretes después del asentamiento, el volumen provisional esponjado y el volumen de excavación, sabiendo que la longitud de los muretes es de 1 m (para que el área de recepción tenga una superficie de 1 m²) y que éstos se realizan en un litosuelo formado sobre margas.

Si se asimila el caballón a construir a un prisma que tiene por base un triángulo equilátero, se obtiene que:

$$\text{- Volumen definitivo: } V' = l \cdot \frac{b \cdot h}{2} = 1 \cdot \frac{0,38 \cdot 0,38}{2} = 0,0722 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen esponjado: } V = \frac{V'}{1-T} = \frac{0,0722}{1-0,22} = 0,0926 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen de excavación: } V_0 = \frac{V}{1+E} = \frac{0,0926}{1+0,37} = 0,0676 \text{ m}^3$$

Esto quiere decir que para obtener un caballón de volumen definitivo $0,0722 \text{ m}^3$ (correspondiente a $0,38 \text{ m}$ de altura) hay que construir un murete de volumen provisional esponjado igual a $0,0926 \text{ m}^3$ (es decir, de $0,43 \text{ m}$ de alto). Pero para conseguir este último es necesario excavar $0,0676 \text{ m}^3$, que corresponde a un prisma triangular excavado en el suelo de $0,37 \text{ m}$ de profundidad.

También puede asimilarse el caballón o murete a otras formas, como por ejemplo a medio cilindro. En este caso, los resultados son:

$$\text{- Volumen definitivo: } V' = I \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{2} = 1 \cdot \frac{\pi \cdot 0,38^2}{2} = 0,2268 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen esponjado: } V = \frac{V'}{1-T} = \frac{0,2268}{1-0,22} = 0,2908 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen de excavación: } V_0 = \frac{V}{1+E} = \frac{0,2908}{1+0,37} = 0,2123 \text{ m}^3$$

La altura de los caballones correspondientes son $0,43 \text{ m}$ para el volumen esponjado y $0,37 \text{ m}$ para el volumen de excavación. Como puede observarse, las alturas resultantes son muy similares al utilizar un caballón de forma prismática triangular y semicilíndrica.

Para el caso del subsolado, el procedimiento es el mismo, partiendo de una altura de muretes de $0,32 \text{ m}$ (por el criterio ecológico) y suponiendo una longitud de caballón de $1,46 \text{ m}$ (la superficie del área de recepción en este caso es de $0,73 \text{ m}^2$, y se supone una anchura de labor de $0,50 \text{ m}$), se obtiene para el caballón prismático de base triangular:

$$\text{- Volumen definitivo: } V' = I \cdot \frac{b \cdot h}{2} = 1,46 \cdot \frac{0,32 \cdot 0,32}{2} = 0,0748 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen esponjado: } V = \frac{V'}{1-T} = \frac{0,0748}{1-0,22} = 0,0959 \text{ m}^3$$

$$\text{- Volumen de excavación: } V_0 = \frac{V}{1+E} = \frac{0,0959}{1+0,37} = 0,0700 \text{ m}^3$$

y para el caballón semicilíndrico:

- Volumen definitivo: $V' = I \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{2} = 1,46 \cdot \frac{\pi \cdot 0,32^2}{2} = 0,2348 \text{ m}^3$

- Volumen esponjado: $V = \frac{V'}{1-T} = \frac{0,2348}{1-0,22} = 0,3010 \text{ m}^3$

- Volumen de excavación: $V_0 = \frac{V}{1+E} = \frac{0,3010}{1+0,37} = 0,2197 \text{ m}^3$

Resultando para ambos tipos de caballón una altura provisional esponjada de 0,36 m y una altura de excavación de 0,31 m.

I.3.- Estanqueidad

Mediante el criterio de estanqueidad se pueden dar unas orientaciones sobre el tamaño óptimo del microembalse, en función del tipo de suelo que se disponga. En el caso de Geria, el suelo es de textura arcillosa, por lo que los caballones deberán tender a ser anchos, para que el agua no se escape de forma lateral durante el tiempo de encharcamiento.

J) Integración de los criterios de diseño

Una vez aplicados todos los criterios de diseño propuestos, es el momento de determinar el tamaño óptimo del microembalse. En las tablas 4.29 y 4.30 se recopilan los resultados obtenidos.

Tabla 4.29. Resultados obtenidos para el tamaño del microembalse, calculado por todos los criterios propuestos en el caso de la preparación por microcuenca

CRITERIO	VOLUMEN DE MICROEMBALSE (l) ¹			ALTURA DE MURETES (cm) ¹			OBSERVACIONES	
Hidrometeorológico	270			27			Fundamental	
Resguardo hidráulico	337			34			Adicional	
Proporcionalidad	63			6			Límite mínimo para endorreísmo	
Edáfico CRAD ²	35	103		4	10		Límite mínimo	Valor de referencia
Ecológico	375			38			Fundamental	
Fisiológico ³	57	69	27	6	7	3	Valores orientativos	
Limitación fisiológica	203			20			Límite máximo por encharcamiento	
Paisajístico	209			21			Valor de referencia	
Estabilidad	280			28			Recomendatorio	
Asentamiento	430			43			Comprobatorio	

¹ Los valores se han redondeado respecto a los calculados en sus correspondientes apartados.

² Para las profundidades del suelo de 34 y 100 cm, respectivamente

³ Para el año medio, seco y húmedo, respectivamente

A la vista de la tabla 4.29, correspondiente a una preparación del suelo por microcuenca, puede realizarse la siguiente discusión acerca del tamaño conveniente del alcorque:

1) El punto de partida lo dan los criterios de resguardo hidráulico (consecuencia del hidrometeorológico) y ecológico. Ambos ofrecen valores próximos, pero si se toma en consideración el mayor de ellos (375 l) se asegura el endorreísmo y, a la vez, más cercano se encuentra el comportamiento hidrológico de la formación forestal climática.

2) El valor que ofrece el criterio edáfico queda por debajo del tamaño antes elegido, lo que implica que casi siempre se perderá agua por percolación profunda. Por otra parte, el criterio fisiológico en sus condiciones teóricamente más desfavorables (año seco), indica que un alcorque de 69 l sería suficiente para cubrir las demandas de las plantas; mientras que la limitación por encharcamiento recomienda reducir el tamaño prácticamente a los 200 l, para no poner en peligro la supervivencia del repoblado.

3) El criterio paisajístico recomienda que el volumen del microembalse sea menor o igual que 209 l, para que éste se colmate de sedimentos durante su vida útil, y se suavice el microrrelieve creado.

4) El criterio mecánico de estabilidad aconseja reducir el microembalse a 280 l, para evitar el desmoronamiento del murete. Los otros dos criterios son meramente orientativos.

5) En definitiva, parece lógico reducir la capacidad del alcorque teniendo en cuenta principalmente lo que aconseja la limitación fisiológica por encharcamiento, por lo pernicioso para el repoblado de una deficiente aireación por encharcamiento prolongado de sus raíces. Si se reduce esta capacidad a unos 200 l, se palia con un grado de confianza elevado este problema, aunque se renuncia a asegurar el endorreísmo en la totalidad de los aguaceros y a conseguir en un plazo breve las condiciones hidrológicas del bosque climático. Por lo tanto, una solución razonable consiste en optar por esta capacidad de microembalse, que corresponde a unos muretes o balates de 20 cm de altura (25 cm a la hora de conformarlos, para considerar los asentamientos).

En cuanto al subsolado, analizando lo expuesto en la tabla 4.30, se pueden hacer las consideraciones siguientes:

1) Según los criterios de resguardo hidráulico (hidrometeorológico) y ecológico, sería bastante correcto fijar un microembalse de 233 l, con el objetivo conocido de endorreísmo y logro de la vegetación climática.

Tabla 4.30. Resultados obtenidos para el tamaño del microembalse, calculado por todos los criterios propuestos en el caso de la preparación por subsolado

CRITERIO	VOLUMEN DE MICROEMBALSE (l) ¹			ALTURA DE MURETES (cm) ¹		OBSERVACIONES	
Hidrometeorológico	159			22		Fundamental	
Resguardo hidráulico	199			27		Adicional	
Proporcionalidad	39			5		Límite mínimo para endorreísmo	
Edáfico CRAD ²	25	75		4	10	Límite mínimo	Valor de referencia
Ecológico	233			32		Fundamental	
Fisiológico ³	110	82	32	15	11	4	Valores orientativos
Limitación fisiológica	147			20		Límite máximo por encharcamiento	
Paisajístico	88			12		Valor de referencia	
Estabilidad	204			28		Recomendatorio	
Asentamiento	263			36		Comprobatorio	

¹ Los valores se han redondeado respecto a los calculados en sus correspondientes apartados.

² Para las profundidades del suelo de 34 y 100 cm, respectivamente

³ Para el año medio, seco y húmedo, respectivamente

2) El criterio edáfico recomienda que debe reducirse este volumen, si se pretende conservar en el suelo y de forma disponible para las plantas el agua recolectada. El criterio fisiológico señala en su situación más desfavorable (año medio) que sería suficiente perfilar un microembalse de 110 l para satisfacer los requerimientos de los brizales. La limitación fisiológica por encharcamiento obliga a reducirlo hasta aproximadamente los 150 l.

3) Para lograr la colmatación del alcorque con los sedimentos procedentes del área de impluvio, el criterio paisajístico aconseja reducir su volumen a 88 l.

4) También es recomendable que el microembalse no sea mayor de 204 l, para asegurar su estabilidad.

5) Por lo tanto, lo más acertado parece reducir a unos 200 l el tamaño del microembalse, para no arriesgar la repoblación por posibles encharcamientos prolongados, siendo más modestos en cuanto a los objetivos de consecución de endorreísmo en la unidad sistematizada y consecución del bosque climáctico. Esto supone unos muretes de 27 cm de altura (30 cm para considerar asentamientos).

4.3. RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN

Para las laderas degradadas de Geria, se ha calculado la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, utilizando los métodos expuestos en el apartado 3.2 y aplicando el método específico para repoblaciones forestales propuesto en este trabajo.

Algunos de los datos necesarios para los cálculos son comunes para varios métodos, a saber:

- Precipitación de cálculo.- Las precipitaciones medias anuales de la serie de años disponible (1964-2001) (véase la tabla 4.31) se han ajustado a la función de distribución de Goodrich, recomendada para el ajuste de valores medios. Los resultados del ajuste son:

$$N = 0,41168$$

$$a = 0,13557 \cdot 10^{-5} \text{ año}^2 \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$x_1 = 218,03647 \text{ mm}$$

$$n = 36 \text{ datos}$$

$$F(x) = 1 - e^{-0,13557 \cdot 10^{-5} \cdot (x - 218,03647)^{\frac{1}{0,41168}}}$$

Tabla 4.31. Precipitación media anual (P) para la estación de Geria, en la serie 1964-2001

AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)
1964	326,5	1983	341,4
1965	447,1	1984	618,0
1966	566,0	1985	380,4
1967	358,8	1986	412,4
1968	422,8	1987	516,4
1969	497,5	1988	506,2
1970	364,8	1989	593,7
1971	505,7	1990	382,9
1972	466,3	1991	279,7
1973	Incompleto	1992	355,6
1974	405,1	1993	489,0
1975	270,1	1994	385,1
1976	576,2	1995	429,7
1977	468,5	1996	532,7
1978	620,5	1997	693,5
1979	565,5	1998	375,0
1980	338,5	1999	428,1
1981	356,0	2000	513,5
1982	374,4	2001	Incompleto

Para confirmar la bondad del ajuste realizado se plantea el test de Kolmogorov, cuyos cálculos se desarrollan en la tabla 4.32.

Tabla 4.32. Test de Kolmogorov para el ajuste a la distribución de Goodrich de la serie de datos de la estación de Geria

<i>n</i>	<i>P</i>	<i>F_{ri}</i>	<i>F(x)</i>	Δ
1	270,1	0,013888889	0,019833656	0,005944767
2	279,7	0,041666667	0,029766265	0,011900402
3	326,5	0,069444444	0,112305452	0,042861008
4	338,5	0,097222222	0,142481589	0,045259367
5	341,4	0,125000000	0,150286785	0,025286785
6	355,6	0,152777778	0,191194943	0,038417165
7	356,0	0,180555556	0,192408769	0,011853213
8	358,8	0,208333333	0,200994562	0,007338772
9	364,8	0,236111111	0,219899193	0,016211918
10	374,4	0,263888889	0,251474941	0,012413948
11	375,0	0,291666667	0,253498607	0,038168060
12	380,4	0,319444444	0,271955277	0,047489167
13	382,9	0,347222222	0,280640995	0,066581227
14	385,1	0,375000000	0,288353426	0,086646574
15	405,1	0,402777778	0,360903220	0,041874558
16	412,4	0,430555556	0,388186543	0,042369013
17	422,8	0,458333333	0,427445967	0,030887366
18	428,1	0,486111111	0,447532105	0,038579006
19	429,7	0,513888889	0,453596674	0,060292215
20	447,1	0,541666667	0,519177956	0,022488711
21	466,3	0,569444444	0,589501728	0,020057284
22	468,5	0,597222222	0,597343274	0,000121052
23	489,0	0,625000000	0,667537028	0,042537028
24	497,5	0,652777778	0,694873319	0,042095541
25	505,7	0,680555556	0,720125297	0,039569741
26	506,2	0,708333333	0,721627848	0,013294514
27	513,5	0,736111111	0,743061109	0,006949998
28	516,4	0,763888889	0,751308775	0,012580114
29	532,7	0,791666667	0,794738422	0,003071756
30	565,5	0,819444444	0,866640911	0,047196466
31	566,0	0,847222222	0,867577723	0,020355501
32	576,2	0,875000000	0,885679042	0,010679042
33	593,7	0,902777778	0,912419097	0,009641319
34	618,0	0,930555556	0,941320873	0,010765318
35	620,5	0,958333333	0,943804460	0,014528873
36	693,5	0,986111111	0,986645475	0,000534364

n = Número de orden del individuo dentro de la muestra

P = Precipitación anual, en mm

$$F_{ri} = \text{Frecuencia real: } F_{ri} = \frac{2 \cdot n - 1}{2 \cdot N}$$

N = Número total de individuos de la muestra

F(x) = Frecuencia calculada por la función de Goodrich

$|\Delta|$ = Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia real y calculada

Se localiza el valor máximo del estadístico $|\Delta|$:

$$D_{\max} = \text{supremo}(|\Delta|) = 0,086646574$$

Se busca en la tabla de valores críticos de Kolmogorov el valor correspondiente a un tamaño de muestra de 36 y un nivel de significación de 0,20; es decir, $D(36; 0,20)$, y como:

$$D_{\max} < D(36; 0,20) = 0,1783$$

se admite el ajuste como válido.

A partir de la función ajustada, se busca la precipitación que corresponde a una probabilidad de ocurrencia del 33 %, equivalente a un periodo de retorno $T = 1,5$ años. La mencionada precipitación resulta 397,4 mm. Esto supone que, de media, dos de cada tres años lloverá más que la precipitación calculada; o, lo que es lo mismo, la probabilidad de que la precipitación de un año cualquiera sea menor o igual que 397,4 mm es del 33 %.

Debido a que se requieren datos mensuales de lluvia, se ha tomado como referencia de distribución anual de precipitaciones el año más seco de la serie. A partir de esta distribución, se ha calculado un coeficiente adaptador: el cociente entre la precipitación con probabilidad 33 % y la precipitación del año seco, que resulta ser 1,1746. Las precipitaciones adaptadas se muestran en la tabla 4.33.

- Evapotranspiración, requerimientos hídricos o uso consuntivo del cultivo.- Se ha utilizado como ETP de cálculo la correspondiente al año seco (1980), cuyos valores pueden consultarse en la tabla 4.33.

Tabla 4.33. Precipitaciones mensuales del año seco (1980), precipitaciones mensuales adaptadas y evapotranspiración potencial de cálculo

MES	P (mm)	P adaptada (mm)	ETP (mm)
Enero	23,0	27,0	11,8
Febrero	31,0	36,4	20,3
Marzo	43,0	50,5	29,2
Abril	54,5	64,0	39
Mayo	46,0	54,0	61,7
Junio	19,0	22,3	94,6
Julio	3,0	3,5	119,8
Agosto	19,0	22,3	128,3
Septiembre	6,5	7,6	97,7
Octubre	37,5	44,0	51,9
Noviembre	52,0	61,1	19,8
Diciembre	4,0	4,7	5,6
TOTAL	338,5	397,4	679,7

- Coeficiente de escorrentía.- Se toma igual a 0,50; que, según la tabla 3.11, corresponde a una vegetación ligera, sobre suelo semipermeable y pendiente entre 20 y 50 %.

A continuación se aplican los métodos descritos de forma individual y pormenorizada:

a) Método de Anaya *et al.* (1976)

El dato que requiere este método es el total de deficiencias de agua mensuales durante el ciclo vegetativo del cultivo ($UC - P$). A tenor de los cálculos que se realizan en la tabla 4.34, el total de deficiencias es 401,2 mm.

Tabla 4.34. Cálculo de las deficiencias de agua mensuales

MES	UC (mm)	P (mm)	UC-P (mm)
Enero	11,8	27,0	-
Febrero	20,3	36,4	-
Marzo	29,2	50,5	-
Abril	39,0	64,0	-
Mayo	61,7	54,0	7,7
Junio	94,6	22,3	72,3
Julio	119,8	3,5	116,3
Agosto	128,3	22,3	106,0
Septiembre	97,7	7,6	90,1
Octubre	51,9	44,0	7,9
Noviembre	19,8	61,1	-
Diciembre	5,6	4,7	0,9
TOTAL	679,7	397,4	401,2

UC = Uso consuntivo (ETP) (mm)

P = Precipitación mensual (mm)

$UC - P$ = Deficiencias mensuales (mm)

Si se aplica la ecuación del método:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{UC - P}{C \cdot P} - 1 = \frac{401,2}{0,50 \cdot 397,4} - 1 = 1,02$$

b) Método de Smith (1978)

Para la aplicación de este método se ha sustituido el producto ($n \cdot ET$) (siendo n el número de días entre lluvias) por la evapotranspiración potencial anual, como estimadora de las necesidades hídricas de la repoblación.

El escurrimiento hacia el área de recepción se ha calculado mediante el producto de la precipitación de diseño por el coeficiente de escorrentía ($Q = 397,4 \cdot 0,50 = 198,7 \text{ mm}$).

Aplicando la ecuación, se obtiene:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{(n \cdot ET) - PP}{Q} = \frac{679,9 - 397,4}{198,7} = 1,42$$

c) Modelo de Velasco-Molina (1983)

El resultado que se obtiene con este método es exactamente igual que el anterior:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{E_V - PP}{CE \cdot PP} = \frac{679,9 - 397,4}{0,50 \cdot 397,4} = 1,42$$

d) Método de Finkel (1985) y método de Critchley & Siegert (1991)

Los requerimientos hídricos de la repoblación (RH) se equiparan en el método de Finkel (1985) a la evapotranspiración potencial, que resulta ser de 679,9 mm. La precipitación de diseño (PD) es 397,4 mm, mientras que el coeficiente de escorrentía (k) elegido es 0,50. Y, finalmente, al factor de eficiencia (E) se le asigna un valor de 0,75; que es el recomendado por Critchley & Siegert (1991) para sistemas con área de impluvio reducida. De esta forma:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{RH - PD}{PD \cdot k \cdot E} = \frac{679,9 - 397,4}{397,4 \cdot 0,50 \cdot 0,75} = 1,90$$

Basándose en el método de Finkel (1985), Critchley & Siegert (1991) creen que para las plantaciones de árboles es suficiente con calcular el tamaño de la unidad sistematizada (MC), como se explicó en el apartado 3.2. En este caso, por lo tanto, debe estimarse el área explotada por el sistema radical, que se supone igual al área de recepción (1 m^2 para microcuenca y $0,73 \text{ m}^2$ para el subsolado). De esta manera, para cada tipo de preparación del suelo, resulta:

- Microcuenca:

$$MC = S_2 \cdot \left(\frac{RH - PD}{PD \cdot k \cdot E} \right) = 1 \cdot \left(\frac{679,9 - 397,4}{397,4 \cdot 0,50 \cdot 0,75} \right) = 1,90 \text{ m}^2$$

- Subsolado:

$$MC = S_2 \cdot \left(\frac{RH - PD}{PD \cdot k \cdot E} \right) = 0,73 \cdot \left(\frac{679,9 - 397,4}{397,4 \cdot 0,50 \cdot 0,75} \right) = 1,38 \text{ m}^2$$

e) Método Velsavill (Villanueva et al., 1987)

Éste es el método que requiere un proceso de cálculo más complejo, que se detalla a continuación:

1) Cálculo de PP

Como se explicó anteriormente, la precipitación pluvial, según una probabilidad de ocurrencia del 33 % (que corresponde a un periodo de retorno de 1,5 años) es 397,4 mm.

2) Cálculo de PP_e

La precipitación efectiva, es decir, la parte de la precipitación que puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas, se ha calculado por el método de Blaney-Criddle, recomendado por Velasco-Molina (1991). Este método se basa en la aplicación de un coeficiente de aprovechamiento, para cada magnitud de lluvia (véanse las tablas 3.13 y 4.35).

Tabla 4.35. Cálculo de la precipitación efectiva según el método de Blaney-Criddle (citado por Velasco-Molina, 1991)

MES	PP (mm)	CÁLCULOS	PP _e (mm)
Enero	27,0	$25 \cdot 0,95 + 2,0 \cdot 0,90$	25,6
Febrero	36,4	$25 \cdot 0,95 + 11,4 \cdot 0,90$	34,0
Marzo	50,5	$25 \cdot 0,95 + 25 \cdot 0,90 + 0,5 \cdot 0,82$	46,7
Abril	64,0	$25 \cdot 0,95 + 25 \cdot 0,90 + 14,0 \cdot 0,82$	57,7
Mayo	54,0	$25 \cdot 0,95 + 25 \cdot 0,90 + 4,0 \cdot 0,82$	49,5
Junio	22,3	$22,3 \cdot 0,95$	21,2
Julio	3,5	$3,5 \cdot 0,95$	3,3
Agosto	22,3	$22,3 \cdot 0,95$	21,2
Septiembre	7,6	$7,6 \cdot 0,95$	7,2
Octubre	44,0	$25 \cdot 0,95 + 19,0 \cdot 0,90$	40,9
Noviembre	61,1	$25 \cdot 0,95 + 25 \cdot 0,90 + 11,1 \cdot 0,82$	55,4
Diciembre	4,7	$4,7 \cdot 0,95$	4,5
TOTAL			367,2

3) Cálculo de n

La estimación del número de eventos de lluvia de magnitud $(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r$ necesarios para satisfacer las demandas hídricas del cultivo se hace de la siguiente forma:

- Humedad disponible (HD):

$$HD = (cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r = (23,24 - 12,99) \cdot 1 \cdot 0,34 = 3,49 \text{ cm}$$

Se ha tomado capacidad de campo $cc = 23,24 \text{ \%}$, punto de marchitez permanente $pmp = 12,99 \text{ \%}$, densidad aparente del suelo $D_a = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, profundidad efectiva de enraizamiento del cultivo $P_r = 0,34 \text{ m}$ (2 veces la profundidad del contenedor).

- 75% de la humedad disponible: 2,61 cm
- Humedad disponible para cada estrato (HDE): $2,61/4 = 0,65 \text{ cm}$
- Demanda evapotranspirativa diaria (DED): $67,97/365 = 0,1862 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$
- Demanda evapotranspirativa diaria por estrato ($DEDE$) y tiempo de abatimiento de la humedad disponible (TA) (véase la tabla 4.36)

Tabla 4.36. Cálculo de la demanda evapotranspirativa diaria por estrato ($DEDE$) y del tiempo de abatimiento de la humedad disponible (TA)

$P_r(\text{cm})$	$PEH(\%)$	$HDE(\text{cm})$	$DEDE(\text{cm} \cdot \text{día}^{-1})$	$TA(\text{días})$
8,5	40	0,65	0,0745	8,7
17,0	30	0,65	0,0559	11,6
25,5	20	0,65	0,0372	17,5
34,0	10	0,65	0,0186	35,0

P_r = Profundidad de enraizamiento (cm)

PEH = Patrón de extracción de humedad (propuesto por Velasco-Molina, 1991) (%)

HDE = Humedad disponible por estrato (cm)

$DEDE$ = Demanda evapotranspirativa diaria por estrato ($\text{cm} \cdot \text{día}^{-1}$): $DEDE = DED \cdot PEH$ (tpu)

TA = Tiempo de abatimiento de la humedad disponible por estrato (días): $TA = HDE / DEDE$

- Finalmente:

$$n = \frac{\text{días del ciclo vegetativo}}{\text{TA en el primer estrato}} = \frac{365}{8,7} = 42,0$$

4) Ecuación final

En esta ecuación las precipitaciones hay que introducirlas en metros y los contenidos de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente en tanto por uno. De esta forma, resulta:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{[(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n - PP_e}{CE \cdot PP} = \frac{[(0,2324 - 0,1299) \cdot 1 \cdot 0,34] \cdot 42,0 - 0,3672}{0,50 \cdot 0,3974} = 5,52$$

f) Modelo de Cadot (1989)

Como ya se ha comentado en el apartado 3.2, este modelo no se considera adecuado para los fines perseguidos en este trabajo (diseño de repoblaciones forestales), ya que plantea un balance diario que le dota de una minuciosidad innecesaria.

g) Modelo de Palomo (1990)

Los datos que emplea este modelo ya se han determinado anteriormente. El resultado de su aplicación es:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET - PP_e}{CE \cdot PP} = \frac{679,7 - 367,2}{0,50 \cdot 397,4} = 1,57$$

h) Método de Oweis *et al.* (1999)

Como se ha explicado en el apartado 3.2, una posibilidad de utilización del método, que sugieren los autores, es considerar que W_0 y W_e sean iguales, por lo que la ecuación final coincide con las de Smith (1978) y Velasco-Molina (1983):

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET + W_e - W_0 - S}{S \cdot E_r} = \frac{679,7 - 397,4}{397,4 \cdot 0,50} = 1,42$$

Otra posibilidad es considerar que W_0 es igual a la capacidad de campo y W_e igual al punto de marchitamiento permanente (situación esta última hipotética y límite que ninguna especie soportaría, pero que al ser la más desfavorable sitúa al cálculo del lado de la seguridad). De esta manera:

$$W_0 = \frac{CC \cdot d_a \cdot p}{1.000} = \frac{0,2324 \cdot 1.000 \cdot 340}{1.000} = 79,0 \text{ mm}$$

$$W_e = \frac{PMP \cdot d_a \cdot p}{1.000} = \frac{0,1299 \cdot 1.000 \cdot 340}{1.000} = 44,2 \text{ mm}$$

Y entonces:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET + W_e - W_0 - S}{S \cdot E_r} = \frac{679,7 + 44,2 - 79,0 - 397,4}{397,4 \cdot 0,50} = 1,25$$

i) Método propuesto

Calculando la escorrentía por el método del número de curva, según la distribución de precipitaciones obtenida por el método de aguaceros virtuales (y habiendo adaptado las precipitaciones máximas diarias como se ha hecho anteriormente con las precipitaciones medias), ésta resulta igual a 23,3 mm (véase la tabla 4.37).

Tabla 4.37. Cálculo de la escorrentía por el método del número de curva

MES	P (mm)	P _{máx} (mm)	n	E _{S1} (mm)
Enero	27,0	8,2	9	0,0
Febrero	36,4	12,3	7	0,0
Marzo	50,5	17,0	10	0,1
Abril	64,0	19,4	8	0,3
Mayo	54,0	17,6	9	0,1
Junio	22,3	9,4	4	0,0
Julio	3,5	2,3	2	0,0
Agosto	22,3	14,7	5	0,0
Septiembre	7,6	4,7	3	0,0
Octubre	44,0	35,2	4	14,8
Noviembre	61,1	22,9	10	8,0
Diciembre	4,7	2,9	2	0,0
TOTAL	397,4	-	73	23,3

P = Precipitación mensual (mm)

P_{máx} = Precipitación máxima diaria (mm)

n = Número de días con lluvia apreciable

E_{S1} = Escorrentía formada en el área de impluvio (mm); calculada a partir de una distribución de precipitaciones (método de aguaceros virtuales) intermedia respecto a la generación de escorrentía (caso III del programa MODIPÉ). Véase Martínez de Azagra (1996) al respecto.

Se trata de una escorrentía muy escasa, que lleva a una elevada relación S₁/S₂:

$$R_{\min} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{S1}} = \frac{679,7 - 397,4}{23,3} = 12,12$$

También puede calcularse la escorrentía utilizando el coeficiente de escurrimiento:

$$E_{S1} = P \cdot e = 397,4 \cdot 0,50 = 198,7 \text{ mm}$$

La escorrentía calculada de esta manera resulta muy superior frente a la que se estima por el método del número de curva, reduciendo R considerablemente:

$$R_{\min} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{S1}} = \frac{679,7 - 397,4}{198,7} = 1,42$$

Como se explicó en el apartado 3.2, para situarse del lado de la seguridad, pueden introducirse la precipitación efectiva y el factor de eficiencia. Así se llega a unas relaciones R mayores, que permiten establecer un intervalo de confianza en el diseño de la sistematización primaria:

$$R_{mayor} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P_e}{E_{S1} \cdot E} = \frac{679,7 - 367,2}{23,3 \cdot 0,75} = 17,88$$

(con E_{S1} calculada por el método del número de curva)

$$R_{mayor} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P_e}{E_{S1} \cdot E} = \frac{679,7 - 367,2}{198,7 \cdot 0,75} = 2,10$$

(con E_{S1} calculada por el coeficiente de escorrentía)

Discusión de los resultados

En la tabla 4.38 se resumen los resultados obtenidos de la aplicación de todos los métodos.

Tabla 4.38. Resultados obtenidos de la aplicación de los métodos de cálculo de la relación entre área de impluvio y área de recepción (R). Se calculan también los valores del área de impluvio (S_1) correspondientes a áreas de recepción (S_2) de 1 m^2 (microcuenca) y de $0,73\text{ m}^2$ (subsolado).

MÉTODO	R	MICROCUENCAS		SUBSOLADO	
		$S_1\text{ (m}^2\text{)}$	$S_2\text{ (m}^2\text{)}$	$S_1\text{ (m}^2\text{)}$	$S_2\text{ (m}^2\text{)}$
Anaya <i>et al.</i> (1974)	1,02	1,02	1,00	0,74	0,73
Smith (1978)	1,42	1,42	1,00	1,04	0,73
Velasco-Molina (1983)	1,42	1,42	1,00	1,04	0,73
Finkel (1985)	1,90	1,90	1,00	1,39	0,73
Critchley & Siegert (1991)	1,90/1,38 ¹	0,90	1,00	0,65	0,73
Velsavill (Villanueva <i>et al.</i> , 1987)	5,52	5,52	1,00	4,03	0,73
Palomo (1990)	1,57	1,57	1,00	1,15	0,73
Oweis <i>et al.</i> (1999) ²	1,42	1,42	1,00	1,04	0,73
	0,90	0,90	1,00	0,66	0,73
	1,42	1,42	1,00	1,04	0,73
Método propuesto ³	12,12	12,12	1,00	8,88	0,73
	2,10	2,10	1,00	1,53	0,73
	17,88	17,88	1,00	13,05	0,73

¹ Tamaño total de la unidad sistematizada (m^2), respectivamente para microcuenca y subsolado

² La primera cifra corresponde a $W_0 = W_e$, y la segunda a $W_0 = CC$ y $W_e = PMP$.

³ El orden de los cuatro valores es: R_{\min} (por el coeficiente de escorrentía y por el número de curva) y R_{\max} (por el coeficiente de escorrentía y por el número de curva).

En base a estos resultados, pueden hacerse las siguientes consideraciones:

- 1) La mayor parte de los métodos dan resultados muy similares, con valores de la relación entre el área de impluvio y el área de recepción entre 0,90 y 2,10. Los dos únicos métodos que se alejan de estos valores son el Velsavill (con $R = 5,52$) y el método propuesto en este trabajo con el cálculo de la escorrentía por el número de curva ($R_{\min} = 12,12$ y $R_{\max} = 17,88$). La razón por la que el modelo Velsavill toma un valor distinto a los demás métodos es la diferente forma de estimar las necesidades hídricas de las plantas: en el método Velsavill se cuantifican los requerimientos de las plantas mediante la magnitud $[(cc - pmp) \cdot D_a \cdot P_r] \cdot n$, mientras que el resto de métodos los estiman a través de la ETP . De esta manera, se obtiene en el primer caso un valor de las necesidades hídricas anuales de 1.463,7 mm y en el segundo de 679,7 mm.
- 2) El cálculo de la evapotranspiración de la repoblación (ET_{rep}) para que los brizales tengan un adecuado crecimiento puede ser –actualmente– poco preciso, lo que dificulta la obtención de una relación S_1/S_2 fiable. Es deseable que se produzcan avances en la investigación sobre este tema. No obstante, ante esta carencia importante, se ha optado por utilizar $ET_{rep} = ETP$.
- 3) En el método que se propone, las diferencias entre las dos formas de calcular la escorrentía (por coeficientes de escurrimiento o por el método del número de curva) son evidentes. Si en el primer caso se obtiene una escorrentía de 198,7 mm, por el número de curva se obtienen únicamente 23,3 mm. Esta importante discrepancia

en la escorrentía, implica una diferencia también muy amplia en los valores de R (concretamente $R_{min} = 1,42$ y $R_{mayor} = 2,20$ por coeficientes de escorrentía; y $R_{min} = 12,12$ y $R_{mayor} = 17,88$ por el número de curva). Como se ha apuntado en el apartado 3.2, el método del número de curva es más fiable que el de coeficientes de escorrentía, puesto que considera un mayor número de situaciones diferentes (en cuanto al tipo de suelo, vegetación, condiciones hidrológicas, etc.). No obstante, la distribución de precipitaciones que se elija en la aplicación del método de aguaceros virtuales puede producir grandes variaciones en la escorrentía generada (sobre el método de aguaceros virtuales puede consultarse Martínez de Azagra, 1996). De las tres posibilidades existentes, en los cálculos expuestos anteriormente se ha elegido la que produce una cantidad intermedia de escorrentía (caso III). En la tabla 4.39 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el método propuesto para los tres casos de aguaceros virtuales.

Tabla 4.39. Relación entre el área de impluvio y el área de recepción calculada por el método propuesto (R_{min} y R_{mayor}), para los tres casos de aguaceros virtuales

CASO	R_{min}	R_{mayor}
I	50,41	74,40
II	2,69	3,97
III	12,12	17,88

Caso I: El más desfavorable a efectos de escorrentía

Caso II: El más favorable a efectos de escorrentía

Caso III: La situación intermedia de las dos anteriores

* * * * *

Utilizando el método del número de curva, pueden determinarse coeficientes de escorrentía (por cociente entre la precipitación anual y la escorrentía calculada). En el caso que se está tratando, se obtienen los siguientes coeficientes: 0,0138; 0,2637 y 0,0584; respectivamente para los casos I, II y III, que corresponden a generación de escorrentía baja, alta y media. Como puede comprobarse, el coeficiente de escorrentía utilizado (0,50), deducido a través de la tabla 3.11, queda muy alejado de estos valores y también muy alejado de la realidad. Por otra parte, los tres valores calculados son muy dispares entre sí, de ahí la importancia de disponer de datos de todos los aguaceros acaecidos durante el año de cálculo, para poder hallar el coeficiente de escorrentía real. Por lo tanto:

- Las tablas de coeficientes de escorrentía no deben utilizarse debido a que sobrevaloran claramente la escorrentía.
- El método de los aguaceros virtuales suple el problema de la falta de datos, pero genera una fuerte incertidumbre que redonda en una imprecisión en los cálculos del coeficiente e , frente al que la relación R es altamente sensible.
- Por estas razones se propone trabajar con el método del número de curva y con la serie real de aguaceros acaecidos durante el año de cálculo.

En el caso planteado, un coeficiente de escorrentía más realista es, por ejemplo, el promedio de los tres calculados por el método del número de curva. Ese promedio resulta 0,1120; que puede redondearse a un valor de 0,10 (el 10 % de la precipitación se convierte en escorrentía). Con este coeficiente se ha vuelto a calcular R por todos los métodos que emplean coeficientes de escorrentía, y los resultados se muestran en la tabla 4.40. Como es lógico, estos valores son mucho mayores que los obtenidos con $e = 0,50$; y se acercan a los calculados utilizando el método del número de curva.

Tabla 4.40. Resultados obtenidos de la aplicación de los métodos de cálculo de la relación entre área de impluvio y área de recepción (R), con $e = 0,10$

MÉTODO	R
Anaya <i>et al.</i> (1974)	10,09
Smith (1978)	7,11
Velasco-Molina (1983)	7,11
Finkel (1985)	9,48
Critchley & Siegert (1991)	9,48/6,92 ¹
Velsavill (Villanueva <i>et al.</i> , 1987)	27,59
Palomo (1990)	7,86
Oweis <i>et al.</i> (1999) ²	7,11 6,23
Método propuesto ³	7,11 10,48

¹ Tamaño total de la unidad sistematizada (m^2), respectivamente para microcuenca y subsolado

² La primera cifra corresponde a $W_0 = W_e$, y la segunda a $W_0 = CC$ y $W_e = PMP$

³ El orden de los valores es: R_{\min} (por el coeficiente de escorrentía y por el número de curva) y R_{\max} (por el coeficiente de escorrentía y por el número de curva)

- 4) Respecto a la utilización de la precipitación efectiva y el factor de eficiencia, como se dijo en el apartado 3.2, mayora el valor de R (de 12,12 a 17,88). La interpretación que puede hacerse de estos resultados es que con R_{\min} (12,12) se suministra a la planta una cantidad suficiente de agua de escorrentía que asegura su crecimiento, mientras que R_{\max} (17,88) sitúa el dimensionado de la sistematización primaria del lado de la seguridad, es decir, incrementa la garantía de cumplimiento del objetivo de buen crecimiento del repoblado. Sin embargo, R_{\max} reduce considerablemente la densidad de repoblación.
- 5) Como se ha comentado en el apartado 3.3 de este trabajo, la relación entre el área de impluvio y el área de recepción está muy ligada a la densidad de plantación. Sólo cuando R toma valores elevados (por ejemplo, $R_{\min} = 12,12$ ó $R_{\max} = 17,88$ por el método propuesto), la economía del agua parece ser limitante a la hora de fijar la densidad de repoblación (que resulta en el ejemplo 525-770 pies/ha, con $S_2 = 1 m^2$). Con el resto de métodos, el tema del agua pasa a un segundo plano para

la fijación de la densidad, ya que se obtienen valores bajos de R que son compatibles con sistematizaciones primarias incompletas.

En este sentido, por ejemplo, en la zona de estudio (y en general en las provincias de Valladolid y Palencia) se ha mostrado como muy eficaz la técnica de ahoyado con subsolador modificado (sistematización incompleta). Dado que la densidad con la que se suele trabajar es de 1.600 pies/ha y que esta preparación supone aproximadamente un 75 % de pasillos de escorrentía (zonas de la ladera que producen escorrentía que no se recoge de forma ordenada), se llega a que R es aproximadamente igual a 3. Pues bien, con esta relación S_1/S_2 tan reducida se obtiene, en este tipo de repoblaciones, un bajo porcentaje de marras.

- 6) De cara a posibles mejoras en el método, seguramente convenga definir con mayor precisión (utilizando la estadística) el año de cálculo, pues no basta, como se ha visto, la precipitación anual de cálculo (obtenida por ejemplo con la función de Goodrich) para obtener el coeficiente de escorrentía, sino que hay que conocer aguaceros individuales. Lo mismo ocurre para obtener años secos, medios y húmedos, pues el valor de la precipitación total anual no es suficiente para saber si realmente el año ha sido seco, medio o húmedo para la vegetación (o para la escorrentía).
- 7) Por todo lo comentado hasta ahora, puede concluirse que el método propuesto, con la determinación de la escorrentía por el método del número de curva, es el más interesante para el cálculo de la relación entre el área de impluvio y el área de recepción. Por este método se ha obtenido una R de 12,12 (17,88 como límite superior de confianza); que garantiza la supervivencia y el adecuado desarrollo del repoblado (por satisfacción de sus necesidades hídricas) en condiciones sumamente difíciles: una precipitación escasa de 397,4 mm (muy alejada de los valores medios) y una ETP muy elevada (679,7 mm). Este diseño de la unidad sistematizada no va a ser necesario en la mayor parte de los años, puesto que los requerimientos de los brizales pueden ser abastecidos con escorrentía procedente de áreas de impluvio más pequeñas. Por esta razón sería posible reducir R , e incluso elegir una sistematización incompleta, en la que no toda la escorrentía generada es puesta a disposición de las plantas, como se ha explicado anteriormente y en el apartado 3.3.

En definitiva, y aunque existen aún carencias y problemas importantes que han quedado patentes, el método aquí propuesto para el cálculo de la relación entre el área de impluvio y el área de recepción se presenta como el más interesante para ser utilizado en repoblaciones forestales situadas en zonas áridas y semiáridas.

4.4. DENSIDAD DE PLANTACIÓN

4.4.1. Microcuenca y subsolado (sistematización completa)

A partir del valor de la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, calculada en el apartado anterior ($R = 12$, por el método propuesto), se determina la densidad de plantación.

En primer lugar, para la sistematización mediante microcuenca, en la que el área de recepción es 1 m^2 , se calcula la superficie ocupada por un pie:

$$S_p = S_1 + S_2 = S_2 \cdot R + S_2 = 1 \cdot 12 + 1 = 13 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, la densidad de plantación es:

$$N = \frac{10.000}{S_p} = \frac{10.000}{13} = 769,23 \approx 769 \text{ Pies/ha}$$

Para el caso del subsolado, con un área de recepción de $0,73 \text{ m}^2$, la superficie que ocupa cada planta es:

$$S_p = S_1 + S_2 = S_2 \cdot R + S_2 = 0,73 \cdot 12 + 0,73 = 9,49 \text{ m}^2$$

Resultando una densidad óptima de:

$$N = \frac{10.000}{S_p} = \frac{10.000}{9,49} = 1.053,74 \approx 1.054 \text{ Pies/ha}$$

4.4.2. Ahoyado (sistematización incompleta)

Para visualizar mejor el método de determinación de la densidad de plantación con sistematizaciones incompletas, se ha proyectado una repoblación en la misma localidad de Geria, a realizar mediante un ahoyado ejecutado con subsolador modificado con una orejeta soldada a la parte central del rejón y una cuña triangular inferior en la bota. Esta preparación del suelo se suele realizar con dos rejones, por lo que la disposición de los hoyos es pareada y al tresbolillo si se desea¹. La disposición

¹ Véase al respecto de esta preparación: Torre (1995) y Monsalve (1995).

de los hoyos en el terreno se describe en la figura 4.19. Las dimensiones de cada hoyo son 0,60 m de ancho (a) por 1 m de largo (b) y 0,20 m de profundidad, lo que da una capacidad de embalse de 120 l. La distancia entre líneas (D) se ha fijado en 3 m.

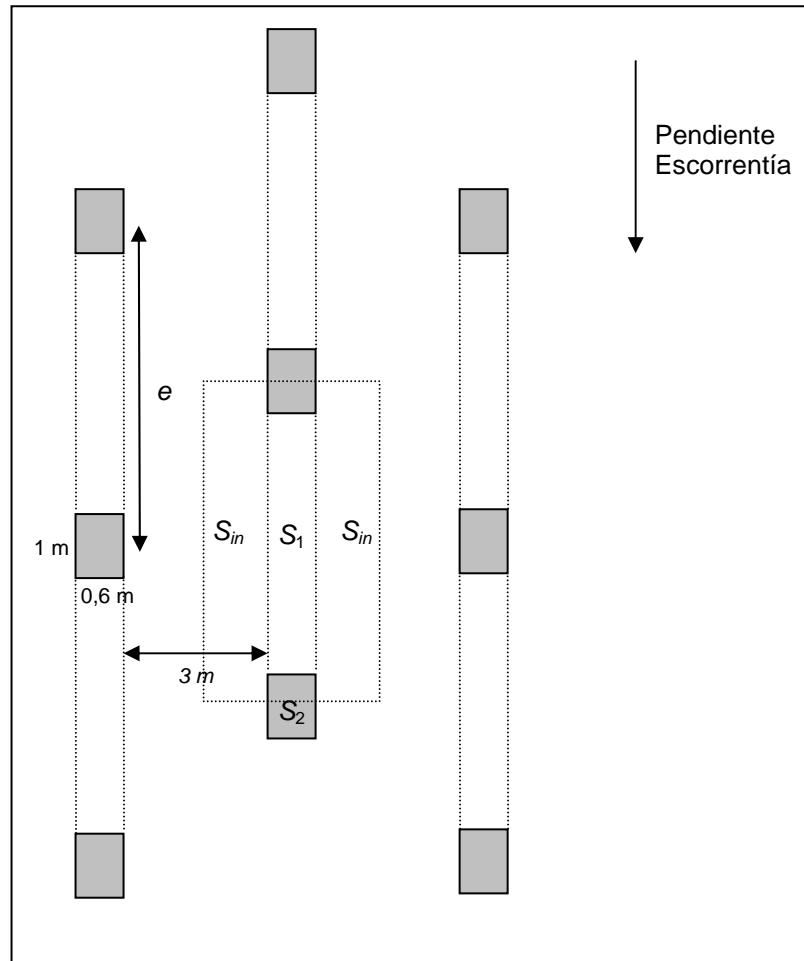


Figura 4.19. Representación esquemática de la sistematización incompleta consistente en un ahoyado, que se estudia en este caso

Si se sigue el procedimiento descrito en el apartado 3.3.3.2, se tiene que:

- 1º) Obtención de S_1 y S_2 .- Por las dimensiones del hoyo S_2 es $0,60 \text{ m}^2$, mientras que S_1 debe calcularse en función de la relación $S_1/S_2 (= 12)$:

$$S_1 = S_2 \cdot 12 = 7,20 \text{ m}^2$$

- 2º) Cálculo de S_{in} :

$$e = \frac{S_1 + S_2}{a} = \frac{7,20 + 0,60}{0,60} = 13,00 \text{ m}$$

$$S_{in} = e \cdot (D - a) = 13,00 \cdot (3,00 - 0,60) = 31,20 \text{ m}^2$$

3º) Determinación de la superficie que corresponde a cada pie:

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in} = 7,20 + 0,60 + 31,20 = 39,00 \text{ m}^2$$

4º) Cálculo de la densidad:

$$N = \frac{10.000}{S_p} = \frac{10.000}{39,00} = 256,41 \approx 256 \text{ Pies/ha}$$

Si se prefiere, puede dejarse la superficie de cada árbol en función de la distancia entre líneas:

$$S_{in} = e \cdot (D - a) = 13,00 \cdot (D - 0,60) = 13,00 \cdot D - 7,80 \text{ m}^2$$

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in} = 7,20 + 0,60 + (13,00 \cdot D - 7,80) = 13,00 \cdot D \text{ m}^2$$

$$N = \frac{10.000}{S_p} = \frac{10.000}{13,00 \cdot D}$$

Y dando valores a D se obtiene la tabla 4.41, que puede servir para tomar una decisión definitiva sobre la densidad de plantación.

Tabla 4.41. Densidad de plantación (N) en pies/ha en función de la distancia entre líneas de ahoyado (D)

D (m)	N (Pies/ha)
2	385
3	256
4	192
5	154

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden extraer del presente estudio se exponen a continuación:

5.1. SOBRE EL DISEÑO DE REPOBLACIONES FORESTALES EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

1. En el diseño de repoblaciones forestales localizadas en laderas de zonas áridas y semiáridas, la economía del agua debe tener un papel fundamental. Es decir, debe ser prioritaria la creación de estructuras en el terreno que sean capaces de recoger e infiltrar la escorrentía que asegure la supervivencia y adecuado desarrollo de los brizales.
2. Los elementos de diseño de una repoblación bajo este tipo de condiciones son tres: el tamaño o capacidad del microembalse a crear, la relación óptima entre el área de impluvio (generadora de escorrentía) y el área de recepción (donde se establece la planta y que se beneficia del aporte suplementario de agua) y, por último, la densidad de plantación, cuestión crucial en cualquier repoblación que cobra mayor importancia, si cabe, en zonas con escasez de agua en el suelo.

5.2. SOBRE EL TAMAÑO DEL MICROEMBALSE

1. Para fijar el tamaño adecuado del microembalse, se establece una serie de criterios que ayudan a su determinación desde varios puntos de vista: hidrometeorológico, de proporcionalidad con el área de impluvio, resguardo hidráulico, edáfico, ecológico, fisiológico, limitación fisiológica por encharcamiento, paisajístico o topográfico, mecánicos y económico.
2. Con la determinación de la capacidad adecuada del alcorque se pretende que éste acumule la cantidad de agua que necesita la planta, aumentando su probabilidad de supervivencia, pero también reducir a lo indispensable la modificación del relieve de la ladera, para minimizar o evitar totalmente el impacto paisajístico u otros impactos ambientales que puede producir la preparación del suelo.
3. Cada uno de los criterios enumerados cubre un aspecto a tener en cuenta en el diseño del microembalse, a saber:
 - a) Criterio hidrometeorológico

La función de un microembalse para la repoblación forestal es recoger toda el agua que llega a él, para una determinada precipitación de diseño. Es decir, hay que

lograr endorreísmo: que toda el agua de escorrentía y precipitación se quede e infiltre en el microembalse. Para ello, se ajusta la serie disponible de precipitaciones máximas diarias anuales a la función de distribución de Gumbel y, a partir de ella, se deduce la capacidad de embalse necesaria para lograr endorreísmo con un periodo de retorno de 10 años (vida útil estimada para la sistematización).

Por otro lado, si existe una relación de proporcionalidad entre el área de impluvio y la capacidad del microembalse, para que el volumen de escorrentía que se genera en el área productora quede retenido en la trampa de agua, se asegura también el endorreísmo. A partir del modelo hidrológico MODIPÉ se calcula *MAX*, que se define como el volumen de agua que escurriría de la unidad sistematizada si no existiera microembalse. Esta variable determina el tamaño del microembalse que garantiza la recogida de toda la escorrentía producida en el área de impluvio.

b) Resguardo hidráulico

El posible desbordamiento de agua del microembalse puede tener efectos perniciosos para el murete de tierra que lo delimita. Por esta razón, es muy recomendable establecer un resguardo entre el nivel que alcanza el agua dentro del microembalse según el criterio hidrometeorológico y la coronación del murete. Los fines de este resguardo son: garantizar el endorreísmo, prevenir la distorsión que se produce al utilizar el método del número de curva (calibrado para cuencas de superficie mucho mayor) y considerar la reducción del volumen del alcorque debido a su aterramiento parcial y al achatamiento o asentamiento de su murete.

c) Criterios edáficos (capacidad de retención de agua y porosidad)

El microembalse que se diseñe no debe recoger una cantidad de agua mayor de la que puede ser almacenada en el suelo, es decir:

$$Volumen\ alcorque\ lleno \leq CRAD$$

siendo *CRAD* la capacidad de retención de agua disponible en el perfil.

El tamaño del alcorque establecido por esta condición es suficiente para obtener la máxima cosecha de agua posible, ya que un valor superior quedará fuera del alcance de las raíces al escapar el agua acumulada de la rizosfera.

Así mismo, puede calcularse la altura del murete del microembalse (*H*) mediante la inecuación que la relaciona con la profundidad del suelo (*h*):

$$H \geq h \cdot p_u$$

Donde p_U es la porosidad útil (volumen de poros entre 0,2 y 9 μm de diámetro, es decir, de aquellos poros que contienen agua disponible para las plantas).

d) Criterio ecológico

En una repoblación forestal, con la preparación del terreno se consigue un avance del número de curva equivalente de la unidad sistematizada (incluso hasta el número de curva mínimo posible), debido a la mejora en las condiciones hidrológicas en la unidad sistematizada. Este salto (dentro de la denominada serie progresiva del número de curva) es paralelo a la mejora de la disponibilidad hídrica (serie progresiva de las disponibilidades hídricas) y también a la evolución de la vegetación hacia la climática.

Si se determina el número de curva de la vegetación climática y se toma como número de curva equivalente objetivo, es posible calcular la correspondiente capacidad del microembalse, utilizando para ello la función de distribución de Gumbel, previamente ajustada para el criterio hidrometeorológico, y la relación que existe entre el número de curva y el umbral de escorrentía.

e) Criterio fisiológico

Según este planteamiento, el microembalse se construye con la finalidad de suministrar a la planta un volumen de agua igual a su evapotranspiración. Es decir, la demanda evapotranspirativa (como estimadora de las necesidades fisiológicas de agua de la planta) debe compensarse con las aportaciones (precipitación en el área de recepción y escorrentía que llega también a ella). Con estos dos componentes (demandas y aportaciones) y utilizando métodos tradicionales de dimensionado de embalses (el método de diagrama de masa o el de diferencias acumuladas, por ejemplo), se obtiene el tamaño del microembalse que hace frente a las necesidades hídricas de la repoblación.

f) Limitación fisiológica por encharcamiento

Después de una precipitación abundante, el alcorque puede llenarse de agua y la planta que en él vegeta quedar anegada. Con el fin de evitar la muerte por anoxia de la planta, es necesario limitar el tiempo máximo de embalse:

$$T_{\max} \leq \frac{H}{f_{\min}}$$

siendo H la altura del murete y f_{\min} la tasa de infiltración mínima del suelo en el área de recepción.

Igualmente, hay que fijar un tiempo máximo mensual de encharcamiento, que debe ser un porcentaje del tiempo total del mes (por ejemplo, un 50 % en parada vegetativa o un 20 % en actividad fisiológica):

$$t_{máx} = \frac{DESP}{f_{min}} \text{, en porcentaje: } X = \frac{t_{máx}}{720} \cdot 100$$

$$X \leq 50 \% \text{ ó } 20 \%$$

Donde *DESP* es la disponibilidad hídrica en el área de recepción, calculada mediante el modelo MODIPÉ, del mes más pluvioso del año.

g) Criterio paisajístico o topográfico

La preparación del terreno supone un movimiento de tierras y, por lo tanto, un impacto negativo sobre el paisaje y el suelo. Para reducir estas alteraciones, es recomendable modificar el relieve natural lo mínimo imprescindible, y esto sólo se consigue con un adecuado diseño de la sistematización primaria, sustentado en la economía del agua.

Al mismo tiempo conviene comprobar que el microrrelieve creado artificialmente se atenúa en pocos años. Una forma sencilla de hacerlo es empleando una ecuación, derivada de la USLE, que sirve para calcular el volumen de sedimentos que van a parar al microembalse (A_1):

$$A_1 = \frac{R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot t \cdot S_1 \cdot 100}{\delta} \cdot (1 - C_e)$$

En esta ecuación *R*, *K*, *L*, *S* y *C* son los consabidos factores de la USLE; *t* = Vida útil de la sistematización; *S₁* = Área de impluvio; *C_e* = Coeficiente de emisión de sedimentos; y δ = Densidad aparente de los sedimentos removidos, transportados y depositados en *S₂*.

Si se cumple la condición siguiente:

$$CAPA \leq A_1$$

el microembalse resulta completamente aterrado, al cabo de su vida útil, y el relieve artificial generado con la preparación del suelo quedará suavizado durante ese horizonte temporal.

h) Criterios mecánicos (estabilidad, estanqueidad y asentamiento)

En el diseño de la sistematización hay que asegurar que los muretes de los microembalses sean estables (que no se desmoronen) y estancos (que no permitan la pérdida de agua a su través). Además, estos muretes, que condicionan la capacidad del alcorque, deben dimensionarse considerando la reducción de su altura que se produce por el asentamiento de la tierra removida.

Los microembalses excavados en el suelo son más estables que los construidos por acumulación de suelo removido. En este segundo caso, de utilización habitual, para incrementar la estabilidad hay que fijar razonadamente las pendientes de los taludes, la anchura de coronación y en la base, y la altura del murete.

Por otro lado, cuando se realizan movimientos de tierra, existe un incremento del volumen de suelo excavado y removido denominado esponjamiento; pero si este suelo se deja a la acción de los agentes atmosféricos, el volumen disminuye por asentamiento. Todas estas cuestiones deben ser tenidas en consideración para que el volumen del caballón definitivo se ajuste al previsto inicialmente.

i) Criterio económico

Los costes de la repoblación no deben incrementarse de forma importante al diseñar y ejecutar la preparación del terreno y el refinado del microembalse, salvo que se justifique por razones climáticas de extrema aridez.

4. Una vez considerados todos los criterios de cálculo del tamaño del microembalse, deben integrarse para llegar a una solución única, técnicamente adecuada y económicamente viable. En este sentido, resultan prioritarios (fundamentales) dos de ellos: el hidrometeorológico y el ecológico. A su vez, el criterio fisiológico pasará a ser prioritario una vez se conozcan las necesidades hídricas de los brizales con que se repuebla. Por otro lado, el criterio paisajístico desarrollado en esta tesis doctoral enlaza la recolección de agua con la recolección de tierra a través del modelo USLE, a la vez que estima la atenuación del microrrelieve artificial creado con la preparación del suelo.

5.3. SOBRE LA RELACIÓN ENTRE ÁREA DE IMPLUVIO Y ÁREA DE RECEPCIÓN

1. Las preparaciones del suelo para la restauración forestal en zonas secas deben diseñarse como sistemas de recolección de agua, compuestos por un área de impluvio y un área de recepción. La relación entre ambas superficies tradicionalmente ha venido predeterminada por la técnica elegida y la densidad de plantación. Sin embargo, en zonas con escasez de agua el procedimiento de cálculo debe ser el inverso: debe partir de la disponibilidad hídrica en el área de recepción y después fijar la mencionada relación, que a su vez condiciona el espaciamiento.

2. Todos los métodos que determinan la relación entre el área de impluvio y el área de recepción se basan en la compensación de las necesidades del cultivo por la precipitación que cae en el área de recepción y la escorrentía generada en el área de impluvio. Todos estos métodos tienen carácter agrícola, son de aplicación sencilla, estiman las necesidades hídricas a través de la ETP y calculan la escorrentía mediante coeficientes de escurrimiento.
3. El tamaño del área de impluvio debe ser tal, que aporte un volumen de agua que permita y asegure la supervivencia de las plantas instaladas en las primeras etapas de desarrollo.
4. Un modelo específico para determinar la relación entre el área de impluvio y el área de recepción en repoblaciones forestales debe utilizar la evapotranspiración real del repoblado (ET_{rep}) como estimadora de sus requerimientos hídricos, una precipitación de diseño (por ejemplo la precipitación con una probabilidad de ocurrencia del 33 %) (P) y la escorrentía formada en el área de impluvio y que llega al área de recepción (calculada por el método del número de curva) (E_{S1}). El modelo propuesto se resume en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{S1}}$$

Para la aplicación de este método surgen algunas cuestiones que conviene aclarar:

- a) La estimación de la evapotranspiración real de las especies forestales (y especialmente de una repoblación) es, en la actualidad, poco precisa; por ello será necesario profundizar en el tema en futuros trabajos de investigación.
- b) Respecto a la escorrentía, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:
 - Deben utilizarse las tablas de coeficientes de escorrentía con suma precaución, pues pueden estar distorsionando el proceso real en gran medida. El método más aconsejable es el del número de curva, ya que hace una estimación más realista de la lluvia neta y considera un mayor número de situaciones.
 - En el uso del método del número de curva, el método de aguaceros virtuales, si bien resuelve el problema de la carencia de datos, introduce una importante incertidumbre, al tener tres casos distintos de distribución de precipitaciones posibles, que generan escorrentías muy diferentes. Por ello, se aconseja trabajar con una serie anual de aguaceros reales.
5. Con el fin de permanecer del lado de la seguridad en el cálculo de R , es posible emplear la precipitación efectiva (P_e) y un factor de eficiencia (E), que permiten establecer un valor de R de confianza, superior al que se estima con la ecuación descrita anteriormente.

De este modo se obtiene:

$$R_{min} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{S1}} \quad R_{mayor} = \frac{ET_{rep} - P_e}{E_{S1} \cdot E}$$

5.4. SOBRE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN

1. La densidad de plantación es una de las más importantes decisiones que debe tomarse en la redacción de un proyecto de repoblación forestal protectora, especialmente en zonas secas en las que el agua es un recurso escaso para las plantas.
2. Los criterios habituales empleados para fijar la densidad de repoblaciones protectoras se han demostrado inválidos para repoblaciones en zonas áridas y semiáridas, puesto que generalmente abogan por pequeños espaciamientos. En cambio, en estas zonas la densidad debe ser directamente proporcional a la cantidad de agua disponible para cada árbol. Es decir, las disponibilidades hídricas para las plantas son las que condicionan la espesura.
3. No sólo con el establecimiento de un bosque denso se consigue la restauración de una ladera degradada en este tipo de climas, sino que en muchas ocasiones son más recomendables tipos de vegetación más propios de lugares con condiciones ecológicas de escasez de agua: bosques huecos o adehesados, plantaciones dispersas de árboles, repoblación en rodales o formaciones infraarbóreas. Se consigue así la creación de ecotonos (áreas de transición entre bosques y otro tipo de formaciones vegetales), que favorecen la restauración del ecosistema degradado.
4. Si se diseña la repoblación como un sistema de recolección de agua, las disponibilidades hídricas de las plantas son el factor principal para el cálculo de la densidad: densidades de implantación reducidas implican áreas de impluvio grandes y la cantidad de agua que llegará a cada planta será mayor.
5. En base a este principio, la densidad de plantación en una zona árida puede calcularse a partir de la superficie dedicada a cada planta, que coincide con la superficie de cada unidad sistematizada (compuesta por un área de impluvio y un área de recepción).

El planteamiento anterior puede aplicarse a sistematizaciones completas, es decir, a aquéllas que recogen toda la escorrentía generada en la ladera. En cambio, en sistematizaciones incompletas, si bien el procedimiento es el mismo, hay que tener en cuenta que la superficie que corresponde a cada árbol, además de área de impluvio y área de recepción, tiene un pasillo de escorrentía, sin utilidad para los fines de las cosechas de agua.

5.5. PROCEDIMIENTO INTEGRADO DE CÁLCULO

1. En las zonas áridas y semiáridas las repoblaciones forestales deben diseñarse en función del recurso más escaso y crucial, que es el agua. Por este motivo, la densidad de plantación no debe ser un dato de partida, como tradicionalmente se plantea, sino que ésta se supedita a la generación de una cantidad suficiente de escorrentía que alimente al área de recepción, a los brizales implantados.
2. Bajo estas premisas, el proceso de cálculo a seguir es el siguiente:
 - 1º) Determinar la capacidad del microembalse
 - 2º) Fijar la relación entre área de impluvio y área de recepción
 - 3º) Establecer la densidad de plantación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abascal, J.M.; 1997. Nueva trampa de agua que evita la erosión. Aplicable a repoblaciones forestales, dehesas y pastizales. *Montes*, 47: 17-21.
- Achouri, M.; 1994. Small-scale water harvesting: case study of water spreading on the perimeter of Boudaoues (Kairouan, Tunisia). *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Aguiló, J.; 1985. *Diseño y construcción de pequeños embalses*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Al-Labadi, A.M.; 1994. Water harvesting in Jordan: existing and potential systems. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Allué, J.L.; 1990. *Atlas fitoclimático de España. Taxonomías*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto de Investigaciones Agrarias). Madrid.
- Almorox, J.; De Antonio, R.; Saa, A.; Díaz, M.C.; Gascó, J.M.; 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid. Ed. Agrícola Española. Madrid.
- 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.
- Antinori, P.; Vallerani, V.; 1994. Experiments with water harvesting technology with new special ploughs. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Arar, A.; 1994. Optimization of water use in arid areas. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Aubreville, A.; 1949. *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Ed. Soc. d'Editions Geographiques et Coloniales. París.
- AUDECA, 2002. *Equipo para ejecución de caballones mecanizados y subsolado vertical en terrenos inclinados*. Documento informativo inédito.
- Ayuso, J.L.; 1990. Circulación de flujos. *Métodos de cálculo usuales en el diseño de canales y embalses en cuencas pequeñas*. Monografía nº 179. Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Bamatraf, A.M.; 1994. Water harvesting and conservation system in Yemen. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Barranco, D.; Fernández-Escobar, R.; Rallo, L. (Eds.); 2001. *El cultivo del olivo*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Bazza, M.; Tayaa, M.; 1994. Operation and management of water harvesting techniques. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Benítez, C.; Arias, W.; Quiroz, J.; 1980. *Manual de conservación de suelos y aguas*. Ministerio de Agricultura y Alimentación. Lima.
- Blaney & Criddle (1950). Citado por Sánchez-Toribio (1992).
- Boers, Th. M.; 1994. *Rainwater harvesting in arid and semi-arid zones*. ILRI Publications. Wageningen.
- Boers, Th. M.; Ben-Asher, J.; 1982. A review of rainwater harvesting. *Agric. Water Manage.*, 5: 145-158.
- Boersma, L.L.; Kirkham, D.; Norum, D.; Ziemer, R.; Guitjens, J.C.; Davidson, J.; Luthin, J.N.; 2001. *Soil moisture*. American Geophysical Union.

- 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.
- Calvo, M.; 1996. *Restauración de la vegetación en las laderas de Valoria la Buena (Valladolid)*. Proyecto Fin de Carrera. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Palencia.
- Carranza, P.A.; 1978. *Establecimiento de huertos frutales con aguas de escurrimiento en pequeñas cuencas hidrológicas*. Avances de Investigación UAAN. Saltillo.
- Carranza, P.A.; 1979. *Establecimiento y manejo de dos especies frutales con agua de escurrimiento de pequeñas cuencas hidrológicas*. Avances de Investigación UAAN. Saltillo.
- Carrera, J.A.; 1989. El Proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo). En: López Bermúdez, F.; Pardos, J.A.; Ramos, A. (Coords.); 1989. *Degradación de zonas áridas en el entorno mediterráneo*. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. Madrid.
- Carreras, C.; García, J. I.; Orti, M.; Ruiz de Torre, J.; 1996. *Manual de la flora para la restauración de áreas críticas y diversificación en masas forestales*. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). Sevilla.
- Castillo, V.M.; Martínez-Mena, M.; Albadalejo, J.; 1997. Validez del método del número de curva para el cálculo de caudales de escorrentía en áreas mediterráneas semiáridas. *I Congreso Forestal Hispano-Luso*, Tomo II: 235-240.
- Cerro, A. del; Briongos, J.M.; 2001. Conservación y mejora de bosques. En: Martín de Santa Olalla, F. (Dir.); 2001. *Agricultura y Desertificación*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Critchley, W.; Siegert, K.; 1991. *Water harvesting*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- CSE; 2003. *A look at India's water harvesting practices*. <http://www.rainwaterharvesting.org/Rural/Traditional3.htm>. Centre for Science and Environment. New Delhi.
- Custodio, E.; Llamas, M.R.; 1983. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. Barcelona.
- Chaparro, J., Enríquez, G. L. & Esteve, M.A.; 1993. Consecuencias ecológicas de las repoblaciones forestales mediante aterrazamientos en ambientes áridos y semiáridos (Murcia, SE de España). *Actas I Congreso Forestal Español*, Tomo IV: 163-168.
- Chaparro, J.; Esteve, M.A.; 1996. Criterios para restaurar la vegetación en ambientes mediterráneos semiáridos. *Quercus*, marzo 1996: 14-17.
- Chirino, E.; Bellot, J.; Bonet, A.; Andreu, J.M.; 2003. Efecto de diferentes tipos de cubierta vegetal en el control de la erosión en clima semiárido. SE-España. En: Bienes, R.; Marqués, M.J. (Eds.); 2003. *Control de la erosión y degradación del suelo. (Actas del Simposio Nacional de la erosión y degradación del suelo)*. Madrid.
- Dal-Re, R.; 1994. *Caminos rurales. Proyectos y construcción*. MAPA-IRYDA-Mundi-Prensa. Madrid.
- Delgado, J.C.; 1998. Los procesos de desertificación a escala subnacional. En: López Cadenas, F. (Dir.); 1998. *Curso: La ingeniería en los procesos de desertificación*. Madrid.
- Dellepiane, S.; De Vallejo, M.; García, A.; 1999. Obras manuales de pequeña dimensión para frenar la erosión y recuperar laderas degradadas. *Montes*, 55: 31-37.

- Díez Hernández, J.M.; 1996. Metodología de evaluación de la erosión hídrica en cuencas hidrográficas. El modelo USLE. En: *Curso de Evaluación de Impacto Ambiental*. Colegio Oficial de Ingenieros de Montes. Palencia.
- El Gindy, A.H.; 1994. Rainwater harvesting: role and prospects in Egyptian agriculture. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Elías (1978). Citado por Porta *et al.* (1999).
- Elías, F.; Castellví, F. (Coords.); 2001. *Agrometeorología*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Elizondo, R.F.; 1977. *Influencia del escurrimiento en la productividad del maíz y frijol de temporal en el desierto Chihuahuense*. Tesis. Universidad Autónoma "Antonio Narro". México D.F.
- Evenari, M.; 1987. *Und die Wüste trage Frucht. Ein Lebensbericht*. Bleicher. Gerlingen.
- Evenari, M; Shanan, L.; Tadmor, N.H.; 1963. *Runoff-farming in the Negev desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects for the years 1958-1962*. Ed. The National and University Institute of Agriculture. Rehovot.
- Evenari, M; Shanan, L.; Tadmor, N.H.; 1964. *Runoff-farming in the Negev desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects 1962-1963*. Ed. The National and University Institute of Agriculture. Rehovot.
- Evenari, M; Shanan, L.; Tadmor, N.H.; 1971. *The Negev, the challenge of a desert*. Harvard University Press. Cambridge.
- FAO; 1963. Citado por Porta *et al.* (1999).
- FAO; 1989. *Arid zone forestry. A guide for field technicians*. Food and Agriculture Organization of United Nations. Roma.
- FAO; 1994. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. Food and Agriculture Organization of United Nations. Roma.
- FAO; 1998. *Lucha contra la desertificación*. CD-Rom. Food and Agriculture Organization of United Nations. Roma.
- Fernández Yuste, J.A.; 1989. Actuaciones en la cuenca: medidas estructurales en terrenos forestales. En: Universidad Politécnica de Madrid (Ed.). *Curso de Estabilización de cauces torrentiales*. Madrid.
- Ferrer-Julià, M.; 2003. *Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección*. Cuadernos de investigación. CEDEX. Madrid.
- Ferrer-Julià, M.; Estrela, T.; Sánchez del Corral, A.; García-Meléndez, E.; 2003. Generación de un mapa de valores continuos de número de curva basado en la conductividad hidráulica saturada. *Ingeniería Civil*, 131: 181-187.
- Fidelibus, M.W.; Bainbridge, D.A.; 1994. Microcatchment water harvesting for desert vegetation. In: *Restoration in the Colorado Desert: Management Notes*.
- Finkel, M. (Ed.); 1985. *Turkana water harvesting manual*. Finkel and Finkel Ltd. Norad.
- Frasier, G.W.; 1994. Water harvesting/runoff farming systems for agricultural production. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Fuentes, J.L.; 1998. *Técnicas de riego*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Fuentes, J.L.; Cruz, J.; 1990. *Curso elemental de riego*. Madrid.
- Gandullo, J.M.; 1985. *Ecología Vegetal*. Ed. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.

García Camarero, J.; 1989. *Zonas y ecosistemas en degradación. Desertificación*. Hojas Divulgadoras 10/89. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

García Cañada, R.; 1924. Acción de los montes en la formación y precipitación de meteoros acuosos y en la regularización de las corrientes de agua. *Curso de conferencias dedicado a la producción del campo aragonés*. Academia de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de Zaragoza.

García Latorre, J.; 1998. La preparación del terreno en la reforestación de zonas semiáridas. *Montes*, 51: 70-75.

García Salmerón, J.; 1991. Manual de repoblaciones forestales I. E.T.S. de Ingenieros de Montes (Fundación Conde del Valle de Salazar). Madrid.

García Salmerón, J.; 1995. *Manual de repoblaciones forestales II*. E.T.S. de Ingenieros de Montes (Fundación Conde del Valle de Salazar). Madrid.

Gatón, A.; 1997. Proyecto de restauración de laderas y cárcavas en el término municipal de Vega de Doña Olimpa (Palencia). Proyecto Fin de Carrera. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Palencia.

Geddes, H.J. 1963. *Water harvesting*. Australian Academy of Science. Canberra.

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.

González Alonso, S. (Dir.); 1998. *Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental. 3. Repoblaciones forestales*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

González Alonso, S.; Encinas, A.; 1995. Ecotonos forestales: la importancia de las fronteras. *Quercus*, 117: 18-21.

Gras; 1957. Citado por Porta *et al.* (1999)

Gutiérrez, C.J.; 1975. *Evaluación de diferentes métodos para establecimiento de especies forestales en zonas áridas*. Tesis. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". México D.F.

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

Heatchcote, R.L.; 1983. *The arid lands: their use and abuse*. Ed. Longman. London.

Heras, R.; 1983. *Recursos hidráulicos. Síntesis, metodología y normas*. Ed. Cooperativa de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Horton, R.E.; 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.

Ibrahim, I.H.; 1994. Rainwater harvesting project in Dier-Atye: a case study from Syria. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.

ICONA; 1982. *Paisajes erosivos en el sureste español: ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación*. Monografía 26. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.

ICONA; 1988. *Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.

Ingelmo, F.; Cuadrado, s.; 1986. *El agua y el medio físico del suelo*. Centro de Edafología y Biología Aplicada (CSIC.). Diputación de Salamanca. Salamanca.

- JCyL; 1994. *Programa regional de forestación de tierras agrarias y mejora de los bosques en zonas rurales. Cuaderno de la zona: 14 Cerratos Oeste*. Junta de Castilla y León, Consejería de Medio Ambiente. Valladolid.
- JCyL; 2000. *Plan forestal de Castilla y León. Documento para el debate público*. Junta de Castilla y León, Consejería de Medio Ambiente. Valladolid.
- Kaul, R. N. (Ed.); 1970. Afforestation in arid zones. *Monographiae Biologicae*, 20.
- Klock, G.O.; Boersma, L.; De Backer, W.; 1969. Pore size distributions as measured by the mercury method and their use in predicting permeability. *Soil Sci. Am. J.*, 32: 12-15.
- Kutílek, M.; Nielsen, D.; 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag. Cremlingen.
- Lange, K.E.; 2003. El desierto retrocede. *National Geographic*, vol. 13, núm. 11.
- Le Houèrou, H.N.; 1976. Can desertization be halted? *FAO Conservation Guide* 3:1-15.
- Lemus, M.; Navarro, G.; 2003. *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*. Corporación Forestal Nacional, Gobierno de Chile. San Fernando.
- 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.
- López Bermúdez, F.; 2001. El riesgo de desertificación. En: Martín de Santa Olalla, F. (Dir.); 2001. *Agricultura y desertificación*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- López Bermúdez, F.; Pardos, J.A.; Ramos, A. (Coords.); 1989. *Degradación de zonas áridas en el entorno mediterráneo*. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. Madrid.
- López Cadenas, F. (Dir.); 1998a. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa, Tragsatec. Madrid.
- López Cadenas, F.; 1998b. La intrahistoria de la problemática de la desertificación. En: López Cadenas, F. (Dir.); 1998. *Curso: La ingeniería en los procesos de desertificación*. Madrid.
- López Cadenas, F.; 2003. *La ingeniería en los procesos de desertificación*. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa. Madrid.
- Lovénstein, H.; 1994. From water harvesting to crop harvesting: opportunities for efficient use of runoff water by crops. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Ludwig, J.; Tongway, D.; Freudenberger, D.; Noble, J.; Hodgkinson, K. (Eds.); 1997. *Landscape ecology. Function and management*. CSIRO. Collingwood.
- Magíster, M.; 1991. *Apuntes de conservación de suelos, tomo II*. Ed. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Martín Galindo, J.L.; 1988. *Almería: Paisajes agrarios. Espacio y sociedad. De la agricultura morisca a los enarenados actuales*. Ed. Universidad de Valladolid. Valladolid.
- Martín de Santa Olalla, F. (Dir.); 2001. *Agricultura y desertificación*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Martínez Artero, J.A.; Juanes, F.; García Robredo, F.; Rojo, L.; Martínez Fernández, F.; Bago, D.; 1997. Diseño de un nuevo método de repoblación hidrológico-forestal en zonas áridas y semiáridas: cuencas de contorno discontinuas. *Actas Congreso Forestal Hispano-Luso*: 407-412.
- Martínez Artero, J.A.; Juanes, F.; Rojo, J.; García Robredo, F.; 1999. Las cuencas de contorno discontinuo. Nueva técnica de repoblación hidrológico-forestal para zonas áridas y semiáridas. *Forestal* 7: 132-135.

Martínez de Azagra, A.; 1990. *Problemas prácticos de hidráulica forestal*. E.U. Politécnica Agraria de Palencia (Universidad de Valladolid). Palencia.

Martínez de Azagra, A.; 1994a. *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- I. Fundamentos del modelo*. Informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA). Palencia.

Martínez de Azagra, A.; 1994b. *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- II. Particularización al modelo de infiltración de Horton. Modelo HYDNUM*. Informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA). Palencia.

Martínez de Azagra, A.; 1995a. *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- III. Particularización al modelo de escorrentía de los complejos hidrológicos. Modelo MODIPÉ*. Informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA). Palencia.

Martínez de Azagra, A.; 1995b. *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera*. Tesis doctoral. E.T.S.I. Montes. Madrid.

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

Martínez de Azagra, A.; 1999. El modelo hidrológico MODIPÉ. *Montes* 55: 77-82.

Martínez de Azagra, A.; 2000. Principles for designing endorheic microcatchments. *Third International Congress Man and Soil at the Third Millennium*, Volumen I: 507-520.

Martínez de Azagra, A.; Calvo, M.; 1996. Desertización por aridez edáfica. *Actas del I Congreso Regional del Agua (Valladolid)*: 111-117.

Martínez de Azagra, A.; Navarro, J.; 1996. *Hidrología forestal. El ciclo hidrológico*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid.

Martínez de Azagra, A.; Mongil, J.; 2001. Algunos criterios para el diseño de sistemas de recolección de agua en repoblaciones forestales. *Actas III Congreso Forestal Español*, Mesa 3: 272-277.

Martínez de Azagra, A.; Mongil, J.; Fernández de Villarán, R.; 2002. Estudio hidrológico del aterrazado con subsolado mediante el modelo MODIPÉ. *Ecología*, 16: 37-44.

Martínez de Azagra, A.; Mongil, J. Rojo, L.; 2004. Oasification: reclamation forestry addressing desertification hazards. En: *NATO-CCMS and Science Committee Workshop on Desertification in the Mediterranean Region. A security issue*. Kluwer Academic Publishers (En prensa).

Martínez, M.L.; Cepeda, V.S.; 1970. *Aprovechamiento de agua de escurrimiento y producción de cosechas en suelos de laderas aluviales de la zona árida del municipio de Saltillo*. Boletín Técnico ESAAN. Saltillo.

Materón, H.; 1997. *Obras hidráulicas rurales*. Ed. Universidad del Valle. Santiago de Cali.

McCool *et al.*; 1982. Citado por López Cadenas (2003).

Medina, J.A.; 2000. *Riego por goteo. Teoría y práctica*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Meigs, P; 1953. World distribution of arid and semiarid homoclimates. En: UNESCO; 1953. Arid zone. Res. Series N.1. *Arid Zone Hydrology*, 203-209.

Messines, J.; 1952. Fijación y repoblación de dunas en Tripolitania. *Unasylva* 6-2.

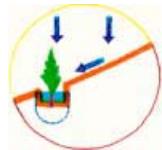
- MIMAM; 2001. *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación*. Borrador de trabajo. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Mintegui, J.A.; López Unzu, López, F.; 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio de publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria.
- Mishra, S.K.; Singh, V.P.; 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Mongil, J.; 1995. *Estudio de la influencia de los trabajos de preparación del suelo en repoblaciones sobre la disponibilidad hídrica del mismo: ahoyado mecánico y subsolado lineal a nivel*. E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia (trabajo fin de carrera). Palencia.
- Mongil, J.; 2002. Repoblación forestal: breve revisión de la labor repobladora en España. *Abula, Miscelánea de la Universidad Católica de Ávila*, 2: 177-185.
- Monsalve, M. (Dir.); 1995. *Manual de forestación*. Junta de Castilla y León. Pamplona.
- Montero de Burgos, J.L.; González Rebollar, J.L.; 1983. *Diagramas bioclimáticos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.
- Montiel, F.; 1955. La lucha contra la erosión en la cuenca del río Segura. *Montes*: 349-354.
- Montoya, J.M.; 1996. *Técnicas de reforestación con encinas, alcornoques y otras especies de Quercus mediterráneos*. Hojas divulgadoras Núm. 7-8/95 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MOPT; 1992. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid.
- MOPU; 1990. *Instrucción 5.2-I.C. Drenaje superficial*. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.
- Morales, A.; 1969. El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. *Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia*, 1: 167-183.
- Morales, A.; 1989. Abandono y desorganización de los sistemas de riegos de turbias. Su incidencia en la escorrentía. En: *Los paisajes del agua. Libro jubilar dedicado al profesor Antonio López*. Ed. Universidad de Valencia. Valencia.
- Morey; 1955. Citado por Udall & Dominy (1966).
- Morgan, R.P.C.; 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Morin, G.C.A.; Matlock, W.G.; 1975. Desert strip farming. Computer simulation of an ancient water harvesting technique. *Proceedings of the Water Harvesting Symposium, Phoenix (Arizona)*.
- Moustafa, A.T.; 1994. Agricultural development in the northwestern zones of Egypt. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Nasr, M.; 1999. *Assessing desertification and water harvesting in the Middle East and North Africa: Policy implications*. ZEF. Bonn.
- Navarro, M. (Coord.); 1977. *Técnicas de Forestación*. Monografías 9. ICONA. Madrid.
- Navarro, J.; 2002. *Control de erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (E.T.S. Ingenieros de Montes). Madrid.
- Nearing, M.A.; Liu, B.; Risso, L.M.; Zhang, X.; 1996. Curve numbers and Green Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resources Bulletin*, 32 (1): 125-136.

- Newman, J.C.; 1966. Waterponding for soil conservation in arid areas in New South Wales. *J. Soil Conserv. N.S. Wales*, 22:18-28.
- Nicolás, J.J.; 1998. Biotécnicas en la restauración de cuencas. En: López Cadenas, F. (Dir.); 1998. *Curso: La ingeniería en los procesos de desertificación*. Madrid.
- NRCS; 1993. *Soil survey manual*. <http://www.nhq.ncrs.usda.gov/JDV/ssmnew>
- NRCS; 1997. *Part 630. Hydrology. National Engineering Handbook*. Washington D.C.
- NRCS; 2002. *Part 630. Hydrology. National Engineering Handbook*. Washington D.C.
- Núñez, A.R.; 1982. *Captación de lluvia y conservación de la humedad del suelo en la producción de cebada bajo condiciones de temporal*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México D.F.
- Qiaregui, G.; 1998. Repoblaciones forestales en Navarra. *Foresta*, 3: 16-20.
- Oliver, C.D.; Larson, B.C.; 1996. *Forest stand dynamics*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Oweis, Th.; Hachum, A.; Kijne, J.; 1999. *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas*. SWIM Papers. Colombo.
- Paco, J.L. de; 1969. *Drenaje agrícola. Teoría y bases de cálculo*. Ed. Servicio Nacional de Concentración Parcelaria y Ordenación Rural (M.A.P.A.). Madrid.
- 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.
- Pascual, B.; 1996. *Riegos por gravedad y a presión*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Pemán, J.; Navarro, R.; 1998. *Re poblaciones forestales*. Edicions Universidad de Lleida. Lérida.
- Pemán, J.; 1999. *Bibliografía española sobre repoblaciones forestales. Libros*. www.grn.es/fl/public/re pobl.htm
- Perdomo, A.C.; 2003. *El agrosistema de "gavias" de Fuerteventura (Canarias): un ejemplo de gestión ecológica del agua en zonas áridas en proceso de abandono*. <http://www.agroecologia.net/congresos/mallorca/agrosistema%20gavias.htm>
- Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Flores, J.P.; Martínez, E.; Ponce, M.; 2003. *Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central*. Ed. FDI-CORFO, Universidad de Talca, EIAS. Talca.
- Ponce, V.M; 1989. *Engineering hydrology. Principles and practices*. Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs.
- Ponce, V.M.; Hawkins, R.H.; 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Journal of hydrologic engineering*, January 1996.
- Ponce, V.M.; 2003a. Comunicación personal sobre las diferentes versiones de las tablas del número de curva.
- Ponce, V.M.; 2003b. *Victor Ponce Website*. <http://ponce.sdsu.edu>
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C.; 1999. *Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Prinz, D.; 1999. Technological potential for improvements of water harvesting. *WCD Thematic Review IV.2 Assessment of Irrigation Options*.
- Prinz, D.; 2001. Water harvesting for afforestation in dry areas. *Proceedings, 10th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Mannheim*.

- Prinz, D.; Tauer, W.; Vögtle, Th.; 1994. Application of remote sensing and geographic information systems for determining potential sites for water harvesting. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Puigdefábregas, J.; 1995. Erosión y desertificación en España. *El Campo*, 132: 63-83.
- Puigdefábregas, J.; 2003. Control de la erosión por la cubierta vegetal en zona árida: otros factores además de la densidad. En: Bienes, R.; Marqués, M.J. (Eds.); 2003. *Perspectivas de la degradación del suelo. (Actas del Simposio Nacional de la erosión y degradación del suelo)*. Madrid.
- Rawls, W.J.; Ahuja, L.R.; Brakensiek, D.; Shirmohammadi, A.; 1993. Infiltration and soil movement. En: Maidment, D.R. (Ed.); 1993. *Handbook of hydrology*. Ed. McGraw Hill.
- Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G.A.; McCool, D.K.; Yoder, D.C. (Coord.); 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S.D.A. Agricultural Handbook, 703.
- Revilla, J.; 1980. *El alumbrado para acumulación de agua en cultivos leñosos de secano*. Hojas divulgadoras Núm. 19/80 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Rippl; 1883. Citado por Zapata (2001).
- Rivas-Martínez, S.; 1987. *Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España*. ICONA. Madrid.
- Rodríguez, J.M. et al.; 1988. *Apuntes de hidrología aplicada*. Curso Internacional de Hidrología General y Aplicada. CEDEX.
- Rocheleau, D.; Weber, F.; Field-Juma, A.; 1988. Agroforestry in dryland Africa. *International Council for Research in Agroforestry, Nairobi*.
- Rojo, L.; 1998. El Proyecto LUCDEME. Convenio de lucha contra la desertificación (París 1994). En: López Cadenas, F. (Dir.); 1998. *Curso: La ingeniería en los procesos de desertificación*. Madrid.
- Roose, E.; 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la F.A.O.*, 70.
- Ruiz de la Torre, J.; 2001. El bosque como defensa frente a las inundaciones y la sequía. *Cuadernos de Forestalia*, 1: 7-18.
- Sanchez Palomares, O.; Blanco, A.; 1985. Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. *Montes* 4: 26-30.
- Sánchez-Toribio, M.I.; 1992. *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Ed. Geoforma. Logroño.
- SCS; 1985. Citado por Mishra & Singh (2003).
- SCS; 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release-55. Washington D.C.
- SCS; 1991. *Engineering field handbook. Chapter 2*. Washington D.C.
- Serrada, R.; 1993. *Apuntes de repoblaciones forestales*. Ed. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- Sevilla, F.; 2001. Marco y densidad de las repoblaciones forestales. *Actas III Congreso Forestal Español*, Mesa 3: 931-937.
- Shanan, L.; Tadmor, N.H.; Evenari, M.; 1958. The ancient desert agriculture of the Negev. II. Utilization of runoff from small watersheds in the Abde (Ovdat) Region. *Ktavim*, 9: 107-128.
- Shanan, L.; Tadmor, N.H.; 1979. *Micro-catchment systems for arid zones development; a handbook for design and construction*. Hebrew University. Jerusalén.

- Sharma, K.D.; Pareek, O.P.; Singh, H.P.; 1986. Microcatchment water harvesting for raising Jujube orchards in an arid climate. *Transactions of the ASEA*, 29 (1): 112-118.
- Shata, A.; Attia, F.; 1994. Socio-economic and environmental aspects of water harvesting: Egyptian experience. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Siegert, K.; 1994. Introduction to water harvesting: some basic principles for planning, design and monitoring. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Simón, E. de; 1990. Restauración de la vegetación en cuencas mediterráneas: repoblaciones en zonas áridas. *Ecología, Fuera de Serie 1*: 401-427.
- Simón, E. de; López, G.; 1989. Actuaciones en la cuenca: medidas biológicas. En: Universidad Politécnica de Madrid (Ed.). *Curso de Estabilización de cauces torrenciales*. Madrid.
- Simón, E. de; Bocio, I.; De Simón, J.A.; 1999. Restauración de la vegetación en cuencas hidrográficas. *Montes* 58: 25-39.
- Simón, E. de; Ripoll, M.A.; Bocio, I.; Navarro, F.B.; Gallego, E.; 2001. Aprovechamiento de escorrentías superficiales, mediante la formación de microcuencas, en repoblaciones de zonas semiáridas. *Actas III Congreso Forestal Español*, Mesa 3: 305-310.
- 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>
- Smith, D.M.; Larson, B.C.; Kelty, M.J.; Ashton, P.M.S.; 1997. *The practice of silviculture. Applied forest ecology*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Smith, R.L.; Smith, Th. M.; 2001. *Ecología*. Pearson Educación. Madrid.
- Soriano, A.; 1956. Los aperos y los motores de sangre en los trabajos de repoblación forestal. *Montes*: 339-350 y 413-424.
- Tadmor, N.H.; Evenari, M.; Shanan, L.; Hillel, D.; 1957. The ancient desert agriculture of the Negev. I. Gravel mounds and gravel strips near Shivta (Sbeita). *Ktavim*, 8: 127-151.
- Tadmor, N.H.; Shanan, L.; Evenari, M.; 1960. The ancient desert agriculture of the Negev. IV. The ratio of catchment to cultivated area. *Ktavim*, 10: 3-4.
- Tayaa, M.; 1994. Present situation and prospects for improvements of water harvesting practices in Morocco. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Témez, J.R.; 1987. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- Thorthwaite, C.W.; 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38: 55-94.
- Tobbi, B.; 1994. Water harvesting: existing, historic and potential in Tunisia. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.
- Tongway, D.; 2003. *Reading de landscape*. CSIRO. Canberra.
- Torre, M.; 1995. Repoblación forestal. Preparación del terreno mediante el método de ahoyado mecanizado con bulldozer y rejón modificado. *Montes*, 41: 37-43.
- Toy, T.J.; Foster, G.R. (Co-Eds.); 1998. *Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), version 1.06, on mined lands, construction sites, and reclaimed lands*. Office of Surface Mining. Denver.

- Trueba, C.; Millán, R.; Schmid, T.; Lago, C.; Gutiérrez, J.; 2000. *Estimación de índices de vulnerabilidad radiológica para los suelos peninsulares españoles*. CIEMAT.
- Turc, L.; 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration pontentielle. *Ann. Agron.*, 12: 13-49.
- Udall, S.L.; Dominy, F.E.; 1966. *Diseño de presas pequeñas*. Ed. Continental. México D.F.
- UNCCD; 1994. *United Nations Convention to Combat Desertification*. Ed. Secretariat of the CCD. Bonn.
- UNESCO (Ed.); 1977. *Map of the world distribution of arid regions*. Map Tech Note 7. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. New York.
- USBR; 1964. *Bureau of reclamation manual. Vol. V. Irrigated land use. Part. 2. Land classification*. Washington.
- Valero, J.; Carreras, C.; 1998. Consideraciones sobre los tratamientos selvícolas y las repoblaciones en Almería. *Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones*.<http://www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT>
- Velasco-Molina, H.A.; 1983. *Uso y manejo del suelo*. Ed. Limusa. México D.F.
- Velasco-Molina, H.A.; 1991. *Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo*. 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).
- Waterfall, P.H.; 2002. *Harvesting rainwater for landscape use*.
<http://ag.arizona.edu/pubs/water/az1052/harvest.html>
- Wesemael, B.; Poesen, J.; Solé Benet, A.; Cara Barrionuevo, L.; Puigdefábregas, J.; 1998. Collection and storage of runoff from hillslopes in a semi-arid environment: geomorphic and hydrologic aspects of the aljibe system in Almeria Province, Spain. *Journal of Arid Environments*, 40: 1-14.
- Wischmeier, W.H.; Johnson, C.B.; Cross, B.V.; 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26: 189-193.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D.; 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Agricultural Handbook, nº 537*.
- Zapata, A.J.; 2001. *Hidrología*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería. Almería.



ANEXOS



ANEXO I:

**TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN
DE AGUA**

ÍNDICE DEL ANEXO I

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	215
2. LAS COSECHAS DE AGUA	216
2.1. Definiciones y clasificación	216
2.2. Partes de un sistema de cosechas de agua	218
2.3. Inducción de escorrentía.....	219
3. TÉCNICAS DE COSECHAS DE AGUA.....	221
3.1. Microcuenca <i>Negarim</i>	225
3.2. Caballones según curvas de nivel para árboles	228
3.3. Caballones semicirculares	231
3.4. Caballones según curvas de nivel para cultivos herbáceos	235
3.5. Caballones trapezoidales	237
3.6. Caballones de piedra según curvas de nivel	240
3.7. Diques permeables de roca	242
3.8. Caballones de extensión de agua.....	245
3.9. Terrazas	247
3.10. Otras técnicas desarrolladas tradicionalmente	253

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La recolección de agua para el consumo humano o animal es una actividad tan antigua como el hombre. Es muy posible que las primeras formas de recoger el agua fueran simples hoyos excavados en la roca, que captarían y almacenarían la escorrentía producida durante las tormentas. El siguiente paso evolutivo probablemente fuera la construcción de muros de desviación para crear un gran área de captación. Existen evidencias de estas estructuras en las montañas de Edom (en el sur de Jordania) datables hace 9.000 años, en Irak hacia el año 4500 A.C. y en la zona situada entre el golfo de Arabia y La Meca (Frasier, 1994). La técnica consistía esencialmente en la recolección de agua de lluvia y su desviación a estanques naturales o artificiales o a depósitos (Bazza & Tayaa, 1994).

Una de las instalaciones de cosechas de escorrentía más temprana y perfectamente documentada se localiza en el desierto Negev (Israel). Esta instalación, que fue construida hace unos 4.000 años, ha sido descrita por Evenari *et al.* (1963, 1964). Las áreas productoras de escorrentía que tenían estos sistemas eran laderas limpias de vegetación y con suelo alisado para incrementar el escurrimiento. Unas zanjas cavadas según curvas de nivel conducían el agua recogida para el riego de los campos. Estos sistemas permitían una agricultura de cereal en zonas con una precipitación anual media de 100 mm.

En Palestina se han descubierto instalaciones que datan del año 2500 al 1800 A.C., que consistían básicamente en cisternas con áreas de captación tratadas para incrementar la escorrentía (Nasr, 1999). Otros sistemas de cosechas de agua han sido también utilizados hace 500 años en el suroeste de Estados Unidos, México, India y en África, tanto en la zona subsahariana como en el norte de este continente (Frasier, 1994; Bazza & Tayaa, 1994). No se conocen las causas del abandono de estos sistemas, pero algunas hipótesis lo achacan a una excesiva salinización del suelo (Frasier, 1994), y otras (Shanan & Tadmor, 1979) lo explican basándose en un cambio climático que obligaría al abandono de los cultivos; sin embargo, Fidelibus & Bainbridge (1994) señalan razones políticas más que de tipo ambiental.

Aunque el método tiene una antigüedad significativa, no ha sido tratado por los investigadores hasta mediado el siglo XX. Es a partir de los años cincuenta y sesenta cuando empiezan a aparecer en la bibliografía especializada algunos trabajos localizados en el desierto de Negev en Israel (Tadmor *et al.*, 1957; Shanan *et al.*, 1958) y en el desierto de Sonora en Arizona (Cadot, 1989).

A pesar del abandono temporal de las técnicas de cosechas de agua antes mencionado, recientemente se aprecia un renovado interés, provocado por el incremento de la demanda de productos agrícolas y los altos costes energéticos. De esta forma, en Arizona y Australia están siendo experimentadas técnicas innovadoras en los campos del consumo doméstico y la jardinería (Bazza & Tayaa, 1994). En la actualidad, las cosechas de agua son practicadas intensamente en las zonas áridas de muchos países para cultivos agrícolas (Méjico, Botswana, India, Afganistán, Pakistán, Australia, Israel, Kenia, Túnez, etc.). El sistema más común es el de las microcuenca. En Afganistán, por ejemplo, se estima que unas 70.000 ha se

benefician de esta técnica (Bazza & Tayaa, 1994).

2. LAS COSECHAS DE AGUA

2.1. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

Para una primera aproximación a las cosechas de agua (*water harvesting* en inglés, *Wasserernten* en alemán y *récolte d'eau*), se recomienda acudir a la recopilación bibliográfica realizada por Boers & Ben-Asher (1982). Según estos autores, la cosecha de agua es un método para inducir, recoger, almacenar y conservar escorrentía local y superficial para la agricultura en regiones áridas y semiáridas.

En sentido más amplio, Critchley & Siegert (1991) definen cosecha de agua como la recolección de escorrentía para su uso productivo. La escorrentía puede recogerse desde tejados y superficies del suelo (cosecha de agua de lluvia o *rainwater harvesting*), o desde cursos de agua intermitentes y efímeros (cosecha desde cursos de agua o *floodwater harvesting*).

Más recientemente, Frasier (1994) aúna ambos conceptos, definiendo la cosecha de agua como el proceso de recolección y almacenamiento de agua para su posterior uso, desde un área tratada para incrementar la escorrentía. Por consiguiente, un sistema de cosecha de agua sería aquel que facilita la recolección y almacenaje de agua de escorrentía, que puede utilizarse para abastecimiento doméstico o para cultivos. Cuando un sistema de cosecha de agua está específicamente diseñado para suministrar agua para el crecimiento de las plantas, recibe el nombre de "cultivo con escorrentía" (*runoff farming* en la bibliografía anglosajona) (véase la figura I.1).

Todas las técnicas de cosechas de agua existentes tienen en común las siguientes características:

- 1) Son aplicadas en zonas áridas y semiáridas, donde la escorrentía tiene un carácter intermitente.
- 2) Dependen de un agua de origen local, como puede ser la escorrentía superficial, el caudal de un arroyo o de un manantial efímeros.
- 3) Son operaciones a pequeña escala, en cuanto al área de captación, al volumen de almacenamiento y al capital invertido.

La recolección de escorrentía puede realizarse de dos formas bien diferentes (Boers & Ben-Asher, 1982):

- a) Cosechas de agua con microcuenca (*microcatchment water harvesting*).- Es un método para recoger la escorrentía superficial desde un área de contribución que conduce el flujo a una distancia inferior a 100 m y almacenarlo para uso consuntivo en la zona radical adyacente a una poceta de infiltración.

- b) Cultivo por cosecha de agua (*runoff farming water harvesting*).- Es un método para recoger la escorrentía superficial desde un área de captación, utilizando canales, presas y sistemas de desviación, y almacenarla en un depósito de superficie o en la zona radical de un área de cultivo para un uso consuntivo directo.

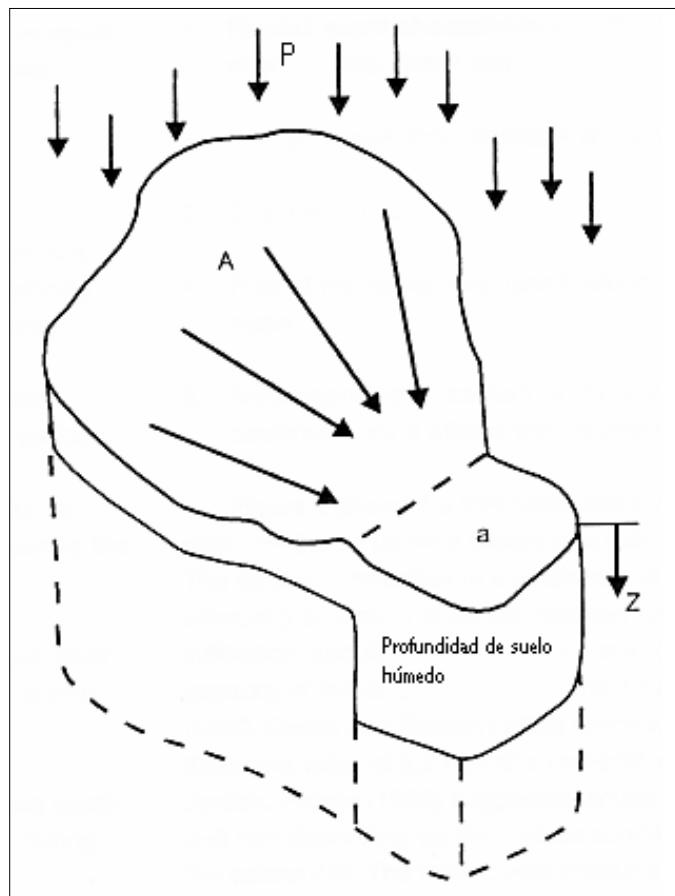


Figura I.1. Modelo conceptual de las cosechas de agua, según Oweis *et al.* (1999). P = Precipitación; A = Área de captación; a = Área de cultivo; Z = Profundidad efectiva de la zona radical

Existen muchas técnicas de cosechas de agua, para muy diversas aplicaciones. Las que se emplean para la producción vegetal, tanto de cultivos como de pastos y árboles, pueden agruparse, según Critchley & Siegert (1991), en tres categorías:

- 1) Microcuenca (*microcatchments*).- Son sistemas de cosecha de agua de lluvia (*rainwater harvesting*). Sus principales características son:

- Se recogen aguas que escurren por la superficie del suelo desde áreas de captación de corta longitud.
- La longitud del área de captación suele ser de 1 a 30 m.

- La escorrentía recogida se almacena en el perfil del suelo.
- La relación entre el área de impluvio y el área de recepción ($AI:AR$) es normalmente de 1:1 a 3:1.

Algunos ejemplos son las microcuenca *Negarim* (indicadas para árboles), caballones según curvas de nivel para árboles o para cultivos herbáceos y caballones semicirculares (recomendados para pastizales y matorrales).

2) Sistemas de captación externa (*external catchment systems*).- Constituyen una técnica de cosecha de agua de lluvia (*rainwater harvesting*) y de larga pendiente. Sus principales características son:

- Se recoge el agua que fluye por la superficie del suelo.
- La escorrentía recogida se almacena en el perfil del suelo.
- El área de captación tiene una longitud de 30 a 200 m.
- La relación área de impluvio/área de recepción es normalmente de 2:1 a 10:1.

Como ejemplos pueden mencionarse los caballones trapezoidales y los caballones de piedra según curvas de nivel, ambos indicados para cultivos agrícolas.

3) Cosechas de aguas de inundación (*floodwater farming*).- Son una técnica de cosecha desde corrientes de agua (*floodwater harvesting*). Sus principales características son:

- El flujo de un arroyo efímero es recogido por desviación o por extensión dentro del lecho o del fondo del valle.
- La escorrentía se almacena en el perfil del suelo.
- El área de captación es grande (puede llegar a ser de varios kilómetros).
- La relación área de impluvio/área de recepción está por encima de 10:1.

Los principales sistemas que se pueden citar como ejemplos son los riegos de boquera, los diques permeables de roca y los caballones de extensión de agua, que se emplean para cultivos agrícolas.

2.2. PARTES DE UN SISTEMA DE COSECHA DE AGUA

Los sistemas de cosechas de agua constan de dos zonas bien diferenciadas:

1) Área de captación, área de impluvio o colectora.- Que recoge y concentra la escorrentía superficial.

2) Área de recepción o de cultivo.- En la que el agua se almacena, bien en el perfil del suelo (lo que sucede en el denominado “*runoff farming*” para la implantación de cultivos o árboles, como se observa en la figura I.2) o en depósitos creados al efecto, si se trata de abastecer de agua a personas o animales (aljibes o alchubes).

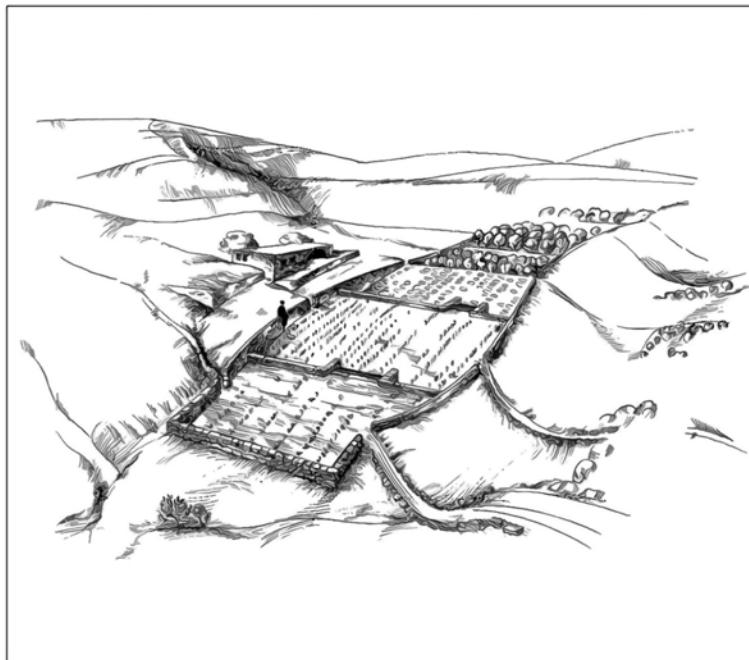


Figura I.2. *Runoff farming* en Avdat Farm, desierto de Negev (Israel) (Evenari, 1987)

2.3. INDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA

El área de impluvio, para conseguir que el sistema sea eficaz, debe ser lo más impermeable posible, para lo cual puede tratarse de diversas formas (véase la tabla I.1). El objetivo consiste, según Boers & Ben-Asher (1982), en reducir el almacenamiento superficial de agua y la capacidad de infiltración del suelo, parámetros que determinan la eficiencia de escorrentía, para intentar que llegue al área de recepción la mayor cantidad de agua posible. Los métodos ensayados hasta la fecha son:

a) Manejo de la vegetación.- Su principal efecto es reducir la capacidad de infiltración, y se aplica generalmente de forma conjunta con tratamientos de la superficie del suelo (Boers & Ben-Asher, 1982).

b) Tratamiento de la superficie del suelo.- Se eliminan las piedras y se alisa y compacta el terreno. Su principal efecto es reducir el almacenamiento superficial de agua (Boers & Ben-Asher, 1982). En algunas ocasiones se llega a modificar de forma importante la topografía del área de captación, como ocurre en el oeste de Australia con los denominados “*roaded*” (Frasier, 1994). Consisten en unos caballones

paralelos de tierra desnuda y compactada (“roads”), construidos de forma que la escorrentía fluya sin que cause erosión.

c) Tratamiento químico.- La aplicación de determinados productos químicos en la superficie del suelo disminuyen la capacidad de infiltración del mismo, como ocurre con materiales bituminosos o asfálticos (Frasier, 1994).

Otro tipo de modificación de las características químicas del suelo consiste en los repelentes químicos, que crean una superficie hidrófoba. Estos materiales no cambian la porosidad del suelo pero sí las características de tensión entre el agua y las partículas del suelo. Los repelentes más ampliamente empleados son las sales de sodio y la parafina (Frasier, 1994).

También es efectivo para los fines perseguidos dispersar las arcillas del suelo con sal común. Al añadir al suelo NaCl, las arcillas se dispersan tapando los poros y reduciendo la permeabilidad (Frasier, 1994).

Una solución más drástica aún es la de colocar una cubierta impermeable sobre el terreno. Existen muchos tipos de materiales plásticos y de otro tipo que ya han sido probados, como láminas de plástico, membranas de tela asfáltica, hormigón y láminas de metal o de goma artificial. El principal inconveniente es el de los daños originados por el viento y la luz solar (Frasier, 1994).

Tabla I.1. Principales tratamientos empleados para incrementar la escorrentía en el área de captación y su influencia en la eficiencia de escorrentía; según Frasier (1994)

TRATAMIENTO	EFICIENCIA DE ESCORRENTÍA (%)	VIDA ESTIMADA (AÑOS)
Modificaciones de topografía Nivelación y limpieza del terreno	20-35	5-10
Modificaciones del suelo Sales de sodio Repelentes al agua, parafina	50-80 60-95	5-10 5-8
Cubierta impermeable Cubiertas de grava Membranas de tela asfáltica Hormigón, láminas de metal, goma	75-95 85-95 60-95	10-20 10-20 10-20

Cuando se trata de una repoblación forestal, la impermeabilización del área de impluvio por los métodos hasta ahora explicados es, en muchos casos, contraproducente. En el medio forestal el área de impluvio tiene la función de generar escorrentía sólo de forma circunstancial, porque el agua infiltrada en esta zona ayudará a la restauración de la ladera degradada, por lo que debe ser tenida en cuenta e incluso incentivada (Martínez de Azagra, 1995b).

3. TÉCNICAS DE COSECHAS DE AGUA

Existen un gran número de técnicas de recolección de agua que están siendo utilizadas en las regiones áridas y semiáridas de todo el mundo. Siegert (1994) hace una clasificación de las mismas y propone algunos criterios para seleccionar la más adecuada (véanse las figuras I.3 y I.4). Un cuadro resumen de las técnicas se expone en la tabla I.2.

Las técnicas de cosechas de agua más conocidas y empleadas las describen con detalle Critchley & Siegert (1991), y son:

- Microcuenca *Negarim*
- Caballones según curvas de nivel para árboles
- Caballones semicirculares
- Caballones según curvas de nivel para cultivos herbáceos
- Caballones trapezoidales
- Caballones de piedras según curvas de nivel
- Diques permeables de roca
- Caballones de extensión de agua

A continuación, se realiza una síntesis de lo expuesto por los mencionados autores sobre estas ocho técnicas, a las que se añaden algunas de las que describen Morales (1969), Roose (1994), Al-Labadi (1994), Achouri (1994), Tobbi (1994), Oweis *et al.* (1999) y Ponce *et al.* (2003), entre otros.

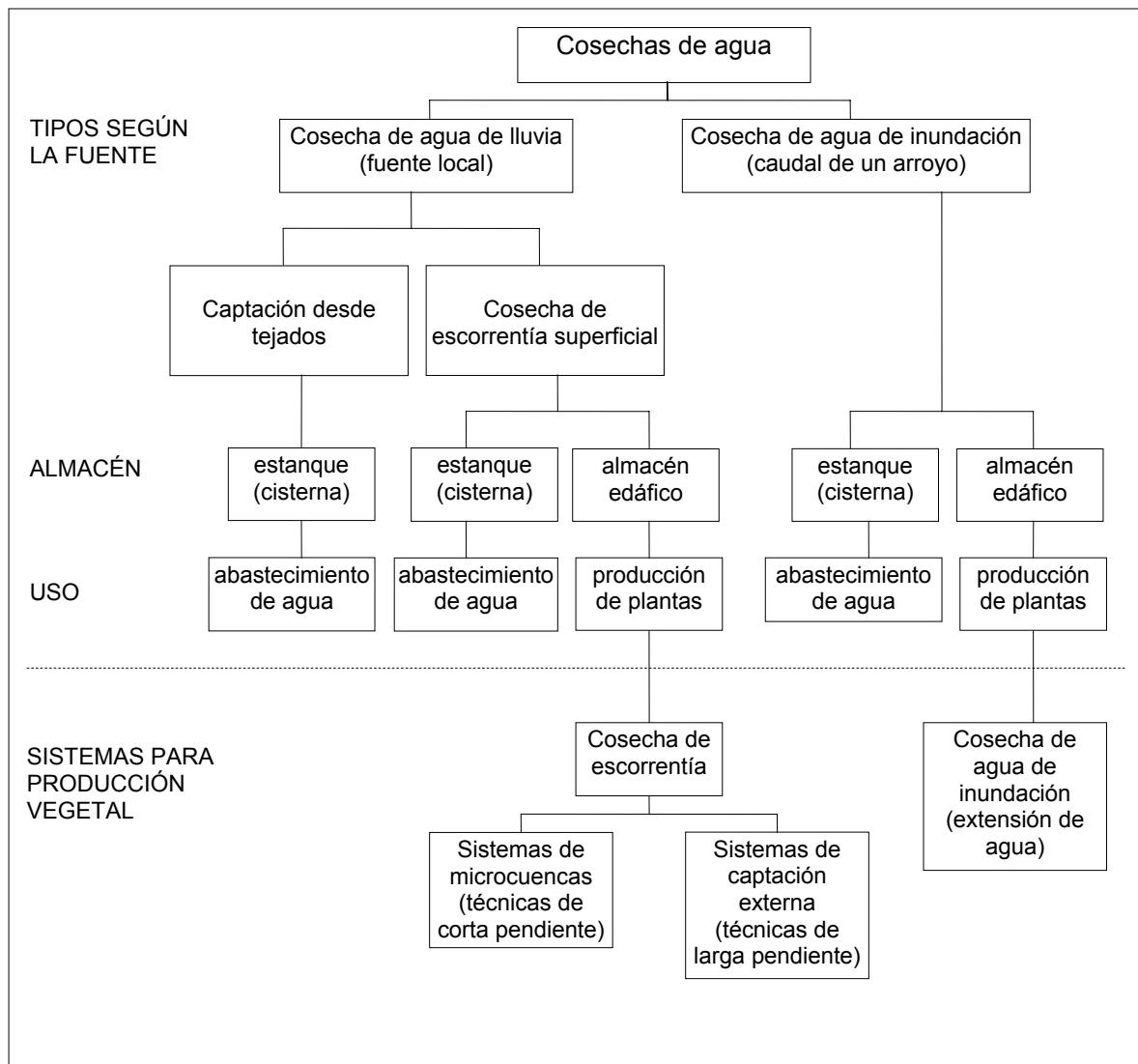


Figura I.3. Clasificación de las técnicas de recolección de agua; según Siegert (1994)

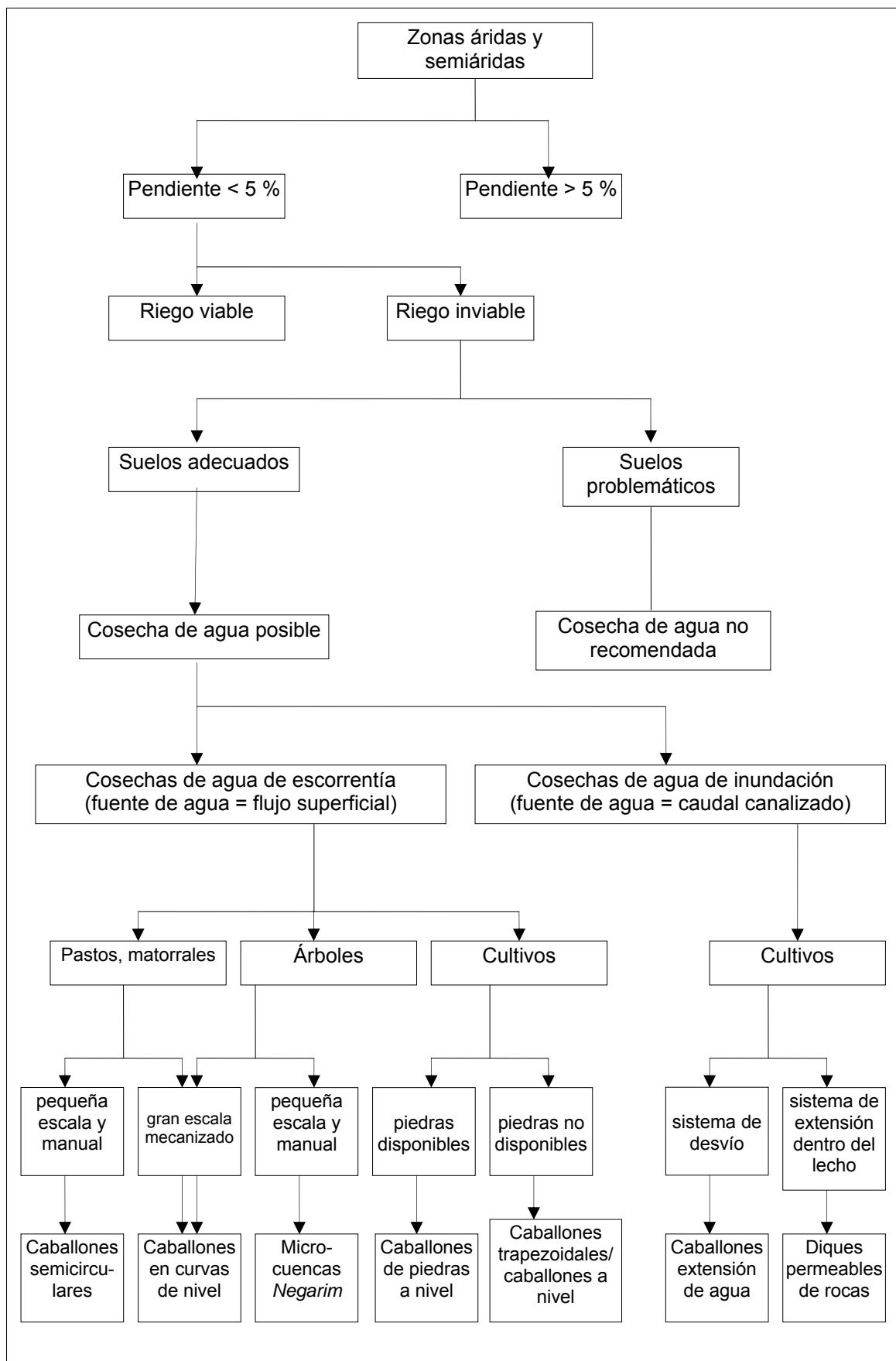


Figura I.4. Selección del sistema de cosecha de agua; según Siegert (1994)

Tabla I.2. Cuadro resumen de técnicas de cosechas de agua; según Critchley & Siegert (1991)

TÉCNICA	CLASIFICACIÓN	USOS	DESCRIPCIÓN	LUGAR ADECUADO	LIMITACIONES	CROQUIS
MICROCUENAS <i>NEGARIM</i> (<i>Negarim microcatchments</i>)	Microcuenca	Árboles y pastos	Rejilla de forma romboidal o "V" formadas por pequeños caballones de tierra con hoyos de infiltración	Para plantación de árboles donde el terreno es quebrado o hay pocos árboles plantados	Difícil de mecanizar, por tanto limitado a pequeña escala. Difícil cultivar entre líneas de árboles	
CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA ÁRBOLES (<i>Contour bunds</i>)	Microcuenca	Árboles y pastos	Caballones de tierra según curvas de nivel cada 5 ó 10 m con surco encima y bandas perpendiculares	Para plantación de árboles a gran escala, especialmente mecanizada	No adecuada para terreno demasiado quebrado	
CABALLONES SEMICIRCULARES (<i>Semicircular bunds</i>)	Microcuenca	Pastos, matorrales, árboles	Caballones de tierra de forma semicircular, según curvas de nivel. En series escalonadas de caballones.	Para resembrar pastos, forrajeras o plantación de árboles en terrenos degradados	No puede mecanizarse por lo que está limitado a zonas con suficiente mano de obra	
CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA CULTIVOS (<i>Contour ridges</i>)	Microcuenca	Cultivos	Pequeños caballones de tierra según curvas de nivel separados 1,5-3 m con surcos encima y bandas perpendiculares	Cultivos en zonas semiáridas especialmente con suelos fértilles y fáciles de trabajar	Requiere nueva técnica de preparación del terreno y plantación, por lo que puede tener problemas de aceptación	
CABALLONES TRAPEZOIDALES (<i>Trapezoidal bunds</i>)	Cuenca externa	Cultivos	Caballones de tierra de forma trapezoidal que captura la escorrentía desde una cuenca externa y desbordando por unos vertederos	Adecuado (en gran variedad de diseños) para cultivos en zonas áridas y semiáridas	Labor intensiva para escorrentías de diferentes cuantías	
CABALLONES DE PIEDRA SEGÚN CURVAS DE NIVEL (<i>Contour stone bunds</i>)	Cuenca externa	Cultivos	Caballones de pequeñas piedras según curvas de nivel y espaciadas 15-35 m, que ralentizan y filtran la escorrentía	Sistema versátil para cultivos en gran variedad de situaciones. Fácil de construir por agricultores de pocos recursos	Sólo posible donde haya abundantes piedras sueltas	
DIQUES PERMEABLES DE ROCAS (<i>Permeable rocks dams</i>)	Técnica de inundación de tierras	Cultivos	Represas de roca, bajas y largas, a través de valles que frenan y dispersan el agua de inundación, también sirven para estabilizar barrancos	Adecuado en valles de pendiente suave que empiecen a abarrancarse y donde se requiera una mejor dispersión del agua	En sitios específicos y necesidad de gran cantidad de piedras o transportarlas de otros sitios	
CABALLONES DE EXTENSIÓN DE AGUA (<i>Water spreading bunds</i>)	Técnica de inundación de tierras	Cultivos, pastos, matorrales	Caballones de tierra colocados a lo largo de la pendiente, con forma de "L", que dispersan y desvían el agua de inundación	Para zonas áridas donde el agua es desviado desde los cauces hasta cultivos o forrajes	No recoge mucho agua. Mantenimiento necesario en etapas tempranas después de la construcción	

3.1. MICROCUENCAS NEGARIM (NEGARIM MICROCATCHMENTS, MICRO-BASSINS)

3.1.1. Antecedentes

Las microcuenas *Negarim* son sistematizaciones con forma romboidal rodeadas por pequeños caballones de tierra con un hoyo de infiltración en el vértice inferior de cada una. La escorrentía es recogida por la cuenca y almacenada en el hoyo de infiltración. Las microcuenas se usan principalmente para la implantación de árboles y arbustos, siendo apropiadas para plantaciones a pequeña escala. Simultáneamente aportan cosechas de agua para los árboles y conservan el suelo.

Aunque las primeras noticias de microcuenas provienen del sur de Túnez, la técnica ha sido desarrollada en el desierto Negev de Israel. La palabra “*Negarim*” deriva del hebreo “*neger*”, que significa escorrentía. Las microcuenas *Negarim* son la forma más conocida de cosechas de agua.

Israel es el país que más y mejor ha desarrollado las microcuenas *Negarim*, localizándolas en fincas de investigación en el citado desierto donde las precipitaciones son inferiores a 100-150 mm al año. No obstante, la técnica y sus variantes son ampliamente utilizadas en otras áreas semiáridas y áridas, especialmente en el norte de África y en la zona subsahariana.

3.1.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Las microcuenas principalmente son utilizadas para la implantación de árboles en zonas áridas y semiáridas, con precipitaciones que pueden ser inferiores a 150 mm anuales. Los suelos deben tener una profundidad suficiente para que pueda asegurarse un adecuado desarrollo del sistema radical y el almacenaje del agua recogida. Las pendientes recomendadas, en condiciones normales, deben ser menores del 5 %.

b) Configuración general.- Cada microcuenca consiste en un área de recogida y un hoyo de infiltración (área cultivada). La forma de cada unidad es normalmente cuadrada (figura I.5), pero la apariencia desde arriba es una red romboidal con hoyos de infiltración en los ángulos inferiores (figura I.6).

c) Limitaciones.- Las microcuenas *Negarim* están adaptadas a la construcción manual, por lo que no pueden ser fácilmente mecanizadas, a excepción de la apertura del hoyo. Una vez que los árboles están plantados, no es posible operar y cultivar con maquinaria entre las líneas de árboles.

d) Tamaño de microcuenca.- El área de cada unidad se determina en base al cálculo o estimación de los requerimientos hídricos de la planta. El tamaño de la microcuenca normalmente varía entre 10 y 100 m², dependiendo de la especie plantada; pero tamaños mayores son también posibles, particularmente cuando en la misma unidad se planta más de un árbol.

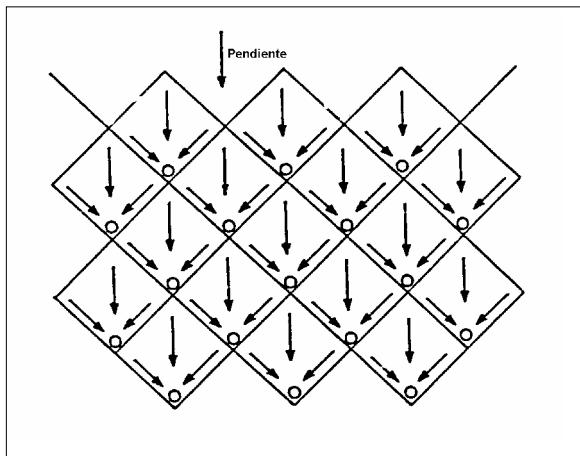


Figura I.5. Configuración general de las microcuenca Negarim; según Critchley & Siegert (1991)

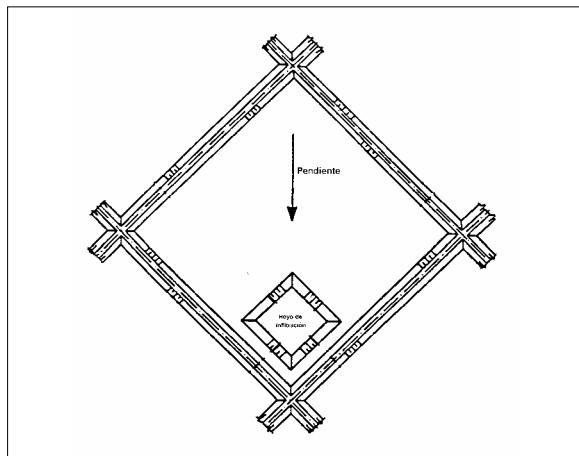


Figura I.6. Detalle de una unidad de microcuenca Negarim; según Critchley & Siegert (1991)

e) Diseño de caballones.- La altura del caballón depende, en primer lugar, de la pendiente y del tamaño de la microcuenca (véase la tabla I.3). Se recomienda construir caballones con una altura superior a 25 cm para evitar el riesgo de desbordamiento y los daños consiguientes que esto acarrearía. En aquellos lugares donde la pendiente supere el 2 %, la altura del caballón cerca del hoyo de infiltración debe ser incrementada.

Tabla I.3. Altura del caballón (cm) en función de la pendiente; según Critchley & Siegert (1991)

TAMAÑO UNIDAD (m)	PENDIENTE			
	2 %	3 %	4 %	5 %
3 x 3	Altura del caballón superior a 25 cm			
4 x 4				30
5 x 5			30	35
6 x 6			35	45
8 x 8		35	45	55
10 x 12	30	45	55	
12 x 12	35	50		No recomendado
15 x 15	45			

La anchura del caballón en su parte superior debe ser mayor de 25 cm y sus taludes deben tener unas pendientes por la parte superior de 1:1, para reducir la erosión del suelo durante los aguaceros. Se recomienda, si fuera posible, que los caballones se cubran de herbáceas, para protegerlos de la erosión.

f) Tamaño del hoyo de infiltración.- En la tabla I.4 se dan algunas recomendaciones al respecto. En cualquier caso, no debe superarse una profundidad de 40 cm, para evitar pérdidas de agua por percolación profunda y para reducir el trabajo de excavación. El suelo excavado debe ser usado para la construcción de los caballones.

Tabla I.4. Características constructivas de las microcuenca *Negarim*; según Critchley & Siegert (1991)

TAMAÑO DE LA UNIDAD lados (m) área (m ²)	TAMAÑO DEL HOYO DE INFILTRACIÓN lados (m) profundidad (m)	PENDIENTES IDÓNEAS PARA ALTURA DE CABALLÓN DE 25 cm *	UNIDADES/ha
3 x 3 = 9	1,4 x 1,4 x 0,4	≤ 5 %	1.110
4 x 4 = 16	1,6 x 1,6 x 0,4	≤ 4 %	625
5 x 5 = 25	1,8 x 1,8 x 0,4	≤ 3 %	400
6 x 6 = 36	1,9 x 1,9 x 0,4	≤ 3 %	275
8 x 8 = 64	2,2 x 2,2 x 0,4	≤ 2 %	155
10 x 10 = 100	2,5 x 2,5 x 0,4	≤ 1 %	100
12 x 12 = 144	2,8 x 2,8 x 0,4	≤ 1 %	70
15 x 15 = 225	3,0 x 3,0 x 0,4	≤ 1 %	45

* Estas pendientes corresponden a un caballón de 25 cm de altura. Con pendientes mayores, debe construirse un caballón relativamente más alto en la parte inferior y más bajo en la parte superior.

g) Variaciones de diseño.- Una variante muy común es construir microcuenca semicirculares o en forma de "V" (figura I.7). La ventaja es que el agua sobrante puede fluir con mayor facilidad por los extremos de los caballones, aunque la capacidad de almacenamiento sea menor.

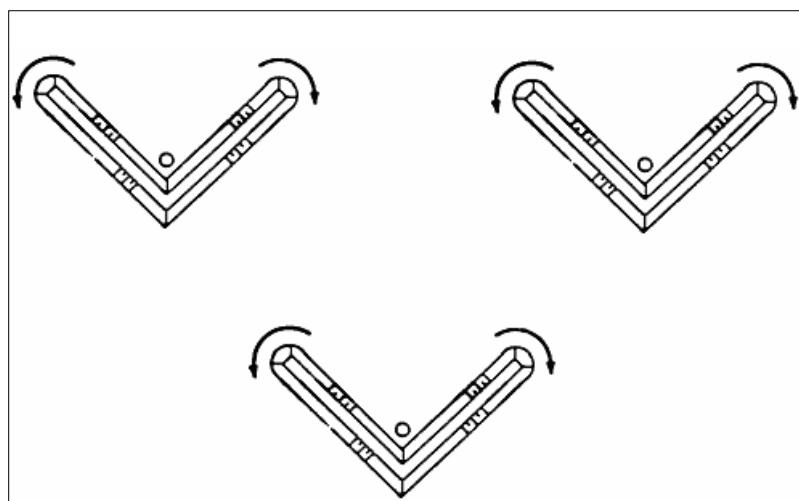


Figura I.7. Microcuenca en forma de "V" (según Critchley & Siegert, 1991)

3.1.3. Aplicación forestal

Las microcuenca están especialmente diseñadas para la plantación de árboles (véase la figura I.8). Aunque en un primer momento se utilizaron para la instalación de frutales, con amplias densidades y grandes áreas de impluvio, también han sido empleadas para el establecimiento de especies forestales con menores espaciamientos. En España la técnica fue introducida por Fernández Yuste (1989) y

De Simón (1990) pero sólo a nivel teórico y experimental, puesto que no se han realizado repoblaciones masivas con ella.

El principal inconveniente de aplicación no es técnico, sino económico. Aunque la realización de los hoyos es perfectamente mecanizable, la construcción del caballón que define las microcuencas sólo puede hacerse de forma manual, lo que encarece sustancialmente la obra. A pesar de ello, este incremento en los costes queda plenamente justificado en zonas áridas, en base a la economía del agua.

En cuanto a las pendientes mencionadas anteriormente, citadas en la bibliografía por su utilización con éxito en numerosos casos, son indudablemente demasiado suaves. No existe ningún inconveniente para la aplicación de esta técnica con pendientes mayores, con las únicas limitaciones impuestas por el acceso y trabajo de la maquinaria y los operarios.



Figura I.8. Microcuencas *Negarim* con árboles plantados (Rocheleau et al., 1988)

3.2. CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA ÁRBOLES (CONTOUR BUNDS FOR TREES)

3.2.1. Antecedentes

Los caballones según curvas de nivel son una forma más simplificada de microcuencas. Es una técnica adecuada para su establecimiento a gran escala y su construcción puede ser mecanizada. Como su nombre indica, los caballones siguen las curvas de nivel, creando un espacio cerrado en la ladera. Proveyéndolos de pequeñas tiras o bandas de tierra perpendiculares a los caballones, el sistema es dividido en microcuencas individuales (figuras I.9 y I.10).

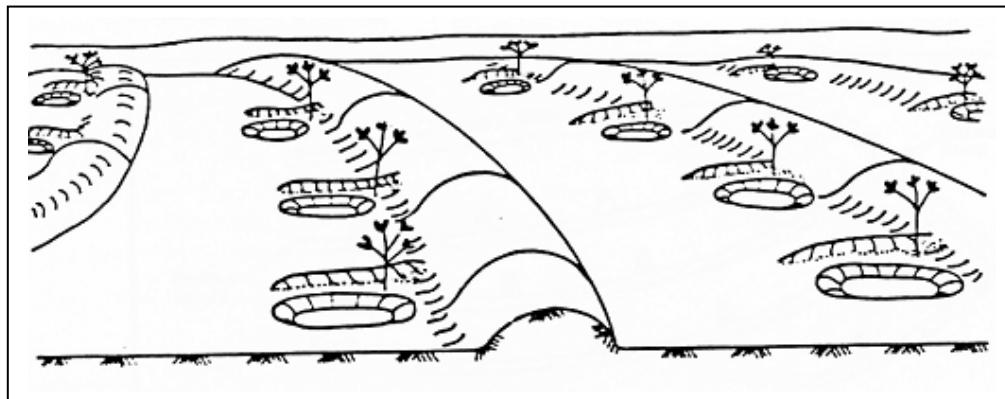


Figura I.9. Caballones según curvas de nivel para árboles (Critchley & Siegert, 1991)

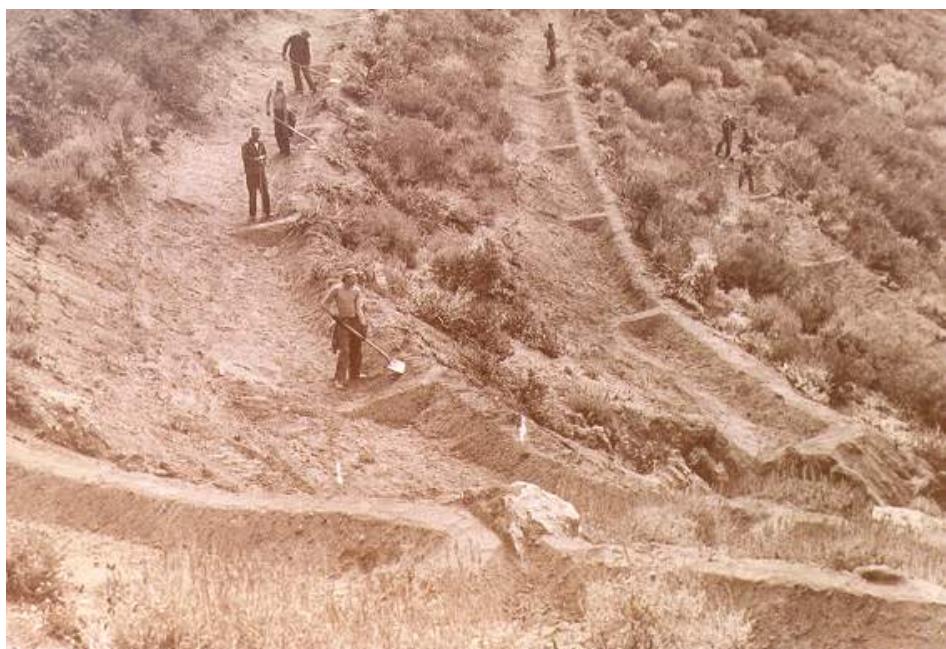


Figura I.10. Construcción de caballones según curvas de nivel cerca de Farmington (Utah, Estados Unidos) por el U.S. Forest Service en 1933 (Ponce, 2003b)

Este sistema, mecanizado o no, es más económico que las microcuencas *Negarim*, especialmente si se instala en grandes superficies, porque el movimiento de tierras es menor. Una segunda ventaja, especialmente en regiones en vías de desarrollo, es su idoneidad para el cultivo o implantación de pastos entre caballones. Como en otras formas de microcuencas, la producción de escorrentía es elevada y no hay pérdidas fuera del sistema.

Los caballones según curvas de nivel no son todavía tan comunes como las microcuencas *Negarim*. Ejemplos de su aplicación existen en el distrito de Baringo (Kenia).

3.2.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Este tipo de caballones se aplica en zonas áridas y semiáridas, con precipitaciones que pueden ir desde los 200 a los 750 mm. Las condiciones recomendables en cuanto a suelo y pendiente son las mismas que en el caso anterior, pero hay que añadir que el terreno debe ser liso, sin barrancos ni cárcavas.

b) Configuración general.- Consiste en una serie de caballones de tierra paralelos o casi paralelos, aproximadamente siguiendo curvas de nivel, espaciados entre sí 5 ó 10 m (véase la figura I.11).

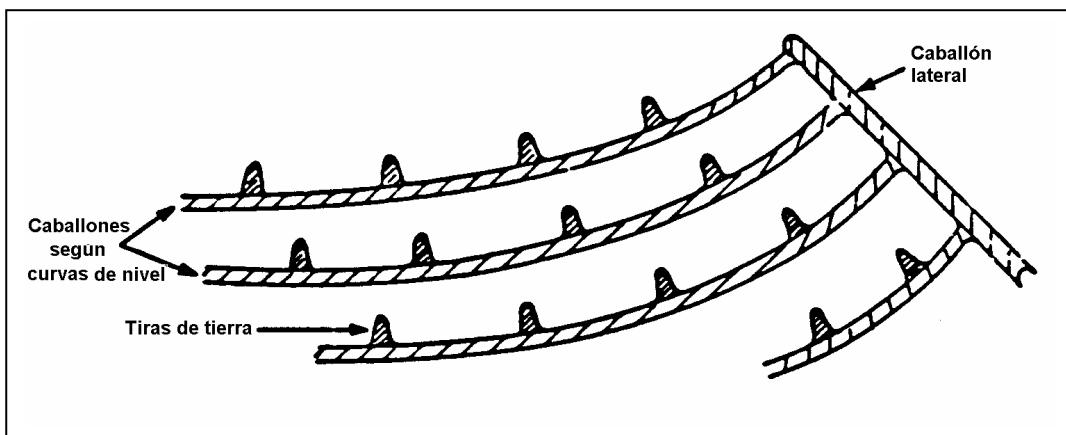


Figura I.11. Configuración general de los caballones según curvas de nivel para árboles (Critchley & Siegert, 1991)

d) Tamaño de la unidad.- El tamaño de la microcuenca se estima de la misma forma que en las microcuenca *Negarim*. Sin embargo este sistema es más flexible, porque el tamaño de microcuenca puede ser fácilmente alterado, añadiendo o cambiando de lugar unas tiras de tierra perpendiculares dentro del espacio fijado por los caballones. Los tamaños habituales están entre 10 y 50 m² por cada árbol.

e) Diseño del caballón y del hoyo de infiltración.- La altura de los caballones es variable, entre 20 y 40 cm, dependiendo de la pendiente. Como los caballones se realizan habitualmente de manera mecanizada, la forma del caballón depende del tipo de apero utilizado (que puede ser un arado de discos o de vertederas). Se recomienda que la altura del caballón no sea inferior a 25 cm y que la anchura en la base sea mayor de 75 cm.

Los caballones deben espaciarse unos 5 ó 10 m. Las tiras perpendiculares deben ser mayores de 2 m de longitud y estar separadas entre sí de 2 a 10 m, definiendo así el tamaño exacto de cada microcuenca. Se recomienda que la distancia entre caballones sea de 10 m con pendientes superiores al 0,5 % y 5 m cuando las pendientes sean muy fuertes. Un tamaño común de microcuenca para árboles es de 25 m²; que corresponde a un espaciamiento entre caballones de 10 m y entre tiras perpendiculares de 2,5 m, ó 5 m entre caballones y 5 m entre tiras (véase la tabla I.5).

El suelo excavado en el hoyo de infiltración debe utilizarse para formar las mencionadas tiras. El hoyo se excava en la unión del caballón con la tira perpendicular. Un tamaño de hoyo de 80 x 80 x 40 cm suele ser suficiente.

Tabla I.5. Características constructivas de los caballones según curvas de nivel para árboles; según Critchley & Siegert (1991)

TAMAÑO DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA			UNIDADES/ha
Espaciamiento entre caballones (m)	Espaciamiento de tiras perpendiculares (m)	Área (m ²)	
5	2	10	1.000
5	5	25	400
5	10	50	200
10	2,5	25	400
10	5	50	200

3.2.3. Aplicación forestal

La técnica descrita puede asimilarse a preparaciones del suelo tales como acaballonado con desfonde, u otras, utilizados con mucha asiduidad en España, como se explica en el anexo II. Experiencias satisfactorias en la plantación de árboles con este método se han realizado en Baringo (Kenia), donde se han instalado especies de los géneros *Acacia*, *Prosopis* y *Combretum* (Critchley & Siegert, 1991).

3.3. CABALLONES SEMICIRCULARES (SEMI-CIRCULAR BUNDS, DEMI-LUNES)

3.3.1. Antecedentes

Los caballones semicirculares son bancales de tierra de forma semicircular con los extremos situados sobre curvas de nivel (figura I.13). Son utilizados principalmente para la rehabilitación de terrenos degradados y para la producción de pastos. También puede emplearse esta técnica para la plantación de árboles y arbustos y, en algunos casos, para cultivos.

Los caballones semicirculares (también llamados “medias-lunas”, o “demi-lunes” en los países francófonos africanos) se recomiendan como un método fácil y rápido de mejorar terrenos degradados en zonas semiáridas. Sorprendentemente, esta técnica nunca ha sido empleada de forma tradicional.

3.3.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Este sistema puede emplearse en zonas áridas y semiáridas, con precipitaciones entre 200 y 750 mm anuales. Los suelos deben tener

cierta profundidad y la pendiente recomendada es inferior al 5 %. Así mismo, requiere una topografía uniforme.

Como se muestra en la figura I.12, existen dos diseños diferentes de caballones semicirculares. El tipo a representa pequeñas estructuras cerradas, adecuadas para áreas semiáridas más húmedas con pendientes bajas. El diseño b corresponde a caballones grandes y ampliamente espaciados, más adecuados para áreas secas.

b) Configuración general.- Los dos tipos de diseño antes mencionados se diferencian en el tamaño de la estructura y en su trazado. El diseño a tiene caballones de 6 m de radio y el diseño b de 20 m. En ambos diseños los caballones semicirculares se construyen en líneas, alternativamente, con producción de escorrentía entre las estructuras.

El diseño a es una técnica de corta pendiente, y no está pensada para utilizar la escorrentía de fuera del área de tratamiento, ni para desaguar desbordamientos. El diseño b es también una técnica de corta pendiente, pero puede alojar escorrentía externa. El desbordamiento se produce por los extremos del caballón, que se sitúan sobre curvas de nivel.

c) Relación $AI:AR$.- Generalmente se recomiendan relaciones 3:1 cuando se trata de la recuperación de terrenos degradados o de la producción de pastos. Relaciones mayores requerirían estructuras mayores y más caras.

En el diseño a, la relación es de 1,4:1 y no requiere una provisión para desbordamientos (sistematización secundaria). El diseño b tiene una relación 3:1, y se recomienda una provisión para desbordamiento alrededor de los extremos, aunque la probabilidad de que ocurra es pequeña. Una relación $AI:AR$ mayor es posible, pero nunca se debe exceder la proporción 5:1.

d) Diseño del caballón

En la tabla I.6 se resumen las características constructivas de esta técnica, en sus dos modalidades.

Diseño a

Este diseño, válido para pendientes no muy pronunciadas (alrededor del 1 %), consiste en una serie de pequeños caballones semicirculares con radio de 6 m. Cada caballón tiene una sección transversal constante, con una longitud de 19 m. La altura de caballón recomendada es de 25 cm, con pendientes del talud de 1:1, lo que da una anchura en la base de 75 cm y una anchura en la parte alta de 25 cm.

Los extremos de cada caballón se sitúan en la curva de nivel, y la distancia entre los extremos de caballones adyacentes en el mismo nivel es de 3 m. Los caballones del nivel inferior se sitúan alternos con los del superior, lo que permite la recogida de escorrentía entre caballones. La distancia entre dos niveles, desde la base de los caballones de una línea hasta los extremos de los caballones de la inferior, es de 3 m. Con este espaciamiento, se construyen unos 70 ó 75 caballones por hectárea.

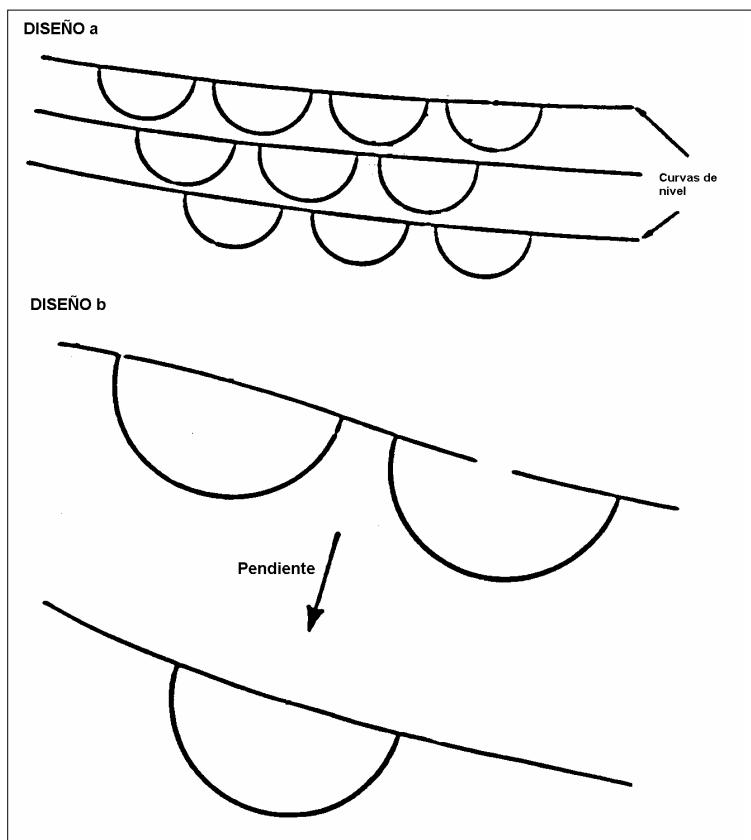


Figura I.12. Caballones semicirculares, en sus dos variantes de diseño; según Critchley & Siegert (1991)



Figura I.13. Caballones semicirculares después de un aguacero (FAO, 1994)

Diseño b

En este caso el radio de los semicírculos es de 20 m y la sección transversal del caballón cambia a lo largo de su longitud. En los extremos la altura del caballón es sólo de 10 cm, pero la altura va en aumento hasta 50 cm en la base, 10 cm en la parte alta y taludes de pendiente 3:1. En la parte inferior del caballón, las anchuras son 70 cm en la base y 3 m en coronación.

Como en el diseño a, los caballones deben disponerse alternos. Debido a las grandes dimensiones de los caballones, sólo entran cuatro estructuras por hectárea. La distancia entre extremos de dos estructuras adyacentes en un nivel es de 10 m, mientras que se recomiendan separaciones de 30 m entre la base de la estructura superior y los extremos de la inferior.

Como se ha dicho, el radio y las distancias pueden ser incrementadas o disminuidas de acuerdo a la relación $AI:AR$ elegida. El diseño b es recomendado en pendientes por encima del 2 %; para pendientes mayores de esta cifra se aconsejan radios menores. Por ejemplo, en una pendiente de 4 %, el radio debe ser reducido a 10 m y la distancia entre dos niveles adyacentes a 15 m, mientras que los extremos de dos estructuras adyacentes deben estar separados 5 m en vez de 10 m. El número de estructuras por hectárea es 16 en este caso, manteniendo la relación $AI:AR$ en 3:1.

Para la plantación de árboles suelen utilizarse caballones semicirculares de radios pequeños. En estos casos se recomienda un radio de 2 a 3 m, con caballones de unos 25 cm de altura.

En Ouramiza (Níger) se han construido medias-lunas con un caballón de 20 cm de altura, 6 m^2 de superficie cultivada y 16 m^2 de área de impluvio. Las medias-lunas tienen un radio de 2 m, la distancia entre estructuras dentro de la misma línea es de 4 m, idéntica a la distancia de separación entre líneas (Roose, 1994).

Tabla I.6. Características constructivas de los caballones semicirculares; según Critchley & Siegert (1991)

PENDIENTE DEL TERRENO	RADIO (m)	LONGITUD DE CABALLÓN (m)	ÁREA TRATADA POR CABALLÓN (m^2)	CABALLONES/ha
Alrededor del 1 % (Diseño a)	6	19	57	73
2 % (Diseño b)	20	63	630	4
4 % (Diseño b)	10	31	160	16

3.3.3. Aplicación forestal

La plantación de árboles en medias-lunas tiene un precedente positivo en la provincia de Tahoua (Níger). Se han plantado, por ejemplo, almendros, albaricoqueros, melocotoneros, pistachos, olivos, granados y arbustos para ramoneo (estos últimos en el noroeste de Siria) (Prinz, 2001). En nuestro país, García Salmerón (1995) cita esta técnica, pero nunca ha sido empleada en repoblaciones forestales.

Independientemente de la bibliografía, este método de preparación del suelo puede tener una gran aplicación en repoblaciones en zonas semiáridas. Sin embargo, convendrá adaptar las características de las estructuras descritas hasta ahora, especialmente en lo que se refiere a su tamaño, que es necesario reducir para poder aumentar la densidad de plantación. Por otro lado, para reducir costes, es preciso crear un apero adaptable a un tractor que pueda perfilar mecanizadamente los caballones (véase la figura I.14).



Figura I.14. Caballones semicirculares construidas con el apero “dolphin” (FAO, 1994)

3.4. CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA CULTIVOS HERBÁCEOS (CONTOUR RIDGES FOR CROPS)

3.4.1. Antecedentes

Los caballones según curvas de nivel para cultivos herbáceos, a veces llamados surcos según curvas de nivel, son utilizados para el establecimiento de cultivos agrícolas. Los caballones siguen una misma cota del terreno, y se disponen separados entre sí 1 ó 2 m. La escorrentía se recoge desde el espacio no cultivado entre caballones y se almacena en un surco realizado en la misma base de los caballones. Los cultivos se implantan a los lados del surco. La construcción de este sistema es sencilla, ya sea manual o mecanizada.

Los caballones según curvas de nivel para cultivos no son todavía una técnica muy extendida, aunque ha sido probada con éxito en varios proyectos en el continente africano.

3.4.2. Detalles técnicos

- a) Condiciones de aplicación.- La precipitación anual debe estar entre 350 y 750 mm. Pueden establecerse estos caballones sobre cualquier suelo idóneo para la agricultura, teniendo en cuenta que los suelos duros y compactados pueden ser un limitante a la construcción manual. Deben evitarse terrenos con cárcavas y es recomendable que la pendiente no supere el 5 %.
- b) Limitaciones.- La técnica de caballones en curvas de nivel es adecuada en zonas semiáridas con una precipitación relativamente alta, ya que la cantidad de escorrentía recogida es pequeña debido a la reducida superficie del área de captación.
- c) Configuración general.- Como puede observarse en la figura I.15, esta técnica consiste en caballones de tierra paralelos o casi paralelos según curvas de nivel, espaciados entre sí 1 ó 2 metros. El suelo es excavado y trasladado pendiente abajo para formar un caballón, y el surco creado encima del caballón recoge la escorrentía desde la banda de captación entre caballones. Se pueden construir también unas tiras o bandas de tierra cada pocos metros, para asegurar un adecuado almacenaje de escorrentía. Además, puede ser necesaria una zanja de desviación para evacuar los excedentes de escorrentía fuera del sistema.

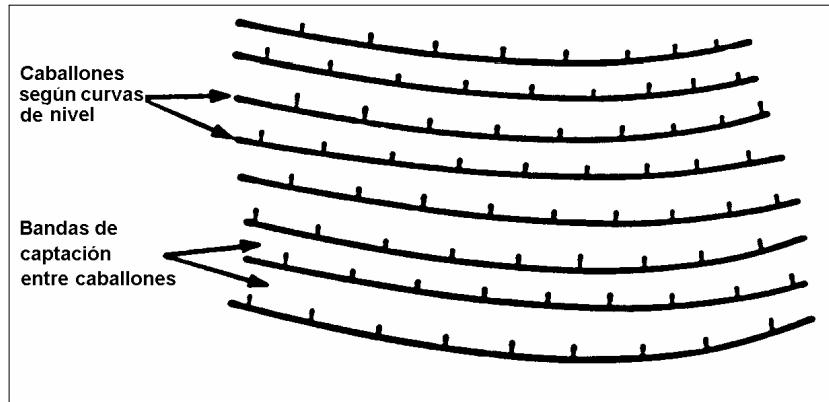


Figura I.15. Caballones según curvas de nivel para cultivos (Critchley & Siegert, 1991)

- d) Relación $AI:AR$.- El área de cultivo no es fácil de delimitar. Se suele asumir una franja de 50 cm con el surco situado en su parte central. Los cultivos agrícolas se establecen dentro de esta zona, y utilizan la escorrentía concentrada en el surco. Según esta disposición, para una distancia típica de 1,5 m entre caballones, la relación $AI:AR$ es 2:1; que implica una franja de recogida de 1 m y una franja cultivada de 0,5 m. Una distancia de 2 m entre caballones da una relación 3:1. La relación $AI:AR$ puede ser ajustada por incremento o reducción de la distancia entre caballones.

- e) Diseño del caballón.- Como único elemento de diseño de los caballones hay que fijar la altura de los mismos, para evitar en lo posible un desbordamiento de la escorrentía. Como la escorrentía se recoge sólo desde una pequeña franja entre caballones, una altura de 15 ó 20 cm suele bastar, si su separación es de 1 ó 2 m. Si

los caballones se separan más de 2 m, su altura debe ser incrementada.

f) Variaciones de diseño.- En Israel han sido desarrolladas algunas variaciones a este sistema, denominadas “*Shananim*” (bandas de escorrentía) y colectores bandeados (Shanan & Tadmor, 1979). Se trata en ambos casos de una serie de caballones anchos pero poco profundos con sus respectivos surcos, formados mediante un apero especial denominado “grada de pala” (*blade grader*). El espacio entre los caballones puede abarcar varios metros (entre 2 y 5 m en el caso de colectores bandeados).

3.4.3. Aplicación forestal

Sobre esta técnica puede afirmarse lo mismo que para los caballones según curvas de nivel para árboles. Se trata de una técnica muy interesante para la repoblación forestal, similar a los acaballonados o alomados utilizados desde hace décadas en España.

3.5. CABALLONES TRAPEZOIDALES (*TRAPEZOIDAL BUNDS*)

3.5.1. Antecedentes

Los caballones trapezoidales se utilizan para cerrar grandes áreas (mayores de 1 ha) y para guiar grandes cantidades de escorrentía que son recogidas por una zona de captación externa o de “larga pendiente”. El nombre deriva de la estructura, que tiene forma trapezoidal: un caballón base conectado a dos alas o caballones laterales que se extienden pendiente arriba con un ángulo de 135°. Como es lógico, los cultivos se instalan en el área cerrada por el caballón. Los posibles desbordamientos se descargan alrededor de los extremos de los caballones laterales.

Esta es una técnica muy tradicional en algunas partes de África. El concepto es similar al de los caballones semicirculares; en este caso tres caras de un trapecio están cerradas, mientras que la cuarta -la situada pendiente arriba- queda abierta para que la escorrentía entre en el campo. La simplicidad de diseño y construcción y el mínimo mantenimiento requerido, son las principales ventajas de esta técnica. La descripción expuesta a continuación corresponde a los caballones trapezoidales construidos en el distrito de Turkana, en el norte de Kenia.

3.5.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Pueden ser usados para el desarrollo de árboles y pastos, pero su aplicación más común es para la producción de cultivos agrícolas. La precipitación anual de la zona debe estar comprendida entre 250 y 500 mm.

El suelo debe tener buenas características estructurales y en ningún caso un alto contenido de arcillas expansibles. Esta técnica está limitada a pendientes suaves;

no obstante, la construcción de caballones trapezoidales con pendientes mayores de 1,5 % es técnicamente viable pero implica un gran volumen de movimiento de tierras.

b) Configuración general.- Cada unidad de caballones trapezoidales consiste en un caballón base conectado a dos caballones laterales o alas, que se extienden pendiente arriba con un ángulo de 135° (figura I.16). El tamaño del área cerrada depende de la pendiente y puede variar entre 0,1 y 1 ha.

Los caballones trapezoidales pueden ser construidos como unidades sencillas o en grupos. Cuando se construyen varios caballones trapezoidales agrupados, se hacen en una disposición alterna, en la que las unidades de las líneas más bajas interceptan la escorrentía que escapa de los caballones superiores.

Una distancia comúnmente utilizada entre los extremos de caballones adyacentes dentro de un nivel es de 20 m, con 30 m de espaciamiento entre los extremos del nivel de abajo y los caballones base del nivel superior. Estas dimensiones pueden variarse a criterio del diseñador, aunque siempre ha de mantenerse la distribución alterna mencionada anteriormente. No se recomienda construir más de dos niveles de caballones, ya que un tercer o cuarto nivel recibiría una escorrentía significativamente escasa.

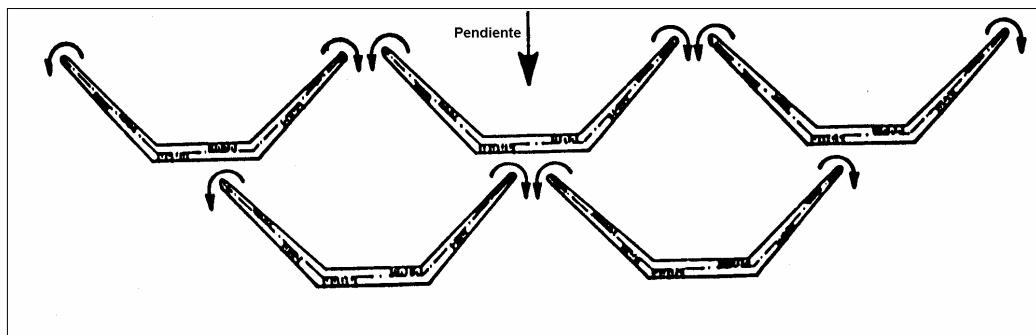


Figura I.16. Configuración general de los caballones trapezoidales (Critchley & Siegert, 1991)

c) Relación $AI:AR$.- Se calcula según los requerimientos hídricos de las plantas, como es habitual en los sistemas de recolección de agua. Sin embargo, algunas veces es más útil determinar el área y número de caballones que pueden ser cultivados en el área de captación existente.

Como todas las técnicas de cosechas de agua que se apoyan en zonas de captación externas, la relación $AI:AR$ se calcula en base a una precipitación estacional de un año pobre en lluvias. En años de elevada precipitación, y particularmente en condiciones de torrencialidad, pueden resultar dañados los caballones y los cultivos. Por ello se limita la proporción $AI:AR$ a un máximo de 10:1, aunque se han utilizado alguna vez relaciones de hasta 30:1. En el caso de que el área de captación sea grande, puede ser bueno construir una zanja de desviación, para prevenir un excesivo caudal de escorrentía. Al contrario, en situaciones donde el área de captación sea demasiado pequeña, pueden excavarse zanjas de intercepción para dirigir la

escorrentía desde zonas de captación adyacentes a nuestros caballones.

d) Diseño del caballón.- Los criterios utilizados en la región keniana de Turkana son los siguientes:

- Longitud del caballón base: 40 m
 - Ángulo entre el caballón base y los caballones laterales: 135°
 - Altura máxima del caballón: 0,6 m
 - Altura mínima del caballón (en los extremos): 0,2 m
 - Sección transversal de los caballones: 1 m de anchura en coronación y una pendiente de taludes de 4:1 (horizontal:vertical)
- e) Dimensiones.- Las dimensiones del caballón base y de los laterales que se emplean habitualmente se muestran en la tabla I.7.

Tabla I.7. Características constructivas de los caballones trapezoidales; según Critchley & Siegert (1991)

PENDIENTE (%)	LONGITUD DEL CABALLÓN BASE (m)	LONGITUD DE CABALLONES LATERALES (m)	DISTANCIA ENTRE EXTREMOS (m)	ÁREA CULTIVADA POR CABALLÓN (m ²)
0,5	40	114	200	9.600
1,0	40	57	120	3.200

f) Variaciones de diseño.- Esta es una técnica abierta a muchas modificaciones. En Sudán, por ejemplo, los caballones son de forma rectangular, con las alas extendidas pendiente arriba en ángulos rectos respecto al caballón base. En cambio, en el noroeste de Somalia se han construido caballones con forma de plátano con *bulldozer*.

3.5.3. Aplicación forestal

Los caballones trapezoidales, al igual que los semicirculares y todas sus variantes, son técnicas muy interesantes para adaptarlas a la repoblación forestal en zonas áridas y semiáridas. Se hace necesario, no obstante, la adecuación de las estructuras individuales y de los espaciamientos entre ellas, a los objetivos de las repoblaciones. Es decir, habrá que reducir el tamaño de cada estructura considerablemente, para que las densidades de plantación puedan ser mayores. También cabe la posibilidad de repoblar por bosquetes espaciados.

Así mismo, como se ha indicado para otros casos, la mecanización de estas obras es indispensable para reducir su coste.

3.6. CABALLONES DE PIEDRA SEGÚN CURVAS DE NIVEL (CONTOUR STONE BUNDS, CORDONS DE PIERRES)

3.6.1. Antecedentes

Los caballones de piedra según curvas de nivel son utilizados para frenar y filtrar la escorrentía, incrementando la infiltración y capturando sedimentos. El agua y los sedimentos recogidos se conducen a los cultivos implantados. Esta técnica es adecuada para su aplicación en pequeñas fincas y, según la disponibilidad de piedras, puede ser desarrollada de forma rápida y barata.

Construir caballones de piedras -o simplemente líneas- es una práctica tradicional en el oeste de África, fundamentalmente en Burkina Faso. Su construcción y alineamiento según curvas de nivel hace esta técnica considerablemente más efectiva. La gran ventaja de sistemas basados en piedras es que no necesitan rutas de evacuación de escorrentía, donde se concentran caudales potencialmente dañinos. El efecto de filtrado de la barrera semipermeable en toda su longitud proporciona una mejor distribución de la escorrentía que los caballones de tierra. Por otra parte, los caballones de piedra requieren mucho menos mantenimiento.

Las técnicas de acaballonado de piedras para cosechas de agua están menos extendidas que los caballones de piedras para aterrazado de laderas. En la provincia de Yatenga, en Burkina Faso, se ha desarrollado una técnica efectiva, que se ha hecho muy popular y es rápidamente aprendida por los agricultores locales.

3.6.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Esta técnica puede emplearse en zonas áridas y semiáridas, con precipitaciones anuales entre 200 y 700 mm. La pendiente del terreno debe ser preferiblemente inferior al 2 %, y debe existir una cantidad suficiente de piedras en el lugar.

b) Configuración general.- La disposición de este tipo de caballones se muestra en la figura I.17. Los espacios entre caballones varían normalmente entre 15 y 30 m, dependiendo de la disponibilidad de piedras y de las obras de construcción necesarias. No se necesitan zanjas de desviación ni rutas de evacuación de escorrentía.

c) Relación $A_l:AR$.- Ésta es una técnica que depende de una zona de captación externa. Las relaciones $A_l:AR$ se calculan por el planteamiento general de requerimientos hídricos. Puede cambiarse esta relación, si se considerase necesario, sencillamente cambiando las piedras de lugar.

d) Diseño del caballón.- Aunque unas simples líneas de piedras pueden ser parcialmente efectivas, se recomienda una altura mínima inicial de caballón de 25 cm, con una base de 35 ó 40 cm de anchura. El caballón debe ser realizado junto a una zanja poco profunda (5 ó 10 cm) a modo de cimientos, que ayuda a prevenir socavaciones por escorrentía. Es importante incorporar en la construcción de los caballones una mezcla de piedras pequeñas y grandes. Un error común es usar sólo

piedras grandes, que hacen que la escorrentía fluya a través de los huecos existentes entre ellas. El caballón debe ser construido de acuerdo al principio del “filtro inverso”, con las piedras pequeñas situadas aguas arriba de las grandes para facilitar una rápida sedimentación (figura I.18).

El espaciamiento recomendado entre caballones es de 20 m para pendientes menores de 1 % y 15 m para pendientes entre 1 y 2 %.

e) Variaciones de diseño.- Donde no haya una suficiente cantidad de piedras disponibles para formar caballones, las líneas de piedras pueden utilizarse para formar el marco de trabajo de otro sistema de cosecha de agua. Así mismo, puede implantarse inmediatamente detrás de las líneas césped u otro material vegetal, para conformar, durante un determinado periodo de tiempo, una “barrera viva”, con efecto similar al caballón de piedras.

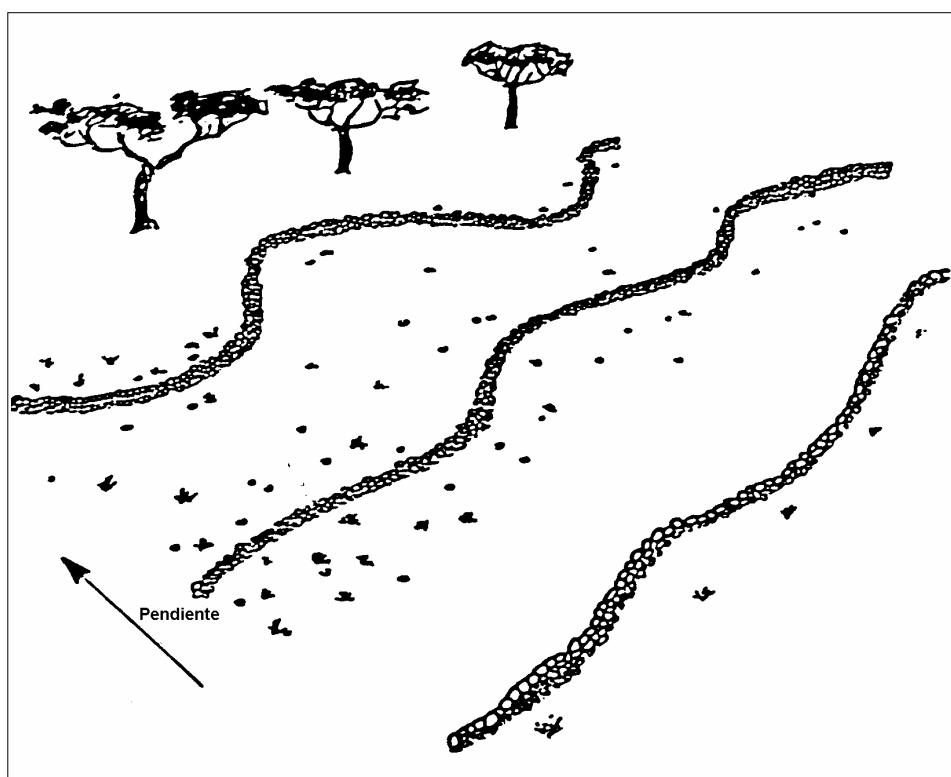


Figura I.17. Configuración general de los caballones de piedra (Critchley & Siegert, 1991)

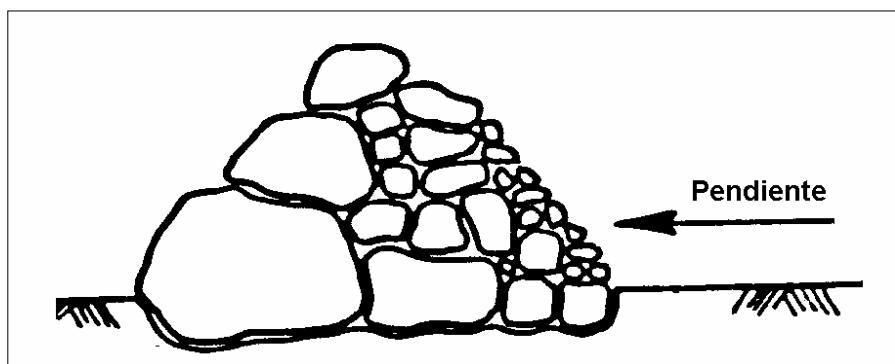


Figura I.18. Perfil de un caballón de piedras (Critchley & Siegert, 1991)

3.6.3. Aplicación forestal

Este tipo de estructuras ha sido utilizado en algunos países africanos para la plantación de especies arbóreas (en Burkina Faso, por ejemplo). En un principio puede parecer un sistema de bastante reducida aplicación en la repoblación forestal de nuestro país. Pero esta técnica puede resultar útil para reforestar laderas pedregosas, en las que con una retroexcavadora de cazo modificado se creen caballones continuos o discontinuos de piedras y tierra, con el fin de retener e infiltrar un bien tanpreciado como es el agua.

3.7. DIQUES PERMEABLES DE ROCA (PERMEABLE ROCK DAMS)

3.7.1. Antecedentes

Las presas permeables de roca son una técnica de cosechas de agua donde las escorrentías son extendidas en los fondos del valle para que puedan desarrollarse cultivos. Al mismo tiempo, se corrigen los barrancos existentes. Las estructuras típicas son diques largos y bajos que cruzan el cauce y el valle de lado a lado (véase la figura I.19). Esta técnica puede considerarse como una forma de “wadis aterrazados”, aunque este término se emplee normalmente para estructuras utilizadas en cursos de agua de zonas más áridas (figura I.20).

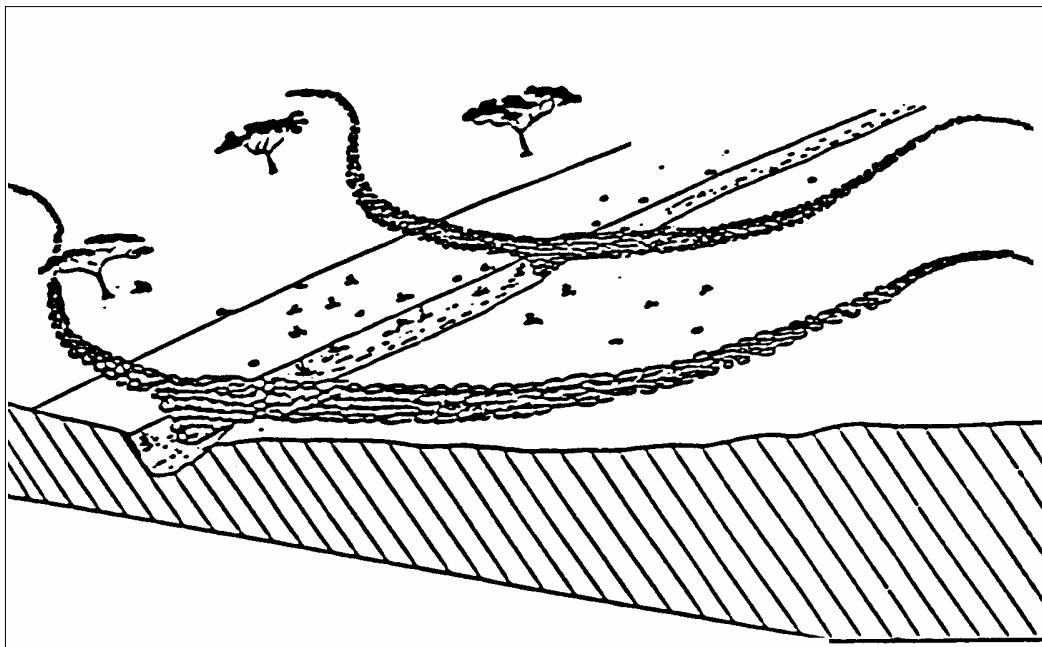


Figura I.19. Vista general de presas permeables de rocas (según Critchley & Siegert, 1991)

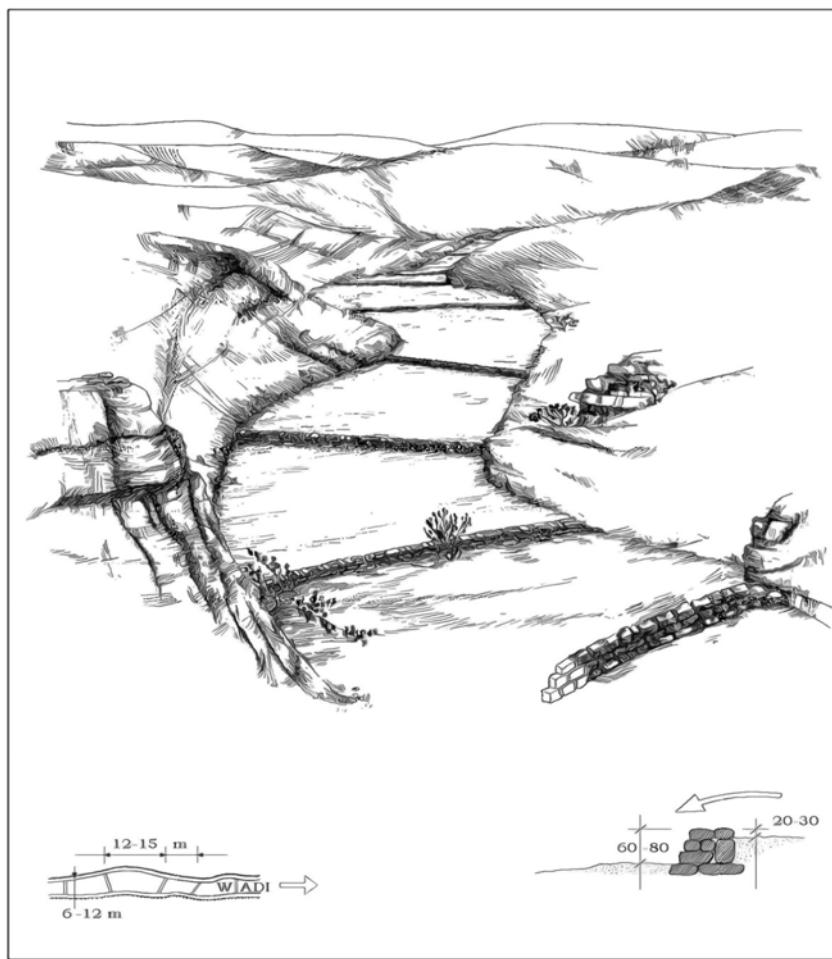


Figura I.20. *Wadis aterrazados* (Evenari, 1987)

3.7.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Pueden construirse en zonas áridas y semiáridas en las que lluevan entre 200 y 750 mm al año. En cuanto a los suelos no existen limitaciones, más bien al contrario, ya que los suelos pobres pueden ser mejorados por este tratamiento.

Se aplica en fondos de valles anchos y poco profundos, preferiblemente con pendientes inferiores al 2 %, debido a que es más efectiva la extensión de agua. La falta de piedras sueltas en la zona puede dificultar o imposibilitar la aplicación de esta técnica.

b) Configuración general.- Un dique permeable de roca es una estructura larga y baja, hecha con cantos rodados (ocasionalmente pueden ser utilizados gaviones) cruzando un fondo de valle. La parte central de la presa es perpendicular al curso de agua, mientras que unas extensiones del muro se sitúan de forma curvada de espaldas a la parte baja del valle, siguiendo aproximadamente las curvas de nivel. La idea es que la escorrentía que se concentra en el centro del valle creando un

barranco, sea extendida por el valle y conducida a lugares con condiciones más favorables para el crecimiento de las plantas. El exceso de agua se filtra a través de la presa, o se desborda, en el caso de grandes avenidas. De manera gradual la presa queda colmatada con fértiles depósitos. Normalmente se construye una serie de diquecillos a lo largo del mismo curso de agua.

b) Relación $A_l:AR$.- No es necesario su cálculo, aunque las características del área de captación influirán en el tamaño de la estructura y en la necesidad o no de rutas de evacuación de escorrentía.

Tabla I.8. Espacio entre presas permeables de roca; según Critchley & Siegert (1991)

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	ESPACIO ENTRE PRESAS* (m)
0,5	140
1,0	70
1,5	47
2,0	35

* El desnivel entre dos presas consecutivas es de 0,7 m

c) Diseño de los diques.- Las especificaciones de diseño dadas a continuación se han extraído de proyectos de presas permeables de rocas localizados en el oeste de África.

El muro del dique o albarroda tiene normalmente alrededor de 70 cm de altura, aunque algunos son menores de 50 cm. Sin embargo, su parte central puede tener una altura útil máxima de 2 m por encima del lecho del barranco. El muro del dique puede llegar a tener longitudes de 1.000 m cruzando fondos de valle anchos, pero normalmente suelen tener de 50 a 300 m. La cantidad de piedras utilizada puede llegar a ser elevada (por ejemplo, 2.000 toneladas).

El muro se construye con piedras sueltas (mampostería en seco), dispuestas cuidadosamente, con grandes cantos rodados formando un marco dentro del cual se disponen piedras pequeñas a modo de “sandwich” (figura I.21). Las pendientes de los paramentos son normalmente 3:1 ó 2:1 en la cara de aguas abajo, y 1:1 ó 1:2 en la cara de aguas arriba. Con paramentos más tendidos la estructura es más estable pero también más cara.

Para todos los tipos de suelo se recomienda cimentar el muro dentro de una zanja de unos 10 cm de profundidad, para prevenir erosiones por las aguas de escorrentía. En suelos erosionables, es recomendable situar una capa de grava o de piedras pequeñas en la zanja.

d) Variaciones de diseño.- Cuando los diques permeables de rocas se construyen en fondos de valle anchos, a veces se hacen de forma recta, en contraste al diseño usual en forma de arco siguiendo las curvas de nivel.

Los diques permeables de roca son similares en muchos aspectos a los “wadis

aterrazados”, tradicionalmente utilizados en el norte de África y en Oriente Medio, aunque estos se utilizan más en regiones áridas, cruzando cursos de agua bien definidos para la producción de cultivos agrícolas y árboles frutales.

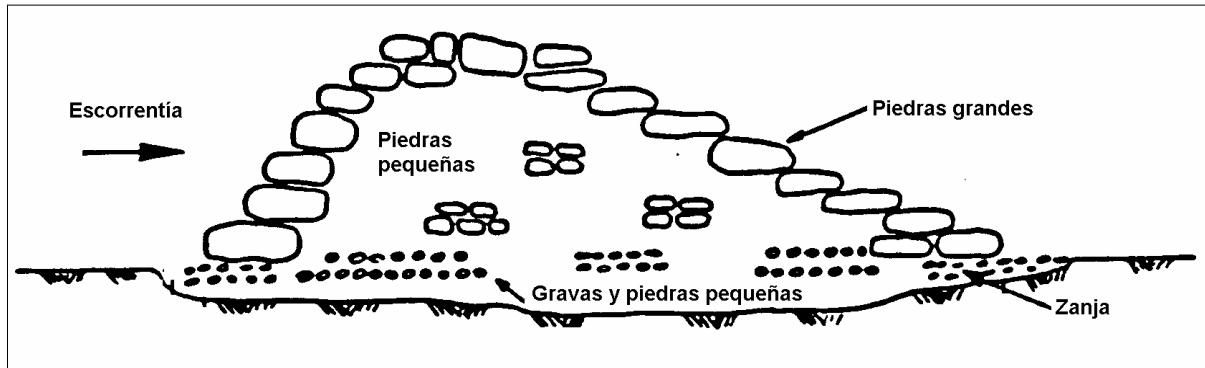


Figura I.21. Perfil de un dique de rocas. Según Critchley & Siegert (1991)

El sistema “*Liman*”, experimentado en Israel, se utiliza en fondos planos o anchos lechos de *wadi*. Unos caballones, frecuentemente de tierra, estancan el agua con profundidades de lámina de agua de 40 cm, y el exceso drena alrededor de las vías de evacuación excavadas. Los “*Limanim*” (plural de “*Liman*”) pueden construirse en series a lo largo del lecho del *wadi*. Esta técnica se encuentra en regiones donde la precipitación es menor de 100 mm al año, utilizándose para cultivos, frutales y especies forestales.

3.7.3. Aplicación forestal

Como se ha indicado anteriormente, los diques de rocas han sido utilizados para proveer de agua a plantaciones de frutales en regiones muy áridas. Su utilidad principal consiste en ampliar las zonas regadas por las aguas efímeras de cauces secos. Su limitación espacial resulta evidente: tan sólo en lugares muy concretos podrá ser de aplicación para la repoblación forestal en España.

3.8. CABALLONES DE EXTENSIÓN DE AGUA (WATER SPREADING BUNDS)

3.8.1. Antecedentes

Los caballones de extensión de agua se aplican frecuentemente en situaciones donde los caballones trapezoidales no son apropiados, normalmente porque el volumen de escorrentía es tan elevado que puede causarles daños, o porque los cultivos pueden llegar a ser anegados temporalmente, lo cual es característico de los caballones trapezoidales.

La principal característica de este sistema es que, como su nombre indica, esparcen el agua y no la estancan. Son normalmente utilizados para desparramar el agua de inundación que ha sido desviado de un curso de agua o derramado de forma natural por la llanura de inundación. Los caballones, hechos normalmente de tierra, frenan el flujo de agua y lo extienden por la tierra que va a ser cultivada, para facilitar su infiltración.

3.8.2. Detalles técnicos

a) Condiciones de aplicación.- Esta técnica es exclusiva de zonas áridas e hiperáridas, en las que la precipitación anual está entre 100 y 350 mm.

Es una técnica de cosecha de agua de inundación, muy específica en cuanto al lugar de instalación. La tierra de cultivo debe situarse junto a un *wadi* u otro curso de agua, donde los suelos sean profundos y fértiles. Es el sistema de cultivo más apropiado para lugares en los que el agua de inundación sea la única fuente posible de agua para la producción de cultivos y pastos.

b) Configuración general.- Existen dos formas de diseño. La primera es para pendientes menores del 0,5 %, donde las estructuras son caballones rectos abiertos-cerrados, cruzados en la ladera, que frenan y extienden el caudal. La segunda, para pendientes mayores de 0,5 %, está formada por una serie de caballones escalonados, cada uno con un ala sencilla y corta, que reparte el agua gradualmente pendiente abajo (figura I.22). En cada caso, los cultivos o pastos se instalan entre caballones.

c) Relación *AI:AR*.- No es necesario un cálculo preciso de esta relación. La razón estriba en que el agua de inundación no se embalsa, sino que gran cantidad continúa fluyendo a través del sistema, y frecuentemente sólo una parte del caudal del *wadi* se desvía a la zona productiva. Esta cantidad de agua no puede ser estimada fácilmente a partir del tamaño del área de captación.

d) Diseño del caballón

d1- Pendientes inferiores a 0,5 %.- Como se ha indicado anteriormente, se utilizan caballones rectos para extender el agua, separados entre sí 50 m. Los caballones deben solaparse, para que el agua que se desborda sea interceptada por el caballón inferior. La sección transversal recomendada de los caballones tiene 60 cm de alto, 4,1 m de anchura en la base, y 50 cm de ancho en coronación. Esto da unas pendientes para los taludes de 3:1. La máxima longitud de caballones recomendada es de 100 m.

d2- Pendientes de 0,5 a 1 %.- Se usan caballones inclinados, como se muestra en la figura I.20, y de sección constante. Se construye, además, un corto caballón lateral con 135° respecto al extremo superior de cada caballón para recoger el flujo procedente del caballón superior. El espacioamiento entre caballones depende de la pendiente del terreno. La sección transversal del caballón es similar a la recomendada para el caso anterior. La longitud máxima orientativa de un caballón base es de 100 m.

e) Variaciones de diseño.- Hay muchas maneras diferentes de construir los caballones de extensión de agua, y la explicada hasta ahora es sólo una de ellas. Todas dependen de la cantidad de agua a esparcir, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la mano de obra disponible y la tradición de la zona.

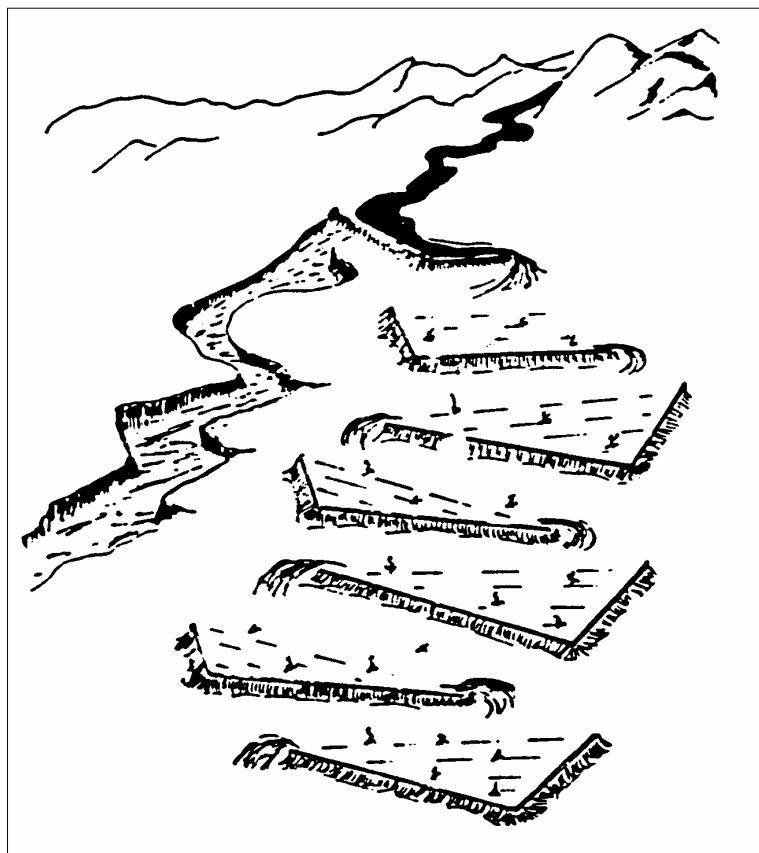


Figura I.22. Caballones de extensión de agua (Critchley & Siegert, 1991)

3.8.3. Aplicación forestal

Aunque el interés de esta técnica para la repoblación forestal en España pueda parecer escaso en un principio, es posible utilizarla para la creación de bosques de árboles o para la instalación de especies arbustivas. Las zonas en las que se establecen los brizales, delimitadas por los caballones, se ven beneficiadas por el agua desviada de un cauce, que de otra forma se desaprovecharía.

3.9. TERRAZAS (TERRACES, TERRASSES)

3.9.1. Antecedentes

Las terrazas son estructuras que consisten en un surco o canal y el

correspondiente lomo o caballón, generalmente construido de tierra o piedra, trazados según curvas de nivel, de manera que intercepten la escorrentía, provocando su infiltración o evaporación, o desviándola a un lugar determinado debidamente protegido y con una velocidad controlada que no ocasione erosión en el canal (López Cadenas, 2003). Este método de preparación del terreno es bien conocido en España y en otros países del área mediterránea, tanto para la plantación de frutales como de especies forestales. Por este motivo, aquí sólo se van a mencionar algunos aspectos de su utilización. De la bibliografía extranjera revisada, en la monografía de Critchley & Siegert (1991) sorprendentemente no se hace alusión a esta técnica, pero sí en Roose (1994), en Al-Labadi (1994) y en Pizarro *et al.* (2003).

3.9.2. Tipología y utilización

Existen muy diversos tipos de terrazas, que reciben diferentes nombres según la región en que nos encontremos. No obstante, los objetivos perseguidos por todas ellas son similares (Fernández Yuste, 1989): controlar la erosión, frenar la velocidad de la escorrentía, recogerla e infiltrarla, incrementar el agua disponible para las plantas y evacuar la escorrentía en el caso de que sea excesiva. Como inconvenientes, se puede mencionar que se trata de una técnica costosa, que puede reducir la fertilidad de los suelos drásticamente al voltear los horizontes superficiales.

En la tabla I.9 se resumen los principales tipos de terrazas según varios criterios de clasificación. Posteriormente se describen según Magíster (1991) y López Cadenas (2003).

Tabla I.9. Clasificación de las terrazas, según López Cadenas (2003)

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	TIPOS
Tamaño de la base	Terraza de base estrecha
	Terraza de base media
	Terraza de base ancha
Forma	Terraza común
	Terraza de banco o bancales
Trazado	Terrazas a nivel
	Terrazas en pendiente
	Terrazas paralelas
Destino de las aguas interceptadas	Terrazas de absorción (a nivel)
	Terrazas de desagüe (en pendiente)
Proceso de construcción	De tipo americano
	De tipo camellón o terraza de Mangún
	De tipo granadino
	De tipo argelino
	De otros tipos
Material principal de construcción	Terrazas de tierra
	Terrazas de piedra, madera, vegetación, etc.

a) Según el tamaño de la base

- Terraza de base estrecha.- Se incluyen dentro de este tipo las terrazas de hasta 3 m de anchura de movimiento de tierras.
- Terrazas de base media.- La anchura de movimiento de tierras varía entre 3 y 6 m.
- Terrazas de base ancha.- El movimiento de tierras afecta a una banda mayor de 6 m, y generalmente menor de 12 m.

b) Según la forma

- Terraza común.- Es una construcción en tierra, a nivel o desnivel, que consta de un canal y un dique o camellón. Es usado en laderas con pendientes menores del 20 %.
- Terraza de banco o bancales.- Son las auténticas terrazas y se construyen con pendientes mayores del 20 % y perpendiculares a la línea de máxima pendiente. Su construcción es similar a las terrazas argelinas, diferenciándose de ellas en que el movimiento de tierras afecta a todo el terreno de forma continua (véanse las figuras I.23 y I.27), mientras que en las argelinas suele existir una franja de terreno natural sin alterar. Existen varios tipos de terrazas de banco, de los cuales uno de los más frecuentes es el de bancales con muro, muy empleado para cultivos herbáceos y leñosos en España.

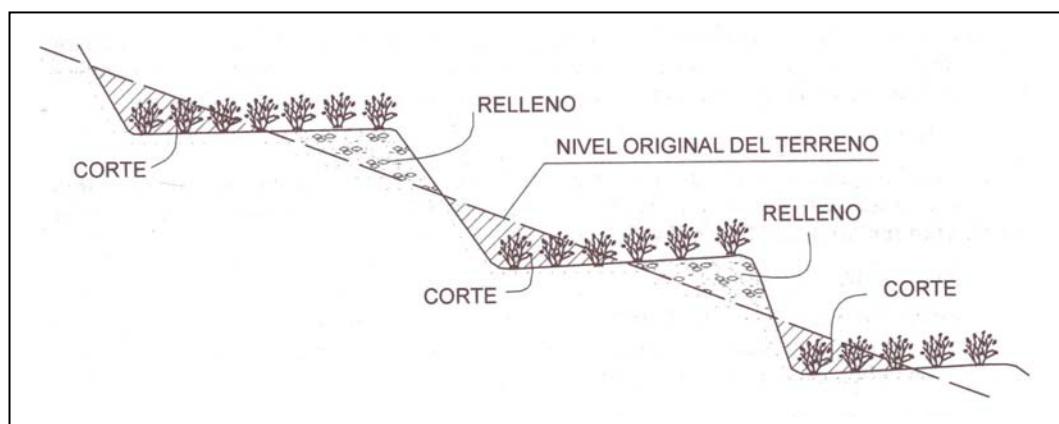


Figura I.23. Terraza de banco o bancale (López Cadenas, 2003)

c) Según el trazado

- Terrazas a nivel.- Su trazado se adapta a la topografía del terreno, siguiendo las curvas de nivel.
- Terrazas en pendiente.- Su perfil longitudinal se dota de una cierta pendiente que permite evacuar el agua recogida, manteniéndose la velocidad del flujo dentro de valores no erosivos. Es preciso que la pendiente del canal no supere el 1 % y que la longitud de la terraza no sea excesiva.

- Terrazas paralelas.- Se trazan con un cierto paralelismo entre las diferentes terrazas, característica que sólo puede conseguirse si el terreno es lo suficientemente uniforme.

d) Según el destino de las aguas interceptadas

- Terrazas de absorción.- Se trazan a nivel, con los extremos de los canales cerrados, abiertos o semiabiertos. Su misión es controlar la erosión, reteniendo y almacenando el exceso de agua escurrida entre dos terrazas consecutivas, favoreciendo su infiltración.

- Terrazas de desagüe.- Tienen el canal en pendiente, con el fin de defender el suelo contra los arrastres y evacuar el agua sobrante hacia desagües acondicionados para este fin.

e) Según el proceso de construcción

- Terrazas de perfil americano.- Se trata de terrazas de absorción que se construyen en terrenos de baja pendiente (1-8 %), cuyos lomos tienen una base muy ancha que las hace aptas de ser cultivas en toda su extensión. Suelen construirse con gran distanciamiento entre sí, deteniendo cantidades de agua considerables.

- Terrazas de tipo camellón o terrazas de Mangún.- Consisten en ondulaciones del terreno creadas con un apero adecuado, en regiones con baja precipitación y pendiente de hasta el 10 %.

- Terrazas de perfil granadino.- Tienen la base del caballón reducida y las pendientes de los taludes mucho mayores que las de las terrazas americanas. Requiere pocos movimientos de tierra y pueden construirse en pendientes de hasta el 30 %.

- Terrazas de perfil argelino.- La sección del canal de estas terrazas tiene forma trapezoidal (véase la figura I.24), y éste tiene poca capacidad de almacenaje, por lo que se recomiendan especialmente para terrazas de desagüe. Son las más adecuadas para conservación de aguas y suelos en plantaciones de frutales (olivos, naranjos, almendros, vides, etc.), sustituyendo al abancajado, que es más costoso.

Suelen llamarse también terrazas mediterráneas (*terrasses méditerranéennes, gradins, bench terracing*). Como indica Roose (1994), en muchas ocasiones el talud subvertical es reforzado con piedras o revegetado, y el canal puede tener una ligera contrapendiente con posibilidad de drenar agua según la pendiente longitudinal (véanse las figuras I.25 y I.26). Se construyen en laderas de fuertes pendientes; Al-Labadi (1994) afirma que en Jordania se suelen construir este tipo de terrazas cuando la pendiente de la ladera está entre el 15 y el 35 %.

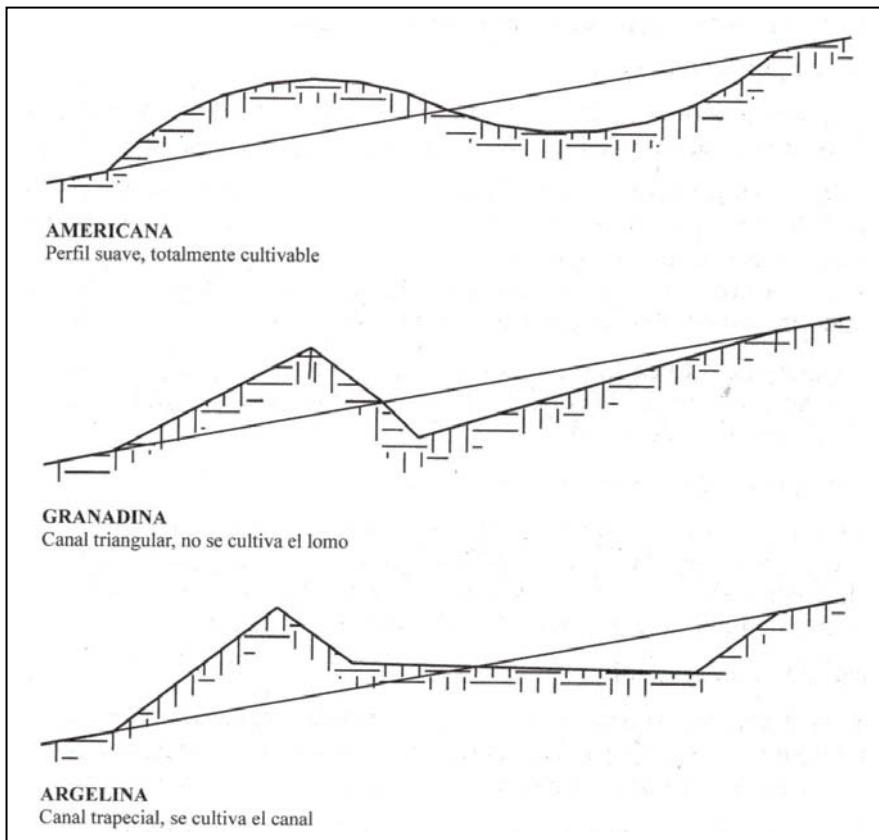


Figura I.24. Tipos de terrazas según el proceso de construcción (López Cadenas, 2003)

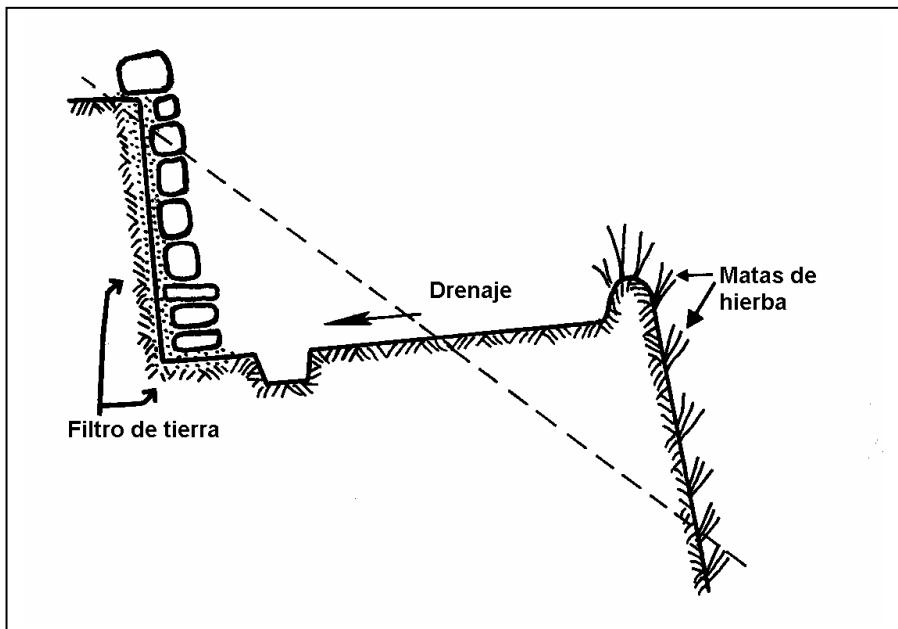


Figura I.25. Terrazas argelinas o mediterráneas, según Roose (1994)



Figura I.26. Terrazas con los taludes recubiertos de piedra en un olivar de la provincia de Granada



Figura I.27. Bancales de piedras en Caimari (Mallorca)

3.9.3. Aplicación forestal

Las terrazas son una preparación del suelo ampliamente utilizada en repoblaciones forestales de zonas áridas. En España se emplearon masivamente hasta hace pocos años, y se están abandonando por los perjuicios que conllevan especialmente de tipo paisajístico (véase el anexo II). A nivel internacional, en Jordania son muy empleadas por el *Jordanian Forestry Department* en repoblaciones con pinos (Al-Labadi, 1994). También han sido utilizadas para cultivos arbóreos en Túnez, Camerún, Sudán, Etiopía, Nigeria y otros países subsaharianos (Prinz, 2001).

3.10. OTRAS TÉCNICAS DESARROLLADAS TRADICIONALMENTE

Las técnicas hasta ahora descritas son las más conocidas y utilizadas actualmente a nivel mundial. Sin embargo, existen otros sistemas tradicionales de recolección de agua que son propios de determinadas regiones y que, aunque no generalizados, cumplen su función satisfactoriamente. Este es el caso, por ejemplo, de las técnicas desarrolladas históricamente en Túnez, que describen Achouri (1994) y Tobbi (1994):

- *Meskats*.- Son estructuras que producen e interceptan la escorrentía superficial y la conducen a un área de recepción, donde se retiene el agua y se facilita su infiltración (figura I.28). El *meskat* o impluvio se mantiene en barbecho y su agua de escorrentía va al *mankaa*, que es cultivado con olivos o frutales. Originalmente la relación *meskat/mankaa* era 2:1, pero al incrementarse la presión de la tierra, el área de *meskat* ha ido disminuyendo (relaciones 1,5:1 y 0,7:1), redundando en una menor eficiencia del sistema. Es una técnica típica del Sahel, cuya precipitación anual es de unos 300 mm. En Túnez, por ejemplo, se han realizado cultivos arbóreos con esta técnica en una extensión aproximada de 300.000 ha (Prinz, 2001).

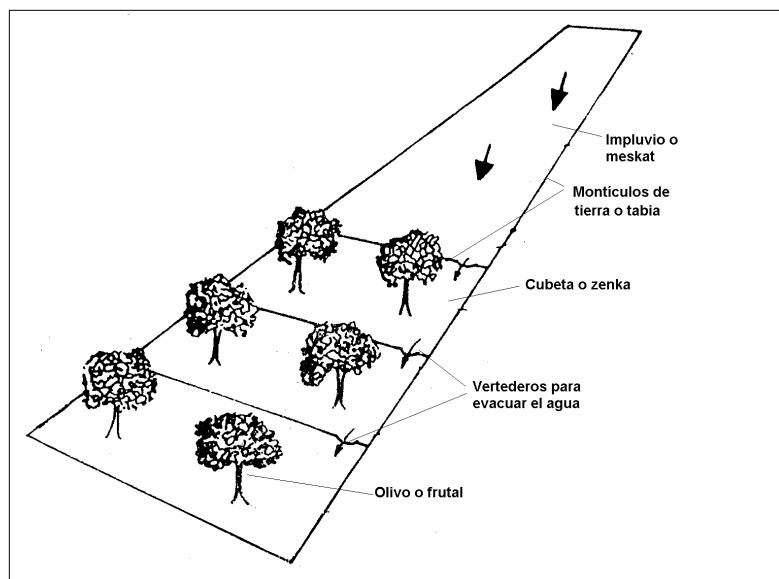


Figura I.28. *Meskat*, según Achouri (1994)

- *M'gouds*.- Son trabajos temporales de captación y desviación para extender las aguas que fluyen por los cauces de los ríos y usarlas para riego. Consisten en un canal que, en las zonas norteafricanas estudiadas, tienen una anchura media de 1 m y hasta 500 m de longitud, y altura en las orillas de 0,8 a 1 m (figura I.29). Cuando el canal se llena de agua sus bordes de tierra deben romperse, para inundar las tierras de cultivo adyacentes.

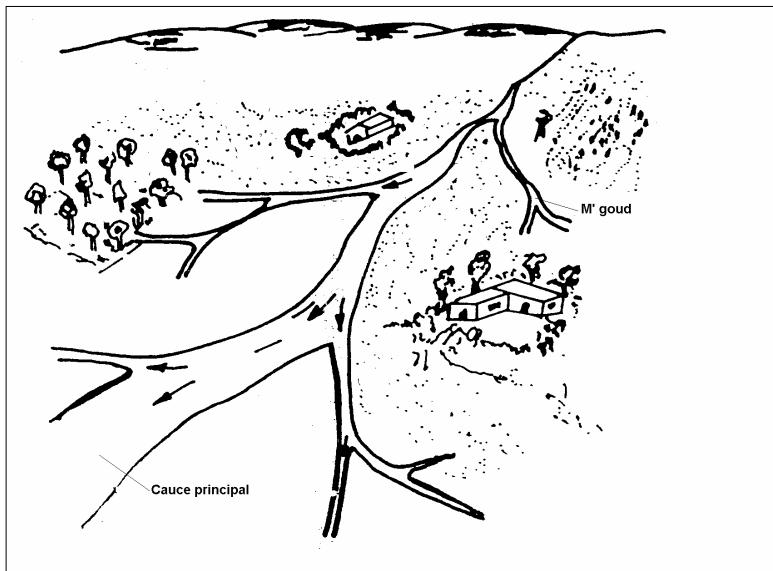


Figura I.29. *M'gouds*, estructuras desarrolladas en Túnez (Achouri, 1994)

Esta técnica es equivalente al riego de boqueras empleado en el sureste español, también denominado riego de turbia, agüeras en Aragón y *cap-rec* en Mallorca (Morales, 1969, 1989). En estos lugares, solía construirse una presa o dique perpendicular al cauce o rambla, con el fin de desviar el agua hacia el canal o boquera. Esta estructura también podía construirse en el centro del lecho y paralelo al sentido del flujo, denominándose en este caso “presa de malecón” (véase la figura I.30).

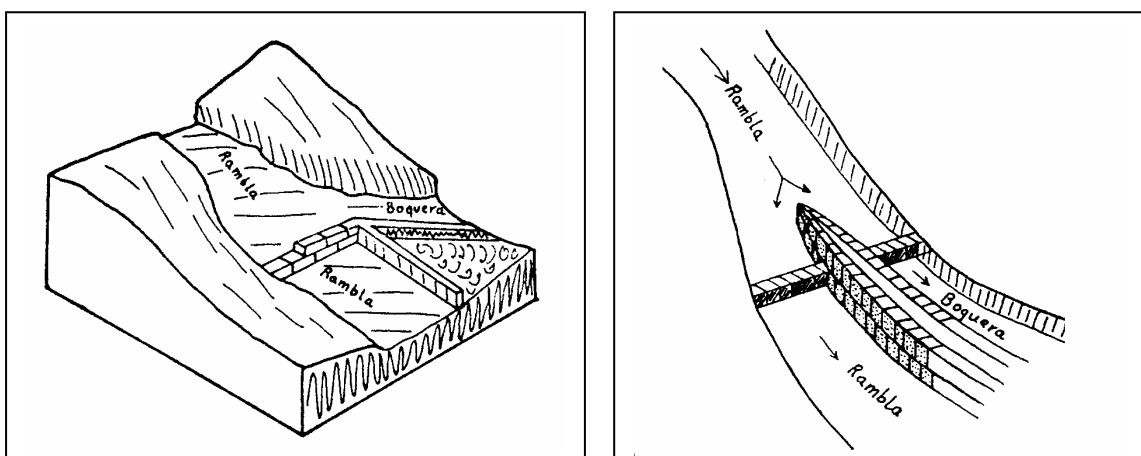


Figura I.30. Boquera con presa de desviación perpendicular o “de malecón”, según la construcción tradicional del sureste español (Morales, 1969)

En cualquiera de los dos tipos, se trata de propiciar un riego por gravedad mientras está lloviendo y hasta que termine la escorrentía en la rambla. Es, por tanto, un riego eventual con agua llovediza, esporádica e incierta. El agua desviada del cauce se conduce a unos bancales o paratas, donde se establece el cultivo agrícola o la plantación de árboles (véase la figura I.31).

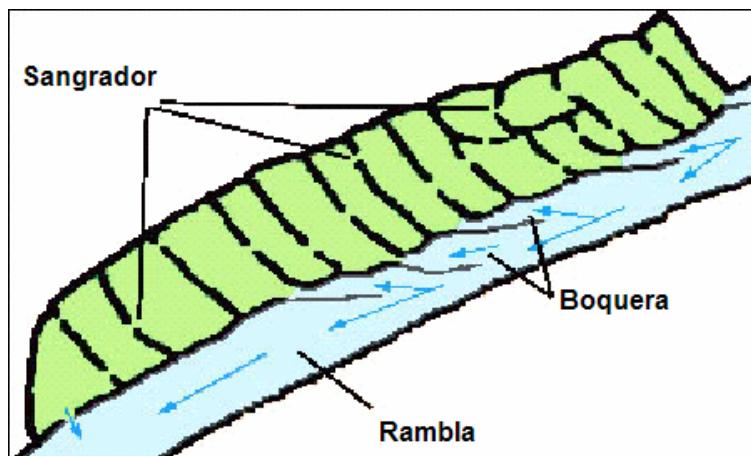


Figura I.31. Riego de boqueras a partir de una rambla

- *Jessours*.- Son pequeños diques o albardadas a lo largo de un cauce de agua, que retienen primero los sedimentos para crear un suelo cultivable profundo, y luego acumulan la escorrentía superficial necesaria para cultivar sobre estos sedimentos. Este sistema ha sido utilizado en plantaciones de almendros, olivos, palmeras y otros árboles (Prinz, 2001).

Además de los sistemas mencionados hasta ahora, Oweis *et al.* (1999) recogen los nombres de otras técnicas utilizadas por todo el mundo: *Haffir* y *Teru* en Sudán, *Khadin* o *Tank* en la India, *Lacs calinaires* en Argelia, *Caag* y *Gawans* en Somalia, *Sayl* en Yemen y *Khuls* en Pakistán. También pueden consultarse sobre este asunto los trabajos de FAO (1989), Waterfall (2002), Pizarro *et al.* (2003) y CSE (2003).

España tiene una gran tradición en cuanto a recolección de agua; a este respecto se ha explicado ya el interesante riego de boqueras. También la fisonomía abancalada de muchas regiones delata la enorme cultura que tenían los anteriores pobladores sobre conservación de aguas y suelos. El abancalamiento, es decir, la formación artificial de rellanos (bancales) en terrenos en pendiente, que puede tener su origen en la ocupación musulmana, es un sistema de cultivo agrícola y de implantación de árboles en terrenos agrestes que permite la recogida de agua bien desde cursos efímeros (mediante las ya mencionadas boqueras o agüeras), bien de escorrentía directa que desciende por la ladera. Los bancales, denominados también paratas si tienen poca anchura, poseen un margen elevado llamado balate o albalate, cuya función es retener la escorrentía y evacuarla de forma ordenada aún con lluvias muy intensas, para que no se desarrollen acarcavamientos por escapes incontrolados de agua (véase la figura I.32). Cuanto más árido es el clima, más altos deben ser los balates por existir mayor necesidad de agua (Martín Galindo, 1988) y debido a que la

torrencialidad de las precipitaciones suele ser mayor.

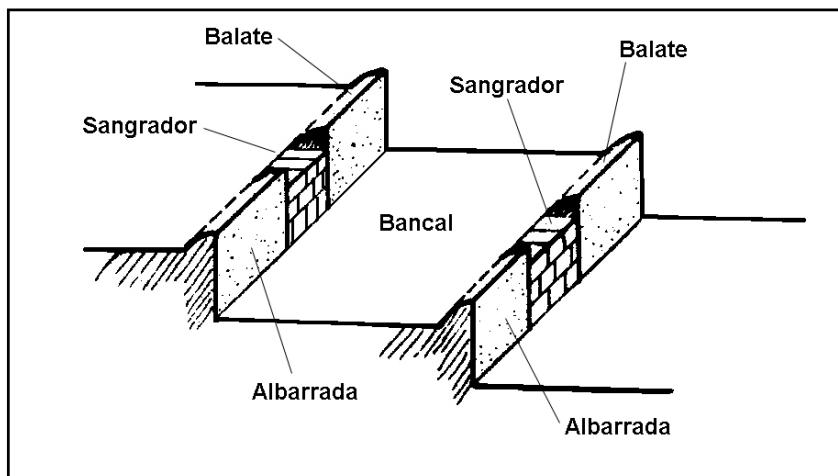


Figura I.32. Descripción de los tradicionales bancales

En la árida isla canaria de Fuerteventura (donde la precipitación anual media no supera los 250 mm), se denomina gavia a un terreno agrícola circundado por un caballón de tierra o de piedra y tierra, llamado *trastón*, con una altura media entre 0,6 y 1 m (Perdomo, 2003). Las dimensiones de estos terrenos suelen ser de unos 3.000 m². A ellos se conducen las aguas de escorrentía, mediante unos canales llamados recogederos o caños, con el objeto de propiciar su lenta infiltración, lo que se denomina "beber la gavia", y obtener un nivel de humedad que permita el cultivo de cereales o leguminosas. Cada gavia tiene un rebosadero, en el extremo contrario de la entrada de agua, reforzado con piedras para evitar su rotura, que permite la evacuación del agua sobrante hacia otra gavia situada más abajo o hacia el cauce del barranco. El control de las aguas se hace de forma manual o mediante compuertas. También el propio caño puede ser usado como rebosadero, dejando este a nivel, de tal forma que llenada la gavia hasta un cierto punto el agua rebosaría en el sentido contrario.

Otro ejemplo significativo se puede obtener de la viticultura tradicional. Era frecuente que después de la vendimia (mayo-junio en Castilla-La Mancha, noviembre-diciembre en Jerez) se retirara a la cepa la tierra que se le había arrimado para abrigarla, incluso se cavara alrededor de las viñas unos hoyos o piletas, todo ello con el fin de recoger el agua de lluvia y escorrentía y facilitar su infiltración. Esta operación recibe el nombre de alumbrado o aserpiado (Revilla, 1980), desacollado (en La Rioja) y descubierto (en Valladolid).



ANEXO II:

TÉCNICAS DE PREPARACIÓN DEL SUELO EN REPOBLACIONES

En este anexo se describen las preparaciones de terreno utilizadas en repoblaciones forestales en España. Se presta especial atención al comportamiento hidrológico de las mismas, con el fin de que se entienda mejor la aplicación del modelo MODIPÉ, cuyo protocolo de uso se explica en el anexo V de este trabajo.

Para la confección de este anexo se ha revisado gran parte de la bibliografía española sobre repoblaciones forestales, que de forma exhaustiva recopiló Pemán (1999). Con atención preferente se han seguido los trabajos de Navarro (1977), Serrada (1993), García Salmerón (1991, 1995), Monsalve (1995) y Pemán & Navarro (1998), pero también referentes a técnicas concretas que se mencionan en cada caso.

En total se describen seguidamente 26 métodos de preparación del suelo que han sido o son empleados en repoblaciones de la Península Ibérica, desde las más antiguas (como pueden ser las banquetas con tracción animal) a las más modernas (acaballonado y subsolado vertical, por ejemplo). Todas las técnicas descritas pueden agruparse en tres modalidades (véase la tabla II.1): labores puntuales, lineales y plenas.

Tabla II.1. Técnicas de preparación del terreno para repoblación forestal empleadas en España

LABORES PUNTUALES	Raspas o casillas Ahoyado manual Hoyos especiales Ahoyado con barrón o plantamón Ahoyado con barrena helicoidal Ahoyado con retroexcavadora	Ahoyado con retroaraña Banquetas con microcuenca Ahoyado con pico mecánico Ahoyado con subsolador modificado
LABORES LINEALES	Subsolado lineal según curvas de nivel Subsolado lineal con subsolador modificado Subsolado lineal según líneas de máxima pendiente Subsolado lineal TTAE Acaballonado y subsolado vertical Asurcado y subsolado Cuenca de contorno discontinua	Acaballonado superficial Terrazas volcadas o fajas subsoladas Acaballonado con desfonde Banquetas con tracción animal Aterrazado con subsolado Acaballanado y subsolado TRAMET
LABORES PLENAS	Laboreo pleno y laboreo profundo Acaballonado superficial completo	Acaballonado completo en llano Subsolado cruzado o pleno

LABOR PUNTUAL	
1. Raspas o casillas	
DESCRIPCIÓN	
Las raspas, que habitualmente van asociadas a las casillas de desbroce, consisten en una cava superficial de forma rectangular o cuadrada (normalmente 40 x 40 cm), realizadas con azada, pico o zapapico, sin extraer la tierra removida. Se denominan someras cuando la profundidad es de 10 cm y picadas cuando alcanza los 30 cm. Su ejecución requiere un desbroce previo.	
EJECUCIÓN	
Se ha descrito en el apartado anterior.	
EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS	
Se trata de un procedimiento puntual, sin inversión de horizontes y de pequeña profundidad. Su efecto hidrológico es muy reducido, así como la mejora del perfil. El efecto paisajístico es inapreciable.	
CONDICIONES DE APLICACIÓN	
Se emplean con dos objetivos: como operación de desbroce previa a un ahoyado con barrón o plantamón en climas húmedos; o como preparación antes de una siembra por golpes, debiendo tener el suelo cierta calidad que permita el arraigo de las plántulas.	
UTILIZACIÓN EN ESPAÑA	
Están indicadas sólo para climas húmedos, por lo que en España se ha aplicado exclusivamente en la zona norte.	
OBSERVACIONES	

LABOR PUNTUAL**2. Ahoyado manual****DESCRIPCIÓN**

Hoyos con dimensiones aproximadas de 40 x 40 x 40 cm, a marco real o al tresbolillo.

EJECUCIÓN

Mediante azada, pico, zapapico o pala.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Se trata de un procedimiento puntual, con inversión muy parcial de los horizontes y con una profundidad de labor media. Su efecto hidrológico es muy limitado, contribuyendo muy poco a la reducción de la escorrentía. El impacto paisajístico es muy reducido.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

La densidad de plantación deberá ser baja, al tratarse de un procedimiento caro. No tiene limitaciones por pendiente, pedregosidad ni afloramientos rocosos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Ha caído en desuso, quedando relegado a pendientes por encima del 60 %, terrenos rocosos o de difícil acceso. También cuando se quiera reducir al mínimo el impacto.

OBSERVACIONES

García Salmerón (1995) describe otro tipo de ahoyado, indicado para regiones áridas y semiáridas, que denomina **hoyos especiales**. Se trata de hoyos de sección circular o cuadrada, con nivel de plantación por debajo del general del terreno y entre el nivel del terreno y el de la plantación se coloca un embudo también de sección circular o cuadrada, con la misión de recoger el exceso de agua de lluvia, sobre la infiltrada durante la precipitación, para recargar y aumentar la infiltración alrededor de la planta. Para evitar la evaporación y percolación de agua en las paredes del embudo, así como la aparición de vegetación competitiva, se han diseñado unas cubiertas de plástico denominadas "*plastic-aprons*". La FAO ha realizado en diversos países mediterráneos ensayos con estos materiales; en Madrid se han probado con *Pinus halepensis* y *Cupressus sempervirens*.

LABOR PUNTUAL**3. Ahoyado con barrón o plantamón****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la realización de hoyos de escasa anchura y profundidad suficiente (unos 30 ó 40 cm), mediante la utilización de las herramientas denominadas barrón y plantamón.

EJECUCIÓN

El barrón es una barra metálica, cilíndrica, de aproximadamente 1,50 m de longitud y de 5 a 7 cm de diámetro. El plantamón es una pala recta de sección romboidal que, una vez clavada en el suelo y tras un movimiento de vaivén, genera una cavidad de forma paralelepípedica.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Ambos son procedimientos puntuales, sin inversión de horizontes y profundidad media. Los efectos hidrológico, paisajístico y de mejora del perfil son inapreciables.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Sus limitaciones vienen dadas por la pedregosidad del suelo y por una textura arcillosa que pudiera producir compactaciones. Se utilizan siempre para plantación, bien asociado a las raspas en climas húmedos y con suelos de calidad, bien en terrenos con muchos afloramientos rocosos de imposible mecanización.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Restringido a terrenos de buena calidad en clima húmedo.

OBSERVACIONES

LABOR PUNTUAL	
4. Ahoyado con barrena helicoidal	
DESCRIPCIÓN	
Hoyos cilíndricos de unos 30 cm de diámetro, abiertos con barrena helicoidal.	
EJECUCIÓN	
Mediante una barrena helicoidal accionada por la toma de fuerza de un tractor. La profundidad del trabajo oscila entre los 40 y 100 cm, en función de las condiciones edáficas y del tipo de planta.	
EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS	
Inversión muy parcial de horizontes y profundidad media a alta. Los efectos hidrológicos y paisajísticos son inapreciables.	
CONDICIONES DE APLICACIÓN	
Este método tiene una limitación de inclinación del terreno del 60 %, debido al riesgo de vuelco del tractor al circular sobre líneas de máxima pendiente. Debe utilizarse en suelos profundos, poco pedregosos y escasamente arcillosos para evitar la compactación de las paredes del hoyo. Requiere un desbroce previo.	
UTILIZACIÓN EN ESPAÑA	
Recomendado para reforestación de terrenos agrícolas y en bosques de ribera.	
OBSERVACIONES	

LABOR PUNTUAL**5. Ahoyado con retroexcavadora****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la remoción del suelo, sin extracción de la tierra, en un volumen de forma prismática, mediante la acción de la cuchara de una retroexcavadora.

EJECUCIÓN

Tras el marcado de los hoyos, la retroexcavadora avanza según líneas de máxima pendiente y hacia arriba, estacionándose de forma que desde un punto pueda realizar los hoyos de tres a cinco líneas. En cada hoyo clava el cazo, gira, levanta y suelta la tierra en el mismo sitio, repitiendo la operación hasta alcanzar las dimensiones del prisma proyectado (entre 0,5 y 0,8 m de largo, entre 0,4 y 0,6 m de ancho y entre 0,4 y 0,6 m de profundidad). Esta operación puede completarse con la elaboración de una plataforma horizontal o en contrapendiente y unos canales laterales en ángulo de 45º que parten de los vértices superiores con la misión de recoger la escorrentía. Este último trabajo se realiza manualmente con azada, y la estructura resultante se denomina **banquetas con microcuenca**.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

El ahoyado con retroexcavadora es un procedimiento de preparación del suelo puntual, sin inversión de horizontes y de profundidad alta. El efecto hidrológico es favorable para la reducción de escorrentía si se forman microcuenca. El efecto paisajístico es apreciable pero transitorio. La mejora de las condiciones edáficas es notable, debido al elevado volumen removido.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

La limitación por pendiente es poco estricta, pudiéndose llegar, generalmente, hasta un 65 %.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Este método se está empezando a aplicar en repoblaciones protectoras de fuertes pendientes. Un caso especial de ahoyado con retroexcavadora es la plantación de chopos a raíz profunda.

OBSERVACIONES

LABOR PUNTUAL**6. Ahoyado con retroaraña****DESCRIPCIÓN**

Hoyo de características análogas al realizado con retroexcavadora convencional. La ventaja de esta máquina es su capacidad de superar las limitaciones de pedregosidad superficial.

EJECUCIÓN

La retroaraña es una retroexcavadora con dos ruedas sin capacidad motriz y dos patas hidráulicas regulables en longitud. Mediante las ruedas, las patas y el brazo, se va desplazando por la ladera y ejecuta los hoyos. Con la cuchara extrae la tierra y la deposita en el mismo hoyo. Para conseguir un hoyo de tamaño suficiente, suele repetirse esta operación dos veces.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

La mejora en las condiciones edáficas es apreciable. El efecto paisajístico no es desfavorable.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Limitación por pendiente a partir del 60 ó 75 %. Sin problemas en terrenos pedregosos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

En nuestro país su utilización es muy reciente y aún escasa.

OBSERVACIONES

LABOR PUNTUAL**7. Ahoyado con pico mecánico****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la formación de banquetas con microcuenca, similares a las descritas anteriormente, por remoción de la tierra contenida en un prisma de dimensiones variables (entre 40 y 60 cm de anchura, entre 40 y 80 cm de longitud y entre 30 y 50 cm de profundidad), sin extraerla, mediante pico mecánico o pala percutora, haciendo a continuación una plataforma horizontal o en contrapendiente y los regueros de la microcuenca con azada.

EJECUCIÓN

Se ha descrito en el apartado anterior.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento de preparación del suelo puntual, sin inversión de horizontes y de profundidad media o alta. El efecto hidrológico es muy favorable para reducir la escorrentía. El efecto sobre el paisaje es poco apreciable.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Similares al resto de ahoyados.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Se emplea habitualmente en repoblaciones protectoras.

OBSERVACIONES

Las banquetas con microcuenca, si quedan desfasadas según una distribución al tresbolillo, consiguen un efecto similar al de las preparaciones lineales en lo que respecta a la retención de escorrentía.

LABOR PUNTUAL**8. Ahoyado con subsolador modificado****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la apertura de hoyos mediante un subsolador modificado movido por un tractor de cadenas, desplazándose este de arriba a abajo según líneas de máxima pendiente. Cuando la vegetación preexistente es muy abundante, puede hacerse un desbroce con la pala del tractor.

EJECUCIÓN

El procedimiento de realización es el siguiente: se clavan los rejones (normalmente dos) y se deja caer el tractor de 0,80 a 1 m, para abrir el hoyo. Se levantan los rejones y se retrocede con el tractor para volver a clavarlos ligeramente por encima de la vez anterior. Al avanzar de nuevo, se deposita y aplasta la tierra que transporta contra el lomo del hoyo recién abierto. Los hoyos de una pasada deben situarse a la altura de la mitad de la distancia entre dos hoyos de la pasada anterior, de forma que la disposición de la plantación resulte al tresbolillo por parejas.

La profundidad mínima del hoyo debe ser de 50 cm. La distancia entre líneas de máxima pendiente es de 1 m (coincidente con la distancia entre rejones) y la distancia entre hoyos dentro de la misma línea depende de la densidad deseada. El hoyo debe quedar preparado con una ligera contrapendiente, al objeto de retener la mayor cantidad de agua posible. La planta se sitúa en el punto de intersección del plano primitivo del terreno con la superficie que queda después de abierto el hoyo.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento que no invierte horizontes. El efecto hidrológico es medio y el paisajístico escaso.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Por debajo del 60 % de pendiente.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Muy empleado en la actualidad. Se inició en Navarra en los años ochenta.

OBSERVACIONES

Como se ha indicado, el subsolador debe estar modificado. Esta modificación consiste en dos piezas, una cuchara o cuña inferior sobre la bota, de forma triangular, para abrir el hoyo; y sobre ella, una orejeta con forma de ala de avión, para empujar la tierra fuera del hoyo (Torre, 1995).

LABOR LINEAL

9. Subsolado lineal

DESCRIPCIÓN

Consiste en producir cortes perpendiculares en el suelo de una profundidad de 40 a 60 cm, generalmente sobre curvas de nivel, que no alteran el orden de los horizontes, mediante un apero denominado subsolador, rejón o *ripper*. Sobre un terreno previamente desbrozado o que no lo necesite, circula el tractor más o menos inclinado según la pendiente del terreno, haciendo uno, dos o tres surcos de subsolador (en función del número de rejones que lleve el apero).

EJECUCIÓN

El tractor avanza siguiendo curvas de nivel o líneas de máxima pendiente, con el rejón clavado en el suelo.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es una preparación lineal, sin inversión de horizontes y de alta profundidad. Su efecto hidrológico es apreciable. El efecto paisajístico es mínimo, pero el desbroce lineal que suele acompañarle resulta más patente. Sobre el perfil edáfico el efecto es muy favorable, al no invertir los horizontes, mejorar sensiblemente la profundidad, la capacidad de retención de agua y la velocidad de infiltración en los surcos.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Esta preparación está limitada a una pendiente del 55 %. El método es especialmente aconsejable en suelos evolucionados y en los de naturaleza caliza.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Muy utilizado, tanto el método general como la variante que se describe a continuación.

OBSERVACIONES

El **subsolado con rejón modificado** consiste en realizar la misma operación pero mediante un subsolador al que han acoplado unas orejetas metálicas laterales, con el objetivo de crear en la parte inferior del surco subsolado un pequeño caballón (de altura inferior a 20 cm), con el fin de facilitar la retención e infiltración de agua en el terreno.

Otra posibilidad consiste en hacer el **subsolado lineal según líneas de máxima pendiente**, limitado únicamente a aquellos lugares donde el riesgo de erosión hídrica sea mínimo. También puede realizarse el subsolado a máxima pendiente de forma discontinua, lo que reduce el riesgo de erosión. En este último caso el subsolador también debe llevar acopladas las orejetas.

También es interesante el **subsolado con tractor autonivelable TTAE**.

LABOR LINEAL**10. Acaballónado superficial, terrazas volcadas o fajas subsoladas****DESCRIPCIÓN**

Este procedimiento es la combinación, en una misma faja, de un decapado y un subsolado, ejecutados según curvas de nivel.

EJECUCIÓN

En una primera pasada del tractor de cadenas, se realiza un decapado con la pala, formándose un caballón con los restos vegetales y tierra en la parte inferior de la faja, cuya anchura total es de 2,5 a 3 m. En la segunda pasada, se levanta la pala y se clavan los rejones (separados 2 m entre sí). Entre dos fajas consecutivas se deja el terreno inalterado con una anchura variable según la densidad de plantación.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un método de preparación del suelo con inversión de horizontes en los 5 cm que aproximadamente son afectados por el decapado, y de alta profundidad. Tiene un buen efecto hidrológico, debido al subsolado y a la formación de los caballones, que superan ampliamente el efecto negativo del decapado. El efecto paisajístico es notable, al alternarse fajas paralelas de diferente color producidas por el decapado.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Su aplicación está limitada a una pendiente menor de 35 %, y está especialmente recomendada para suelos silíceos degradados.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Criticado por su drástica eliminación de la vegetación natural, sin embargo es útil en muchas situaciones si se realiza cuidadosamente.

OBSERVACIONES

Si las fajas decapadas se juntan, se convierte en una labor areal.

LABOR LINEAL**11. Acaballonado con desfonde****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la formación de lomos de tierra o caballones, según curvas de nivel, de diferente anchura y altura en función del tamaño del apero, a base de hacer pasar un arado de vertedera, lo que a su vez deja un surco o canal en la zona aguas arriba del caballón, que se ha formado con la tierra extraída del surco. La profundidad de labor es superior a 40 cm.

EJECUCIÓN

El apero empleado es un arado forestal de vertedera bisurco y reversible, modelo "Alchi" o "Chirlaque". En algunos casos es necesario realizar un desbroce previo.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento de preparación del suelo con inversión de horizontes en la faja donde se aplica con una anchura de 40 a 60 cm, de profundidad alta. El efecto hidrológico es bueno si los surcos están bien nivelados (similar al del aterrazado con subsolado), ya que la escorrentía se almacena sobre ellos incrementándose el tiempo de infiltración. El efecto sobre el paisaje es apreciable, pero menor que en el caso de fajas decapadas.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Tiene limitaciones por pendiente (30 %), pedregosidad y afloramientos rocosos. Es más recomendable para suelos silíceos, homogéneos, poco evolucionados y erosionables.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Fue muy utilizado, aunque su uso ha quedado bastante restringido en la actualidad.

OBSERVACIONES

LABOR LINEAL**12. Acaballónado y subsolado vertical****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la realización de un caballón o surco siguiendo curvas de nivel, que se complementa con un subsolado en la parte inferior del mismo, que no es perpendicular a la pendiente sino vertical. El surco -de entre 50 y 70 cm- se realiza mediante un apero de nuevo diseño, y en él el tractor introduce una de sus cadenas para lograr mayor estabilidad en la ejecución del subsolado. De esta forma el tractor no circula con la inclinación de la ladera, sino mucho más horizontal, por lo que al subsolar, el corte resulta vertical y no perpendicular a la pendiente como en el subsolado convencional.

EJECUCIÓN

Descripción en el apartado anterior.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Se mejoran las características del suelo, en cuanto a incrementar su profundidad, capacidad de retención e infiltración. Se reduce la erosión y se recoge la escorrentía. Impacto paisajístico medio, limitado a los 70 cm de anchura de labor.

CONDICIONES DE APLICACIÓN**UTILIZACIÓN EN ESPAÑA**

Prácticamente desconocido aún.

OBSERVACIONES

Otras ventajas de este nuevo método, citadas por sus creadores (AUDECA, 2000), son:

- Reducción de costes de plantación, por la facilidad de desplazamiento por el surco para los operarios.
- Mayor índice de arraigo y crecimiento, gracias al subsolado vertical, que favorece el geotropismo.
- Mayor adherencia del tractor, debido a que la cadena queda encajada en el surco. Esto permite trabajar con pendientes mayores de lo habitual (hasta del 60 %).

LABOR LINEAL**13. Banquetas con tracción animal****DESCRIPCIÓN**

Es una preparación lineal que consiste en la formación de superficies estrechas (con anchura menor de 1 m) y largas, llanas o en contrapendiente, siguiendo curvas de nivel y utilizando aperos de tracción animal (generalmente un arado monosurco reversible del tipo "Bravant" arrastrado por bueyes). La profundidad de labor debe superar los 30 ó 40 cm. Suele utilizarse con pendientes entre 30 y 60 %.

EJECUCIÓN

Se describe en el apartado anterior.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Cuando el matorral sea abundante, es más recomendable ejecutar terrazas que lo eliminan con facilidad. El efecto sobre el paisaje es mínimo y desaparece con el tiempo. Respecto al efecto hidrológico, la retención de escorrentía es eficaz pero sin llegar a la conseguida mediante el aterrazado.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Es un método típico de repoblación de laderas de páramos, en climas secos. Se ha utilizado también para corregir la falta de retención de escorrentía en repoblaciones ya hechas por ahoyado, intercalando banquetas horizontales (2.000 m/ha) entre las líneas de hoyos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

De uso muy frecuente y exitoso en tiempos pasados (Soriano, 1956). Hoy esta preparación del suelo ha desaparecido totalmente en nuestro país, principalmente por la dificultad de encontrar bueyes aptos para ella. Sin embargo, los efectos beneficiosos que supone frente a las terrazas, principalmente desde el punto de vista hidrológico y paisajístico, hace que su conservación sea muy interesante especialmente en países poco desarrollados, donde el acceso a la maquinaria es más difícil.

OBSERVACIONES

LABOR LINEAL**14. Aterrazado con subsolado****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la formación de terrazas o plataformas horizontales o en contrapendiente en una ladera, según curvas de nivel, mediante la ejecución de un desmonte y un terraplén, con anchura suficiente para la circulación del tractor que la construye y que son subsoladas en toda su longitud. Las dimensiones que definen el aterrazado son la anchura de la plataforma y la separación entre los ejes de dos terrazas consecutivas, que junto a la pendiente de la ladera y las pendientes de desmonte y terraplén, permiten configurar su geometría.

EJECUCIÓN

La labor se realiza de abajo hacia arriba, siguiendo curvas de nivel. En primer lugar el tractor hace la plataforma con la pala delantera, dando un ángulo de ataque adecuado a la dureza del terreno y a la anchura de la plataforma que se desee, a base de extraer tierras en el desmonte de la parte superior de la ladera y verterlas en la parte baja formando un terraplén. Cuando termina la plataforma, el tractor da la vuelta y circula por ella con la pala levantada y subsolando a 50 ó 60 cm de profundidad con 2 ó 3 rejones. Es importante no cruzar con las terrazas los cauces de circulación natural de las aguas, pues la concentración de caudales romperá la estructura.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento de preparación del suelo lineal, con inversión de horizontes y de alta profundidad. Como se ha comentado, es el que mayor impacto paisajístico produce, por ser muy visibles los desmontes y terraplenes por un tiempo superior a los veinte años.

Los efectos hidrológicos de las terrazas son positivos, ya que anulan prácticamente la escorrentía en la ladera, aumentan la capacidad de infiltración, limitan el arrastre del suelo y evacúan el agua sobrante de forma ordenada (si están bien diseñados y ejecutados).

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Sólo debe utilizarse con suelos muy degradados, en zonas de precipitación escasa y torrencial, para recoger las escorrentías que de otra forma se perderían.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Después de un gran auge en los años 70-90 del siglo pasado, ha desaparecido casi totalmente en la actualidad. De hecho, está proscrito en algunas comunidades autónomas.

OBSERVACIONES

El aterrazado es un procedimiento de preparación del suelo muy discutido, fundamentalmente porque provoca un impacto paisajístico elevado y duradero (Serrada, 1993). Algunos autores añaden otros tipos de perjuicios causados por los aterrazados. Chaparro *et al.* (1993), analizando aterrazados realizados hace más de veinte años en el sureste español, llegan a la conclusión de que este método de preparación del terreno no produce una evolución positiva del suelo, favorece la erosión hídrica en vez de frenarla, y provoca profundos cambios en la composición específica y en la estructura fisonómica de la vegetación natural. Esta situación ha llevado a que en algunas comunidades autónomas, como en Castilla y León, se recomiende el abandono de esta técnica (JCyl, 2000).

Es esta, por consiguiente, una preparación del suelo controvertida, con sus ventajas e inconvenientes. La bibliografía consultada permite establecer dos condiciones para que la preparación minimice los impactos y cumpla con las funciones que se le encomiendan. Por un lado, se trata de reducir al máximo el movimiento de tierras y la remoción del suelo; y por otro, de ajustar el diseño a las necesidades del ecosistema, es decir, el dimensionado debe basarse en la economía del agua (Martínez de Azagra *et al.*, 2002).

LABOR LINEAL**15. Acaballonado TRAMET****DESCRIPCIÓN**

Se trata de un acaballonado con subsolado de dimensiones variables, ejecutado mediante un equipo desarrollado por las empresas Tragsa y Metsa, que dan nombre al método y al equipo.

EJECUCIÓN

La labor se realiza mediante el tractor TRAMET que lleva un apero compuesto por una fresa y un subsolador. La fresa produce un desbroce y un surco, desplazando la tierra extraída ladera abajo y formando un caballón. Al mismo tiempo, el rejón va subsolando el fondo del surco, hasta una profundidad de 50 cm. La anchura total del trabajo desde el extremo del surco hasta el del caballón es variable: entre 60 y 100 cm.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento lineal, con una inversión parcial de los horizontes y profundidad de labor de media a alta. La reducción de la escorrentía es importante, al acumularse el agua en el surco y favorecer la infiltración por el subsolado. El efecto paisajístico es muy reducido, por la escasa anchura de terreno alterada.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

El empleo de esta técnica está limitado por pendientes superiores al 55 % y afloramientos rocosos. Asimismo es conveniente reducir la profundidad del surco en suelos calizos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Hay pocos equipos disponibles. Muy utilizado desde su creación en la provincia de Cuenca.

OBSERVACIONES

LABOR LINEAL**16. Asurcado y subsolado****DESCRIPCIÓN**

Consiste en la realización de un surco de 70-80 cm de ancho y un caballón de unos 30-40 cm, y posteriormente un subsolado profundo.

EJECUCIÓN

Esta preparación del suelo se realiza mediante un tractor con cadenas de gran potencia, que lleva incorporados dos aperos de nuevo diseño (Abascal, 1997).

El apero delantero denominado “asurcador” consta de un arco con dos vertederas, cuya reja de penetración está protegida por dos dientes recambiables de subsolador, que le confieren la misma penetrabilidad que los rejones. Con este apero se hace un surco, desplazando la tierra por debajo del tractor, formando un caballón.

El apero trasero es un subsolador, que realiza su labor en el fondo del surco. El apero, que lleva dos rejones en los extremos, tiene dos características especiales: pivota sobre el eje longitudinal y es extensible. Aunque para conseguir buenas profundidades de trabajo, sólo subsola con un rejón.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Los efectos sobre el suelo e hidrológicos son buenos, mientras que el impacto paisajístico es medio.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

La pendiente debe ser menor del 50 %. Puede requerir desbroce previo. Es preferible aplicarlo a suelos ácidos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Uso aún poco generalizado.

OBSERVACIONES

LABOR LINEAL**17. Cuencas de contorno discontinuas****DESCRIPCIÓN**

Se trata de un conjunto de microcuencas que forman un mosaico que cubre toda la ladera a restaurar. El área de recepción queda configurada como un depósito de forma prismática, de bases triangulares y aristas horizontales, y un caballón formado por las tierras que ocupaban ese espacio. Debajo del depósito se efectúa un subsolado profundo para favorecer la infiltración y la reserva de agua. La labor se interrumpe dentro de cada curva de nivel, de ahí el nombre de la técnica (Martínez Artero *et al.* 1997; Martínez Artero *et al.*, 1999)

EJECUCIÓN

La ejecución de la preparación corresponde a un tractor de orugas de gran potencia y provisto de tres rejones. El trabajo se realiza de arriba a abajo, desplazándose el tractor en líneas de máxima pendiente. Primero recorre la distancia fijada para el área de impluvio sin clavar los rejones. Después clava los rejones, subsolando 2 m en máxima pendiente y los levanta. Continúa de esta forma hasta que termina la ladera. Posteriormente, sube marcha atrás sobre sus roderas hasta que llega a una zona subsolada, entonces clava la pala, desciende y levanta, creando un caballón con la capacidad de embalse que se haya calculado. La operación se repite de la misma manera en una línea contigua, evitando que coincidan estructuras vecinas a la misma altura de la ladera.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Los efectos sobre el suelo e hidrológicos son buenos. El impacto paisajístico es medio.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Las limitaciones son las propias de un tractor de cadenas, es decir, pendientes inferiores al 55-60 % y naturaleza del suelo pedregosa o rocosa.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Aún incipiente.

OBSERVACIONES

LABOR AREAL**18. Laboreo pleno****DESCRIPCIÓN**

Labor en todo similar al alzado que realizan los agricultores tradicionalmente, removiendo toda la superficie del terreno en pasadas paralelas, preferiblemente sobre curvas de nivel.

EJECUCIÓN

La ejecución se describe en el apartado anterior. Se realiza con tractor agrícola equipado con arado de vertedera o de discos.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento con inversión de horizontes y de profundidad media, porque es difícil que se superen los 40 cm de profundidad de labor. El efecto hidrológico es negativo, ya que pueden favorecerse procesos erosivos, por lo que únicamente debe emplearse con pendientes inferiores al 15 %. El efecto paisajístico no es muy patente. Requiere un desbroce previo.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Se desaconseja en suelos con caliza activa en profundidad alcanzable por la labor. Se utiliza en el campo forestal exclusivamente para siembras a voleo.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Para reforestación de terrenos agrícolas.

OBSERVACIONES

Otro laboreo bastante empleado en la reforestación de tierras agrícolas es el **laboreo profundo**. Consiste en un laboreo pleno, con o sin volteo de horizontes, a mayor profundidad que las labores agrícolas tradicionales, de manera que se rompa la “suela de labor” producida por el cultivo continuado. El apero utilizado en este caso es también un arado de vertedera capaz de llegar a la profundidad requerida (mayor de 40 cm), o un arado *chissel*, que no voltea el suelo.

LABOR AREAL**19. Acaballonado superficial completo****DESCRIPCIÓN**

Es un método de acaballonado en toda la superficie, que se consigue al aproximar suficientemente los ejes de las fajas descritas en el acaballonado superficial. El tractor realiza un decapado sobre una faja que posteriormente subsola; al realizar la siguiente faja, el nuevo caballón queda sobre el borde de la faja anterior.

EJECUCIÓN

Se describe en un apartado anterior.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Este procedimiento supone inversión de horizontes en la profundidad del decapado (máximo 10 cm), y su profundidad de trabajo es alta debido al subsolado. El efecto hidrológico es similar al acaballonado superficial. El efecto paisajístico es menor, al no observarse fajas alternas de diferente color.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Está limitado a pendientes menores del 35 % si se realiza con tractores convencionales. No se aconseja en suelos calizos ni en climas de alta torrencia. Sí es interesante para repoblaciones productoras sobre suelos profundos y de escasa pendiente.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Utilizado con cierta frecuencia hace años. Por su intensidad, debe emplearse exclusivamente en lugares que cumplan las condiciones de aplicación.

OBSERVACIONES

LABOR AREAL**20. Acaballónado completo en llano****DESCRIPCIÓN**

Preparación típica en páramos ácidos mediante el desfonde e inversión de horizontes del suelo, facilitando el mullido y drenaje superficial con la formación de caballones separados por zanjas de sección triangular.

EJECUCIÓN

El procedimiento consta de tres fases: 1) Nivelado; 2) Subsolado profundo y cruzado; 3) Acaballónado mediante una zanjadora.

EFFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

El efecto edáfico es muy fuerte, produciéndose una inversión de horizontes. Los efectos hidrológicos son muy buenos, ya que se consigue el drenaje del terreno, que es uno de los objetivos perseguidos. Impacto paisajístico elevado.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Para pendientes inferiores al 10 % y en suelos ácidos.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Muy utilizado en épocas pasadas en los páramos ácidos de las provincias de León y Palencia, para romper horizontes impermeables y facilitar el drenaje superficial del suelo.

OBSERVACIONES

LABOR AREAL**21. Subsolado pleno o cruzado****DESCRIPCIÓN**

Consiste en ejecutar un doble subsolado lineal en direcciones que son perpendiculares en terrenos llanos y oblicuas en terrenos con pendiente. Puede hacerse con dos rejones separados entre sí 2 m, o con un único rejón.

EJECUCIÓN

Descripción en el apartado anterior.

EFECTOS EDÁFICOS, HIDROLÓGICOS Y PAISAJÍSTICOS

Es un procedimiento de alta profundidad que no supone inversión de horizontes. Por una parte, el efecto hidrológico beneficioso en pendiente es superior al subsolado lineal por ejecutarse el doble de longitud subsolada, pero por otra es inferior por no realizarse sobre curvas de nivel. No obstante, en los lugares en los que se ha aplicado, los surcos oblicuos no han inducido abarrancamientos. El impacto paisajístico es pequeño y muy transitorio.

CONDICIONES DE APLICACIÓN

Esta preparación está limitada por una pendiente superior al 45 %, por cambios bruscos de pendiente en ladera y por afloramientos rocosos. Requiere un desbroce previo o un terreno sin vegetación.

UTILIZACIÓN EN ESPAÑA**OBSERVACIONES**



ANEXO III:
MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

ÍNDICE DEL ANEXO III

1. INTRODUCCIÓN	287
2. DESARROLLO DEL MODELO	287
3. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO	290
3.1. Tipos de suelo.....	291
3.2. Tipos de cubierta vegetal o usos del suelo.....	295
3.3. Tratamiento o forma de explotación	298
3.4. Condición hidrológica	298
3.5. Condición inicial o previa de humedad del suelo	299
3.6. Tablas del número de curva	301
3.7. Obtención de la escorrentía superficial	305
4. ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA A PARTIR DE DATOS DE CAMPO	308
5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MÉTODO.....	309

1. INTRODUCCIÓN

El método del número de curva, o de los complejos hidrológicos, es un modelo conceptual de pérdidas de precipitación, cuyo objetivo es calcular la precipitación neta o escorrentía generada por un aguacero en una cuenca de pequeñas dimensiones (Martínez de Azagra, 1995b; López Alonso, 2001; Mishra & Singh, 2003). Ha sido desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) –llamado desde 1994 *National Resources Conservation Service* (NRCS)- del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para cuencas no aforadas en las que se deseen estimar los caudales circulantes por métodos hidrometeorológicos. La primera versión apareció en el *National Engineering Handbook* del SCS en 1954, habiéndose publicado revisiones posteriores hasta 1997 (NRCS, 1997), y versiones de ámbito reducido para usos del suelo y vegetación locales (Ponce, 2003a). Existe, asimismo, una adaptación a cuencas urbanas (SCS, 1986).

2. DESARROLLO DEL MODELO

El modelo se asienta en dos hipótesis generales formuladas a partir de un gran número de exámenes de la escorrentía directa con respecto a la precipitación caída en cuencas naturales. Estas hipótesis son:

1^a) La escorrentía superficial se inicia una vez alcanzado un cierto umbral de escorrentía, denominado P_0 .

2^a) El cociente entre la retención de agua real y la retención máxima es igual al cociente entre la escorrentía directa y la escorrentía superficial máxima:

$$\frac{\text{retención real de agua}}{\text{retención máxima}} = \frac{\text{escorrentía superficial real}}{\text{escorrentía superficial máxima}}$$

Los conceptos que intervienen en esta definición se explican seguidamente:

- La retención real de agua (R_r) es la parte de la precipitación caída que no escurre, o lo que es lo mismo, el agua que se infiltra una vez alcanzado el umbral de escorrentía:

$$R_r = P - E_s - P_0$$

Esta expresión tiene su origen en la ecuación de continuidad (véase la figura III.1):

$$P = Q + P_0 + R_r$$

siendo:

P = Precipitación del aguacero (mm). Si el episodio de lluvia tiene una duración superior a 24 horas debe ser dividido en precipitaciones diarias; en tal caso hay que variar las condiciones previas de humedad diariamente.

$Q = E_S$ = Escorrentía superficial real (mm).

P_0 = Umbral de escorrentía previa al encharcamiento, es decir, la cantidad de agua necesaria para que se inicie la escorrentía superficial (mm). P_0 se corresponde con la cantidad inicial de agua retenida por intercepción, embalse superficial e infiltración antes de iniciarse la escorrentía.

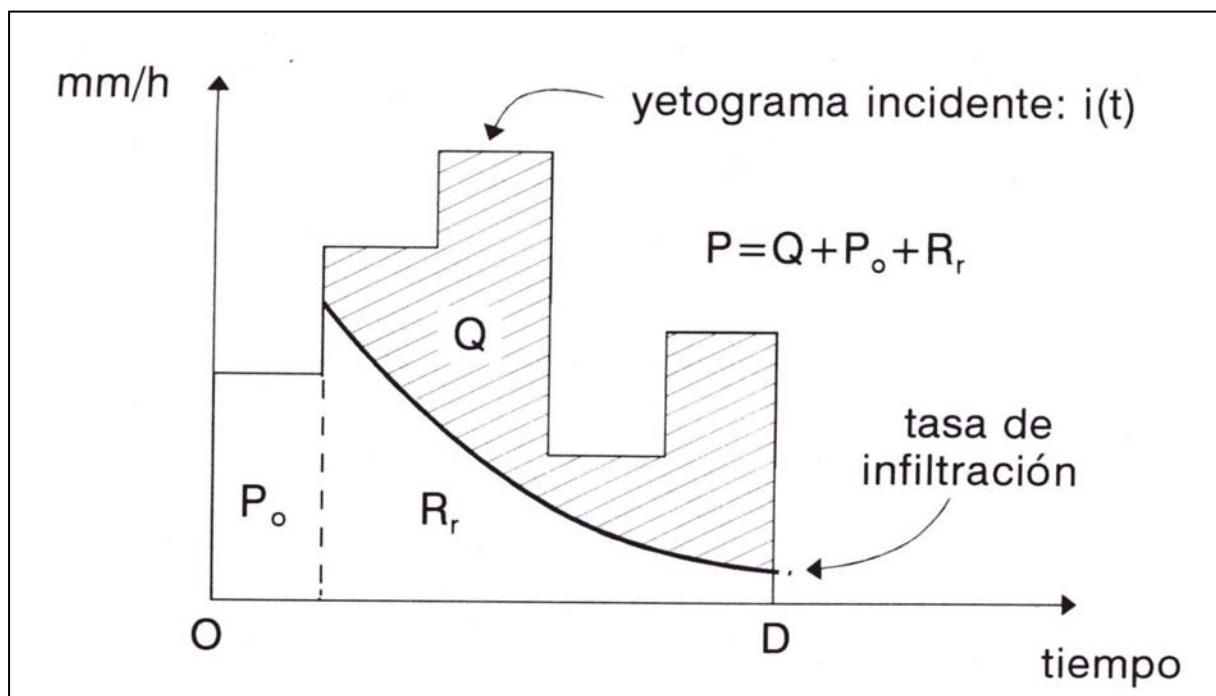


Figura III.1. Interpretación física de las variables que considera el modelo del número de curva

- La retención máxima posible (S) es un parámetro del modelo que depende del tipo de suelo, de su humedad inicial antes del aguacero, de la vegetación que sustenta y del tratamiento cultural que se realice. Representa el potencial máximo de retención de agua que tiene el complejo suelo-vegetación analizado.

- Escorrentía superficial real ($E_S = Q$).
- Escorrentía superficial máxima ($P - P_0$) es lo que llueve menos el umbral de escorrentía (extracciones iniciales que son inevitables de acuerdo con el modelo).

Con la nomenclatura establecida, la segunda hipótesis queda así:

$$\frac{R_r}{S} = \frac{P - Q - P_0}{S} = \frac{Q}{P - P_0}$$

Por lo tanto:

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{P - P_0 + S}$$

Con la obligación de que siempre se ha de cumplir:

$$Q \leq P - P_0$$

$$R_r \leq S$$

En su versión original, el método del número de curva es un modelo biparamétrico, siendo P_0 y S sus dos parámetros. Despues de numerosas experiencias, el USDA. una relación entre P_0 y S , a saber:

$$P_0 = 0,2 \cdot S \quad \text{ó bien,} \quad S = 5 \cdot P_0$$

mediante la cual se llega a la conocida ecuación del método del número de curva (en su versión uniparamétrica):

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$

La relación entre P_0 y S puede interpretarse como que el 20 % de la retención máxima posible es equivalente al umbral de escorrentía. El 80 % restante se produce por infiltración una vez que ha comenzado la escorrentía y siempre que el aguacero sea "suficientemente largo" (el ajuste del modelo se ha hecho con datos de precipitaciones diarias).

3. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO

El parámetro P_0 (o S) se determina mediante la utilización de unas tablas. En ellas se ofrece un número adimensional (N), denominado número de curva, que puede tomar valores comprendidos entre 0 y 100:

- $N = 0$, si la cuenca o el terreno es tan permeable que no escurre agua ante ningún aguacero (esta es una situación extrema, imposible en la práctica).
- $N = 100$, si la cuenca es totalmente impermeable, es decir, que escurre todo lo que llueve, como en el caso de superficies de agua, tejados o carreteras asfaltadas.

A mayor N , mayor escorrentía superficial cabe esperar ante un mismo aguacero.

La relación entre P_0 (o S) y N es la siguiente:

$$S = \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} \quad (\text{mm})$$

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

Para el caso de cuencas o terrenos heterogéneos (con diferentes usos del suelo, tipos de suelo o condiciones hidrológicas) hay que efectuar una ponderación para obtener el número de curva correspondiente a la cuenca en conjunto. Para ello se divide la cuenca en complejos hidrológicos (superficies con características hidrológicas homogéneas), asignando a cada una de estas superficies (S_i) el número hidrológico más apropiado (N_i). El número de curva promedio de la cuenca (N) se calcula ponderando según superficies:

$$N = \frac{\sum N_i \cdot S_i}{S}$$

siendo:

S_i = Superficie de la cuenca a la que corresponde un número hidrológico N_i .
 S = Superficie total de la cuenca.

* * * * *

El número de curva de una zona depende del tipo de suelo, de la cubierta vegetal, de la forma de explotación o tratamiento del terreno, de sus condiciones hidrológicas y del grado de humedad del terreno al comienzo del aguacero a analizar. Todos estos parámetros, que son los que se contemplan en las tablas desarrolladas por el SCS (véase la tabla III.6), se detallan en los epígrafes siguientes.

3.1. TIPOS DE SUELO

El método establece cuatro tipos o grupos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico (NRCS, 2002):

- 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 arenolimosa). El nivel freático debe quedar a una profundidad mayor de 150 cm permanentemente.
- 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). El nivel freático debe quedar permanentemente a una profundidad mayor de 60 cm.
- 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 presenten horizontes someros bastante impermeables. El nivel freático se encuentra siempre a una profundidad mayor de 60 cm.
- 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 (a una profundidad menor de 60 cm).

Además de estas descripciones, para conocer a qué grupo corresponde un suelo se puede hallar su tasa de infiltración mínima (f_{min}) o su conductividad hidráulica a saturación (k), y después acudir a la clasificación de la tabla III.1.

Para obtener f_{min} de forma directa hay que realizar un ensayo de infiltración prolongado hasta que la tasa de infiltración se estabilice (generalmente varias horas), mediante un equipo consistente en un infiltrómetro de doble anillo o mediante un simulador de lluvia. Otro método consiste en obtener la conductividad hidráulica a saturación (k) con un permeámetro a partir de una muestra inalterada de suelo o mediante el diagrama de la figura III.2, si se dispone sólo de datos de textura USDA.

La tasa mínima de infiltración resulta inferior a la conductividad hidráulica por las interferencias que provoca el aire confinado en ciertos poros del suelo, lo que Bouwer (1966) (citado por Martínez de Azagra, 1995b) cuantifica en la siguiente expresión:

$$f_{\min} = 0,5 \cdot k$$

Tabla III.1. Tipos de suelo para el método del número de curva, según la tasa mínima de infiltración (f_{\min}) y la conductividad hidráulica a saturación (k); recopilación realizada por Ferrer-Julià *et al.* (2003)

GRUPO	f_{\min} (mm·h ⁻¹)	k (mm·h ⁻¹)		
	SCS (1986)	NRCS (1993)	Nearing <i>et al.</i> (1996)	Porta <i>et al.</i> (1999) y Trueba <i>et al.</i> (2000)
A	7,62 - 11,43	≥180	≥ 28,36	≥ 50
B	3,81 - 7,62	18-180	2,34-16,74	20-50
C	1,27 - 3,81	1,8-18	1-7,4	1-5 y 5-20
D	0,00 - 1,27	≤ 1,8	≤ 0,68	≤ 1

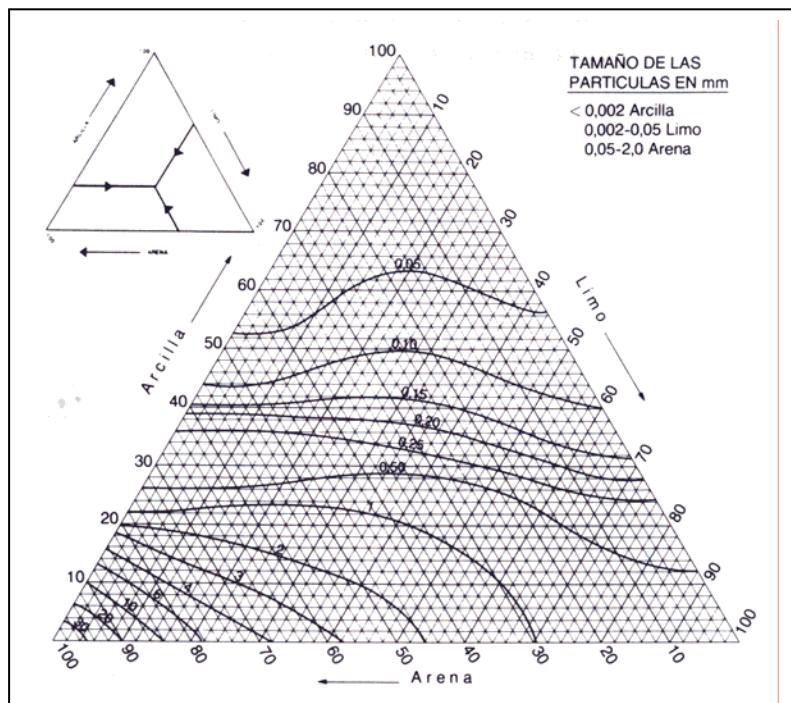


Figura III.2. Diagrama textural para la determinación de la conductividad hidráulica a saturación (k en $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$). Los datos texturales de entrada deben ser los del horizonte menos permeable.

También a partir de la textura de un suelo puede llegar a saberse de forma orientativa el tipo al que corresponde, mediante alguno de los distintos diagramas propuestos (Témez, 1987; MOPU, 1990; MOPT, 1992; Rawls *et al.*, 1993; Ferrer-Julià, 2003) (véanse la tabla III.2 y las figuras III.3 y III.4).

Tabla III.2. Equivalencias entre las clases texturales del USDA y los grupos hidrológicos

TEXTURA	Témez (1987)	MOPU (1990)	MOPT (1992)	Rawls et al. (1993)	Ferrer-Julíà (2003)
Arenosa (A)	A	A	A	A	A
Areno-francosa (AF)	A	A	A-B	A	A
Arcillosa (C)	D	D	D	D	D
Arcillo-arenosa (CA)	C	C	C	D	C
Arcillo-limosa (CL)	D	D	C	D	D
Franca (F)	B	B	C	B	C
Franco-arenosa (FA)	B	B	B	A	B
Franco-arcillosa (FC)	B-C	C	C	D	C
Franco-arcillo-arenosa (FCA)	C	B	C	C	C
Franco-arcillo-limosa (FCL)	D	C	C	D	C
Franco-limosa (FL)	B	B	B	B	C
Limosa (L)	C	C	A	B	D

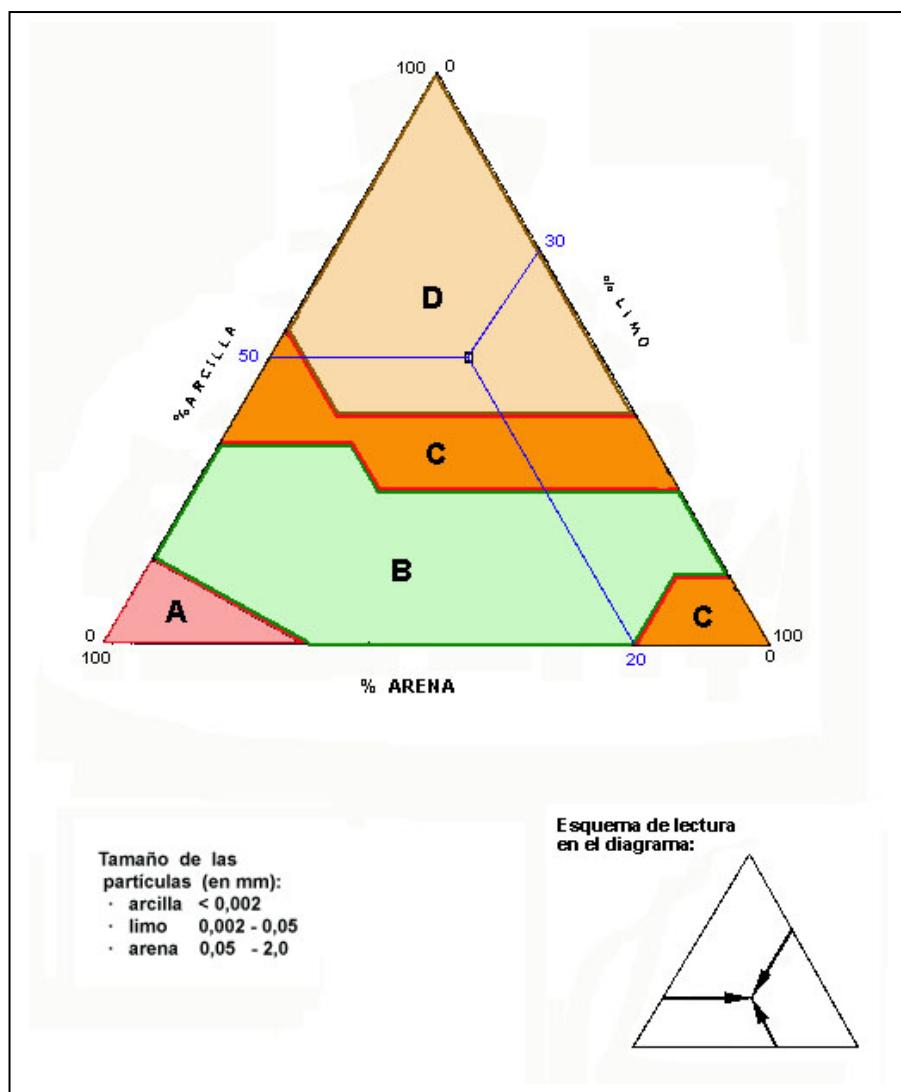


Figura III.3. Diagrama textural para la determinación del tipo de suelo para el método del número de curva; elaboración propia a partir MOPU (1990)

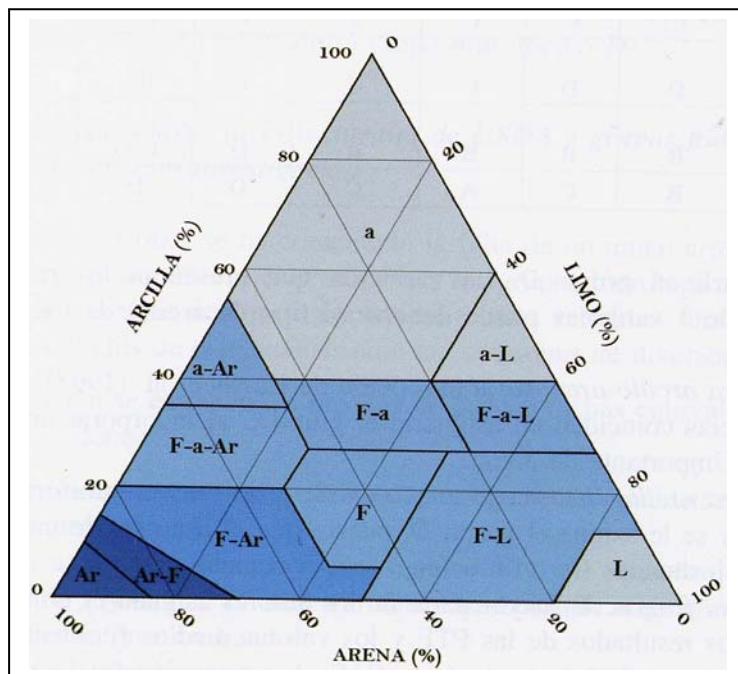


Figura III.4. Diagrama textural para la determinación del tipo de suelo para el método del número de curva (según Ferrer-Julià, 2003)

A nivel práctico, y en todos estos procedimientos para determinar el grupo de suelo, es necesario tener en cuenta estas otras consideraciones:

- No es estrictamente necesario acudir a ensayos directos de infiltración o permeabilidad. Los métodos simplificados propuestos son suficientemente precisos para los fines perseguidos.
- El horizonte a considerar dentro del perfil debe ser siempre el más impermeable.
- La presencia de pedregosidad en el perfil facilita la infiltración.
- En sentido contrario actúan las costras o tastanas, que reducen considerablemente 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 tipo D aunque su textura apunte en otra dirección.
- 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 (con profundidad comprendida entre 30 y 50 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 III.3, 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 III.3. Grupos hidrológicos de suelos según las definiciones del NRCS; modificada de López Alonso (2001)

SUELO	CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN CON HUMEDAD ELEVADA	TASA DE INFILTRACIÓN (mm·h ⁻¹)	PROFUNDIDAD	TEXTURA	DRENAJE
A	Alta	7,62-11,43	Elevada	Arenosa Areno-limosa	Muy bueno
B	Moderada	3,81-7,62	Mediana a elevada	Franca-arenosa Franca Franco-arcillosa-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

3.2. TIPOS DE CUBIERTA VEGETAL O USOS DEL SUELO

Consiste en la identificación de la cubierta vegetal o uso del suelo existentes en la ladera estudiada con un tipo de vegetación o uso considerados en el método de los números hidrológicos. En la tabla III.6, se han diferenciado catorce tipos de vegetación o uso (Martínez de Azagra & Navarro, 1996), a saber:

- 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 e incluso en aterrazados. 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 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 aterrazados 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 según curvas de nivel.
- 7) **Prados permanentes.**- Este tipo de formaciones no son pastadas, es decir, su vegetación es permanente, cubriendo el 100 % de la superficie del terreno. Su aprovechamiento es por siega para henificado.
- 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 40 %), *regular* (del 50 % al 75 % de la cubierta vegetal) y *buena* (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 que, protegidos del pastoreo, el terreno aparece cubierto de matas abundantes, pastos naturales y restos orgánicos de toda clase.

En la tabla más reciente del número de curva (SCS, 1991; Mishra & Singh, 2003) esta categoría pasa a denominarse “bosques”, sustituyendo al tipo de vegetación que se describe a continuación.

- 11) **Bosques.**- La versión de la tabla del número de curva adaptada al español por Martínez de Azagra & Navarro (1996) establece cinco clases hidrológicas para los bosques (véase la tabla III.6), 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 el empleo de un nomograma creado por Morey (1955), citado por Udall & Dominy (1966), y que se inserta en la figura III.5.

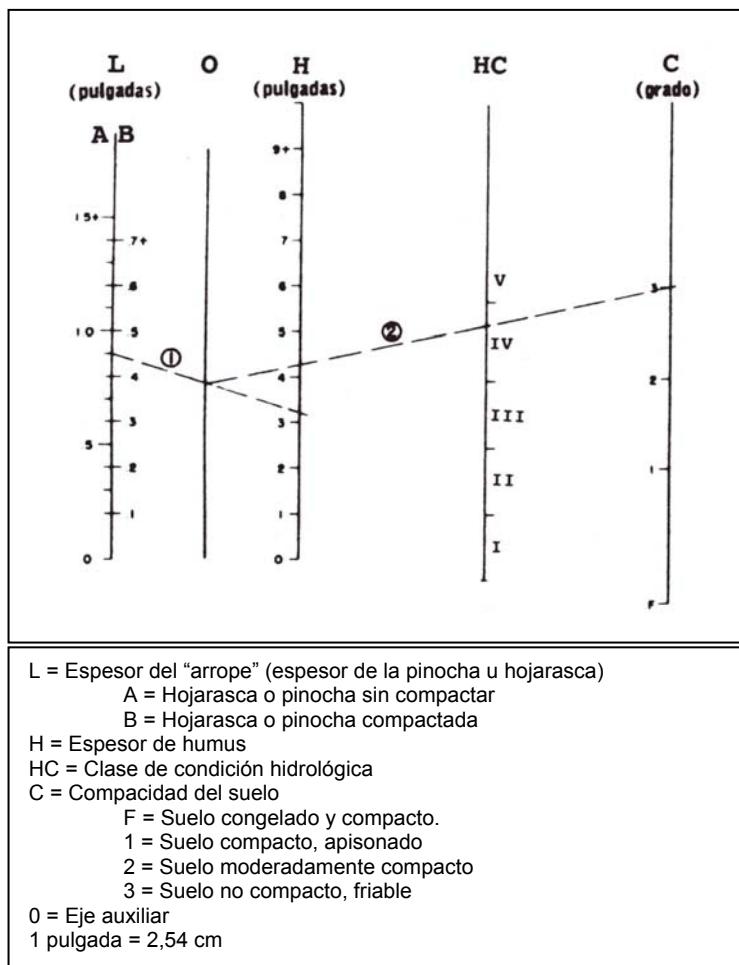
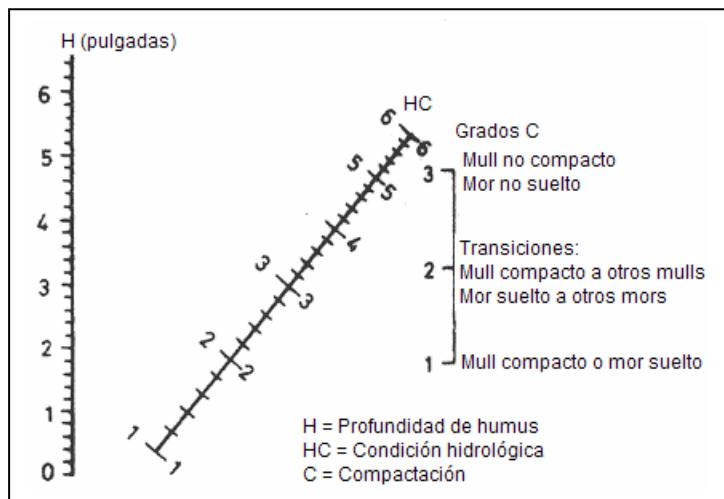


Figura III.5. Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de un bosque; de Morey (1955), citado por Udall & Dominy (1966)

Si se desea afinar un poco más en el número de curva de terrenos forestales, es interesante considerar la definición de seis clases hidrológicas que hace el SCS (1985). Para la determinación de las mismas, se utiliza otro ábaco, que se muestra en la figura III.6.

12, 13 y 14) Caseríos, caminos en tierra y caminos en firme.- Estos tipos de terrenos quedan fuera del objeto de este trabajo. Baste con agregar que existen tablas específicas del número de curva desarrolladas para zonas urbanas (Ponce, 1989; Mishra & Singh, 2003).



3.3. TRATAMIENTO O FORMA DE EXPLOTACIÓN

La forma de explotación del terreno condiciona en gran medida la elección del número de curva. Los casos que contempla el método son las 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 (labrado, gradeo, siembra, etc.) en línea recta sin considerar la pendiente del terreno (R).
- Cultivo según curvas de nivel (C).
- Terrenos aterrazados (terrazas abiertas con desagües para la conservación del suelo) (T).

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

3.4. CONDICIÓN HIDROLÓGICA

La condición hidrológica de un terreno agrícola (para los forestales ya se visto con anterioridad) 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
- Porcentajes de residuos vegetales cubriendo la superficie del suelo (valores superiores al 20 % implican una buena condición hidrológica del suelo)
- Grado de rugosidad superficial

En conclusión, 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.

3.5. CONDICIÓN INICIAL O PREVIA DE HUMEDAD DEL SUELO

Se refiere a la condición de humedad que tiene el suelo justo antes del aguacero que se pretende analizar. El modelo distingue tres situaciones diferentes:

- Condición II.- El suelo está en condición de humedad media, alejado de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente. Los números de curva que figuran en las tablas se refieren a esta situación. La ponderación del número de curva según superficies a la que se hizo alusión anteriormente debe realizarse siempre en esta condición.
- Condición I.- El suelo está muy seco pero sin llegar al punto de marchitez. Suele ser la situación ideal para realizar las labores agrícolas.
- Condición III.- El suelo se encuentra muy húmedo, saturado o próximo a la saturación. También es aplicable a suelos algo húmedos pero que estén helados.

Estas condiciones de humedad vienen definidas por las siguientes consideraciones estadísticas: “en el 10 % de las ocasiones suelo más húmedo”, define la condición III; “en el 50 % de las ocasiones suelo más húmedo”, define la condición II; y “en el 10 % de las ocasiones suelo más seco”, define la condición I.

La determinación de las condiciones previas de humedad se realiza en función de la precipitación acumulada en los cinco días previos al aguacero (120 horas antes). También se distingue entre el periodo vegetativo y el de reposo. Todo ello queda resumido en la tabla III.4.

Tabla III.4. Determinación de las condiciones iniciales de humedad, para la aplicación del método del número de curva

CONDICIÓN	LLUVIA TOTAL DURANTE LOS CINCO DÍAS ANTERIORES	
	Reposo vegetativo	Periodo vegetativo
I	menos de 12,5 mm	menos de 35,5 mm
II	de 12,5 a 28 mm	de 35,5 a 53 mm
III	más de 28 mm	más de 53 mm

El cambio desde la condición II a las otras dos situaciones de humedad puede hacerse mediante las ecuaciones:

$$N(I) = \frac{4,2 \cdot N(II)}{10 - 0,058 \cdot N(II)}$$

$$N(III) = \frac{23 \cdot N(II)}{10 + 0,13 \cdot N(II)}$$

Ponce & Hawkins (1996) propone unas ecuaciones similares para el paso de la condición II a las otras dos situaciones de humedad:

$$N(I) = \frac{N(II)}{2,281 - 0,01281 \cdot N(II)}$$

$$N(III) = \frac{N(II)}{0,427 + 0,00573 \cdot N(II)}$$

La tabla III.5 también permite la transformación de una condición de humedad en otra.

Tabla III.5. Conversión del número de curva según las diferentes condiciones de humedad (I, II y III)

N (II)	N (I)	N (III)
100	100	100
99	97	100
98	94	99
97	91	99
96	89	99
95	87	98
94	85	98
93	83	98
92	81	97
91	80	97
90	78	96
89	76	96
88	75	95
87	73	95
86	72	94
85	70	94
84	68	93
83	67	93
82	66	92
81	64	92
80	63	91
79	62	91
78	60	90
77	59	89
76	58	89
75	57	88
74	55	88
73	54	87

N (II)	N (I)	N (III)
72	53	86
71	52	86
70	51	85
69	50	84
68	48	84
67	47	83
66	46	82
65	45	82
64	44	81
63	43	80
62	42	79
61	41	78
60	40	78
59	39	77
58	38	76
57	37	75
56	36	75
55	35	74
54	34	73
53	33	72
52	32	71
51	31	70
50	31	70
49	30	69
48	29	68
47	28	67
46	27	66
45	26	65

N (II)	N (I)	N (III)
44	25	64
43	25	63
42	24	62
41	23	61
40	22	60
39	21	59
38	21	58
37	20	57
36	19	56
35	18	55
34	18	54
33	17	53
32	16	52
31	16	51
30	15	50
.	.	.
25	12	43
.	.	.
20	9	37
.	.	.
15	6	30
.	.	.
10	4	22
.	.	.
5	2	13
.	.	.
0	0	0

3.6. TABLAS DEL NÚMERO DE CURVA

El modelo de los números hidrológicos ofrece unas tablas generales, de las que existen diferentes versiones, para la determinación del número de curva. Una de las versiones más conocidas es la que recoge Ponce (1989), que es básicamente coincidente con la del SCS (1991). Más recientemente Mishra & Singh (2003) han publicado otra tabla más completa, que distingue entre terrenos urbanos, agrícolas y forestales (entre los que se incluyen las formaciones vegetales de zonas áridas y semiáridas).

Una de las adaptaciones al español más recientes se debe a Martínez de Azagra & Navarro (1996), que se muestra en la tabla III.6. Esta tabla, muy similar a las mencionadas anteriormente, tiene la diferencia de dar mayor importancia a los bosques, estableciendo para ellos las cinco clases hidrológicas de las que se ha hablado en un apartado anterior, y que fueron definidas por Morey (1955).

Tabla III.6. Determinación del número de curva en condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$; según Martínez de Azagra & Navarro (1996)

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
	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	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

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

Tabla III.6. (Continuación). Determinación del número de curva en condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$; según Martínez de Azagra & Navarro (1996)

TIPO DE VEGETACIÓN	TRATAMIENTO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
			A	B	C	D
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 pobres	56	75	86	91
	-	II Pobres	46	68	78	84
	-	III Regulares	36	60	70	76
	-	IV Buenas	26	52	63	69
	-	V Muy buenas	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos en firme	-	-	74	84	90	92

C = En curvas de nivel

Para el caso de los bosques, y si se ha determinado su condición hidrológica según SCS (1985), es decir de la clase 1 a la 6, el número de curva puede también fijarse mediante el ábaco de la figura III.7 (Mishra & Singh, 2003).

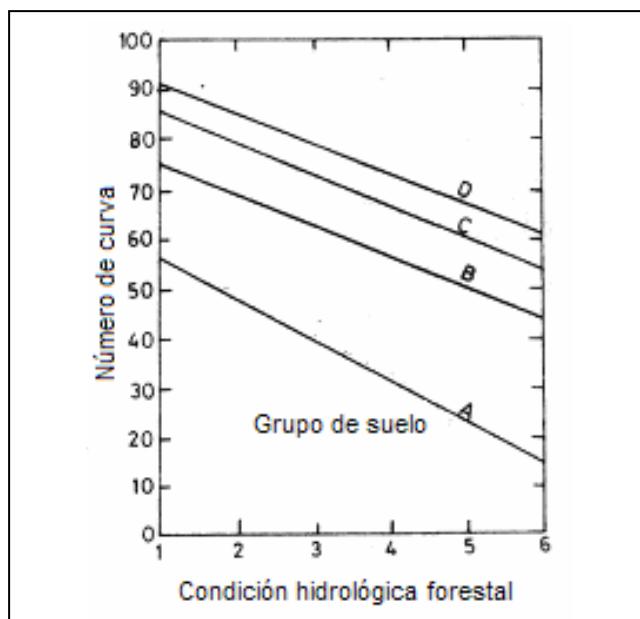


Figura III.7. Ábaco para determinar el número de curva de bosques, en base al tipo de suelo y su condición hidrológica (Mishra & Singh, 2003)

Utilizando la tabla general, el método del número de curva se desajusta en zonas áridas y subdesérticas, por lo que el SCS (1991) ha desarrollado una tabla específica para estas regiones, que ha sido también adaptada al español por Martínez de Azagra & Navarro (1996) y puede observarse en la tabla III.7.

Tabla III.7. 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 & Navarro (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:	
<u>Tipo 2</u>	<u>Tipo 4</u>
<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> 	<ul style="list-style-type: none"> - "Sagebrush" = <i>Artemisia tridentata</i>
<u>Tipo 3</u>	<u>Tipo 5</u>
<ul style="list-style-type: none"> - "Pinyon" = <i>Pinus edulis</i> y <i>Pinus monophylla</i> - "Juniper" = <i>Juniperus osteosperma</i> 	<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.
El significado de los adjetivos de la condición hidrológica es:	
<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 %. 	
* Valores añadidos por Smith & Maidment (1995)	

Para este tipo de formaciones vegetales se han desarrollado también unos ábacos que permiten determinar de manera rápida el número de curva (Mishra & Singh, 2003). Estos ábacos se muestran en la figura III.8.

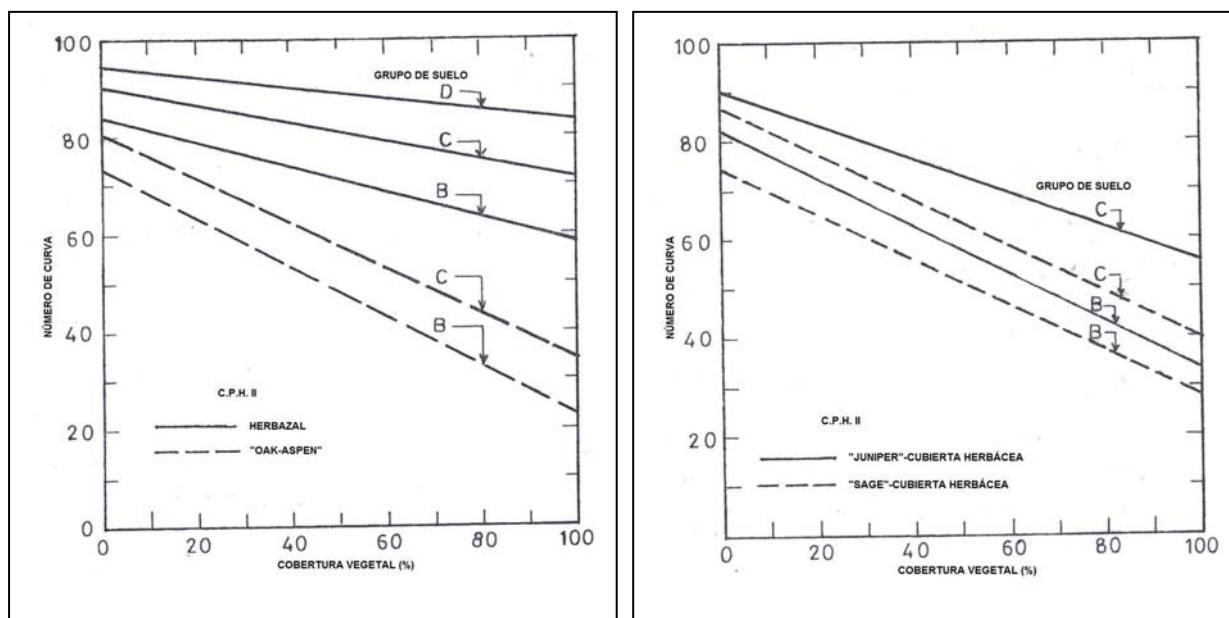


Figura III.8. Ábacos para la estimación del número de curva para formaciones vegetales típicas de zonas áridas de Estados Unidos (Mishra & Singh, 2003)

Martínez de Azagra & Navarro (1996) proponen 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 III.8).

Tabla III.8. Correspondencia entre las asociaciones vegetales americanas y españolas en la determinación del número de curva para zonas áridas y subdesérticas (según Martínez de Azagra & Navarro, 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>P. 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>

Finalmente, Témez (1987) ha adaptado una tabla del número de curva a los suelos españoles, pero expresada por medio del umbral de escorrentía (P_0) (también puede consultarse en Martínez de Azagra & Navarro, 1996). Ferrer-Julià (2003),

transforma esos valores nuevamente a números de curva, y el resultado se muestra en la tabla III.9.

Tabla III.9. Valores del número de curva a partir de los umbrales de escorrentía de Témez (1987); según Ferrer-Julià (2003)

USO DEL SUELO	PENDIENTE (%)	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	TIPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	R	77	86	89	93
	< 3	N	75	82	86	89
Cultivos en hileras	≥ 3	R	72	78	82	86
	< 3	N	69	80	86	89
Cereales de invierno	≥ 3	R	67	76	82	86
	< 3	N	64	73	78	82
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	64	75	84	86
	< 3	N	61	73	81	84
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	60	71	78	81
	< 3	N	66	77	85	89
Praderas	≥ 3	R/N	64	75	82	86
	< 3	R/N	63	73	80	84
Pobres	≥ 3	R	58	72	81	85
	< 3	N	55	69	78	82
Media	≥ 3	R	52	67	76	80
	< 3	N	68	78	86	89
Buenas	≥ 3	R	49	69	78	85
	< 3	N	42	61	74	80
Muy buenas	≥ 3	R	42	55	70	77
	< 3	N	39	55	70	77
Pobres	≥ 3	Pobre	47	67	81	88
	< 3	N	47	67	81	88
Medias	≥ 3	Pobre	39	59	75	84
	< 3	N	39	59	75	84
Buenas	≥ 3	Pobre	30	48	70	78
	< 3	N	30	48	70	78
Muy buenas	≥ 3	Pobre	17	34	67	76
	< 3	N	17	34	67	76
Pobres	≥ 3	Medio	45	66	77	84
	< 3	N	45	66	77	84
Medias	≥ 3	Bueno	39	60	73	78
	< 3	N	39	60	73	78
Buenas	≥ 3	Pobre	34	55	70	77
	< 3	N	34	55	70	77
Muy buenas	≥ 3	Medio	40	60	73	78
	< 3	N	40	60	73	78
Buenas	≥ 3	Bueno	35	55	70	77
	< 3	N	35	55	70	77
Muy buenas	≥ 3	Pobre	25	60	67	76
	< 3	N	25	60	67	76
Muy claras	≥ 3	Medio	56	75	86	91
	< 3	N	56	75	86	91
Claras	≥ 3	Bueno	46	68	78	84
	< 3	N	46	68	78	84
Medias	≥ 3	Pobre	40	60	70	76
	< 3	N	40	60	70	76
Espesas	≥ 3	Medio	36	52	62	69
	< 3	N	36	52	62	69
Muy espesas	≥ 3	Bueno	30	44	54	61
	< 3	N	30	44	54	61
Rocas permeables	≥ 3	Pobre	94	94	94	94
	< 3	N	94	94	94	94
Rocas impermeables	≥ 3	Medio	91	91	91	91
	< 3	N	91	91	91	91

R = Cultivo en líneas de máxima pendiente; N = Cultivo siguiendo curvas de nivel

3.7. OBTENCIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Una vez fijado el número de curva (N), puede obtenerse de forma inmediata la escorrentía superficial generada por una precipitación (siendo esta precipitación mayor que el umbral de escorrentía), bien utilizando el ábaco de la figura III.9 ó bien mediante las ecuaciones:

- Umbral de escorrentía

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

- Escorrentía

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad (\text{mm})$$

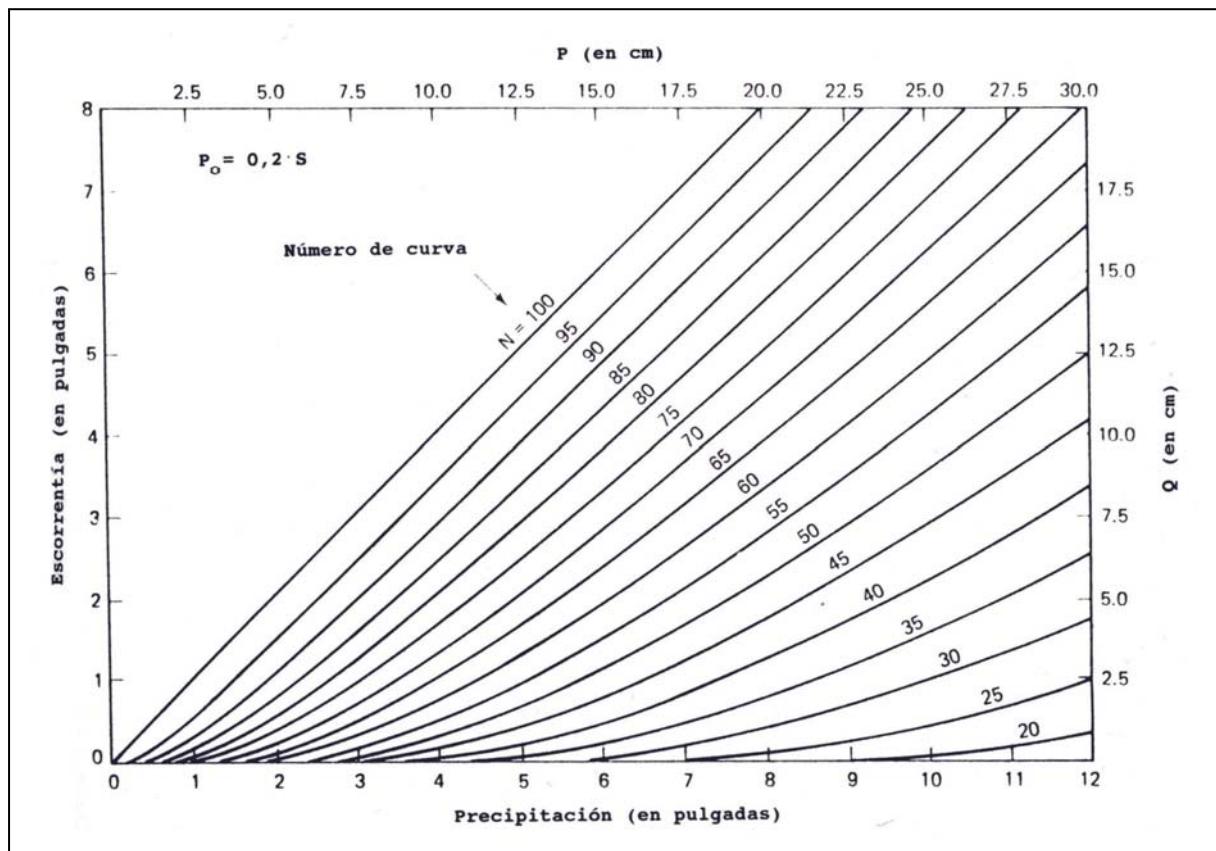


Figura III.9. Ábaco para la obtención de la escorrentía superficial. Se entra en abscisas con la precipitación del aguacero y se traza una vertical hasta alcanzar la curva correspondiente al número hidrológico hallado. Este nivel indica la escorrentía superficial generada, dato que se lee en la escala de ordenadas.

En resumen, el procedimiento a seguir en el cálculo de la escorrentía es el siguiente:

- 1) Subdividir la cuenca en subcuenca homogéneas o unidades hidrológicas menores, con diferentes tipos de suelo o usos del terreno.
- 2) Identificar el uso del suelo, tratamiento y tipo de suelo en cada unidad.
- 3) Determinar la superficie que corresponde a cada unidad.

- 4) Buscar el número de curva de cada unidad en la tabla correspondiente.
- 5) Multiplicar los valores de número de curva por el respectivo porcentaje superficial de cada unidad. Si se suman los números de curva de todas las unidades se obtiene el número de curva ponderado en condición previa de humedad II.
- 6) Determinar la condición previa de humedad.
- 7) Revisar el número de curva ponderado en función de la condición previa de humedad.
- 8) Calcular el umbral de escorrentía (P_0) y la escorrentía (Q) mediante las ecuaciones anteriores.

Escorrentía superficial acumulada

El modelo del número de curva, en principio, no hace intervenir al tiempo, aunque el ajuste se haya realizado con precipitaciones diarias. Esto no impide que con este modelo se pueda obtener la escorrentía superficial acumulada (o lluvia neta acumulada) desde el comienzo del aguacero hasta un instante dado, ya que:

$$\sum Q = \frac{[\sum P - P_0]^2}{\sum P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } \sum P > P_0$$

siendo:

$\sum Q$ = Escorrentía superficial acumulada

$\sum P$ = Precipitación acumulada (que se determina a partir del pluviograma).

Para obtener la escorrentía o lluvia neta de un determinado intervalo habrá de restarse $\sum Q(t+1)$ de $\sum Q(t)$.

Tasa de infiltración

De manera implícita, el modelo considera una tasa de infiltración variable con el tiempo y que tiende de forma asintótica a cero si el aguacero dura indefinidamente. En el desarrollo conceptual del método se define la retención real de agua (R_r) como la cantidad de agua que se infiltra en el terreno una vez se ha alcanzado el umbral de escorrentía (P_0):

$$R_r = P - Q - P_0$$

Por otra parte y según la segunda hipótesis del modelo:

$$\frac{R_r}{S} = \frac{Q}{P - P_0}$$

De la combinación de ambas ecuaciones, resulta que:

$$R_r = \frac{S \cdot (P - P_0)}{P - P_0 + S}$$

Si se deriva teniendo en cuenta que P_0 y S son constantes para un aguacero, se obtiene:

$$\frac{dR_r}{dt} = \frac{S^2 \cdot \frac{dP}{dt}}{(P - P_0 + S)^2}$$

Esta ecuación puede interpretarse como la función explícita de la tasa de infiltración del modelo. Se observa que si la precipitación tiende a infinito, la tasa de infiltración (o de retención, dR_r/dt) tiende a cero. Esto resulta coherente con las bases del método, ya que la retención máxima posible (S) quedará satisfecha en semejante episodio de lluvia.

$$\lim_{P \rightarrow \infty} \frac{dR_r}{dt} = 0$$

Finalmente, al aumentar la intensidad de lluvia (dP/dt) la tasa de retención real de agua en la cuenca aumenta, situación que no parece tener una buena justificación física (Martínez de Azagra, 1995b).

4. ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA A PARTIR DE DATOS DE CAMPO

El número de curva (N), la retención máxima posible (S) o el umbral de escorrentía (P_0), se pueden estimar si se conoce un número suficiente y

representativo de pares de valores de precipitación y escorrentía (P_i, Q_i) ocurridos en la cuenca o terreno a estudiar.

Una primera forma consiste en situar todas las parejas de valores en una gráfica auxiliar y hallar el centro de gravedad de la nube de puntos resultante. Su situación nos permite determinar el valor del número de curva (en condición II) de la cuenca o terreno estudiado. Otra opción es la de determinar directamente de la nube de puntos los tres números de curva asociados ($N(I)$, $N(II)$, $N(III)$), tal y como se hace en la figura III.10: $N(II)$ define una curva que separa la nube de puntos en dos porciones iguales, $N(I)$ define la envolvente inferior y $N(III)$ la envolvente superior.

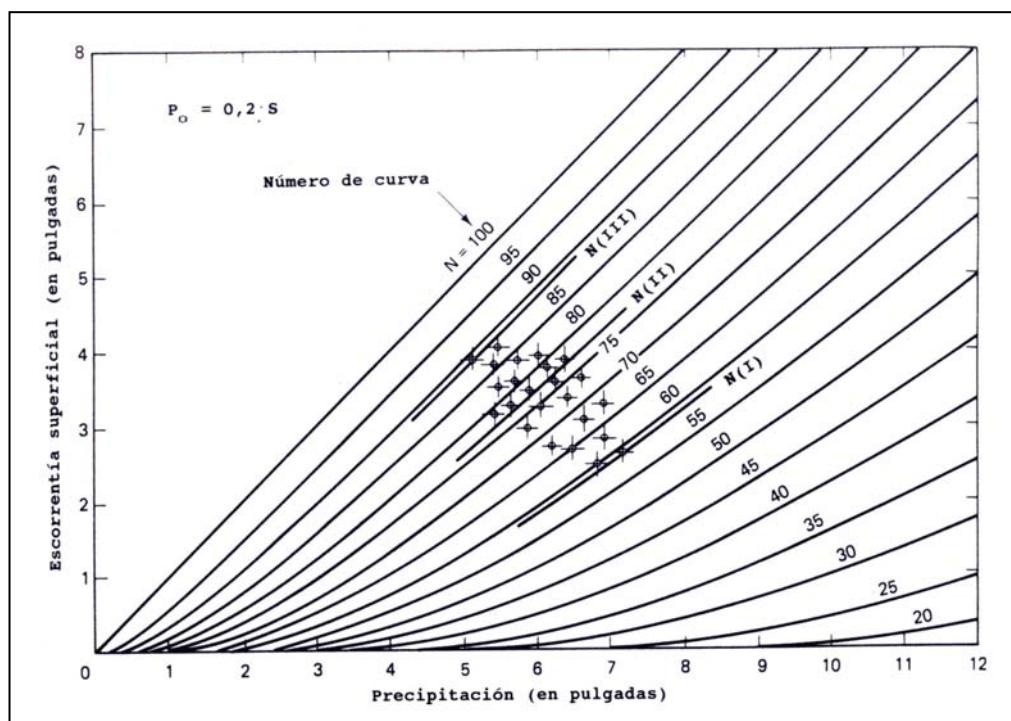


Figura III.10. Determinación del número de curva mediante pares de valores de precipitación y escorrentía

En el método analítico se impone que la varianza del error relativo cometido (diferencia entre la escorrentía estimada y la escorrentía medida) sea mínima. Este cálculo puede realizarse para todo el conjunto de parejas de valores, en cuyo caso se obtiene $N(II)$, o bien se puede dividir el conjunto de datos en tres grupos (según fueran las condiciones previas de humedad al inicio de cada aguacero) para después realizar el cálculo antes mencionado, con lo que se obtienen los tres números de curva asociados ($N(I)$, $N(II)$, $N(III)$).

5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MÉTODO

Como es lógico, el método del número de curva tiene defectos y virtudes que pueden resumirse en los siguientes puntos (Martínez de Azagra, 1995b; Ponce &

Hawkins, 1996; Castillo *et al.*, 1997; López Alonso, 2001; Mishra & Singh, 2003; Ferrer-Julià, 2003):

a) Ventajas

- Su uso es sencillo.
- La información necesaria para la obtención del número de curva puede obtenerse fácilmente. Quizás lo más complejo sea determinar el tipo de suelo, puesto que para Estados Unidos está muy bien estudiado pero no para el resto del mundo.
- Es un método muy empleado en cuencas no aforadas por ofrecer datos suficientemente fiables y precisos.
- Considera los principales factores que regulan el fenómeno de la escorrentía.
- Tiene un buen ajuste a infinidad de datos experimentales que contemplan la práctica totalidad de las situaciones posibles.
- Se incluye en muchos programas informáticos que realizan cálculos hidrológicos.
- Al estar el parámetro basado en información de uso del suelo se pueden evaluar los impactos o variaciones producidos por futuros escenarios.
- Es un método muy difundido y utilizado, por lo que con frecuencia aparecen publicaciones que actualizan o complementan el método.

b) Inconvenientes

- Es un modelo empírico cuyas hipótesis de partida no están plenamente justificadas desde el punto de vista físico. Las simplificaciones del método con respecto al proceso real se hacen sobre todo patentes al comprobar que no considera ni la intensidad ni la duración del aguacero, como se ha visto anteriormente.
- Las simplificaciones y empirismo del método lo hacen poco adecuado para la predicción de la infiltración originada por un aguacero, aunque sirve como primera aproximación.
- Existen problemas de escala, tanto temporal como espacial. Esto es debido a que el ajuste del modelo se ha hecho con datos de tormentas de larga duración (diarias) e intensidad apreciable, y para cuencas vertientes pequeñas pero de al menos varios kilómetros cuadrados. Se recomienda no utilizar el método para cuencas mayores de 250 km².
- El método ha sido desarrollado con datos del medio oeste de Estados Unidos, por lo que su utilización en otras partes del mundo requiere una adaptación de las tablas a las condiciones locales.

- Los números de curva representan una condición media de datos recogidos, y deben aplicarse fundamentalmente a aguaceros de diseño. Cuando se aplican a aguaceros reales puede disminuir mucho la precisión, puesto que el episodio de lluvia puede situarse en una posición extrema respecto a la media.
- Errores del mismo nivel en la estimación del número de curva y de la precipitación influyen de diferente manera en la escorrentía. Concretamente el error en el número de curva tiene mayor efecto sobre la lluvia neta.
- La relación entre el umbral de escorrentía y la retención máxima posible que propone el método ($P_0 = 0,2 \cdot S$) sólo se cumple para condiciones iguales a las que originaron los datos con los que se realizó el ajuste (cuencas agrícolas menores de 10 acres). Por eso será conveniente verificar esa igualdad y –en su caso- establecer otro tipo de relación en cada medio particular.
- El método funciona bien en cuencas agrícolas y urbanas, pero los resultados son mediocres para pastizales y malos en cuencas forestales boscosas.

La explicación a esta última circunstancia se encuentra en que la base empírica para la confección de las tablas corresponde a eventos con predominio de flujo superficial hortoniano, sin eventos influenciados por el flujo subsuperficial. Sin embargo, este flujo subsuperficial sí afecta a las cuencas forestales, que tienen un número de curva pequeño y suelos muy permeables de tipo A, donde la precipitación no suele ser mayor que la capacidad de infiltración. En estas condiciones el hidrograma de respuesta al aguacero es generado por flujo superficial por saturación, por flujo subsuperficial que originado en las partes altas de las laderas aparece en superficie en los contornos de la red de drenaje, o por flujo subterráneo.

Aunque teóricamente podrían llegar a 0, las tablas más recientes del número de curva no recogen valores menores de 25, correspondientes a bosques con suelo tipo A y condiciones hidrológicas muy buenas. En cuencas con número de curva menor de 40, se recomienda utilizar el método con precaución y contrastarlo con otros métodos.

- Cuando la cuenca es heterogénea, hay que calcular el número de curva promedio por ponderación de todas las superficies diferentes. Pero esto puede acarrear algunos problemas debido a que el número de curva ponderado puede no representar satisfactoriamente las propiedades de la cuenca. Por ejemplo, se obtiene el mismo resultado para una cuenca muy impermeable en cabecera y muy permeable en las zonas bajas, que para otra cuenca que presente la situación contraria. Este problema puede resolverse mediante la división en subcuenca y la propagación de los hidrogramas generados en cada una.
- La determinación de las condiciones previas de humedad es muy importante. El SCS ha dado varios métodos para determinarlas, debiéndose entender que el más correcto será el más recientemente publicado (y que se ha expuesto anteriormente en el apartado 3.5 de este anexo).

-
- Según el método, cuando las condiciones previas de humedad son secas (condición I), el número de curva es menor para tener en cuenta la mayor capacidad de infiltración que inicialmente tiene el suelo. Sin embargo, en algunos casos (especialmente en ambientes áridos o semiáridos, o después de largos periodos de sequía), las partículas erosionadas por salpicadura o escorrentía pueden formar una costra que reduce de forma considerable la capacidad de infiltración.
 - El principal inconveniente de utilización del método del número de curva en el diseño de sistemas de recogida de agua es de escala. El método ha sido elaborado utilizando datos de al menos varios kilómetros cuadrados. Por este motivo la estimación de la escorrentía en superficies pequeñas, como es una unidad sistematizada, está sujeta a una incertidumbre que sólo el calibrado y la validación del modelo podrán despejar en el futuro.



ANEXO IV:

**ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS
DE SUELO (USLE)**

ÍNDICE DEL ANEXO IV

1. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO	317
2. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA O ÍNDICE DE EROSIÓN PLUVIAL (R)	317
3. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)	320
4. FACTOR TOPOGRÁFICO ($L \cdot S$)	322
5. FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL (C).....	324
6. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS (P).....	326

1. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO

Esta ecuación fue publicada en su versión definitiva por Wischmeier & Smith (1978), aunque contaba con numerosos antecedentes dentro del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Morgan, 1997). La ecuación fue deducida por los mencionados autores a partir de datos obtenidos en más de 10.000 parcelas experimentales de carácter agrícola, y completada posteriormente con más datos experimentales, llegando a la expresión siguiente:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

A = Valor promedio de las pérdidas de suelo anuales ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia y la escorrentía o índice de erosión pluvial ($hJ \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)

K = Factor de erosionabilidad del suelo ($t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$)

L = Factor longitud de la ladera (adimensional)

S = Factor pendiente de la ladera (adimensional)

C = Factor cubierta vegetal o cultivo (adimensional)

P = Factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)

Éste es un modelo paramétrico que estima las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un periodo representativo de años, que se producen en una parcela o superficie de terreno debidas a la erosión superficial, laminar y en regueros, ante unas determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo. Ha sido mal utilizado en muchas ocasiones al ignorarse que su ámbito de aplicación se restringe, como se ha dicho, a la erosión laminar y en regueros, donde el agente principal es la energía cinética de los aguaceros, y que no evalúa otros tipos de erosión como los movimientos en masa, la erosión en cárcavas y barrancos y en cauces (Almorox *et al.*, 1994; Díez-Hernández, 1996; Navarro, 2002).

2. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA O ÍNDICE DE EROSIÓN PLUVIAL (R)

Representa la influencia que tiene sobre la erosión la energía cinética de los aguaceros, disgragando las partículas y removiéndolas por salpicadura, y su intensidad máxima, al originar escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración.

Se define por la siguiente expresión:

$$R = \frac{E \cdot I_{30}}{100}$$

Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia ($\text{hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

I_{30} = Intensidad de lluvia máxima en 30 minutos ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)

E = Energía cinética del aguacero ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$), que se calcula por la siguiente expresión:

$$E = \sum_1^n E_i = \sum_1^n (210,2 + 89 \cdot \log I_i) \cdot (I_i \cdot T_i) \quad \text{y siempre: } E_i \leq 289 \cdot (I_i \cdot T_i)$$

Siendo:

I_i = Intensidad de la lluvia en el intervalo i ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)

T_i = Duración del intervalo de intensidad de lluvia i (h)

n = Número de intervalos de intensidad constante (i_i) en que se divide el aguacero

Debido a que el cálculo de R requiere una información detallada de los aguaceros, se han realizado una serie de ecuaciones de regresión para distintas regiones españolas (véase la figura IV.1), que son las siguientes (ICONA, 1988):

Zona 1:

$$R = e^{-0,834} \cdot PMEX^{1,314} \cdot MR^{-0,388} \cdot F24^{0,563}$$

Zona 2:

$$R = e^{-1,235} \cdot PMEX^{1,297} \cdot MR^{-0,511} \cdot F24^{0,414} \cdot MV^{0,366}$$

Zona 3:

$$R = e^{-0,754} \cdot T2^{1,031} \cdot T10^{-0,828} \cdot F^{0,482} \cdot PMEX^{1,1628} \cdot MR^{-1,22} \cdot MV^{0,536} \cdot F24^{0,8} \cdot e^{(Z7-0,211)} \cdot e^{-(Z9-0,157)}$$

Donde:

$PMEX$ = Valor medio anual de la máxima lluvia mensual (mm)

MR = Precipitación media del periodo octubre-mayo (mm)

F_{24} = Valor medio de los cocientes entre la precipitación máxima en 24 horas de cada año elevada al cuadrado y la precipitación máxima en 24 horas de todos los meses de ese mismo año.

MV = Precipitación media del periodo junio-septiembre (mm)

F = Valor medio del índice de agresividad de la lluvia de Fournier (cociente entre la precipitación del mes más lluvioso del año elevado al cuadrado y la precipitación anual de ese mismo año)

T_2 = Precipitación máxima en 24 horas con periodo de retorno de 2 años

T_{10} = Precipitación máxima en 24 horas con periodo de retorno de 10 años

Z_7 = Murcia (Cuenca Levante costera, Ebro costero, Pirineo oriental costero y Baleares)

Z_9 = Tarragona (Ebro central)

Z_i = 1, si se trata de la zona i , y 0 en las restantes zonas

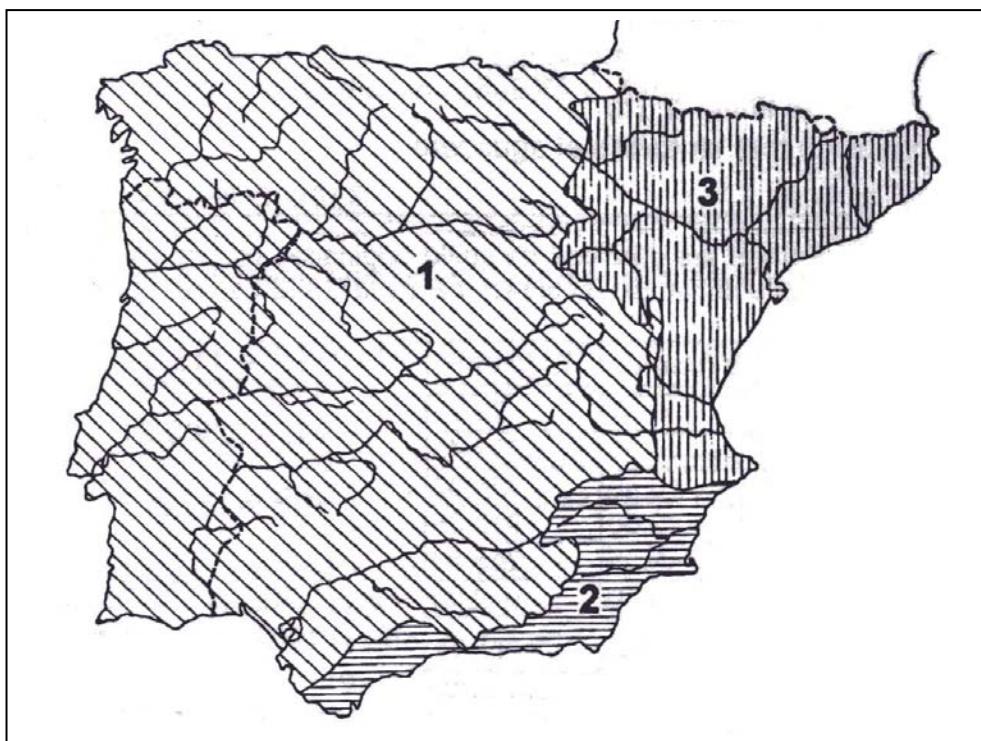


Figura IV.1. Zonificación de la Península Ibérica para la determinación del factor R (ICONA, 1988)

El factor R está cartografiado en España (ICONA, 1988) y, por tanto, la consulta de estos mapas es otra forma sencilla de determinar el valor que toma R para una zona concreta. No obstante, su uso debe hacerse con cierta precaución, puesto que no parece que en su elaboración se hayan tenido en cuenta algunas consideraciones establecidas por los autores del modelo como las limitaciones a la energía cinemática de la intensidad de los intervalos de cada aguacero o los relativos a la intensidad máxima en 30 minutos de cada aguacero (Navarro, 2002).

3. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)

La erosionabilidad del suelo es la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado ante una fuerza o mecanismo erosivo: esfuerzo cortante del agua e impacto directo de las gotas de lluvia. Es una característica propia del suelo, que depende de su granulometría, estructura y condiciones hidrológicas.

La medición directa del factor K es laboriosa, porque requiere mediciones experimentales en parcelas durante varios años. Wischmeier *et al.* (1971), mediante la utilización de un simulador de lluvia en parcelas tipo, llegaron a una regresión con cinco variables representativas de las propiedades físicas del suelo:

$$K = 2,71 \cdot 10^{-6} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2) + 3,23 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3)$$

Donde:

K = Factor de erosionabilidad del suelo ($t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$)

$M = X \cdot Y$ = Factor de textura

X = Porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,1 mm (es decir, limo y arena muy fina). La expresión se ha desarrollado para valores de $X \leq 70\%$.

Y = Porcentaje de partículas comprendidas entre 0,002 y 2 mm (100-% arcilla)

a = Porcentaje de materia orgánica

b = Clase de estructura del suelo, según la siguiente clasificación:

1 = Granular muy fina (< 1 mm)

2 = Granular fina (1-2 mm)

3 = Granular media (2-5 mm) o gruesa (5-10 mm)

4 = Bloques, laminar o maciza (> 10 mm)

c = Clase de permeabilidad del perfil según la siguiente clasificación:

1 = Rápida o muy rápida (> 125 mm·h $^{-1}$)

2 = Moderadamente rápida (62-125 mm·h $^{-1}$)

3 = Moderada (20-62 mm·h $^{-1}$)

4 = Moderadamente lenta (5-20 mm·h $^{-1}$)

5 = Lenta (1,2-5 mm·h $^{-1}$)

6 = Muy lenta ($< 1,2$ mm·h $^{-1}$)

Los valores de textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15-20 cm superiores del perfil, y los de permeabilidad a todo el perfil.

La determinación de K puede hacerse de forma más rápida y sencilla mediante la utilización de un nomograma, que se muestra en la figura IV.2.

Normalmente K toma valores entre 0,1 y 1 $t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$.

La erosionabilidad del suelo depende de la combinación de muchos factores, pero es evidente que la textura es uno de los más importantes debido a su relación

con la cohesión del material y con la permeabilidad. Se ha comprobado experimentalmente que los suelos más erosionables corresponden a texturas intermedias (en los que la fracción de limos es más abundante), del tipo franco-arenoso, franco, franco-limoso y limoso. A este respecto, se pueden hacer también estas otras consideraciones (Toy & Foster, 1998):

- Los suelos de texturas arcillosas (suelos franco-arcillosos y arcillosos) son más coherentes y resistentes a la erosión, por lo que tienen valores bajos de K .
- Cuando aumenta el porcentaje de arena (suelos franco-arenosos y arenosos) aumenta la infiltración y se ralentiza la aparición de escorrentía, por lo que su erosionabilidad es reducida.
- El contenido de materia orgánica proporciona estabilidad a los agregados del suelo y mejora su estructura y resistencia a la erosión, siendo también un factor determinante de la erosionabilidad del suelo.

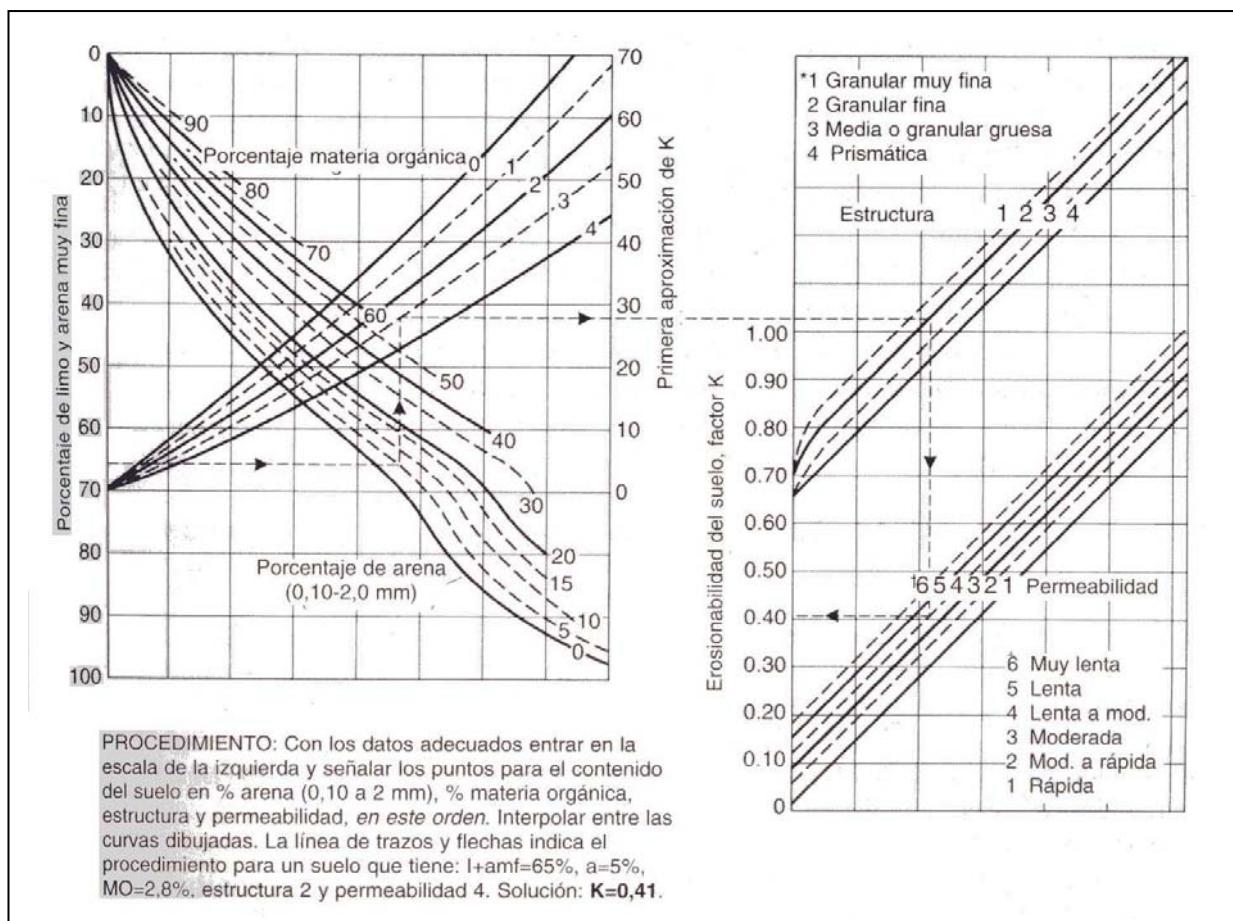


Figura IV.2. Nomograma para la determinación del factor K en unidades métricas; según Morgan (1997), siguiendo a Wischmeier *et al.*, (1971)

4. FACTOR TOPOGRÁFICO ($L \cdot S$)

Es evidente que el relieve influye de forma importante en las tasas de erosión que se producen en una ladera. Esta influencia es cuantificada por la USLE mediante el factor topográfico $L \cdot S$.

Al incrementarse la pendiente y la longitud de la ladera, aumenta también la tensión de arrastre, por lo que se generan mayores pérdidas de suelo.

La longitud de la ladera se define como la distancia en proyección horizontal que recorre una gota de agua desde que se forma en la divisoria, hasta que encuentra el cauce o una zona de sedimentación. La expresión que estima la influencia de la longitud de la ladera es:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Este factor L , o factor de longitud de la ladera, representa la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo obtenidas en una parcela de longitud de ladera λ y la tasa de erosión de esa misma parcela bajo idénticas condiciones de clima (R), suelo (K), pendiente y vegetación, pero de longitud de ladera $\lambda = 22,13$ m.

Para determinar los valores del exponente m se han propuesto los que aparecen en la tabla IV.1, en función de la pendiente de la ladera s (%).

Tabla IV.1. Valores del exponente m para el cálculo del factor de longitud de ladera, en función de la pendiente (Wischmeier & Smith, 1978)

s (%)	m
≥ 5	0,5
3 – 5	0,4
1 – 3	0,3
< 1	0,2

Por otra parte, la USLE evalúa la influencia de la pendiente (factor S) a través de las ecuaciones:

$$S = 0,006541 s^2 + 0,045 s + 0,065$$

$$\text{ó bien } S = 0,065 + 4,56 \cdot \operatorname{sen} \beta + 65,41 \cdot \operatorname{sen}^2 \beta$$

El factor S , o factor de pendiente, se define como la relación entre las pérdidas de suelo medias en una parcela con una pendiente s y las que se producen en la misma parcela, con iguales condiciones de clima, suelo, vegetación y longitud de ladera, pero con una pendiente del 9 %.

Lo habitual es evaluar conjuntamente los dos factores, mediante el factor topográfico $L \cdot S$, que puede calcularse empleando el nomograma de la figura IV.3 o la ecuación siguiente (Morgan, 1997):

$$L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \cdot (0,0065 \cdot s^2 + 0,045 \cdot s + 0,065)$$

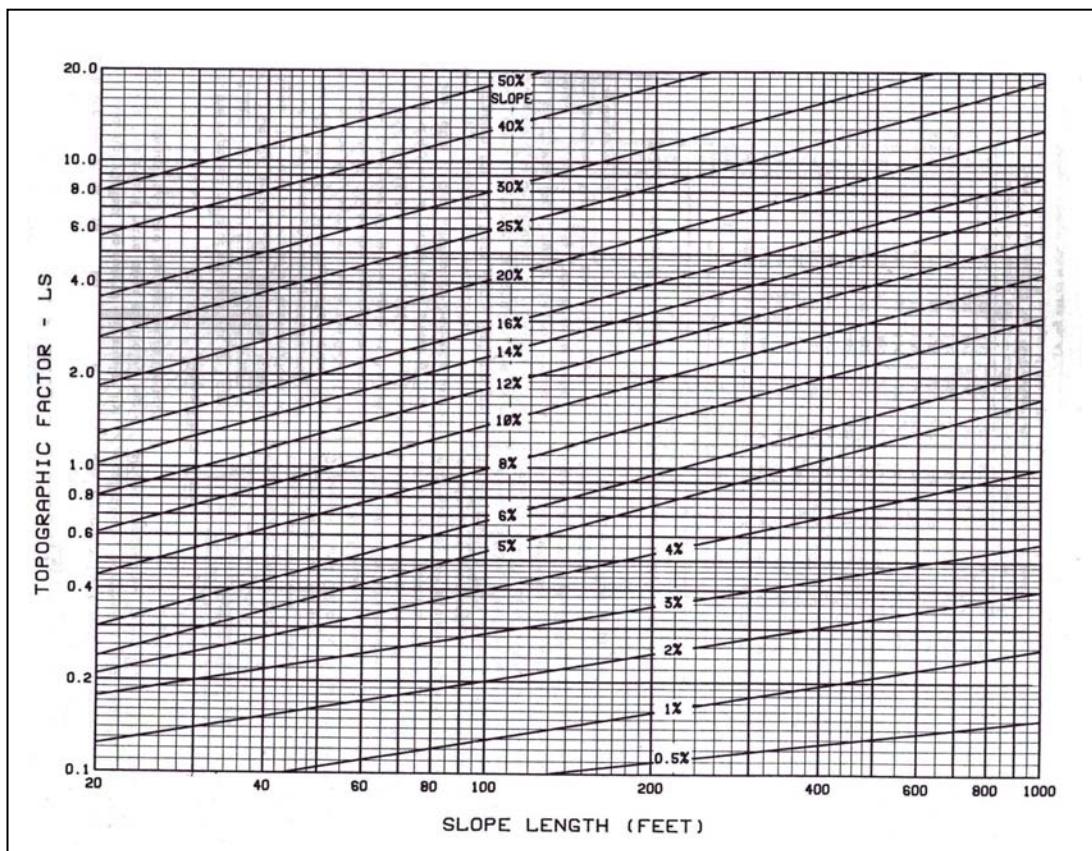


Figura IV.3. Nomograma para el cálculo del factor $L \cdot S$ (Wischmeier & Smith, 1978)

Aunque ésta sea la ecuación más comúnmente empleada, existen en la bibliografía otras utilizables en determinadas condiciones (McCool *et al.*, 1982; López Cadenas, 1998a), si bien no están avaladas por el USDA:

$$\text{Para } \lambda < 350 \text{ m y } s \leq 20\%: L \cdot S = \lambda^{0.5} \cdot (0,0138 + 0,00965 \cdot s + 0,00138 \cdot s^2)$$

$$\text{Para } \lambda < 350 \text{ m y } s > 20\%: L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1,4}$$

$$\text{Para } \lambda > 350 \text{ m y } s \leq 9\%: L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{0,43 + 0,3 \cdot s + 0,043 \cdot s^2}{6,613} \right)$$

$$\text{Para } \lambda > 350 \text{ m y } s > 9\%: L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1,3}$$

Todas estas expresiones son aplicables en laderas de pendiente uniforme, y con el mismo tipo de suelo y vegetación.

5. FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL (C)

La cubierta vegetal de una ladera constituye el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, al reducir la energía con la que llegan las gotas de agua a la superficie del suelo y ralentizando la velocidad de la escorrentía superficial.

El factor *C*, que recoge la influencia del tipo de vegetación existente y de los residuos que deja en el suelo, representa la relación entre las pérdidas de suelo que se generan en una parcela con las mismas características de clima, suelo y relieve, pero que se encuentra en barbecho permanente (labrada según líneas de máxima pendiente y desprovista de vegetación). Es decir:

C = 1 con barbecho continuo

C < 1 en el resto de los casos. Será mayor cuanto más densa sea la cubierta vegetal en contacto con el suelo

Según el tipo de vegetación que aparezca, se puede presentar el caso de cultivos agrícolas –con cubierta variable a lo largo del año- y el de masas vegetales permanentes. En el análisis que nos ocupa, sólo interesa este segundo caso. Se trata de pastizales, matorrales y bosques, cuyo valor de *C* se obtiene en primera aproximación de la tabla IV.2 o de las originales de Wischmeier & Smith (1978) (tablas IV.3 y IV.4):

Tabla IV.2. Primera aproximación para determinar el factor C (ICONA, 1982)

CUBIERTA VEGETAL	C
Arbolado forestal denso	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral con buena cobertura	0,08
Matorral ralo y eriales	0,20
Cultivos arbóreos y viñedos	0,40
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Cultivos en regadío	0,04

Tabla IV.3. Valores del factor C para pastizales, matorrales y arbustos (Wischmeier & Smith, 1978)

CUBIERTA VEGETAL			CUBIERTA EN CONTACTO CON EL SUELO					
Tipo y altura de cubierta	Recubrimiento (%)	Tipo	% de cubrimiento del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable	0	G	0,45	0,20	0,10	0,042	0,013	0,003
		W	0,45	0,24	0,15	0,090	0,043	0,011
Plantas herbáceas y matojos (0,5 m)	25	G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		W	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
Matorral (2 m)	75	G	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
		W	0,17	0,12	0,09	0,067	0,038	0,011
	25	G	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		W	0,40	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
Arbolado sin matorral pequeño apreciable (4 m)	50	G	0,34	0,16	0,085	0,038	0,012	0,003
		W	0,34	0,19	0,13	0,081	0,041	0,011
	75	G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		W	0,28	0,17	0,12	0,077	0,040	0,011
	25	G	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
		W	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	G	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		W	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
	75	G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011

G = Cubierta en contacto con el suelo formada por pastizal con al menos 5 cm de humus

W = Idem por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer

Tabla IV.4. Factor C para bosques (Wischmeier & Smith, 1978)

% CABIDA CUBIERTA	% CABIDA CUBIERTA CONTACTO CON EL SUELO ¹	TIPO DE ORDENACIÓN ²	
		C	NC
100-75	100-90	0,001	0,003-0,011
75-40	90-70	0,002-0,003	0,01-0,03
40-20 ³	70-40	0,003-0,009	0,03-0,09

¹ Formada al menos por 5 cm de restos vegetales o plantas herbáceas² C = Montes con control estricto de pastoreo

NC = Montes sin control de pastoreo

³ Para cubiertas en contacto con el suelo inferiores al 40 % o cabida cubierta menor del 20 % deben usarse los valores de la tabla IV.3.

6. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS (P)

Este factor hace referencia a técnicas tales como cultivos sobre curvas de nivel, cultivos por fajas y terrazas.

Dado que en el presente trabajo se trata de aplicar la USLE a una pequeña cuenca de recolección de agua (denominada área de impluvio o productora), no se tiene en consideración este factor P , es decir, P es igual a 1.



ANEXO V:

PROTOCOLO DE APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO MODIPÉ

ÍNDICE DEL ANEXO V

1. INTRODUCCIÓN	331
2. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO	331
3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE LA LADERA ACTUAL	331
4. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA	332
5. DETERMINACIÓN DE LOS NÚMEROS DE CURVA DEL ÁREA DE IMPLUVIO Y DEL ÁREA DE RECEPCIÓN	334
6. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA PARA LA VEGETACIÓN CLÍMAX	337
7. CONVENIENCIA O NECESIDAD DE SISTEMATIZAR	339
8. UTILIDADES DE MODIPÉ	340
8.1. Caracterización de microclimas en ladera	341
8.2. Diagnóstico de procesos de desertificación por aridez edáfica	341
8.3. Diseño técnico de la sistematización primaria para abordar la restauración forestal de una ladera degradada	342
8.4. Evaluación del efecto hídrico conseguido tras una repoblación forestal	343
8.5. Simulación del comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada	343
9. ESTUDIO DE CASOS	343
9.1. Obtención de <i>NAC</i> y <i>Nmín</i> en laderas de la comarca del Cerrato (Palencia)	343
9.2. Sistematización mediante microcuencas	344
9.3. Sistematización mediante subsolado lineal	346
9.4. Evaluación hidrológica de dos preparaciones del suelo	347
9.5. Aterrazado con subsolado	348
9.6. Ahoyado mecanizado con <i>bulldozer</i>	355

1. INTRODUCCIÓN

El modelo hidrológico MODIPÉ, creado por Martínez de Azagra (1995a), resulta de gran utilidad en el diagnóstico de situaciones de desertificación por aridez edáfica o en la restauración de laderas degradadas por este motivo. A pesar de que existe un programa informático para su aplicación más sencilla y que se ha publicado una pequeña guía de utilización (Martínez de Azagra, 1996), aún existen algunos flecos que dificultan su utilización por parte de los técnicos especializados en la repoblación forestal de zonas áridas y semiáridas. Por este motivo, en este anexo se presentan algunas pautas que pretenden esclarecer dudas o allanar la senda de uso de MODIPÉ.

2. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Los datos de entrada del modelo son: el número de curva de la ladera actual (*NAC*), el tamaño del área de impluvio (S_1), el 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*). Todo ello puede observarse gráficamente en la figura V.1.

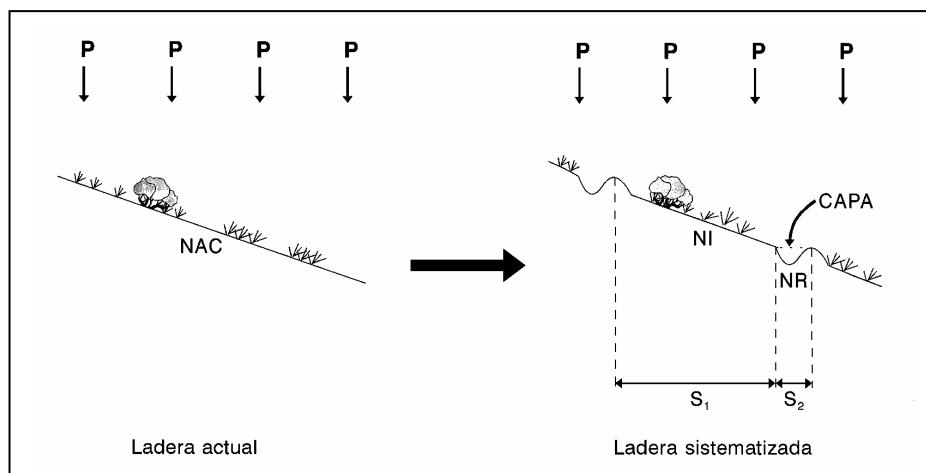


Figura V.1. Datos de entrada del modelo MODIPÉ

3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE LA LADERA ACTUAL

El método del número de curva es un modelo que tiene como objetivo el cálculo de la escorrentía o precipitación neta, que genera un aguacero en una cuenca de reducidas dimensiones. Ha sido desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) –llamado desde 1994 *National Resources Conservation Service* (NRCS)- del

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para cuencas no aforadas en las que se quiera estimar los caudales circulantes por métodos hidrometeorológicos. En el anexo III se explican con detalle los fundamentos y la utilización del método.

Cuando se pretenda restaurar una ladera degradada en una zona árida mediante la repoblación forestal, 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, como son el suelo, la vegetación, la forma de explotación del terreno y su condición hidrológica:

a) Suelo.- El método distingue cuatro tipos de suelos desde el punto de vista hidrológico, desde el tipo A (con bajo potencial de escurrimiento) hasta el tipo D (con elevada capacidad de producir escorrentía). La distinción del tipo de suelo puede hacerse mediante las indicaciones que se explican en el anexo III.

b) Vegetación.- La identificación del tipo de cubierta vegetal o uso del suelo es uno de los pilares para la determinación del número de curva. En las tablas generales del número de curva, que se muestran en el anexo III, se han diferenciado catorce clases de vegetación, que van desde los pastizales o el barbecho hasta los bosques.

c) Forma de explotación.- Se refiere a las prácticas de cultivo que pueden realizarse, por ejemplo labores siguiendo curvas de nivel o cultivos en terrazas.

d) Condición hidrológica.- Deben estudiarse los factores que favorecen o dificultan la formación de escorrentía, como pueden ser la fracción de cabida cubierta de vegetación o la rugosidad superficial, por citar dos ejemplos.

Una vez conocidas estas cuatro características de la ladera, se determina su número de curva utilizando las tablas III.6 y III.7 del anexo III.

4. 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).

La novedad que propone MODIPÉ consiste en que no sólo proporciona a la planta el hoyo, sino que a este le une un microembalse y un área de impluvio. Esto tiene implicaciones técnicas de gran interés para la restauración forestal en zonas áridas.

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 se pierde.

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 brizal un mejor microclima, más húmedo. Éste 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, 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. Esto ya se ha explicado en apartado 3.2 de este trabajo. En él se mencionan también algunos modelos agrícolas sobre cosechas de agua (que no son directamente aplicables al sector forestal) y una metodología propuesta para la determinación de la relación S_1/S_2 en repoblaciones forestales.

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

$$CAPA \approx H \cdot S_2$$

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

En la determinación del tamaño de la poceta o microembalse deben ser tenidos en cuenta los diez criterios que se desarrollan en este trabajo (véase el apartado 3.1). Esto asegurará que el alcorque tenga las dimensiones adecuadas, acordes con la economía del agua y respetuosas con la alteración mínima posible del microrrelieve natural.

5. DETERMINACIÓN 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: $NI \geq NAC$.
- 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): $NI \geq NAC$.
- 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, es de esperar que el suelo mejore (por ejemplo, de un tipo D a un tipo C), y por ello: $NI \leq NAC$.

b) Sobre NR

Por un lado, la eliminación de la vegetación preexistente en esta 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 V.2) y hay que decidir cuál de los dos en cada caso 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, del tipo de tempero que tenga el terreno al realizar la misma y de las enmiendas incorporadas.

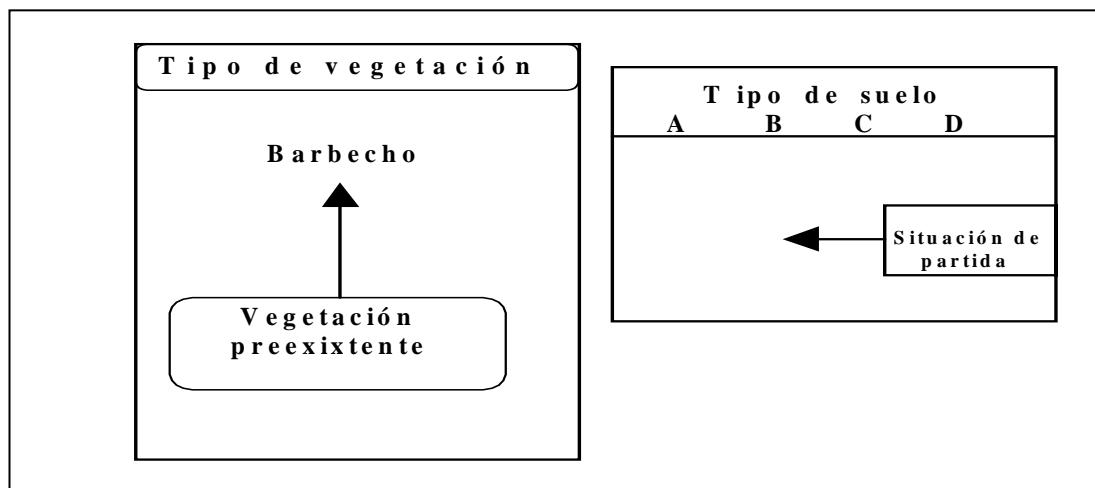


Figura V.2. Flechas indicando la evolución del número de curva (tabla III.6) al realizar una labor profunda en un suelo somero (litosuelo)

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 V.1 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 que se utilizan en España.

Tabla V.1. 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; Microcuenca		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acaballónado según curvas de nivel; Subsolado con rejón modificado		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acaballónado superficial		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Aterrazado en contrapendiente		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Subsolado lineal; Subsolado 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 (≈ 0).

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el método del número de curva está calibrado para cuencas de varios kilómetros cuadrados. Los números de curva a la escala de trabajo que se manejan en 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 períodos 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 (N_{AC})! Por el contrario, querer crear y desarrollar modelos biparamétricos o triparamétricos se presume del todo ilusorio, si no se ha sido capaz de calibrar un modelo uniparamétrico primero. Son ganas de complicar las cosas antes de haberlas resuelto primero de forma aproximada.

6. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA PARA LA VEGETACIÓN CLIMAX

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 anexo III).

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 (infiltración) y a la escorrentía de una ladera (véanse las figuras V.3 y V.4).

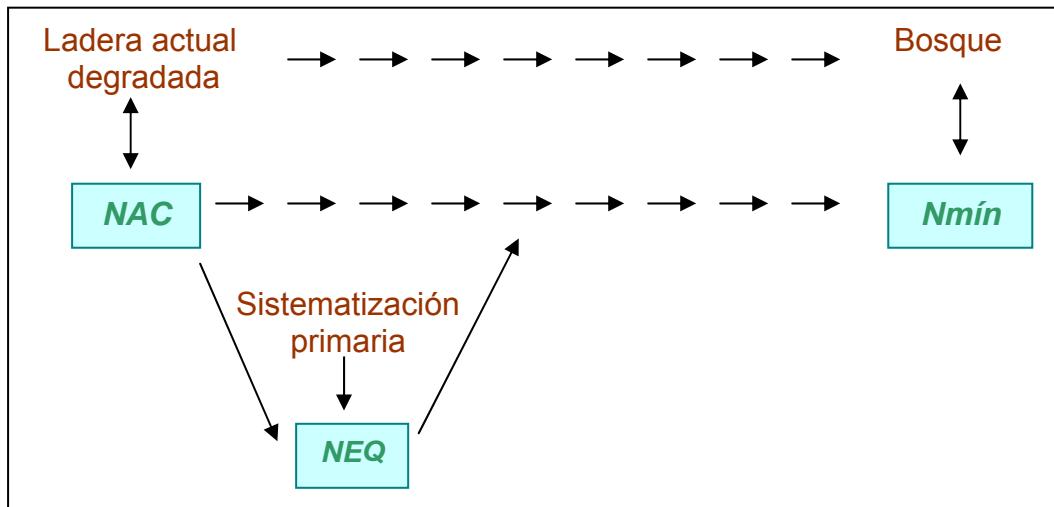


Figura V.3. Serie progresiva del número de curva (Martínez de Azagra, 1996)

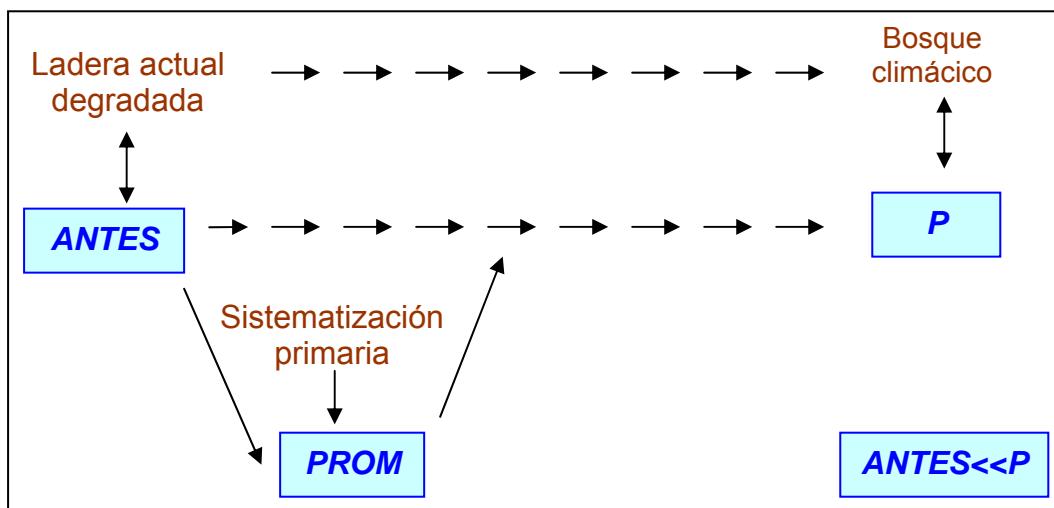


Figura V.4. Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (Martínez de Azagra, 1996)

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 (P_{AC}) y para la ladera restaurada ($P_{máx}$). A cada uno de estos umbrales de escorrentía les corresponde un periodo de retorno determinado, como se ha expresado en el apartado 3.1, donde se aborda el criterio ecológico. En este apartado también puede observarse una tabla en la que se muestran los números de curva asignados a

diferentes formaciones forestales típicas de una zona semiárida como es la provincia de Valladolid, que pueden servir como ejemplos de vegetación objetivo en caso de restauración de áreas degradadas.

7. CONVENIENCIA O NECESIDAD DE SISTEMATIZAR

Los objetivos de una sistematización o preparación del suelo son diversos. 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 a 80).
- Cuando muchos episodios de lluvia provoquen escorrentía en la ladera. Para estudiar esta cuestión basta con comparar el umbral de escorrentía de la ladera actual degradada ($PAC(2)$) 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 tiene 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 remontables.
- 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 de tierra que recojan e infiltrén 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 proceso de desertificación.

8. UTILIDADES DE MODIPÉ

MODIPÉ ha sido concebido como una herramienta auxiliar para el diseño técnico de repoblaciones forestales en zonas mediterráneas, que sirve de apoyo al ingeniero para su toma de decisiones a la hora de restaurar una ladera. Muchos de los métodos de preparación del suelo llevan siendo ensayados con éxito desde hace muchos años pero carecen de un cuerpo de doctrina que los refrende. Son métodos bien arraigados y experimentados en el quehacer cotidiano del ámbito forestal, a los que MODIPÉ puede dar una mayor validez técnica, puede reforzar su uso y orientar acerca de algunas mejoras y precisiones. También puede desechar algunos métodos de preparación del suelo en relación a su eficacia hidrológica.

MODIPÉ sirve, igualmente, para diseñar la preparación del suelo en taludes originados por obras públicas y minería a cielo abierto. También puede ser de utilidad en arboricultura de secano en laderas pronunciadas (olivares, almendrales, viñedos, algarrobales, etc.).

Las principales aplicaciones del modelo MODIPÉ son las que se mencionan seguidamente:

- 1) Sirve para caracterizar microclimas de ladera, cuantificando el volumen de agua que se infiltra en cada uno de sus puntos).
- 2) Ayuda a comprender los procesos de desertificación por aridez edáfica.
- 3) Permite simular el comportamiento hidrológico de cualquier unidad sistematizada (área de impluvio y área de recepción del microembalse).
- 4) Evalúa el efecto hídrico que tienen los distintos procedimientos de preparación del suelo en repoblaciones forestales (microcuenca, acaballados, aterrazados, etc.).
- 5) Posibilita el diseño técnico de trampas de agua con las que incrementar la infiltración en una ladera, con el principal objetivo de disminuir el número de marras por estrés hídrico.
- 6) Permite calcular el volumen mínimo de tierras a remover en una ladera degradada para invertir el proceso de desertificación por aridez edáfica (*oasificación* mediante cosechas de agua).

En resumen, se trata de una herramienta muy útil para el correcto diagnóstico y para la acertada toma de decisiones del técnico encargado de restaurar taludes y laderas degradadas en zonas mediterráneas. Es deseable que todo proyecto de restauración incorpore un estudio hidrológico serio sobre la preparación del suelo planteada, especialmente si se centra en climas áridos o semiáridos. Para tal fin el modelo MODIPÉ resulta, hoy por hoy, insustituible tanto desde el punto de vista conceptual como a nivel práctico.

8.1. CARACTERIZACIÓN DE MICROCLIMAS EN LADERA

Para trabajar con este objetivo es necesario elegir la opción anual e introducir doce ternas de datos por año. Debe analizarse el año seco, medio y húmedo de la serie, por las siguientes razones:

- El año húmedo para comprobar el endorreísmo.
- El año seco para verificar si se producen cosechas de agua.
- Los meses de abril, mayo y junio, para conocer si se producen estas en un momento oportuno.

El modelo contempla la posibilidad de utilizar distribuciones mensuales de la precipitación más o menos propicias a generar escorrentía, que se calculan por el método de los aguaceros virtuales (Martínez de Azagra, 1996).

MODIPÉ resulta muy útil para modelos existentes como la ficha hídrica de Thornthwaite, los diagramas bioclimáticos o los climodiagramas, para los que ofrece resultados más precisos y realistas que los datos de precipitación que se utilizan habitualmente, y considerando que no hay escorrentía que escape de la ladera ($W = 0$).

8.2. DIAGNÓSTICO DE PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN POR ARIDEZ EDÁFICA

Existe un desierto de sequía cuando se presentan las siguientes situaciones:

- Se tiene una ladera con una aridez muy grande en comparación con los datos pluviométricos. Es decir, existe en ella un edafoclima arídico que no concuerda con el régimen de lluvias existente en la comarca.
- Un número de curva de la ladera actual (NAC) elevado propicia una escorrentía superficial importante, lo que se traduce en una infiltración reducida, en una disponibilidad hídrica muy inferior a la precipitación y en una erosión hídrica acelerada. La cubierta vegetal se resiente, por lo que a la degradación hídrica y edáfica hay que agregar una regresión botánica. Se comprende la estrecha relación entre todos los factores mencionados como que el proceso se retroalimente y pueda

ser altamente destructivo a la vez que difícil de revertir si no se interviene rápida y acertadamente.

Por todo esto una ladera degradada puede definirse desde tres perspectivas diferentes:

- Desde el punto de vista botánico: Si hay, por ejemplo, un tomillar ralo donde debería crecer un espeso encinar.
- Desde el punto de vista hídrico: Si el volumen infiltrado es muy inferior a la precipitación anual caída.
- Desde el punto de vista edáfico: Si la velocidad de erosión es mayor que la velocidad de formación del suelo.

Si se consigue frenar los procesos degradadores gracias a una correcta restauración hidrológico-forestal, se produce una evolución hacia mayores disponibilidades hídricas paralela a la recuperación de la vegetación. A este hecho se le ha denominado “serie progresiva de las disponibilidades hídricas”, a la que ya se hizo alusión en la figura V.4.

Comparando *ANTES* con *P* se puede contestar a la pregunta de si tiene sentido o no sistematizar el terreno y hacer microembalses en la ladera.

Un análisis sencillo sobre desertificación por aridez edáfica consiste en calcular el número de meses al año en que hay escorrentía confrontando la precipitación máxima diaria de cada mes con el umbral de escorrentía de la ladera en estudio para condiciones medias de humedad. Igual análisis puede hacerse para condiciones de humedad I y III.

Las frecuencias observadas en la serie de precipitaciones máximas diarias de cada mes junto con la condición de humedad del suelo para todo el mes puede aproximarse mejor a este diagnóstico. El enfoque complementario consiste en analizar el número de precipitaciones diarias que resultan endorreicas (aquellas que se infiltran al 100 %) en condición III, II e incluso I para la ladera en estudio.

8.3. DISEÑO TÉCNICO DE LA SISTEMATIZACIÓN PRIMARIA PARA ABORDAR LA RESTAURACIÓN FORESTAL DE UNA LADERA DEGRADADA

Dimensionar el área de recepción con su trampa de agua y el área de impluvio, de manera que la restauración resulte exitosa, es sin duda la principal utilidad de MODIPÉ. Este planteamiento afecta directamente a la preparación del suelo (tamaño del microembalse y relación entre el área de impluvio y el área de recepción) y a la densidad de repoblación. Todas estas cuestiones de diseño, cruciales en toda intervención restauradora, se tratan profundamente en este trabajo (véanse los apartados 3 y 4).

8.4. EVALUACIÓN DEL EFECTO HÍDRICO CONSEGUIDO TRAS UNA REPOBLACIÓN FORESTAL

Para verificar el acierto o la escasa utilidad de la sistematización realizada en una repoblación forestal, hay que utilizar la opción “serie de aguaceros” del programa informático MODIPÉ, considerando las precipitaciones acaecidas desde que se plantó (o desde que se preparó el terreno) hasta el verano.

8.5. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE UNA UNIDAD SISTEMATIZADA

Con MODIPÉ se puede simular la eficacia hídrica de cualquier intervención. La metodología es válida para la mayor parte de los métodos de preparación del suelo usados en España, todos aquellos que persiguen la economía del agua (véase la tabla V.1).

9. ESTUDIO DE CASOS

9.1. OBTENCIÓN DE N_{AC} Y $N_{mín}$ EN LADERAS DE LA COMARCA DEL CERRATO (PALENCIA)

La vegetación de estas laderas es bastante rala, pudiéndose asimilar a un pastizal de condición hidrológica pobre desarrollándose sobre un litosuelo. A esta formación le corresponde un número de curva (en condiciones medias de humedad) de 90, que equivale a un umbral de escorrentía de 5,6 mm. Esto significa que siempre que la precipitación diaria supere este valor, parte de la lluvia escurrirá superficialmente, hecho que ocurre con bastante frecuencia. De esta forma se crea un edafoclima más árido que el que puede existir en un terreno llano, o más aún, en una zona que reciba y retenga la escorrentía.

Para el mismo relieve, clima y roca madre, la vegetación potencial de este tipo de laderas es un bosque mixto de encinas, quejigos y/o enebros. A este bosque le corresponde un número de curva de 44 (es decir, un umbral de escorrentía de 64,7 mm). Mediante un ajuste de las precipitaciones máximas diarias anuales de la zona a la distribución de Gumbel, se puede interpretar este umbral de escorrentía: en el bosque maduro sólo se produce escorrentía superficial con un periodo de retorno superior a 300 años, es decir, el bosque actúa como una perfecta esponja que intercepta e infiltra todo el agua de lluvia, a excepción de tormentas muy infrecuentes.

9.2. SISTEMATIZACIÓN MEDIANTE MICROCUENCIAS

El primer esquema de actuación consiste en una repoblación en microcuenca con una densidad de plantación de 1.000 pies/ha con una banqueta de 1 m² en la que hay que perfilar una trampa de agua del tamaño apropiado. Para simular el funcionamiento hidrológico de la unidad sistematizada descrita se ha trabajado con los datos de entrada siguientes:

- Número de curva de la ladera actual: $NAC = 90$, se corresponde con un pastizal de condición hidrológica pobre sobre un suelo de tipo D (en la tabla general para la determinación del número de curva aparece $N = 89$, mientras que en la tabla para zonas áridas y semiáridas, $N = 93$)
- Tamaño de cada microcuenca: $S = 10 \text{ m}^2 = 10.000 \text{ m}^2/(\text{pies/ha})$
- Área de recepción (banqueta): $S_2 = 1 \text{ m}^2$
- Área de impluvio: $S_1 = 9 \text{ m}^2 (= S - S_2)$
- Número de curva del área de impluvio: $NI = 90$ (igual al de la ladera actual degradada)
- Número de curva del área de recepción: $NR = 90$ (hipótesis del lado de la seguridad a la hora de estimar la eficacia de esta preparación del suelo, dado que se supone que el laboreo de la banqueta no resulta eficaz para aumentar la capacidad de infiltración)
- Capacidad del microembalse: $CAPA = 0, 50, 100, 150, \dots$ hasta 400 litros (el valor final sugerido es $CAPA = 200 \text{ l}$; elección que se argumenta más adelante).

Como resumen de los resultados que se obtienen con el programa informático MODIPÉ, se ofrece la tabla V.2 en la que se relaciona la capacidad del microembalse con el número de curva equivalente conseguido, con la precipitación límite de la microcuenca (en condiciones medias de humedad) y con el periodo de retorno asociado.

Tabla V.2. Resumen de resultados que ofrece el programa MODIPÉ para el ejemplo de sistematización por microcuenca

CAPA (l)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
NEQ	90	71	64	59	55	52	49	46	44
P límite (mm)	5,6	20,3	28,2	35,0	41,4	47,5	53,4	59,1	64,7
T(años)	---	1,1	2	5	11	26	61	138	311

De acuerdo con los resultados, un número de curva (NEQ) igual al del bosque climático ($N = 44$) se consigue para una capacidad de embalse de 400 litros, es decir: para una altura de muretes de 40 cm. Sin embargo, el tiempo de embalse se prolonga en exceso (unas 35 horas; véase más adelante en donde se describe este cálculo) lo que desaconseja esta solución (por riesgo de problemas de anoxia en las raíces de los brizales). A esta razón cabe agregar otras muchas, tales como la conveniencia de minimizar el movimiento de tierras, de reducir el riesgo de rotura de las represas y de sus consecuencias, de aminorar el impacto visual de la preparación del suelo, etc. Además, se debe indicar que ni siquiera el bosque climático es capaz de infiltrar 64,7

mm en un día, puesto que una parte no despreciable de la precipitación es interceptada y no llega a alcanzar el suelo en una masa arbórea densa.

La decisión sobre el tamaño de los alcorques a formar en la ladera puede basarse en los datos de la tabla anterior. Una trampa de agua de 200 litros en cada banqueta debe bastar para emprender con éxito la restauración de las laderas analizadas ($CAPA = 200 \text{ l} \Rightarrow NEQ = 55$; Precipitación límite ($P2$) = $41 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2}$; periodo de retorno de 11 años; muretes de 20 cm y tiempo máximo de embalse = 17 horas).

Tiempo máximo de embalse

La acumulación de agua en el microembalse después de un aguacero puede poner en peligro las plantas, si esta situación se alarga demasiado en el tiempo, debido a la falta de oxígeno en las raíces. Así, el tiempo máximo de embalse tras un episodio de lluvia ($T_{máx}$) se estima suponiendo el microembalse lleno y una tasa de infiltración mínima, mediante la fórmula:

$$T_{máx} \leq \frac{H}{f_{min}}$$

siendo: H = Altura de los muretes del microembalse ($\approx \frac{CAPA}{S_2}$), en cm
 f_{min} = Tasa de infiltración mínima del suelo, en $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$.

A partir de la textura del suelo y en primera aproximación, se puede obtener la permeabilidad o conductividad hidráulica a saturación. Para el ejemplo, los datos texturales del suelo de la ladera (según la clasificación del USDA) son:

Porcentaje de arena: 58,5 %
 Porcentaje de limo: 31,0 %
 Porcentaje de arcilla: 10,5 %

Por lo que, según la figura 3.8:

$$k \approx 2,3 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$$

Por otro lado, la tasa de infiltración final o mínima (f_{min}) se puede estimar a partir de la permeabilidad, siendo siempre inferior a esta. Si se usa la relación de Bouwer:

$$f_{min} \approx 0,5 \cdot k$$

queda:

$$f_{min} = 1,15 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$$

Con estos datos:

$$T_{máx} \leq \frac{40}{1,15} = 34,78 \text{ h}$$

9.3. SISTEMATIZACIÓN MEDIANTE SUBSOLADO LINEAL

El segundo esquema de actuación consiste en un subsolado lineal siguiendo las curvas de nivel con un apero de dos rejones separados 2 metros. La densidad de plantación se fija en 1.600 pies/ha; la distancia entre la línea superior e inferior de dos pases consecutivos es de 3,12 m con una separación media entre plantas adyacentes dentro de una misma línea de 2,44 m.

Se desea perfilar un caballón (mediante unas aletas acopladas a los brazos del subsolador) que tenga la altura adecuada para reducir la escorrentía al máximo. Para ello hemos utilizado el programa MODIPÉ con los datos de entrada siguientes:

- Tamaño de cada unidad sistematizada: $S = 6,25 \text{ m}^2$ ($= 10.000/(\text{pies/ha})$)
- Área de recepción: $S_2 = 0,73 \text{ m}^2$

$$S_2 = k \cdot b \cdot l$$

siendo: k un factor próximo a la unidad ($k \geq 1$)

b el ancho del brazo del subsolador

l la longitud de línea que corresponde a cada planta

$$S_2 \approx 1,2 \cdot 0,25 \cdot 2,44 = 0,73 \text{ m}^2$$

- Área de impluvio (área productora): $S_1 = 5,52 \text{ m}^2$ ($= S - S_2$)
- Número de curva del área de impluvio: $Nl = 90$ (igual al de la ladera actual degradada)
- Número de curva del área de recepción: $NR = 86$ (número de curva correspondiente a un pastizal en condición hidrológica pobre creciendo en un suelo de tipo C, mejorado gracias a la labor profunda del subsolador)
- $CAPA \approx H \cdot S_2$, siendo H la altura del caballón o la depresión de la poceta conseguida con el subsolado (valor final sugerido: $CAPA = 125$ litros, lo que equivale a una altura de $H = 17$ cm)

Trabajando con los datos de entrada anteriores y exigiendo un número de curva equivalente (NEQ) de 55 (igual al logrado con la preparación del suelo anterior) se llega a que la altura del caballón debe ser de 17 cm, dato de sumo interés para realizar una buena labor de subsolado en la ladera.

9.4. EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE DOS PREPARACIONES DEL SUELO

Analizando la serie de precipitaciones ocurrida durante los últimos 33 años en la zona y operando con el modelo MODIPÉ, se puede cuantificar el grado de aridificación que padece la ladera actual y los efectos beneficiosos que generamos con las pequeñas trampas de agua diseñadas.

Mientras que la precipitación media anual en la zona es de 413,5 mm, la ladera degradada aprovecha unos 388 mm. Esta diferencia puede parecer escasa (6,2%) pero es, en todo caso, bastante significativa para un clima mediterráneo árido. Por otro lado, se debe aclarar que al analizar el dato promedio, las diferencias se atenúan (p. ej.: en la serie estudiada la diferencia llega a ser próxima a los $100 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$ en dos ocasiones).

En cuanto al efecto beneficioso de la preparación del suelo con microcuenca de 10 m^2 y una capacidad del alcorque de 200 litros, se puede indicar que:

- a) La ladera sistematizada aprovecha (infiltra) la práctica totalidad de la lluvia caída (tan sólo se produce un episodio de lluvia que excede la capacidad del microembalse en 33 años, lo que se traduce en una precipitación media anual infiltrada de 412,4 mm).
- b) El microclima de la banqueta es mucho más húmedo que el de un terreno horizontal gracias a los aportes de escorrentía recibidos del área de impluvio ($621,2 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$ frente a los 413,5 mm registrados de media en un pluviómetro). Esta mayor disponibilidad hídrica puede ser crucial para el éxito de la reforestación de la ladera. Conviene significar que en todos los años analizados se obtiene cosecha de agua siendo las estaciones de otoño y primavera las más efectivas en cuanto a la recolección obtenida.

Resultados similares, que apuntan en igual dirección, cabe inferir para el subsolado profundo con acaballónado descrito como alternativa segunda.

Una diferencia importante a la hora de interpretar los resultados que ofrece el programa MODIPÉ para microcuenca y subsolado es el que se refiere al microclima del área de recepción. Para el caso de banquetas amplias el dato tiene mucha más significación, ya que en las primeras etapas de crecimiento la planta va a disfrutar de dicho microclima. No ocurre lo mismo con el subsolado lineal dado que la forma del área de recepción “obliga” casi de inmediato al repoblado a prospectar zonas del área de impluvio.

9.5. ATERRAZADO CON SUBSOLADO

Definición del problema

Se ha estudiado una repoblación forestal situada dentro del término municipal de Reinoso de Cerrato (Palencia). La pendiente de la ladera es de un 40 %. La vegetación existente es fundamentalmente herbácea, con una cobertura media del 60 %, que crece sobre un litosuelo formado en unas margas yesosas bastante impermeables.

La intervención, efectuada en el otoño de 1988, consistió en unas terrazas anchas (de 3 m de explanación) según curvas de nivel, realizadas con un tractor de cadenas tipo *tiltdozer*, con una contrapendiente del 5 % (véase la figura V.5). Los desmontes han quedado con una pendiente del 120 %, mientras que los terraplenes poseen un 70 % de pendiente. El coeficiente de esponjamiento persistente, según García Salmerón (1995), se cifra en 1,1. La densidad de plantación ha sido de 1.600 pies/ha, plantando dos líneas de pinos en cada terraza (una interior y otra exterior), distanciados entre sí 2 m y al tresbolillo (alternos, para reducir la competencia). No se plantó en la interterraza, de por sí muy exigua.

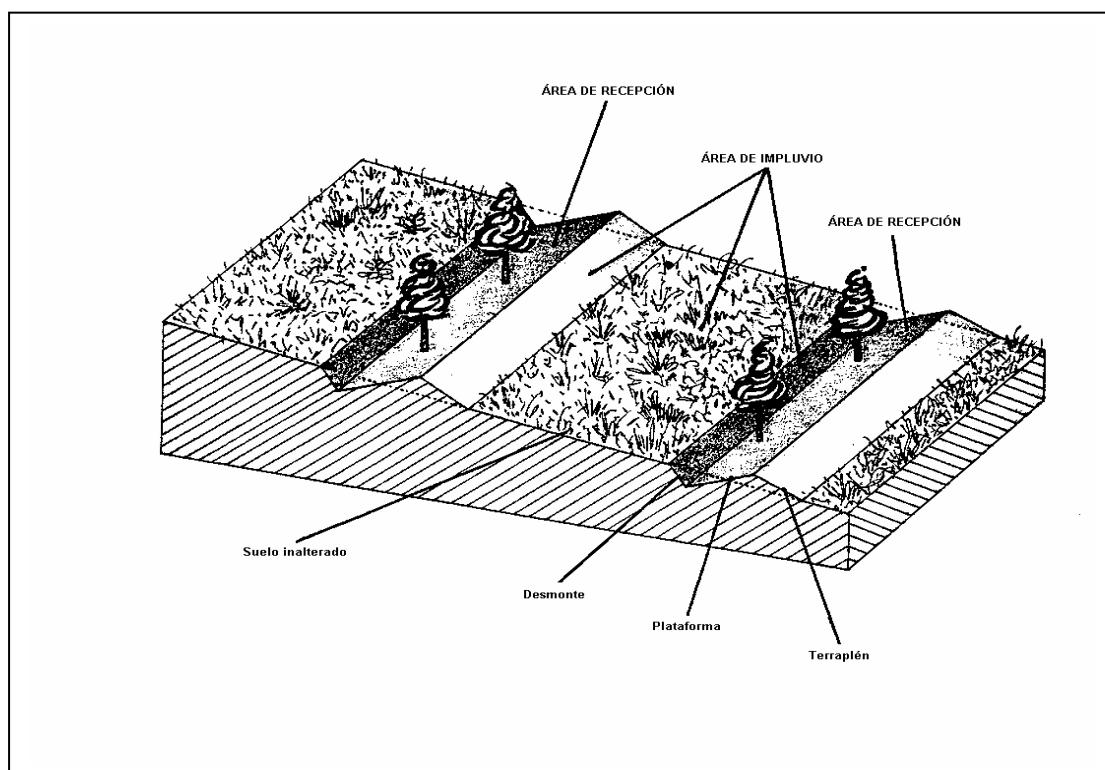


Figura V.5. Ladera en la que se ha realizado un aterrazado con subsolado. Se identifican el área de impluvio y el área de recepción de la unidad sistematizada.

En primer lugar y con la ayuda de un sencillo programa informático denominado TERRA1, se caracterizó la geometría de las terrazas. Posteriormente, se evaluó la sistematización del terreno planteada mediante el modelo hidrológico MODIPÉ. Con el programa informático que desarrolla y aplica este modelo, se determinó la idoneidad

de crear trampas de agua, así como el efecto hídrico que produce el aterrazado, en comparación con la ladera inalterada.

Definición de la geometría de la terraza

La preparación del terreno que se analiza en este trabajo queda descrita por los siguientes datos estimados en campo:

- Anchura de la explanación (a): 3 m
- Ángulo del terreno (λ): 40 %
- Ángulo del talud en terraplén (τ): 70 %
- Ángulo del talud en desmonte (δ): 120 %
- Ángulo de la contrapendiente de la explanación (ε): 5 %
- Coeficiente de esponjamiento (c_e): 1,1

Con esta información puede ejecutarse el programa TERRA1, que aporta unas características geométricas más concretas del aterrazado ejecutado. Estas características se muestran a continuación y quedan reflejadas en la figura V.6.

- Anchura de explanación en desmonte (a_d): 1,640 m
- Anchura de explanación en terraplén (a_t): 1,360 m
- Volumen de desmonte por unidad de longitud (V_d): $0,9433 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
- Volumen de terraplén por unidad de longitud (V_t): $1,0377 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
- Longitud de ladera desmontada (l_d): 2,757 m
- Longitud de ladera terraplenada (l_t): 3,657 m
- Longitud de ladera afectada (l): 6,414 m
- Anchura total afectada (A): 5,955 m
- Diferencia de cota afectada (Z): 2,382 m
- Descenso del c.d.g. de la tierra removida (ΔZ_G): 0,744 m
- Sección mojada (S_m): 0,234 m²
- Radio hidráulico (R_h): 0,0732 m

Una vez obtenida esta información, se pasa a calcular la distancia horizontal entre los ejes de dos terrazas consecutivas (D) y la longitud total de terrazas abiertas en 1 ha (L). Siendo N la densidad de la repoblación (en pies/ha), n el número de líneas de plantación a incluir en cada plataforma y e la equidistancia entre plantas dentro de una línea, se obtiene que:

$$e = \frac{n \cdot 10.000}{N \cdot D} \quad (\text{si no se planta en la interterraza, como es el caso})$$

$$\text{A su vez: } D \cdot L = 10.000$$

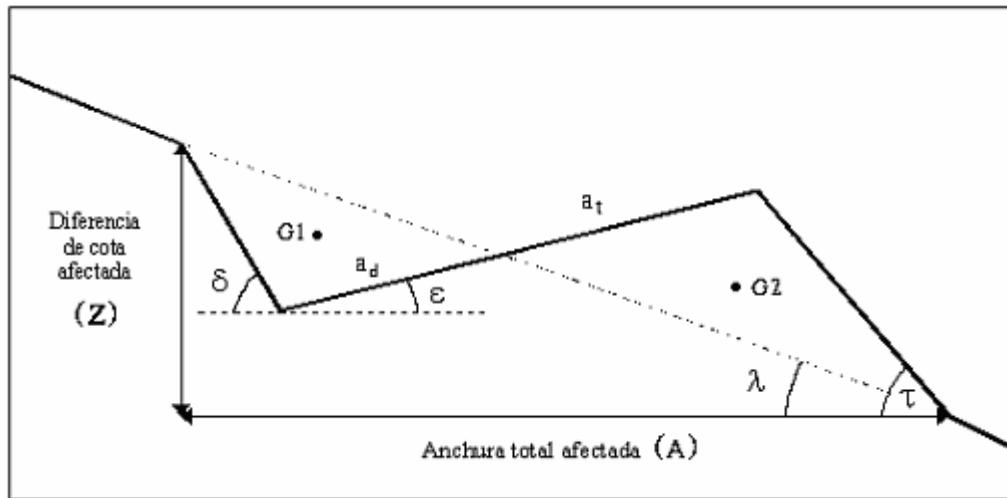


Figura V.6. Esquema en el que se destacan las principales magnitudes geométricas de la preparación del suelo analizada

En este caso, $N = 1.600$ pies/ha, $n = 2$ y $e = 2$ m. Con estos datos tenemos que:

$$D = \frac{n \cdot 10.000}{e \cdot N} = 6,25 \text{ m}$$

La longitud total de terraza abierta por hectárea vale:

$$L = \frac{10.000}{D} = 1.600 \text{ m}$$

El volumen desmontado asciende a $1.509 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($0,9433 \cdot 1.600$), lo que supone unas 3.020 toneladas desplazadas por hectárea. Este movimiento de tierras ha provocado un descenso en su cota de 74,4 cm, que se debe interpretar como erosión por preparación del terreno.

Haciendo coincidir la anchura total afectada (A) con la distancia horizontal entre terrazas (D) se obtiene la densidad máxima de repoblación posible mediante la preparación perfilada ($N_{máx}$). Se tiene que:

$$D = A \Leftrightarrow N = N_{máx} = \frac{n \cdot 10.000}{e \cdot A}$$

Luego en este caso: $N_{máx} = 1.679$ pies/ha

Se aprecia que la densidad de plantación se aproximó mucho a la máxima posible (1.600 frente a 1.679 pies/ha), lo que tuvo una consecuencia inmediata en el porcentaje de superficie que salió indemne de la intervención (P).

$$P = \frac{D - A}{D} \cdot 100 = \frac{6,25 - 5,955}{6,25} \cdot 100 = 4,72 \%$$

Esta proporción es ciertamente escasa: La mayor parte de la superficie del suelo (el 95,28 %) se vio afectada con el aterrazado.

Evaluación hidrológica de la preparación del suelo

a) Identificación de la unidad sistematizada (datos geométricos)

Trabajando por unidad de longitud de terraza (que en este caso coincide con la longitud puesta a disposición de cada planta), se tiene:

$$S = D \cdot 1 = 6,25 \text{ m}^2$$

$$S_2 = a \cdot \cos \varepsilon = 3 \cdot \cos 2,862^\circ = 2,996 \text{ m}^2 (\approx 3 \text{ m}^2)$$

siendo S el tamaño de la unidad sistematizada, S_1 el área de impluvio, S_2 el área de recepción, a el ancho de la explanación y ε el ángulo de la contrapendiente (5 %, que corresponde a 2,862°).

$$S_1 = S - S_2 = 3,254 \text{ m}^2 (\approx 3,25 \text{ m}^2)$$

Por otra parte, el área de impluvio consta de tres superficies con características hidrológicas bien diferentes (razón por la que conviene individualizarlas) y que son (véanse las figuras V.6 y V.7): terraplén (S_a), terreno inalterado (S_b) y desmonte (S_c).

$$S_1 = S_a + S_b + S_c$$

Para calcular estas superficies valen las siguientes relaciones:

$$S_a = (\text{longitud ladera terraplenada}) \cdot \cos \lambda - (\text{anchura explanación en terraplén}) \cdot \cos \varepsilon$$

$$S_b = D - A$$

$$S_c = (\text{longitud ladera desmontada}) \cdot \cos \lambda \cdot (\text{anchura explanación en desmonte}) \cdot \cos \varepsilon$$

Lo que aplicado a este caso, resulta:

$$S_a = 2,037 \text{ m}^2$$

$$S_b = 0,295 \text{ m}^2$$

$$S_c = 0,922 \text{ m}^2$$

$$S_1 = S_a + S_b + S_c = 3,254 \text{ m}^2$$

Finalmente, se debe estimar el tamaño de la trampa de agua creada:

$$\text{CAPA} = \text{sección mojada} \cdot 1 = 0,234 \text{ m}^3 = 234 \text{ litros}$$

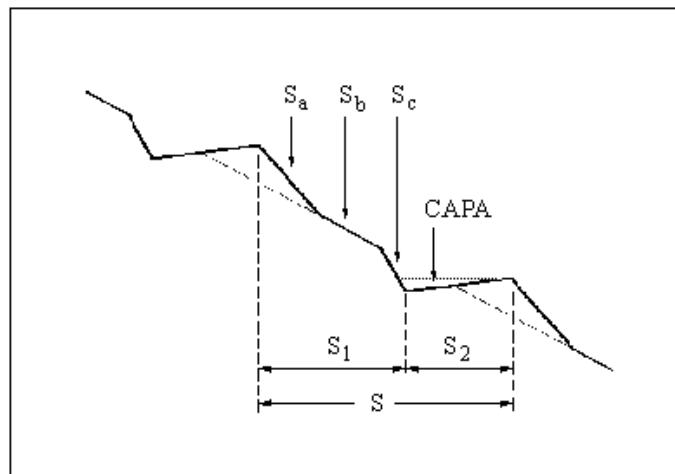


Figura V.7. Datos geométricos de la unidad sistematizada

b) Datos hidrológicos

Como datos de entrada, el modelo hidrológico MODIPÉ precisa el número de curva de la ladera actual (*NAC*), el del área de impluvio (*NI*) y el del área de recepción (*NR*). Estos números de curva se determinan utilizando las tablas generales del Servicio de Conservación de Suelos estadounidense que pueden consultarse, por ejemplo, en Martínez de Azagra & Navarro (1996) o en el anexo III de este trabajo.

La ladera inicial (es decir: antes de la intervención) se puede asimilar a un pastizal regular (con entre un 50 y un 75 % de cobertura entre especies herbáceas y leñosas) sobre un litosuelo (tipo D), lo que corresponde a un número de curva (*NAC*) de 84, en condiciones medias de humedad.

En el área de impluvio pueden diferenciarse tres zonas, una de desmonte, otra de terreno inalterado y otra de terraplén. La zona de desmonte puede considerarse como un barbecho desnudo y suelo de tipo D, con un número de curva de 94. Al terreno inalterado, obviamente, le corresponderá un número de curva igual a NAC, es decir, 84. Y, finalmente, en el terraplén se encuentra un barbecho bueno (con bastantes residuos vegetales y el terreno esponjado) que tiene un número de curva de 88. Para calcular el número de curva del área de impluvio (NI) es necesario realizar la media de los valores antes establecidos, ponderándolos por la superficie que corresponde a cada zona:

$$NI = \frac{2,037 \cdot 88 + 0,295 \cdot 84 + 0,922 \cdot 94}{3,254} = 89,337 \approx 89$$

Por último, el área de recepción puede considerarse como un camino en tierra (por la creación de la plataforma) sobre suelo de tipo C (debido al subsolado profundo y a la acumulación de tierra removida en el terraplén). Estas características implican un número de curva (NR) de 87.

c) Aplicación del modelo MODIPÉ.

El modelo MODIPÉ, tras introducir los datos requeridos (números de curva, capacidad de la trampa de agua y superficies de las áreas de impluvio y recepción), ofrece un análisis comparativo entre los números de curva. La salida gráfica del programa se muestra en la figura V.8. El modelo recomienda la creación de trampas de agua, en base a las relaciones existentes entre los números de curva.

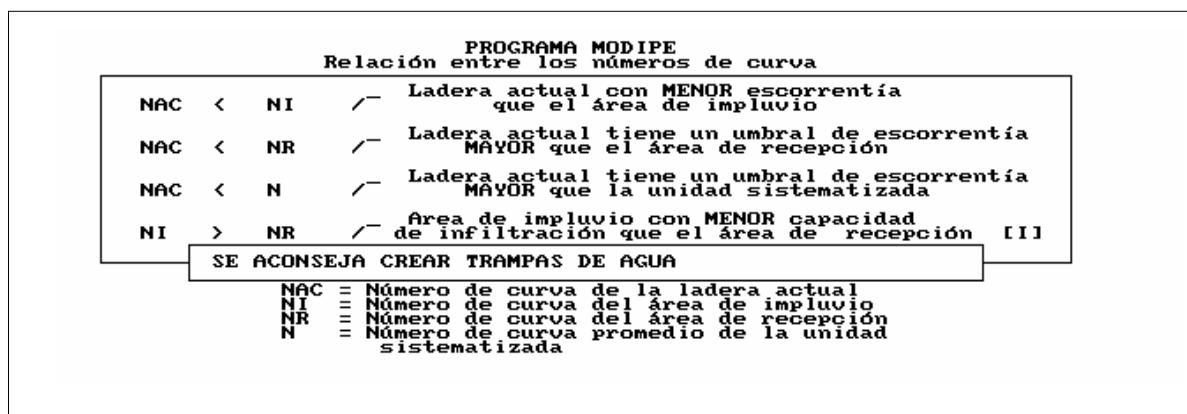


Figura V.8. Salida gráfica del programa MODIPÉ, en el que se comparan los números de curva de la ladera actual, del área de impluvio y del área de recepción

La modelización del comportamiento hídrico de la preparación del suelo estudiada, se completa con los umbrales de escorrentía de la ladera actual y de la unidad sistematizada (véase la tabla V.3.)

Tabla V.3. Datos de la sistematización del terreno según el programa MODIPÉ

	S	N1	P0 (1)	N2	P0(2)	N3	P0(3)
Ladera actual	-	69	23	84	10	92	4
Área de impluvio	3,3	78	14	89	6	95	3
Área de recepción	3,0	74	18	87	8	94	3
Unidad sistematizada	6,3	35	93	44	66	50	52

Capacidad de embalse del área de recepción = 234,0 l

S = Superficie (m^2); N(i) = Número de curva en condición de humedad i; P0(i) = Umbral de escorrentía en condición de humedad i (mm)

De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia un ecosistema degradado, con una baja capacidad de acogida de agua debido a sus elevados números de curva. Sus umbrales de escorrentía así lo atestiguan: con que lluevan 10 mm en unas condiciones medias de humedad en la ladera se produce escorrentía. Si llueve sobre mojado (condición III de humedad), el umbral se reduce a 4 mm. Sobre suelo bien seco (condición I) la escorrentía superficial comienza con aguaceros superiores a 23 mm. Esta circunstancia puede propiciar una sequedad en la zona que no concuerda con la pluviometría del lugar. La situación se agrava si, como es característico del clima mediterráneo, se producen bastantes episodios de lluvia a lo largo del año que generan escorrentía. La erosión consiguiente y la pérdida de recursos hídricos pueden desembocar en 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 93 mm en suelo seco, 66 mm en condiciones medias y 52 mm en suelo húmedo. Como consecuencia inmediata tendremos que el ecosistema va a poder aprovechar mejor el agua. Las posibilidades de incrementar la cobertura vegetal son ahora, por lo tanto, 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 mayores disponibilidades hídricas que las indicadas por los pluviómetros.

Lo que demuestran los datos hasta ahora presentados es que ésta es una buena preparación del terreno, desde el punto de vista de las cosechas de agua. Sin embargo, las trampas de agua son demasiado grandes para el tamaño de la microcuenca: 6,25 m^2 de microcuenca para 234 l de trampa de agua. El modelo MODIPÉ permite afirmar que hubiera bastado con una trampa de agua de 103 litros (lo que supone una altura de muretes de unos 34 cm) para lograr endorreísmo ante una precipitación de diseño de 40 mm (aguacero que posee un periodo de retorno de 30 años en la zona de estudio).

Pero, como se ha dicho, no es el efecto hídrico directo lo que debe cuestionarse, ya que efectivamente se reduce la escorrentía y se incrementa la capacidad de acumulación de agua. Los problemas se plantean porque la preparación del suelo llevada a cabo afecta a la mayor parte de la superficie de la ladera (al 95,28 %) y remueve un gran volumen de tierra. Esto implica, además del notable impacto paisajístico de la nueva topografía en graderío, la eliminación excesiva e injustificada de la vegetación preexistente, la posible formación de tastanas que dificulten la

infiltración (al quedar mucho tiempo al desnudo el suelo removido), el riesgo de deslizamientos en masa en épocas de lluvia (porque los ángulos del desmonte y terraplén son excesivos, según García Salmerón (1995), el peligro de erosión hídrica por regueros y formación de cárcavas al concentrarse la escorrentía en determinados puntos, y la interrupción drástica de la evolución edáfica natural.

En consecuencia, el aterrazado con subsolado es una actuación que genera efectos hidrológicos positivos para el establecimiento de vegetación. No obstante, su diseño debe estar basado en criterios dictados por la economía del agua, para reducir al mínimo indispensable el movimiento de tierras y la remoción del suelo y, consecuentemente, los impactos que estos trabajos producen.

9.6. AHOYADO MECANIZADO CON *BULLDOZER*

Esta preparación, muy utilizada en los últimos años, consiste en una sistematización primaria incompleta, es decir, en la creación de alcorques sin guiar a la escorrentía superficial hacia ellos. Es hidrológicamente equivalente a otros tipos de ahoyado, como el ahoyado con retroexcavadora, el ahoyado transversal, etc.

En este caso el microembalse sólo aprovecha un porcentaje de la escorrentía que se produce en la superficie que corresponde a cada planta ($S_p = 10.000/N$). Para estimar dicho porcentaje hay que fijarse en la longitud de ladera que queda interceptada por los hoyos siguiendo una curva de nivel (o fijarse en la superficie que aporta obligatoriamente escorrentía al área de recepción. Esta área de impluvio resulta inferior a $S_p - S_2$, es decir: $S_1 < S_p - S_2$, como puede apreciarse en las figuras V.9 y V.10. A la vista de estas figuras, pueden calcularse las superficies de la sistematización como:

$$S_1 = a \cdot (e - b)$$

$$S_2 = \text{área de recepción} = a \cdot b$$

$$S_{in} = (D - a) \cdot e$$

$$S_p = \text{distancia entre líneas} \cdot \text{equidistancia entre hoyos} = D \cdot e = \frac{10.000}{N}$$

$$S_p = S_1 + S_2 + S_{in} = a \cdot (e - b) + a \cdot b + (D - a) \cdot e$$

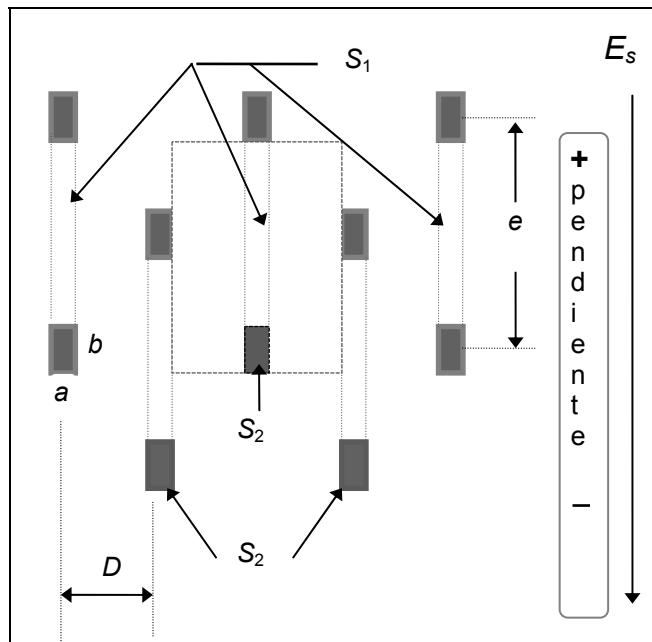


Figura V.9. Esquema de una repoblación mediante ahoyado con subsolador

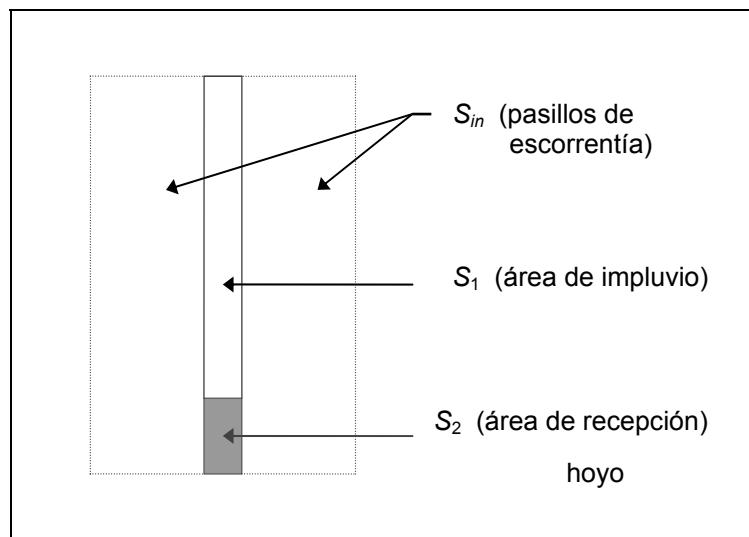


Figura V.10. Unidad sistematizada y pasillos de escorrentía

Al no aprovechar toda la escorrentía, las pocetas pueden ser más pequeñas (pues no se pretende acumular tanta agua), pero habrá que dimensionarlas de acuerdo al área de impluvio (S_1). El hecho de que exista un porcentaje de escorrentía descontrolada (la correspondiente a los pasillos) redunda en:

- Menores cosechas de agua
- Cierta indeterminación del agua infiltrada como promedio en la ladera (trampas de agua parciales)

- Mayor riesgo en la formación de regueros y en la rotura de hoyos (por acumulación de escorrentía de mayores zonas).

No obstante, la decisión adoptada puede ser técnicamente acertada e idónea (en zonas en las que las cosechas de agua no sean cruciales para la consecución de la repoblación), y la restauración puede resultar exitosa y más barata.

Procedimiento a seguir con MODIPÉ

La forma de operar con MODIPÉ en los casos de sistematización parcial es similar que con las microcuenca, con algunas precisiones:

1) Determinación de las superficies

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

$$S_p > S_1 + S_2 \quad S_p = S_1 + S_2 + S_{in}$$

$$S_1 = S_p - S_2 - S_{in} = e \cdot D - a \cdot b - (D - a) \cdot e = a \cdot (e - b)$$

$$S_2 = a \cdot b$$

$$S_{in} = S_p - (S_1 + S_2) = (D - a) \cdot e$$

Siendo:

S_p = Superficie puesta a disposición de cada planta

S_1 = Área de impluvio

S_2 = Área de recepción

S_{in} = Área de los pasillos de escorrentía

a = Anchura del área de recepción u hoyo

b = Longitud del área de recepción u hoyo

e = Equidistancia entre hoyos de una misma línea

N = Densidad de repoblación (pies/ha)

D = Distancia entre pases del *bulldozer* (distancia entre ejes)

2) Determinación de los números de curva

En esta preparación del terreno existe la posibilidad de ejecutar una roza con la pala delantera del *bulldozer*, en el caso de que el matorral preexistente entorpezca las labores de repoblación (Monsalve, 1995). El resultado es una banda desbrozada de 2 m de anchura y un cordón de restos vegetales de aproximadamente 0,5 m. En este caso:

- Antes de la sistematización: NAC
- En S_1 , por coincidir con la banda desbrozada: $NI \geq NAC$

- En S_2 , también por coincidir con la roza, y por haberse removido el suelo en la ejecución del hoyo: $NR > NAC$
- En S_{in} , gracias a la acumulación de la vegetación, se puede admitir que el número de curva disminuye un poco respecto a NAC : $N_{in} \leq NAC$

Pero si el matorral no es abundante, no se realiza el desbroce por lo que se tendría:

- NAC
- $NI = NAC$
- $NR > NAC$
- $N_{in} = NAC$

3) En la ladera, el número de curva promedio de la intervención planteada es:

$$NMED = \frac{NEQ \cdot (S_1 + S_2) + N_{in} \cdot S_{in}}{S_1 + S_2 + S_{in}} = \frac{NEQ \cdot (S_1 + S_2) + N_{in} \cdot S_{in}}{S_p}$$

Y el umbral de escorrentía medio:

$$PLAD = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NMED}{NMED}$$

Para que la intervención pueda considerarse positiva desde el punto de vista de la economía del agua, $NMED$ deberá ser menor que NAC :

$$NMED < NAC$$

4) Para estimar CAPA hay que determinar las medidas del hoyo a realizar, mediante la anchura de la cuña del rejón, la pequeña longitud de ladera "ahoyada" y la profundidad del hoyo (definida por la longitud del rejón). Así mismo tiene mucha importancia el acondicionamiento final del hoyo. En las repoblaciones habitualmente llevadas a cabo, el hoyo suele tener unas dimensiones de $a = 0,6$ m y $b = 0,8 - 1$ m

5) Como caso extremo que conviene analizar está el de las pocetas o alcorques aislados, sin área de impluvio que los alimente. En tal situación, no recibirán escorrentía ($E_{s1} = 0$ mm, pues $S_1 = 0$ m² y $S_{in} = S_p - S_2$).

El método del número de curva aplicado al microembalse aislado tiene por expresión:

$$E_s = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR}$$

con

$$PR = 0,2 \cdot \frac{25400 - 254 \cdot NR}{NR}$$

Si incluimos el tamaño del área de recepción (S_2) en la ecuación anterior:

$$E_s \cdot S_2 = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2$$

La lluvia neta queda retenida en el alcorque gracias a CAPA hasta que el microembalse se colmata y empieza a rebosar. Al imponer que la lluvia neta ($E_s \cdot S_2$) coincida con la capacidad de la trampa de agua (CAPA) se determina la precipitación límite para la poceta aislada.

$$CAPA = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2$$

Despejando P se obtiene la precipitación límite o umbral:

$$P = PUM = PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2} + \sqrt{\left[PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2} \right]^2 + \frac{4 \cdot CAPA \cdot PR}{S_2} - PR^2}$$

A esta precipitación umbral (PUM) le corresponde un número de curva (NAL), a saber:

$$NAL = \frac{5.080}{PUM + 50,8}$$

siendo NAL el número de curva equivalente de un microembalse sin área de impluvio (número de curva de un alcorque aislado: $S_1 = 0 \text{ m}^2$; $E_{s1} = 0 \text{ mm}$)

Para obtener el número de curva promedio de una ladera con alcorques aislados hay que ponderar por superficies:

$$NMED = \frac{NAC \cdot (S_p - S_2) + NAL \cdot S_2}{S_p}$$

ya que no se puede asegurar ningún orden en las cosechas de agua por no existir una conexión entre las áreas de impluvio y las pocetas.

Una vez calculado $NMED$, se puede trabajar con el programa MODIPÉ de la siguiente manera:

- ANTES: NAC
- DESPUÉS: $NMED$

Pero introduciendo en el programa $NI = NMED$, $NR = NMED$ y $CAPA = 0$ litros, por tratarse del caso especial de alcorques aislados.

Para que la intervención pueda considerarse positiva desde el punto de vista de la economía del agua, $NMED$ deberá ser menor que NAC :

$$NMED < NAC$$

En este desarrollo subyace una hipótesis de cálculo muy pesimista que no suele darse en la realidad: se admite que no hay área de impluvio, que las pocetas no se benefician en nada de la escorrentía que se genera a su alrededor (microembalses desconectados de su entorno, algo que no se logra ni a propósito). ¡No hay guías de escorrentía hacia los alcorques sino todo lo contrario: muretes que impiden la entrada del agua a los mismos! Ello da lugar a una estimación de las disponibilidades hídricas de la ladera por defecto. Aún se podría haber sido más pesimista admitiendo que $NR = N_{barbecho}$.

Ejemplo A: Alcorques aislados (no conectados a un área de impluvio)

Con los mismos datos que el ejemplo realizado anteriormente con una preparación de microcuencas, se plantea este caso ficticio en el que se establecen unos hoyos sin área de impluvio. El número de curva del área de recepción (NR) es 90, la capacidad del embalse 200 litros y la superficie del área de recepción 1 m^2 . Así, se puede calcular el umbral de escorrentía en el área de recepción, la precipitación límite o umbral y su número de curva correspondiente:

$$PR = 0,2 \cdot \frac{25400 - 254 \cdot 90}{90} = 5,64 \text{ mm}$$

$$P = PUM = 5,64 + 100 + \sqrt{105,64^2 + 4515,5 - 3186} = 230,7 \text{ mm}$$

$$NAL = \frac{5080}{230,7 + 50,8} = 18$$

Si se supone un alcorque cada 10 m^2 (igual que en el ejemplo de las microcuenca) y que $NI = NR = NAC = 90$, valdrá:

$$NMED = \frac{9 \cdot 90 + 1 \cdot 18}{10} = 82,8 \approx 83$$

De acuerdo con estos cálculos, se ha rebajado en siete puntos la curva de la ladera actual con la preparación del suelo planteada (un alcorque aislado con 200 litros de capacidad cada 10 m^2). Cabe comparar esta actuación con la primera planteada (microcuenca) y se apreciará de forma nítida el efecto tan favorable de las cosechas de agua y -consecuentemente- de los caballones que guían la escorrentía superficial hacia el repoblado.

Ejemplo B: Ahoyado mecanizado con *bulldozer*

En este caso se realiza una preparación consistente en un ahoyado con *bulldozer* (con el rejón modificado mediante una cuña triangular inferior y una orejeta en forma de ala de avión en la mitad del rejón). Los hoyos se disponen al tresbolillo por parejas, efectuándose con un apero de dos rejones separados entre sí una distancia d . En la figura V.11 se muestra esta disposición, y se indican las variables que intervienen en los cálculos.

Puede utilizarse la siguiente relación:

$$e \cdot N \cdot D = n \cdot 10.000$$

Donde:

- e = Equidistancia entre hoyos de una misma línea
- N = Densidad de repoblación (pies/ha)
- D = Distancia entre los ejes de pases consecutivos del *bulldozer*
- n = Número de rejones del apero subsolador

Por razones de uniformidad en el marco de plantación y para evitar solapes interesa que $(D - d)$ no sea muy distinto ni de e ni de d . Por otro lado, e ha de ser mayor de 2 metros (aproximadamente) para que los hoyos no queden conectados entre sí.

En la tabla V.4. se pueden observar varios casos posibles.

Tabla V.4. Diferentes casos posibles de diseño de ahoyado con subsolador

CASO	e	N	D	D - d (d = 2 m)
1	2,5	2.000	4	2
2	2,5	2.500	3,2	1,2
3	2	2.500	4	2
4	2,5	1.600	5	3
5	3	1.600	4,16	2,16
6	3,5	1.600	3,57	1,57
7	2,44	1.600	5,12	3,12
8	3,125	1.600	4	2

El significado de los símbolos se expone en la figura V.11.

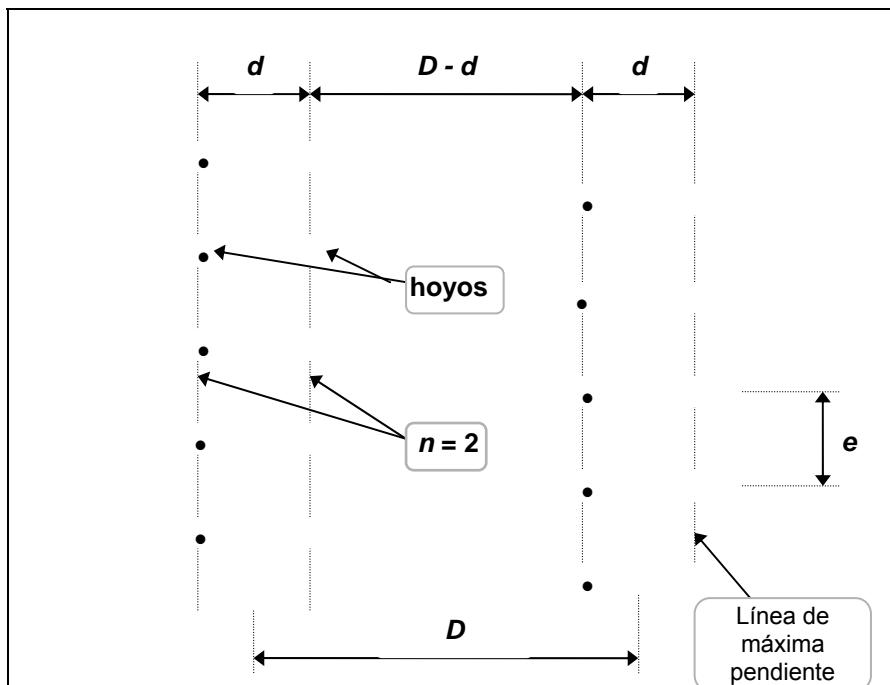


Figura V.11. Disposición de los hoyos en el terreno, en una preparación de ahoyado con *bulldozer*. Siendo:

d = Distancia entre rejones del apero del *bulldozer* (separación de los rejones)

n = Número de rejones del apero

e = Equidistancia entre hoyos de una misma línea

N = Densidad de repoblación (pies/ha)

D = Distancia entre pases del *bulldozer* (distancia entre ejes)

A continuación van a estudiarse dos de estos casos:

a) Caso 7

Una solución que conduce a un marco de plantación bastante regular, propuesta por Calvo (1996) es (véase la figura V.12):

$e = 2,44 \text{ m}$ y $D = 5,12 \text{ m}$ (de esta manera: $D - d = 3,12 \text{ m}$).

Por las modificaciones hechas en los rejones y por la forma de operar el *bulldozer* en la ladera las dimensiones del hoyo son $0,60 \times 0,60 \times 0,20 \text{ m}$. El acondicionamiento del hoyo da lugar a una capacidad de la trampa de agua de unos 75 litros.

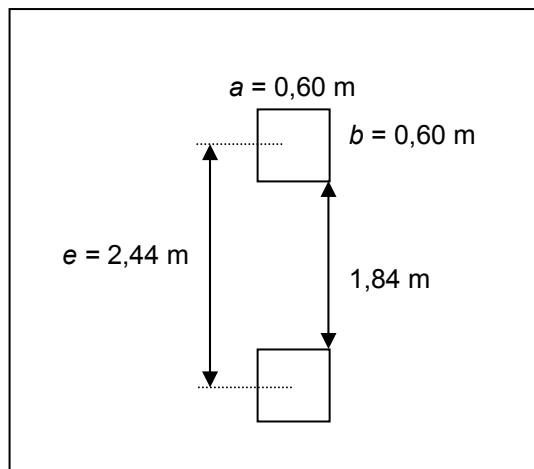


Figura V.12. Dimensiones de la sistematización del caso 7

Con estos datos se puede estimar el área de impluvio y el tamaño de los pasillos de escorrentía:

$$S_1 = a \cdot (e - b) = 0,60 \cdot 1,84 = 1,10 \text{ m}^2$$

$$S_2 = a \cdot b = 0,60 \cdot 0,60 = 0,36 \text{ m}^2$$

$$S = S_1 + S_2 = 1,46 \text{ m}^2$$

$$S_{in} = S_p - S = \frac{10.000}{1.600} - 1,464 = 4,79 \text{ m}^2$$

Y, partiendo de un número de curva de la ladera actual degradada de 84 (correspondiente a un pastizal natural de condición regular sobre suelo D), los números de curva son:

$$NI = NAC = 84$$

$$NR = 90 \quad (\text{barbecho CR, condición pobre, sobre suelo C})$$

$$CAPA = 0,60 \cdot 0,60 \cdot 0,20 = 72 \text{ l}$$

$$N_{in} \leq NAC, \text{ por ejemplo } N_{in} = NAC = 84$$

b) Caso 8

De forma habitual la densidad de plantación (o de realización de hoyos) es $N = 1.600$ pies/ha. Esto se consigue con $D = 4 \text{ m}$ y $e = 3,125 \text{ m}$ (figuras V.13a y V.13b):

$$3,125 \cdot 4 \cdot N = 10.000 \cdot 2$$

$$N = 1.600 \text{ pies/ha}$$

Para el maquinista es fácil de aplicar, dejando 2 m entre líneas de hoyos (véase la figura V.13a).

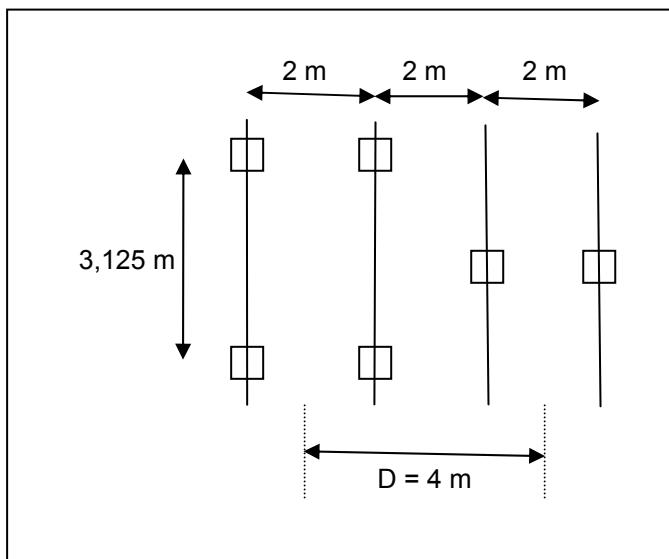


Figura V.13a. Dimensiones de la sistematización del caso 8

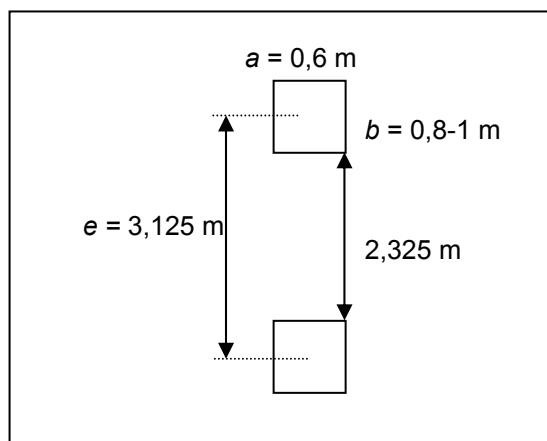


Figura V.13b. Dimensiones de la sistematización del caso 8

Con estos datos, se calculan de manera sencilla las superficies y la capacidad del microembalse:

$$S_1 = 2,325 \cdot 0,60 = 1,395 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0,60 \cdot 0,80 = 0,48 \text{ m}^2$$

$$S = 1,875 \text{ m}^2$$

$$S_{in} = 6,25 - S = 4,375 \text{ m}^2$$

$$CAPA = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 0,096 \text{ m}^3 \approx 100 \text{ l}$$

Conclusiones

Desde el punto de vista hidrológico y de conservación de suelos, el ahoyado con *bulldozer* no es un método ideal, pues se dan pistas a la escorrentía superficial para que cree regueros según líneas de máxima pendiente. Sin embargo, si se acondicionan bien los hoyos, la experiencia demuestra que es un método efectivo y poco impactante para muchas cuestas y cerros degradados. En cuanto al efecto paisajístico, compite con clara ventaja con el aterrazado pues las huellas de la intervención desaparecen en pocos años (unos 5 años). De todos modos, siempre es preferible un acaballónado según curvas de nivel si la pendiente lo permite, pues el riesgo de acarcavamiento es menor (por lo dicho anteriormente), la sistematización es completa, las trampas de agua resultan suficientes y se trata de una preparación más económica.



ANEXO VI:

GLOSARIO

1. INGLÉS-ESPAÑOL

- Afforestation** Repoblación forestal
- Arid lands, arid zones** Zonas áridas
- Artificial regeneration** Regeneración artificial
- Available water** Agua disponible
- Base time of a (streamflow) hydrograph** Tiempo base
- Bench terracing** Aterrazado, “terrazas mediterráneas”, terrazas de absorción
- Catchment area, runoff area, contributing area** Área de impluvio, Área productora
- Continuity equation** Ecuación de continuidad
- Contour lines** Curvas de nivel
- Contour ridges, contour bunds** Caballones según curvas de nivel
- Contour ridging, contour bunding** Acaballonado o alomado según curvas de nivel
- Contour stone bunds** Caballones de piedra según curvas de nivel
- Crust soil** Costra de suelo, tastana
- Cultivated area, collecting area, basin area** Área de recepción área colectora
- Curve number method** Método del número de curva
- Cut** Desmonte
- Degraded arid ecosystems** Ecosistemas áridos degradados
- Degraded lands** Terrenos degradados
- Depression storage** Acumulación de agua en depresiones del terreno
- Desertification** Desertificación, Desertización
- Design criteria** Criterios de diseño
- Dig holes** Ahoyar
- Digging** Ahoyado
- Discharge coefficient** Coeficiente de gasto
- Discharge equation** Ecuación de descarga
- Discharge exponent** Exponente de descarga
- Dry farming** Cultivo de secano
- Endorheic microcatchment** Microcuenca endorreica
- Ephemeral water, ephemeral stream** Agua efímera, corriente efímera
- Excess of water** Demásias de agua
- Excess rainfall, effective rainfall** Lluvia neta
- Fill** Terraplén
- Floodwater harvesting** Recolección de agua desde cursos, riego de boqueras
- Full ploughing** Laboreo pleno
- Full subsoiling** Subsolado pleno (completo)
- Furrow** Surco
- Groundwater flow** Flujo o escorrentía subterránea
- Holding (field) capacity** Capacidad de campo
- Hole, pit** Hoyo
- Hollow for water around a tree, Micropond** Alcorque, microembalse, poceta
- Horton model, Horton's infiltration equation** Modelo de Horton, ecuación de infiltración de Horton
- Horton's infiltration equation, Horton model** Ecuación de Horton
- (Streamflow) Hydrograph** Hidrograma
- Hydrologic model** Modelo hidrológico
- Hydrological behaviour** Comportamiento hidrológico
- Impermeabilization** Impermeabilización
- Infiltration capacity, infiltration rate** Capacidad de infiltración, ratio de infiltración
- Infiltration rate** Velocidad de infiltración
- Kinematic wave (model)** Onda cinemática
- Linear (contour) subsoiling** Subsolado lineal (según curvas de nivel)
- Local water balance** Balance hídrico local
- Microcatchment, microbasin** Microcuenca
- Micropond** Microembalse

- Microwatersheds** Surcos según curvas de nivel, microcuencas
- Mini-dam** Presa pequeña, balate
- Moisture holding capacity** Capacidad de retención de agua del suelo
- Oasification** Oasificación
- Overflowing, flooding, spilling** Rebosadura
- Overland flow** Flujo o escorrentía superficial
- Permeable rock dams** Presas permeables de rocas
- Ponded area or surface (flooded area)** Superficie anegada
- Ponding time** Tiempo de encharcamiento
- Primary systematization** Sistematización primaria
- Rainfall capture** Captura de lluvia
- Rainfall hyetograph, hyetograph** Yetograma, hietograma
- Rainfall intensity** Intensidad de lluvia
- Rainfall-runoff relationship** Relación precipitación-escorrentía
- Rain-fed agriculture, margin farms** Secarregadíos, agricultura de secano
- Rainwater concentration structure** Estructura de concentración de lluvia
- Rainwater harvesting** Recolección de agua de lluvia, cosechas de agua
- Rangeland** Terreno con pastizales, matorrales y bosquetes arbolados típicos de zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos y Australia
- Reforest, reafforest, rehabilitate** Reforestar, reposar, rehabilitar
- Reforestation** Reforestación
- Reverse-sloped terrace, bench terrace, retention terrace** Terraza de absorción (o en contrapendiente)
- Ridge, tied-ridge, bund** Caballón
- Ridging by deep cultivation** Acaballonado con desfonde
- Ridging with (the) topsoil** Acaballonado superficial
- Ripper, ripper tine** Brazo del subsolador
- Ripper's incision, ripper-tine's incision** Incisión del subsolador
- Runoff coefficient** Coeficiente de escorrentía
- Runoff curve number method** Método del número de curva
- Runoff efficiency** Eficiencia de escorrimento
- Runoff farming** Cultivo empleando agua de escorrentía, riego de boqueras, riego de turbias
- Runoff inducement** Inducción de escorrentía
- Runoff water collection, retention** Recolección o retención de agua de escorrentía
- Seedling** Brinjal
- Semicircular bunds** Caballones semicirculares
- Shelf (terrace)** Plataforma (de una terraza)
- Shrubland** Terreno poblado de arbustos
- Small plateau** Banqueta
- Soil infiltration properties** Propiedades de infiltración del suelo
- Soil workability status** Tempero
- Subsurface flow** Flujo o escorrentía subsuperficial
- Surface hydrology** Hidrología superficial
- Systematized unit** Unidad sistematizada
- Terracing** Aterrazado
- Tillage** Laboreo
- Tilled soil, loosened earth** Terreno removido
- Time of concentration** Tiempo de concentración
- Trapezoidal bunds** Caballones trapezoidales
- Tree planting** Plantación arbórea
- Undisturbed soil** Terreno inalterado
- Water balance** Balance hídrico
- Water conservation** Conservación de aguas
- Water depth** Calado o profundidad
- Water harvesting (structures, systems, etc.)** Cosecha de agua (estructuras, sistemas, etc.), recolección de agua
- Water needs** Necesidades hídricas
- Water requirements (minimal ...)** Requerimientos hídricos (mínimos...)
- Water spreading bunds** Caballones de expansión de agua

Water storage capacity Capacidad de retención de agua
Water stress Estrés hídrico

2. FRANCÉS-ESPAÑOL

Bilan hydrique Balance hídrico
Capture du ruissellement Cosecha de escorrentía, recolección de escurrimientos
Collecte des eaux Cosecha de agua, recolección de agua
Débit de pointe Caudal punta
Demi-lunes Caballones semicirculares o en media-luna
Digue-filtrante Presa o dique permeable
Drainage Drenaje
Encroûte Encostrado
Gradins Terrazas
Micro-terrasses en escaliers Microterrazas en escalera
Mur Muro
Nappe phréatique Capa freática
Oued Wadi, rambla, cauce seco
Quinconce Disposición al tresbolillo
Récolte d'eau Cosecha de agua, recolección de agua
Ruisseaulement Escorrentía
Stock du sol Almacén hídrico del suelo, capacidad de retención de agua
Talus Talud
Terrasses discontinues en grandins forestiers Terrazas discontinuas
Terrasses méditerranéennes Terrazas, “terrazas mediterráneas”, terrazas de absorción



ANEXO VII:

**RELACIÓN DE ABREVIATURAS Y
SÍMBOLOS**

<i>a</i>	Anchura del hoyo o microembalse
<i>a</i>	Anchura de la explanación (terrazas)
<i>a</i>	Parámetro de la función de Goodrich
<i>a_d</i>	Anchura de explanación en desmonte
<i>a_t</i>	Anchura de explanación en terraplén
<i>a</i>	Porcentaje de materia orgánica
<i>A</i>	Anchura total afectada
<i>A</i>	Aportaciones
<i>A</i>	Pérdidas de suelo anuales
<i>A</i>	Sección transversal de una columna de material poroso
<i>A</i>	Ancho del área de escurrimiento
<i>A</i>	Longitud del bordo antierosivo
<i>A</i>	Número de meses secos
<i>A₁</i>	Volumen de sedimentos que se depositan en el microembalse durante la vida útil de la sistematización
<i>A_A</i>	Aportaciones acumuladas
<i>A_c</i>	Porcentaje de arcilla (USDA)
<i>A_c</i>	Superficie total de la cuenca
<i>A_c</i>	Área de cultivo
<i>AI</i>	Área de impluvio
<i>Ar</i>	Porcentaje de arena (USDA)
<i>Ar</i>	Área explotada por el sistema radical
<i>AR</i>	Área de recepción
<i>A_s</i>	Área de siembra
<i>A_w</i>	Área de escurrimiento
ANTES	Disponibilidad hídrica antes de la sistematización
<i>b</i>	Longitud del hoyo o anchura de labor (terrazas, subsolado)
<i>b</i>	Clase de estructura del suelo
<i>b</i>	Anchura de la base del murete o caballón
<i>B</i>	Longitud del acuífero o de la sección (ley de Darcy)
<i>c</i>	Clase de permeabilidad del perfil del suelo
<i>c_e</i>	Coeficiente de esponjamiento
<i>C</i>	Factor de cubierta vegetal o cultivo
<i>C</i>	Coeficiente de escorrentía del área de escurrimiento
<i>C</i>	Área de captación
<i>CA</i>	Área de cultivo
CAPA	Capacidad del microembalse
CC	Contenido másico de humedad a capacidad de campo
CCAR	Relación entre la superficie productora de escorrentía y la cultivada
<i>CC_i</i>	Capacidad de campo del horizonte <i>i</i>
<i>C_e</i>	Coeficiente de emisión de sedimentos
<i>CE</i>	Coeficiente de escurrimiento
<i>C_i</i>	Temperatura máxima absoluta
CRAD	Capacidad de retención de agua disponible
<i>d</i>	Déficit (ficha hídrica de Thornthwaite)
<i>d</i>	Número de días secos (diagrama ombrotérmico)
<i>d</i>	Distancia entre rejones del apero del <i>bulldozer</i> (separación de los rejones)
<i>d_a</i>	Densidad aparente del suelo
<i>d₅₀</i>	Diámetro medio de las partículas del medio poroso (ley de Darcy)
<i>D</i>	Duración del aguacero
<i>D</i>	Demandas
<i>D</i>	Distancia entre líneas de plantación o entre ejes del <i>bulldozer</i>
<i>D</i>	Distancia entre los ejes de dos terrazas consecutivas
<i>D</i>	Altura del acuífero o de la sección (ley de Darcy)
<i>D_A</i>	Demandas acumuladas
<i>D_a</i>	Densidad aparente
DED	Demandas evapotranspirativa diaria
DEDE	Demandas evapotranspirativa diaria por estrato

<i>DESP</i>	Disponibilidades hídricas en el área de recepción
<i>D_{máx}</i>	Valor crítico de Kolmogorov-Smirnov
<i>DSA</i>	Déficit de saturación absoluta
<i>e</i>	Coeficiente de escorrentía
<i>e</i>	Distancia entre hoyos de plantación
<i>e</i>	Evapotranspiración residual
<i>e</i>	Anchura en coronación del murete o caballón
<i>E</i>	Evaporación física desde la superficie del suelo
<i>E</i>	Esponjamiento inicial
<i>E</i>	Factor de eficiencia
<i>E</i>	Energía cinética del aguacero
<i>E'</i>	Esponjamiento persistente
<i>Er</i>	Coeficiente de escorrentía del sistema
<i>E_s</i>	Escorrentía superficial real
<i>E_{s1}</i>	Agua que llega al lugar por escorrentía superficial
<i>E_{s2}</i>	Agua que escapa del lugar por escorrentía superficial
<i>ET</i>	Evapotranspiración diaria
<i>ETP</i>	Evapotranspiración potencial
<i>ETR</i>	Evapotranspiración real
<i>ET_{rep}</i>	Evapotranspiración real de la repoblación
<i>E_v</i>	Uso consuntivo o evapotranspiración
<i>F</i>	Valor medio del índice de agresividad de la lluvia de Fournier
<i>F(x)</i>	Función de distribución de Gumbel
<i>F(x)</i>	Función de distribución de Goodrich
<i>F24</i>	Valor medio de los cocientes entre la precipitación máxima en 24 horas de cada año elevada al cuadrado y la precipitación máxima en 24 horas de todos los meses de ese mismo año
<i>Fcc</i>	Fracción de cabida cubierta
<i>F_i</i>	Temperatura mínima absoluta
<i>f_{min}</i>	Tasa de infiltración mínima
<i>F_{Ri}</i>	Frecuencia observada (test de Kolmogorov-Smirnov)
<i>h</i>	Profundidad del embalse del suelo
<i>h_c</i>	Ascenso o descenso capilar
<i>H</i>	Humedad relativa media (%)
<i>H</i>	Disponibilidad hídrica del lugar
<i>H</i>	Altura del murete del microembalse o profundidad de la poceta
<i>H₁-H₂</i>	Diferencia de carga (ley de Darcy)
<i>HDE</i>	Humedad disponible para cada estrato
<i>HP</i>	Periodo de helada probable
<i>HS</i>	Periodo de helada segura
<i>i</i>	Ángulo de inclinación del talud
<i>i</i>	Gradiente hidráulico (ley de Darcy)
<i>i(t)</i>	Intensidad de precipitación
<i>I</i>	Índice de Lang, Martonne, Meyer, Dantín-Revenga, Emberger y FAO
<i>I</i>	Volumen de agua infiltrado
<i>I</i>	Longitud de la columna del medio poroso (ley de Darcy)
<i>I₃₀</i>	Intensidad de lluvia máxima en 30 minutos
<i>I_h</i>	Índice de humedad de Thornthwaite
<i>IH</i>	Intervalo horizontal o separación entre bordos
<i>I_i</i>	Intensidad de lluvia del intervalo <i>i</i>
<i>IS</i>	Intervalo de siembra
<i>It</i>	Intercepción
<i>k</i>	Coeficiente de gasto
<i>k</i>	Permeabilidad o conductividad hidráulica a saturación
<i>k</i>	Coeficiente de escorrentía
<i>k·(y-H)^x</i>	Ecuación de descarga del rebosadero
<i>k_c</i>	Coeficiente de cultivo
<i>K</i>	Factor de erosionabilidad del suelo
<i>K</i>	Conductividad hidráulica de un material poroso
<i>K</i>	Intensidad de la sequedad

$K(\theta)$	Conductividad hidráulica no saturada
l	Longitud de línea (subsolado, terrazas) que corresponde a cada planta
l_d	Longitud de ladera desmontada (terrazas)
l_t	Longitud de ladera terraplenada (terrazas)
l'	Longitud de ladera afectada (terrazas)
L	Longitud total de terrazas abiertas en 1 ha
L	Porcentaje de limo (USDA)
L	Factor de longitud de ladera
L	Longitud de una columna de material poroso
L	Longitud del área de cultivo
LT	Longitud total entre bordos antierosivos
m	Temperatura media de las mínimas del mes más frío
m	Coeficiente de pendiente
M	Temperatura media de las máximas del mes más cálido
M	Factor de textura
MAX	Escorrentía máxima que puede escapar de la unidad sistematizada para alcorque nulo
MC	Tamaño de la microcuenca
MR	Precipitación media del periodo octubre-mayo
MV	Precipitación media del periodo junio-septiembre
n	Número de horizontes del perfil edáfico
n	Tamaño de la muestra
n	Número de días entre lluvias
n	Número de individuo dentro de la muestra (test de Kolmogorov-Smirnov)
n	Número de intervalos en que se divide un aguacero
n	Número de rejones del apero subsolador
N	Número de curva
N	Densidad de plantación
N	Número total de individuos de la muestra (test de Kolmogorov-Smirnov)
N	Parámetro de la función de Goodrich
$N(I)$	Número de curva para condición previa de humedad I
$N(II)$	Número de curva para condición previa de humedad II
$N(III)$	Número de curva para condición previa de humedad III
NAC	Número de curva de la ladera actual degradada
NAL	Número de curva en el caso de alcorques aislados
NEQ	Número de curva equivalente de la unidad sistematizada
NI	Número de curva del área de impluvio
N_{in}	Número de curva de los pasillos de escorrentía (sistematizaciones incompletas)
$NMED$	Número de curva promedio en sistematizaciones incompletas
N_{min}	Número de curva clímax
NR	Número de curva del área de recepción
p	Espesor del perfil edáfico considerado
p_e	Porosidad eficaz o efectiva
p_T	Porosidad total
p_u	Porosidad útil
P	Precipitación anual media (mm)
P	Precipitación
P	Precipitación del aguacero
P	Factor de prácticas de conservación de suelos
P	Lluvia que cae durante el periodo de desarrollo del cultivo
$P0$	Umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada
$P1$	Precipitación mínima o umbral de escorrentía en el área de impluvio
$P2$	Precipitación límite o umbral de escorrentía de la unidad sistematizada
$P3$	Precipitación máxima
PAC	Escorrentía en la ladera actual degradada
PD	Precipitación de diseño
PE	Precipitación estival mínima
PEH	Patrón de extracción de humedad
P_e	Precipitación efectiva
$PIMP$	Disponibilidades hídricas en el área de impluvio
$PLAD$	Umbral de escorrentía correspondiente a $NMED$

PM	Contenido másico de humedad en el punto de marchitamiento permanente
$P_{máx}$	Umbral de escorrentía de la ladera restaurada (correspondiente a N_{min})
$P_{máx}$	Precipitación máxima diaria anual
P_{MEX}	Valor medio anual de la máxima lluvia mensual
PMP_i	Punto de marchitamiento permanente del horizonte i
PP	Precipitación pluvial
PP	Precipitación promedio anual según la isoyeta
PP	Precipitación pluvial al 75 % de probabilidad de ocurrencia
PP_e	Precipitación efectiva
PR	Umbral de escorrentía del área de recepción
P_r	Profundidad efectiva de enraizamiento
$PROM$	Disponibilidad hídrica promedio de la ladera
PUM	Umbral de escorrentía en el caso de alcorques aislados
Q	Caudal
Q	Escurrimiento hacia el área de cultivo
Q	Escorrentía superficial real
r	Radio del capilar edáfico
r	Relación entre el área de captación y al área de cultivo
r_e	Retención específica
R	Relación entre el área de impluvio y el área de recepción
R	Factor de erosividad de la lluvia o índice de erosión pluvial
Re	Número de Reynolds
R_h	Radio hidráulico
RH	Requerimientos de agua del cultivo
R_r	Retención real de agua
s	Superávit (ficha hídrica de Thornthwaite)
s	Pendiente de la ladera
s	Desviación típica
S	Factor de pendiente de ladera
S	Precipitación de diseño
S	Superficie de la unidad sistematizada
S	Retención máxima posible (método del número de curva)
S	Superficie total de la cuenca
S	Sección transversal atravesada por el flujo (ley de Darcy)
$S(y)$	Superficie anegada
S_1	Superficie del área de impluvio
S_2	Superficie del área de recepción
S_3	Área de proyección del bulbo húmedo
S_{copa10}	Superficie de copa a los 10 años
S_i	Superficie de la cuenca a la que corresponde un número de curva N_i
S_{in}	Superficie correspondiente a cada árbol que produce escorrentía incontrolada
S_m	Sección mojada
S_p	Superficie disponible para cada planta
t	Lapso de tiempo en el que se desea que el relieve artificial quede completamente atenuado o vida útil de la sistematización primaria
t_0	Inicio del aguacero
t_f	Tiempo de conclusión
t_i	Tiempo de encharcamiento del área de impluvio
t_l	Tiempo límite para la unidad sistematizada
$t_{máx}$	Tiempo máximo mensual de encharcamiento
t_r	Tiempo de encharcamiento del área de recepción
t_v	Tiempo final de rebosadura
T	Temperatura media anual ($^{\circ}$ C)
T	Tensión máxima de vapor de agua correspondiente a la temperatura media
T	Asentamiento
T	Periodo de retorno
T	Transmisividad del acuífero (ley de Darcy)
TA	Tiempo de abatimiento de la humedad disponible por estrato
T_i	Duración del intervalo de lluvia i
$T2$	Precipitación máxima en 24 horas con periodo de retorno de 2 años

T_m	Temperatura media mensual
$T_{máx}$	Tiempo máximo de embalse después de un episodio de lluvia
$TMMC_i$	Temperatura media de las máximas
$TMMF_i$	Temperatura media de las mínimas
UC	Uso consuntivo
$v_i(t)$	Velocidad de infiltración en el área de impluvio
v	Velocidad de flujo
V	Volumen de materiales excavados antes de asentamiento
V	Volumen del microembalse
V'	Volumen de materiales excavados después de asentamiento
V_d	Volumen de desmonte por unidad de longitud (terrazas)
V_0	Volumen de terreno natural
V_s	Volumen de la fase sólida
V_t	Volumen de terraplén por unidad de longitud
V_T	Volumen total
V_V	Volumen de huecos
W_0	Aqua disponible en la zona radical al principio de la estación seca
W_e	Aqua disponible en la zona radical al final de la estación seca
$w_i(t)$	Velocidad de infiltración en el área de recepción
x	Exponente de descarga
x_1	Precipitación media anual mínima (parámetro de la función de Goodrich)
X	Porcentaje de partículas de tamaño limo y arena muy fina
X	Tiempo máximo mensual de encharcamiento (en porcentaje)
y	Profundidad de la lámina de agua en el microembalse
$y-H$	Carga de vertido
Y	Porcentaje de partículas de tamaño arcilla
Z	Diferencia de cota afectada (terrazas)
α	Coeficiente de la función de distribución de Gumbel
γ	Peso específico del agua
δ	Densidad aparente de sedimentos removidos, transportados y depositados
δ	Ángulo del talud de desmonte (terrazas)
ΔE_s	Escorrentía superficial que provoca el aguacero
ΔZ_G	Descenso del c.d.g. de la tierra removida (terrazas)
$/\Delta/$	Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia real y calculada (test de Kolmogorov-Smirnov)
ε	Ángulo de la contrapendiente de la explanación (terrazas)
ε_T	Porosidad
θ	Ángulo de contacto del menisco con el capilar
φ	Factor de cálculo de la evapotranspiración residual
λ	Longitud de la ladera
λ	Ángulo del terreno (terrazas)
μ	Coeficiente de la función de distribución de Gumbel
ρ_a	Densidad aparente
ρ_s	Densidad real
σ	Coeficiente de tensión superficial del agua
τ	Ángulo del talud del terraplén (terrazas)
Ψ_H	Potencial hidráulico
ν	Viscosidad cinemática del agua
$\%P$	Porcentaje probable de precipitación pluvial

Esta Tesis Doctoral
se terminó de redactar
el 30 de junio de 2004.