

DIMENSIONADO DEL MICROEMBALSE PARA LA RESTAURACIÓN FORESTAL EN ZONAS ÁRIDAS

Jorge Mongil Manso¹ y Andrés Martínez de Azagra Paredes²

¹ Grupo de Hidrología y Conservación de Suelos. Universidad Católica de Ávila. Canteros s/n. 05005-ÁVILA (España). Correo electrónico: jorge.mongil@ucavila.es

² Unidad de Hidráulica e Hidrología. E.T.S. Ingenierías Agrarias (U. de Valladolid). Av. de Madrid 44. 34004-PALENCIA (España). Correo electrónico: amap@iaf.uva.es

Resumen

En el proyecto de cualquier repoblación forestal en una zona seca situada en ladera, la economía del agua debe ser una de las principales consideraciones a tener en cuenta. La recolección de una cantidad suficiente de agua para los brinzales en sus primeras etapas de vida resulta decisiva para que el resultado de la repoblación sea exitoso. En este trabajo, se enumeran y desarrollan algunos criterios que sirven para fijar la capacidad del microembalse o alcorque a crear con la preparación del suelo, y que orientan al técnico encargado de la restauración forestal, con el fin de incrementar la supervivencia del repoblado, reduciendo al mismo tiempo la modificación del microrrelieve de la ladera a lo mínimo imprescindible.

Palabras clave: Cosechas de agua, Repoblación forestal, Zonas áridas, Oasificación

INTRODUCCIÓN

Un sistema de recolección de agua se compone de dos partes: un área donde se induce y genera la escorrentía superficial (área de impluvio o productora) y un área en donde se recogen y almacenan estos aportes hídricos (área de recepción o colectora). Es en esta área donde se instala un cultivo agrícola o se realiza una siembra o plantación de especies forestales. Las plantas se desarrollan mejor gracias al microclima favorable inducido. La mayor parte de los métodos de preparación del suelo en el sector forestal 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. Este proceso ha

sido denominado por los autores como oasificación (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 2000; MARTÍNEZ DE AZAGRA et al., 2004), que consiste en la construcción de pequeñas estructuras de tierra para recoger e infiltrar la precipitación y la escorrentía, por modificación de la fisiografía de las laderas de forma adecuada y no impactante (véase www.oasificacion.com). De esta manera se pueden mejorar las condiciones hídricas del suelo, lo que posibilita el establecimiento y desarrollo de una vegetación leñosa que invierta el peligroso proceso de desertificación.

En el presente trabajo, basándonos en el modelo hidrológico MODIPÉ (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996) y teniendo muy presente la economía del agua, ofrecemos unos criterios de referencia con los que diseñar una repoblación forestal en laderas de zonas áridas y semiáridas. Estos criterios deben servir al técnico encargado

de proyectar la repoblación para determinar la densidad de plantación y el tamaño del microembalse a construir, alterando lo mínimo posible el microrrelieve de la ladera.

CRITERIOS PARA EL DIMENSIONADO DEL MICROEMBALSE

La mayoría de los tratamientos de preparación del suelo en las repoblaciones forestales en zonas secas buscan invertir procesos de desertificación por aridez edáfica. 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.

MONGIL & MARTÍNEZ DE AZAGRA (2006) han elaborado una metodología para dimensionar el microembalse o alcorque de la preparación del suelo en la restauración de la vegetación y en la conservación de suelos. Esta metodología, denominada FO-REST (acrónimo de RESTauración FOrestal), se compone de una serie de criterios que orientan al técnico sobre la capacidad que debe tener el microembalse. En este trabajo se realiza una breve síntesis de esta metodología, remitiendo al lector a la referencia citada para obtener una explicación más detallada de la misma. Los criterios a considerar son los siguientes:

1) Criterio hidrometeorológico.- Para que el microembalse cumpla su función, debe producirse endorreísmo para un determinado aguacero de cálculo; es decir, todo el agua que llegue al área de recepción debe quedarse e infiltrarse en ella. Para conseguirlo se calcula la capacidad del microembalse (CAPA) ajustando la serie de precipitaciones máximas diarias a la distribución de Gumbel.

Empleando el modelo MODIPÉ, se obtiene la CAPA (y la altura de los muretes del microembalse) que consigue endorreísmo para un periodo de retorno de 10 años (lapso de tiempo que se corresponde con la vida útil general de una preparación del suelo).

2) Criterio de proporcionalidad con el área de impluvio.- El área de impluvio 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. De esta manera se asegura también el endorreísmo en la unidad sistematizada. En el modelo MODIPÉ, el tamaño necesario o de referencia para el microembalse se determina mediante una variable denominada *MAX*, que es el volumen de agua que escurriría de la unidad sistematizada si la capacidad del microembalse 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, 1996). Con estas ecuaciones y conociendo la relación entre el área de impluvio y el área de recepción, o los valores de éstos, la precipitación de cálculo y los umbrales 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.

3) Criterio de resguardo hidráulico.- Se trata de incrementar la altura de los muretes, obtenida por los dos primeros criterios, levemente, lo que supone una disminución del número de curva equivalente (*NEQ*) en varios puntos. Los objetivos principales del resguardo son: permanecer del lado de la seguridad en la consecución de endorreísmo en la microcuenca; y 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. 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.

- 4) **Criterio edáfico de la capacidad de retención de agua disponible.**- 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. 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. 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. En conclusión, es necesario que se cumpla la siguiente inecuación:

Volumen alcorque lleno ≤ *Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)*

- 5) **Criterio edáfico de la porosidad.**- La altura de los muretes del microembalse y la profundidad del suelo (de la preparación del suelo, de las raíces) son variables que deben estar relacionadas. Si se asocia el criterio edáfico explicado anteriormente con el concepto de porosidad útil, obtenemos la siguiente igualdad:

Volumen del alcorque lleno = *Volumen de poros útiles*

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

siendo: S_2 = Área de recepción (m^2); H = Altura de los muretes (m); S_3 = Área que en proyección horizontal ocupa el "bulbo húmedo" (m^2), siendo $S_3 \geq S_2$; h = Profundidad del "embalse del suelo" (m); p_u = Porosidad útil (porosidad que retiene agua capilar a un potencial hídrico aprovechable por las plantas) (en tanto por uno).

Despejando la altura de los muretes:

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

$$S_3 \geq S_2 \rightarrow H \geq h \cdot p_u$$

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.

- 6) **Criterio edáfico de la infiltración.**- Siguiendo con la idea de conseguir endorreísmo en la unidad sistematizada, en este criterio se intenta lograr ese endorreísmo partiendo de tasas medias de infiltración. En una unidad sistematizada, bajo una precipitación constante, puede estimarse un índice medio de infiltración ϕ . Una vez conocido ϕ y aplicando la ecuación de continuidad, se puede obtener la altura del microembalse como:

$$H \approx (i - \phi) \cdot D \cdot \kappa$$

Siendo:

i = Intensidad de lluvia

D = Duración del aguacero

κ = Relación entre el tamaño de la unidad sistematizada y el área de recepción (S/S_2)

ϕ = Tasa uniforme de pérdidas (o índice de infiltración)

- 7) **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). 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 de este método. 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_{\min}), es decir, el número de curva de la vegetación climática de la zona: $NEQ \geq N_{\min}$

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 climácico. El rango de variación del número de curva entre la situación actual degradada (NAC) 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. A cada número de curva N le corresponde un umbral de escorrentía P_0 , que se define mediante la ecuación siguiente:

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

Mediante esta ecuación, se pueden obtener los umbrales de escorrentía tanto para la ladera actual degradada (PAC) 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. 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 ecosistema, en el suelo y también en el subsuelo (si los frentes húmedos escapan de la rizosfera).

8) 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. 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). En el cálculo de la capacidad de un embalse intervienen dos grupos de variables: las aportaciones (A) y las demandas (D). En una repoblación forestal, el microembalse deberá compensar con precipitación y recolección de agua las necesidades hídricas de la planta a instalar:

a) Aportaciones.- las aportaciones que alimentan al alcorque son las precipitaciones

directas sobre el área de recepción (P) más la escorrentía que llega a dicha área (E_{s1}) desde el área de impluvio.

b) Demandas.- El microembalse deberá proporcionar a las plantas un “caudal regulado” igual a las necesidades fisiológicas de agua de las mismas. La estimación de estas necesidades es, sin duda, 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). No se encuentran suficientes estudios respecto a los requerimientos hídricos de las especies forestales. No obstante, 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). De esta manera puede establecerse un patrón de requerimientos hídricos, que constituirán las demandas. Una vez conocidas las aportaciones y las demandas, se aplica el método de diagrama de masa. Éste es un método sencillo de dimensionado hidráulico de embalses, desarrollado por RIPPL (1883) (citado por ZAPATA, 2001). El mayor valor de las diferencias positivas acumuladas entre las demandas y las aportaciones representa el volumen máximo necesario para satisfacer la demanda y, por lo tanto, será el volumen que deberá tener el microembalse a construir.

9) Criterio de limitación fisiológica por encharcamiento.- Después de una precipitación abundante, el alcorque puede llenarse de agua y la planta que en él vegeta quedar anegada, poniéndola en grave riesgo su supervivencia. Con el fin de evitar la muerte por anoxia de la planta, es necesario limitar el tiempo máximo de embalse ($T_{máx}$):

$$T_{máx} \leq \frac{H}{f_{min}}$$

H = Altura de los muretes del microembalse (aproximadamente igual a $CAPA/S_2$) (cm)

f_{min} = Tasa de infiltración mínima del suelo en el área de recepción ($cm \cdot h^{-1}$). Coincide con el parámetro f_c del modelo de infiltración de Horton. Este parámetro puede estimarse a partir de la permeabilidad, utilizando la relación orientativa: $f_{min} \approx 0,5 \cdot k$, siendo k la conductividad hidráulica del suelo.

10) Criterio paisajístico o topográfico.- El movimiento de tierras de la preparación del terreno produce un impacto negativo sobre el paisaje y el suelo. Por este motivo hay que intentar modificar el relieve natural lo mínimo imprescindible, mediante un adecuado diseño de la sistematización primaria, sustentado en la economía del agua. Así mismo, conviene comprobar que el microrrelieve creado artificialmente se atenúa en pocos años. De esta manera se comprueba que el impacto paisajístico es reversible en poco tiempo. Para ello puede utilizarse una ecuación, derivada de la USLE, que sirve para calcular el volumen de sedimentos que van a parar al microembalse (A_1):

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

Siendo: R , K , L , S y C = Factores de la USLE; t = Vida útil de la sistematización; S_1 = Área de impluvio; C_e = Coeficiente de emisión de sedimentos; y δ = Densidad aparente de los sedimentos removidos, transportados y depositados en S_2 . Si se cumple que $CAPA \leq A_1$ el microembalse resulta completamente aterrado (tras su vida útil) y el relieve artificial generado queda suavizado durante ese tiempo.

11) Criterios mecánicos (estabilidad, asentamiento, estanqueidad).- 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.

Para que los muretes o caballones cumplan su función de forma adecuada, debe evitarse 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). Respecto a

estas dimensiones pueden hacerse algunas recomendaciones que pueden consultarse en MONGIL & MARTÍNEZ DE AZAGRA (2006).

12) Criterio económico.- La preparación del terreno, el refinado y la conformación del alcorque no deben incrementar de manera considerable los costes de la repoblación. No obstante, el sobrecoste que supone diseñar un buen sistema de recolección de agua se justifica en el caso de intentos reiterados fallidos de repoblación por métodos tradicionales, peligro para poblaciones o asentamientos humanos, riesgo para infraestructuras (presas, carreteras, vías de ferrocarril, puentes, etc.), o una zona muy degradada que requiera de todos los esfuerzos para su restauración (concepto de área crítica).

INTEGRACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO

Una vez analizados los criterios propuestos para el dimensionado de microembalses, bueno será ofrecer algunas pautas acerca del orden más adecuado de efectuar los cálculos y de la forma correcta de integrar todos los criterios hasta llegar a concretar $CAPA$. Para ello, pueden agruparse estos criterios de la forma siguiente:

- Criterios fundamentales.-** Sirven como punto de partida, pues consideran condiciones o principios de vital importancia en el diseño. Criterios hidrometeorológico, de resguardo hidráulico, proporcionalidad con el área de impluvio, ecológico.
- Criterios de referencia.-** Son también importantes, por lo que se consideran como referentes en el diseño del microembalse. Edáficos, paisajístico, limitación fisiológica, fisiológico.
- Criterios recomendariorios.-** Simplemente aconsejan modificaciones del tamaño del embalse en función de aspectos relevantes de diseño, pero no fundamentales. Mecánicos.
- Criterio económico.-** Este criterio, al no ser meramente técnico, se sitúa al final del proceso, condicionando la decisión definitiva sobre el tamaño a dar a $CAPA$.

BIBLIOGRAFÍA

- CRITCHLEY, W. & SIEGERT, K.; 1991. *Water harvesting*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; 1996. *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; 2000. Principles for designing endorheic microcatchments. *In: Third International Congress Man and Soil at the Third Millennium*, I: 507-520.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; MONGIL, J. & ROJO, L.; 2004. Oasification: reclamation forestry addressing desertification hazards. *In: NATO-CCMS and Science Committee Workshop on Desertification in the Mediterranean Region. A security issue*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- MONGIL, J. Y MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; 2006. Diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas: tamaño del microembalse y relación entre el área de impluvio y el área de recepción. *Investigaciones Geográficas* 40: 201-226.
- MONTERO DE BURGOS, J.L. Y GONZÁLEZ REBOLLAR, J.L.; 1983. *Diagramas bioclimáticos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.
- ZAPATA, A.J.; 2001. *Hidrología*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería. Almería.