

# CRITERIOS PARA FIJAR LA RELACIÓN ENTRE EL ÁREA DE IMPLUVIO Y EL ÁREA DE RECEPCIÓN EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DE ZONAS ÁRIDAS

A. MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES<sup>1</sup>

J. MONGIL MANSO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología  
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Universidad de Valladolid)  
Avenida de Madrid, 44 34004-Palencia  
E-mail: amap@iaf.uva.es

<sup>2</sup> Área Departamental Agroforestal y Ambiental  
Universidad Católica de Ávila  
C/ Canteros, s/n 05005-Ávila  
E-mail: jorge.mongil@ucavila.es

## Resumen

En las zonas áridas y semiáridas, la restauración forestal se plantea como una solución muy interesante para frenar la desertificación, puesto que con ella se consigue la protección del suelo y la conservación del agua. En estos lugares con escasez de precipitaciones, la repoblación debe diseñarse como un sistema de recolección de agua, compuesto por un área de impluvio (productora de escorrentía) y un área de recepción (en la que se infiltra el agua). Por lo tanto, una de las decisiones más importantes que debe tomarse al proyectar la preparación del suelo es la relación óptima entre estas dos superficies, que influirá de manera decisiva sobre la densidad de repoblación.

Palabras clave: Cosechas de agua, recolección de agua, repoblación forestal, microcuencas

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de recolección de agua consta de dos partes: 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, arbustos y matas leñosas o se siembran sus semillas.

Generalmente, 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 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 (MARTÍNEZ DE AZAGRA y MONGIL, 2001). 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 de las plantas introducidas.

En este trabajo se desarrolla un método específico de cálculo de la relación entre área de impluvio y área de recepción, 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 anteriormente.

## 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 m<sup>2</sup>, 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. Por su parte, CRITCHLEY & SIEGERT (1991) recogen datos de microcuencas para uso arbóreo, de zonas tan distantes como Kenia, Israel o India, que van desde cocientes entre 0,9 (para *Ziziphus mauritiana* en India) y 64 (para especies productoras de leñas en Nigeria).

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 próximas a 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. Valores más pequeños (originariamente 2:1) se emplean en un tipo de microcuencas denominadas *meskat*, tradicionales en Túnez para el cultivo de frutales y olivos (TOBBI, 1994).

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 y CEPEDA, 1970; ELIZONDO, 1977; CARRANZA, 1978, 1979; NÚÑEZ, 1982). Más afín a 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. 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 se explica por la mayor longitud de recorrido y, en consecuencia, por un aumento del tiempo de concentración (= del tiempo de oportunidad de infiltración). 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).

Se han revisado algunos de los modelos existentes a nivel mundial, de carácter agrícola

fundamentalmente, para definir la relación óptima o necesaria entre el área de impluvio y el área de recepción. Los métodos analizados son: ANAYA *et al.* (1976), SMITH (1978), VELASCO-MOLINA (1983), FINKEL (1985), CRITCHLEY & SIEGERT (1991), Velsavill (VILLANUEVA *et al.*, 1987), CADOT (1989), PALOMO (1990) y OWEIS *et al.* (1999). Sus principales características se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se basan en la compensación de las necesidades hídricas del cultivo mediante la precipitación directa (que cae en el área de recepción) y la escorrentía generada en el área de impluvio (recolección de agua).
- Tienen carácter agrícola (a excepción del método para árboles desarrollado por CRITCHLEY & SIEGERT (1991)).
- Son de aplicación sencilla.
- Estiman las necesidades hídricas a través de la *ETP*.
- Calculan la escorrentía mediante coeficientes de escurrimiento.
- A menudo, emplean balances hídricos más precisos (a nivel temporal y/o edáfico) de lo requerido en el diseño de repoblaciones forestales.

El método de FINKEL (1985) posiblemente sea el más empleado a nivel mundial. Se resume en la siguiente ecuación:

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

donde:  $C$  = Área de captación (o de impluvio) [=  $S_1$ , en la nomenclatura del artículo]

$CA$  = Área de cultivo (o de recepción) [=  $S_2$ ]

$RH$  = Requerimientos de agua del cultivo

$PD$  = Precipitación de diseño

$k$  = Coeficiente de escorrentía

$E$  = Factor de eficiencia

## METODOLOGÍA PROPUESTA

Fundamentado en la economía del agua para las plantas, la idea principal del método que se presenta es que el tamaño del área de impluvio sea el adecuado para proporcionar una determinada cantidad de agua que permita (o asegure) la subsistencia del repoblado durante su fase más crítica (el 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 1).

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:

$E_{s1}$  = Escorrentía formada en el área de impluvio que llega al área de recepción ( $l \cdot m^{-2}$ )

$P$  = Precipitación de diseño ( $l \cdot m^{-2}$ )

$ET_{rep}$  = Evapotranspiración real de la repoblación ( $l \cdot m^{-2}$ )

$S_1$  = Área de impluvio ( $m^2$ )

$S_2$  = Área de recepción ( $m^2$ )

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

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ET_{rep} - P}{E_{s1}}$$

Para evitar equívocos, conviene concretar cada uno de los componentes de la ecuación con todo detenimiento:

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 y NAVARRO, 1996) en su balance hídrico y MONTERO DE BURGOS y GONZÁLEZ REBOLLAR (1983) en los diagramas bioclimáticos, entre otros.

La estimación de la evapotranspiración real de las especies forestales (y especialmente de una repoblación) es, en la actualidad, poco precisa; por ello convendrá profundizar en el tema en futuros trabajos de investigación.

¿Cuál es entonces la medida para los requerimientos de agua de una repoblación? La respuesta a esta pregunta hay que buscarla en la propia Naturaleza. Aquellos años en los que se produzca una exitosa regeneración en 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 utilizada en la gran mayoría de los métodos revisados en este trabajo.

b) Precipitación de diseño.- Se utiliza como tal la precipitación anual que tiene una probabilidad de no excedencia (o 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 de precipitación o de caudal).

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 (es decir: la cosecha de agua) debe calcularse por el método del número de curva, puesto que es más preciso y recoge una mayor cantidad de situaciones que las tablas habituales de coeficientes de escorrentía.

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

$NI =$  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 (serie real de aguaceros) o, en su defecto, utilizar una distribución de precipitaciones obtenida por el método de los aguaceros virtuales (a este respecto puede consultarse MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996). El método de los aguaceros virtuales plantea tres casos posibles de distribución de las precipitaciones, que generan respectivamente una escorrentía máxima, mínima y media (lo que provoca una indeterminación, que se evita utilizando la serie completa de aguaceros).

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).

- 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 microcuencas *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 segunda ecuación que obtiene una  $R$  mayor, lo que nos permite crear un intervalo de valores a la hora de elegir la relación definitiva de  $R$  para la repoblación. Así pues, se puede calcular la relación entre el área de impluvio y el área de recepción por la ecuación vista anteriormente:

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

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

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

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 ofrece una mayor garantía de éxito en la supervivencia de la repoblación (a cambio de agrandar el marco y el tamaño de las trampas de agua, a veces innecesariamente).

## CONCLUSIONES

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 necesaria en el área de recepción y después fijar la mencionada relación, que a su vez condiciona el espaciamiento.
2. El tamaño del área de impluvio debe ser tal, que aporte un volumen de agua que permita y asegure la supervivencia y crecimiento de las plantas instaladas.
3. 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) ( $E_{s1}$ ).
4. 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 fundamental del método.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General para la Biodiversidad en el ámbito de su proyecto LUCDEME (Lucha Contra la Desertificación en el Mediterráneo).

## BIBLIOGRAFÍA

- ANAYA, G.M.; TOVAR, S.; TOVAR, A. y MACÍAS, L.; 1976. *Métodos de captación de lluvia para zonas agrícolas con temporal deficiente*. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Chapingo.
- BOERS, TH. M. & BEN-ASHER, J.; 1982. A review of rainwater harvesting. *Agric. Water Manage.*, 5: 145-158.
- 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.
- CARRANZA, P.A.; 1978. *Establecimiento de huertos frutales con aguas de escurrimiento en pequeñas cuencas hidrológicas*. Avances de Investigación UAAN. Saltillo.
- CRITCHLEY, W. & SIEGERT, K.; 1991. *Water harvesting*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- 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.
- 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.
- 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.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; 1996. *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. y NAVARRO, J.; 1996. *Hidrología forestal. El ciclo hidrológico*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. y 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, M.L. y 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.

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.

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.

OWEIS, TH.; HACHUM, A. & KIJNE, J.; 1999. *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas*. SWIM Papers. Colombo.

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

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.

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

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.

TOBBI, B.; 1994. Water harvesting: existing, historic and potential in Tunisia. *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. FAO.

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. y 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).

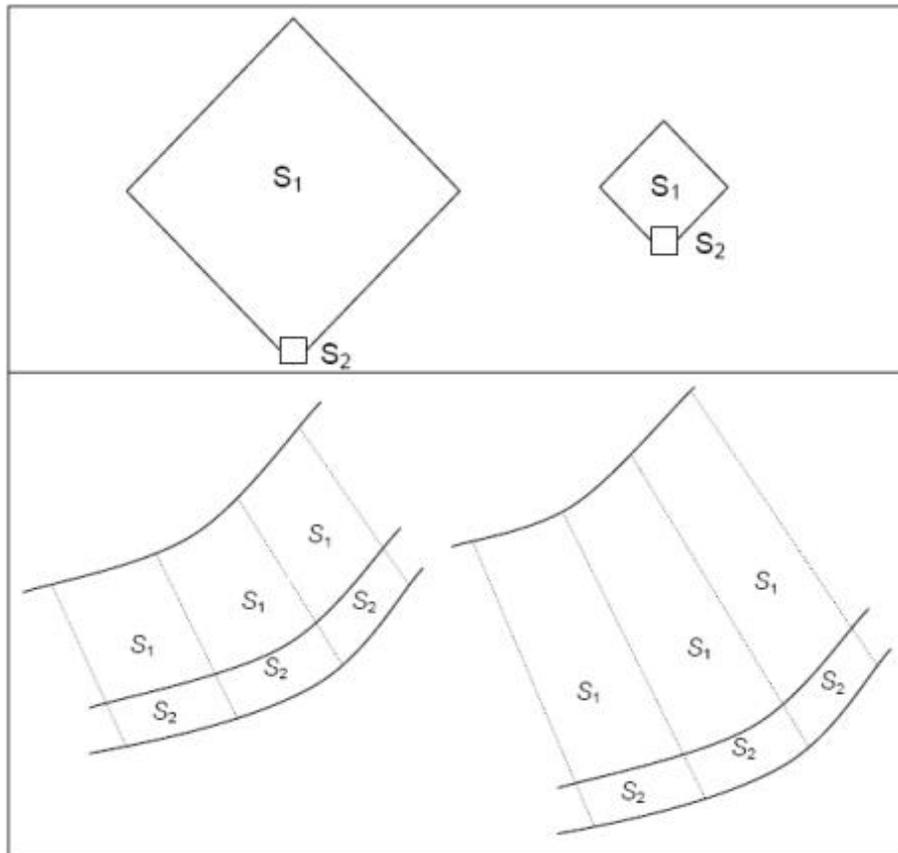


Figura 1. En las preparaciones del suelo, como las microcuencas (arriba) u operaciones lineales (abajo), el área de impluvio ( $S_1$ ) debe tener un tamaño adecuado para dotar de agua suficiente al área de recepción ( $S_2$ ).