

Revisión de Bases Técnicas

René van Veenhuizen,
Oficial Profesional Asociado en Suelos, FAO

INTRODUCCIÓN

En este texto se denomina captación de agua, sea de lluvia o de nieblas, a la recolección de la escorrentía superficial o de la niebla, para su utilización en la producción agropecuaria o forestal. La captación de agua puede ser considerada como una forma rudimentaria de riego. La diferencia está en que con la captación de agua de lluvia o de nieblas, el productor tiene poco o ningún control sobre la oportunidad de aplicación del agua ya que la escorrentía superficial generalmente se aprovecha cuando llueve y el aprovechamiento de las nieblas depende principalmente de las condiciones atmosféricas.

La ocurrencia y cantidad de la escorrentía superficial dependen de las características de la precipitación, clima, suelo, vegetación, pendiente y tamaño del área. La teoría general de captación de agua de lluvia/niebla es:

AGUA DE CONSUMO O DE RIEGO ADICIONAL = CAPTACIÓN DE AGUA

Captación de agua de lluvia = escorrentía inducida + precipitación recogida

$$AC = (PP * Ac * Ce) + (PP * As)$$

- AC = Volumen de agua captado (litros)
- PP = Precipitación (mm)
- Ac = Área de captación de agua (m²)
- As = Área de siembra/cosecha (m²)
- Ce = Coeficiente de escorrentía

Captación de agua de niebla = niebla captada + precipitación recolectada

$$AC = R * (A * Vs * T) * V$$

- AC = Volumen de agua captado (litros)
- R = Eficiencia de la trampa/colector de nieblas
- A = Superficie de intercepción (área de captación de nieblas)
- Vs = Velocidad del viento
- T = Tiempo (duración de las nieblas o de la captación)
- V = Volumen de la masa del aire que pasa por el colector

Para determinar cuanto volumen de agua es necesario captar hay que evaluar el requerimiento de agua del cultivo seleccionado. A ese requerimiento se le llama también "uso consuntivo" de las plantas. El coeficiente de escorrentía depende de las características del suelo en el área de captación, el suelo más conveniente es el que facilita la escorrentía (compacto, impermeable, sin vegetación). En cambio en el área de cultivo los requerimientos de suelo (permeables, retentivos, fértiles), son diferentes. Las características del clima son importantes

para determinar tanto los requerimientos del cultivo como el volumen de agua que se puede captar.

Como se dijo anteriormente, todo sistema de captación de agua de lluvia consta de un área de captación (recolección) y de un área cultivada (de almacenamiento, de siembra, o de plantas). Para un diseño apropiado de un sistema, es recomendable determinar la relación entre el área de captación (A_c) y el área cultivada (A_s). Muchos sistemas de captación de agua de lluvia exitosos han sido establecidos sólo estimando la relación entre área de captación y área de cultivo. Este puede ser sin duda el único enfoque posible donde no se tenga información básica sobre lluvia, escorrentía superficial y requerimientos de agua por el cultivo. Sin embargo, el cálculo de la relación resultará ciertamente en un sistema más eficiente y efectivo, si se dispone de la información básica y ésta es confiable.

El cálculo de la relación A_c/A_s es principalmente útil para sistemas de captación de agua de lluvia donde se pretende el establecimiento de cultivos. Este tema se trata en las diferentes descripciones de las técnicas en este manual.

La cantidad de agua obtenida del área de captación es una función de la cantidad de escorrentía superficial producida por la lluvia en esa superficie. Esta escorrentía superficial, para un periodo de tiempo definido, se calcula multiplicando una lluvia de "diseño" por el coeficiente de escorrentía superficial. Como no toda la escorrentía superficial puede ser eficientemente utilizada (debido a filtración profunda, etc.), tiene que ser multiplicado adicionalmente por un factor de eficiencia.

La cantidad de agua requerida es obtenida multiplicando el tamaño del área cultivada por los requerimientos netos de agua por el cultivo, que representa el requerimiento total de agua (uso consuntivo), menos la supuesta lluvia de diseño.

En este capítulo se revisan las bases técnicas generales, es decir la información técnica que se necesita para determinar el potencial de la captación y para planificar las obras. Los temas que se tratan son precipitación, suelos, planta, balance hídrico, captación de las nieblas, cuenca hidrográfica y labores culturales.

PRECIPITACION (PLUVIAL)

La precipitación es uno de los factores que se debe analizar para definir si es, o no factible realizar obras de captación. Para un planificador en captación de agua de lluvia, la tarea más difícil es seleccionar el diseño apropiado de acuerdo a la lluvia. Los datos importantes se obtienen de las estaciones meteorológicas que cuenten con datos de precipitación mensual de por lo menos diez años (Anaya, 1994).

Las precipitaciones de las zonas áridas y semiáridas resultan en muchos de los casos de procesos convectivos que producen aguaceros de corta duración, intensidad relativamente alta y en una área limitada. Este, sin embargo, no es el caso de las áreas costeras del Pacífico, en Chile, Perú, Ecuador y Baja California (México), donde las precipitaciones son de tipo frontal. Pero, generalmente las precipitaciones tienen dos características que afectan adversamente la producción agrícola; la baja cantidad y el bajo nivel de confianza (incertidumbre). Además

estas características están vinculadas en las estadísticas, en el sentido que el bajo nivel de confianza aumenta cuando la cantidad de precipitación disminuye (Hudson, 1987).

Las características de la lluvia más importantes para determinar la **cantidad**, son la intensidad, la duración y la distribución de la precipitación. Para planificar obras de captación de agua de lluvia, puede utilizarse como base la precipitación anual ó mensual. Se podría mejorar la confianza de los datos calculando la probabilidad de la precipitación. Y, para comparar más exactamente con las necesidades de los cultivos, podría determinarse la porción del agua de lluvia que podría ser utilizada por las plantas calculando la precipitación efectiva.

Cantidad, intensidad y distribución

Reij et al (1988), indican que la precipitación en las zonas áridas es tan errática, que sería mejor utilizar como requisito mínimo para la captación de agua de lluvia una precipitación media anual de 100-200 mm para obras grandes y de 500-600 para obras pequeñas.

Sin embargo, más pertinentes que la suma total de la precipitación son sus características, como **frecuencia, duración e intensidad**.

La **frecuencia** de las lluvias es la periodicidad media estadística en años en que pueden presentarse eventos de características similares en intensidad y duración (Colegio de Postgraduados, 1991). Los requisitos mínimos relacionados a la frecuencia, en la planificación de la captación de agua de lluvia son muy difíciles de establecer y dependen también de otros factores.

La **duración** y la **intensidad** son importantes porque la escorrentía ocurre sólo después de exceder un cierto límite: o la intensidad de un chubasco excede la tasa de infiltración, o la intensidad y la duración de un chubasco exceden la capacidad de almacenaje de agua del suelo (véase precipitación efectiva). Este límite depende del suelo.

La **intensidad** de la lluvia se define como la relación entre la cantidad total de lluvia (lámina de agua) que cae durante un período dado y la duración del período, y se expresa en lámina de agua por unidad de tiempo, generalmente como mm por hora (mm/h). La intensidad de la precipitación generalmente se calcula para varios intervalos y diferentes períodos. Para registrar la intensidad y la duración de la lluvia se utiliza el pluviógrafo.

Los criterios más útiles para determinar la potencialidad de la captación de agua de lluvia son la frecuencia de los chubascos individuales y la probabilidad de una cierta cantidad e intensidad de lluvia (Reij et al, 1988).

Probabilidad

En la planificación y diseño de obras de captación de agua de lluvia es importante conocer la probabilidad de que ocurra una cierta cantidad de lluvia en una cierta fecha.

En climas templados, la desviación estándar de lluvia anual es del 10 al 20 por ciento; en 13 de cada 20 años las cantidades anuales están entre 75 y 125 por ciento de la media. En climas áridos y semiáridos la relación de máximas a mínimas cantidades anuales es mucho mayor y la distribución de la lluvia anual se hace creciente con un sesgo por la creciente

aridez. **Por ejemplo**, con una precipitación media anual de 200 a 300 mm, la lluvia en 19 años de cada 20 típicamente varía desde 40 a 200 por ciento de la media. Con una precipitación media anual de 100 mm/año, hay una variación de 30 a 350 por ciento de la media. En localidades más áridas no es difícil que se presenten varios años consecutivos sin lluvia.

La **lluvia de diseño** es la cantidad de lluvia estacional en la cual, o arriba de la cual, el sistema está diseñado para proveer escorrentía superficial suficiente para cubrir el requerimiento de agua de los cultivos. Si la lluvia es inferior a esta lluvia de diseño, hay un riesgo de fracaso del cultivo debido a estrés por humedad. Cuando la lluvia es superior, entonces la escorrentía superficial está en excedente y podría sobrepasar los bordos y pues resultar en un daño a las estructuras.

La lluvia de diseño se determina según una cierta probabilidad de ocurrencia. Si por ejemplo, se fuera a establecer con un 67% de probabilidad, la lluvia ocurrirá o estará excedida (como promedio), en dos de cada tres años y la lluvia captada será suficiente para satisfacer el uso consuntivo, también en dos de cada tres años. La lluvia de diseño se determina por cálculos o estimaciones.

Un diseño conservador estará basado en una probabilidad más alta (lo cual significa una lluvia de diseño baja), para hacer el sistema más "confiable". Sin embargo, el riesgo potencial sería una inundación más frecuente del sistema en años donde la lluvia ocurrida excede a la lluvia de diseño.

Un método gráfico sencillo para determinar la probabilidad o frecuencia de ocurrencia anual de lluvia estacional se describe en el Tomo I (FAO, 1996), capítulo "Análisis de la relación lluvia/escorrentía". Para el diseño de planes de captación de agua de lluvia, este método es tan válido como cualquier método analítico descrito en textos sobre estadística.

- El primer paso es determinar el total de lluvia anual que se necesita para el ciclo vegetativo en la localidad de interés. En localidades donde no existen registros de lluvia se podrán utilizar datos de estaciones cercanas. Es importante contar con registros de muchos años, porque la variabilidad de la lluvia en zonas áridas y semiáridas puede ser considerable. Un análisis de solamente 5 ó 6 años de observaciones es inadecuado ya que estos 5 ó 6 valores pueden pertenecer particularmente a un período seco o muy lluvioso y por lo tanto puede no ser representativo para el patrón de lluvias a largo plazo.
- El siguiente paso es asignar a los totales anuales $m = 1$ para el valor más alto y $m = N$ (N observaciones o años), para el valor más bajo y ordenar los datos en forma creciente. La probabilidad de ocurrencia P (%) para cada una de las observaciones ordenadas puede calcularse de acuerdo a la ecuación:

$$P(\%) = \frac{m - 0,37 \times 100}{N + 0,25}$$

Donde:

P = probabilidad en % de la observación del rango m
 m = rango de la observación

N = número total de observaciones utilizadas

- El siguiente paso es construir un gráfico con las observaciones ordenadas contra las probabilidades correspondientes. Para este propósito puede utilizarse el papel de probabilidad normal.
- Finalmente, se adapta una curva de modo tal que la distancia de observaciones por arriba o por debajo de la curva estén tan cerca de la curva como sea posible. Esta curva puede ser una línea recta. De esta curva es posible obtener la probabilidad de ocurrencia o excedencia de un valor de lluvia de una magnitud específica. Inversamente, es también posible obtener la magnitud de la lluvia que corresponde a una probabilidad dada.
- El período de retorno T (en años), puede calcularse fácilmente una vez que la probabilidad de excedencia P (%) sea conocida, utilizando siguiente relación:

$$T = \frac{100(\text{años})}{P}$$

Precipitación efectiva

No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede realmente ser utilizada por las plantas. Parte del agua de lluvia se infiltra a través de la superficie y parte fluye sobre el suelo en forma de escorrentía superficial. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo. Del total del agua que se infiltra, parte percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenada en dicha zona y podría ser utilizada por las plantas.

El agua de lluvia evaporada, la de percolación profunda y la de escorrentía superficial no pueden ser utilizadas por el cultivo, o sea no son efectivas. A la porción restante, almacenada en la zona de raíces se le denomina precipitación efectiva.

En otras palabras, el término "precipitación efectiva" es utilizado para definir esa fracción de la lluvia que estará realmente disponible para satisfacer al menos parte de las necesidades de agua de las plantas. Este parámetro puede determinarse por experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas (FAO, 1993), que para áreas con pendientes inferiores al 4-5% se tiene:

$$\begin{aligned} Pe &= 0.8 \times PP - 25 \quad \text{si } PP > 75 \text{ mm/mes} \\ Pe &= 0.6 \times PP - 10 \quad \text{si } PP < 75 \text{ mm/mes} \end{aligned}$$

SUELOS

La diversidad de suelos en las zonas áridas y semiáridas es muy grande. Las propiedades físicas del suelo afectan la escorrentía del agua. Idealmente el suelo en el área de captación debería tener un coeficiente de escorrentía superficial alto, mientras el suelo en el área cultivada debería ser profundo, fértil y suficientemente permeable. Donde las condiciones para las áreas de captación y de cultivo se contraponen, los requerimientos del área cultivada deberán tener prioridad.

A continuación se resume los aspectos importantes del suelo que afectan el desarrollo de la planta bajo sistemas de captación de agua de lluvia.

*La **textura** de un suelo se refiere a su composición en tamaños de las partículas minerales que lo componen, lo que tiene influencia sobre diversas características importantes, incluyendo la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua disponible.*

*La **estructura** del suelo se refiere a la forma y consistencia del agrupamiento de las partículas de suelo en agregados y al arreglo de estos agregados.*

*Junto con la estructura, la **profundidad** del suelo es particularmente importante para el sistema de captación de agua de lluvia. Los suelos profundos tienen la capacidad de almacenar más escorrentía superficial captada, mientras que los suelos con menos de un metro de profundidad son poco apropiados para la captación de agua de lluvia.*

*En muchas de las áreas donde los sistemas de captación de agua de lluvia pueden ser introducidos, la baja **fertilidad** del suelo puede ser una restricción igual ó más importante como la carencia de humedad para el crecimiento de la planta. Por lo tanto es indispensable prestar también atención al mantenimiento del nivel de fertilidad.*

*Los suelos con problemas de **salinidad** o **sodicidad** pueden reducir la disponibilidad de humedad directamente, o indirectamente, así como ejercer una influencia dañina sobre el crecimiento de la planta.*

*Una tasa de **infiltración** muy baja puede ser perniciosa debido a la posibilidad de inundación en el área cultivada. Por otra parte, una tasa de infiltración baja conduce a mucha escorrentía superficial en el área de captación. La formación de costras es un problema especial en zonas áridas y semiáridas, ya que provocan altas escorrentías superficiales y bajas tasas de infiltración. Considerando que los suelos del área de cultivo deberían ser suficientemente permeables para permitir una humedad adecuada en la zona de las raíces, los requerimientos en el área cultivada deberán tener siempre prioridad.*

*La capacidad del suelo para formar bordos de tierra **resistentes** como un componente del sistema de captación de agua de lluvia, es muy importante.*

*La capacidad de los suelos para mantener y liberar niveles adecuados de humedad a las plantas, es vital para la captación de agua de lluvia. La **capacidad de agua disponible** es una medida de este parámetro, y está expresado como la lámina de agua en mm fácilmente disponible para las plantas después de que un suelo ha sido humedecido a "capacidad de campo". La capacidad de agua disponible también tiene consecuencias para el diseño técnico de cálculo.*

Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

El agua es retenida por el suelo de dos maneras: una por adsorción de la arcilla o de la materia orgánica (humedad adherida) y otra la que rellena los poros entre las partículas sólidas (humedad libre). Aquella humedad adherida no está disponible para las plantas porque se necesita una energía de succión muy alta para extraerla. La humedad libre se determina en el laboratorio y se expresa como el porcentaje por peso de suelo secado al horno, llamado porcentaje de saturación. Para determinar el **porcentaje de humedad por volumen** de suelo se necesita la **densidad aparente** del suelo:

porcentaje de humedad por volumen del suelo = porcentaje de humedad por peso * densidad aparente

Para propósitos agrícolas el porcentaje de humedad por volumen está expresado como profundidad de humedad en mm:

1 % (vol.) de humedad = 1 mm de agua dentro de una capa de suelo de 10 cm

Toda el agua dentro los poros del suelo está sometida/expuesta a fuerzas capilares que causan una succión negativa, o tensión de la humedad del suelo, expresada como la altura de una columna de agua h en cm, o como el logaritmo negativo de la tensión de humedad del suelo, **pF**. Cada tipo de suelo puede ser caracterizado por su **curva de pF**, mostrando la relación entre los valores de pF y el contenido de humedad. Los valores pF más importantes son:

- pF=0: **Punto de Saturación (PS)**, en que todo el espacio de los poros está lleno con agua
- pF=2: **Capacidad del Campo (CC)**, la tensión de la humedad del suelo después de 1 a 1,5 días de drenaje libre de un suelo saturado (generalmente utilizan valores de CC de 2,1; 2,2 ó 2,3 de pF)
- pF=4.2: **Punto de Marchitez Permanente (PMP)**, a partir del cual la fuerza de succión de las plantas no puede vencer la fuerza con que es retenida el agua en el suelo, y por lo tanto se marchitan.

Algunos valores útiles de los parámetros CC, PMP y Densidad aparente (D_a) en la planificación de los sistemas de captación *in situ* son (Anaya, 1994):

	Textura Gruesa	Textura Media	Textura Fina
D_a	1,6	1,3	1,1
CC	12%	25%	47%
PMP	5%	12%	25%

La humedad disponible para las plantas es igual a la diferencia entre el contenido de la humedad a Capacidad del Campo y el contenido de la humedad a Punto de Marchitez Permanente, y se expresa como el porcentaje en volumen (% V), o como profundidad de la humedad (mm por dm de suelo).

Lámina de agua aprovechable

La ecuación para obtener los valores de lámina de agua aprovechable es (Anaya, 1994):

$$L = (CC - PMP) * D_A * Prof / 100$$

Donde:

- L = Lámina de agua aprovechable almacenada (cm)
- CC = Contenido de humedad a capacidad de campo (%)
- PMP = Contenido de humedad a punto de marchitez permanente (%)
- Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)
- Prof. = Profundidad del suelo (cm)

(1mm de lámina de agua = 1 litro/m² = 10 m³/ha)

Relieve

La pendiente media del área de captación se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$S = H / L$$

Donde:

- S = Pendiente media de la cuenca/área de captación (%)
- H = Diferencia de nivel entre el lugar donde se construye la obra y el sitio más alejado del área de captación
- L = Distancia entre estos dos puntos

Coefficiente de escorrentía

Es la proporción de lluvia que fluye superficialmente sobre el terreno como escorrentía. Depende entre otros factores, de la pendiente, del tipo de suelo, de la cubierta vegetal, de la humedad del suelo previa a la lluvia, así como de la intensidad y duración de la lluvia.

Debería también considerarse que las condiciones físicas de un área de captación no son homogéneas. Hasta en el nivel micro hay gran variedad de diferentes pendientes, tipos de suelo, cubiertas de vegetación, etc. Cada área de captación tiene por lo tanto su propia respuesta de escorrentía superficial y responderá de distinto modo a diferentes eventos de precipitación.

El diseño de sistemas de captación de agua de lluvia requiere del conocimiento de la cantidad de escorrentía superficial que será producida por un aguacero en un área de captación dada. Se supone comúnmente que la cantidad (volumen) de la escorrentía superficial es una proporción (porcentaje) de la lámina de agua de lluvia.

$$\text{Escorrentía superficial (mm)} = K \times \text{lámina de agua de lluvia (mm)}$$

En captaciones rurales donde ninguna o solamente partes pequeñas del área son impermeables, el **coeficiente K**, que describe el porcentaje de la escorrentía superficial resultante de una lluvia, no es un factor constante. Su valor es altamente variable y depende de

los factores específicos del área de captación descritos anteriormente y de las características de la lluvia.

En el Tomo I se describe como determinar el Coeficiente de Escorrentía con datos meteorológicos, como intensidad de la lluvia, duración de los eventos y condiciones de humedad del suelo. En general, el **coeficiente de escorrentía superficial** está definido como la escorrentía superficial total observada en un año (o estación), dividida por la lluvia total caída en el mismo año (o estación).

$$K = \text{escorrentía superficial total (mm)} / \text{lluvia total (mm)}.$$

Cuando se analiza la información medida, es posible notar que una cierta cantidad de lluvia es requerida siempre antes de que ocurra cualquier escorrentía superficial. Esta cantidad, que generalmente se refiere a una lluvia umbral, representa la interceptación debido a pérdidas iniciales y almacenamiento en depresiones, así como para cubrir las pérdidas por la alta infiltración inicial.

La lluvia umbral depende de las características físicas del área y varía de una cuenca de captación a otra. En áreas con poca vegetación y donde el terreno es muy regular, la lluvia umbral puede encontrarse solamente en el rango de 3 mm, mientras en otras cuencas este valor puede exceder fácilmente los 12 mm, particularmente donde los suelos dominantes tienen una alta capacidad de infiltración. El hecho de que la lluvia umbral tenga primero que ser sobrepasada explica por qué no toda tormenta produce escorrentía superficial. Es importante conocer cuando evaluar el coeficiente de escorrentía anual de un área de captación.

Otra manera de determinar la escorrentía es por medio de lotes o parcelas de escorrentía superficial. Estos lotes son utilizados para medir la escorrentía superficial bajo condiciones controladas. Las parcelas deben ser establecidas directamente en el área o cuenca para la cual se requiere el coeficiente. Sus características físicas, como tipo de suelo, pendiente y vegetación tienen que ser representativas de los sitios donde los planes de captación de agua de lluvia serán llevados a cabo.

El coeficiente varía generalmente entre **0,1 y 0,5**. Cuando no se dispone de información, el coeficiente puede ser estimado en base a la experiencia. Sin embargo, este método debe ser evitado siempre que sea posible por los riesgos que implica.

Factor de Eficiencia

Este factor tiene en cuenta la ineficiencia de la distribución desigual del agua dentro del campo, así como las pérdidas por evaporación y percolación profunda. Donde el área de cultivo es nivelada y suavizada, la eficiencia es más alta. Los sistemas de microcaptación tienen eficiencias más altas cuando el agua es generalmente almacenada a menos profundidad. La selección del factor de eficiencia se deja a criterio del diseñador basándose en su experiencia y en la técnica seleccionada. Normalmente los rangos del factor están entre **0,5 y 0,75**.

PLANTA

Para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia, es necesario evaluar el requerimiento de agua por el cultivo seleccionado. El consumo de agua por un cultivo (ETc o Uso Consuntivo) se definen como la cantidad de agua necesaria para reponer las pérdidas de agua producidas en el proceso de evapotranspiración. Siempre se refieren a las necesidades de un cultivo que crece en condiciones óptimas.

Las necesidades de agua de los cultivos dependen principalmente del:

- **clima** (como principales factores: luz solar, temperatura, humedad y velocidad del viento);
- **tipo de cultivo; y,**
- **estado de desarrollo**

La influencia del clima sobre las necesidades hídricas de los cultivos se refleja en la evapotranspiración (ET), que se compone de dos sumandos, evaporación (desde la superficie del suelo) más transpiración (de las plantas). La evapotranspiración se expresa usualmente en mm, sea por día, mes, ciclo o estación.

Se han desarrollado diversos métodos para determinar el uso consuntivo de plantas específicas. Unas excelentes guía para estos cálculos por diferentes métodos es el Estudio de Riego y Drenaje No. 24 "Necesidades de Agua de los Cultivos" (FAO, 1977), y el manual "Necesidades de Agua de los Cultivos. Manual de Campo No. 3. (FAO, 1986). Sin embargo, debe observarse que las fórmulas para dar buenos resultados requieren de datos y que en muchos de los lugares donde se practica la captación de agua de lluvia no están disponibles.

Uso Consuntivo

El cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos (**Uso Consuntivo**), es relativamente simple. La ecuación básica para el cálculo es la siguiente:

$$ET_{\text{cultivo}} = K_c \times ET_o$$

Donde:

- ET cultivo = Es el (Uso Consuntivo), requerimiento de agua de un cultivo dado en mm por unidad de tiempo (mm/día, mm/mes o mm/estación).
- Kc = Factor del cultivo, depende de la especie o variedad cultivada y de la etapa de crecimiento de la planta
- ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm por unidad de tiempo
(Ver Tomo I: FAO,1996)

La evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o (llamada a veces evapotranspiración potencial, ETP) está definida como la tasa de evapotranspiración de una gran área cubierta de pasto que crece activamente, cubre completamente el suelo y no sufre de deficiencia de agua. La tasa de agua evapotranspirada depende del clima. El valor más alto de ET_o se encuentra en

áreas calurosas, secas, ventosas y soleadas; mientras que los valores más bajos son observados en áreas frías, húmedas y nubladas o sin viento.

En muchos casos es posible obtener estimaciones de ET_0 para el área de interés, desde áreas cercanas con condiciones climáticas similares; sin embargo, donde esto no es posible, los valores para ET_0 tienen que calcularse.

En el **cuadro 1** se encuentran valores aproximados para ET_0 , que pueden ser utilizados en ausencia de datos medidos o calculados.

El **cuadro 2** contiene factores de cultivo **Kc** para las especies comúnmente cultivadas bajo sistemas de captación de agua de lluvia.

Cuadro 1. Valores aproximados de necesidades de agua de cultivos estacionales

Cultivo	Necesidad de agua de los cultivos (mm/total período vegetativo)
Frijol	300 - 500
Cítricos	900 - 1200
Algodón	700 - 1300
Cacahuete (maní)	500 - 700
Maíz	500 - 800
Sorgo/mijo	450 - 650
Soya	450 - 700
Girasol	600 - 1000

Cuadro 2. Factores de cultivo (Kc)

Cultivo	Etapa Inicial		Etapa de crecimiento del cultivo		Pleno desarrollo del cultivo		Etapa de madurez		Promedio del cultivo
	Kc	días	Kc	Días	Kc	días	Kc	días	
Algodón	0,45	(30)	0,75	(50)	1,15	(55)	0,75	(45)	0,82
Maíz	0,40	(20)	0,80	(35)	1,15	(40)	0,70	(30)	0,82
Mijo	0,35	(15)	0,70	(25)	1,10	(40)	0,65	(25)	0,79
Sorgo	0,35	(20)	0,75	(30)	1,10	(40)	0,65	(30)	0,78
Granos pequeños	0,35	(20)	0,75	(30)	1,10	(60)	0,65	(40)	0,78
Leguminosas	0,45	(15)	0,75	(25)	1,10	(35)	0,50	(15)	0,79
Maní	0,45	(25)	0,75	(35)	1,05	(45)	0,70	(25)	0,79

BALANCE HIDRICO

Una vez obtenido los datos de precipitación y consumo de agua por los cultivos considerados, el siguiente paso es determinar si hay necesidades de agua de riego, o sea si son necesarias las obras de captación de agua de lluvia, para lo cual se debe analizar las deficiencias o excesos de agua, por medio del **balance hídrico**. La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca (o cualquier masa de agua) indica los valores relativos de entrada y salida, flujo y variación del volumen de agua.

En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (lluvia o nieve) realmente recibida en la superficie del suelo (**P**), y las aguas superficiales y subsuperficiales recibidas dentro de la cuenca (**Q**). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación y transpiración (**ET**) y la salida de las aguas superficiales, o sea la escorrentía (**ES**), y las aguas subterráneas (**ST**).

$$P + Q = ET + ES + ST$$

Para su aplicación en ciertos cálculos, la ecuación del balance hídrico podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objetivo del cálculo, y las dimensiones de la masa de agua (por ejemplo diferentes cálculos para microcaptación, captación externa ó inundaciones). La ecuación simplificada del balance hídrico es:

$$P = ET + ES$$

Los componentes de la ecuación del balance hídrico se pueden expresar como una altura media de agua sobre la cuenca (mm), como un volumen (m³), o en forma de caudal (m³/s):

$$V(m^3) = 1/1000 \times A(m^2) \times ES(mm)$$

Necesidad de Agua de Riego

Las necesidades de agua adicional, por ejemplo la que se necesita obtener por captación de lluvia, pueden resultar de la diferencia entre las demandas de agua del cultivo (uso consuntivo) por mes durante el ciclo de desarrollo y la parte o porción de agua de lluvia caída en esos meses.

Normalmente se utiliza la probabilidad de lluvia al 50%, o la precipitación efectiva (**Pe**), de forma que se pueda analizar las deficiencias o excesos de agua (Anaya et al, 1994).



$$NA = ETc + SAT + PERC + LA - Pe$$

Donde:

NA	=	Necesidades de agua de riego
ETc	=	Evapotranspiración del cultivo
SAT	=	Cantidad de agua necesaria para saturar el suelo
PERC	=	Pérdidas por percolación y filtraciones
LA	=	Agua para establecer la lámina de agua superficial
Pe	=	Precipitación efectiva

La ecuación simplificada, donde UC es Uso Consuntivo, es:

$$NA = UC - Pe$$

En que básicamente existen tres situaciones:

UC = Pe	NA = 0	Situación actual, el agua de lluvia es suficiente
UC > Pe	NA = ETc - Pe	Se necesita contribución del riego. Si no llueve en absoluto NA = ETc
UC < Pe	NA = 0	Hay exceso agua de lluvia, drenaje es necesario.

No obstante, debe tenerse en cuenta que los cálculos están siempre basados en parámetros con alta variabilidad. La lluvia y la escorrentía superficial son característicamente erráticas en regiones donde se practica la captación de agua de lluvia. Por lo tanto, a veces es necesario modificar un diseño original a la luz de la experiencia y frecuentemente será útil incorporar medidas de seguridad.

Los datos del balance hídrico se utilizan para determinar si es necesario captar agua de lluvia (o regar) y para calcular la suma total del agua que necesitan las plantas. También se puede calcular para cada mes (o para cualquier período durante el crecimiento de las plantas) las necesidades de agua de los cultivos, para determinar si se debería regar. Con la suma de estas necesidades se obtiene datos para calcular la cantidad total a captar.

LA CUENCA HIDROGRÁFICA

En los cálculos para las áreas más grandes de captación de agua de lluvia, además de los datos de la precipitación y del requerimiento de agua de las plantas, es necesario tener datos sobre las variaciones del volumen de agua almacenada en la cuenca.

Como se ha discutido en el párrafo anterior, el balance hídrico es muy útil para determinar el agua disponible. La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca indica los valores relativos de entrada y salida del agua, o sea:

$$\text{flujo de entrada} = \text{flujo de salida} \pm \text{cambio en el almacenaje del perfil.}$$

Este balance se puede aplicar a diferentes partes del ciclo hidrológico.

Agua Subterránea	<i>entrada</i>	Percolación profunda e infiltración
	<i>salida</i>	Flujo subterráneo, ascenso "capilar" y evapotranspiración
	<i>diferencia</i>	Cambio en el almacenamiento
Una Cuenca	<i>entrada</i>	Precipitación
	<i>salida</i>	Evapotranspiración y escorrentía total
	<i>diferencia</i>	Almacenamiento en micro-depresiones, agua subterránea, canales, etc.

El agua almacenada en las cuencas hidrográficas comprende:

- Agua superficial almacenada sobre la superficie de la cuenca.
- Agua subsuperficial almacenada en el suelo, en la zona no saturada.
- Agua subterránea.

En las zonas áridas la acumulación más importante de agua tiene lugar durante la estación de lluvias. La captación del agua superficial y subsuperficial ocurre principalmente durante esta estación; mientras la captación del agua subterránea puede ocurrir en la estación después de la lluvia (ver artículo de Néstor Cabas, en Captación Externa de éste Manual).

La precipitación efectiva (P_e), fluye por diferentes caminos hacia la red de drenaje y se evalúa en algún sitio de interés del cauce (donde se planifica poner la obra de captación) como **escorrentía, escurrimiento o caudal**. El caudal se define como el volumen de agua que atraviesa la sección del cauce en una cantidad de tiempo y se expresa en m^3/s o l/s .

Los componentes del caudal son de los siguientes tipos:

- **Escorrentía superficial** (flujo superficial)
- **Escorrentía subsuperficial** (interflujo)
- **Escorrentía subterránea** (flujo base)
- **Precipitación que cae sobre el cauce** (sin contactar ni entrar en el suelo)

El registro de la escorrentía se hace en términos del caudal medio diario, obtenido ordinariamente mediante la medición de niveles de agua dos o tres veces al día y transformados a caudales mediante una curva de descarga. Muchas estaciones están equipadas con instrumentos (limnógrafos) para proporcionar información sobre los eventos extremos y los caudales máximos y mínimos.

El hidrograma es la representación gráfica de alguna característica de la escorrentía o caudal a lo largo del tiempo en una estación específica.

Para determinar si es factible planificar captación de agua de lluvia, se requiere conocer el **caudal mínimo** dentro de una cierta posibilidad, mientras en el diseño de obras hidráulicas pequeñas, como de la captación de agua de lluvia, normalmente sólo se requiere del

conocimiento del **caudal máximo** para un determinado período de retorno. Además, es importante conocer el **caudal en estiaje** (en la época seca), que es cuando más se necesita el agua.

El método racional de estimado de la escorrentía es el que se utiliza para determinar el caudal de diseño de pequeñas obras en cuencas de hasta 500 hectáreas, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = 0,278 * C * I * A$$

Donde:

- Q = Caudal de diseño (m³/s)
- C = Coeficiente de escorrentía
- I = Intensidad de la precipitación (mm/h)
- A = Area de la cuenca de captación (Km²)

El análisis de **frecuencia** es un método analítico para determinar el caudal de diseño para períodos de retorno deseados. Las curvas de frecuencia son una expresión de los datos hidrológicos sobre una base probabilística, ya que sirven para estimar la frecuencia con que una variable de cierta magnitud es igualada o excedida. Estas curvas pueden ser desarrolladas para cualquier variable hidrológica.

El término **aguas subterráneas** se refiere en general a la ocurrencia del agua por debajo de la superficie del suelo. Sin embargo, comúnmente se relaciona sólo con la que se encuentra en la zona saturada de agua. El límite de separación entre la zona de aireación y la de saturación se conoce como **nivel freático**, donde el agua se mantiene a presión atmosférica (agua libre). Un **acuífero** se define como un estrato del subsuelo que contiene y conduce agua.

INFORMACION PARA LA CAPTACION DEL AGUA DE NIEBLA

En las zonas donde la lluvia es muy escasa, la captación y almacenamiento de la precipitación no es factible. Aparte de las fuentes de agua en las zonas áridas y semiáridas tales como ríos, lagos o la lluvia, existe un gran depósito natural de agua bajo la forma de vapor de agua, sea vapor de la atmósfera, de la evaporación desde el suelo o transpiración de las plantas, o más frecuentemente: rocío y niebla. La diferencia con aquellas fuentes de agua, es que esta forma de agua es difícil de captar, es decir relativamente sólo un pequeño porcentaje de rocío o niebla puede ser captado, pero puede significar un aporte suficiente como para considerarlo. En algunos lugares la combinación de condiciones meteorológicas y la topografía crean la existencia de nieblas persistentes. En estas zonas, se podría captar agua de nieblas.

Una definición de niebla o neblina es: "una nube baja que cubre o envuelve al observador y es lo suficientemente densa para reducir la visibilidad horizontal a menos de 1 km. Si la visibilidad es mayor que 1 km, pero menos de 10 km estamos ante una neblina, (Cardich, 1991)".

La diferencia entre la lluvia y la niebla es el diámetro de las gotas y la velocidad de caída subsiguiente. Generalmente la niebla es el resultado de un enfriamiento del aire húmedo al contacto con la superficie terrestre. El fenómeno de las nieblas como recurso hídrico se presenta especialmente en zonas áridas cercanas a océanos, tal como Baja California en México, en el Norte de Chile, y en el centro y sur del Perú. En el capítulo Captación Externa, se describe una técnica para captar agua de niebla en Chile.

En la práctica cualquier objeto o superficie que entre en contacto oponiéndose a la dirección del viento que arrastra la niebla es un captador. La forma de captación más eficaz es aquella que de manera natural proporciona un bosque y también los arbustos densos y la vegetación herbácea en orden decreciente. La captación artificial se está llevando a cabo mediante diferentes artefactos con resultados diversos.

Intervienen en el proceso de la captación de agua de niebla factores topográficos, meteorológicos y estacionales.

Topografía del sector

En primer lugar, para elegir lugares apropiados para captar agua de nieblas, se necesita de montañas con altitud suficiente para interceptar las nubes. Es importante elegir la altura del lugar que conviene para captar las nubes con la cantidad más alta de agua. Schemenauer y Cereceda (1994), mencionan una altura deseada como dos tercios de la densidad de la nube desde su base.

Cuando se trata de montañas de la costa, es importante que el eje longitudinal de la sierra sea aproximadamente perpendicular a la dirección de los vientos dominantes que traen las nubes desde el mar. En este caso la distancia a la costa debería ser lo más próxima posible, idealmente menos de 5 km, pero hay ejemplos de captación de hasta 25 km al interior. En otros lugares, con ocurrencia de nieblas frecuentes no se toma en cuenta la distancia al mar.

Es importante considerar que no haya obstáculos grandes para el viento en el sitio elegido y que haya suficiente espacio para las obras de captación. Hay que considerar también la pendiente y microtopografía. En general son ideales pendientes suaves para el viento y la posición de las obras en las cimas de las lomas u ondulaciones del terreno.

Frecuencia, intensidad y dirección de los vientos

El viento es un factor importante en la determinación y planificación de obras para abastecimiento de agua de niebla. Schemenauer y Cereceda (1994), también recomiendan adaptaciones en las obras de captación de agua de lluvia considerando el efecto del viento.

El potencial de la captación de agua de niebla está influido por la dirección y fuerza de los vientos predominantes.

El viento resulta del movimiento causado por diferencias en la presión atmosférica de las masas de aire. Es influenciado por el contacto con la superficie de la tierra, produciendo un movimiento desordenado. Este movimiento de aire aumenta el transporte de la materia, calor y

agua. La información sobre el viento se utiliza para calcular la tasa de evaporación y evapotranspiración potencial.

La **dirección** del viento es importante para optimizar la orientación (en grados) y ubicación de las obras de captación. La dirección media mensual del viento se mide durante los meses importantes, o sea cuando llueve o cuando hay nieblas importantes. En general vientos persistentes en una dirección son ideales para captar agua de niebla. Por ejemplo la circulación cerca de áreas con alta presión en la parte oriental del pacífico produce vientos con dirección sur oeste y vientos con dirección sur hasta Perú (Schemenauer y Cereceda, 1994).

La frecuencia y velocidad de los vientos son importantes para evaluar la potencialidad de la captación de agua de niebla. La **velocidad** del viento influye sobre el volumen del aire (que contiene agua en forma de niebla) que pasa el colector o trampa. La **velocidad** del viento influye entonces en el volumen del agua de lluvia para captar, mientras más fuerte es el viento, el ángulo de caída de las gotas es más horizontal, y demanda entonces adaptaciones en la posición vertical del colector. La **dirección** del viento determina la ubicación de las obras.

La **velocidad** del viento está influenciada por las irregularidades de la superficie de la tierra. El movimiento desordenado resultante implica que la determinación de la velocidad y la dirección media del viento es difícil porque ocurren cambios rápidos. La velocidad del viento aumenta con la altitud. Para medir la velocidad del viento se utiliza el anemómetro que calcula la velocidad media del viento en metros por segundo.

Las gotas de lluvia y de llovizna tienen un diámetro de aproximadamente 5 mm a 40 micrones y velocidades de caída de 9 a 2 m/s, mientras las gotas de la niebla tienen un diámetro de menos de 40 micrones y velocidades de caída inferiores a 5 m/s (principalmente menores de 1 m/s). El viento entonces influye en el ángulo de caída, tanto para la lluvia como para la niebla, pero la velocidad de caída de las gotas de la niebla es tan pequeña que el movimiento de estas gotas es casi horizontal. Esto implica que el colector tiene que ser vertical.

Las mediciones meteorológicas relevantes son **temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión;** y especialmente **velocidad y dirección del viento**. Para evaluar la potencialidad de la captación de agua de niebla, es recomendable medir la velocidad y dirección del viento cada 5 ó 15 segundos, para calcular promedios diarios y después visualizar la distribución de frecuencias, velocidad y dirección del viento.

Para determinar la **duración** del viento, se puede observar la velocidad del mismo cada hora durante varios días.

Determinación del potencial hídrico

Con las mediciones meteorológicas mencionadas anteriormente, podría evaluarse los volúmenes de agua de niebla que pueden ser colectados. Estos volúmenes dependen de la superficie del colector, la eficiencia de la captación del colector o trampa y la velocidad del viento.

No obstante, Gischler (1991) encontró que las variables más importantes son la duración de las nieblas y la temperatura durante la intercepción. La velocidad del viento, la visibilidad

(como indicador de la densidad de la nube) y la humedad relativa no fueron significativas. Este autor comentó que probablemente la velocidad del viento en su caso no fue importante porque en la investigación estadística la cantidad de agua en la nube y el tamaño de las gotas fueron más importantes.

Para evaluar la captación potencial de agua de niebla, Schemenauer y Cereceda (1994) recomiendan un colector estandar, de 1 x 1 m, midiendo así litros de agua por metro cuadrado por hora, por día, u otro período.

LABORES CULTURALES

Idealmente el área de captación debería tener una escorrentía superficial alta, mientras en el área cultivada las condiciones deberían ser favorables para la infiltración y el aprovechamiento del agua. Entonces, las labores para aumentar la escorrentía superficial incluyen despejar la vegetación o aplicar materiales impermeabilizantes (artificiales) para las áreas de escorrentía.

Las labores culturales a que se hace referencia son los aspectos agronómicos, o sea los tratamientos para mejorar el almacenamiento del agua en el suelo y el aumento de la producción de las plantas. Estas labores pueden ser comparadas, hasta cierto punto, con las prácticas conservacionistas del suelo, tales como labranza, mulching y barbecho.

Labranza

Los sistemas de labranza tienen como objetivos fundamentales: **preparar la cama** para las semillas y las raíces, **controlar las malezas**, establecer condiciones superficiales en el suelo que favorezcan la **infiltración** y **controlar la erosión**.

Es importante aplicar las labores culturales en el momento oportuno. Respecto a la aplicación del agua, los períodos en los que la humedad extra puede ocasionar una diferencia significativa son:

- ⊗ Sembrando cuando la germinación y el establecimiento puede mejorarse;
- ⊗ A mediados de la estación seca, cuando el cultivo puede sostenerse hasta las siguientes lluvias;
- ⊗ Mientras los cultivos están en las etapas vitales de floración y llenado del grano.

La forma más práctica de proteger el suelo de la erosión (y aumentar la infiltración), es manteniendo una cobertura vegetal densa en forma permanente. En una labranza de conservación se aplica **mulch residual** y/o se incrementa la **rugosidad de la superficie**. Un aumento en la rugosidad se logra mediante labranza en fajas, sistemas de labranza en surcos y métodos de labranza que ocasionan la inversión del perfil del suelo. En el capítulo sobre Microcaptación se trata más sobre este tema.

Mulching

El “mulching” se utiliza mucho conjuntamente con técnicas de labranza mínima y de cero labranza. Consiste en una cobertura de desechos orgánicos, que forma una cubierta protectora, facilitando la infiltración y reduciendo la velocidad de escorrentía. La dificultad que puede presentarse es la falta de disponibilidad de residuos de plantas.

Barbecho

El barbecho (tierra que no se siembra durante uno o más años), es empleado en algunas zonas para aumentar la cantidad del agua en el suelo antes de sembrar. El efecto positivo depende de las precipitaciones durante el período del barbecho y del crecimiento de las plantas (Hudson, 1987). También tiene un cierto riesgo de desarrollo de malezas y de erosión.

Incorporación de materia orgánica

Es importante mantener un nivel suficiente de materia orgánica en el suelo para una mayor infiltración y almacenamiento de agua en el mismo, así como para el aumento de la fertilidad.

La fertilidad de los suelos en áreas secas es generalmente el segundo factor más limitante de la producción después del estrés de humedad. La mejora en el suministro de agua disponible con captación de agua de lluvia puede conducir al agotamiento de nutrientes del suelo. Por lo tanto, es muy importante mantener el nivel de materia orgánica añadiendo estiércol o abono animal al suelo. Los fertilizantes inorgánicos son rara vez económicos para la producción de cultivos bajo captación de agua de lluvia.

Algunos sistemas de captación de agua de lluvia también extraen, con el agua, materia orgánica del área de captación y por lo tanto “incrementan” la fertilidad del área cultivada.

Control de malezas

La maleza es un problema donde se utiliza la captación de agua de lluvia, debido a las condiciones de crecimiento favorable donde se concentra el agua. Las malezas se presentan especialmente al comienzo de la estación y por lo tanto el deshierbe temprano es muy adecuado. Las malezas compiten con los cultivos por el agua.

Las malezas se presentan también cuando se utiliza “mulching”, cero labranza y labranza mínima.