

Diseño de sistemas de captación de escorrentía



Diseño de sistemas de captación de escorrentía

MEFCCA,
COSUDE, CATIE

Nicaragua, 2018

Contenido

Introducción	4
Glosario	6
Criterios técnicos para diseñar reservorios	8
¿Por qué se debe hacer un diseño preliminar?	9
Valores claves para diseñar sistemas de captación de escorrentía	10
Precipitación	10
Evapotranspiración	12
Geología de suelos	15
Topografía y pendiente	15
Precipitación efectiva	16
Lluvia de diseño	17
Estimación del déficit de agua en la finca	19
Estimación del déficit de agua para consumo animal	19
Estimación del déficit de agua para consumo agrícola	20
Estimación de la escorrentía superficial	22
¿Cómo se calcula el área de captación o recarga?	25
Dimensiones de las obras	27
Tamaños sugeridos para reservorios	30
Reservorio trapezoidal de 500 m ³	30
Reservorio trapezoidal de 1,000 m ³	32
Reservorio trapezoidal de 7,500 m ³	34
Reservorio circular de 500 m ³	36
Reservorio circular de 1,000 m ³	38
Reservorio circular de 7,500 m ³	40

Diseño de la obra de toma	42
Diseño del vertedero	44
Diseño del abrevadero	45
Diseño de sitios con Google Earth	47
Georreferenciación del sitio propuesto para el reservorio	48
Mapeo del sitio en Google Earth Pro	48
Marca de posición: definir coordenadas de ubicación del reservorio	48
Agregar polígono: definir el área de recarga	49
Agregar ruta: se define la red de drenaje de la obra	52
Mostrar regla: dibujar y medir el reservorio	53
Método de relevamiento topográfico	55
Bibliografía	58

Introducción

Los sistemas de captación de esorrentía se recomiendan, de forma muy especial, para las zonas donde se presentan problemas de escasez de agua. En estos lugares, el agua captada se transforma en una real alternativa para enfrentar los problemas derivados de la irregularidad de las lluvias, y de la falta de agua en la estación seca, popularmente conocida como “verano”.

En el Corredor Seco, que atraviesa casi todos los países centroamericanos, la disponibilidad de agua para consumo humano, animal y uso agropecuario se reduce considerablemente durante la estación seca. Muchas fuentes naturales de agua llegan a secarse completamente, poniendo en serio riesgo los medios de vida de la población.

Los sistemas de captación de esorrentía pueden ayudar a solventar ese problema. Para ello, el diseño del sistema debe considerar diversos factores. Se comienza por determinar las características de la finca, el objetivo que cumplirá el sistema, los criterios de accesibilidad al lugar y los espacios disponibles para la construcción de las diferentes obras. Con relación a los aspectos constructivos, se debe considerar la construcción del reservorio en un punto más elevado que el área donde se desea abastecer con el agua captada, tema que es tratado a profundidad en la Guía 3: Construcción de Reservorios.

La selección de un sitio apropiado para construir el sistema de captación de esorrentía es clave para su éxito. Igualmente importante es su diseño, que debe ser elaborado por personal especializado y experimentado, con capacidad para acceder y manejar información agroclimática, vital para echar a andar el proceso.

El tamaño, la forma y la profundidad son también elementos claves para un diseño exitoso. Por ejemplo, los reservorios más profundos y con menor superficie de agua expuesta al sol y al viento son los que pierden menos agua por evaporación. Según reportes de la FAO (2013, p. 13), las altas temperaturas y la baja humedad atmosférica predominantes en el trópico seco, pueden hacer perder más de 10 mm de agua por día en reservorios.

Para diseñar un sistema de captación de escorrentía se requiere de información zonificada del ciclo hidrológico, el tipo de suelos, la demanda hídrica, amenazas y riesgos climáticos, cultivos y sus necesidades de agua, etc. Toda esta información no es para nada fácil de conseguir ni barata de lograr. Por esta razón, organismos internacionales que promueven esta tecnología, como la FAO, UNESCO, recomiendan que sean las instituciones competentes de cada país, las que hagan esfuerzos por obtener, actualizar y divulgar estos datos.

El diseño, por cualquier método que se use, necesita información sobre valores de precipitación y evapotranspiración, coeficientes de escorrentía, especies y variedades adaptadas a las zonas de referencia y otros que se explican en esta Guía de Diseño de Sistemas de Captación de Escorrentía.

Glosario

Acuífero: formación geológica natural que guarda agua.

Aridez: condición climática permanente en la que predomina una muy baja precipitación anual o estacional.

Área de recarga: es la parte alta de una cuenca hidrográfica donde una gran parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo y la otra parte, se escurre por la superficie y es la que puede ser captada y aprovechada en diversas labores agropecuarias o de uso humano.

Cambio climático: según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es un cambio de clima atribuido, directa o indirectamente, a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Corredor seco: define a un grupo de ecosistemas que se combinan en la ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica en la vertiente pacífica, abarcando gran parte de la región central premontaña de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Guanacaste en Costa Rica y el Arco Seco de Panamá.

Cosechar agua: recolección del agua de lluvia que cae directamente sobre el reservorio y de la que escurre superficialmente hacia esta estructura para su uso posterior en labores agropecuarias y/o domésticas.

Cuenca hidrográfica: es la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye a través de corrientes, ríos y lagos hacia el mar por una desembocadura única, estuario o delta.

Escorrentía: en este documento se refiere a la lámina de agua proveniente de la lluvia que se desliza cuesta abajo sobre la superficie del suelo.

Evapotranspiración: cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas.

Coefficiente de escorrentía: es la relación entre la parte de la precipitación que circula superficialmente y la precipitación total. La parte superficial es menor que la precipitación total al descontar la evaporación, evapotranspiración, almacenamiento, etc.

Geología: Conjunto de características del subsuelo o de la corteza terrestre de una zona o de un territorio.

Mitigación: medidas estructurales y no estructurales adoptadas o previstas para limitar el impacto adverso de los riesgos.

Precipitación: es el espesor de la lámina de agua que se forma sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a litros de agua por metro cuadrado de terreno (l/m^2).

Prevención: actividades y medidas previstas con anticipación para asegurar una respuesta eficaz a una situación potencial de riesgo.

Reservorio: depósito o estructura de tierra impermeabilizada que capta agua de lluvia directa y de escorrentía en un lugar determinado.

Sequía: rasgo recurrente del clima que se caracteriza por la escasez temporal del agua.

Sequía hidrológica: disminución en la alimentación a los sistemas hidrológicos superficiales y subterráneos.

Sequía agronómica: para la agricultura de secano es el déficit de humedad de la tierra que sigue a una sequía meteorológica y que produce impactos negativos en la cosecha o en el crecimiento de la vegetación. Para la agricultura de regadío es la escasez de agua que abastece los sistemas de riego debido a la sequía en las aguas superficiales o subterráneas.

Criterios técnicos para diseñar reservorios

Por captación de agua de escorrentía se entiende la recolección de escorrentía superficial en reservorios naturales o artificiales, con el propósito de utilizarla en la producción agropecuaria, forestal y/o en labores domésticas.

La cantidad de agua que se necesita captar depende directamente de las necesidades del cultivo seleccionado o del número de cabezas de ganado que hay en la finca para abreviar durante todos los días de la temporada seca. En caso de que el productor se dedique simultáneamente a la agricultura y ganadería, la cantidad de agua necesaria corresponderá a la suma de ambos valores. El cálculo de la cantidad de agua necesaria para el consumo animal se explica en el Cuadro 2. El cálculo de la cantidad de agua necesaria para consumo agrícola se describe en el Cuadro 4.

El volumen de captación de agua (V_c), depende de factores como el tamaño del área de captación (A_c) y la cantidad de lluvia o precipitación (PP) que cae sobre la zona. El coeficiente de escorrentía (C_e) depende de varias características del área de recarga. Las más importantes son el tipo de suelo y la cubierta vegetal.

Los suelos compactos, impermeables y sin vegetación facilitan la escorrentía (el valor de C_e tiende a 1), pero al mismo tiempo son más susceptibles a deslaves, erosión e inundaciones en las partes bajas de la cuenca. Por esa razón, estos tipos de suelos suelen ser los que más requieren de obras de conservación.

La fórmula para obtener el volumen de agua captado es:

$$V_c = PP \times A_c \times C_e$$

Donde:

V_c = volumen de captación (litros)

PP = precipitación (mm)

A_c = área de captación (m^2)

C_e = coeficiente de escorrentía

¿Por qué se debe hacer un diseño preliminar?

El diseño y la construcción de un sistema de captación de escorrentía no son ni fáciles ni baratos de hacer. Se deben considerar factores sociales, económicos y técnicos como los valores sobre clima, tipos de suelo, precipitación, escorrentía, cultivos, etc., que demandan especialización y experiencia.

El factor económico puede ser, para muchos, su mayor restricción, pues son relativamente considerables los costos de construcción de un sistema de captación de escorrentía. En este sentido, antes de comenzar una obra de esta magnitud, siempre se deben considerar otras alternativas que puedan mejorar el abastecimiento de agua.



Vista parcial de un reservorio con su área de recarga construido en la comunidad El Espino, municipio de Cinco Pinos, Chinandega 2017. Foto: CATIE.

Al contar con un diseño preliminar, se pueden establecer costos preliminares y resulta más fácil hacer correcciones en el terreno para garantizar congruencia entre lo que se diseña y las características específicas del sitio. Probablemente, lo más importante que permite lograr un diseño preliminar, es la posibilidad de evaluar la capacidad de infiltración y escurrimiento que tienen los suelos del sitio seleccionado y determinar si pueden o no suministrar el agua requerida.

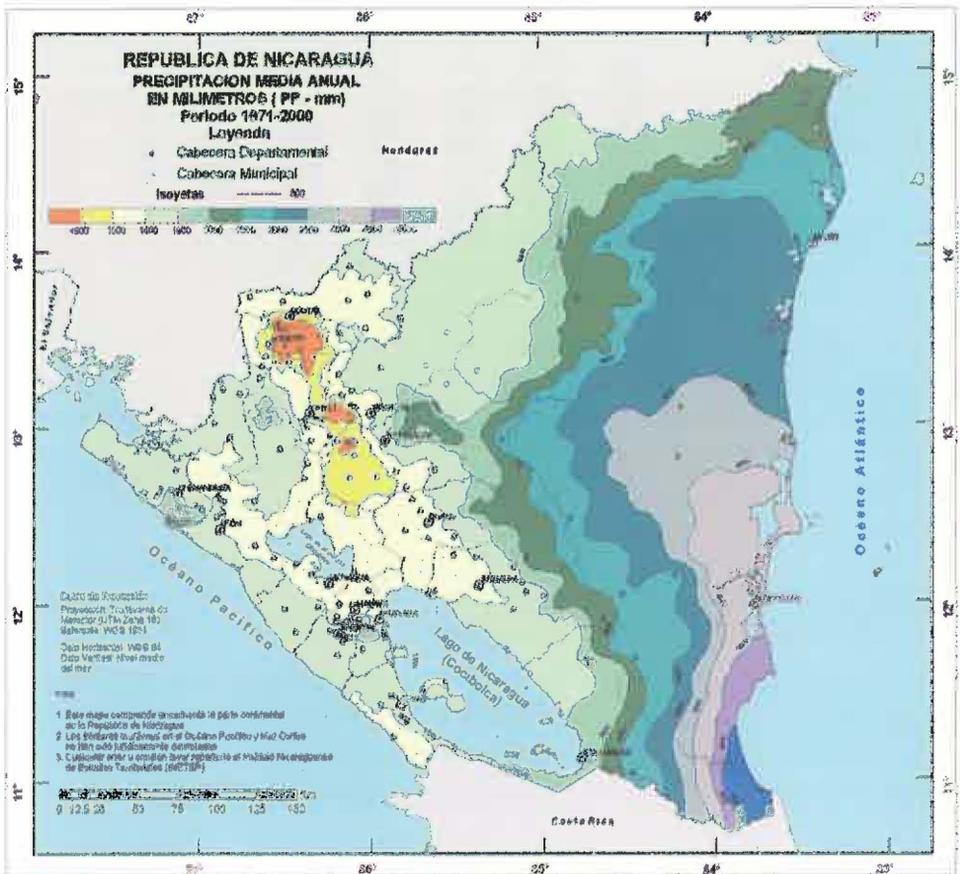
Valores clave para diseñar sistemas de captación de esorrentía

Precipitación

Para un agricultor, la precipitación tiene que ser vista como su primera fuente de agua disponible en la finca. La lluvia que cae tiene tres características que deben ser tomadas en cuenta como parte del diseño de sistemas de captación de esorrentía. La primera es el tiempo de duración (horas, minutos, etc.); la segunda, la intensidad o volumen de la lluvia; y la tercera es la frecuencia con la que llueve en la zona. De manera general, se puede afirmar que en el Corredor Seco Centroamericano las precipitaciones son de relativa alta intensidad y corta duración, cayendo sobre áreas limitadas.

Para facilitar el trabajo de los diseñadores de obras de captación de esorrentía de Nicaragua, la Dirección de Meteorología del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) ha publicado mapas de precipitación con datos históricos promedio de distintas zonas del país. Estos datos se pueden contrastar o precisar con la ayuda del conocimiento y la experiencia de las comunidades, especialmente porque en las zonas secas o áridas la precipitación es muy errática.

En regiones donde hay alta variabilidad de la precipitación no se recomienda usar la precipitación promedio, sino un valor de excedencia del 75% o mayor. La probabilidad de excedencia del 75% quiere decir que en 3/4 partes del tiempo (medido en años) se puede disponer de una cantidad de lluvia igual o mayor al valor obtenido (P75) (FAO 2013, p, 42).



Mapa 1. Precipitación media anual en mm. Período 1971-2000.
 Fuente: INETER.

Considérese el ejemplo mostrado en la Figura 1, si se diseña con el valor promedio de la precipitación P50 (es decir, con probabilidad de excedencia del 50%), marcado en la figura con una línea roja, vemos que la mitad del tiempo (cinco años) la precipitación es mayor. En cambio, si se utiliza una precipitación P75 con una probabilidad de excedencia del 75% (percentil 25%), igual a 1398 mm en este ejemplo, se puede comprobar que la mayor parte del tiempo (al menos siete años) la precipitación será igual o mayor.

Un milímetro de lámina de agua que cae sobre el terreno equivale a 1 litro por cada metro cuadrado o 10 m^3 (10,000 litros) por hectárea.

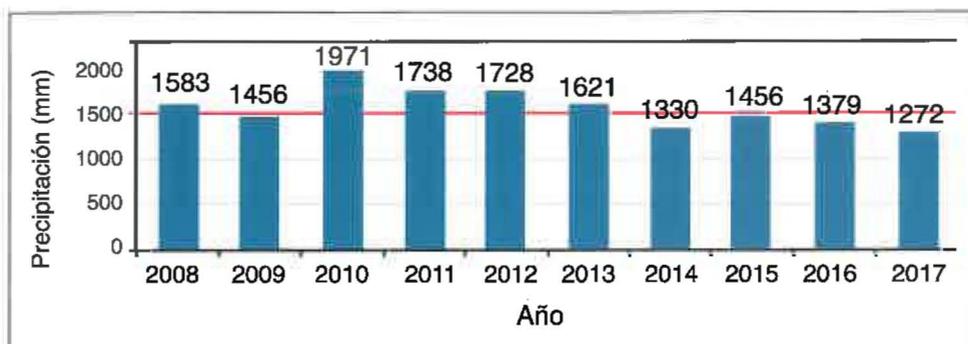


Figura 1. Ejemplo de precipitación anual (mm) para un periodo de 10 años en una estación pluviométrica dada. La línea roja indica el valor P50 (1,553 mm). Fuente: Molieri, J. 2016.

Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados pero que ocurren simultáneamente, mediante los cuales se pierde el agua que se evapora de la superficie del suelo y el agua que transpira el cultivo (FAO 2013, p, 16). El agua que se evapora del suelo es agua no productiva, no aprovechada; mientras que el agua que transpira la planta es agua productiva, que en su momento fue absorbida por las raíces junto con nutrientes.

La tasa de evapotranspiración depende de muchos factores, como la radiación solar, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la salinidad del suelo y del agua de riego, el tipo y las características del cultivo, las prácticas agronómicas y el desarrollo vegetativo del cultivo. La pérdida de 1 mm de agua al día equivale a perder 10 m³/ha.

En cuencas y microcuencas protegidas con vegetación, la transpiración es elevada y la evaporación es baja; en las que carecen de cubierta vegetal o esta es muy pobre, la evaporación (agua improductiva) es la más elevada. El volumen de agua que transpira la planta debe ser compensado con agua de lluvia o con riego para evitar que la planta sufra estrés hídrico.

Medir la evapotranspiración (ET) no es ni simple ni barato. Se requieren datos meteorológicos y personal capacitado para analizarlos. El Mapa 2 del INETER muestra el promedio de evapotranspiración en milímetros (mm) en un período de tiempo de 29 años.

- Precipitación en mm
- Cobertura vegetal del suelo
- Tipo de cultivo
- Área de siembra
- Ciclo y prácticas del cultivo
- Fecha de siembra y de cosecha
- K_c - coeficiente del cultivo

El consumo de agua de un cultivo se define como la cantidad de agua que necesita para reponer las pérdidas de agua producidas en el proceso de evapotranspiración. La necesidad de agua depende de la radiación solar, la temperatura y humedad, la velocidad del viento, el tipo de cultivo y su estado de desarrollo. A más follaje, mayor transpiración y, por tanto, mayor necesidad de agua de reposición (Figura 2).

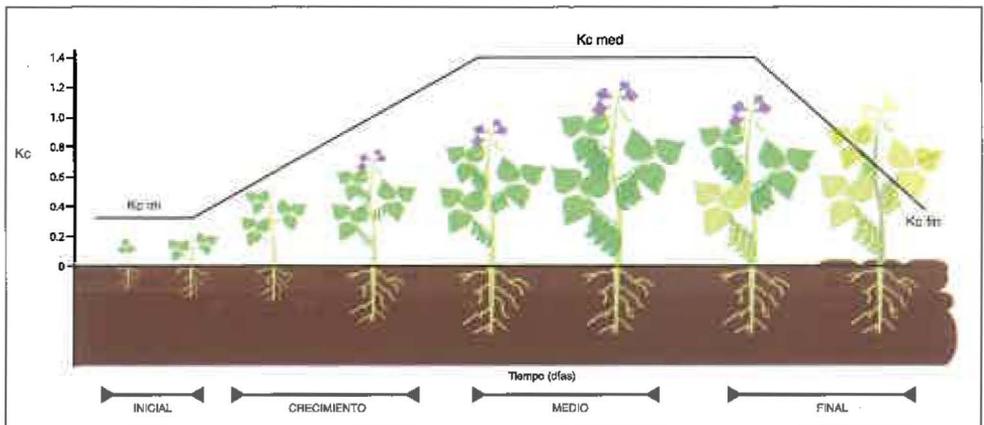


Figura 2. Variación del coeficiente del cultivo (K_c) de acuerdo con su desarrollo vegetativo (Adaptado de FAO 2005).

Geología

En las zonas áridas y semiáridas del Corredor Seco de Nicaragua y Centroamérica hay gran diversidad de suelos. En el caso del corredor seco de Nicaragua, los suelos son superficiales, con afloramientos rocosos, pedregosos, muy permeables, de drenaje excesivo, poco profundos, de pendientes de onduladas a ligeramente escarpadas. Sus depósitos de agua subterránea son muy pobres y muy profundos (Bendaña, G. 2012, p, 35).

El bosque natural ha sido muy deforestado con el objetivo de incorporar cultivos de subsistencia o potreros cuyos pastos naturales tienen poco valor nutritivo. Se estima que en las zonas secas persiste menos de 1% de vegetación nativa (Bendaña, G. 2013, p, 25), que subsiste en algunas riveras de ríos y riachuelos.

Este panorama obliga a ser muy selectivo en la selección del sitio para establecer sistemas de captación de escorrentía. Para el área de captación, se requieren suelos con alto coeficiente de escorrentía superficial (cercano a 1,0), mientras que en el área de siembra se necesitan suelos con elevada permeabilidad, con más de un metro de profundidad y ricos en materia orgánica.

Cuando se trata de elegir un sitio apropiado, la baja fertilidad de los suelos para labores agrícolas en el Corredor Seco Centroamericano, puede ser una restricción igual o más importante que la falta de humedad. Si el área de cultivo no cumple con los requerimientos mínimos, la construcción de una obra de captación de escorrentía podría no justificarse.

Topografía

Las condiciones físicas del área de captación no son homogéneas. Casi siempre habrá diferentes pendientes, tipos de suelo y cubierta vegetal diversa.

El área de captación o recarga no puede ser plana. Por lo menos debe tener una pendiente mínima del 2%, a fin de garantizar el escurrimiento superficial del agua hacia el reservorio, y de allí, hacia el área de cultivo.

El área para el reservorio debe ubicarse en una zona plana, ligeramente ondulada, con una pendiente mínima del 2% y máxima del 8%.

El área de cultivo preferido debe ser plano o casi plano, con una pendiente máxima del 7%. En un terreno con estas características se facilitan las labores agrícolas, se puede manejar eficientemente la escorrentía y el riego. Cuando la topografía del terreno es irregular, provoca una mala distribución del agua y una baja eficiencia del riego.

También se recomienda elegir terrenos que no reciban radiación solar directa e intensa durante las horas de la tarde. En los terrenos expuestos a radiación solar directa, la temperatura ambiental aumenta, generando más evapotranspiración. Los vientos también favorecen la evaporación. En ambos casos, se crea una mayor demanda hídrica.

Precipitación efectiva

La precipitación efectiva (PE) es la lluvia útil para el cultivo, la que se almacena en el suelo, dentro de la zona radicular de las plantas.

Cuando llueve mucho o muy intensamente, una parte del agua no llega a infiltrarse ni se almacena en el suelo debido a factores como el tipo de suelos y el grado de cubierta vegetal del terreno. Esta parte se conoce como escorrentía superficial, que debe controlarse o manejarse para que no dañe los campos ni centros poblados. Una forma de hacerlo es con tecnologías de siembra y cosecha de agua, varias de las cuales están detalladas en la Guía No. 3 denominada Construcción y supervisión de reservorios para captación de escorrentía, de la caja de herramientas.



Estimar la precipitación efectiva es realmente difícil, por la cantidad de variables que intervienen en este proceso. El método recomendado por la FAO es la medición del balance diario de humedad, siempre que se hayan desarrollado en esa zona estudios de balance de agua en el suelo, algo poco probable.

Una alternativa es el uso del método del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS-USDA), que estima la lluvia efectiva anual promedio a partir del promedio de lluvia media mensual (P50) y la evapotranspiración mensual.

Usando como referencia el Cuadro 1, con la precipitación promedio (P50) de una zona de trópico seco donde caen 100 mm mensuales y la evapotranspiración es de 125 mm, la lluvia efectiva sería de 72 mm.

Lluvia de diseño

Es la cantidad total de lluvia que cae durante todo el ciclo vegetativo del cultivo. La lluvia que cae sobre el área de captación provee la escorrentía superficial que se requiere almacenar para completar las necesidades de agua del cultivo. Para determinar la lluvia de diseño, se deben considerar los siguientes datos claves y valores (FAO 2013, p. 48):

- Fecha de siembra del cultivo
- Duración del ciclo vegetativo
- Seleccionar el menor valor de excedencia o de precipitación efectiva de los datos proporcionados por la estación meteorológica
- Determinar la cantidad de lluvia que cae en todo el ciclo vegetativo del cultivo seleccionado

Cuando la lluvia de diseño es menor que la evapotranspiración, el cultivo sufre estrés hídrico, a menos que este déficit se pueda solventar con riego.

El valor mensual de la lluvia de diseño se obtiene a partir de estos valores:

- El P75, es decir, la precipitación en mm que ocurre durante cada mes del ciclo del cultivo. Por ejemplo, los valores de precipitación para el maíz cultivado en Centroamérica corresponderían a los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

Cuadro 1. Estimación de la lluvia efectiva mensual con base en el promedio de lluvia (P50) y la evapotranspiración para una lámina de 75 mm de agua retenida en el suelo (SCS-USDA, citado por FAO 2013, p. 45).

P50 Promedio mensual	Evapotranspiración media mensual (mm)														
	25.0	50.0	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0	225.0	250.0	275.0	300.0	325.0	350.0	
Lluvia efectiva mensual (mm)															
12.5	7.5	8.0	8.7	9.0	9.2	10.0	10.5	11.2	11.7	12.5	13.0	13.0	13.0	13.0	
25.0	15.0	16.2	17.5	18.0	18.5	19.7	20.5	22.0	24.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	
37.5	22.5	24.0	26.2	27.5	28.2	29.2	30.5	33.0	36.2	37.5	38.0	38.0	38.0	38.0	
50.0	25.0	32.2	34.5	35.7	36.7	39.0	40.5	43.7	47.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	
62.5	a 41.7	39.7	42.5	44.5	46.0	48.5	50.5	53.7	57.5	62.5	63.0	63.0	63.0	63.0	
75.0		46.2	49.7	52.7	55.0	57.5	60.2	63.7	67.5	73.7	75.0	75.0	75.0	75.0	
87.5		50.0	56.7	60.2	63.7	66.0	69.7	73.7	77.7	84.5	86.0	86.0	86.0	86.0	
100.0		a 80.7	63.7	67.7	72.0	74.2	78.7	83.0	87.7	95.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
112.5			70.5	75.0	80.2	82.5	87.2	92.7	98.0	105.0	111.0	112.0	112.0	112.0	
125.0			75.0	81.5	87.7	90.5	95.7	102.0	108.0	115.0	121.0	125.0	125.0	125.0	
137.5			a 122.0	88.7	95.2	98.7	104.0	111.0	118.0	126.0	132.0	137.0	137.0	137.0	
150.0				95.2	102.0	106.0	112.0	120.0	127.0	136.0	143.0	150.0	150.0	150.0	
162.5				100.0	109.0	113.0	120.0	128.0	135.0	145.0	153.0	160.0	162.0	162.0	
175.0				a 160.0	115.0	120.0	127.0	135.0	143.0	154.0	164.0	170.0	175.0	175.0	
187.5					121.0	126.0	134.0	142.0	151.0	161.0	170.0	179.0	185.0	187.0	
200.0					125.0	133.0	140.0	148.0	158.0	168.0	178.0	188.0	196.0	200.0	
225.0					a 197.0	144.0	151.0	160.0	171.0	182.0					
250.0						150.0	161.0	170.0	183.0	194.0					
275.0							a 240.0	171.0	181.0	194.0	205.0				
300.0								175.0	190.0	203.0	215.0				
325.0								a 287.0	198.0	213.0	224.0				
350.0									200.0	220.0	232.0				
375.0									a 331.0	225.0	240.0				
400.0										a 372.0	247.0				
425.0											250.0				
450.0											a 412.0				
25.0	50.0	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0	225.0	250.0						

- El segundo valor es la cantidad de días por mes en que se desarrolla el cultivo, a partir de la fecha de siembra hasta el día de la cosecha. Generalmente, mayo y septiembre a veces suman menos de 30 días.

Para obtener el valor mensual de la lluvia de diseño se usa la fórmula:

$$(P75/31 \text{ días}) \times \# \text{ días que tiene el mes analizado} = \text{lluvia de diseño}$$

$$\text{Ejemplo: } (55.0/31) \times 30 \text{ (junio)} = 53.22 \text{ mm}$$

Estimación del déficit de agua en la finca

Para elegir el sitio y el tamaño del sistema de captación de escorrentía, el diseñador debe elaborar un cálculo de la cantidad de agua que hay en la finca (arroyos, manantiales, pozos, otros). Luego, debe establecer la cantidad de agua de escorrentía que requiere para cubrir el déficit de agua del cultivo y/o del hato de la finca.

Estimación del déficit de agua para consumo animal

Para obtener el déficit de agua de consumo del hato en la finca, se cuenta el número de cabezas de ganado de las diferentes especies. Deben incluirse todos los animales, incluyendo los de patio, como gallinas, pavos, patos, etc.

Utilizando la siguiente tabla, se establece el consumo diario, mensual y anual por especie de todo el hato. Luego se establece el consumo total de agua para todo el hato.

Cuadro 2. Consumo diario de agua de algunas especies de animales domésticos (FAO 2013, p, 28).

Especie	Condición de consumo	Consumo
Gallinas		15 litros/día × 100 cabezas
Pavos		30 litros/día × 100 cabezas
Cerdos	Hasta 12 meses	11 litros/día × 100 kg de peso
	Engorde	3 a 4 litros/día × kg de materia seca consumida
	En lactancia	15 a 20 litros/día
Caprinos		4.5 a 8.0 litros/día
Bovinos		45 litros/día
Equinos		25 litros/día

Cuando el productor no tiene una fuente de agua propia, el total de consumo se contabiliza como déficit. En período invernal, lo más común es que el dueño lleve su ganado a los abrevaderos naturales que recogen escorrentía y reduce a la mitad ese déficit.

Para enfrentar este déficit en los secos meses de verano (aproximadamente 180 días, desde noviembre hasta el mes de abril), el agricultor tiene la opción de almacenar escorrentía.

Como ejemplo, tomemos una finca con 10 cabezas de ganado vacuno, dos caballos, 20 gallinas y dos perros, con un déficit de agua para 180 días.

Cuadro 3. Ejemplo de cálculo de consumo total de agua de algunos animales domésticos adaptado con datos de FAO 2013, p, 28, 29.

Cantidad del hato	Consumo diario individual	Consumo diario del hato	Consumo total del hato en 180 días
Vacunos: 10 cabezas	45 litros	450 litros	81,000 litros
Equinos: 2 cabezas	25 litros	50 litros	9,000 litros
Gallinas: 20 cabezas	1.5 litros (10 gallinas)	3 litros	540 litros
Perros: 2 cabezas	5 litros	10 litros	1,800 litros
Total en litros			92,340 litros
Total en m³			92.3 m³

Estimación del déficit de agua para consumo agrícola

Un cultivo sufre déficit de agua cuando la cantidad de lluvia que cae sobre el área sembrada y se almacena en la zona de las raíces (precipitación efectiva PE) es menor que la evapotranspiración (ET).

Cuando el suelo carece de humedad y se combina con ciertas condiciones ambientales adversas, como altas temperaturas, vientos fuertes y una elevada radiación solar, el cultivo fácilmente puede entrar a un riesgoso período

de estrés hídrico. Lo deseable, en estos casos, es mantener un bajo nivel de transpiración, compatible con la cantidad de agua que se dispone en el suelo o en sistemas de captación de escorrentía para riego.

En el trópico seco de América Central, los factores climáticos intensifican la evapotranspiración; por tanto, conocer el déficit de agua en el cultivo seleccionado es una condición necesaria para diseñar sistemas de captación de escorrentía apropiados.

Según la FAO (2013 p, 35), cuando se planifica a largo plazo la siembra de varios cultivos en el mismo terreno, se puede estimar el déficit utilizando el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o). En el caso de un solo cultivo, se utiliza el valor de evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Por ejemplo, para estimar el ET_c del maíz en Centroamérica, el organismo recomienda usar los siguientes valores:

1. Fecha de siembra del cultivo: 15 de mayo aproximadamente
2. Períodos del cultivo: inicial (30 días), crecimiento (30 días), medio (30 días), final (10 días)
3. **Valores de K_c para el cultivo: K_{ini}, K_{med}, K_{fin}** (FAO 2013, p, 35)

Donde:

K_c = coeficiente del cultivo

K_{ini} = coeficiente inicial del cultivo

K_{med} = coeficiente medio del cultivo

K_{fin} = coeficiente final del cultivo

Los valores K_c inicial, medio y final reflejan el volumen de evapotranspiración en cada etapa del cultivo, el cual cambia conforme al crecimiento y desarrollo de su follaje. Las necesidades de agua cambian en esa misma proporción.

En el Cuadro 4, se muestra una lista de valores aproximados sobre las necesidades de agua de algunos cultivos estacionales. Estos valores pueden ser de referencia cuando no se pueda contar con información oficial del país.

Cuadro 4. Valores aproximados de necesidades de agua de algunos cultivos estacionales (FAO 200, p, 16).

Cultivo	Necesidad de agua de los cultivos durante todo su periodo vegetativo (mm/total)
Frijol	300-500
Cítricos	900-1200
Algodón	700-1300
Maní	500-700
Maíz	500-800
Sorgo	450-650
Soya	450-700
Girasol	600-1000

Estimación de la escorrentía superficial

Cuando la finca solo cuenta con el agua de lluvia para desarrollar los cultivos y la ganadería, la escorrentía superficial puede agregar más agua para la agricultura y la ganadería, captándola a través de diversas técnicas que facilitan la infiltración y/o su almacenamiento en reservorios.

La escorrentía superficial aparece en el momento que el suelo llega a su máxima capacidad de retención de agua. Este fenómeno sucede generalmente cuando la lluvia es intensa y duradera. También, cuando la lluvia es muy breve pero el suelo no permite la infiltración de agua, porque está muy erosionado y desprovisto de cubierta vegetal.

Precisamente, los suelos que facilitan la escorrentía son los preferidos como áreas de recarga o sitios de captación. Mientras más cercano su valor de coeficiente de escorrentía a 1,0, mayores serán las posibilidades de captar altos volúmenes de agua de lluvia.

El valor de la escorrentía superficial se obtiene de la siguiente relación:

$$\text{Escorrentía} = \text{precipitación} - \text{infiltración}$$

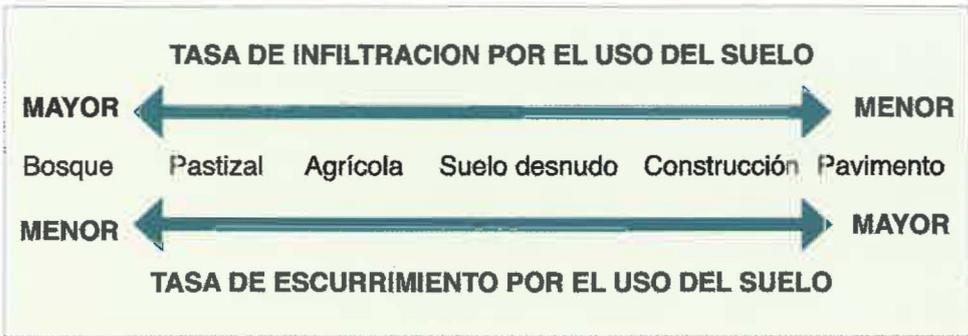


Figura 3. Muestra gráfica de la tasa de infiltración y escurrimiento, según el uso del suelo. Fuente: CATIE.

Al comienzo, la escorrentía superficial se desplaza a baja velocidad y en bajos volúmenes. Cuando el caudal aumenta, crece la velocidad, rompe el suelo, abre surcos y cárcavas sobre la pendiente. En la medida que aumenta su fuerza, arrastra grandes cantidades de suelo y sedimentos, elevando el riesgo de inundaciones y deslaves. Por eso, cuando se diseña para captar escorrentía y aumentar la disponibilidad de agua en la finca, también se diseña para incorporar técnicas y tecnologías que ayuden a resolver esos problemas.

Un milímetro de lámina de agua que cae sobre la superficie de un terreno, representa un litro de agua por metro cuadrado o 100 m^3 por hectárea. Para tener una idea más clara, tomemos como ejemplo un terreno de 1 ha donde caen 10 mm de lluvia. Si la mitad del agua se infiltra ($5 \text{ mm} = 500 \text{ m}^3/\text{ha.}$), la otra mitad ($5 \text{ mm} = 500 \text{ m}^3/\text{ha.}$), se pierde por escorrentía superficial. Esta proporción de agua que no se infiltra se la conoce como coeficiente de escorrentía (C_e).

Lo deseable es que el coeficiente de escorrentía sea mayor en el área de recarga y se reduzca al mínimo posible en el área de cultivo, para que las plantas aprovechen productivamente el agua de lluvia.

Para establecer una relación lluvia–escorrentía superficial, la principal recomendación de los especialistas es realizar una medición simultánea de ambos fenómenos en el sitio donde se planea captar agua y una medición de la humedad del suelo antes que caiga la lluvia.

Cuando se diseña un sitio de captación de escorrentía, estas mediciones se convierten en un freno, porque deben hacerse por lo menos durante dos años seguidos, debido a que la intensidad y la cantidad de lluvias que caen sobre una misma cuenca no son constantes. El problema no es solo de tiempo, también de costos, por lo que deberían ser hechas por los institutos nacionales de investigación y ofrecerlas como nuevo servicio a los productores.

Los autores Critchley y Siegert (1996) citados por FAO (2005) sugieren utilizar un valor de coeficiente de escorrentía de 0.1 a 0.5 cuando se trata de áreas pequeñas de captación de lluvia. Otra alternativa para diseñadores es la tabla de referencia publicada por la UNESCO en su Manual de Sistemas de Captación de Agua de Lluvias (2015):

Cuadro 5. Coeficientes de escorrentía en diversas superficies (Salinas 2010, citado por UNESCO 2015, p, 19).

Tipo de superficie	Coeficiente de escorrentía
Zonas cultivadas	0.20 a 0.40
Tierra sin vegetación	0.20 a 0.80
Zonas con vegetación media:	0.10 a 0.50
Terrenos granulares, terrenos arcillosos	0.30 a 0.75
Zonas con vegetación densa:	0.05 a 0.35
Terrenos granulares, terrenos arcillosos	0.15 a 0.50
Zonas arboladas y bosque	0.10 a 0.20
Superficie de grava	0.15 a 0.30
Adoquinados	0.50 a 0.70
Pavimentos de macadam	0.25 a 0.60
Para superficies lisas, impermeables como techos en metal, en teja asfáltica, de concreto, entre otros	0.90
Pavimentos de hormigón y bituminosos	0.70 a 0.95

¿Cómo se calcula el área de captación o recarga?

El coeficiente de escorrentía es un valor de muchísima importancia para establecer el tamaño correcto del área de captación o recarga. En esta área se capta el agua de lluvia que no logra infiltrarse para conducirla hacia el reservorio. Por tanto, su tamaño debe ser suficientemente grande como para cubrir el déficit hídrico detectado en el área de cultivo y/o abrevadero para un período de tiempo determinado.

El tamaño del área de captación depende, entre otros factores, del tamaño del área de cultivo y del tipo de cultivo. En cultivos densos, como por ejemplo el frijol, trigo, sorgo, se puede considerar que toda el área o todo el terreno está ocupado; por tanto, demanda más agua que otros cultivos, como los frutales, que no ocupan todos los espacios del terreno.

Para diseñar el área de captación, se toma en cuenta que la demanda de agua crece en correspondencia con el crecimiento vegetativo del cultivo.

El tamaño del área de captación de escorrentía se obtiene a través de la siguiente fórmula (FAO 2015, p, 76):

$$\text{CAPT} = \frac{\text{Área cultivada} \times (\text{necesidad de agua de las plantas} - \text{lluvia de diseño})}{\text{Lluvia de diseño} \times \text{coeficiente de escorrentía} \times \text{factor de eficiencia}}$$

CAPT: área de captación

Cuanto mayor es el déficit de agua en el cultivo, más grande deberá ser el área de captación. En zonas áridas o semiáridas como el Corredor Seco Centroamericano, la relación captación – cultivo, probablemente será de una gran área de captación (CAPT) para abastecer de agua a una pequeña área de cultivo (CULT). (FAO 2015, p, 76).

Como se propuso anteriormente, se puede utilizar el valor del coeficiente de escorrentía de 0.1 y 0.5 recomendado por los autores Critchley y Siegert, o uno de los valores publicados por FAO (2015 p, 45), que se muestran en la tabla de la página 18 de esta guía.

El factor de eficiencia de la escorrentía depende del terreno de captación. Cuanto menores sean los obstáculos con que se encuentre en el camino la escorrentía superficial, mayor su eficiencia. Como se sabe, los suelos más apropiados para el área de captación son poco permeables, arcillosos, rocosos, inclinados, con pocas depresiones y una capa vegetal arbustiva y leñosa.

En cambio, los suelos agrícolas deben ser planos o semiplanos, profundos, permeables para facilitar la infiltración de agua, muy ricos en nutrientes y materia orgánica, con vegetación de hoja ancha y verde aún en la época de verano.



En esta imagen, se observa un sitio de alto potencial para construir un reservorio con gran capacidad de almacenamiento de escorrentía. Tiene una excelente área de recarga y una zona apropiada para desarrollar cultivos agrícolas o ganadería. Foto: CATIE.

Dimensiones de las obras

La dimensión de las obras de captación depende directamente del déficit de agua que podría llegar a tener un cultivo de secano en temporada invernal, y/o el ganado de la finca durante todo el año. O bien, para cubrir con riego todo el periodo vegetativo de un cultivo sembrado en verano.

Cálculo del volumen neto de agua para reservorios rectangulares (MEFCCA-CATIE 2016)

$$V = \frac{h}{3}(A1 + A2 + \sqrt{(A1 \times A2)})$$

$$h = \frac{3V}{(A1 + A2 + \sqrt{A1 \times A2})}$$

Donde:

V = volumen neto de agua (m³)

h = tirante de agua (m)

A1= área del espejo de agua (m²)

A2= área de fondo (m²)

Cálculo del volumen neto de agua para reservorios circulares (MEFCCA-CATIE 2016)

$$V = \frac{1}{12} \pi \times h \times (D^2 + Dd + d^2)$$

Donde:

V = volumen neto a utilizar (m³)

h = tirante de agua del reservorio circular (m)

D = diámetro mayor (espejo de agua) (m)

d = diámetro menor (fondo del reservorio) (m)

Para garantizar mayor estabilidad a la obra, se recomienda establecer en 45° la pendiente de los taludes internos de reservorios trapezoidales y circulares.

Para calcular el área de aportación o zona de recarga requerido, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = C_e \times A \times P_m$$

$$A = \frac{V}{(C_e \times P_m)}$$

Donde:

V = volumen neto requerido para llenar el reservorio (m³)

A = área de aportaciones en m² multiplicado por 2 para garantizar el volumen necesario

C_e = coeficiente de escorrentía

P_m = precipitación media anual en (mm)

Para calcular el aumento rápido de una corriente ocasionada por una tormenta en la cuenca de aportaciones, necesario para el diseño del aliviadero o vertedero, se utilizó el Método Racional Americano, en el que intervienen la intensidad de la lluvia y algunos parámetros de la cuenca de aportaciones.



La ecuación es:

$$Q = 0.028C \times I \times A$$

Donde:

Q = caudal máximo instantáneo en m³/segundo

0.028 = constante numérica resultante de las unidades en que se expresan las demás variables dimensionales

Ce = coeficiente de escurrimiento

I = intensidad de la lluvia para un periodo de retorno de 25 años

A = área de la cuenca, en hectáreas

La fórmula utilizada por el Proyecto Cosecha de Agua del MEFCCA, INTA, CO-SUDE, CATIE para calcular el tiempo de concentración fue la siguiente:

$$T_c = 0.0041 \left(3.28 \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Donde:

Tc = tiempo de concentración, en minutos

L = longitud del cauce más largo, en metros

S = pendiente del cauce, m/m



Tamaños sugeridos para reservorios

La información de valores que se presenta a continuación ha sido aplicada por MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE en el año 2016–2017, con base en las condiciones agroclimáticas del corredor seco de Nicaragua. Puede usarse solo como referencia, pues el diseño para cada sitio depende de factores climáticos, agronómicos, geológicos, económicos, etc. de cada zona.

Cuadro 6. Reservorio trapezoidal de 500 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto (VN)	500.00 m ³
Longitud de los lados del cuadrado superior	17.92 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	10.00 m
Altura considerada del espejo de agua	2.29 m
Área superior A1	321.21 m ²
Área inferior A2	100.00 m
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m ³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva	
Volumen de pérdidas por infiltración	10% del VN
Pérdida por infiltración	50.00 m ³
Volumen de evaporación (VE)	0.006 m ³
Área del reservorio (AE)	321.21 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de reserva	110.00 m ³
Volumen de diseño (VD)	660.00 m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Longitud de los lados del cuadrado superior	20.00 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	10.00 m
Altura del espejo de agua del reservorio	2.85 m
Área superior A1	400.00 m ²
Área inferior A2	100.00 m ²
Volumen de almacenamiento	675.00 m ³

D. CÁLCULO DEL ÁREA DE DRENAJE REQUERIDA: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	675.00 m ³
Coficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	600 mm (75% de probabilidad de excedencia, con un promedio anual de 800 mm)
Área de drenaje	2,250.00 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	4,500.00 m ²
E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc) $T_c = 0.0041(3.28 L / S1/2)^{0.77}$	
Área de drenaje rectangular	4,500.00 m ²
A	20.00 m
Longitud del cauce más largo (L)	225.00 m
Pendiente del cauce asumido 2%	0.02 m/m
Tc	2.99 menor de 10.00 minutos
Tc asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un Tc = 10 minutos y un Pr = 25 años	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C \cdot I \cdot A$	0.094 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m \cdot b \cdot (\mu(2g) \cdot H)^{3/2}$	
Vertedero de umbral ancho	$m = 0.35$
Largo de la abertura	$b = 1.00$ m
Carga sobre el vertedero	$H = 0.30$ m
Caudal de diseño (Q)	0.25 m ³ /s

Fuente: Diseño y construcción de reservorios. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Cuadro 7. Reservorio trapezoidal de 1,000 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto	1,000.00 m ³
Longitud de los lados del cuadrado superior	23.60 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	15.00 m
Altura considerada del espejo de agua	2.48 m
Área superior A1	556.90 m ²
Área inferior A2	225.00 m ²
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva	
Volumen de pérdidas por infiltración	10% del VN
Pérdida por infiltración	100.00 m ³
Pérdidas por evaporación en verano: $VE = 0.75(0.001AE)(0.77 EA - PA)$	
Volumen de evaporación (VE)	0.01 m ³
Área del reservorio (AE)	556.86 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de diseño (VD)	1,320.00 m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Longitud de los lados del cuadrado superior	26.00 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	15.00 m
Altura del espejo de agua del reservorio	3.15 m
Área superior A1	676.00 m ²
Área inferior A2	225.00 m ²
Volumen de almacenamiento	1,336.00 m ³
D. CÁLCULO DEL AREA DE DRENAJE: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	1,336.00 m ³
Coefficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	600.00 mm (75% de probabilidad sobre el promedio anual de 800.00 mm)
Área de drenaje	4,453.50 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	8,907.00 m ²



E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc) $T_c = 00041(3.28 L / S^{1/2})^{0.77}$	
Área de drenaje rectangular	8,907.00 m ²
A	26.00 m
Longitud del cauce más largo (L)	342.58 m
Pendiente del cauce asumido 2%	0.02 m/m
Tc	4.13 menor de 10.00 minutos
Tc asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un Tc = 10 minutos y un Pr = 25 años	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C * I * A$	0.187 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m * b * (\mu(2g))^H H^{3/2}$	
Vertedero de umbral ancho	$m = 0.35$
Largo de la abertura en m	$b = 1.00$
Carga sobre el vertedero en m	$H = 0.30$
Caudal de diseño (Q)	0.255 m ³ /s

Fuente: Diseño y construcción de reservorios. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Cuadro 8. Reservorio trapezoidal de 7,500 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto	7,500.00 m ³
Longitud de los lados del cuadrado superior	52.80 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	40.00 m
Altura considerada del espejo de agua	3.70 m
Área superior A1	2,785.00 m ²
Área inferior A2	1,600.00 m
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva.	
Volumen de pérdidas por infiltración	10% del VN
Pérdida por infiltración	750.00 m ³
Pérdidas por evaporación en verano: $VE = 0.75(0.001AE)(0.77 EA - PA)$	
Volumen de evaporación (VE)	0.048 m ³
Área del reservorio (AE)	2,785.08 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de diseño (VD)	9,900.00 m ³
Volumen de reserva	1,650.01 m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Longitud de los lados del cuadrado superior	60.98 m
Longitud de los lados del cuadrado inferior	50.00 m
Altura inferior de corte	2.00 m
Altura a nivel máximo de operación	3.15 m
Altura del espejo de agua del reservorio	3.15 m
Área superior A1	3,718.56 m ²
Área inferior A2	2,500.00 m ²
Volumen de almacenamiento	9,992.83 m ³
D. CÁLCULO DEL AREA DE DRENAJE: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	9,992.83 m ³
Coefficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	640.00 mm (80% de probabilidad sobre el promedio anual de 800.00 mm)



Área de drenaje	31,227.00 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	62,455.18 m ²
E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc) $T_c = 00041(3.28 L / 51/2)^{0.77}$	
Área de drenaje trapezoidal	62,455.18 m ²
Base mayor	95.16 m
Base menor	60.98 m
A	26.00 m
Longitud del cauce más largo (L)	800.00 m
Pendiente del cauce asumido 2%	0.02 m/m
Tc	7.93 menor de 10.00 minutos
Tc asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un Tc = 10 minutos y un Pr = 25 años	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C * I * A$	1,308.00 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m * b * (\mu(2g)) * H^{3/2}$	
Vertedero de umbral ancho	$m = 0.35$
Largo de la abertura en m	$b = 5.00$
Carga sobre el vertedero en m	$H = 0.30$
Caudal de diseño (Q)	1.27 m ³ /s

Fuente: Diseño y construcción de reservorios. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Cuadro 9. Reservorio circular de 500 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto	500.00 m ³
Diámetro superior	20.29 m
Diámetro inferior	12.00 m
Volumen calculado	500.31 m ³
Altura considerada del espejo de agua	2.39 m
Área superior A1	m ²
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva	
Volumen de pérdidas por infiltración	10% del VN
Pérdida por infiltración	50.00 m ³
Pérdidas por evaporación en verano: $VE = 0.75(0.001AE)(0.77 EA-PA)$	
Volumen de evaporación (VE)	0.006 m ³
Área del reservorio (AE)	323.20 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de reserva	110.00 m ³
Volumen de diseño (VD)	m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Diámetro superior	21.85 m
Diámetro inferior	12.00 m
Altura del espejo de agua del reservorio	3.15 m
Área superior A1	676.00 m ²
Área inferior A2	225.00 m ²
Volumen de almacenamiento	1,336.00 m ³
D. CALCULO DEL ÁREA DE DRENAJE: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	661.40 m ³
Coefficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	600.00 mm (75% de probabilidad sobre el promedio anual de 800.00 mm)
Área de drenaje	2,204.80 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	4,409.60 m ²



E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc) $T_c = 0.0041(3.28 L / S1/2)0.77$	
Área de drenaje rectangular	4,409.60 m ²
A	21.85 m
Longitud del cauce más largo (L)	201.81 m
Pendiente del cauce asumido 2%	0.02 m/m
Tc	2.75 menor de 10.00 minutos
Tc asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un Tc = 10 minutos y un Pr = 25 años:	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C * I * A$	0.092 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m * b * (\mu(2g) * H^3) / s$	
Vertedero de umbral ancho	m = 0.35
Largo de la abertura en m	b = 1.00
Carga sobre el vertedero en m	H = 0.30
Caudal de diseño (Q)	0.255 m ³ /s

Fuente: Diseño y construcción de reservorios. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Cuadro 10. Reservorio circular de 1,000 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto	1,000.00 m ³
Diámetro superior	27.70 m
Diámetro inferior	20.00 m
Altura considerada del espejo de agua	2.22 m
Área superior A1	m ²
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva	
Pérdida por infiltración	100.00 m ³
Pérdidas por evaporación en verano: $VE = 0.75(0.001AE)(0.77 EA - PA)$	
Volumen de evaporación (VE)	0.010 m ³
Área del reservorio (AE)	602.34 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de reserva 2	20.00 m ³
Volumen de diseño (VD)	1,320.00 m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Diámetro superior	29.50 m
Diámetro inferior	20.00 m
Altura del espejo de agua del reservorio	2.75 m
Área superior A1	683.47 m ²
Área inferior A2	314.15 m ²
Volumen de almacenamiento	1,377.90 m ³
D. CÁLCULO DEL ÁREA DE DRENAJE: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	1,377.90 m ³
Coeficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	600.00 mm (75% de probabilidad sobre el promedio anual de 800.00 mm)
Área de drenaje	4,592.90 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	9,185.70 m ²



E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_c) $T_c = 00041(3.28 L / S^{1/2})^{0.77}$	
Área de drenaje rectangular	9,185.70 m ²
A	29.50 m
Pendiente del cauce asumido 2% (S)	0.02 m/m
T_c	3.84 menor de 10.00 minutos
T_c asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un $T_c = 10$ minutos y un $Pr = 25$ años	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C * I * A$	0.192 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m * b * (\mu(2g) * H)^{3/2}$	
Vertedero de umbral ancho	$m = 0.35$
Largo de la abertura en m	$b = 1.00$
Carga sobre el vertedero en m	$H = 0.30$
Caudal de diseño (Q)	0.255 m ³ /s

Fuente: *Diseño y construcción de reservorios*. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Cuadro 11. Reservorio circular de 7,500 m³.

A. DIMENSIONES	
Volumen neto	7,500.00 m ³
Diámetro superior	60.80 m
Diámetro inferior	50.00 m
Altura considerada del espejo de agua	3.10 m
Volumen calculado	7,500.00 m ³
Área superior	2,899.05 m ²
B. VOLUMEN DE DISEÑO (m³) = volumen neto (VN) + volumen de pérdidas por infiltración + volumen de pérdidas por evaporación + volumen de reserva	
Pérdida por infiltración	750.00 m ³
Pérdidas por evaporación en verano: $VE = 0.75(0.001AE)(0.77 EA-PA)$	
Volumen de evaporación (VE)	0.050 m ³
Área del reservorio (AE)	2,899.05 m ²
Evaporación anual (EA)	1,069.00 mm
Precipitación media anual (PA)	800.00 mm
Volumen de reserva	1,650.00 m ³
Volumen de diseño (VD)	9,900.00 m ³
C. DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN	
Diámetro superior	67.25 m
Diámetro inferior	55.00 m
Altura inferior de corte	2.50 m
Altura a nivel de máxima operación	3.50 m
Área superior	3,551.90 m ²
Área inferior	2,375.76 m ²
Volumen de almacenamiento	10,192.15 m ³
D. CÁLCULO DEL ÁREA DE DRENAJE: $A = V/(C \cdot PA)$	
Volumen de almacenamiento (V)	10,192.15 m ³
Coefficiente de escurrimiento (C)	0.50
Precipitación media anual (PA)	640.00 mm (80% de probabilidad sobre el promedio anual de 800.00 mm)
Área de drenaje	31,850.50 m ²
Área de drenaje asumiendo un factor de seguridad	63,700.90 m ²



E. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc) $T_c = 00041(3.28 L / 51/2)0.77$	
Área de drenaje rectangular	63,700.90 m ²
Base mayor	104.25 m
Base menor	55.00 m
Longitud del cauce más largo (L)	800.00 m
Pendiente del cauce asumiendo el 2% (S)	0.02 m/m
Tc	7.93 menor de 10.00 minutos
Tc asumido	10.00 minutos
F. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO para un Tc = 10 minutos y un Pr = 25 años	
Intensidad de la precipitación (I)	150.80 mm/h
Caudal del diseño: $Q = C * I * A$	1.30 m ³ /s
G. CÁLCULO DEL VERTEDERO $Q = m * b * (\mu(2g) * H)^{3/2}$	
Vertedero de umbral ancho	$m = 0.35$
Largo de la abertura en m	$b = 5.00$
Carga sobre el vertedero en m	$H = 0.35$
Caudal de diseño (Q)	1.60 m ³ /s

Fuente: Diseño y construcción de reservorios. MEFCCA, INTA, COSUDE, CATIE 2017.

Diseño de la obra de toma

La obra de toma es una estructura hecha para conectar el vaso del reservorio con el exterior a través de una tubería plástica que traslada el agua almacenada hacia el área de cultivo y/o el abrevadero.

Se coloca en la parte baja del vaso, a una distancia de al menos dos metros desde el pie del talud interno del dique. Su ubicación exacta dependerá de varios factores, entre ellos la ubicación del punto más bajo del reservorio. Si el reservorio es circular, la obra de toma debería colocarse al centro del reservorio. En un reservorio trapezoidal, se puede ubicar en la zona media del reservorio, sea alineado a uno de los diques laterales o al centro.

El tamaño sugerido para la obra de toma es de 1 metro de lado por 70 cm de altura. Para reducir la cantidad de sedimentos que lleguen a los sistemas de riego o abrevaderos, la obra de toma debe enterrarse 30 centímetros, quedando 40 centímetros elevada sobre el fondo del reservorio.

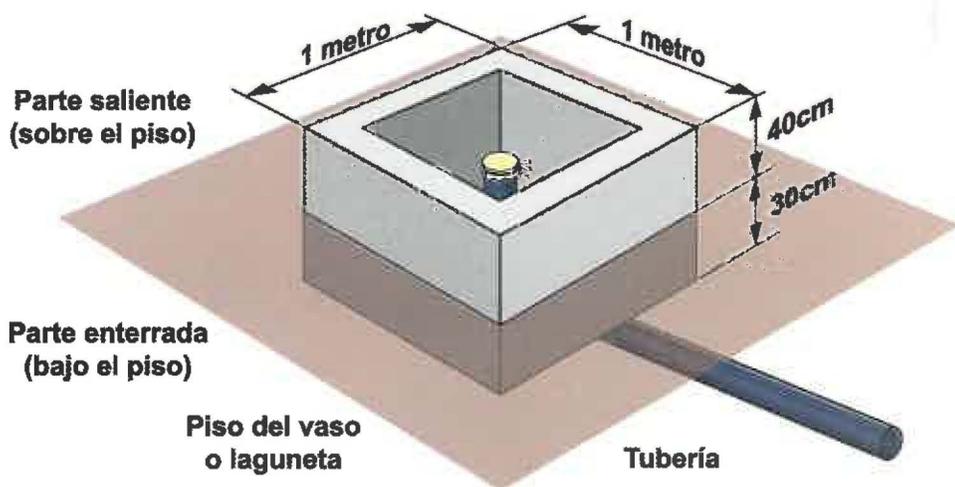


Figura 4. Diseño de la obra de toma con las medidas más utilizadas en Centroamérica. Fuente: CATIE.



Figura 5. Corte lateral para indicar la ubicación recomendada de la obra de toma y de la tubería de drenaje. Fuente: CATIE.

El tubo de drenaje también deberá estar elevado desde el fondo del reservorio. Sin embargo, una consecuencia de este diseño es que habrá un volumen de agua, con un máximo de 40 cm de profundidad, que permanecerá sin usarse dentro del reservorio.

Una alternativa, para aprovechar todo el volumen de agua, es construir una obra de toma consistente en un barril plástico con perforaciones y relleno completamente de rocas.

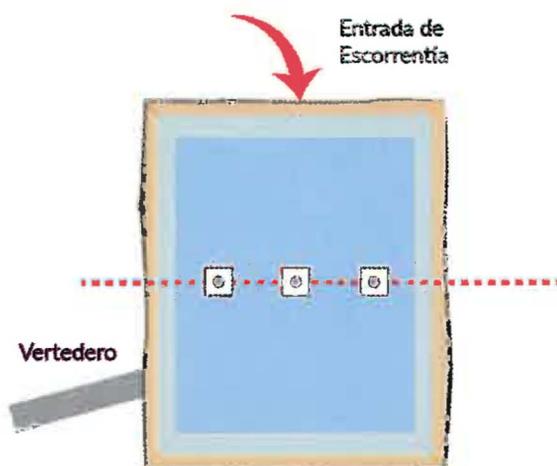


Figura 6. Ejemplo de posibles puntos de ubicación de la obra de toma en un reservorio trapezoidal con fondo horizontal o con el punto más bajo hacia el medio. Fuente: CATIE.

Diseño del vertedero

El vertedor de excesos o vertedero, se construye en uno de los diques divisores de agua, donde hay tierra firme y no recibe el golpe directo de la escorrentía al entrar al vaso del reservorio. Este dispositivo también permite desaguar la basura acumulada en el espejo de agua.

Para obtener las medidas apropiadas del vertedero en relación con el caudal de diseño, se calcula en base a la siguiente fórmula (MEFCCA 2017):

$$Q = mb\sqrt{2gh}^{3/2}$$

Donde:

Q = caudal máximo instantáneo (m³/s)

m = coeficiente de vertedero, asumir 0.42

b = ancho del canal del vertedero (m)

h = altura de agua sobre el vertedero (m)

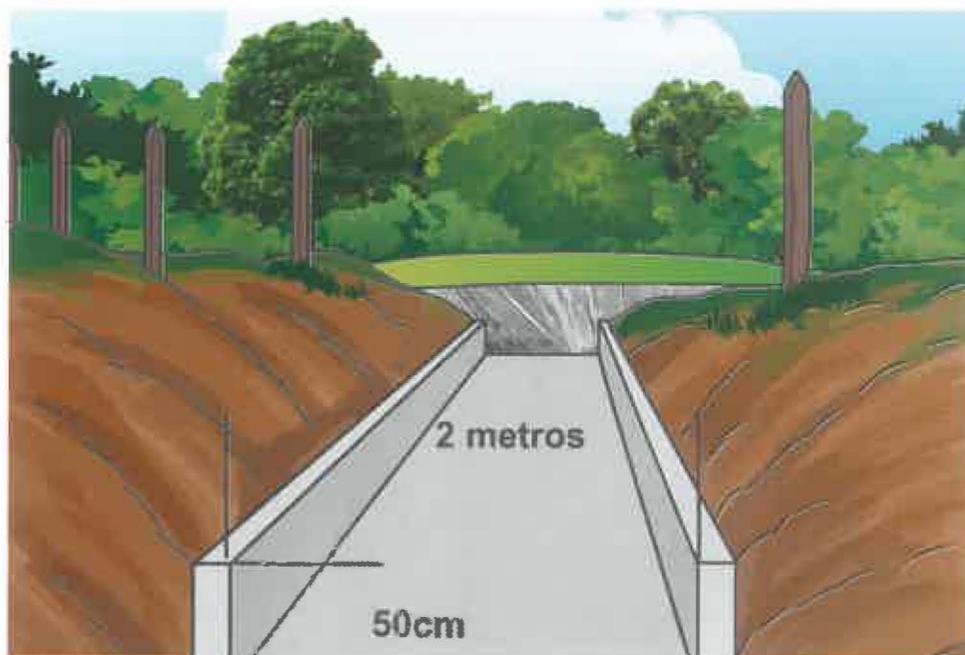


Figura 7. Diseño del vertedero con 2 m de ancho por 50 cm de profundidad, utilizando concreto y piedra de río. Fuente: CATIE.



Figura 8. Uso de piedra de río para extender el largo del vertedero con el fin de evacuar excedentes. Fuente: CATIE.

Para reservorios no mayores de $5,000 \text{ m}^3$, se recomienda un vertedero con un ancho aproximado de 2 m por 50 cm de profundidad. La longitud del mismo debe permitir evacuar los excedentes de agua fuera de los taludes, para evitar la erosión. Se recomienda construirlo de concreto ciclópeo, utilizando piedra bolón o piedra de río.

Diseño del abrevadero

El abrevadero se construye en un sitio plano, por lo menos un metro por debajo del nivel del reservorio y a unos diez metros de distancia de este, para que pueda ser alimentado a través de una tubería plástica.

Empotrado en uno de los costados del abrevadero se construye una columna de concreto. Al centro se coloca un tubo PVC, con una llave de chorro para descargar el agua en el abrevadero.

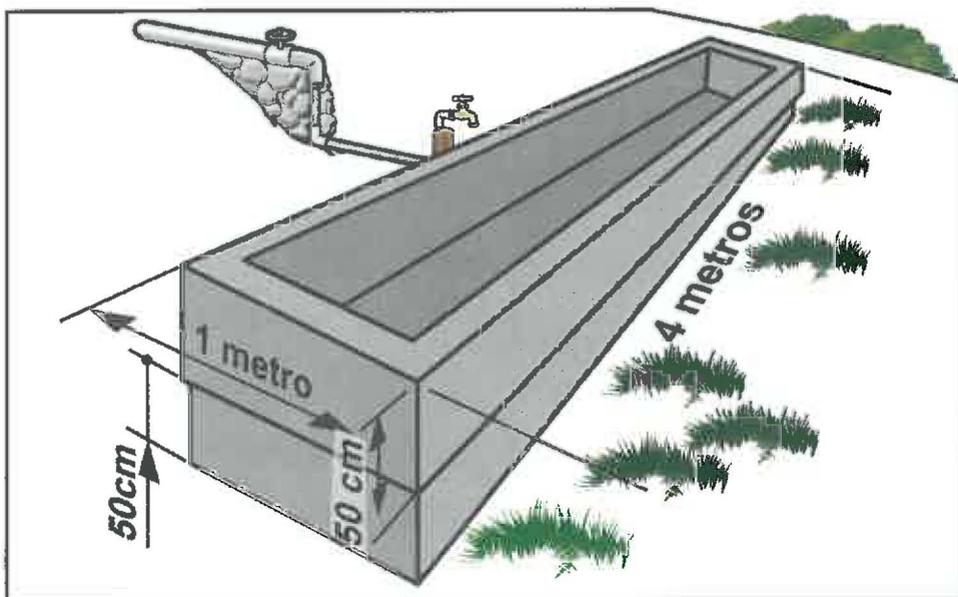
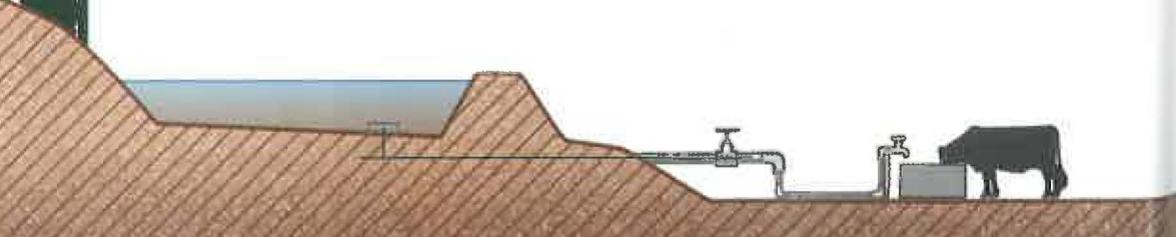


Figura 9. Diseño del abrevadero para diez cabezas de ganado. Fuente: CATIE.

El tamaño depende del número de cabezas de ganado que tenga la finca. Cuando se construye para diez cabezas de ganado y se usa cemento y piedra o ladrillo, se aconseja que tenga 1 m de ancho por 4 m de largo y 50 cm de profundidad. Su capacidad total de almacenamiento será de 2 m³ o dos mil litros de agua. Un hato de 10 cabezas de ganado vacuno consume 450 litros diarios o 45 litros por cabeza. Pero si la cantidad de ganado es mucho mayor, es mejor construir dos o más abrevaderos para facilitar el acceso al agua.

La construcción debe hacerse sobre una base de cemento con piedra para colocar el abrevadero al nivel del suelo y facilitar el acceso del ganado al agua. De preferencia, se ubica el abrevadero a la sombra de árboles, para reducir la evaporación y mejorar las condiciones para el ganado.

Como alternativas al cemento y la piedra se pueden usar barriles cortados a la mitad o neumáticos también cortados a la mitad y colocados sobre una estructura de piedra para garantizar una larga vida útil.



Diseño de sitios con *Google Earth Pro*

El programa informático de uso libre *Google Earth Pro* fue creado para visualizar cartografía múltiple basada en la superposición de imágenes satelitales, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos creados por computadora.

Esos recursos gratuitos combinados con información agroclimática de los territorios o zonas de intervención, permiten hacer levantamientos topográficos precisos para la selección de sitios y el diseño de obras de captación de escorrentía. Los datos que se requieren, son casi todos aquellos explicados en las páginas de esta guía técnica, que pueden usarse con las herramientas convencionales o informáticas de diseño de obras de captación de escorrentía.

Google Earth Pro permite mapear lo siguiente:

1. Sistemas de drenaje superficial/ perfiles topográficos.
2. Potenciales sitios para construir embalses en territorios priorizados.
3. Establecer y dibujar los polígonos de áreas de recarga hídrica.

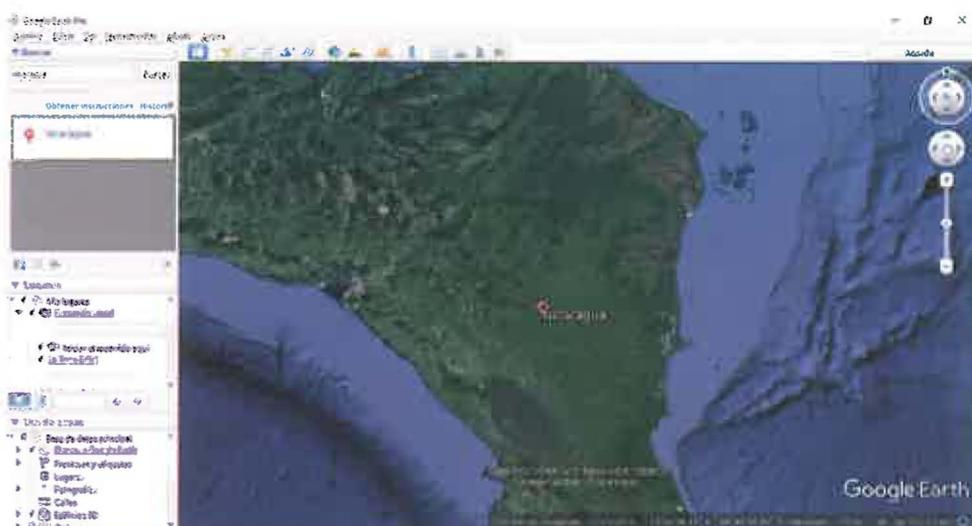


Figura 10. Pantalla de inicio de *Google Earth Pro*. Fuente: Google.

4. Establecer y dibujar el perímetro de las obras de cosecha de agua.
5. Diseñar el perímetro de los taludes propuestos y el perímetro de acceso.
6. Señalar la ubicación de bancos de materiales de arcilla.
7. Señalar posibles fuentes de abastecimiento de agua para las obras grises y la compactación.

La información que se introduce a *Google Earth Pro* permite realizar la caracterización hídrica y el balance hídrico del área de recarga; la selección de sitios estratégicos con potencial para captar escorrentía y la aplicación de criterios técnicos para diseñar las obras en base a necesidades de agua y presupuesto.

A continuación presentamos las instrucciones paso a paso en el uso de *Google Earth Pro* para el diseño de sistemas de captación de escorrentía.

Georreferenciación del sitio propuesto para el reservorio

Con la ayuda de un GPS, el diseñador de la obra y el dueño de la finca recorren el terreno para ubicar el sitio donde se sugiere la construcción del reservorio. En una libreta se anotan las coordenadas Este y Norte (X - Y), que aparecen en el GPS, el nombre de la finca, el dueño de la finca, la comunidad, el municipio y el departamento.

Mapeo del sitio en Google Earth Pro

Abrir *Google Earth Pro* para ingresar las coordenadas y comenzar la selección y diseño del sitio.

Marca de posición: 

Hacer click en la herramienta "Marca de Posición" para definir coordenadas de ubicación del sitio. Las coordenadas pueden estar en el sistema UTM o en latitud/longitud. En cualquier caso, se puede modificar, desde el menú Herramientas | Opciones de *Google Earth Pro*, en qué formato se va a trabajar, siendo posible seleccionar grados decimales, grados/minutos/segundos o UTM.

En el sistema UTM, Nicaragua se encuentra en la zona 16P.

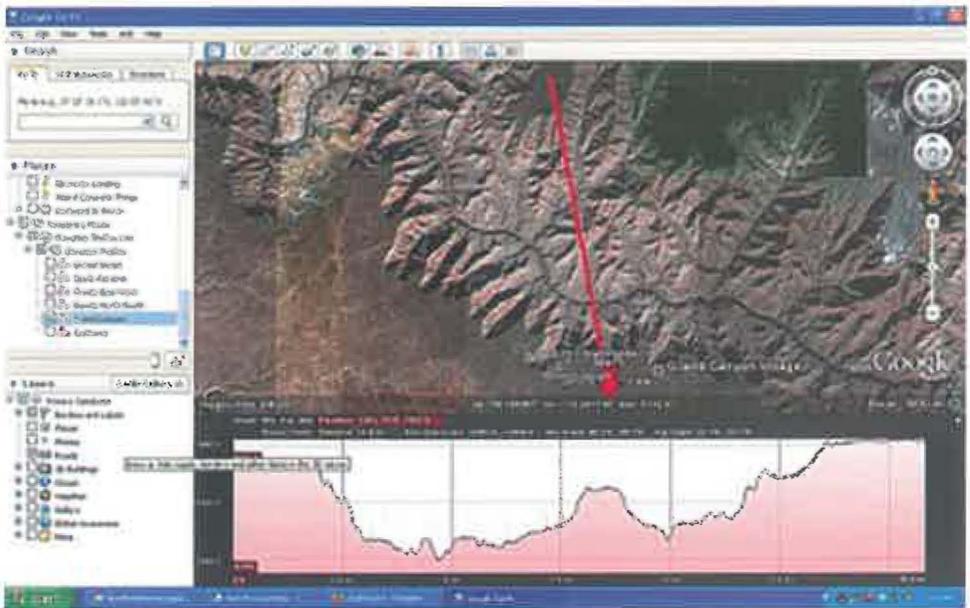


Figura 12. Imagen ilustrativa del uso de la herramienta de perfil de elevaciones en Google Earth Pro. Fuente: Google.

El primer paso es visualizar la dirección de la pendiente del terreno hacia el punto de interés e identificar visualmente los cauces por los que escurrirá el agua precipitada hacia ese punto.

El siguiente paso es identificar puntos altos que marcan el parteaguas entre la cuenca o área de recarga, donde toda la escorrentía se dirige a los cauces previamente visualizados y una cuenca vecina.

Una herramienta para auxiliarse en este proceso es el perfil de elevaciones en el programa *Google Earth Pro*.

Tener en consideración que pueden haber parteaguas dentro de una misma área de recarga, que definen subcuencas dentro de la cuenca mayor. En tales casos, las redes de drenaje de ambas subcuencas siempre escurren hacia el punto identificado.

Este análisis permitirá, de manera sencilla, determinar los límites del área de recarga.

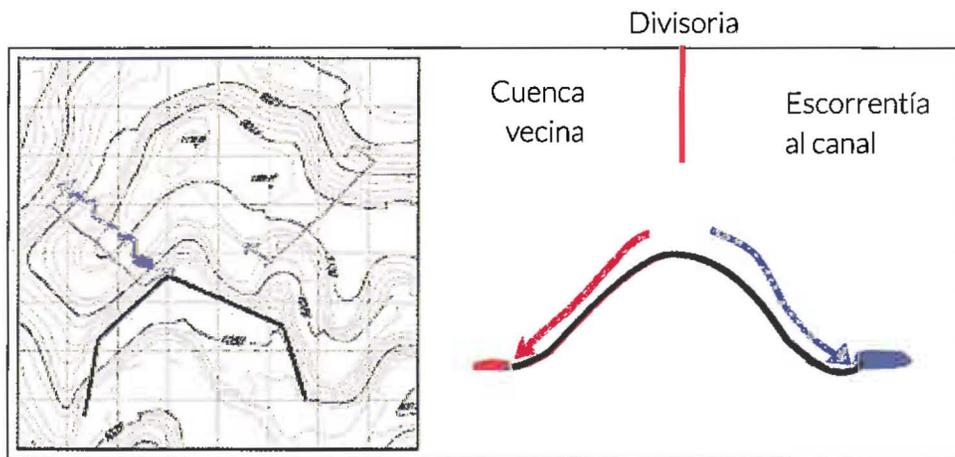


Figura 13. Ejemplo de una imagen que muestra cuáles son las divisorias o parteaguas. Fuente: CATIE.

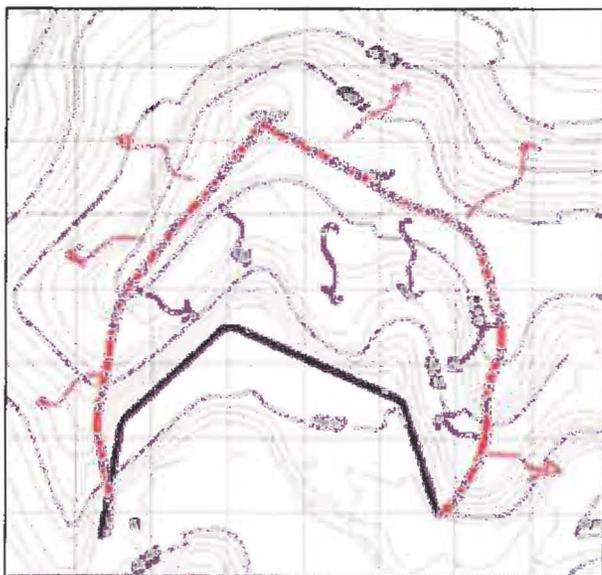


Figura 14. Ejemplo de ilustración mostrando la demarcación de una cuenca hidrográfica. En esta figura, la cuenca tributa no a un punto, sino a una línea. Fuente: CATIE.

Al hacer click derecho sobre el trazo, se obtiene el perímetro en km y el tamaño del área de recarga en km², o en las medidas que sean seleccionadas en el comando "Editar Polígono".

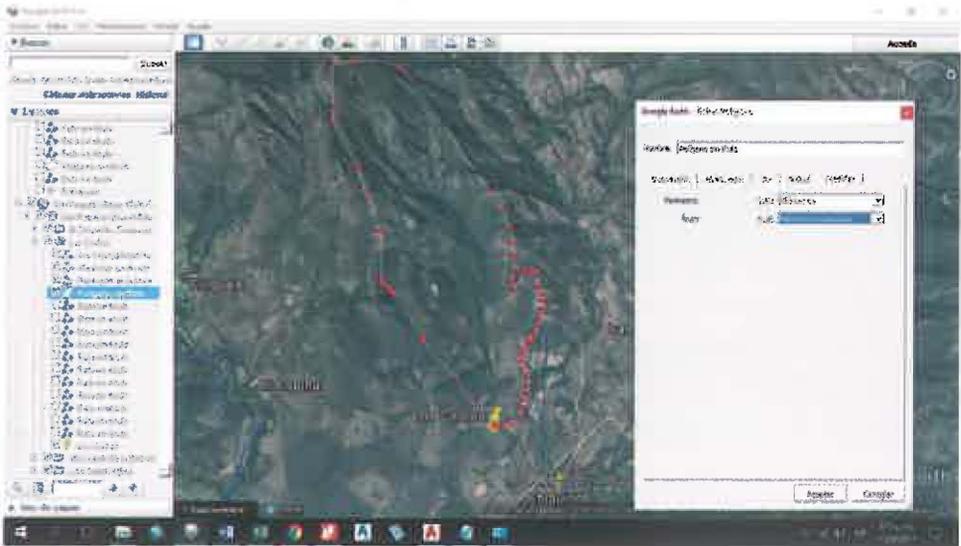


Figura 15. Ejemplo del trazo del área de recarga y de la ubicación del sitio de construcción del reservorio. El comando "Editar Polígono" permite hacer cambios en todos los trazos. Fuente: Google.

Agregar ruta: se define la red de drenaje de la obra

Trazar las rutas de escurrimiento superficial, es decir, los cauces o canales de drenaje que van en dirección al sitio seleccionado para el reservorio.

Es necesario identificar y trazar la red de drenaje completa, es decir, tanto los cauces principales como sus afluentes, si los hubiere.

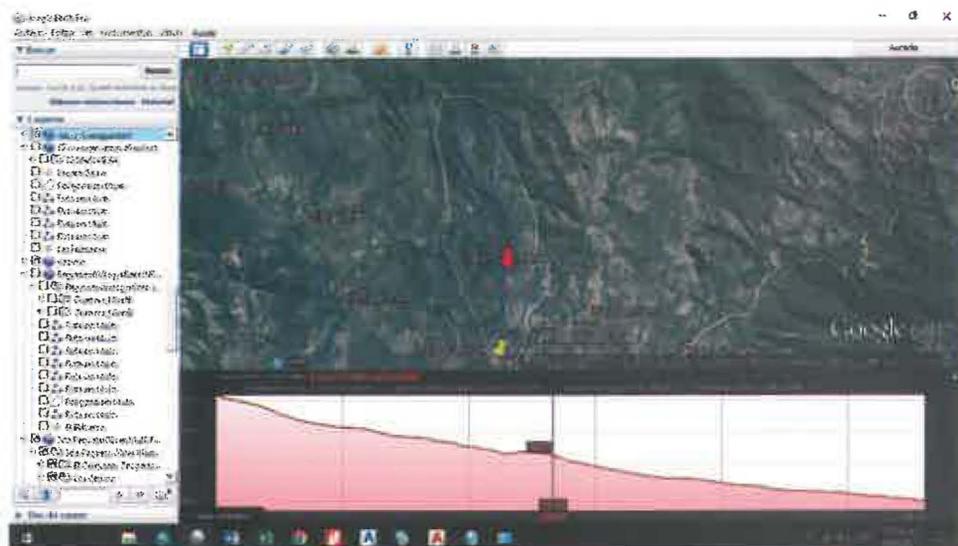


Figura 16. A estas alturas se debe identificar y trazar la red de drenaje de los cauces principales y de afluentes, en caso que los hubiera, para establecer el punto donde confluyen. Fuente: Google.

Mostrar regla: dibujar y medir el reservorio

Al hacer click en la herramienta Regla, aparece el cuadro de diálogo Regla (Ruler). Seleccionar metros como sistema de medida. Seleccione el tipo de trazo: ruta, polígono, círculo y dibuje la forma y tamaño del reservorio a partir del pin que indica el punto central de la coordenada.

Llegado a este punto, se imprime el diseño y se procede a realizar una visita *in situ*, para efectuar un trabajo de replanteo y medición de la obra en el terreno. Esta visita implica determinar los puntos de emplazamiento del reservorio, la obra de toma, el vertedero, pendientes, obstáculos del terreno, distancias y lo que se necesite revisar para que la construcción y la obra sean exitosas.



Figura 17. Seleccione la herramienta “Regla” y elija metros como sistema de medida. Seleccione el tipo de trazo: ruta, polígono, círculo y dibuje la forma y tamaño del reservorio. Fuente: Google.

Relevamiento topográfico y replanteo

La construcción de un sistema de captación destinado a solventar déficits de agua en actividades agrícolas y/o ganaderas, el cual se describe en la **Guía 3: Construcción de reservorios para captación de escorrentía** requiere un proceso de diseño que abarca las siguientes etapas:

1. Localizar el sitio para establecer el sistema.
2. Determinar la demanda de agua en la finca.
3. Calcular la disponibilidad de agua en la finca.
4. Diseño del área efectiva de captación de escorrentía.
5. Diseño del sistema de almacenamiento o reservorio.
6. Diseño de la obra de toma y del sistema de conducción del agua captada hacia el área de cultivo y/o el abrevadero.
7. Diseño del sistema de riego y/o del abrevadero.

Una vez finalizados los procedimientos detallados en la sección anterior, se procede a realizar una visita al sitio para evaluar el lugar de ubicación propuesto del reservorio, verificar la capacidad del mismo y determinar con precisión los emplazamientos de las obras de toma y del vertedero.

Los aspectos más importantes a evaluar del sitio propuesto para ubicar el reservorio tienen que ver con que el lugar no sea rocoso o lleno de troncos, raíces y/o árboles de gran tamaño.

El relevamiento topográfico mínimo para construir un reservorio consiste en la medición de un perfil altimétrico a lo largo del eje del dique y del vertedero. Asimismo, se hace un relevamiento planialtimétrico de suficientes puntos en el vaso, los cuales permitan estimar áreas y volúmenes del reservorio. Estos puntos deben describir el vaso usando curvas de nivel cada metro, como mínimo, hasta un metro arriba de la altura superior de la represa.



Visita al sitio para evaluar el lugar de ubicación propuesto del reservorio, verificar la capacidad del mismo y determinar con precisión los emplazamientos de las obras de toma y del vertedero. Foto: CATIE.

Para delimitar la superficie del reservorio a inundar, se recomienda trazar la curva de nivel del embalse hasta el nivel del umbral del vertedero. Se traza otra curva de nivel del embalse en su cota máxima de vertido.

Si se pretende construir un vertedero tipo canal, se debe realizar un perfil longitudinal del punto seleccionado, comenzando en el punto de inicio hasta el punto de descarga de los excesos de escorrentía, fuera de los lindes de la obra. Para realizar este trazo, se debe considerar la pendiente del terreno en ese punto y las características del vertedero.

Conforme a los valores presentados en la primera parte de esta guía, se selecciona la forma y tamaño del reservorio a construir. Esos valores determinarán las dimensiones de la estructura, la pendiente de los taludes, el ancho del coronamiento y la geometría interior. Asimismo, determinarán el diseño y los aspectos constructivos de la obra de toma y del vertedero.



*Labores de medición y corrección en el sitio seleccionado para construir el reservorio.
Foto: CATIE.*

En caso de necesidad, se deberán hacer las correcciones de diseño, con la finalidad de garantizar que haya congruencia con las características específicas del sitio donde se construirá la obra.

Una vez realizados los cambios necesarios a la propuesta de sistema de captación de agua de escorrentías surgidas de la visita al sitio, se procede a replantear el reservorio, es decir, se ubicarán en el terreno los puntos que definen la obra proyectada. Tales puntos incluyen los vértices y otros puntos que delimitan el contorno del reservorio, la ubicación de la obra de toma, del vertedero, etc.

El trazado, la determinación de niveles y la construcción son temas que se explican en la **Guía No. 3: Construcción de reservorios para la captación de escorrentía**, correspondiente a esta serie de publicaciones de cosecha de agua.

Bibliografía

- Bendaña G. (2012). Agua, agricultura y seguridad alimentaria en las zonas secas de Nicaragua. Nicaragua.
- Palma E., Cruz J., Martínez A., Aguilar A., Nieuwenhuys A. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE (2011). ¿Cómo construir mejores aguadas para el suministro de agua al ganado?, Turrialba, Costa Rica.
- FAO (2015). Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- FAO, Acción contra el hambre. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano. 2012. Nicaragua.
- FAO. Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de requerimientos de agua de los cultivos.
- IICA-MEXICO (1998). Manual técnico: Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y El Caribe. México.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica – MAG. (2010). Compendio con información de las opciones técnicas de cosecha de agua aplicables a nuestro medio. San José, Costa Rica.
- MEFFCA, COSUDE (2015). Guía de selección de sitio y construcción de reservorios. Nicaragua.
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOT-MA) (2011). Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas. Volumen 1: Diseño Hidrológico / Hidráulico. Montevideo, Uruguay.
- Molieri, J. (2016). Guía técnica de diseño y construcción de obras de cosecha de agua. Proyecto Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua. MEFFCA, 2014-2017.
- Souza Silva A. Rocha Porto E. Pinheiro F. (2010). Embalse para riego de salvación, Brasil. EMBRAPA-CPATSA. Brasil.
- Salinas A. A. Universidad Nacional de Costa Rica – UNA. Especificaciones técnicas para la construcción de reservorios agrícolas. Recuperado de: <http://www.cemedede.una.ac.cr/index.php/produccion-academica/category/2-libros?download=37:diseo-de-estructuras-reservorios>.
- USAID (2005). Proyecto de desviación, almacenamiento y uso de aguas lluvias en El Salvador. El Salvador.