

MÓDULO V: Monitoreo ambiental en zonas de recarga hídrica

Serie de materiales didácticos sobre experiencias de manejo
sostenible de recursos naturales en tres microcuencas de la Región
Trifinio



Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Domicilios de la empresa
Bonn y Eschborn, Alemania

Programa Bosques y Agua
Agencia de la GIZ
Bulevar Orden de Malta, Casa de la Cooperación Alemana
Urbanización Santa Elena, Antiguo Cuscatlán, La Libertad
El Salvador, C.A.
Tel. +503 21 21 51 00
www.giz.de

Versión
Febrero de 2018

Diseño
Studio 15, Estudio de Diseño
San Salvador

Créditos fotográficos
Todas las fotos: Programa Bosques y Agua / GIZ

Texto
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

La GIZ es responsable del contenido de la presente publicación.

Por encargo del
Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania

Contenido

Presentación	8
Introducción al módulo	9
Capítulo I. Enfoque y fundamentos del monitoreo ambiental	10
1.1. Objetivos del sistema de monitoreo ambiental del Programa Bosques y Agua	10
1.2. Monitoreo de agua	11
1.2.1. Gestión de la cantidad y calidad del agua	11
1.2.2. Bases del monitoreo hídrico implementado por el Programa Bosques y Agua	12
1.3. Monitoreo de suelos	12
1.3.1. Manejo y conservación de suelos	12
1.3.2. Bases del monitoreo de suelos implementado por el Programa Bosques y Agua	13
1.4. Modelación de cuencas hidrográficas - SWAT	14
Capítulo II. Caracterización de las microcuencas seleccionadas	16
2.1. Selección de las microcuencas	16
2.2. Hidrología	16
2.3. Clima	18
2.4. Topografía	18
2.5. Suelos	19
Capítulo III. Variables y métodos de medición	20
3.1. Establecimiento de parcelas de monitoreo	20
3.2. Precipitación	23
3.3. Escorrentía	24
3.4. Pérdida de suelo por escorrentía (erosión hídrica)	25
3.5. Infiltración de agua en el suelo	28
3.6. Cantidad de agua	29
Capítulo IV. Resultados obtenidos del monitoreo ambiental	32
4.1. Estacionalidad e irregularidad de la precipitación	32
4.2. Mejora de las condiciones de los suelos	33
4.3. Calidad y cantidad de agua	35
4.4. Cambio de uso del suelo	35
Guía didáctica	36
Bibliografía	39

Figuras

- Figura 1. Contribución de los sistemas de monitoreo a la buena gestión de los recursos
- Figura 2: Las comunidades participan en la recolección e interpretación de los datos
- Figura 3. Factores que determinan la erosividad de la precipitación
- Figura 4. Factores que determinan la erodabilidad de un suelo
- Figura 5. Mapa de ubicación de las microcuencas piloto seleccionadas para la implementación del Programa
- Figura 6. Mapa de relieve de la Región Trifinio
- Figura 7. Visualización de las áreas de intervención con el modelo agroforestal y de los puntos seleccionados para realizar el monitoreo ambiental
- Figura 8. Esquema de una parcela de monitoreo permanente de escorrentía y erosión
- Figura 9. Participación activa de las comunidades en la construcción de la parcela de monitoreo permanente
- Figura 10. Mujer en comunidad del Trifinio leyendo pluviómetro
- Figura 11. Parcela permanente de monitoreo con recipiente de rebalse y barril recolector final
- Figura 12. Proceso de recolección de muestra para la medición de pérdida de suelo
- Figura 13. Filtrado y secado de muestras
- Figura 14. Medición de la infiltración del agua en una finca SAF de café bajo sombra
- Figura 15. Aforo volumétrico de caudal con la ayuda de un balde
- Figura 16. Aforo de la quebrada Marroquín en la microcuenca Marroquín con un molinete tipo pigmeo
- Figura 17. Demostración y práctica sobre cómo realizar un aforo
- Figura 18. Radar de nivel marca Sutron modelo RLR-0003-1 y Datalogger con modem GPRS para enviar aforos en tiempo real a un celular
- Figura 19. Aplicación del método colorimétrico Visocolor en la quebrada Marroquín
- Figura 20. Características generales de las precipitaciones en la Región Trifinio
- Figura 21. Comparación de indicadores de conservación de suelo según el tipo de cobertura vegetal
- Figura 22. Efectos de los SAF sobre la conservación de los suelos
- Figura 23. Cambios en el uso del suelo observados en la microcuenca Marroquín entre 2009 y 2015

Recuadros

Recuadro 1.	Enfoque del sistema de monitoreo ambiental del Programa Bosques y Agua
Recuadro 2.	Desafíos de la gestión del agua, en términos de cantidad y calidad
Recuadro 3.	Desafíos del manejo de suelos
Recuadro 4.	Modelación hidrológica basada en cuencas hidrográficas
Recuadro 5.	Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua – SWAT
Recuadro 6.	Definiciones de las características morfométricas de una cuenca
Recuadro 7.	Clasificación de las parcelas de monitoreo, según uso del suelo
Recuadro 8.	¿Cómo se mide la precipitación?
Recuadro 9.	Medición participativa de la precipitación
Recuadro 10.	Efectos de la escorrentía
Recuadro 11.	Coefficiente de escorrentía
Recuadro 12.	Umbrales de escorrentía
Recuadro 13.	Impactos agronómicos de la erosión
Recuadro 14.	Erosión hídrica
Recuadro 15.	Factor crítico del proceso de medición de la pérdida de suelo
Recuadro 16.	Consecuencias de una baja infiltración
Recuadro 17.	Capacidad de infiltración de un suelo

Tablas

Tabla 1.	Características morfométricas de las tres microcuencas seleccionadas
Tabla 2.	Parámetros climatológicos de las tres microcuencas seleccionadas
Tabla 3.	Principales agrupaciones de suelo encontradas en las microcuencas seleccionadas
Tabla 4.	Información utilizada para la selección de fincas para establecimiento de las parcelas permanentes de monitoreo de escorrentía y erosión
Tabla 5.	Distribución de las parcelas de monitoreo de suelo
Tabla 6.	Precipitación promedio anual de las microcuencas seleccionadas

Siglas y acrónimos

ARS	Servicio de Investigación Agrícola
AIS	Año Internacional de los Suelos
BMZ	Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CSEH	Compensación por Servicios Ecosistémicos Hídricos
CTPT	Comisión Trinacional del Plan Trifinio
DEM	Modelo de Evaluación Digital
FAO	Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
HRU	Unidades de Respuesta Hidrológica (por su sigla en inglés)
INE	Instituto Nacional de Ecología de México
MINAMBIENTE	Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
RRNN	Recursos Naturales
SAF	Sistema Agroforestal
SIG	Sistema de Información Geográfico
SIGE	Sistema de Información Gerencial de la CTPT
STRM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (por su sigla en inglés)
USD	Dólares de los Estados Unidos de América
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (por su sigla en inglés)

Abreviaturas

A	Área
°C	Centígrado Celsius (unidad termométrica)
cm	Centímetro (unidad de longitud)
cm ²	Centímetro cuadrado (unidad de superficie)
ha	Hectárea (unidad de superficie)
km	Kilómetro (unidad de longitud)
km ²	Kilómetro cuadrado (unidad de superficie)
L	Longitud
m	Metro (unidad de longitud)
m ²	Metro cuadrado (unidad de superficie)
m ³	Metros cúbicos (unidad de volumen)
ml	Mililitro (unidad de capacidad)
mm	Milímetro (unidad de longitud)
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mz	Manzana (unidad de medición de área, equivalente a 0.7 hectárea)
No.	Número
pH	Potencial de hidrógeno
qq	Quintal (unidad de peso)
S.J.B.	San Juan Buenavista

Presentación¹

El Programa Bosques y Agua² es un esfuerzo conjunto entre la Comisión Trinacional del Plan Trifinio (CTPT) y la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Se implementa en la Región Trifinio desde el año 2009. En sus tres fases, el programa apoyó a la CTPT y actores locales en sus esfuerzos de fomentar e implementar de forma transfronteriza el uso sostenible de recursos naturales.

En los ocho años y medio de ejecución del Programa, se introdujeron exitosamente medidas piloto de gestión sostenible de los recursos naturales (RRNN). Paralelamente se fortalecieron capacidades de actores e instituciones a nivel local y regional. Con un enfoque multinivel que combina asesoramiento técnico, político y de procesos.

Específicamente, se desarrollaron tres modelos de gestión de los RRNN: Modelo agroforestal de cultivo café bajo sombra y de frutales con forestales, Modelo silvopastoril de ganadería amigable con el ambiente, y Modelo forestal con un enfoque de compensación por servicios ecosistémicos hídricos.

Los modelos agroforestal y silvopastoril se implementaron en más de 600 pequeñas y medianas unidades productivas, localizadas en 7 microcuencas y 3 micro-zonas piloto de los tres países. El modelo forestal fue implementado en 6 microcuencas. De manera complementaria, el Programa contribuyó a la sensibilización y capacitación de las comunidades en la prevención y el control de incendios forestales.

La estrategia utilizada tuvo como meta la promoción del desarrollo integral del área trinacional, incidiendo positivamente en los ámbitos económico, social, institucional y ambiental. Como apoyo a la CTPT, se propiciaron diversas formas de articulación entre los actores territoriales y se fortalecieron sus capacidades en diferentes niveles. El trabajo realizado se fundamentó en los siguientes principios básicos: (i) alineación con las prioridades establecidas en la región, (ii) fomento de la apropiación y la gobernanza territorial, (iii) un enfoque de integralidad, (iv) el escalamiento de las experiencias, y (v) fortalecimiento de capacidades en diferentes niveles.

De manera integrada los modelos construyeron condiciones que han servido como punto de partida para reducir la vulnerabilidad del medioambiente en la zona, mejorando la capacidad de adaptación al cambio climático por parte de las comunidades en la Región Trifinio, específicamente en: conocimientos, tecnologías, institucionalidad o formas de gobernanza, y recursos / economía.

1 En el documento, los vocablos “productores” se refieren a productores y productoras, “beneficiarios” a beneficiarios y beneficiarias, “técnicos” a técnicos y técnicas. El uso del masculino para referirse a ambos sexos en este documento pretende hacer el texto más legible, y de ninguna manera se trata de una discriminación en contra de la mujer.

2 En el documento, el Programa Bosques y Agua/GIZ – Plan Trifinio se podrá denominar “Programa Bosques y Agua”, “Programa” y “PByA”.

Introducción al módulo

El Programa promovió tres modelos de manejo sostenible de los recursos naturales como parte de las medidas de adaptación al cambio climático en la Región del Trifinio, donde convergen Honduras, Guatemala y El Salvador. Con una amplia participación de los diversos actores de los territorios, se realizaron acciones de fortalecimiento ambiental, económico y social, que contribuyen a la protección y manejo sostenible en la Región Trifinio, la cual tiene una extensión territorial de más de 7,541km², y al mejoramiento de los medios de vida de más de 800 mil habitantes.

El presente, es el quinto de cinco módulos didácticos, que recogen conocimientos generales y experiencias específicas desarrolladas por el Programa Bosques y Agua en la implementación de modelos agroforestal, silvopastoril y forestal; éste último con un enfoque de compensación por servicios ecosistémicos hídricos, en seis microcuencas piloto.

El propósito de este módulo didáctico es que sirva de apoyo en la formación de los profesionales del sector agropecuario y relacionados con el medio ambiente. Su contenido se basa principalmente en extractos del documento “**Monitoreo ambiental en zonas de recarga hídrica en el Trifinio: Efectos de sistemas agroforestales sobre la hidrología de suelos**” (Programa Bosques y Agua/ GIZ- Plan Trifinio, 2016).

Describe el sistema de monitoreo ambiental diseñado e implementado por el Programa. El sistema compara los resultados obtenidos por los modelos en comparación con los cultivos tradicionales y evidencia el mejoramiento de suelos y el aumento de la retención de agua. La aplicación del sistema se realizó con una amplia participación de los productores, capacitados para tal fin. Esto, contribuyó sin duda, a la apropiación de los modelos, y por tanto al logro de los beneficios tangibles observados en términos ambientales, económicos y sociales.

Objetivos pedagógicos

Objetivo general:

Facilitar y fomentar una cultura de monitoreo ambiental, aplicando métodos sencillos que pueden ser transferidos a nivel de campo para el manejo de los recursos naturales.

Objetivos específicos:

1. **Conocer** los métodos y variables del sistema de monitoreo ambiental aplicado por el Programa Bosques y Agua.
2. **Analizar** la importancia del involucramiento comunitario en el levantamiento y uso de información para el monitoreo ambiental.
3. **Comprender** las condiciones en las cuales el sistema de monitoreo ambiental ha sido aplicado y su contribución a la comprensión del efecto de modelos de gestión sostenible de los recursos naturales desarrollados en las microcuencas del Trifinio.
4. **Evaluar y analizar** si el sistema es apropiado a condiciones de territorio diferentes a las de la Región Trifinio.

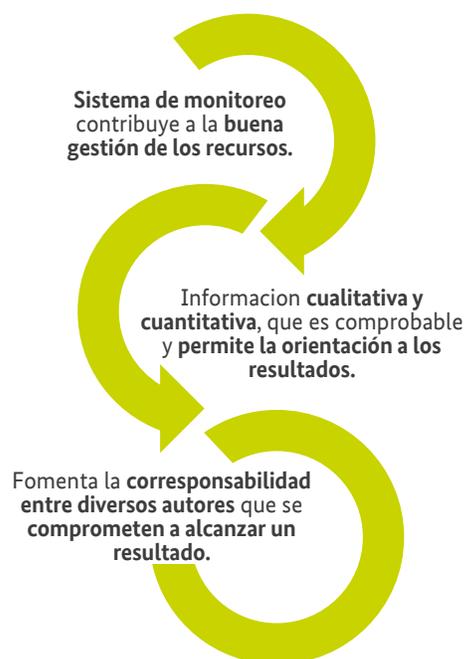
Capítulo I. Enfoque y fundamentos del monitoreo ambiental

El monitoreo es el levantamiento de datos como parte de la ejecución de un Programa o del avance de un proceso, y su comparación con lo planificado o con un estándar establecido previamente.

Los sistemas de monitoreo son un elemento fundamental para la generación de aprendizajes, porque permiten verificar los aspectos que funcionan de manera óptima y aquellos que se están desviando de lo esperado, donde deben realizarse los ajustes necesarios. La reflexión colectiva de la información puede conducir a la identificación de los factores de éxito y de las lecciones aprendidas. Por ejemplo, la contribución a la buena gestión de los recursos de la microcuenca, como se muestra en la figura 1.

Además de contar con su propio sistema, el Programa Bosques y Agua, apoyó a otras instancias (como la CTPT y la Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lempa) en la implementación de sistemas de monitoreo. Específicamente, asistió la concepción e implementación del Sistema de Información Gerencial (SIGE) de la CTPT, cuyo fin es contribuir al seguimiento de programas, proyectos e iniciativas relacionados con el Plan Trifinio.

Figura 1. Contribución de los sistemas de monitoreo a la buena gestión de los recursos



1.1. Objetivos del sistema de monitoreo ambiental del Programa Bosques y Agua

En toda América Central, la degradación del suelo está reduciendo su capacidad para retener agua y nutrientes. Ante la perspectiva de déficits hídricos más severos en el futuro, debido al cambio climático, un mejor manejo de los suelos es fundamental para crear resiliencia en los cultivos y minimizar el impacto negativo sobre los rendimientos (Eitzinger, et al., 2013). Frente a la problemática apremiante del cambio climático en la Región del Trifinio, surgió la hipótesis que las prácticas de los modelos de gestión sostenible promovidos por el Programa aportan positivamente a la capacidad de sus beneficiarios en términos de adaptación al cambio climático. Por lo que el objetivo del monitoreo ambiental del Programa fue **evaluar el potencial de los Sistemas Agroforestales (SAF) para incrementar o mejorar los servicios hídricos** en microcuencas hidrográficas de la Región Trifinio, midiendo la **capacidad del suelo en transmitir agua**.

Al mismo tiempo, el sistema proporciona un **ejemplo de generación de datos ambientales**. Su implementación tenía como fin **motivar el compromiso de todas las partes** involucradas en la gestión ambiental, para lo cual fue determinante aplicar métodos participativos de recolección y análisis de datos, y capacitar a los beneficiarios del Programa para tal fin (recuadro 1).



Recuadro 1. Enfoque del sistema de monitoreo ambiental del Programa

- El sistema es aplicable al monitoreo ambiental en zonas de recarga hídrica.
- Se implementó durante 4 años, desde el 2010, año en el que se constituyó la línea base del mismo.
- Se consideraron variables para el monitoreo de los suelos (erosión, infiltración y escorrentía) y el monitoreo del agua (cantidad y calidad).
- Es un sistema de fácil manejo y bajo costo, que involucró de manera activa a las personas de las comunidades, lo que permitió levantar una gran cantidad de datos con la frecuencia necesaria para garantizar la confiabilidad estadística.
- La participación de los productores en la implementación del sistema, les permitió observar ellos mismos los efectos de sus buenas prácticas y comprender cómo éstas crean resiliencia frente al cambio climático.

1.2. Monitoreo de agua

1.2.1. Gestión de la cantidad y calidad del agua

La disponibilidad del recurso agua sirve de indicador para evaluar la eficiencia con la que se está manejando este recurso vital y su impacto sobre la flora, la fauna y el suelo. Se mide en función de la cantidad y la calidad, y de la evolución de estas variables en el espacio y en el tiempo (recuadro 2).

Recuadro 2. Desafíos de la gestión del agua, en términos de cantidad y calidad

Cantidad. En términos absolutos, en nuestra región, existe alta disponibilidad del agua, en comparación con los requerimientos de consumo humano, agrícola o industrial; sin embargo, la distribución irregular en el tiempo y desigual en el espacio causa situaciones de déficit hídrico. Un concepto estrechamente relacionado con disponibilidad es el de accesibilidad, que califica las facilidades de acceso al agua por parte de la población, las cuales pueden verse disminuidas principalmente por razones de costo, distancia o infraestructura.

Calidad. La contaminación del agua, especialmente la de índole microbiológica y química, se convierte en un desafío tanto para el consumo humano directo como para su uso en la producción de alimentos. A su vez, el uso excesivo de insumos agrícolas puede contaminar el recurso agua (ríos, lagunas, mantos acuíferos entre otros). Finalmente, la sobreexplotación de acuíferos conduce a la paulatina salinización del suelo, con una consecuente pérdida de su fertilidad.

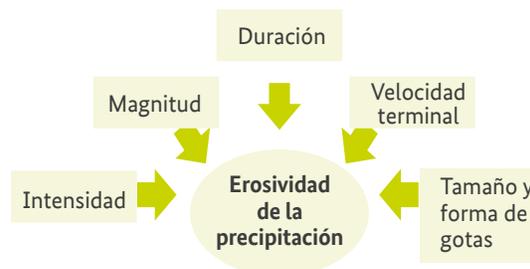
Para realizar una adecuada gestión de la cantidad y calidad del agua, se debe:

- Mantener actualizada la información tanto de los recursos de agua superficial como de las subterráneas, de preferencia con apoyo de la participación comunitaria;
- Definir estándares de la calidad del agua y ajustar los Límites Máximos Permitidos en función de los estándares perseguidos;
- Homogenizar los parámetros de medición de calidad y cantidad;
- Establecer las regulaciones para la protección de aguas subterráneas en cabecera de cuencas; y
- Establecer mecanismos de pagos e incentivos que contribuyen a la conservación del agua y a un uso responsable de la misma.

Por otro lado, es importante conocer la estrecha relación entre agua y suelo, en especial el papel que juega el agua en la erosión de los suelos:

- Por impacto directo de las lluvias - se habla de erosividad de la precipitación, determinada por factores como magnitud del evento de precipitación (área alcanzada por las lluvias), intensidad de las lluvias, velocidad terminal de las gotas, tamaño y forma de las gotas (figura 3).
- Por escorrentías, las cuales se explican en el capítulo III del presente módulo.

Figura 3. Factores que determinan la erosividad de la precipitación



1.2.2. Bases del monitoreo hídrico implementado por el Programa Bosques y Agua

El monitoreo hídrico consistió en documentar parámetros básicos de calidad y cantidad de agua, en fuentes de agua cercanas a las fincas con sistema agroforestal (SAF). Las fuentes se dividieron en dos categorías:

- fuentes con muy poca área de recarga bajo cobertura SAF; y
- fuentes con un área de recarga intervenida.

Parámetros analizados

- Se registraron las **precipitaciones** en cada una de las microcuencas piloto.
- Se midieron **caudales** en pequeñas fuentes de agua cercanas a las fincas SAF.
- Se evaluaron los **parámetros físico-químicos** del agua relacionados con el uso de productos agrícolas tales como fertilizantes.

Duración y frecuencia de las tomas de datos

- Las precipitaciones se midieron diariamente.
- El monitoreo de los caudales se realizó bimensualmente durante el primer año de monitoreo; posteriormente dos veces por año para las fuentes de la categoría (a); y tres veces por semana para las otras.
- Adicionalmente, se monitoreó la calidad del agua.

1.3. Monitoreo de suelos

1.3.1. Manejo y conservación de suelos

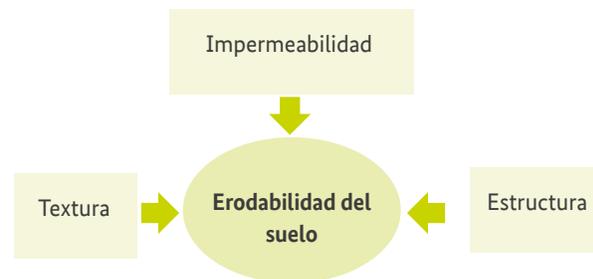
De acuerdo con la FAO (2015), el treinta por ciento de las tierras del planeta están degradadas, por razones físicas, químicas y biológicas. Según Gardi et al. (2014), citado por Montiel & Ibrahim (2015), el 74 % de las tierras cultivables en Mesoamérica son afectadas por procesos de degradación, lo que representa una amenaza para la producción agropecuaria, la seguridad alimentaria y nutricional, y el desarrollo sostenible (recuadro 3).

Recuadro 3. Desafíos del manejo de suelos

Degradación de suelos. Acciones antrópicas, como el uso de prácticas agrícolas no sustentables, y efectos del cambio climático, aumentan la degradación de los suelos, resultando en: compactación, pérdida de materia orgánica, disminución de la fertilidad, desequilibrios químicos (ej. salinización o acidificación), reducción biológica de la micro y macrofauna, **erosión** (hídrica o eólica), sedimentación de ríos, pérdida de fuentes de agua (Montiel & Ibrahim, 2015)

La susceptibilidad de un suelo a ser erosionado se denomina **erodabilidad**, la cual está determinada por **la textura** (proporción entre arcilla, limo y arena), la estructura (forma en la que agrupan las partículas de arcillo, limo y arena), la **impermeabilidad** (figura 4).

Figura 4. Factores que determinan la erodabilidad de un suelo



En cuanto a **textura**:

- Los suelos limosos, con más del 40% de limo, son considerados los más fértiles y resultan ser los más susceptibles a la erosión.
- Los suelos arenosos son menos susceptibles, ya que las partículas de arena son más difíciles de arrastrar por el agua o el viento.
- Los suelos arcillosos están compuestos por un alto porcentaje de pequeñas partículas, pero éstas pueden formar agregados, volviendo el suelo más estructurado y menos propenso a la erosión.

En cuanto a **estructura**, entre más estructurado sea un suelo, más estable será ante los agentes erosivos, debido a que presenta una alta infiltración que evitará escorrentías superficiales (Torres, 2000).

La incorporación de **materia orgánica** mejora la **impermeabilidad** del suelo.

Por otro lado, la **cobertura vegetal** actúa como **elemento amortiguador de la erosión** (tanto hídrica como eólica).

1.3.2. Bases del monitoreo de suelos implementado por el Programa Bosques y Agua

Como explicado en el párrafo 1.2., la cantidad de suelo erosionado, no es directamente proporcional a la lámina anual de precipitación (Torres, 2000). En ese sentido, la estrategia del Programa Bosques y Agua no ha sido realizar un estudio de la relación precipitaciones - grado de erosión per se, sino estudiar las respuestas de diferentes usos del suelo frente a un mismo evento de precipitación.

Así, el monitoreo de suelos se realizó comparando tres tipos de parcelas:

- parcelas piloto (sistema agroforestal recién introducido),
- parcelas de uso ideal (vegetación natural de la zona, generalmente bosque),
- parcelas testigo (no se sometieron a ningún cambio de uso de suelo, y continúan con cultivo tradicional de granos básicos o pasto natural).

Parámetros analizados

- Se registraron la **escorrentía**, la **erosión** y la **infiltración**.
- La erosión es considerada una de las expresiones más importantes de la degradación del suelo, mientras la capacidad de infiltración y la escorrentía son componentes básicos del balance hídrico.

Duración y frecuencia de las tomas de datos

- Los parámetros de erosión y escorrentía se determinaron diariamente, mientras que la infiltración se documentó anualmente. Se repitieron los ensayos todos los años, en los mismos sitios.

1.4. Modelación de cuencas hidrográficas - SWAT

Considerando que las relaciones entre el suelo, su uso y el agua son complejas, e influenciadas simultáneamente por diversos procesos que varían en escalas temporales como espaciales, la interpretación de los datos puede resultar difícil. Además, los efectos de cambio de uso de suelo pueden apreciarse generalmente a mediano y largo plazo.

Por estos motivos, el Programa Bosques y Agua realizó un análisis prospectivo recurriendo a herramientas de modelación hidrológica, o modelación de cuencas hidrográficas (recuadro 4).



Recuadro 4. Modelación hidrológica o modelación de cuencas hidrográficas

Un modelo es una representación simplificada del comportamiento de un sistema real complejo, basada en ecuaciones matemáticas. Se habla de modelo hidrológico cuando el sistema es una cuenca hidrográfica cuyos componentes son las variables del ciclo **hidrológico**³. Los datos de salida pueden ser, según el modelo elegido: predicciones de totales mensuales de escorrentía, parámetros de tormentas individuales, etc. (MINAMBIENTE, sf).

Para realizar la modelación de cuencas, el Programa Bosques y Agua utilizó la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*⁴, creada por la Universidad Texas A&M para el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA) (recuadro 5).

Recuadro 5. Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua - SWAT

Se ingresan datos de:

Clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra.

SWAT modeliza:

- Procesos físicos asociados con el movimiento del agua y el movimiento de sedimentos
- Desarrollo de cosecha
- Ciclo de nutrientes
- Entre otros

El ciclo hidrológico simulado por el SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum(R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Dónde:

- SW_t es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm),
- SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm),
- t es el tiempo en días,
- R_i es la cantidad de lluvia caída en el periodo de análisis (mm),
- Q_i es la cantidad de escorrentía (mm),
- ET_i evapotranspiración (mm),
- P_i es la percolación (mm),
- QR_i es el flujo de retorno (mm).

Fuente: Uribe, 2010

³ En el Módulo I de la presente serie de materiales didácticos, se define el ciclo hidrológico.

⁴ Para mayor información, visite el portal oficial de SWAT: <http://swat.tamu.edu/>

El SWAT permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas. Por tanto, predice el impacto a largo plazo de las prácticas de manejo del suelo sobre la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas (pesticidas y fertilizantes).

Se puede usar para cuencas grandes y heterogéneas en cuanto a suelos, uso de la tierra y condiciones de manejo, ya que las divide en unidades homogéneas llamadas unidades de respuesta hidrológica (HRU por sus siglas en inglés), que se obtienen del cruce de las variables tipos de suelo (textura), uso del suelo y pendiente.

Para realizar la modelación, el Programa Bosques y Agua desarrolló los siguientes pasos.

1. Se **calibra y valida** el modelo de forma representativa para una de las 6 microcuencas. Para esta tarea fue necesario ingresar los valores de los indicadores medidos por el sistema de monitoreo ambiental.
2. Se procede con la **recolección e ingreso de datos espaciales y temporales**. El Programa recolectó específicamente:
 - a. Información topográfica – modelo de elevación digital (DEM). Se generó con una resolución de 90 m (STRM 90 M – *Shuttle Radar Topography Mission*). Es utilizada para delimitar microcuencas, intercuencas y canales de drenajes;
 - b. Información climática – temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa y precipitación diaria;
 - c. Información edafológica – mapa de suelos;
 - d. Información de uso de suelo – mapa de uso de suelo. Se elaboraron dos: (i) con la cobertura de 2009; (ii) con la cobertura de 2015.
3. Se cruzan las capas de tipo de suelo, uso y pendiente, para generar las **HRU**.
4. SWAT genera reportes de datos y mapas que se **interpretan**.

Los datos de la modelación orientan las decisiones sobre prevención y control la erosión de los suelos, control de contaminación de fuentes de agua y manejo de cuencas.

Capítulo II. Caracterización de las microcuencas seleccionadas

2.1. Selección de las microcuencas

El Programa Bosques y Agua intervino con SAF en seis microcuencas (durante su primera y segunda fase de implementación), seleccionadas en función de su capacidad de recarga hídrica⁵, y posteriormente de la factibilidad de implementación del modelo agroforestal⁶. Estas microcuencas son representativas de la diversidad ecológica y social de la Región Trifinio (figura 5).

Las experiencias llevadas a cabo en las microcuencas Mezcal en Jutiapa, Guatemala, Marroquín en Copán, Honduras y Jupula en Chalatenango, El Salvador son las que se documentan en los estudios de caso de la presente serie de materiales didácticos.

2.2. Hidrología

Cada cuenca hidrográfica tiene un comportamiento único. Sin embargo, existen parámetros o indicadores que reflejan características geomorfológicas de las cuencas, la vegetación y el clima (tabla 1, recuadro 6).

Estos, dan indicios del comportamiento que una cuenca presenta ante eventos de precipitación. Ayudan a relacionar tiempos de respuesta o curvas de avenida, además de evaluar la susceptibilidad a riesgos como la erosión o las inundaciones.

Tabla 1. Características morfométricas de las seis microcuencas seleccionadas

Características /microcuenca	Mezcal	Carcaj	Marroquín	S.J.Buena Vista	Jupula	Cusmapa
Orden de red hídrica	3	4	4	3	3	3
Área [km ²]	89.1	81.8	32.9	23	23.7	98.7
Área intercuenca [km ²]	34.2	9.1	9.1	8.2	4.6	2.6
Perímetro [km]	49.7	50.4	28.6	30.3	28.8	62.7
Ancho [km]	7.0	3.5	2.8	1.7	1.7	5.8
Longitud del curso principal [km]	12.72	23.17	11.78	13.53	13.7	17.16

5 Para conocer la capacidad de recarga hídrica, el Programa encargó el estudio: “Análisis hidrogeológico de la región Trifinio”.

6 Para mayor información sobre el modelo agroforestal, consultar el Módulo I de la presente serie de materiales didácticos.

Figura 5. Mapa de ubicación de las microcuencas piloto seleccionadas para la implementación de los modelos agroforestales



Fuente: Programa Bosques y Agua/GIZ – Plan Trifinio.

Tabla 1. Características morfométricas de las seis microcuencas seleccionadas

Características /microcuenca	Mezcal	Carcaj	Marroquín	S.J.Buena Vista	Jupula	Cusmapa
Longitud de la red hídrica [km]	113.36	88.87	34.49	27.49	26.88	95.77
Densidad de drenaje	1.3	1.1	1	1.2	1.1	1
Altitud más frecuente	706	1074	1173	1257	750	438
Desnivel altitudinal [%]	1562	1300	845	1375	1976	617
Cuota máxima [msnm]	2040	1720	1483	2295	2705	1047
Cuota mínima [msnm]	478	420	638	920	729	430
Pendiente media de la cuenca [%]	23	42	38	33	63	23
Pendiente media del cauce [%]	9.11	10.66	10.87	13.89	14.27	14.35
Coefficiente de compacidad	1.49	1.57	1.4	1.78	1.67	1.78
Factor de forma	0.55	0.15	0.24	0.13	0.13	0.34
Tiempo de concentración [h] (Kirpich)	1.05	2.26	1.22	1.19	1.05	2.13

Fuente: Programa Bosques y Agua, 2016.



Recuadro 6. Definiciones de las características morfométricas de una cuenca

Ancho: Define la relación entre el área (A) y la longitud (L) de la cuenca (A/L).

Área: Delimita el total del volumen de precipitación que puede recibir una cuenca. Es, estadísticamente, el factor más importante en las relaciones entre escorrentía y las características de una cuenca.

Coefficiente de compacidad: Refleja la irregularidad de una cuenca, entre más irregular sea (en relación a la forma de un círculo), mayor será su coeficiente de compacidad.

Densidad superficial de la red hídrica, o densidad de drenaje: Relación entre el área de la cuenca y el agua que circula superficialmente en la cuenca. Alta densidad de drenaje, equivale a alto riesgo de erosión e inundaciones.

Desnivel altitudinal (INE, 2004): Es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Se relaciona con la variabilidad climática y ecológica.

Factor de forma (kf): Refleja la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. Por ejemplo, cuencas muy anchas o con salidas hacia los lados, tienen un factor de forma alto.

Longitud: La distancia horizontal siguiendo el cauce principal, desde la salida de la cuenca hasta el parte aguas.

Orden de red hídrica (Polo, sf): Es la posición que ocupa la microcuenca en la red de drenaje. La red hídrica inicia con los cursos de agua sin afluentes, es decir arroyos procedentes de nacientes. Se les asigna el orden 1. Dos cursos de nivel 1 convergen para constituir un curso de orden 2 y sucesivamente. Cuando se unen dos afluentes de orden distinto, al curso de agua resultante se le asigna el orden más alto de los dos afluentes.

Perímetro: Longitud del contorno del área de la cuenca. En relación con el área de la cuenca, este parámetro indica la forma.

Tiempo de concentración (Kirpich) (Ibáñez, Moreno & Gisbert, sf): de una cuenca, se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre.

2.3. Clima

El documento “El Estado de la región Trifinio 2010” (GIZ, 2011) clasifica, con base en una serie de datos climáticos mensuales de estaciones climatológicas del Trifinio (de 1990 al 2010), las zonas climáticas según Thornwaite, mediante dos índices: 1) la jerarquía de temperatura; 2) la jerarquía de humedad. Estos índices se consideran determinantes para el desarrollo de la vida vegetal y por lo tanto para el potencial de éxito del SAF. A continuación, se presentan los parámetros climatológicos de las microcuencas (tabla 2).

Tabla 2. Parámetros climatológicos de las microcuencas seleccionadas

Variables	Mezcal	Carcaj	Marroquín	S.J.B.	Jupula	Cusmapa
Precipitación (humedad)						
Días de lluvia/año	120	90	140	120	130	120
Precipitación máxima [mm]/día	110	90	100	200	130	120
Precipitación anual promedio - año húmedo [mm]	1200	1200	1500	1600	2300	1500
Precipitación anual promedio - año seco [mm]	650	650	800	950	1300	1000
Temperaturas						
Media anual [°C]	24	24	24	19	18	25
Máxima [°C]	31	31	30	27	27	32
Mínima [°C]	8	8	7	4	7	10

Fuente: Programa Bosques y Agua, 2011, con datos de los años 1990-2010.

Las microcuencas Mezcal, Carcaj y Marroquín son de clima semicálido húmedo, mientras Jupula y San Juan Buenavista se caracterizan por un clima semicálido-muy húmedo por estar ubicado en la zona más alta del Trifinio.

La precipitación se distribuye entre los meses de mayo a octubre con lluvias esporádicas en noviembre. Se observan fuertes variaciones entre un año húmedo y un año seco, lo que presenta una dificultad para la sostenibilidad de los sistemas agroforestales. Igualmente, las fuertes precipitaciones con lluvias hasta 200 mm por evento, aumentan el riesgo de erosión.

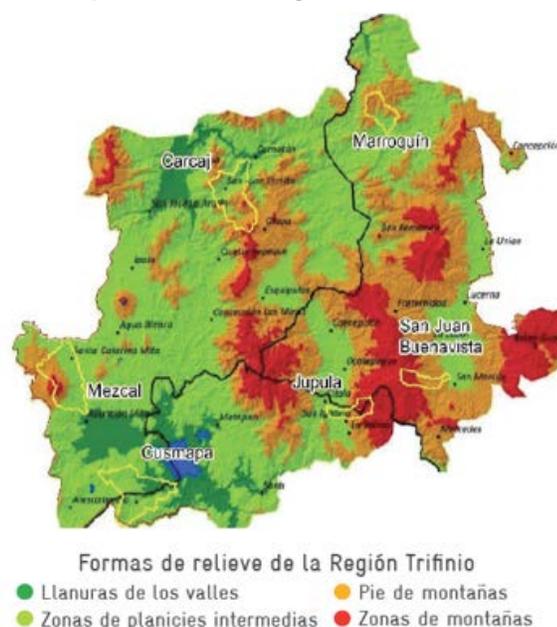
2.4. Topografía

La Región se segmenta en 4 formas de relieve:

- Montañas (arriba de 1,750 msnm)
- Pie de montañas (1,251 a 1,750 msnm)
- Planicies intermedias (750 a 1,250 msnm)
- Llanuras de los valles (menor a 750 msnm)

Jupula y San Juan Buenavista se encuentran en zona de montaña de hasta 2,000 msnm, con altura y clima aptos para los cultivos de aguacate y melocotón. Marroquín, Carcaj y Mezcal presentan relieve de pie de montaña, propicio al café de altura (figura 6).

Figura 6. Mapa de relieve de la Región Trifinio



Fuente: Programa Bosques y Agua/GIZ - Plan Trifinio.

2.5. Suelos

A continuación, se precisan las asociaciones de suelo encontradas en las microcuencas seleccionadas, de acuerdo con la clasificación de suelos de la FAO (1974). Cada agrupación se asocia a determinadas características como la capacidad de uso del suelo y la vulnerabilidad a la erosión entre otros (tabla 3).

Tabla 3. Principales agrupaciones de suelo encontradas en las microcuencas seleccionadas

Microcuenca	Agrupación de suelo	Descripción	Vulnerabilidad a la erosión
Mezcal	Cambisol, Regosol, Vertisol	De material de origen volcánico. Suelos poco profundos con alta capacidad de infiltración	BAJA E+
Carcaj	Luvisol, Molisol	Suelos poco profundos, pedregosos de texturas finas a medias sobre roca caliza y mármol, altos pH y fuerte eluviación de arcillas	ALTA E+++
San Juan Buenavista	Andosol, Luvisol, Regosol	Profundidad moderada, textura media a fina encontrados en colina y montañas de valles altos	MEDIA E++
Jupula	Andosol, Luvisol, Regosol	Profundidad moderada, textura media a fina encontrados en colinas y montañas de valles altos	MEDIA E++
Cusmapa	Andosol, Regosol, Lluvisol, Rendzina	De material volcánico, suelos poco profundos	MEDIA/BAJA E++

Fuente: Programa Bosques y Agua/GIZ – Plan Trifinio. 2011.

Nota: no hay datos disponibles de la microcuenca Marroquín.

Capítulo III. Variables y métodos de medición

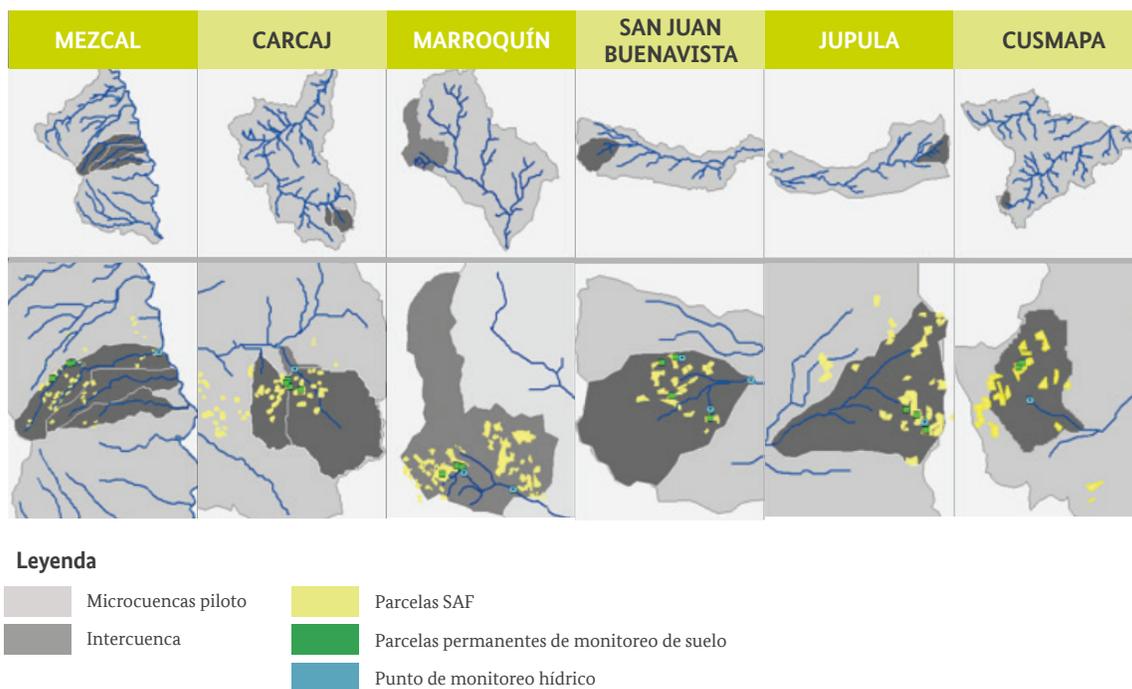
3.1. Establecimiento de parcelas de monitoreo

En las microcuencas seleccionadas, se aplicaron los pasos siguientes para ubicar los puntos de monitoreo y establecer las parcelas.

1. Se seleccionaron y segmentaron **pequeñas áreas de recarga hídrica**, también llamadas **intercuencas**. Se procuró que la mayoría de las fincas piloto seleccionadas para el cambio de uso de suelo, se encontraran dentro de esta misma intercuenca.
2. Se determinaron las intercuencas que presentaban el mayor porcentaje de su área de escurrimiento en terrenos bajo cambio de uso de suelo. Para ello, se georreferenciaron y digitalizaron 366 fincas en las seis microcuencas piloto del Programa.
3. Se determinó por microcuenca las áreas promedio de cada finca, los usos y tipos de suelo, así como la pendiente más frecuente.
4. Con esta información, se procedió a seleccionar las **fincas** que se encontraran en la moda⁷ en cuanto a la frecuencia de estas variables (tabla 4).
5. En estas fincas, se instalaron 54 **parcelas permanentes de monitoreo de suelo** (figura 7).
6. Los **puntos de monitoreo hídrico** se ubicaron a la salida de la intercuenca con mayor nivel de intervención (figura 7).

Todas las parcelas y los puntos de monitoreo fueron instalados con apoyo de las comunidades.

Figura 7. Visualización de las áreas de intervención con el modelo agroforestal y de los puntos seleccionados para realizar el monitoreo ambiental



⁷ Moda: Valor que se presenta con mayor frecuencia en una distribución de datos.

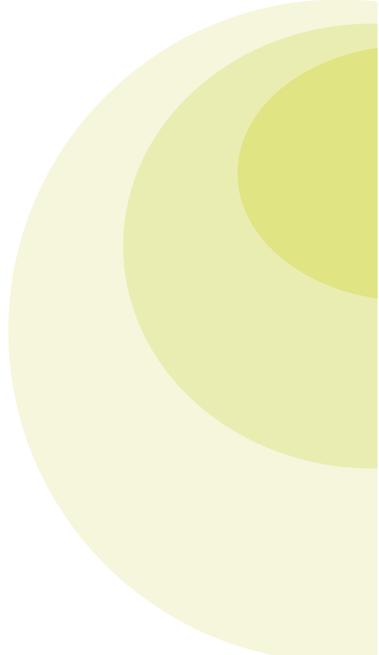
Tabla 4. Información utilizada para la selección de fincas para establecimiento de las parcelas permanentes de monitoreo de escorrentía y erosión

	Mezcal	Carcaj	Marroquín	S.J.B.	Jupula	Cusmapa
No. de fincas	57	82	82	48	48	49
Área Total (ha)	29	20	30	25	20	24
Área promedio (ha)	0.52	0.24	0.46	0.32	0.45	0.4
Uso del suelo (moda)	Granos básicos 38%	Granos básicos 76%	Granos básicos 48%	Pastos 72%	Pastos – hortalizas 31%	Granos básicos 71%
Vegetación natural presente	Bosque mixto 19%	Bosque latifoleado 3%	Bosque de coníferas 28%	Bosque latifoleado 6%	Bosque de coníferas 11%	-
Pendiente (moda)	12%	45%	45%	56	53%	13%
Tipo de suelo (moda)	Franco	Franco	Franco	Franco	Franco	Franco

Fuente: Programa Bosques y Agua, 2016.

En cada microcuenca se seleccionaron los diferentes usos de suelo para monitorear escorrentía, erosión e infiltración (recuadro 7). Al seleccionar las áreas donde se instalarían las parcelas, se tuvo cuidado que las parcelas testigo y las parcelas en transición fueran similares (tipo de suelo, pendiente, etc.) y se encontraran lo más cerca posible (tabla 5).

Recuadro 7. Clasificación de las parcelas de monitoreo, según uso del suelo



Parcelas con suelos bajo uso testigo: áreas con un mínimo de cinco años de cultivo tradicional, que continuarían el mismo uso y manejo tradicional durante los próximos años.

Parcelas con suelos bajo uso natural: áreas con poca o ninguna intervención humana, como bosques de coníferas o latifoleados, o cafetales abandonados ubicados cerca de las fincas.

Parcelas con suelos bajo uso testigo: áreas con un mínimo de cinco años de cultivo tradicional, que continuarían el mismo uso y manejo tradicional durante los próximos años.

A continuación, por cada microcuenca seleccionada para la presente serie de materiales didácticos, se presenta la distribución de parcelas de monitoreo de escorrentía y erosión (tabla 5).

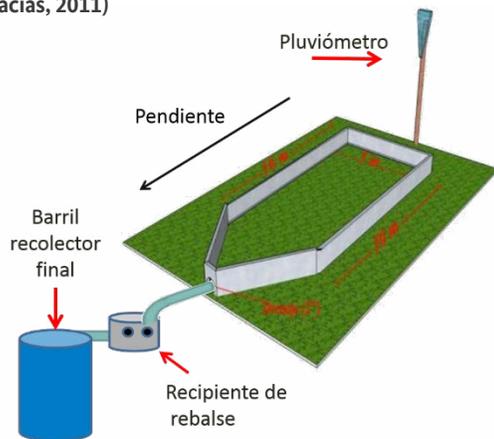
Tabla 5. Distribución de las parcelas de monitoreo de suelo

Microcuenca	Total parcelas	Parcelas testigo		Parcelas de transición		Parcelas de uso ideal	
		Cobertura	No. parcelas	Cobertura	No. parcelas	Cobertura	No. parcelas
Mezcal	9	Granos básicos	3	SAF café con sombra	3	Bosque latifoleado secundario	3
Carcaj	9	Granos básicos	3	SAF café con sombra	3	Bosque latifoleado secundario	3
Marroquín	9	Granos básicos	3	SAF café con sombra	3	Bosque coníferas	3
S. J. B.	15	Pasto/hortalizas	6	SAF frutales	6	Bosque latifoleado primario	3
Jupula	6	Pasto	3	SAF frutales	3	--	--
Cusmapa	6	Granos básicos	3	SAF café con sombra	3	--	--

Fuente: Programa Bosques y Agua/GIZ - Plan Trifinio. 2016. Monitoreo ambiental en zonas de recarga hídrica en el Trifinio. Efectos de sistemas agroforestales sobre la hidrología de suelos.

¿Cómo instalar una parcela permanente de monitoreo?

Figura 8. Esquema de una parcela de monitoreo permanente de escorrentía y erosión (Adaptado de Macías, 2011)



Para la instalación de las parcelas de monitoreo se siguen los siguientes pasos (figura 8):

- Delimitar una zona de 5 m de ancho por 10 m de alto, lo que representa un área de escurrimiento de 50 m².
 - Instalar un barril recolector final, que permitirá captar la escorrentía proveniente de esa área. Se recomienda un barril con capacidad de 200 litros.
 - Instalar un rebalse entre la parcela y el barril recolector final. El rebalse permite recolectar una fracción controlada del volumen total de la escorrentía, lo que hace posible la determinación del coeficiente de escorrentía. Además, evita el rebalse del barril recolector final.
- Al hacer los agujeros del rebalse, tener cuidado que tengan el mismo diámetro y se encuentren todos a la misma altura (para que reciban la misma presión de agua). De esta manera, se puede asumir que todos los agujeros reciben la misma presión y por tanto en todos fluye la misma cantidad de agua.
 - Verificar que todos los agujeros tengan el mismo diámetro incluso después de haber instalado el adaptador para los tubos.
 - Anualmente, antes de iniciar la estación lluviosa, realizar el mantenimiento de las parcelas.

La figura 9 presenta varias vistas del proceso de instalación de las parcelas de monitoreo permanente.

Figura 9. Participación activa de las comunidades en la construcción de la parcela de monitoreo permanente.



3.2. Precipitación

La precipitación total que recibe una parcela se convierte en vapor de agua, en agua almacenada, y en agua que circula superficialmente⁸. Por tanto, el conocimiento de la precipitación es necesario para la interpretación de la mayoría de datos ambientales.

El monitoreo de la precipitación se realizó en las seis microcuencas piloto, en aquellas fincas donde se instalaron las parcelas de monitoreo de erosión y escorrentía. Se utilizó un pluviómetro con un área de captación estándar de 200 cm², instalado a una altura de 2 metros (recuadro 8).

Recuadro 8. ¿Cómo se mide la precipitación?

- El instrumento usado es un pluviómetro estándar, que puede ser de plástico o de metal, con una graduación que alcance entre 100 mm y 200 mm
- El cilindro interior – o colector – se llena hasta 25 mm de lluvia. Si llueve más que esta cantidad, el exceso desborda en el cilindro externo. El cilindro interior tiene una precisión de 0.5 mm. Se mide el contenido del cilindro interior. Una vez anotado, se vacía, y se vierte ahí el contenido del cilindro externo para medirlo, las veces necesarias. Se suman los valores para determinar la cantidad total de lluvia.
- La lectura se debe realizar a diario, en horario matutino.

El Programa Bosques y Agua recolectó los datos de precipitación con amplia participación de los beneficiarios, previamente capacitados para tal fin (figura 10 y recuadro 9).

⁸ Para más detalle, ver el apartado “Ciclo Hidrológico”, en el Módulo I de la presente serie de Materiales didácticos.



Figura 10. Mujer en comunidad del Trifinio leyendo pluviómetro

Recuadro 9. Medición participativa de la precipitación

- El Programa Bosques y Agua demostró a los beneficiarios la importancia de llevar registros de precipitación y les recapitó para tal fin.
- La lectura de los pluviómetros fue realizada por una persona de la comunidad, previamente formada (figura 7).
- Durante los cuatro años en los que se realizaron las mediciones de precipitación, se procuró que fuera la misma persona quien realizará el monitoreo en un determinado punto.
- El monitoreo de las precipitaciones se realizó todos los días, entre las 06:00 y las 08:00 am, desde junio 2010 hasta diciembre 2014.

- ➔ El Programa Bosques y Agua realizó un monitoreo de precipitaciones diarias, que generó datos de distribución anual y total de la precipitación, precipitaciones mínimas y máximas mensuales, precipitaciones máximas diarias, distribución de las intensidades diarias, máxima intensidad y duración de eventos.

3.3. Escorrentía

Se le llama **escorrentía** o **escurrimiento** a la corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales. Sin embargo, en el caso del presente documento, “escorrentía” o “escurrimiento” se usan para referirse al escurrimiento superficial que se produce en un terreno, es decir la parte de la precipitación conocida como **precipitación en exceso**. Es aquella que durante un evento de precipitación no logra infiltrar en el suelo y escurre (figura 11).

La escorrentía es uno de los **principales causantes de la erosión**, pero también puede ocasionar otros efectos perjudiciales (recuadro 10):

Recuadro 10. Efectos de la escorrentía

- Provoca erosión (pérdida de suelo).
- Puede transportar contaminantes a los sistemas hídricos (agua superficial, subterránea y del suelo).
- El abastecimiento en agua potable puede quedar comprometido si el agua llega a presentar cambios en su calidad (olor, color, turbiedad) e inocuidad.
- Las aguas superficiales contaminadas pueden cambiar los procesos metabólicos de las especies acuáticas que residen en ellas.
- Todo lo anterior se traduce en riesgos para la salud humana y perturbaciones del ecosistema

¿De qué depende la escorrentía? La escorrentía depende de diversos factores :

1. Intensidad y duración de la precipitación
2. Topografía del terreno (pendiente y relieve)
3. Tipo y estado del suelo (compactación, impermeabilidad, humedad inicial entre otros)
4. Tipo de cobertura vegetal

Por lo general, altas tasas de escorrentía generan altas tasas de erosión, o un aumento de la misma. Sin embargo, la relación entre ambas variables no es lineal y no siempre es evidente (ver párrafo 3.4.).

➔ El sistema de monitoreo ambiental del Programa Bosques y Agua registró dos indicadores: el coeficiente de escorrentía (recuadro 11), y el umbral de escorrentía, promedio y mínimo (recuadro 12).

Recuadro 11. Coeficiente de escorrentía

- El coeficiente de escorrentía mide la relación “precipitación que circula superficialmente” sobre “precipitación total recibida por el suelo”.
- Generalmente, una reducción en el coeficiente de escorrentía indica una mayor infiltración del agua en el suelo.

Figura 11. Parcela permanente de monitoreo con recipiente de rebalse y barril recolector final, para recibir las aguas de escorrentía.



Recuadro 12. Umbrales de escorrentía

- El umbral de escorrentía, es la cantidad de precipitación a partir de la cual el terreno no es capaz de infiltrar más agua y ésta discurre sobre la superficie en un flujo difuso.
- El umbral promedio, se calcula tomando en cuenta todos los eventos de precipitación en el año.
- El umbral mínimo, refleja la menor lámina para la cual se registra una escorrentía significativa.



3.4. Pérdida de suelo por escorrentía (erosión hídrica)

La erosión es un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo, por agentes erosivos. Este fenómeno es una de las máximas expresiones de la degradación del suelo. Constituye uno de los problemas más graves que enfrenta la agricultura moderna, puesto que remueve la capa superficial del suelo, donde se encuentran la mayor cantidad de nutrientes para los cultivos (Almorox, Rafelli, & Bermúdez, 2010) (recuadro 13).

Recuadro 13. Impactos agronómicos de la erosión

- Reduce la fertilidad del suelo.
- Afecta la capacidad de almacenamiento del suelo en agua.
- Con el tiempo, la capa de suelo se vuelve más delgada, lo que perjudica el desarrollo del sistema radicular de las plantas, y por tanto la capacidad de las plantas en alimentarse.

Lo anterior provoca:

- Una menor productividad de los cultivos.
- Una menor capacidad de las plantas de enfrentar ataques de plagas (debido a deficiencias nutricionales).
- Una menor resiliencia ante efectos climáticos adversos.

La forma de erosión que más afecta a la agricultura en Centroamérica es la erosión hídrica (recuadro 14).



Recuadro 14. Erosión hídrica

Cuando el agua satura los poros y fisuras del terreno, va formando regueros que se deslizan a gran velocidad en zonas con pendiente y comienzan a erosionar el suelo, arrancando y arrastrando materiales. La fuerza del impacto de las precipitaciones y la velocidad del arrastre aumentan cuando el suelo presenta baja o nula vegetación.

¿De qué depende la pérdida de suelo? Se puede atribuir a diferentes factores (Röder, Villavicencio & Zarazúa, 2006):

1. Erosividad de la precipitación
2. Erodabilidad del suelo
3. Longitud de la pendiente
4. Inclinación de la pendiente
5. Tipo de cobertura vegetal (a mayor cobertura, menor erosión)
6. Prácticas de conservación de suelo (a más prácticas, menor erosión)

Considerando que intervienen todos estos factores, entendemos porque la erosión no depende únicamente de la escorrentía. Así, un suelo puede generar altos volúmenes de escorrentía, pero estar compactado de manera que sus valores de erosión sean mínimos. Además, varios estudios mencionan que los dos últimos factores son los de mayor incidencia sobre el proceso erosivo.

Los SAF inciden precisamente sobre estos dos últimos factores, y por tanto contribuyen a una reducción del fenómeno de erosión. A su vez tienen una influencia sobre la longitud de la pendiente, ya que la construcción de terrazas y acequias modifica la misma.

➡ El Programa Bosques y Agua registró la pérdida de suelo por cada evento de precipitación. De esta forma, se obtuvo la pérdida de suelo promedio por evento, la pérdida total anual y la pérdida máxima por evento.

Método aplicado por el Programa Bosques y Agua para evaluar la pérdida de suelo por escorrentía

A continuación, se describe el proceso implementado, paso a paso. El paso 1, el cual implementó el Programa con involucrado de las comunidades, es clave para asegurar el éxito del procedimiento (recuadro 15).

Etapa 1. Recolección de muestra

1. En cada evento de precipitación, la persona responsable del monitoreo de las parcelas, mide con una barra graduada la lámina de agua escurrida y captada en el barril recolector final (figura 12.1.). Se registra ese valor.
2. La persona procede a revolver el agua captada en el recolector final, hasta lograr que los sedimentos asentados en el fondo del barril se dispersan homogéneamente (figura 12.2).
3. Se procede a la toma de una muestra de 1 litro de líquido de escorrentía (figura 12.3). Las muestras se toman siempre en el centro del barril y a media altura.
4. Todas las muestras son etiquetadas y almacenadas por la persona responsable en cada finca.

Figura 12. Proceso de recolección de muestra para la medición de pérdida de suelo. Implementado por la Sra. Rosalba Martínez en una parcela con un SAF de café especial bajo sombra. Microcuenca Mezcal, comunidad El Quebracho, municipio de Santa Catarina Mita. Guatemala.



Etapa 2. Filtrado y secado de las muestras

El Programa recolecta las muestras una vez al mes y al final de la época de lluvias. En laboratorio, se procede a determinar la pérdida de suelo por muestra obtenida:

1. Se preparan filtros, poniéndoles previamente a secar durante 48 horas en un horno a 110 °C. Se pesan los filtros para determinar su peso vacío con exactitud.
2. Se cuelan las muestras en estos filtros.
3. Cada muestra se filtra dos veces como mínimo, o hasta lograr que el agua de muestra quede sin turbidez (figura 13.1).
4. Se pone a secar el filtro y el residuo del filtrado en un horno a 110°C durante 48 horas (figura 13.2).
5. Al peso obtenido, se le resta el peso del filtro vacío.

Figura 13. Filtrado y secado de muestras



Recuadro 15. Factor crítico del proceso de medición de la pérdida de suelo

El principal reto es asegurar que la escorrentía se recolecte en su totalidad, en el barril recolector. Las siguientes situaciones pueden perjudicar una recolección completa:

- Posible obstrucción de los poliductos, entre el recipiente de rebalse y el barril recolector,
- Salida de sedimentos de la parcela,
- Posible fuga de escorrentía en otro punto de la parcela debido a movimientos de las láminas o la misma presión de la escorrentía.

Por estos motivos, es imprescindible asegurar un mantenimiento continuo tanto de la parcela como de los equipos, el cual estuvo a cargo de las comunidades participantes en el proceso.

3.5. Infiltración de agua en el suelo

La infiltración es el **paso del agua que penetra desde la superficie hacia el interior del suelo**, a través de los espacios porosos del mismo.

En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie. Saturados los espacios vacíos, y en un suelo con buena infiltración, el agua se infiltra hasta las capas inferiores del suelo y posteriormente percola hasta formar parte del agua subterránea (del subsuelo), contribuyendo a la recarga hídrica. La infiltración del agua es una de las propiedades del suelo más importantes, en su función como regulador del ciclo hidrológico (Taboada, Lado, Vilar & Paz, 2014).

Recuadro 16. Consecuencias de una baja infiltración

- Aumenta el riesgo de erosión del suelo.
- El agua que no se infiltra ya no contribuye a la recarga de los acuíferos.
- Aumenta el riesgo de exceso de agua al cultivo, por saturación del suelo.
- Aumentan los riesgos de inundaciones y deslizamientos.

Por ello, para fines de ordenamiento territorial y gestión de cuencas y fincas, es importante conocer la capacidad de infiltración de un suelo (recuadro 17).



Recuadro 17. Capacidad de infiltración de un suelo

Es la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones. Se calcula por métodos directos o indirectos

Método directo:

Se mide la cantidad de agua infiltrada sobre una superficie de suelo.

- ▶ Aplicable a escala de parcela

Método indirecto:

Se estima el volumen de agua infiltrada con datos precisos de precipitación, evaporación y escorrentía.

- ▶ Aplicable a escala de cuenca o microcuenca homogénea

¿Qué factores inciden en la capacidad de infiltración de un suelo?

1. Textura, estructura y compactación del suelo
2. Profundidad del suelo
3. Humedad inicial del suelo
4. Salinidad del suelo y del agua
5. Técnica de labranza utilizada
6. Cobertura vegetal: enraizamiento

A más baja capacidad de infiltración del suelo, menor velocidad de infiltración (tasa de infiltración).

➔ El Programa Bosques y Agua/GIZ – Plan Trifinio midió la velocidad de infiltración de un suelo, por métodos directos, con una periodicidad anual. Las mediciones se realizaban durante los últimos meses de la época de lluvias.

Método aplicado por el Programa Bosques y Agua para evaluar la infiltración en el suelo

El Programa Bosques y Agua / GIZ-Plan Trifinio, aplicó el método de los cilindros infiltrómetros de doble anillo, por ser sencillo y directo, fácilmente transferible a los beneficiarios del Programa.

Figura 14. Medición de la infiltración del agua en una finca SAF de café bajo sombra.



Consiste en hacer uso de dos cilindros concéntricos: un cilindro interior, con un diámetro de 30 cm y un cilindro exterior, con un diámetro de 60 cm (figura 14).

Los anillos o cilindros se insertan en el suelo unos 5 cm, asegurándose que no haya fugas de agua hacia afuera del cilindro. En el anillo exterior, se mantiene una lámina de agua a nivel, es decir una carga constante sobre el suelo, mientras que en el anillo interior se puede monitorear la velocidad de infiltración, de una forma controlada. Con una regla graduada, se hacen mediciones de la altura de la lámina en el anillo interior a intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos.

3.6. Cantidad de agua

Los caudales son un indicador de la capacidad de recarga hídrica de una cuenca. El Programa Bosques y Agua realizó un monitoreo del caudal en los puntos de monitoreo hídrico de cada intercuenca seleccionada (ver párrafo 3.1.).

Se construyó la línea base durante un año de haberse establecidos los SAF (entre 2010 y 2011), con ayuda de la Universidad de El Salvador. Esta información sirvió para clasificar las fuentes de agua en dos categorías, ya mencionadas en el capítulo I:

- (a) Las de muy poca área de recarga bajo cobertura SAF, y que por tanto no pueden dar datos que documenten el efecto de los SAF sobre la recarga hídrica; y
- (b) Las fuentes con un área de recarga con más del 15% bajo cobertura SAF.

En las fuentes de segunda categoría, con el fin de poder aumentar la frecuencia de monitoreo, se construyeron pequeños vertederos o se aprovecharon puntos estratégicos donde se facilita medir los caudales (figuras 15 y 16). Se capacitaron a habitantes de las comunidades para realizar los aforos⁹, logrando aumentar la frecuencia de monitoreo y reducir el costo de la recopilación de los datos (figura 17). Los datos eran enviados automáticamente a celulares, en tiempo real (figura 18).

► Para construir la línea base, se midieron los caudales dos veces por mes durante un año. Luego, el Programa midió los caudales una vez en época seca y una vez en época lluviosa en las fuentes (a), y tres veces por semana en las fuentes (b) directamente impactadas por los SAF.

Figura 15. Aforo volumétrico de caudal con la ayuda de un balde en una fuente de agua de la microcuenca Marroquín.



Figura 17. Demostración y práctica sobre cómo realizar un aforo.



Figura 16. Aforo de la quebrada Marroquín en la microcuenca Marroquín con un molinete tipo pigmeo.



Figura 18. Radar de nivel marca Sutron modelo RLR-0003-1 y Datalogger con modem GPRS para enviar aforos en tiempo real a un celular.



⁹ Aforo: medición de caudal

3.7. Calidad del agua

La calidad del agua se determina según la concentración de variables fisicoquímicas y biológicas. Para interpretar los resultados de las mediciones que se realicen, se establecen previamente metas de calidad en el corto, mediano y largo plazo. Para evaluar el cumplimiento de los objetivos de calidad, se calcula la diferencia entre los valores medidos y los estándares de calidad previamente acordados. Se evaluaron:

- Cantidad de materia orgánica, determinada por el oxígeno disuelto;
- Concentración de iones de Hidrógeno (pH);
- Concentración de nutrientes: nitratos, fosfatos, amonio. Son indicadores del uso de agroquímicos, aunque su presencia también puede estar relacionada a otros factores;
- Sales disueltas, determinados por la dureza total y la conductividad eléctrica; y
- Materia bacteriológica presente, establecida por conteo de coliformes totales y fecales presentes en el cultivo de una muestra de agua.

Figura 19. Medición de parámetros físico-químicos por método colorimétrico con uso del kit visocolor, en la quebrada Marroquín.



El Programa Bosques y Agua aplicó parámetros físico-químicos que se determinaron in situ, utilizando un método colorimétrico de fácil manejo y bajo costo (figura 19). El método colorimétrico permite identificar la concentración de un compuesto en una muestra, en relación al color característico que resulta al mezclarla con una sustancia específica que forma parte del kit de medición.

Para la realización de los análisis microbiológicos, se recolectaba una muestra de 100 ml de agua en una bolsa de Tiosulfato, luego transportada en hielera hasta la oficina del Programa, en donde se realizaba el cultivo en cajas de Petri Compact Dry, y el posterior conteo visual de las colonias de coliformes totales y de *Escherichia coli*.

➡ El Programa Bosques y Agua midió in situ diez parámetros físico-químicos y biológicos, que permitían evaluar posibles mejoras en la calidad del agua. El monitoreo se realizó en los puntos de monitoreo hídrico. Una vez al año, se comparaba con análisis de laboratorio acreditado para verificar la confiabilidad de los datos.

Capítulo IV. Resultados obtenidos del monitoreo ambiental

4.1 Estacionalidad e irregularidad de la precipitación

La precipitación media aritmética de las seis microcuencas fue de 1,590 mm entre 2010 y 2014¹⁰. Se observaron irregularidades del régimen pluviométrico, con una desviación estándar de 436.4 mm y un coeficiente de variación del 28%. Esto se debe principalmente a las altas precipitaciones reportadas durante los años 2010 y 2013 y las bajas precipitaciones del año 2012 (tabla 6).

Tabla 6. Precipitación promedio anual de las microcuencas seleccionadas

Parámetros estadísticos	Mezcal	Carcaj	Marroquín	San Juan Buenavista	Jupula	Cusmapa
Precipitación anual 2010 [mm]	2052	1958	2028	1812	2146	1878
Precipitación anual 2011 [mm]	1264	1636	1818	1762	1987	1082
Precipitación anual 2012 [mm]	854	771	856	1023	1506	552
Precipitación anual 2013 [mm]	1598	1784	1722	1730	1781	2029
Precipitación anual 2014 [mm]	1799	1943	1823	1468	1934	1407
Precipitación promedio [mm]	1513	1618	1709	1559	1871	1267
Desviación estándar [mm]	468	492	488	328	242	601
Coeficiente de variación [%]	31	30	29	21	13	43
Número de eventos de precipitación	90	91	121	117	98	72

Fuente: Programa Bosques y Agua, 2016.

El análisis de los datos del sistema de monitoreo muestra los siguientes hallazgos, cuyas conclusiones se presentan en la figura 20.

- El promedio de días de lluvia fue de 113.
- El 94% de las precipitaciones ocurre entre mayo y octubre.
- Fenómenos climáticos como La Niña¹¹, la depresión tropical E12, y El Niño¹² pueden ocasionar excesos o déficit de precipitaciones hasta 33% superiores/inferiores al promedio de los últimos 10 años.
- El 50% de los días de lluvia produjeron el 87% de la cantidad anual de precipitaciones. Un 5% de días es responsable del 28% de la cantidad anual.
- En dos microcuencas, se presentaron eventos de precipitación significativos entre noviembre y febrero, que resultaron críticos en relación a la degradación de suelos ya que las parcelas de cultivos tradicionales no cuentan con cobertura vegetal en esa época.
- La influencia de la lluvia sobre el proceso erosivo se relaciona más con el número de eventos individuales con capacidad de causar erosión, que con la precipitación total recibida.

10 Se consideran años hidrológicos, que inician en mayo. Por tanto, la mención 2010 se refiere al año hidrológico 2010-2011.

11 Este fenómeno se explica en el Módulo I de la presente serie de materiales didácticos.

12 Ídem.

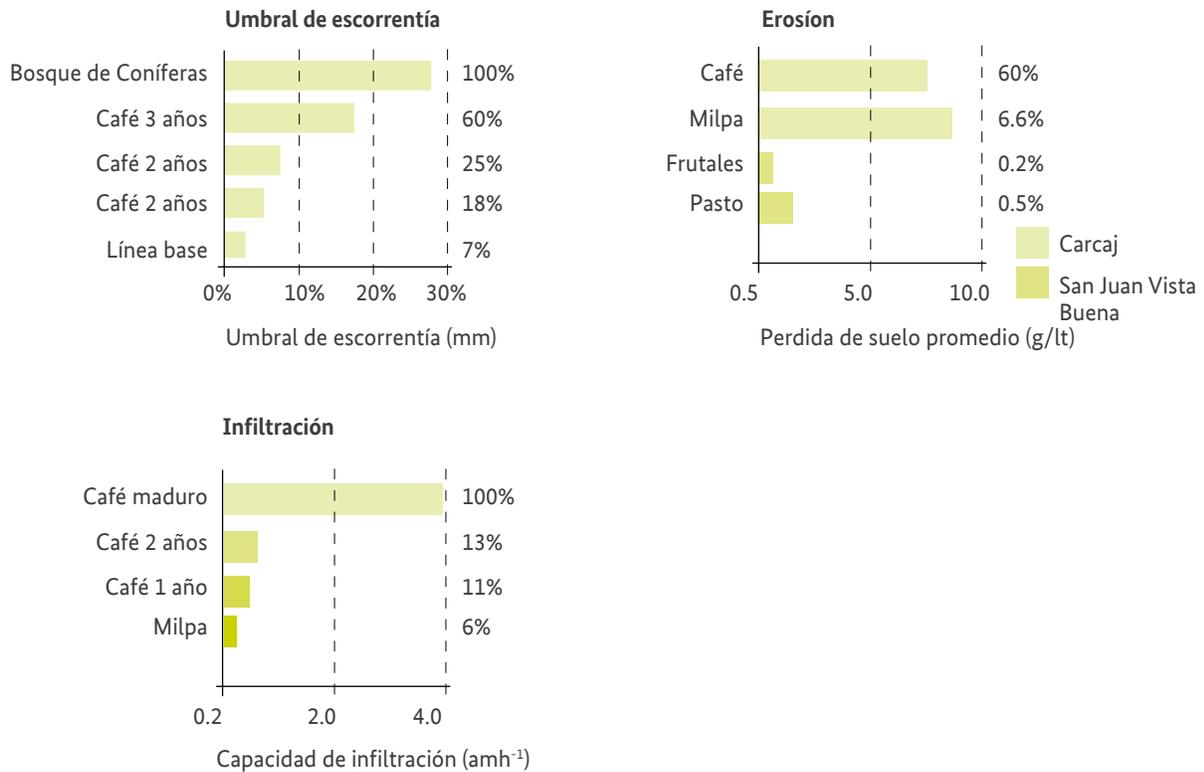
Figura 20. Características generales de las precipitaciones en la Región Trifinio



4.2. Mejora de las condiciones de los suelos

La figura 21 muestra los resultados arrojados por el sistema de monitoreo ambiental en cuanto escorrentía, erosión e infiltración. La figura 22 muestra un resumen el efecto positivo de los SAF sobre la conservación de los suelos.

Figura 21. Comparación de indicadores de conservación de suelo según el tipo de cobertura vegetal



Umbrales de escorrentía

- Los umbrales de escorrentía en los sistemas de café muestran una tendencia ascendente en la protección de suelo. Los sistemas más antiguos que se pudieron medir son cafetales de 3 años, los cuales muestran un umbral de escorrentía de 60%.
- Se observa que cada año manejado con el SAF, permite acercarse más al umbral de escorrentía de suelos bajo bosque de coníferas, que es de 100%.
- En SAF de frutales es donde se observaron los mayores aumentos en el umbral de escorrentía promedio, el cual se duplicó en comparación con el umbral observado con pasto natural.
- De los 113 días de lluvia anuales que se presentan en promedio en la región, ocurre escorrentía durante 50 días en áreas con cultivos tradicionales y durante 6 días en áreas con bosque.

Coefficiente de escorrentía

- Los suelos con sistemas agroforestales presentaron coeficientes de escorrentía más bajos que los suelos con granos básicos, demostrando que la cobertura vegetal proporcionada por plantas de café, los árboles de sombra y los frutales proveen protección al suelo.

Escorrentía

- Se estima que con el cambio de uso de suelo en 144 hectáreas, dejó de escurrir un total de 188,048 m³ de agua por año. Tomando en cuenta que en la Región Trifinio la media de uso de agua por persona es de 220.07 m³/año, ese volumen es suficiente para suplir las necesidades de 829 personas.

Erosión/ pérdida de suelo

- La erosión es mucho menor en los sistemas de frutales y pasto, en comparación de los sistemas de granos básicos y café de 3 años.
- A los cuatro años de establecimiento de los SAF de café bajo sombra, la pérdida de suelo se redujo en un 43.6%, en comparación con parcelas de granos básicos.
- Una disminución aún más fuerte de la erosión se observó en los sistemas agroforestales de frutales, que reemplazaron a los pastos naturales. Esta disminución se manifestó después de dos años, cuando los sistemas agroforestales alcanzaron un desarrollo suficiente para proteger adecuadamente los suelos.

Infiltración

- La capacidad de infiltración de un suelo con cultivo de café incrementa a medida que se desarrolla el cultivo, logrando a ser del 100% una vez completamente establecido. En comparación, los suelos con cultivos de milpa tienen una capacidad del 6%.
- En promedio, se estima que, en las parcelas con 10 años de cultivo tradicional de granos básicos, se ha reducido la capacidad de absorción de los suelos en 40 mm. Este dato confirma el mayor riesgo derivado de la agricultura tradicional.

Figura 22. Efectos de los SAF sobre la conservación de los suelos

Escorrentía	Erosión	Infiltración
La cantidad de agua que corre por el suelo y que provoca erosión fue menor en las parcelas con SAF, en comparación con las parcelas de granos básicos y de pastos degradados.	Los SAF contribuyen a disminuir la erosión de los suelos, al proporcionar una cubierta vegetal permanente que evita el impacto directo de la lluvia en el suelo.	Los SAF contribuyeron a una mayor infiltración de agua al suelo en comparación con los sistemas de producción de granos básicos y pastos naturales degradados.

4.3. Calidad y cantidad de agua

Cantidad de agua

- Con excepción de la microcuenca Mezcal en Guatemala, todas las microcuencas tenían una respuesta de dos hasta cuatro semanas a un evento de precipitación. Este es el tiempo regular que se tarda en aumentar un caudal desde que ocurre la precipitación.

Calidad del agua

- En todos los puntos de monitoreo, se observó una cantidad de coliformes fecales/totales y Escherichia coli, que supera el límite permisible en los tres países de la Región Trifinio. Esto se debe a una alta contaminación de los cauces con aguas negras y/o con heces humanas o de ganado.
- Fue notoria la contaminación química que existe en las microcuencas, lo cual se debe al sobre uso agrícola, así como a las malas prácticas en el manejo de agroquímicos.

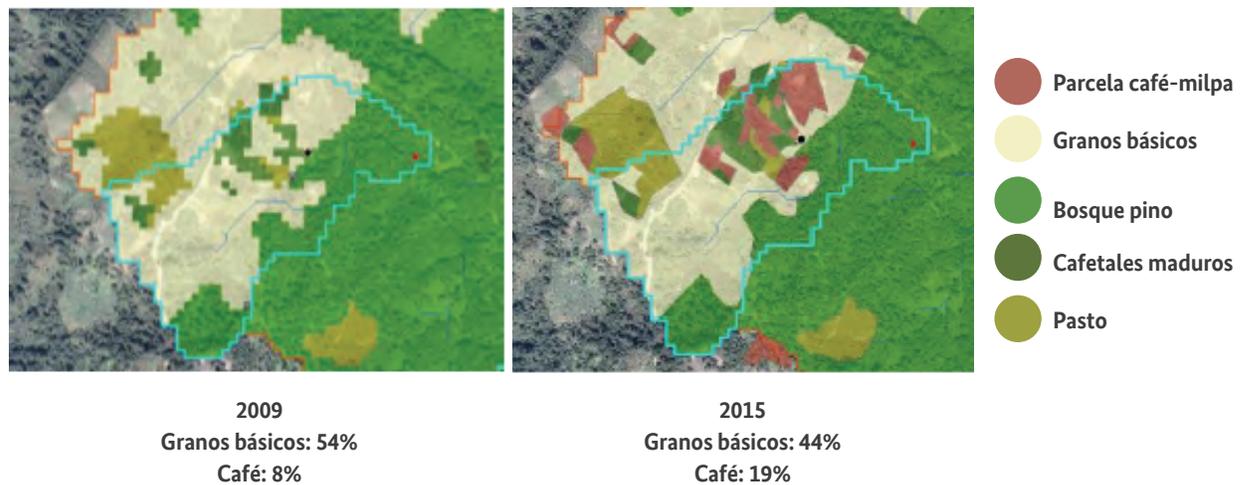
4.4. Cambio de uso del suelo

Los principales cambios del uso de suelo resultantes de la promoción del modelo agroforestal fueron:

- Reducción de la cobertura de granos básicos, de un 54 a un 44%;
- Aumento en la cobertura SAF – café bajo sombra, del 8 al 19%.

En la figura 23 se puede apreciar el cambio de uso de suelo en una intercuenca de la microcuenca Marroquín.

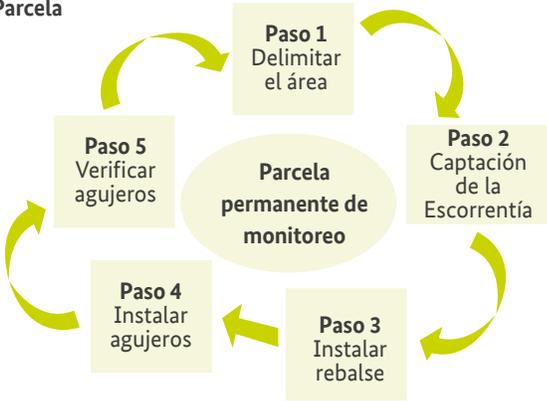
Figura 23. Cambios en el uso del suelo observados en la microcuenca Marroquín entre 2009 y 2015



Guía didáctica

La presente guía es un instrumento práctico para docentes que opten por usar los materiales de la presente serie en sus enseñanzas. Propone aplicar técnicas de aprendizajes como: preguntas de comprensión de lectura para el alumno, preguntas generadoras de discusión en plenaria o grupos, ejercicios teórico-práctico, investigación individual y colectiva, entre otros.

Tema I. Enfoque y fundamentos del monitoreo ambiental	
Preguntas de comprensión de lectura	Preguntas de reflexión y análisis
<ol style="list-style-type: none"> ¿Qué es monitoreo ambiental? ¿Qué es monitoreo del agua? ¿Qué es monitoreo del suelo? El monitoreo ambiental se caracteriza por ser: <ol style="list-style-type: none"> De difícil entendimiento para los productores Ser participativo incluyendo a varios actores Sencillo y fácil manejo y bajo costo Todas son verdaderas ¿El monitoreo del agua consiste en? <ol style="list-style-type: none"> Controlar las fuentes de agua potable para el saneamiento ambiental Documentar parámetros básicos de calidad y cantidad de agua Medir los caudales de los ríos y pozos La a y b son correctas Explique en pocas palabras el enfoque participativo del monitoreo ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el objetivo de un monitoreo ambiental? ¿Cuál es la contribución del monitoreo a la buena gestión de los recursos? ¿Por qué es importante el monitoreo ambiental en ámbito centroamericano y nacional?
Ejercicio 1	Realice una investigación bibliográfica sobre calidad del agua y presente un análisis sobre las causas de la contaminación de las principales fuentes de agua, haciendo una propuesta de monitoreo para la calidad del agua de una fuente de su interés.
Ejercicio 2	Revise la información metodológica aplicada en el monitoreo de suelos realizado por el Programa Bosques y Agua en la Región del Trifinio. Explicar en qué consistió el monitoreo de suelo, ¿cuáles fueron las variables estudiadas?, ¿con qué información se partió?
Ejercicio 3	Investigue en qué consiste y por qué es importante el modelo hidrológico denominado SWAT en la modelación cuencas hidrográficas.
Tema II. Caracterización de las microcuencas seleccionadas y de las parcelas de monitoreo	
Preguntas de comprensión de lectura	Preguntas de reflexión y análisis
<ol style="list-style-type: none"> ¿Cuál son los dos índices para clasificar las zonas climáticas según Thornwaite? ¿Cuáles son los parámetros climatológicos que se emplearon en el monitoreo ambiental de la Región Trifinio? 	<p>¿Cómo se clasificaron las parcelas o fincas de monitoreo? Justifique.</p>

<p>Ejercicio 4</p>	<p>La experiencia que se menciona en el texto es de las microcuencas seleccionadas y estudiadas por el Programa Bosques y Agua GIZ-Trifinio. Explique los pasos que se siguieron para la instalación y una reflexión sobre replicas en otras zonas con las mismas condiciones.</p> 
<p>Ejercicio 5</p>	<p>Explique cómo instalar una parcela permanente de monitoreo. Considere que se debe incluir a la población objetivo y capacitarla antes de instalar la parcela o durante su instalación. Puede guiarse por el esquema o la figura 3 del texto.</p> <p>Instalación de Parcela permanente</p> 
<p>Tema III. Variables y métodos de medición</p>	
<p>Preguntas de comprensión de lectura</p>	<p>Preguntas de reflexión y análisis</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Explique el método de medición participativa de la precipitación experiencia del Programa Bosques y Agua / GIZ-Plan Trifinio. 2. ¿Qué influencia tiene la precipitación sobre la erosión? 3. ¿Qué es escorrentía? 4. ¿A qué se le llama umbral de escorrentía? 5. ¿Qué es erosión de suelo? 6. Con base a lo aprendido explique los términos conceptuales sobre cantidad y calidad del agua. 7. ¿Cómo se realizó la práctica la medición los parámetros químicos, físicos y microbiológicos del agua en el monitoreo ambiental de la Región Trifinio? 	<p>¿Por qué es importante estudiar la erosión y escorrentía del suelo?</p> <p>¿Quiénes deben realizar el monitoreo ambiental? Explique.</p> <p>¿Cuáles son los principales retos de un sistema de monitoreo ambiental?</p>

Ejercicio 6	El Programa Bosques y Agua / GIZ - Plan Trifinio realizó un monitoreo del caudal de los principales cauces, en puntos de monitoreo de cada intercuenca seleccionada. Explique: ¿cómo se realizó la medición de caudales?, ¿para qué sirve esta medición?. ¿Cómo usted aplicaría este conocimiento en un sitio de su preferencia incluyendo la problemática del contexto?				
Ejercicio 7	<p>Con el conocimiento adquirido sobre escorrentía superficial y umbral de escorrentía, elabore un análisis de estos dos indicadores del suelo. Recuerde en su análisis ciertos factores, que son determinantes en la relación escorrentía y erosión ya que, por lo general, a altas tasas de escorrentía se generan altas tasas de erosión, o un aumento de la misma. Incluya los efectos de la escorrentía y la erosión en los sistemas agroforestales.</p> <p>Amplíe su conocimiento revisando información relacionada a los indicadores. El análisis no debe ser mayor de dos páginas.</p> <p>Factores de los que depende la escorrentía:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Intensidad y duración de la precipitación 2. Topografía del terreno (pendiente y relieve) 3. Tipo y estado del suelo (compactación, impermeabilidad, humedad inicial entre otros) 4. Tipo de cobertura vegetal <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <pre> graph LR A[Paso 1 Revisión de la información] --> B[Paso 2 Ordenar las ideas] B --> C[Paso 3 Elaborar el análisis] </pre> </div>				
Ejercicio 8	<p>Explique cuál fue el método de infiltración aplicado en el monitoreo ambiental, sus efectos en los sistemas agroforestales y elabore una recomendación para aplicarlo en otro sitio similar.</p> <p>Recuerde que existen métodos directos y métodos indirectos.</p>				
Tema IV. Resultados: efectos de los SAF sobre la mejora de los suelos y del agua					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%; padding: 5px;">Preguntas de comprensión de lectura</th> <th style="width: 40%; padding: 5px;">Preguntas de reflexión y análisis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;"> <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cuáles fueron los resultados del monitoreo de agua y monitoreo de suelo? 2. ¿Cuál fue el empoderamiento de los productores que participaron en el monitoreo ambiental? 3. ¿Cuáles fueron los cambios logrados en cuanto a la vegetación con la aplicación del modelo agroforestal? </td> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Por qué el monitoreo solo se hizo por 4 años? </td> </tr> </tbody> </table>		Preguntas de comprensión de lectura	Preguntas de reflexión y análisis	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cuáles fueron los resultados del monitoreo de agua y monitoreo de suelo? 2. ¿Cuál fue el empoderamiento de los productores que participaron en el monitoreo ambiental? 3. ¿Cuáles fueron los cambios logrados en cuanto a la vegetación con la aplicación del modelo agroforestal? 	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Por qué el monitoreo solo se hizo por 4 años?
Preguntas de comprensión de lectura	Preguntas de reflexión y análisis				
<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cuáles fueron los resultados del monitoreo de agua y monitoreo de suelo? 2. ¿Cuál fue el empoderamiento de los productores que participaron en el monitoreo ambiental? 3. ¿Cuáles fueron los cambios logrados en cuanto a la vegetación con la aplicación del modelo agroforestal? 	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Por qué el monitoreo solo se hizo por 4 años? 				
Ejercicio 9	Con base a los resultados presentados sobre suelo, agua y vegetación; explique si los cambios en el uso de la tierra en las microcuencas generaron beneficios a los agricultores, en los ámbitos ambientales, económicos y sociales.				

Bibliografía

- Almorox, J., Rafelli, S., & Bermúdez, F. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Murcia: Universidad de Murcia. 384 p.
- Eitzinger A, Läderach A, Sonder K, Schmidt A, Sain G, Beebe S, & Nowak A. 2013. Tortillas en el comal: los sistemas de maíz y frijol de América Central y el cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 6. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (CIAT). 6 p. Recuperado de: https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/41675/politica_sintesis6_tortillas_en_comal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. América Latina y el Caribe celebra el Año Internacional de los Suelos 2015. Publicado en : <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/270860/>
- Ibáñez, S., Moreno, H. & Gisbert, J. sf. Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo%20de%20concentraci%C3%B3n.pdf>
- INE (Instituto Nacional de Ecología de México). 2004. Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. 47 p. Recuperado de: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Lozano, J. & Martínez, J. 1991. Atlas para el desarrollo del proyecto T-6; Riego para la Región del Trifinio. Agencia Española de Cooperación Internacional. 46 p.
- Macías, C.A. 2011. Comportamiento hidrológico y erosivo en uso de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica. CATIE
- MINAMBIENTE (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia). sf. Modelación hidrológica. Publicado en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>
- Montiel K. & Ibrahim M. 2015. Manejo integrado de suelos para una agricultura resiliente al cambio climático. Sistematización del ciclo de foros virtuales | Año Internacional de los Suelos (AIS) 2015. 29 p. Recuperado de: <http://repiica.iica.int/docs/B3982E/B3982E.PDF>
- Polo R. sf. Red hidrológica de órdenes. Publicado por GEASIG en: <http://www.geasig.com/red-hidrologica-de-ordenes>
- Programa Bosques y Agua/GIZ - Plan Trifinio. 2011. Estado de la Región Trifinio 2010. Datos socioeconómicos y ambientales de los municipios. 84 p.
- Programa Bosques y Agua/GIZ - Plan Trifinio. 2016. Monitoreo ambiental en zonas de recarga hídrica en el Trifinio. Efectos de sistemas agroforestales sobre la hidrología de suelos. 94 p.
- Röder, J., Villavicencio, R. & Zarazúa, P. 2006. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo “USLE” en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida “Sierra de Quila”. Publicado en: https://www.researchgate.net/publication/272476834_Aplicacion_de_la_ecuacion_universal_de_perdida_de_suelo_USLE_en_SIG_para_estimar_riesgo_potencial_de_erosion_en_el_area_protegida_Sierra_de_Quila .
- Taboada, M., Lado, M., Vilar, A., & Paz, A. 2014. Evolución Temporal de la Infiltración Superficial a Escala de Parcela. Coruña: Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña. Tori. (1972).
- Torres, E. 2000. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión y de las características asociadas (infiltración, y escorrentía) de los suelos de ladera en el departamento del Cauca, mediante un mini simulador de lluvia [Trabajo de Grado]. Palmira: Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia; 2000. 123p.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. 47 p. Recuperado de: <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

Materiales didácticos sobre experiencias en el manejo sostenible de los recursos naturales en microcuencas seleccionadas de la Región Trifinio

El Programa Bosques y Agua/GIZ-Plan Trifinio es un esfuerzo conjunto entre la Comisión Trinacional del Plan Trifinio (CTPT) y la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Se ejecutó entre los años 2009 y 2018 en la Región Trifinio, donde convergen Honduras, Guatemala y El Salvador.

Como parte de los logros, se desarrollaron tres modelos de gestión sostenible de recursos naturales: Modelo agroforestal de cultivo café bajo sombra y de frutales con forestales, Modelo silvopastoril de ganadería amigable con el ambiente, y Modelo forestal con un enfoque de compensación por servicios ecosistémicos hídricos. Paralelamente se fortalecieron capacidades de actores e instituciones a nivel local y regional. El Programa aplicó un enfoque multinivel que combina asesoramiento técnico, político y de procesos, y una amplia participación de los diversos actores del territorio.

Con el propósito de contribuir a la gestión de conocimientos y a la sostenibilidad de los modelos, se elaboraron materiales didácticos que describen las experiencias en gobernanza y manejo sostenible de los recursos naturales. Los materiales se dividen en cinco módulos.

Módulo I. Bases conceptuales y el espacio geográfico. Describe los conceptos y ejemplos del Programa relacionados con: (i) Clima, cambio climático, vulnerabilidad y adaptación; (ii) Gobernanza territorial, ambiental y del agua; (iii) manejo integral de cuencas hidrográficas; (iv) Caracterización de la Región Trifinio (como parte del Corredor Seco Centroamericano), de la cooperación trinacional y del impacto esperado del Cambio climático en el área.

Módulo II. Estudio de caso Microcuenca Mezcal, Guatemala. Describe las bases técnicas y el sistema de extensión-promoción de los modelos agroforestal y silvopastoril. Expone los detalles de la implementación de cada modelo, sus resultados y lecciones aprendidas. En la microcuenca, el modelo agroforestal promovido fue el de café bajo sombra, con una intervención que aplicó el enfoque de cadena de valor. El módulo contiene también una introducción a la metodología de desarrollo de cadenas de valor “ValueLinks”, aplicada a nivel de microcuenca con una articulación con iniciativas regionales.

Módulo III. Estudio de caso Microcuenca Marroquín, Honduras. Resume los resultados y lecciones aprendidas de la implementación de los modelos agroforestal y silvopastoril. Detalla el modelo forestal – compensación por servicios ecosistémicos hídricos, poniendo énfasis en la base técnica del modelo, las características y funcionamiento de un Fondo Verde, y los procesos de articulación de actores y fortalecimiento de la institucionalidad. Concluye explicando cómo la intervención del Programa Bosques y Agua en la microcuenca contribuyó a una mejor gobernanza ambiental.

Módulo IV. Estudio de caso Microcuenca Jupula, Chalatenango. Describe la implementación del modelo agroforestal de aguacate y melocotón, con énfasis en ese último cultivo, resaltando resultados y lecciones aprendidas. En la microcuenca, la intervención del Programa permitió un desarrollo completo de la cadena de valor, llegando a apoyar la creación de una cooperativa de procesamiento de melocotón, con apoyo de aliados institucionales. El módulo profundiza en la metodología de desarrollo de la cadena, identificando las etapas a implementar y las relaciones entre los actores de la cadena. Finaliza con una descripción de los procesos sociales asociados a la intervención del Programa en todas las microcuencas: fortalecimiento organizacional, equidad de género y articulación de actores multinivel.

Módulo V. Monitoreo ambiental hídrico. Describe el sistema de monitoreo ambiental desarrollado por el Programa en zonas de recarga hídrica para conocer los efectos de los sistemas agroforestales sobre la hidrología de los suelos. Contiene una descripción morfométrica de las seis microcuencas en las que se implementaron sistemas agroforestales. Presenta las variables del monitoreo de agua y suelos y los métodos de recolección de datos, incluyendo el establecimiento de parcelas de monitoreo. Enfatiza el carácter participativo del sistema, con un involucramiento de los productores en su puesta en marcha. Concluye con una presentación de los efectos de los sistemas agroforestales sobre la reducción de la erosión de los suelos y el aumento de la infiltración del agua en comparación con los sistemas de cultivo tradicionales.

Cada módulo contiene un texto de lectura principal, en el que se presentan conceptos y definiciones clave, ilustraciones, ejemplos precisos de la intervención del Programa Bosques y Agua y bibliografía de referencia. Se complementa con una guía didáctica, que propone, por cada tema abordado, preguntas de comprensión de lectura, preguntas de análisis y reflexión y ejercicios, individuales o grupales, que pueden incluir trabajos de campo.

De esta manera, se espera apoyar la formación académica de los futuros profesionales del sector agropecuario y relacionados con el medio ambiente, capacitándoles para proponer soluciones de gestión integral de los recursos naturales en contextos similares a los estudiados.

Descriptor: gestión de recursos naturales, manejo de cuencas, suelos, agua, gobernanza ambiental, adaptación al cambio climático, sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, compensación por servicios ecosistémicos, cadena de valor, fortalecimiento organizacional, articulación de actores, monitoreo ambiental

