



DOCUMENTO METODOLÓGICO

Gestión sostenible y conservación del recurso hídrico

BWS0001

**Metodología para cuantificar las ganancias
netas de agua por aumento de la infiltración
en cuencas hidrográficas**

BIOCARBON CERT[©]

VERSIÓN PARA CONSULTA PÚBLICA | JUNE 27, 2025

© 2025 BIOCARBON CERT®. Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial sin autorización expresa de BIOCARBON CERT.

BIOCARBON CERT®. 2025. DOCUMENTO METODOLÓGICO. Gestión sostenible y conservación del recurso hídrico. BWS0001. Metodología para cuantificar las ganancias netas de agua por aumento de la infiltración en cuencas hidrográficas. Versión para Consulta Pública. 27 de junio de 2025. 66 p. <http://www.biocarbonstandard.com>

Créditos

Este documento fue elaborado con el soporte técnico de la Fundación Cataruben, cuya trayectoria en conservación de ecosistemas, manejo integral de cuencas hidrográficas y esquemas de servicios ecosistémicos fue clave para su desarrollo metodológico.

Tabla de contenido

1	Introducción	6
2	Objetivos	6
3	Términos y definiciones	7
4	Actividades elegibles	13
4.1	<i>Actividades de gestión sostenible del recurso hídrico</i>	14
4.1.1	Técnicas de mejoramiento de suelos	14
4.2	<i>Actividades de conservación del recurso hídrico</i>	15
4.2.1	Conservación y restauración de ecosistemas hídricos	15
	Restauración de humedales y cuencas degradadas	15
	Protección de fuentes de agua y ecosistemas hídricos	16
	Conservación de franjas de vegetación en cuerpos de agua	16
	Manejo del suelo para evitar la erosión y mejorar la infiltración	16
4.2.2	Conservación y restauración de coberturas vegetales	17
	Forestación y revegetalización	17
	Reforestación y herramientas de manejo del paisaje	17
	Rehabilitación de coberturas boscosas con áreas productivas	18
5	Condiciones de aplicabilidad	18
6	Balance hídrico de la cuenca hidrográfica	20
7	Levantamiento de línea base	21
7.1	<i>Información para el levantamiento de la línea base</i>	22
7.1.1	Catálogo de Estaciones meteorológicas	22
7.1.2	Modelo digital de elevación	24
7.1.3	Cartografía de suelos	24
7.1.4	Coberturas de la tierra	25
7.2	<i>Análisis de línea base</i>	26
7.2.1	Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica	27
	Procedimiento en QGIS	29
	Procedimiento en ArcGIS	30
7.2.2	Degradación de las coberturas naturales	31
7.2.3	Análisis del aumento de la curva número de escurrimiento	32
7.2.4	Análisis del estrés hídrico de la cuenca hidrográfica.	35
	Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico de la cuenca.	37

7.3	<i>Modelamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica</i>	41
7.3.1	Procedimiento General para el Modelamiento Hidrológico.	42
7.3.2	Modelos Distribuidos y Semi-distribuidos	42
	Modelos Distribuidos Basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	42
	Modelos Semi-distribuidos	43
7.4	<i>Levantamiento de línea base de infiltración</i>	44
8	Ganancias netas de agua por aumento de la infiltración	46
8.1	<i>Estratificación de las áreas en los límites del proyecto</i>	47
8.2	<i>Cálculo de las ganancias netas</i>	48
9	Cuantificación de créditos de agua por aumento de la infiltración	51
10	Monitoreo de las actividades del proyecto	52
10.1	<i>Método de monitoreo</i>	52
10.2	<i>Componentes del plan de monitoreo</i>	53
10.2.1	Monitoreo en campo	53
10.2.2	Monitoreo satelital.....	53
10.3	<i>Puntos de monitoreo</i>	54
10.4	<i>Tamaño de la muestra</i>	54
10.5	<i>Distribución de los puntos de monitoreo en las áreas de proyecto.</i>	56
10.6	<i>Frecuencia del monitoreo</i>	57
10.7	<i>Medición con infiltrómetros.</i>	57
10.8	<i>Verificación y control de calidad de los datos</i>	58
11	Supuestos y limitaciones de la metodología	58
12	Gestión documental del proyecto	59
12.1	<i>Manejo de las bases de datos del proyecto</i>	59
13	Verificación y aseguramiento de calidad	60
14	Referencias	60

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de calificación de curva número de escorrentía.	32
Tabla 2. Tipos de condiciones hidrológicas por tipos de coberturas de la tierra	34
Tabla 3. descripción de las variables de la ecuación de ganancias netas de agua	46
Tabla 4. Tipos de infiltrómetros para línea base y monitoreo de la infiltración.....	57

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Procedimiento en QGIS para el cálculo de los parámetros geomorfológicos.	29
Ilustración 2. Procedimiento en ArcGIS para el cálculo de los parámetros geomorfológicos	30
Ilustración 3. Procedimiento de Transformación de coberturas naturales.	31
Ilustración 4. Procedimiento para el cálculo de la curva número de escorrentía.	36
Ilustración 5. Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico.	37
Ilustración 6. Procedimiento para la generación de isoyetas e isothermas.....	39
Ilustración 7. Procedimiento de generación de ráster de evapotranspiración	40
Ilustración 8. Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico	41
Ilustración 9. Procedimiento para el modelamiento hidrológico.	42
Ilustración 10. Procedimiento para el levantamiento de la línea base de infiltración	45
Ilustración 11. Procedimiento para la generación de puntos aleatorios de monitoreo.	54

1 Introducción

La gestión integral del recurso hídrico es una condición esencial para la sostenibilidad de la vida en el planeta. Aunque el 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, solo el 2.5 % es dulce, y de esta, la mayor parte se encuentra congelada o almacenada en acuíferos subterráneos. Menos del 1 % del agua dulce se encuentra disponible en cuerpos superficiales como ríos, lagos y embalses, fuentes críticas tanto para el consumo humano como para los ecosistemas.

La disponibilidad de este recurso vital está sujeta a múltiples presiones. Entre ellas se destacan la deforestación, la erosión del suelo, la contaminación y el uso ineficiente del agua en actividades productivas. Estas presiones son especialmente graves en regiones áridas y semiáridas, y han generado un creciente estrés hídrico en muchas cuencas hidrográficas.

La protección, restauración y manejo sostenible de las cuencas es esencial para conservar la oferta y regulación del agua, garantizar el equilibrio ecológico, y promover la resiliencia climática y la seguridad hídrica de las comunidades. Estas acciones están en línea con los compromisos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento.

En este contexto, esta metodología establece los lineamientos técnicos para cuantificar las ganancias netas de agua por infiltración derivadas de actividades de conservación y gestión sostenible del recurso hídrico. La metodología permite certificar Créditos de Agua Verificados (CAV) bajo el Estándar de Agua BioCarbon, expresados en metros cúbicos por año ($m^3/año$) de infiltración adicional atribuible al proyecto. Estos créditos pueden ser utilizados como instrumentos financieros para canalizar inversiones hacia la restauración ecológica, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático en las cuencas hidrográficas.

2 Objetivos

Esta metodología tiene como objetivo proveer los lineamientos técnicos y los requisitos específicos para cuantificar las ganancias netas de agua por infiltración derivadas de actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico, en el marco del Estándar de Agua BioCarbon.

En particular, esta metodología establece:

- (a) los requisitos para la identificación del área de proyecto, la delimitación de la cuenca hidrográfica y la caracterización hidrológica inicial;
- (b) los criterios de elegibilidad de las actividades y las condiciones de aplicabilidad en función del estado del ecosistema y de los usos del suelo;
- (c) los procedimientos para establecer la línea base de infiltración y levantar la información requerida mediante datos satelitales, modelamiento y mediciones en campo;
- (d) la ecuación estándar para la estimación de las ganancias netas de agua, expresadas en metros cúbicos por año ($m^3/año$), asociadas a mejoras en la infiltración;
- (e) los parámetros y técnicas para la estratificación y monitoreo de las áreas de intervención;
- (f) los requisitos para calcular las unidades certificables como Créditos de Agua Verificados (CAV), según lo definido por el Estándar de Agua BioCarbon.

3 Términos y definiciones

Acolchado

Técnica agrícola que cubre el suelo con materiales orgánicos o inorgánicos para conservar humedad, evitar erosión y mejorar fertilidad (Elevitch & Wilkinson, s.f.).

Agua superficial

Agua disponible en la superficie terrestre, incluyendo ríos, lagos, quebradas, lagunas y embalses.

Almacenamiento hídrico

Acumulación de agua en reservorios naturales o artificiales, como embalses, acuíferos, lagos y humedales.

Área de Proyecto

Área geográfica definida dentro de la cuenca hidrográfica donde se implementan las actividades de conservación y gestión del recurso hídrico.

Biochar

Material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa que se aplica al suelo como enmienda para mejorar su capacidad de retención.

Capacidad de infiltración

Tasa máxima a la que el suelo puede absorber agua, normalmente expresada en mm/día.

Caudal

Cantidad de agua que fluye por una sección transversal de un cuerpo de agua en un tiempo determinado, expresada en m³/s.

Coberturas Naturales

Áreas del paisaje dominadas por ecosistemas nativos o seminaturales que conservan su estructura, composición y funciones ecológicas, y que no han sido significativamente transformadas por actividades humanas. Incluyen bosques naturales, humedales, matorrales, páramos y otras formaciones vegetales que mantienen procesos ecológicos esenciales como la regulación hídrica, la conservación del suelo y la provisión de hábitats (Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, s. f.)

Control de la erosión

Comprende el conjunto de prácticas y técnicas aplicadas para prevenir y mitigar la pérdida de suelo causada por agentes erosivos, como la acción del agua y el viento, protegiendo así la calidad del suelo y reduciendo la sedimentación en cuerpos de agua. (Wischmeier & Smith, 1978)

Control de Nutrientes

Implica la gestión y regulación de la cantidad y distribución de nutrientes (como nitrógeno y fósforo) en cuerpos de agua, con el objetivo de prevenir problemas asociados, como la eutrofización, que pueden deteriorar la calidad del agua y afectar los ecosistemas acuáticos. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017)

Control de sedimentos

Implica estrategias para prevenir la erosión del suelo y reducir la sedimentación en cuerpos de agua, manteniendo así la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, s.f.)

Créditos de Agua Verificados (CAV)

Unidades certificadas que representan la cantidad adicional de agua infiltrada en el suelo como resultado de las actividades del proyecto, expresadas en m³/año.

Cultivos de cobertura

Plantas sembradas para proteger y mejorar la calidad del suelo entre ciclos de cultivos principales. Estas plantas ayudan a prevenir la erosión, mejorar la estructura del suelo, aumentar la materia orgánica y controlar las malas hierbas. (FAO, 2013)

Deforestación para expansión agrícola

Implica la conversión de bosques y otras áreas naturales en tierras de cultivo o pastoreo. Esta práctica es una de las principales causas de la pérdida y degradación de habitats, afectando negativamente la biodiversidad y contribuyendo al cambio climático. (FAO, 2019)

Diseño de terrazas

Construcción de superficies planas o escalonadas en terrenos inclinados para reducir erosión y facilitar el cultivo.

Eliminación de setos y bordes de campo

Implica la remoción de vegetación que delimita parcelas agrícolas, lo que puede reducir la biodiversidad y afectar negativamente a las especies que dependen de estos hábitats. (UICN, 2014)

Escorrentía

Flujo superficial que se genera cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo (Dunne & Black, 1990).

Estratificación

Clasificación de las áreas del proyecto en unidades homogéneas (estratos) para facilitar el análisis, monitoreo y cuantificación de infiltración.

Evapotranspiración

Pérdida conjunta de agua por evaporación desde el suelo y transpiración de las plantas (Allen et al., 1998).

Ganancias netas

Volumen adicional de agua infiltrada ($m^3/año$) atribuible a las actividades implementadas, respecto a la línea base.

Gestión integral del recurso hídrico

implica el manejo coordinado y sostenible de todas las dimensiones del ciclo del agua, incluyendo aspectos físicos, ecológicos, sociales y económicos, para garantizar su disponibilidad y calidad a largo plazo, mediante la participación de diversos actores y el uso de enfoques interdisciplinarios. (Global Water Partnership, 2000)

Gobernanza del Agua

Se refiere al conjunto de procesos, estructuras y mecanismos mediante los cuales se toman decisiones y se implementan políticas relacionadas con el recurso hídrico, involucrando a diversos actores y partes interesadas para asegurar una gestión equitativa y sostenible. (Global Water Partnership, 2018)

Huella hídrica

Es un indicador que cuantifica el volumen total de agua dulce utilizado en la producción de bienes y servicios, abarcando tanto el consumo directo como el indirecto a lo largo de toda la cadena de suministro. (Hoekstra & Chapagain, 2008)

Hugelkultur

Técnica de jardinería con camas elevadas de madera muerta y material orgánico, que mejora retención de agua y fertilidad (Holzer, 2011).

Infiltración

Proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo desde la superficie, recargando acuíferos y humedeciendo el perfil edáfico (Environmental Protection Agency, 2000).

Línea base

Condición inicial del recurso hídrico y del suelo, usada como referencia para estimar los impactos del proyecto.

Materia orgánica del suelo

Fracción del suelo compuesta por residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición, fundamental para la estructura y retención de agua.

Modelamiento hidrológico

Proceso de simulación computacional del comportamiento del agua en una cuenca, incluyendo precipitación, escorrentía e infiltración.

Monocultivo extensivo

Se refiere a la práctica agrícola de cultivar una sola especie de planta en grandes extensiones de tierra durante períodos prolongados. Esta práctica puede conducir a la reducción de la biodiversidad y al agotamiento de nutrientes en el suelo, lo que puede afectar negativamente la sostenibilidad del ecosistema agrícola. (FAO, 2006)

Oferta hídrica

Cantidad total de agua disponible en una región, proveniente de fuentes superficiales y subterráneas (FAO, 2011).

Precipitación

Cualquier forma de agua (lluvia, nieve, granizo, llovizna) que cae desde la atmósfera a la superficie terrestre (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017).

Quema de residuos agrícolas

Práctica que consiste en incendiar los restos de cultivos después de la cosecha. Esta actividad puede liberar contaminantes al aire, contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero y afectar la calidad del suelo. (FAO, 2006)

Recurso hídrico

Agua disponible, incluyendo fuentes como ríos, lagos, acuíferos y precipitación, que se utiliza para diversas necesidades humanas y actividades ecológicas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

Regulación hídrica

Procesos naturales o artificiales que modulan el flujo y la distribución del agua dentro de un sistema hidrológico (The Nature Conservancy, s.f.).

Seguridad hídrica

Condición en la que se garantiza el acceso suficiente, sostenible y seguro al agua para satisfacer necesidades humanas, ambientales y productivas (The Nature Conservancy, s.f.).

Sobrexplotación de recursos hídricos

Uso intensivo y no sostenible del agua, especialmente en la agricultura, lo que conlleva la disminución de la disponibilidad de agua y afectar la biodiversidad.

Uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes químicos

Práctica común en sistemas de agricultura intensiva que implica la aplicación desproporcionada o no controlada de insumos agroquímicos. Este uso excesivo puede generar la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, alterar el equilibrio ecológico de los suelos, reducir la biodiversidad funcional, y representar riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas acuáticos (Proyecto LIFE MedWetRivers, s.f.).

Zanjas de infiltración

Canales construidos en laderas para captar escorrentía y aumentar la infiltración del agua en el suelo (Pizarro et al., 2004).

4 Actividades elegibles

Las actividades elegibles se dividen en las actividades de gestión sostenible y las actividades de conservación del recurso hídrico.

4.1 Actividades de gestión sostenible del recurso hídrico

Las actividades de gestión sostenibles están orientadas a las acciones que mejoren la eficiencia, el uso y el ahorro del recurso hídrico, en las actividades productivas donde se estén implementado acciones positivas para el mejoramiento de la oferta, la regulación del recurso hídrico.

4.1.1 Técnicas de mejoramiento de suelos

Las técnicas de mejoramiento de la infiltración y de la materia orgánica favorecen la infiltración del agua, evitan la degradación del suelo y reducen la escorrentía superficial. Esto incluye la implementación de prácticas agrícolas y de conservación del suelo, tales como:

- (a) diseño con curvas de nivel, que consiste en la disposición de cultivos y prácticas agrícolas siguiendo las líneas naturales del terreno, lo que permite reducir la velocidad del agua, evitar la erosión y facilitar la infiltración;
- (b) zanjas de infiltración, que son canales poco profundos diseñados para captar y retener el agua de lluvia, permitiendo su infiltración gradual en el suelo y contribuyendo a la recarga de acuíferos;
- (c) terrazas de cultivo, con superficies escalonadas en pendientes que disminuyen la erosión, mejoran la retención de agua y optimizan el uso del suelo en terrenos inclinados;
- (d) medialunas de infiltración, que corresponden a estructuras en forma de medialuna construidas en suelos áridos y semiáridos para capturar el agua de escorrentía y mejorar la humedad en la zona de raíces de los cultivos;
- (e) adición de materia orgánica, incorporando residuos vegetales, estiércol y compost al suelo mejora su estructura, aumenta la capacidad de retención de agua y fomenta la actividad microbológica, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes;
- (f) fertilización orgánica, mediante el uso de abonos naturales como compost, humus de lombriz y biofertilizantes para mejorar la fertilidad del suelo sin afectar su equilibrio ecológico;

- (g) El acondicionamiento del terreno para favorecer la infiltración incluyendo técnicas para mejorar la absorción de agua en el suelo, tales como: diseño con curvas de nivel, zanjas de infiltración, terrazas de cultivo, media luna de infiltración, adición de materia orgánica, fertilización orgánica, entre otras. Este proceso ayuda a reducir la escorrentía y a mejorar la recarga de acuíferos.

4.2 Actividades de conservación del recurso hídrico

Las actividades de conservación comprenden intervenciones orientadas a la protección, restauración y mantenimiento funcional de ecosistemas hídricos y coberturas vegetales estratégicas. Estas acciones buscan asegurar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, reducir la erosión del suelo, y conservar la biodiversidad asociada. Las actividades elegibles bajo esta categoría deben contribuir directamente a la regulación hidrológica y al restablecimiento de los servicios ecosistémicos clave en las áreas de proyecto.

A continuación, se describen las prácticas elegibles bajo esta metodología.

4.2.1 Conservación y restauración de ecosistemas hídricos

La conservación y restauración de los ecosistemas hídricos están directamente relacionados con la conservación del agua, la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad de las actividades agropecuarias. La combinación de restauración con prácticas agrícolas sostenibles y protección de los recursos garantiza la continuidad de los servicios ecosistémicos y la resiliencia de los paisajes y coberturas frente a los desafíos ambientales actuales.

Restauración de humedales y cuencas degradadas

Los humedales y cuencas hidrográficas cumplen un papel crucial en la regulación del ciclo del agua, la retención de sedimentos y la conservación de la biodiversidad. Las actividades de restauración pueden incluir:

- (a) eliminación de barreras artificiales que alteran los flujos de agua;
- (b) reforestación y revegetación con especies nativas para estabilizar el suelo y
- (c) mejorar la infiltración;

- (d) restablecimiento del régimen hidrológico en humedales, lo cual consiste en restaurar o rehabilitar un humedal;
- (e) implementación de humedales artificiales para mejorar la calidad del agua.

Protección de fuentes de agua y ecosistemas hídricos

La protección de nacimientos de agua, ríos y quebradas para garantizar su funcionalidad ecológica y evitar su contaminación. Para ello pueden llevarse a cabo las siguientes actividades:

- (a) evitar actividades agrícolas y ganaderas en zonas de protección hídrica;
- (b) implementar sistemas de monitoreo para controlar la calidad del agua;
- (c) promover actividades que garanticen el uso responsable del recurso hídrico.

Conservación de franjas de vegetación en cuerpos de agua

Las franjas de vegetación en los márgenes de ríos y quebradas desempeñan un papel clave en la filtración de contaminantes, la reducción de la erosión y la regulación térmica del agua. Las actividades para su conservación y establecimiento pueden contemplar:

- (a) protección y restauración de la vegetación natural en estas áreas;
- (b) cumplimiento de la normativa vigente sobre el ancho mínimo de las franjas de protección, basado en criterios hidrológicos y ecológicos;
- (c) implementación de cercas vivas y barreras vegetales en zonas agropecuarias cercanas a fuentes hídricas.

Manejo del suelo para evitar la erosión y mejorar la infiltración

El suelo puede ser protegido contra la erosión mediante prácticas que favorezcan su estabilidad y capacidad de retención hídrica. Esto incluye actividades tales como:

- (a) Revegetalización con especies nativas y cobertura vegetal natural;
- (b) Manejo de coberturas vegetales en áreas agrícolas para reducir la escorrentía superficial; (c) Establecimiento de barreras de árboles o sistemas

agroforestales, especialmente en zonas con déficit hídrico, para mejorar las condiciones micro climáticas y conservar la humedad del suelo.

4.2.2 Conservación y restauración de coberturas vegetales

Las actividades de conservación del recurso hídrico están estrechamente relacionadas con las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que mejoran elementos del paisaje y el hábitat, incrementando la conectividad funcional, o cumplen simultáneamente estas funciones en el ecosistema, mientras contribuyen a la conservación de la biodiversidad.

Forestación y revegetalización

La forestación consiste en la plantación de árboles en áreas donde no existían bosques previamente. La revegetalización es el proceso de restaurar o reintroducir vegetación en un área que ha sido degradada, alterada o destruida debido a factores naturales o actividades humanas, como la deforestación, la minería, la construcción o incendios. Su objetivo principal es recuperar el equilibrio ecológico, mejorar la calidad del suelo, prevenir la erosión y favorecer la biodiversidad. Estas actividades pueden incluir:

- (a) crear nuevos ecosistemas boscosos en terrenos degradados;
- (b) conversión de pasturas/pastizales a coberturas vegetales naturales;
- (c) siembra de semillas, plantación de árboles y arbustos nativos;
- (d) control de especies invasoras e implementación de técnicas para mejorar las condiciones del suelo y el agua.

Reforestación y herramientas de manejo del paisaje

La reforestación es el proceso de repoblación de áreas que han perdido su cobertura forestal debido a causas naturales (incendios, plagas, fenómenos climáticos) o actividades humanas (deforestación, urbanización, agricultura, ganadería). Las herramientas de manejo del paisaje (HMP) son elementos del paisaje que componen o mejoran el hábitat, incrementan la conectividad funcional o cumplen simultáneamente con estas funciones aportando a la conservación de la biodiversidad. Estas actividades pueden incluir:

- (a) plantaciones forestales con especies nativas, que recuperan la cobertura forestal y sus funciones ecológicas;
- (b) herramientas de manejo del paisaje (HMP) que mejoran la conectividad ecológica y los servicios ecosistémicos;
- (c) establecimiento de sistemas forestales (puros o combinados) para estabilizar suelos y reducir el impacto de fenómenos erosivos.

Rehabilitación de coberturas boscosas con áreas productivas

Son actividades para restaurar y recuperar la vegetación arbórea en zonas productivas, promoviendo la recuperación ecológica sin comprometer su uso para la agricultura, la ganadería o la silvicultura. En lugar de devolver estas áreas a su estado original, se implementan estrategias que integran la vegetación con las actividades productivas, optimizando tanto la conservación ambiental como el rendimiento económico. Estas actividades incluyen:

- (a) sistemas silvopastoriles, que optimizan la producción agropecuaria con la conservación del suelo y del recurso hídrico;
- (b) regeneración asistida, que fomenta la diversificación del paisaje y mejora la calidad del suelo y la retención de agua;
- (c) cultivos con modelos de producción sostenible, que mejoran la estructura y función del ecosistema en paisajes agrícolas;
- (d) sistemas agroforestales que integren árboles y cultivos para optimizar el uso del suelo.

5 Condiciones de aplicabilidad

Las condiciones de aplicabilidad para las áreas de proyecto y las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico se presentan a continuación. Estas condiciones complementan las disposiciones establecidas en el Estándar de Agua BioCarbon, y deben ser cumplidas de manera obligatoria por los proyectos que apliquen esta metodología.

- (a) Las áreas incluidas dentro de los límites geográficos del proyecto no deben clasificarse como bosque, conforme a la definición establecida en el Estándar de Agua BioCarbon;
- (b) Las actividades implementadas no deben provocar la transformación de ecosistemas naturales, ni directa ni indirectamente;
- (c) Las intervenciones deben llevarse a cabo únicamente en áreas que presenten evidencia verificable de transformación de coberturas naturales ocurrida al menos diez (10) años antes del inicio del proyecto;
- (d) Las especies utilizadas en las actividades de conservación o restauración no deben ser exóticas ni invasoras, y deben estar adaptadas a las condiciones ecológicas locales;
- (e) Las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico no deben generar degradación del suelo ni pérdida de materia orgánica, y deben promover su recuperación y funcionalidad;
- (f) Las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico deben priorizar la restauración, rehabilitación y recuperación de bosques de galería y otros ecosistemas estratégicamente conectados con la red hídrica de la cuenca;
- (g) Las actividades no deben comprometer la calidad del agua mediante el uso de fertilizantes, herbicidas, fungicidas u otras sustancias con efectos tóxicos para los ecosistemas acuáticos o terrestres;
- (h) Las prácticas de mejoramiento del suelo implementadas por el proyecto deben ser de carácter agroecológico, incluyendo, entre otras: zanjas de infiltración, acolchado, hugelkultur, cultivos de cobertura, aplicación de compost y Biochar, diseño de terrazas y sistemas tipo keyline;
- (i) Las actividades deben ejecutarse exclusivamente en unidades hidrográficas que presenten condiciones hidrológicas compatibles con la metodología, incluyendo:
 - i. alta escorrentía,

- ii. curva número (CN) igual o superior a 60, y
- iii. evidencia de estrés hídrico.

Adicionalmente, las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico deben ser ambientalmente responsables y no generar impactos adversos sobre la biodiversidad ni contaminar los recursos naturales dentro del área elegible. En este sentido, no son compatibles con esta metodología, las prácticas que comprometan la integridad ecológica o la calidad del recurso hídrico, incluyendo, pero sin limitarse a:

- (a) monocultivos extensivos;
- (b) uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes químicos;
- (c) deforestación para expansión agrícola;
- (d) sobreexplotación de fuentes hídricas;
- (e) quema de residuos agrícolas;
- (f) introducción de especies exóticas y/o invasoras;
- (g) caza de fauna silvestre.

El incumplimiento de esta disposición inhabilita el área y las actividades asociadas para la certificación bajo esta metodología.

6 Balance hídrico de la cuenca hidrográfica

Para identificar las variables hidrológicas que pueden ser afectadas positivamente por un proyecto orientado a la conservación y uso sostenible del recurso hídrico, es necesario cuantificar el balance hídrico en las áreas de proyecto. Este análisis permite estimar el volumen de agua infiltrada, expresado en metros cúbicos por año, que constituye la base para determinar las ganancias netas de agua atribuibles a la implementación del proyecto.

En este contexto, el balance hídrico cumple una función central en la evaluación del impacto positivo de las actividades implementadas en las áreas de proyecto. Las

intervenciones orientadas a la conservación y gestión sostenible del recurso hídrico inciden directamente sobre tres componentes clave del balance:

- (a) la reducción de la escorrentía superficial,
- (b) el incremento de la capacidad de infiltración del suelo, y
- (c) el aumento del almacenamiento neto de agua en el perfil edáfico y en los acuíferos.

Estas mejoras son fundamentales para sustentar técnicamente las ganancias netas de agua derivadas del proyecto.

El balance hídrico permite evaluar el comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica y constituye la base técnica para estimar las ganancias netas de agua por infiltración. La ecuación general del balance hídrico es la siguiente:

$$P = Q + ET + I \pm \Delta S$$

Donde:

<i>P</i>	Precipitación (mm)
<i>Q</i>	Escorrentía (mm)
<i>ET</i>	Evapotranspiración (mm)
<i>I</i>	Infiltración (mm)
ΔS	Cambio en el almacenamiento (mm)

Esta expresión representa la relación entre las entradas (precipitación) y las salidas o destinos del agua en la cuenca. En el contexto de esta metodología, se pone especial énfasis en el componente **I (infiltración)**, ya que constituye la base para cuantificar las **ganancias netas de agua** generadas por las actividades del proyecto

7 Levantamiento de línea base

La **línea base** corresponde al estado inicial de las áreas de proyecto y de la cuenca hidrográfica en la que se implementan las actividades de conservación y uso sostenible del recurso hídrico. Este escenario de referencia permite evaluar los

cambios atribuibles al proyecto y constituye el punto de partida para la cuantificación de las **ganancias netas de agua**.

7.1 Información para el levantamiento de la línea base

El levantamiento de la línea base para el modelamiento hidrológico requiere la recopilación de información cartográfica, meteorológica y edáfica que permita caracterizar el estado hidrológico de la cuenca al inicio del proyecto. A continuación, se presenta el listado de insumos necesarios para el análisis y modelamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica.

7.1.1 Catálogo de Estaciones meteorológicas

Debe gestionarse un catálogo de datos diarios de estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de influencia de la cuenca hidrográfica, incluyendo aquellas localizadas en cuencas aledañas cuya información sea relevante para el análisis. Estos datos son necesarios para la generación de isoyetas, la estimación de la precipitación media multianual y el análisis del comportamiento histórico de la precipitación en un periodo de al menos veinte (20) años previos al inicio del proyecto.

En caso de no contar con estaciones meteorológicas suficientes dentro de la cuenca, se podrán emplear datos satelitales de precipitación disponibles en plataformas como Google Earth Engine. Algunos de los conjuntos de datos más comúnmente utilizados incluyen:

(a) Datos de precipitación

GPM IMERG (Global Precipitation Measurement) (NASA, s.f.): Ofrece estimaciones globales de precipitación en diferentes versiones (Early, Late y Final Run). Es ideal para análisis recientes y proporciona alta resolución tanto espacial como temporal.

TRMM 3B42 (NASA, s.f.): Proporciona datos diarios de precipitación para áreas tropicales y subtropicales. Aunque la misión TRMM operó entre 1997 y 2015, su conjunto de datos es muy útil para estudios históricos en estas regiones.

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) (NASA, s.f.): Este producto combina datos satelitales con observaciones de estaciones meteorológicas, lo que mejora la precisión en áreas con escasa cobertura de estaciones.

PERSIANN-CDR (NASA, s.f.): Utiliza métodos basados en inteligencia artificial para estimar la precipitación diaria a escala global, ofreciendo un registro continuo y multianual.

Otras fuentes de información meteorológica nacionales como redes de estaciones meteorológicas y series de precipitación multianuales.

(b) Datos de temperatura

MODIS Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily (MOD11A1) (NASA, s.f.): Proporciona datos diarios de temperatura de la superficie terrestre a nivel global a partir del satélite Terra, con una resolución adecuada para estudios multianuales.

MODIS Aqua Land Surface Temperature and Emissivity Daily (MYD11A1) (NASA, s.f.): Similar al producto de Terra, este ofrece datos diarios de temperatura de la superficie terrestre a nivel global, pero a partir del satélite Aqua, lo que permite complementar análisis y validar resultados.

Otras fuentes de información meteorológica nacionales como redes de estaciones meteorológicas y series de precipitación multianuales.

(c) Datos de evapotranspiración

MODIS Global Evapotranspiration Product (MOD16A2) (NASA, s.f.): Ofrece estimaciones globales de evapotranspiración. Aunque este producto se presenta como un compuesto de 8 días, es uno de los principales disponibles en Google Earth Engine para análisis multianuales de evapotranspiración.

Otras fuentes de información meteorológica nacionales como redes de estaciones meteorológicas y series de precipitación multianuales.

7.1.2 Modelo digital de elevación

Para obtener información geomorfológica y de elevación de la cuenca hidrográfica, se debe usar un modelo digital de elevación (DEM) con una resolución espacial de entre 5 metros y 30 metros. modelo Digital de Elevación.

SRTM 30 Metros (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, s.f.) o Alternativamente, también se pueden utilizar otras fuentes.

ALOS PALSAR DEM, que ofrece resoluciones de 12.5 metros y 30 metros,

ASTER GDEM (NASA, s.f.): Aproximadamente 30 m de resolución global,

ALOS World 3D (AW3D30) (Japan Aerospace Exploration Agency, s.f.): Ofrece resoluciones de 12.5 y 30 m,

Copernicus DEM (Comisión Europea, s.f.): Versión gratuita a 30 m; versiones comerciales con resoluciones hasta 10 m,

TanDEM-X (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, s.f.): Proporciona resoluciones cercanas a los 12 m en algunas áreas.

En caso de no contar con una identificación precisa de las pendientes del terreno, se recomienda el uso de **datos de alta resolución obtenidos mediante tecnología LiDAR o levantamientos fotogramétricos con drones**. Estos insumos son especialmente útiles para aquellas actividades del proyecto que requieran **mayor sensibilidad, detalle topográfico y precisión en la caracterización de elevación**.

7.1.3 Cartografía de suelos

Debe obtenerse **información edafológica de la cuenca hidrográfica**, que incluya el tipo de suelos, su textura, capacidad de drenaje y demás propiedades relevantes. Esta información debe estar disponible en una escala **igual o superior a 1:100.000**, y será utilizada para caracterizar la respuesta hidrológica del suelo en las áreas de proyecto y sustentar el modelamiento hidrológico de la cuenca.

SoilGrids (ISRIC) (Hengl et al., 2017): Plataforma global que ofrece mapas de propiedades del suelo (textura, pH, carbono orgánico, etc.) a una resolución de 250 m, basados en modelado y aprendizaje automático;

European Soil Data Centre (ESDAC) (Comisión Europea, s.f.): Aunque enfocado en Europa, este centro ofrece datos y mapas rasterizados de características del suelo (incluyendo clasificación, textura y otros atributos) derivados de múltiples fuentes, con resoluciones que pueden adaptarse a escalas superiores a 1:100.000.

GlobalSoilMap (Batjes et al., 2016): Iniciativa que utiliza modelado geoespacial y datos remotos (incluyendo imágenes satelitales) para generar mapas de propiedades del suelo a alta resolución.

USDA NRCS SSURGO Soil Data (United States Department of Agriculture, s.f.): Esta base de datos ofrece información detallada sobre la tipología de suelos en Estados Unidos, incluyendo clasificación, textura, capacidad de drenaje y otros atributos.

OpenLandMap Soil Property Datasets (Hengl et al., 2018): Este conjunto global proporciona mapas rasterizados de diversas propiedades del suelo (por ejemplo, textura, contenido de materia orgánica, pH, fracciones de arena, arcilla y limo), que pueden usarse para analizar características físicas y químicas del suelo.

NASA SMAP (Soil Moisture Active Passive) (NASA & USDA, s.f.): Aunque su principal enfoque es la humedad del suelo, SMAP ofrece datos que pueden ser útiles para entender aspectos hidrológicos del suelo a nivel global y complementar estudios sobre la dinámica del agua en cuencas.

7.1.4 Coberturas de la tierra

El análisis del cambio y la transformación en las **coberturas de la tierra** debe realizarse a partir del levantamiento de información multitemporal, utilizando preferiblemente la metodología **CORINE Land Cover** a una escala **igual o superior a 1:25.000**. Alternativamente, pueden emplearse servicios satelitales confiables que proporcionen datos sobre transformación de coberturas, o fuentes

oficiales de información nacional con series históricas de coberturas de la tierra correspondientes a diferentes años.

CORINE Land Cover – Copernicus Land Monitoring Service (Comisión Europea. (s. f.)): Ofrece datos actualizados de coberturas de la tierra en Europa basados en la metodología CORINE, con resoluciones que se ajustan a los requerimientos para análisis detallados.

CORINE Land Cover – European Environment Agency (EEA) (Agencia Europea de Medio Ambiente. (s. f.)): La EEA pone a disposición varios productos CORINE Land Cover (por ejemplo, CLC 2018, CLC 2012) que permiten descargar datos raster para análisis de cambio en la cobertura terrestre a escalas detalladas.

EU Open Data Portal – CORINE Land Cover Datasets (Portal Europeo de Datos Abiertos. (s. f.)): En el portal de datos abiertos de la Unión Europea se pueden encontrar conjuntos de datos relacionados con CORINE Land Cover, disponibles para descarga en diversos formatos raster y vectores, lo que facilita el análisis de transformaciones en la cobertura terrestre.

7.2 Análisis de línea base

Con la información base recopilada, el análisis debe integrar los siguientes componentes para caracterizar el estado hidrológico de la cuenca hidrográfica:

- (a) la distribución y transformación de las coberturas de la tierra;
- (b) la degradación del número de curva de escorrentía (CN) en función del uso del suelo y tipo de suelo;
- (c) el comportamiento histórico de variables meteorológicas como precipitación, temperatura y evapotranspiración;
- (d) la identificación de zonas con tendencia al estrés hídrico;
- (e) el análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca; y

- (f) el modelamiento histórico de la escorrentía hasta la fecha de inicio del proyecto.

Este análisis constituye la base para establecer la línea base hidrológica de la cuenca y definir los escenarios de referencia para la cuantificación de las ganancias netas de agua.

7.2.1 Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica

El análisis hidrográfico y geomorfológico de la cuenca hidrográfica debe considerar tanto la configuración interna como la dinámica del agua, con el fin de comprender y modelar con mayor precisión el comportamiento hidrológico.

Además de los parámetros morfométricos básicos, deben incorporarse los siguientes elementos complementarios:

- (a) **Identificación de la red hídrica y su orden:** Determinar la red de drenaje y asignar el orden (por ejemplo, método de Strahler) permite identificar la jerarquía de los cursos de agua. Esto es esencial para establecer la conectividad entre ríos y afluentes, y para estimar el aporte de cada subcuenca al caudal total.
- (b) **Forma y Factor de Forma:** La forma de la cuenca (alargada, circular o irregular) influye en la velocidad y el volumen de la escorrentía. El factor de forma cuantifica esta característica y ayuda a predecir la respuesta de la cuenca ante eventos pluviales, permitiendo inferir el tiempo de concentración.
- (c) **Área, perímetro, largo y ancho:** El área determina la extensión de la superficie de captación, mientras que el perímetro, junto con la longitud y el ancho, se relaciona con la capacidad de almacenamiento y la exposición a procesos erosivos. Estos parámetros son fundamentales para el dimensionamiento de obras hidráulicas y para el balance hídrico.
- (d) **Cota mínima, cota máxima y altitud media:** Conocer la elevación mínima y máxima de la cuenca ayuda a determinar el gradiente altimétrico, el cual es clave para calcular la pendiente promedio. La altitud media, por su parte,

ofrece información sobre el régimen climático y la distribución de la precipitación.

- (e) **Pendiente de la cuenca e índice de pendiente:** La pendiente promedio influye directamente en la velocidad de desplazamiento del agua y en la energía erosiva del flujo. Un índice de pendiente permite evaluar de manera cuantitativa la capacidad de erosión y el potencial de sedimentación dentro de la cuenca.
- (f) **Longitud del cauce principal y de la red hídrica:** La extensión del cauce principal y la suma total de la longitud de la red de drenaje proporcionan información sobre la dispersión y convergencia del agua. Estos datos son esenciales para estimar tiempos de tránsito y para simular la respuesta hidrológica ante tormentas.
- (g) **Índice de Compacidad (Gravelius):** Este índice compara la forma de la cuenca con la de un círculo perfecto. Valores cercanos a 1 indican cuencas más compactas, lo que se asocia a tiempos de concentración menores y respuestas hidrológicas más rápidas, mientras que valores mayores sugieren una respuesta más difusa.
- (h) **Densidad de drenaje:** Se calcula como la relación entre la longitud total de la red de drenaje y el área de la cuenca. Una alta densidad indica una mayor capacidad para recolectar escorrentía, lo que puede significar un potencial elevado para inundaciones y una rápida respuesta ante eventos de lluvia.

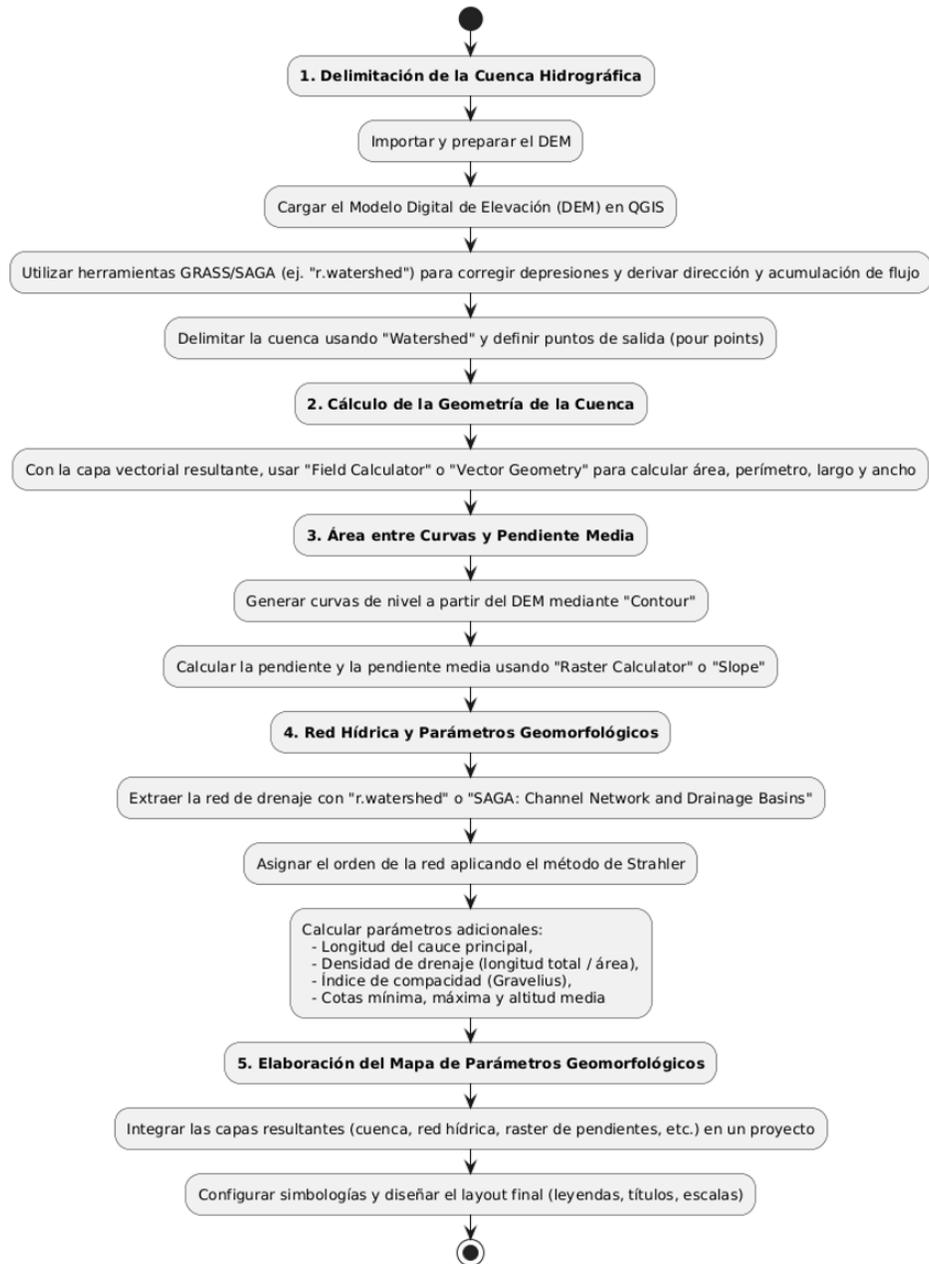
Cada uno de estos parámetros aporta no solo información cuantitativa, sino también elementos clave para establecer relaciones y correlaciones funcionales en el contexto del modelamiento hidrológico. La integración de estos datos permite:

- (a) calibrar modelos de simulación de caudales y tiempos de concentración;
- (b) identificar zonas críticas de erosión, sedimentación o acumulación de agua;
- (c) dimensionar adecuadamente obras de manejo hidráulico y de conservación del recurso hídrico;
- (d) y planificar estrategias de intervención basadas en la morfología y dinámica de la cuenca.

Los procedimientos para el cálculo de los parámetros geomorfológicos se presentan en las siguientes ilustraciones.

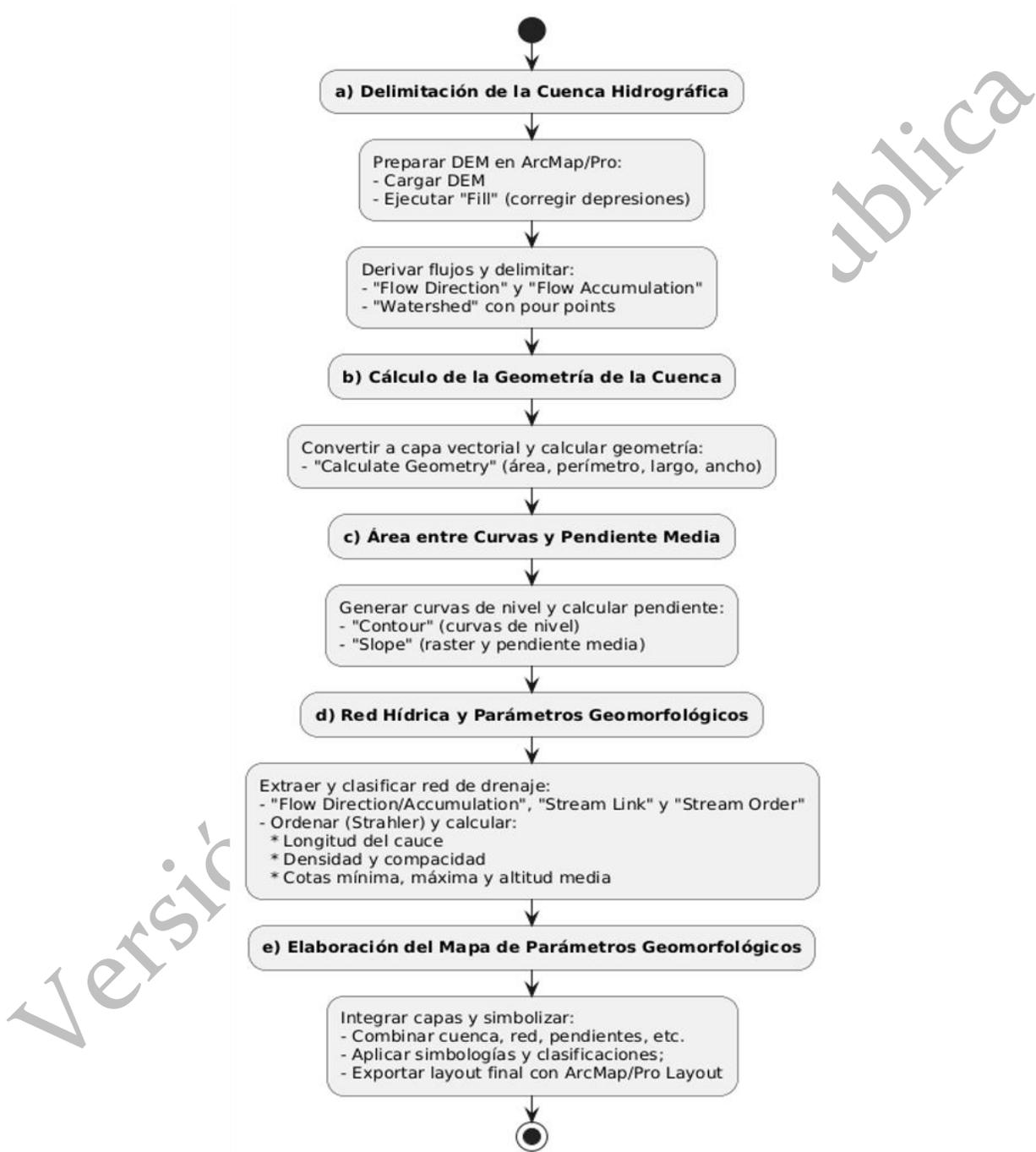
Procedimiento en QGIS

Ilustración 1. Procedimiento en QGIS para el cálculo de los parámetros geomorfológicos.



Procedimiento en ArcGIS

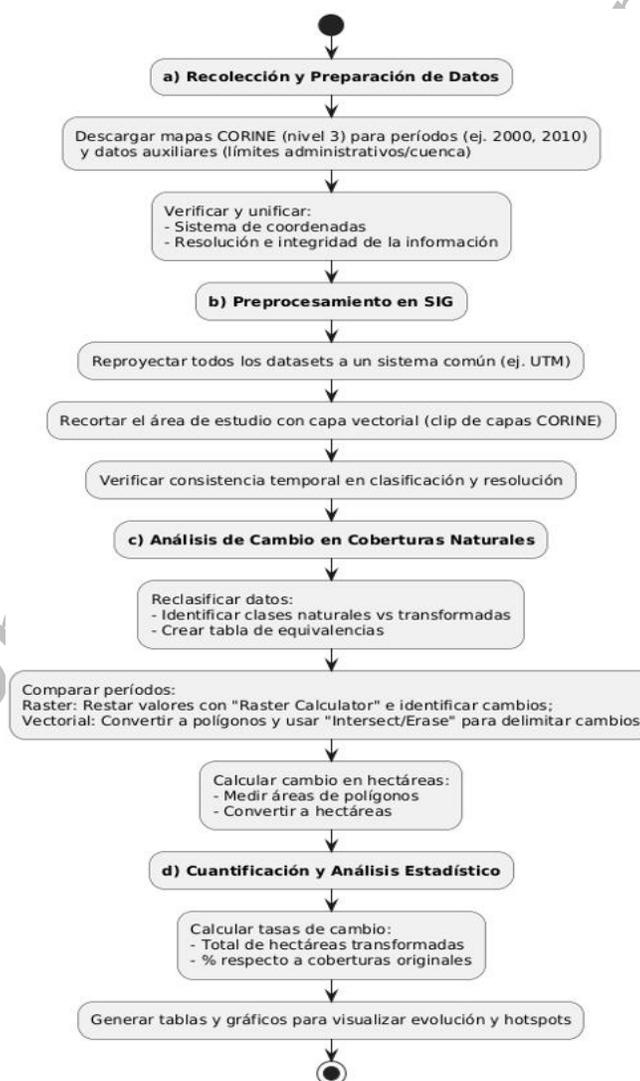
Ilustración 2. Procedimiento en ArcGIS para el cálculo de los parámetros geomorfológicos



7.2.2 Degradación de las coberturas naturales

La cuantificación de la degradación de las coberturas naturales debe realizarse mediante procesos de análisis espacial en sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de determinar las tasas de pérdida de cobertura en el área de proyecto. Este análisis debe abarcar un período mínimo de diez (10) años previos al inicio del proyecto y permite verificar que no hayan ocurrido procesos recientes de deforestación o transformación que comprometan la elegibilidad del área (Ver Ilustración 3).

Ilustración 3. Procedimiento de Transformación de coberturas naturales.



7.2.3 Análisis del aumento de la curva número de escorrentía

El análisis y la cuantificación del número de curva de escorrentía (CN) en la cuenca hidrográfica debe realizarse mediante procesos geoespaciales en sistemas de información geográfica (SIG). Este análisis incluye el corte espacial de la cuenca y la intersección de las capas de uso del suelo y tipo de suelo, lo que permite asignar un valor de CN a cada unidad espacial.

La asignación del número de curva debe realizarse utilizando las Tablas 1 y 2. La Tabla 1, clasifica los valores de CN en función de tres variables:

- (a) el tipo de uso del suelo,
- (b) el grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D), y
- (c) la condición hidrológica (buena, regular o mala).

Este procedimiento permite identificar zonas con mayor susceptibilidad a la escorrentía superficial y es fundamental para la caracterización de la línea base hidrológica.

Tabla 1. Tabla de calificación de curva número de escorrentía.

Coberturas de la tierra	Tratamiento y manejo	Numero de curva de escorrentía por tipo de suelo hidrológico				
		condición de drenaje	A	B	C	D
tipo de cobertura	tratamiento	condición de drenaje				
En barbecho	Suelo desnudo	- - -	77	86	91	94
	Cubierta de residuos de cultivos (CR)	Pobre	76	85	90	93
		buena	74	83	88	90
Cultivos en hileras	Fila recta (SR)	Pobre	72	81	88	91
		buena	67	78	85	89
	SR+ CR	Pobre	71	80	87	90
		buena	64	75	82	85
	Contorneado (C)	Pobre	70	79	84	88
		buena	65	75	82	86
	C+ CR	Pobre	69	78	83	87
		buena	64	74	81	85

Coberturas de la tierra	Tratamiento y manejo	Numero de curva de escorrentía por tipo de suelo hidrológico				
	Contorneado y aterrazado (C y T)	Pobre	66	74	80	82
		buena	62	71	78	81
	C & T+ CR	Pobre	65	73	79	81
		buena	61	70	77	80
Cultivos transitorios de grano pequeño	SR	Pobre	65	76	84	88
		buena	63	75	83	87
	SR+ CR	Pobre	64	75	83	86
		buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
		buena	61	73	81	84
	C+ CR	Pobre	62	73	81	84
		buena	60	72	80	83
	C Y T	Pobre	61	72	79	82
		buena	59	70	78	81
	C & T+ CR	Pobre	60	71	78	81
		buena	58	69	77	80
Siembra directa o radiodifusión	SR	Pobre	66	77	85	89
		buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
		buena	55	69	78	83
	C Y T	Pobre	63	73	80	83
		buena	51	67	76	80
Pastos, praderas o pastizales/ forraje continuo para pastoreo	NA	pobre	68	79	86	89
		regular	49	69	79	84
		buena	39	61	74	80
Pasto continuo de pradera /protegidas del pastoreo y generalmente para heno	NA	buena	30	58	71	78
arbustos/ bosque /hierba	NA	pobre	48	67	77	83
		regular	35	56	70	77
		buena	30	48	65	73
combinación bosque - hierba (huerto o explotación forestal)	NA	pobre	57	73	82	86
		regular	43	65	76	82
		buena	32	58	72	79

<i>Coberturas de la tierra</i>	<i>Tratamiento y manejo</i>	<i>Numero de curva de escorrentía por tipo de suelo hidrológico</i>				
bosques	NA	pobre	45	66	77	83
		regular	36	60	73	79
		buena	30	55	70	77
granja: edificios, caminos, entradas de vehículos y terrenos rurales	NA	NA	59	74	82	86
carreteras	NA	NA	72	82	87	89
grava	NA	NA	76	85	89	91

Fuente: USDA (United States Department of Agriculture, s.f.)

Para realizar el procedimiento descrito, deben utilizarse de manera conjunta la Tabla 1 y la Tabla 2, con el fin de calcular correctamente el número de curva de escorrentía (CN) para las distintas coberturas de la tierra presentes en la cuenca.

La Tabla 1 presenta los valores de CN según el tipo de uso del suelo, el grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D), y el tipo de tratamiento aplicado.

La Tabla 2 complementa esta información, describiendo los criterios que definen la condición hidrológica (buena, regular o mala) para diferentes tipos de cobertura: cultivos, pasturas, arbustales y bosques.

El uso combinado de ambas tablas permite asignar valores de CN representativos a cada unidad espacial en el análisis SIG, lo que es fundamental para el modelamiento de la escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica.

Tabla 2. Tipos de condiciones hidrológicas por tipos de coberturas de la tierra

Condición hidrológica	
<i>Condición hidrológica para los tipos de coberturas de la tierra</i>	El estado hidrológico se basa en combinaciones de factores que afectan a la infiltración y la escorrentía, entre los que se incluyen (a) la densidad y el dosel de las zonas vegetales, (b) la cantidad de cubierta vegetal durante todo el año, (c) la cantidad de hierba o leguminosas sembradas cerca, (d) el porcentaje de cubierta de residuos en la superficie de la tierra, y (e) grado de tenacidad superficial.
<i>Barbecho/cultivos en hileras/cultivos</i>	Pobre: Los factores perjudican la infiltración y tienden a aumentar la escorrentía.

Condición hidrológica	
<i>transitorios/ siembra directa</i>	Bueno: Los factores favorecen la infiltración media y superior a la media y tienden a disminuir la escorrentía.
<i>pastos, pradera o pastizales, (forraje continuo para pastoreo) / Pasto continuo de pradera (protegidas del pastoreo y generalmente para heno)</i>	Pobre: < 50% de cubierta vegetal o muy pastoreada sin mantillo.
	Regular: 50 a 75% de cobertura del suelo y poco pastoreo.
	Bueno: > 75% de cobertura del suelo y pastoreo ligero u ocasional.
<i>arbustos- bosque - hierba</i>	Pobre: < 50% de cobertura del suelo.
	Regular: 50 a 75% de cobertura del suelo.
	Bueno: > 75% de cobertura del suelo.
<i>combinación bosque - hierba (huerto o explotación forestal) / Bosques</i>	Pobre: La hojarasca forestal, los árboles pequeños y la maleza son destruidos por el pastoreo intenso o las quemadas regulares.
	Regular: Los bosques están rozados, pero no quemados, y algo de hojarasca forestal cubre el suelo.
	Bien: Los bosques están protegidos del pastoreo, y la hojarasca y la maleza cubren adecuadamente el suelo.

Fuente: USDA (United States Department of Agriculture, s.f.)

Finalmente, debe generarse un mapa de distribución del número de curva de escorrentía (CN) para las distintas coberturas de la tierra presentes en la cuenca hidrográfica. Este mapa permite visualizar la variabilidad espacial de los valores de CN (en un rango de 0 a 100) y priorizar las áreas con mayor susceptibilidad a la escorrentía superficial. Estas áreas presentan un alto potencial para la implementación de actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico, orientadas a incrementar la infiltración y reducir la pérdida de agua por escurrimiento (Ver Ilustración 4).

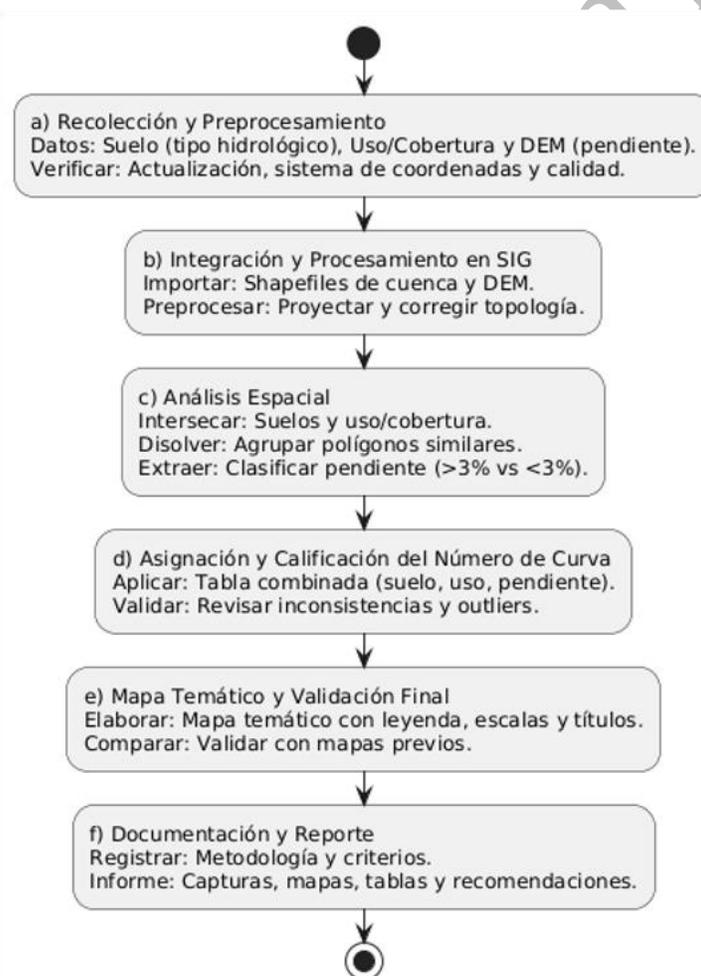
7.2.4 Análisis del estrés hídrico de la cuenca hidrográfica.

El análisis del estrés hídrico en la cuenca hidrográfica debe realizarse a partir de la comparación entre la precipitación total anual y la evapotranspiración correspondiente al año inmediatamente anterior al inicio del proyecto. Este análisis requiere el uso de herramientas geoespaciales que permitan la superposición de capas ráster interpoladas con datos distribuidos de precipitación y evapotranspiración en toda la cuenca. El resultado permite identificar zonas donde

el déficit hídrico es crítico y, por tanto, prioritarias para la implementación de actividades orientadas a mejorar la regulación hídrica.

Este análisis permite determinar si la cuenca hidrográfica presenta condiciones de escasez o estrés hídrico debido a una insuficiente disponibilidad de precipitación en determinadas zonas. Estas áreas, caracterizadas por regímenes áridos o de baja precipitación y bajo almacenamiento hídrico, presentan un alto potencial de impacto positivo a través de la implementación de actividades de gestión sostenible y conservación, orientadas a mejorar la regulación y disponibilidad del recurso hídrico.

Ilustración 4. Procedimiento para el cálculo de la curva número de escorrentía.



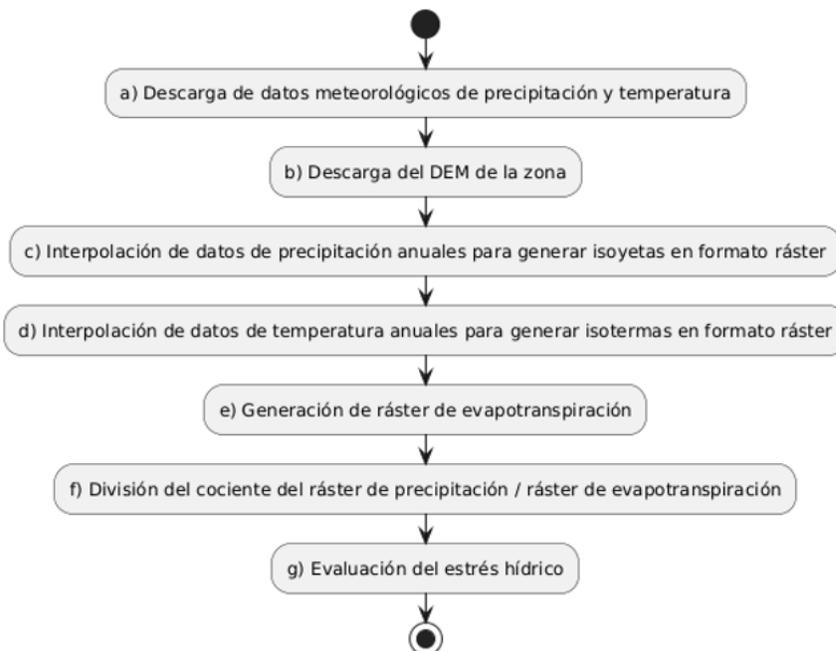
A continuación, se describen la información a levantar y el procedimiento a seguir para la evaluación del estrés hídrico en la cuenca hidrográfica.

Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico de la cuenca.

Para identificar las zonas de la cuenca hidrográfica donde la precipitación no genera excedentes y es completamente devuelta a la atmósfera a través de la evapotranspiración, debe realizarse un análisis espacial de estrés hídrico. Este análisis permite localizar áreas donde el abastecimiento hídrico es insuficiente y que, por tanto, resultan prioritarias para la restauración de coberturas vegetales que favorezcan la retención de humedad en el suelo y el aumento de biomasa.

El análisis de estrés hídrico debe realizarse mediante un procedimiento geoespacial aplicado en sistemas de información geográfica (SIG), conforme al flujo metodológico ilustrado en la *Ilustración 5*. Este procedimiento permite identificar y clasificar las zonas de la cuenca con base en el balance entre precipitación y evapotranspiración.

Ilustración 5. Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico.



1) Descarga de datos meteorológicos de precipitación, temperatura y DEM.

El primer paso del procedimiento consiste en descargar y procesar los datos de precipitación y temperatura correspondientes al año inmediatamente anterior al inicio del proyecto. Es fundamental asegurar la continuidad temporal de los datos, evitando vacíos que puedan afectar el análisis. Para ello, deben utilizarse múltiples puntos de medición, ubicados tanto dentro de la cuenca hidrográfica como en zonas aledañas. La información puede provenir de estaciones meteorológicas disponibles o, en su defecto, de fuentes satelitales confiables, con selección de puntos aleatorios distribuidos espacialmente para garantizar una cobertura representativa del territorio.

Posteriormente, debe descargarse el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca hidrográfica, el cual será utilizado para calcular las pendientes del terreno y apoyar los análisis espaciales del estrés hídrico. Además, se debe contar con el polígono delimitador de la cuenca, debidamente georreferenciado, que defina con precisión el área de análisis para la ejecución del procedimiento en SIG.

2) Interpolación de Isoyetas e Isotermas

Para la generación de isoyetas e isothermas en la cuenca hidrográfica se debe seguir el siguiente procedimiento (ver ilustración 6).

3) Generación del ráster de evapotranspiración

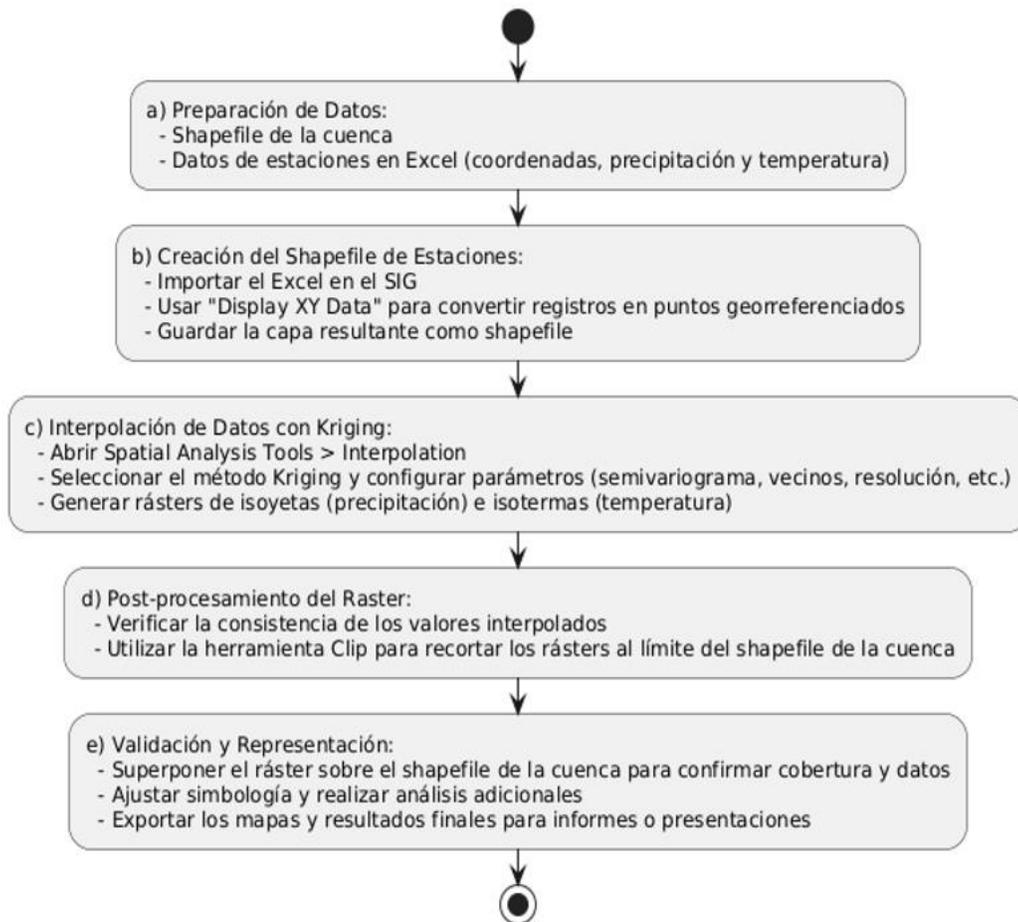
Para estimar la evapotranspiración potencial anual en la cuenca hidrográfica, debe generarse un ráster de evapotranspiración utilizando el método empírico de Holdrich (Holdrich, 1995). Este procedimiento requiere:

- (a) disponer de un ráster de isothermas (temperatura media anual en °C), y
- (b) aplicar la siguiente expresión mediante una calculadora ráster en el entorno SIG

$$\text{Evapotranspiración} = \text{temperatura en } ^\circ\text{C} * 58.93$$

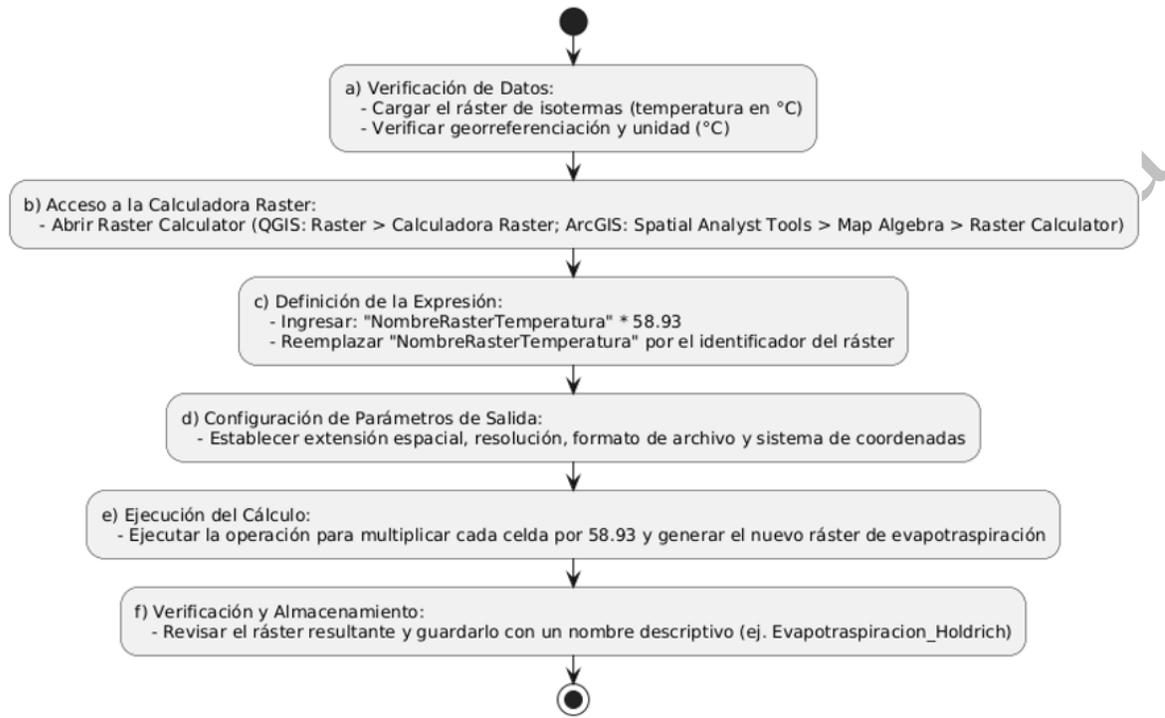
Este cálculo genera una capa espacial que representa la distribución de la evapotranspiración en toda la cuenca y es insumo fundamental para el análisis del balance hídrico y el estrés hídrico.

Ilustración 6. Procedimiento para la generación de isoyetas e isotermas.



A continuación, se presenta el procedimiento para generar el ráster de evapotranspiración anual correspondiente al año anterior al inicio del proyecto, utilizando datos de temperatura y el método de Holdrich descrito previamente (ver Ilustración 7). Este ráster permitirá representar espacialmente la demanda hídrica atmosférica en la cuenca hidrográfica y constituye un insumo esencial para el análisis del estrés hídrico.

Ilustración 7. Procedimiento de generación de ráster de evapotranspiración



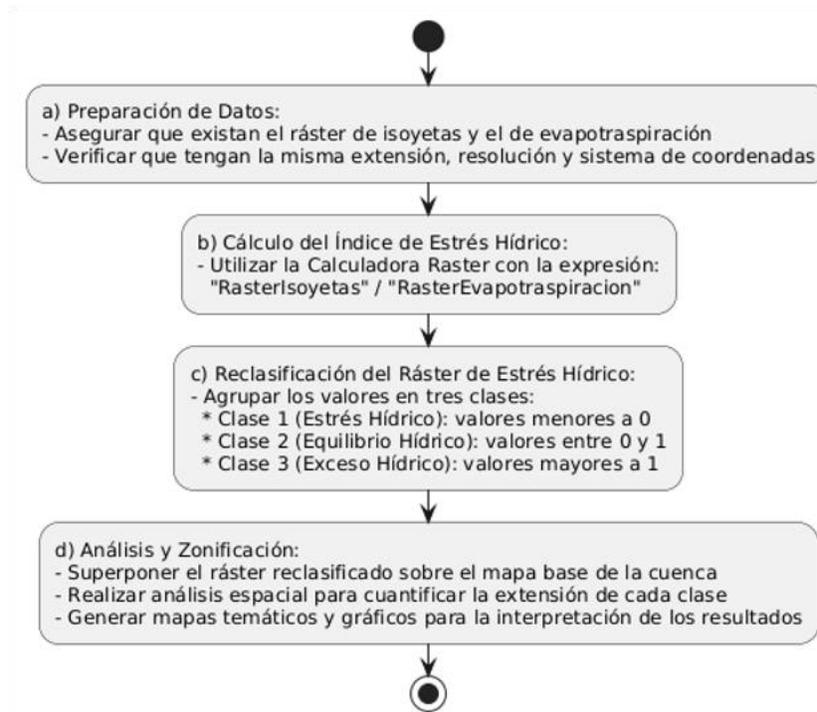
4) Evaluación del estrés hídrico de la cuenca hidrográfica

La evaluación del estrés hídrico proporciona información clave sobre el grado de desabastecimiento hídrico en diferentes zonas de la cuenca. Identifica áreas donde la totalidad del agua precipitada se evapora, generando condiciones de aridez o desertificación; zonas en las que se alcanza un equilibrio hídrico, donde la precipitación es comparable a la evapotranspiración y permite cierto nivel de infiltración; y zonas con exceso hídrico, donde la precipitación supera la demanda evaporativa.

Esta clasificación espacial es esencial para la toma de decisiones en la selección de áreas de proyecto, priorizando aquellas con mayor potencial de mejora mediante actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico.

La evaluación del estrés hídrico se realiza mediante el procedimiento descrito en la Ilustración 8, a continuación.

Ilustración 8. Procedimiento para la evaluación del estrés hídrico



7.3 Modelamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica

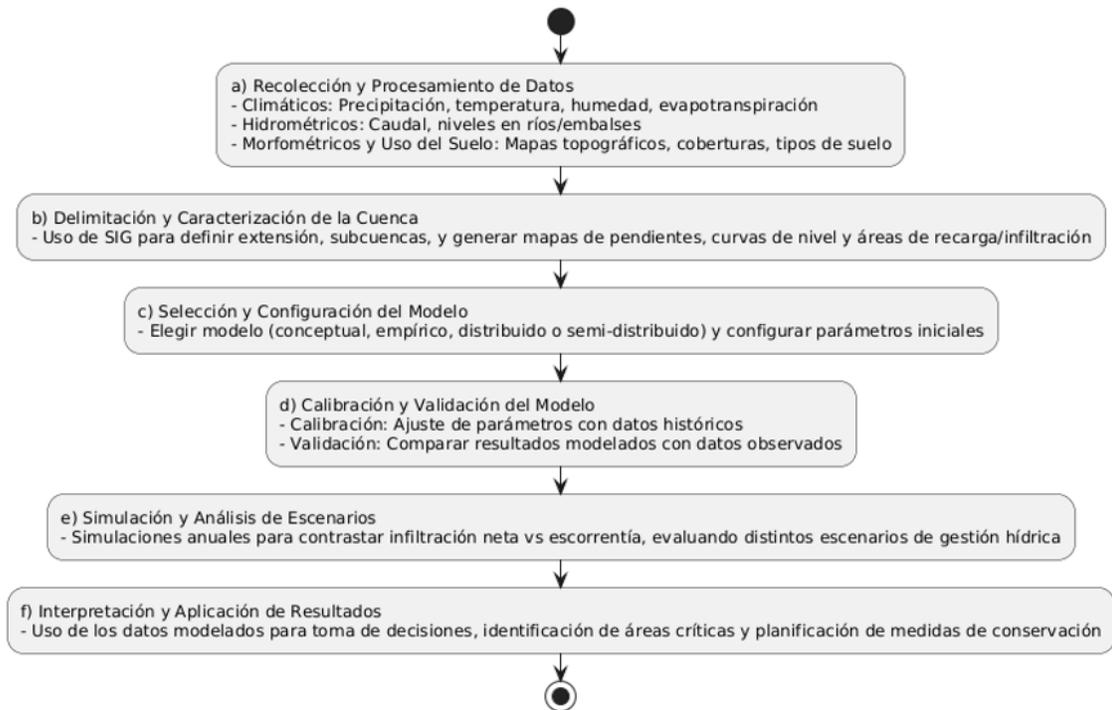
El modelamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica debe realizarse mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), integrando tanto la información de línea base como los datos hidrométricos disponibles para la calibración del modelo. Los insumos deben incluir registros históricos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y los parámetros morfométricos de la cuenca, con el fin de alimentar de forma precisa los datos de entrada y simular de manera realista la dinámica hidrológica del sistema.

El objetivo del modelamiento hidrológico es estimar los aportes de caudal generados por la cuenca hidrográfica durante el año anterior al inicio del proyecto y realizar una simulación anual que permita comparar los resultados de escorrentía superficial con las ganancias netas de agua por infiltración. Este enfoque integrado permite analizar la interacción entre los procesos hidrológicos clave, mejorar la comprensión de la dinámica entre infiltración y escorrentía, y sustentar de manera robusta la toma de decisiones en la gestión sostenible del recurso hídrico.

7.3.1 Procedimiento General para el Modelamiento Hidrológico.

Los pasos a seguir para el modelamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica se muestran en la Ilustración 9.

Ilustración 9. Procedimiento para el modelamiento hidrológico.



7.3.2 Modelos Distribuidos y Semi-distribuidos

Modelos Distribuidos Basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los modelos hidrológicos distribuidos permiten integrar y analizar datos espaciales (como topografía, uso del suelo, cobertura vegetal y parámetros morfométricos) para subdividir la cuenca hidrográfica en unidades menores (como subcuencas o píxeles) y simular los procesos hidrológicos de forma espacialmente explícita.

Esta aproximación mejora la representación de la heterogeneidad física del territorio y permite un análisis más preciso del comportamiento hidrológico en diferentes zonas de la cuenca.

Los siguientes sistemas y herramientas SIG son comúnmente utilizados para la implementación de modelos hidrológicos distribuidos en el contexto del análisis de cuencas

- (a) ArcGIS Pro (ESRI) (Environmental Systems Research Institute, s.f.)
 - Herramientas: Spatial Analyst, Hydrology Toolbox, Interpolation Tools.
 - Soporta modelos hidrológicos como SWAT (Soil and Water Assessment Tool).
- (b) QGIS (Open Source) (QGIS Development Team, s.f.)
 - Complementos: SAGA GIS, GRASS GIS, Processing Toolbox.
 - Plugins útiles: QSWAT, Interpolation y Raster Calculator.

Modelos Semi-distribuidos

Los modelos hidrológicos semi-distribuidos representan la heterogeneidad de la cuenca hidrográfica agrupando el territorio en unidades homogéneas con características similares. Este enfoque permite una simulación más detallada que la de los modelos empíricos simples, sin requerir la complejidad computacional de un modelo completamente distribuido. Su aplicación es adecuada para cuencas de tamaño medio y para proyectos que requieren un balance entre precisión y eficiencia operativa.

A continuación, se presentan algunas de las herramientas comúnmente empleadas para implementar modelos hidrológicos semi-distribuidos en el análisis y simulación de cuencas

- (a) **SWAT (Soil and Water Assessment Tool)** (Texas A&M University, s.f.): Muy empleado para simular procesos hidrológicos y de calidad del agua a escala de cuencas, considerando procesos como la erosión, la infiltración y la generación de escorrentía.
- (b) **HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)** (U.S. Army Corps of Engineers, s.f.): Utilizado para simular el ciclo hidrológico completo de

la cuenca hidrográfica, permitiendo modelar eventos de precipitación y sus respuestas en términos de escorrentía.

7.4 Levantamiento de línea base de infiltración

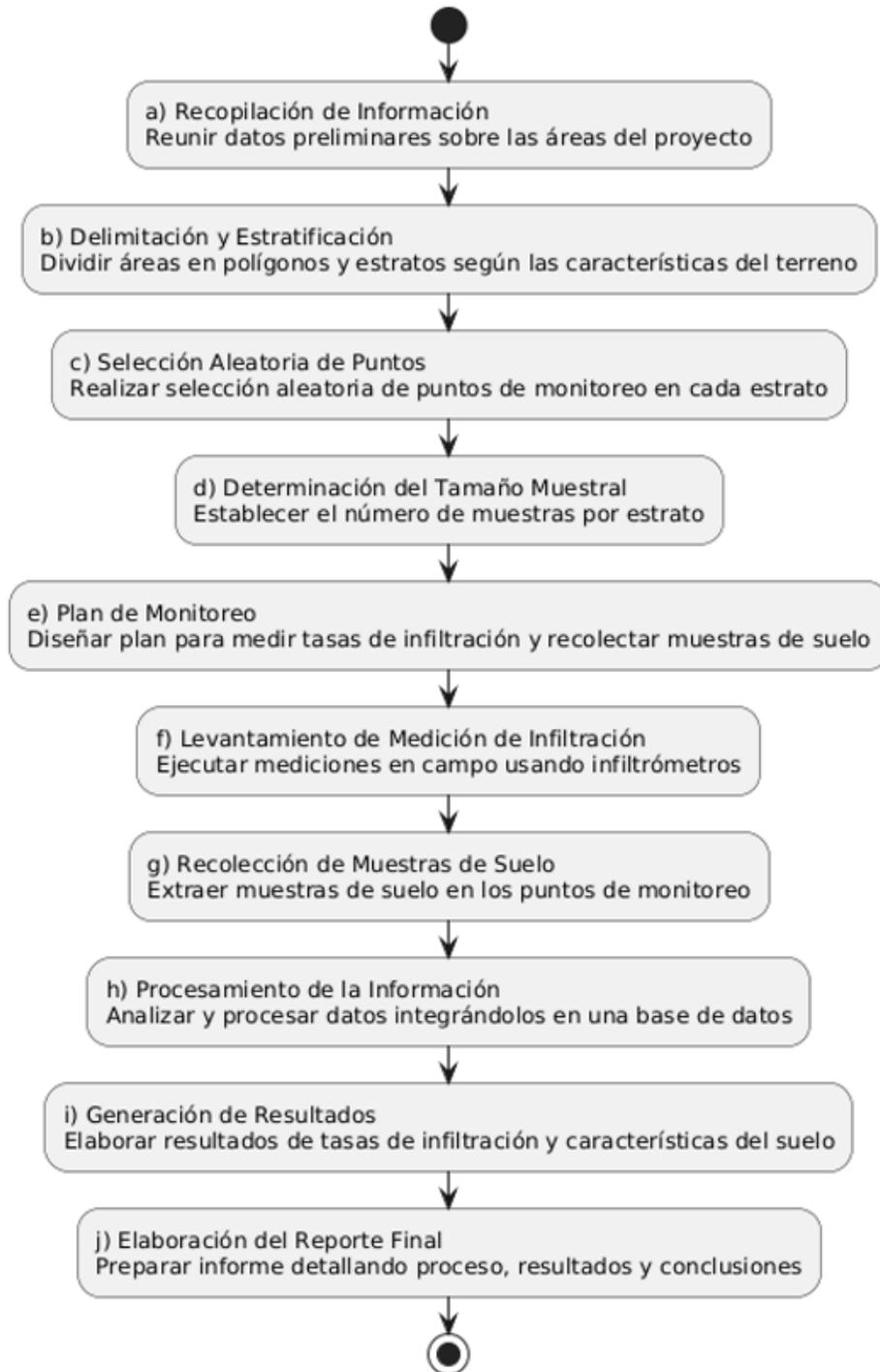
Para establecer la línea base de infiltración en las áreas del proyecto donde se implementarán actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico, es fundamental realizar mediciones directas en campo utilizando infiltrómetros manuales o automáticos. Estas mediciones deben realizarse por estratos definidos al inicio del proyecto y permitirán generar un punto de referencia confiable para evaluar, a lo largo del tiempo, las ganancias netas de agua atribuibles a las intervenciones.

La cuantificación de la línea base debe realizarse mediante un muestreo aleatorio estratificado, que garantice la representatividad espacial de los puntos seleccionados dentro de las áreas del proyecto. Cada punto de medición debe ser georreferenciado y su ubicación documentada, facilitando así el seguimiento y la comparación durante los periodos de monitoreo posteriores.

Todos los datos recolectados —incluyendo tasas de infiltración y propiedades edáficas relevantes, deben integrarse en un archivo *shapefile*, que contenga la localización geográfica y los atributos de cada punto. Esta base de datos espacial será esencial para la gestión técnica del proyecto y para los análisis posteriores de desempeño.

Los pasos detallados para el levantamiento de la línea base se presentan en la Ilustración 10.

Ilustración 10. Procedimiento para el levantamiento de la línea base de infiltración



8 Ganancias netas de agua por aumento de la infiltración

Las ganancias netas en la regulación hídrica asociadas al aumento de la infiltración en los diferentes estratos del área de proyecto (por ejemplo: áreas descapotadas, cultivos, pastizales, bosques, entre otros) deben ser calculadas en metros cúbicos por año (m³/año). Estas ganancias corresponden al volumen adicional de agua que logra infiltrarse como resultado directo de las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico.

La expresión para el cálculo de las ganancias netas (GN) por estrato se presenta a continuación.

$$GN_{\frac{m^3}{Año}} = \frac{\theta * A * \sum_{d=1}^D [\min (I_{act}, P_d) - \min (I_{base}, P_d)]}{1000}$$

Tabla 3. descripción de las variables de la ecuación de ganancias netas de agua

Símbolo	Descripción	Unidad	Fuente / forma de cálculo
θ	Fracción de infiltración profunda (o - 1) que realmente recarga el acuífero (excluye el flujo rápido).	s.d.	Calibrar con piezómetros, modelos de balance hídrico o literatura análoga de suelos.
A	Área del estrato o del proyecto.	m ²	SIG / cartografía oficial del proyecto.
1000	Factor de conversión de mm → m (1 mm = 0.001 m).	s.d.	Convierte la lámina infiltrada en volumen.
D	Número de días lluviosos reales en el año de seguimiento ($P_d \geq 1$ mm/día).	días	Serie diaria observada (red local o satélite: GPM, CHIRPS).
P_d	Precipitación del día d.	mm d ⁻¹	Serie diaria observada.
I_{act}	Capacidad de infiltración después de las intervenciones (media diaria).	mm d ⁻¹	Promedio de infiltrómetros, corregido por humedad inicial.
I_{base}	Capacidad de infiltración línea base (año anterior).	mm d ⁻¹	Promedio de infiltrómetros, corregido por humedad inicial.

8.1 Estratificación de las áreas en los límites del proyecto

Una adecuada estratificación garantiza que las mediciones, los muestreos y los cálculos de infiltración y de ganancias netas de agua sean representativos, comparables y técnicamente sólidos en toda el área del proyecto.

La estratificación de las coberturas donde se desarrollan las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico debe realizarse considerando los distintos tipos de áreas de proyecto, tales como zonas descapotadas degradadas, barbechos, praderas y pastizales, cultivos permanentes en hileras, áreas boscosas deforestadas, zonas arbustivas y de vegetación secundaria, entre otras coberturas identificadas.

La estratificación de las áreas de proyecto se basa en la clasificación de los distintos tipos de coberturas de la tierra donde se implementan las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico, tales como áreas descapotadas, cultivos, pastizales, bosques, vegetación secundaria, entre otros. Esta estratificación permite analizar la infiltración de forma diferenciada en cada estrato, reconociendo que el comportamiento hidrológico varía significativamente según las características físicas y funcionales de cada tipo de cobertura.

Esta estratificación se fundamenta en las diferencias iniciales en las tasas de infiltración entre las coberturas presentes al inicio del proyecto. Su propósito es permitir una medición representativa y diferenciada tanto en la línea base como en los monitoreos anuales subsecuentes, capturando así los cambios en la infiltración asociados a las actividades implementadas.

En este contexto, para lograr una evaluación diferenciada y técnicamente representativa de la infiltración en función del tipo de cobertura presente en las áreas de proyecto, debe considerarse lo siguiente:

(a) Base de la estratificación

Las diferencias iniciales en las tasas de infiltración entre coberturas al inicio del proyecto.

(b) Coberturas comúnmente identificadas como estratos (por ejemplo):

- i. Zonas descapotadas degradadas
- ii. Barbechos
- iii. Praderas y pastizales
- iv. Cultivos permanentes en hileras
- v. Áreas boscosas deforestadas
- vi. Zonas arbustivas y vegetación secundaria
- vii. Otras coberturas relevantes del paisaje

(c) Aplicación en la línea base y seguimiento anual:

Los estratos definidos se utilizan para:

- (a) medir las tasas de infiltración en la línea base, y
- (b) capturar los cambios generados año a año por las actividades del proyecto.

8.2 Cálculo de las ganancias netas

El proceso de cuantificación de las ganancias netas de agua por infiltración inicia con la recolección de información y datos base necesarios para realizar los cálculos establecidos por esta metodología. Esta información incluye:

- (a) la delimitación del área del estrato o del proyecto (A),
- (b) la fracción de infiltración profunda que efectivamente recarga los acuíferos (θ),
- (c) las tasas de infiltración antes y después de la intervención, y
- (d) los registros diarios de precipitación ($P \geq 1$ mm/día) durante el año de seguimiento.

Estos insumos permiten estimar con precisión la diferencia de infiltración entre el escenario con proyecto y el escenario base, y calcular el volumen adicional de agua infiltrada atribuible a las actividades implementadas. Toda la información utilizada

debe ser representativa, trazable y georreferenciada, conforme a los lineamientos de esta metodología.

Una vez recolectados los datos base, debe calcularse la infiltración diaria para cada día lluvioso (precipitación ≥ 1 mm/día), diferenciando los escenarios con y sin intervención.

El cálculo diario se realiza aplicando la fórmula de infiltración por estrato, considerando:

- (a) la tasa de infiltración posterior a la intervención (en mm/día),
- (b) la tasa de infiltración de línea base (en mm/día),
- (c) y la precipitación diaria observada.

La diferencia entre ambas tasas se evalúa día a día, limitando el valor máximo de infiltración al volumen real de precipitación registrado. Esto garantiza que no se sobreestime el volumen infiltrado, manteniendo la integridad técnica del cálculo.

Para cada día con lluvia aplicar la siguiente ecuación:

$$\Delta \text{ Infiltración diaria} = [\min (I_{\text{act}}, P_d) - \min (I_{\text{base}}, P_d)]$$

Esta ecuación permite calcular, para cada día lluvioso, la diferencia entre la lámina de agua que se infiltra en el escenario con intervención y la correspondiente al escenario de línea base. Para garantizar la consistencia del cálculo y evitar sobreestimaciones, se establece como límite superior la precipitación diaria observada.

Es decir, si la capacidad de infiltración del suelo excede el volumen de precipitación registrado en un día determinado, se considera que la infiltración efectiva no puede ser mayor que la lluvia caída, y se utiliza el valor de precipitación como límite máximo infiltrado para ese día.

A continuación, debe realizarse la sumatoria de las diferencias diarias de infiltración obtenidas a lo largo del periodo de monitoreo. Esta sumatoria

representa el volumen adicional acumulado de agua infiltrada en todos los días lluviosos del año, comparando el escenario con intervención frente al escenario base.

El resultado constituye la lámina total de infiltración adicional anual para cada estrato, expresada en milímetros (mm).

$$\sum_{d=1}^D [\min (I_{act}, P_d) - \min (I_{base}, P_d)]$$

Una vez obtenida la lámina total de infiltración adicional (en mm) para cada estrato, debe realizarse su conversión a volumen (en metros cúbicos por año, m³/año). Para ello, se multiplica la lámina por el área del estrato (en m²) y se divide entre 1000, con el fin de transformar milímetros en metros:

$$\frac{A * \sum_{d=1}^D [\min (I_{act}, P_d) - \min (I_{base}, P_d)]}{1000}$$

Este resultado representa el volumen adicional de agua infiltrada por estrato en un año.

Finalmente, debe aplicarse la corrección por fracción de infiltración profunda (θ), la cual representa la proporción del agua infiltrada que efectivamente recarga el acuífero (excluyendo flujos rápidos o superficiales que no contribuyen a la regulación hídrica).

La multiplicación del volumen infiltrado por el valor de θ permite estimar únicamente la porción del agua adicional que es considerada efectiva para la generación de Créditos de Agua Verificados (CAV).

$$\frac{\theta * A * \sum_{d=1}^D [\min (I_{act}, P_d) - \min (I_{base}, P_d)]}{1000}$$

Este valor representa el volumen final de agua infiltrada adicional atribuible al proyecto, en el estrato correspondiente.

Este procedimiento debe repetirse para cada estrato definido en las áreas de proyecto, aplicando los mismos cálculos de lámina, volumen y corrección por fracción profunda (θ). Posteriormente, se deben sumar los volúmenes corregidos de todos los estratos para obtener el volumen total de agua adicional infiltrada ($m^3/año$) generado por el proyecto en el periodo de verificación correspondiente.

Este volumen total constituye la base técnica para la cuantificación y certificación de los Créditos de Agua Verificados (CAV) por infiltración.

$$GN_{\frac{m^3}{Año}} \text{ totales} = GN_{\frac{m^3}{Año}} \text{ estrato 1} + GN_{\frac{m^3}{Año}} \text{ estrato 2} + GN_{\frac{m^3}{Año}} \text{ estrato n}$$

Las ganancias netas de agua totales representan el volumen anual adicional de agua infiltrada ($m^3/año$) atribuible a las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico implementadas en las áreas de proyecto. Este valor constituye el resultado principal cuantificable bajo la presente metodología.

Además de este beneficio hidrológico, las actividades implementadas también generan cobeneficios ambientales significativos, tales como la mejora de la biodiversidad, la recuperación funcional de ecosistemas y el aumento del almacenamiento de carbono, tanto en la biomasa aérea como en las reservas del suelo.

9 Cuantificación de créditos de agua por aumento de la infiltración

Las variables utilizadas para la cuantificación de los Créditos de Agua Verificados (CAV) deben expresarse en unidades de metros cúbicos por año ($m^3/año$). Estas unidades reflejan el volumen adicional de agua infiltrada que es atribuible a las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico implementadas en las áreas de proyecto, y constituyen la base para la certificación de los créditos conforme a esta metodología.

Para la cuantificación de los Créditos de Agua Verificados (CAV) por infiltración, generados a partir de la implementación de actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico, deben aplicarse las ecuaciones establecidas en esta metodología. Estas fórmulas permiten estimar el volumen adicional de agua

infiltrada por año ($m^3/año$) atribuible al proyecto, y deben utilizarse en cada periodo de verificación para garantizar la trazabilidad y consistencia del cálculo.

$$\begin{aligned} &\text{Créditos de Agua Verificados (CAV)} \\ &= \text{Ganancias Netas de agua (GNT)} (m^3/Año) \end{aligned}$$

La sumatoria de las ganancias netas de agua por infiltración, expresadas en metros cúbicos por año ($m^3/año$), obtenidas en todos los estratos de las áreas de proyecto, constituye la base técnica para la determinación de los Créditos de Agua Verificados (CAV) generados. La relación entre el volumen adicional infiltrado y la cantidad de CAV es directamente proporcional, siempre que los cálculos y mediciones utilizados cumplan con los requisitos establecidos en esta metodología, incluyendo representatividad, trazabilidad y consistencia en los datos.

10 Monitoreo de las actividades del proyecto

El monitoreo de las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico es necesario para verificar:

- (a) el cumplimiento efectivo de las intervenciones previstas en el proyecto,
- (b) el avance en la restauración de coberturas naturales,
- (c) y la mejora de las condiciones de infiltración del suelo.

Asimismo, permite evaluar el cumplimiento de las proyecciones y estimar, de forma anual, las ganancias netas de agua por adicionalidad y la reducción del uso de agua en los predios intervenidos, como base para la cuantificación de los Créditos de Agua Verificados (CAV).

10.1 Método de monitoreo

La implementación del plan de monitoreo debe estructurarse con base en la estratificación de las coberturas existentes al inicio del proyecto. Esto implica que:

- (a) cada tipo de cobertura que será restaurada o mejorada debe constituir un estrato específico de monitoreo;
- (b) las mediciones deben realizarse en campo dentro de cada estrato, para garantizar representatividad y comparabilidad entre periodos.

El plan de monitoreo debe incluir, como mínimo, los siguientes elementos por estrato:

- (a) Tasas de infiltración (antes y después de la intervención);
- (b) Datos edáficos, incluyendo textura, densidad aparente y materia orgánica del suelo;
- (c) Indicadores de biodiversidad, particularmente en ecosistemas estratégicos;
- (d) Seguimiento del restablecimiento de coberturas vegetales;
- (e) Estimaciones del aumento de biomasa vegetal como indicador complementario de funcionalidad ecosistémica.

10.2 Componentes del plan de monitoreo

El plan de monitoreo contempla dos componentes complementarios:

10.2.1 Monitoreo en campo

Incluye la realización de mediciones directas de infiltración, caracterización de suelos (textura, densidad, humedad) y, cuando sea aplicable, aspectos socioeconómicos vinculados a la gestión del recurso hídrico en las áreas de proyecto.

10.2.2 Monitoreo satelital

Comprende el análisis de variables biofísicas a escala espacial utilizando plataformas satelitales y herramientas SIG, incluyendo precipitación, temperatura, evapotranspiración, cambios en la biomasa y transformación de coberturas de la tierra.

El plan de monitoreo debe implementarse de forma anual, considerando al menos una campaña en temporada de lluvias y otra en temporada de estiaje, de acuerdo con los regímenes de precipitación del área de proyecto. Esto permite capturar variaciones estacionales y mejorar la representatividad de los datos utilizados para la cuantificación y verificación de resultados.

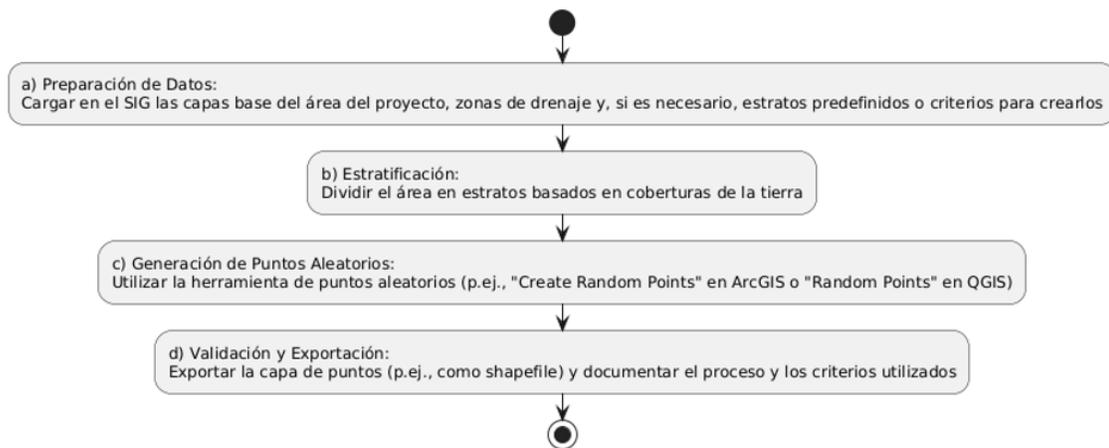
10.3 Puntos de monitoreo

Los puntos de monitoreo deben ser seleccionados mediante un muestreo aleatorio estratificado, aplicando herramientas de generación de puntos aleatorios en sistemas de información geográfica (SIG).

La distribución de los puntos se realiza dentro de cada estrato definido, asegurando que se ubiquen en zonas de drenaje representativas dentro de las áreas de proyecto. Esto permite garantizar la validez espacial de las mediciones y la comparabilidad entre campañas de monitoreo.

El procedimiento para la generación y distribución de los puntos aleatorios se presenta en la Ilustración 11.

Ilustración 11. Procedimiento para la generación de puntos aleatorios de monitoreo.



10.4 Tamaño de la muestra.

El tamaño de muestra debe ser determinado de forma que garantice la representatividad estadística dentro de cada estrato definido. Para ello, debe

seleccionarse un número suficiente de unidades de muestreo por estrato, considerando un nivel de confianza del 95 % y un margen de error inferior al 5 %.

La determinación del tamaño de muestra puede realizarse utilizando métodos estadísticos reconocidos, tales como la fórmula de Cochran para muestras simples o la asignación de Neyman para muestras estratificadas. Estas fórmulas permiten distribuir de forma óptima el esfuerzo de monitoreo, ajustándose a la variabilidad interna de cada estrato y al total del área de proyecto.

Tamaño de muestra por estrato (Ecuación de Cochran) (Cochran, 1977):

$$Tm = \frac{Z^2 * p * (1 - p)}{e^2}$$

Donde:

- Z valor crítico de la distribución normal (para 95% de confianza, Z=1.96).
- P proporción estimada de la característica de interés (si no se conoce, se utiliza $p=0.5$ para maximizar la variabilidad)
- e error muestral máximo permitido (en este caso, 0.05 para un 5%).

En el caso de proyectos con múltiples estratos, el tamaño total de muestra n puede ser distribuido entre los distintos estratos utilizando la asignación proporcional de Neyman, que permite optimizar el muestreo en función del tamaño relativo de cada estrato.

La fórmula para la asignación proporcional es:

$$Th = n * \frac{N_h}{N}$$

Donde:

- T_h Tamaño de la muestra asignado al estrato h
- N_h Tamaño poblacional del estrato h
- N Tamaño poblacional total (suma de todos los estratos)
- n Tamaño de la muestra

Si se desea mejorar la precisión del muestreo considerando la variabilidad interna de cada estrato, puede aplicarse la asignación óptima de **Neyman** (Neyman, 1934). Este método distribuye el tamaño total de muestra de forma proporcional al producto del tamaño y la desviación estándar de cada estrato, priorizando aquellos con mayor variabilidad.

La fórmula es la siguiente:

$$n_h = n * \frac{N_h * S_h}{\sum_{h=1}^L N_h * S_h}$$

Donde:

n_h	tamaño de muestra asignado al estrato h
N_h	tamaño poblacional del estrato h
S_h	desviación estándar del estrato h
n	Tamaño total de la muestra

Este enfoque permite optimizar el esfuerzo de muestreo, mejorando la precisión estadística en función de la heterogeneidad observada entre los estratos.

10.5 Distribución de los puntos de monitoreo en las áreas de proyecto.

La distribución espacial de los puntos de monitoreo debe realizarse de manera aleatoria dentro de cada estrato, utilizando herramientas de generación de puntos aleatorios disponibles en los sistemas de información geográfica (SIG).

Los puntos deben organizarse en capas *shapefile* independientes, donde se identifiquen claramente los límites y atributos de cada estrato correspondiente a las actividades de gestión sostenible y conservación del recurso hídrico. Esta organización facilita el análisis espacial, la trazabilidad de las mediciones y el seguimiento durante los diferentes periodos de monitoreo.

10.6 Frecuencia del monitoreo

Los monitoreos de infiltración deben realizarse con una frecuencia mínima anual, preferiblemente incorporando múltiples campañas a lo largo del año para mejorar la representatividad de los datos. Es recomendable realizar mediciones tanto en temporada de lluvias como en temporada de estiaje, con el fin de capturar la variabilidad estacional en las tasas de infiltración.

La planificación del monitoreo debe considerar el régimen de precipitación predominante en el área de proyecto (ya sea monomodal o bimodal), para asegurar que las mediciones reflejen adecuadamente las condiciones hidrológicas del territorio.

10.7 Medición con infiltrómetros.

Deben usarse infiltrómetros de alta precisión para medir la tasa de infiltración (mm/día) en puntos aleatorios y georreferenciados dentro de cada estrato. Los datos obtenidos deben ser registrados y gestionados mediante sistemas de información geográfica (SIG), garantizando su trazabilidad, organización espacial y disponibilidad para el análisis técnico posterior.

Tabla 4. Tipos de infiltrómetros para línea base y monitoreo de la infiltración.

Tipo de Infiltrómetro	Características Principales	Diámetro (cm)	Uso Principal
Infiltrómetro de Doble Anillo (Van Walt, s.f)	Mide la tasa de infiltración de agua en el suelo, ideal para estudios de campo.	30	Estudios de infiltración de agua en suelos agrícolas
Infiltrómetro de Minidisco (TecFresh, s.f.)	Configuración fácil y tamaño compacto, ideal para mediciones de campo.	4.5	Estudios de hidrología y mediciones rápidas en campo
Infiltrómetro de Anillo Sencillo (Tiloom, s.f.)	Permite determinar la conductividad hidráulica saturada de campo, ideal para estudios rápidos.	15-30	Determinación de la conductividad hidráulica en campo

Tipo de Infiltrómetro	Características Principales	Diámetro (cm)	Uso Principal
Infiltrómetro automático (Plant-e, s.f.)	Infiltrómetro automático medición permanente en tiempo real de la infiltración y temperatura de	N.A.	Medición de tasa infiltración en tiempo real.

10.8 Verificación y control de calidad de los datos

Para los datos obtenidos en los diferentes monitoreos, incluyendo infiltración, precipitación, temperatura, textura y densidad del suelo, tanto en mediciones de campo como satelitales, debe aplicarse un procedimiento de control de calidad que permita identificar y excluir valores atípicos que puedan generar sesgos en la cuantificación.

Debe eliminarse cualquier dato que supere una (1) desviación estándar respecto a la media de los datos dentro de cada estrato, salvo justificación técnica documentada. Adicionalmente, debe verificarse que el error total de los monitoreos se mantenga por debajo del 10 %, a fin de asegurar la confiabilidad de los resultados utilizados en la estimación de las ganancias netas de agua.

11 Supuestos y limitaciones de la metodología

La presente metodología se basa en una serie de supuestos técnicos y operativos que permiten la aplicación estandarizada de los procedimientos de cuantificación. Entre ellos, se asume:

- (a) que los datos climáticos y edáficos utilizados son representativos del área de proyecto;
- (b) que la relación entre infiltración y recarga profunda puede ser estimada a partir de datos puntuales y extrapolada por estrato;
- (c) y que los procesos hidrológicos modelados presentan una variabilidad temporal moderada, permitiendo comparaciones interanuales.

Asimismo, el enfoque puede presentar limitaciones en contextos con escasa información local o alta heterogeneidad espacial no capturada adecuadamente por

los insumos disponibles. En tales casos, el uso de supuestos regionales, promedios multianuales o datos secundarios deberá ser debidamente documentado y justificado.

Cuando el proyecto se implemente en zonas fuera de las condiciones edafoclimáticas comunes a la metodología, o cuando se utilicen datos alternativos o proxies, se recomienda realizar una recalibración parcial del modelo o una evaluación complementaria de sensibilidad.

12 Gestión documental del proyecto

12.1 Manejo de las bases de datos del proyecto

La implementación de todos los procedimientos establecidos en esta metodología debe estar respaldada por una base de datos integrada, que permita gestionar, almacenar y actualizar la información técnica generada durante el ciclo del proyecto.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es esencial para la organización y el análisis de datos espaciales. Se recomienda estructurar la base de datos en plataformas robustas, como el modelo GDB de ArcGIS (Environmental Systems Research Institute), que permite la integración eficiente de múltiples capas temáticas, atributos y metadatos.

De forma alternativa, pueden emplearse soluciones basadas en software libre, como QGIS, que permite el uso de bases de datos compatibles como QPK y la integración con otras fuentes externas para mejorar la visualización, trazabilidad y análisis espacial.

Una gestión documental adecuada garantiza que toda la información del proyecto esté organizada, disponible y verificable, facilitando el análisis técnico, la toma de decisiones informadas y el cumplimiento de los requisitos de monitoreo y verificación.

13 Verificación y aseguramiento de calidad

Los resultados generados mediante esta metodología estarán sujetos a procesos de auditoría independiente, conforme a los requisitos del Estándar de Agua BioCarbon. En particular, las siguientes condiciones deben cumplirse para garantizar la trazabilidad y validez de los Créditos de Agua Verificados (CAV):

- (a) Toda la información utilizada en los cálculos debe estar documentada, georreferenciada y disponible para su revisión;
- (b) Los procedimientos de recolección de datos, análisis y modelamiento deben ser consistentes con lo establecido en esta metodología, incluyendo el uso de los formatos, ecuaciones y variables indicadas;
- (c) Las mediciones en campo y los datos satelitales utilizados deben ser trazables a sus fuentes, con respaldo técnico suficiente para demostrar su representatividad;
- (d) La coherencia entre los datos de línea base, los escenarios con proyecto y los resultados cuantificados será objeto de revisión por parte del organismo de certificación.

El incumplimiento de estas condiciones puede afectar la aprobación del proyecto y, así mismo, la emisión de los créditos solicitados. El titular del proyecto es responsable de mantener un sistema de información actualizado y verificable, como parte de su plan de monitoreo y gestión documental.

14 Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.pdf>

Banco Mundial. (2014). Water storage: Analysis and design. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/21042/Water-Storage-Analysis-and-Design.pdf>

BioCarbon Cert. (2025). BWS0001. Metodología para cuantificar las ganancias netas de agua por manejo de la infiltración en cuencas hidrográficas. Versión Consulta Pública.

Climate Hazards Group. (s. f.). CHIRPS Daily [Conjunto de datos]. https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/UCSB_CHG_CHIRPS_DAILY

Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (s. f.). Recursos hídricos. https://unfccc.int/sites/default/files/ch6_water_resources-handbook.pdf

Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. (s. f.). Recursos hídricos. https://www.unccd.int/sites/default/files/2018-06/GLO%20Spanish_Ch8.pdf

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (s. f.). TanDEM-X [Conjunto de datos]. <https://tandemx-science.dlr.de>

Dunne, T., & Black, A. (1990). Soil erosion and runoff. FAO. <https://www.fao.org/3/to688e/To688E00.pdf>

Environmental Protection Agency. (2000). Soil infiltration rate testing. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/infiltration_rate_testing.pdf

Elevitch, C. R., & Wilkinson, K. M. (s. f.). Sheet mulching: Greater plant and soil health for less work. Permanent Agriculture Resources. https://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/Sheet_Mulching.pdf

FAO. (2006). La larga sombra del ganado: Cuestiones y opciones ambientales. <https://www.fao.org/3/a0701s/a0701s.pdf>

FAO. (2011). The state of the world's water. <https://www.fao.org/3/a-i2917e.pdf>

FAO. (2013). Conservación y rehabilitación de suelos en América Latina y el Caribe. <https://www.fao.org/3/i3340s/i3340s.pdf>

FAO. (2019). El estado de la biodiversidad para la alimentación y la agricultura en el mundo. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/79dee2e1-bbf2-4fee-8159-5ef8e50e91b9/content>

Fundación Biodiversidad. (s. f.). Guía de restauración ecológica. https://ieeb.fundacionbiodiversidad.es/sites/default/files/guia_de_restauracion_ecologica_baja_o.pdf

Global Water Partnership. (2000). Integrated water resources management (Background Paper No. 4). https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/2000_11_integrated_water_resources_management.pdf

Global Water Partnership. (2018). Gobernanza del agua: Estrategias y desafíos para la gestión sostenible. https://www.gwp.org/es/docs/gobernanza_del_agua.pdf

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. IWA Publishing. <https://waterfootprint.org/media/downloads/RefThesis.pdf>

Holdrich, J. (1995). Métodos empíricos para la estimación de la evapotranspiración en condiciones semiáridas [Informe técnico]. Instituto Nacional de Recursos Hídricos.

Holzer, S. (2011). Desert or paradise: Restoring endangered landscapes using water management, including lake and pond construction. Permanent Publications.

Instituto Nacional de Hidrología. (2010). Conceptos básicos de hidrología y medición del caudal. https://www.hidrologia.gob.mx/docs/hidrologia_basica.pdf

Japan Aerospace Exploration Agency. (s. f.). ALOS World 3D – 30 m (AW3D30). <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2017). Precipitation measurement. <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/precipitation-measurements.pdf>

Neyman, J. (1934). On the two different aspects of the representative method: The method of stratified sampling and the method of purposive selection. *Journal of the Royal Statistical Society*, 97(4), 558–625.

Organización Mundial de la Salud. (2017). Directrices de calidad del agua potable. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2017-wq-guidelines.pdf

Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2004). Zanjas de infiltración. Universidad de Talca. <https://www.cuhs.otalca.cl/exctha/Docs/pdf/Publicaciones/libros/Zanjas.pdf>

Proyecto LIFE MedWetRivers. (s. f.). Anexo: Tabla de impactos Planes básicos vs. PYA UE. https://www.lifemedwetrivers.eu/sites/default/files/documentos/anexo1_tabla_impactos_planes_basicos_vs_pya_ue_o.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). Control de nutrientes en cuerpos de agua: Estrategias para prevenir la eutrofización. https://www.gob.mx/medioambiente/documentos/control_de_nutrientes.pdf

The Nature Conservancy. (s. f.). Fondos de agua: Invirtiendo en la naturaleza para la seguridad hídrica. <https://www.conservationgateway.org/Documents/LAWFP-ESP-low%20050312.pdf>

UICN. (2014). Restauración funcional del paisaje rural: Manual de técnicas. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/ST-GFE-no.03.pdf>

UN-Water. (2015). Water security and the sustainable development goals. <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-sdgs.pdf>

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning (Agricultural Handbook No. 537). USDA. <https://www.fao.org/3/Xo56oE/Xo56oEoo.pdf>

Versión para consulta pública

Historia del Documento

Tipo de documento

Documento metodológico. Metodología de cuantificación de ganancias netas de agua por aumento de la infiltración en cuencas hidrográficas.

Versión	Fecha	Naturaleza del documento
Versión para Consulta Pública	27 de junio de 2025	Versión inicial

Versión para consulta pública