



El ambiente
es de todos

Minambiente

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico

Lineamientos generales para el **Manejo de sedimentos** a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico

Con el apoyo de:
**Proyecto Comunica Colombia de
Cooperación Canadiense**



Comunica

Un proyecto de:



Con el financiamiento de:



LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO



Iván Duque Márquez

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

Carlos Eduardo Correa Escaf

MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Francisco Cruz Prada

VICEMINISTRO DE POLÍTICAS Y NORMALIZACIÓN
AMBIENTAL

Fabián Mauricio Caicedo Carrascal

DIRECTOR DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

EQUIPO TÉCNICO

Autores: Juan Diego González Parra, Diana Marcela Moreno Barco

Profesionales que contribuyeron al proceso: Claudia Liliana Buitrago Aguirre

PROYECTO COMUNICA COLOMBIA DE COOPERACIÓN CANADIENSE

Juan José Montoya Monsalve

Jerson Villarreal

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Grupo de Comunicaciones
José Roberto Arango R.

CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN: Grupo Divulgación de
Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y
Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

*Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica
en el marco de la gestión integral del recurso hídrico* / Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.
Textos: González Parra, Juan Diego; Moreno Barco, Diana Marcela. — Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de
Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022.

112 p. : il.; + 1 anexo (publicado en www.minambiente.gov.co) —.

ISBN: 978-958-5551-84-8

Publicado en: www.minambiente.gov.co

1. recurso hídrico	2. sedimentos	3. erosión	4. remoción en masa
5. gestión integral del recurso hídrico	6. balance de sedimentos	7. restauración ecológica	
8. casos de uso	9. metodologías	I. Tit.	II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CDD: 333.91

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia, 2022

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor; siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.



No comercializable. Distribución gratuita

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	5
1 INTRODUCCIÓN	7
2 MARCO DE POLÍTICA Y NORMATIVO	10
2.1 NORMATIVA AMBIENTAL RELACIONADA CON LOS SEDIMENTOS	11
2.2 POLÍTICA NACIONAL DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO	12
2.3 POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL SUELO	13
2.4 NORMATIVA RELACIONADA CON EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL SECTORIAL	14
3 MARCO INSTITUCIONAL	16
4 MARCO CONCEPTUAL	20
4.1 ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES DEL CICLO DE SEDIMENTOS	23
4.2 EL CICLO DE SEDIMENTOS EN UNA MIRADA INTEGRAL	25
4.3 LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	27
4.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	34
4.5 ALTERACIONES ANTRÓPICAS SOBRE EL RÉGIMEN DE SEDIMENTOS	38
5 ANTECEDENTES SOBRE EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA	42
5.1 CASOS DE ESTUDIO DE LA INICIATIVA INTERNACIONAL DE SEDIMENTOS – ISI	43
5.2 ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES ENTRE EL RÉGIMEN DE CAUDALES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS Y EL TRANSPORTE DE MATERIA ORGÁNICA EN RÍOS DEL JAPÓN	44
5.3 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES ENTRE EL BALANCE DE SEDIMENTOS, LOS PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS Y CAMBIOS EN LA TOPOBATIMETRÍA EN EL RÍO YUBA, CALIFORNIA	44
5.4 ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA STEEPHOLLOW CREEK, CALIFORNIA, Y ANÁLISIS DE SU CONECTIVIDAD LONGITUDINAL	45
5.5 EFECTOS DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA SOBRE EL RÉGIMEN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YELLOW, CHINA	45
5.6 ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL MARCO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES A CONCESIONAR EN LA CUENCA DEL RÍO YELLOW, CHINA	46
5.7 HERRAMIENTA CASCADE PARA EL ANÁLISIS Y GESTIÓN DE LA CONECTIVIDAD DEL RÉGIMEN DE SEDIMENTOS	46
5.8 ANÁLISIS DEL EFECTO DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y EL AGUA SOBRE LAS CARGAS DE SEDIMENTOS SUSPENDIDOS TRANSPORTADAS DURANTE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO GUSHANCHUAN, CHINA	47
5.9 ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE ESTRATEGIAS DE MANEJO DE SEDIMENTOS SOBRE UNA SUBCUENCA DEL RÍO AWASH, ETIOPÍA	47
5.10 EXPERIENCIAS NACIONALES EN MANEJO SOSTENIBLE DE SEDIMENTOS A ESCALA DE CUENCA	47
6 PROPUESTA DE LINEAMIENTOS PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA	50
6.1 GENERALIDADES	51
6.2 PROPUESTA METODOLÓGICA	52
7 ARTICULACIÓN CON LA INSTRUMENTACIÓN VIGENTE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO	86
8 REFERENCIAS	88
9 ANEXOS	96
9.1 ANEXO 1 – PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ENTRADA PARA LA ECUACIÓN DE EROSIÓN POTENCIAL HÍDRICA EN LADERA	97
9.2 ANEXO 2 – MEMORIAS DEL TALLER NACIONAL “UNA CONSTRUCCIÓN COLECTIVA PARA LA DEFINICIÓN DE LINEAMIENTOS GENERALES QUE PERMITAN EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO” (ANEXO DIGITAL)	110

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

LISTA DE FIGURAS

• Figura 1.	Ciclo de sedimentos en una cuenca hidrográfica.	18
• Figura 2.	Esquema general de distribución de los sistemas fluviales según Schumm (1977).	19
• Figura 3.	Componentes del ciclo de sedimentos en diferentes escalas temporales y espaciales.	20
• Figura 4.	Esquema de un paisaje a escala de cuenca, se observan diferentes almacenamientos de sedimentos.	21
• Figura 5.	Capacidad de transporte vs. suministro de sedimentos.	22
• Figura 6.	Clases de procesos denudativos.	23
• Figura 7.	Procesos erosivos en ladera.	24
• Figura 8.	Desprendimientos y colapsos.	27
• Figura 9.	Desprendimientos por flexión (izquierda) y por desplome (derecha).	27
• Figura 10.	Ejemplos de deslizamientos (izquierda rotacional, derecha traslacional).	28
• Figura 11.	Esquema general del balance de sedimentos en un tramo de río.	32
• Figura 12.	Fases recomendadas para el manejo sostenible de sedimentos en cuencas hidrográficas.	43
• Figura 13.	Actividades propuestas para el desarrollo de la fase 0. Conocimiento	45
• Figura 14.	Actividades propuestas para la caracterización de la producción de sedimentos en el marco de la fase 1. Caracterización	48
• Figura 15.	Red de drenaje derivada de un mapa de acumulación de flujo con un umbral de 10 hectáreas (en blanco) superpuesta a la red de drenaje de la cartografía básica del IGAC en escala 1:100.000. ⁵⁰	
• Figura 16.	Actividades propuestas para la caracterización del sistema fluvial en el marco de la fase 1. Caracterización	53
• Figura 17.	Unidades espaciales propuestas para la clasificación geomorfológica de ríos.	55
• Figura 18.	Actividades propuestas para la caracterización de las intervenciones y presiones antrópicas en el marco de la fase 1. Caracterización.	64

LISTA DE TABLAS

• Tabla 1.	Casos de estudio analizados	36
• Tabla 2.	Fases y actividades recomendadas para la implementación de un programa de manejo sostenible de sedimentos a escala de cuenca	44
• Tabla 3.	Tipos de indicadores para la evaluación de la calidad de hábitat	63
• Tabla 4.	Rangos adoptados para el rendimiento medio de sedimentos anual multianual	70

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **Cascade:** Modelo de conectividad y transporte de sedimentos a nivel de cuenca (en inglés **Catchment Sediment Connectivity And Delivery**)
- **DEM:** Modelo Digital de Elevación (en inglés **Digital Elevation Model**)
- **EIA:** Estudio de impacto ambiental
- **GUS:** Sistema de Identificación y Clasificación de Unidades Morfológicas (en inglés **Geomorphic Units Survey and Classification System**)
- **HTP:** Hidrocarburos totales del petróleo
- **Ideam:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales
- **IGAC:** Instituto Geográfico Agustín Codazzi
- **Mavdt:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
- **Minambiente:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- **PNICM:** Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar
- **Pomca** Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas
- **PORH** Planes de ordenamiento del recurso hídrico
- **Pnmrh:** Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico
- **QBR:** Calidad del bosque de ribera (en catalán **Qualitat del Bosc de Ribera**)
- **REFORM:** Programa de restauración de ríos para la gestión efectiva de cuencas (en inglés **Restoring rivers for effective catchment management**)
- **RFV:** Evaluación de bosques riparios (en inglés **Riparian Forest evaluation**)
- **RUSLE:** Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (en inglés **Revised Universal Soil Loss Equation**)
- **SGC:** Servicio Geológico Colombiano
- **SINA:** Sistema Nacional Ambiental
- **UCS:** Unidades cartográficas de suelos
- **Unodc:** Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito
- **Usace:** Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (en inglés **United States Army Corps of Engineers**)
- **USLE:** Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (en inglés **Universal Soil Loss Equation**)

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA
HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO



INTRODUCCIÓN

Los sedimentos son materiales removidos, transportados y depositados por el viento, el hielo o el agua. Estos procesos hacen parte de ciclos naturales los cuales, en largos períodos de tiempo, moldean la superficie de la tierra. Las actividades humanas modifican y aceleran estos procesos, ocasionando impactos sociales, económicos y ambientales.

Los sedimentos transportados por las corrientes se producen de la erosión hídrica, los movimientos en masa y las fuentes puntuales de sedimentos en la cuenca hidrográfica, así como de la erosión fluvial en las bancas y lechos de los cauces. Estos materiales son transportados por el flujo de agua hacia aguas abajo. En zonas de baja pendiente los sedimentos son depositados en las bancas y el lecho de los ríos, así como en las planicies de inundación debido a la disminución de la capacidad de transporte de las corrientes. La producción, transporte y depósito de sedimentos no se encuentran restringidos a un tramo o área particular de un cuerpo de agua, sino que ocurren a lo largo de todo su curso, lateral y longitudinalmente.

El transporte de sedimentos es un proceso natural que hace parte del flujo normal de los ríos, estuarios y costas, y tiene una gran importancia para los procesos hidráulicos, geomorfológicos y ecológicos de los cuerpos de agua (Usace, 2004). En condiciones naturales, un río presenta unas condiciones de flujo de agua y de sedimentos que favorecen el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos. Además de ser un factor determinante en los procesos geomorfológicos de los cuerpos de agua, los sedimentos proporcionan hábitat a organismos bénticos, y pueden ser un sumidero significativo y una fuente potencial de contaminantes (Brils, 2008).

Los sedimentos tienen un alto valor ecológico, pues generan una variedad de hábitats para diversas especies como algunos anfípodos, moluscos y gusanos, entre otros; constituyen una importante fuente de nutrientes para estos organismos y, por lo tanto, para otras especies superiores en la cadena alimenticia. Adicionalmente, los ciclos de erosión y sedimentación que componen la dinámica de los sedimentos generan diversos ambientes geomorfológicos que favorecen la existencia de condiciones para diversas especies (Brils, 2008).

Sin embargo, intervenciones antrópicas como la construcción de presas y otras estructuras transversales, la construcción de infraestructura lineal como vías, el desarrollo de actividades mineras, la alteración de la geomorfología de los cauces, la modificación de los usos y las coberturas del suelo para el desarrollo de diferentes actividades económicas y la explotación de materiales de arrastre pueden modificar e incluso interrumpir los procesos de transporte de sedimentos, alterando el equilibrio natural de los cauces y generando problemas tanto en los sitios intervenidos como aguas abajo. Estas modificaciones en la producción y transporte de sedimentos generadas por efecto de actividades humanas ocasionan consecuencias adversas, entre las que se resaltan:

- Pérdida de productividad en cultivos, debido a la erosión del horizonte superficial de los suelos, en los cuales se encuentran los nutrientes para los ciclos vitales de las plantas.
- Sedimentación de cauces con disminución de la navegabilidad de ríos.
- Pérdida de vida útil de embalses por colmatación.
- Contaminación de las aguas de escorrentía y de corrientes debido a que los sedimentos pueden actuar como medio de transporte de contaminantes.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

- Daños en infraestructuras (vías, ferrocarriles o puentes).
- Deterioro de las estructuras hidráulicas (bocatomas de acueductos, distritos de riego, presas, etc.).

Si bien la normativa colombiana aplicable en la materia señala la importancia de los sedimentos en los cuerpos de agua del país, se ha identificado la necesidad de avanzar en la caracterización y el entendimiento de los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos a nivel de cuenca. Asimismo, se requiere avanzar en el análisis técnico y administrativo para la gestión de dichos sedimentos en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), armonizando los desarrollos técnicos propuestos con los respectivos instrumentos existentes para la planificación y administración del recurso hídrico por parte de las autoridades ambientales competentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) ha identificado la necesidad de elaborar unos lineamientos generales que orienten a las autoridades ambientales para la gestión sostenible de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica, con miras en avanzar hacia un análisis que integre el régimen de los caudales líquidos y sólidos requeridos en los cuerpos de agua para mantener o recuperar el equilibrio de los ecosistemas y su prestación de servicios ecosistémicos, teniendo en cuenta la influencia de dicho régimen sobre los procesos hidráulicos, geomorfológicos, ecológicos y de calidad del agua de las cuencas.

Es importante aclarar que el presente documento constituye una propuesta preliminar y, por tanto, los lineamientos presentados constituyen una aproximación inicial a los requerimientos técnicos, administrativos y normativos mínimos necesarios para avanzar en el conocimiento y gestión del régimen de sedimentos en el país. Estos lineamientos deben ser socializados y retroalimentados con autoridades ambientales competentes, institutos de investigación y usuarios del recurso hídrico, entre otros actores de interés, con el fin de avanzar a mediano plazo hacia la definición de las herramientas que permitan incorporar las recomendaciones respectivas a la instrumentación vigente en el marco de la gestión integral del recurso hídrico.

En todo caso, los lineamientos descritos en el presente documento deben entenderse como una recomendación general de los contenidos mínimos que debe tener el análisis de sedimentos a escala de cuenca, los cuales deben adaptarse a las particularidades de cada caso de estudio, para lo cual se deberán complementar, según se requiera, las necesidades de información, los requisitos de modelación y las mediciones necesarias para caracterizar el régimen de sedimentos. Cabe anotar que el presente documento está dirigido a profesionales con conocimiento en temas de hidráulica, transporte de sedimentos y morfología fluvial, involucrados en la toma de decisiones con respecto al manejo de sedimentos en cuerpos de agua.

Los lineamientos propuestos se han elaborado con un enfoque de gestión integral del recurso hídrico, la cual incluye la gestión coordinada de los caudales líquidos y sólidos del cuerpo de agua. Por lo tanto, se parte de una descripción del marco de política y normativo que soporta la presente propuesta de lineamientos (capítulo 2), posteriormente se presenta un marco conceptual en el que se describe el régimen natural de sedimentos, su importancia en el funcionamiento de los sistemas fluviales y el efecto de las alteraciones antrópicas sobre dicho régimen (capítulo 4), así como un resumen

de experiencias internacionales relacionadas con el manejo de sedimentos (capítulo 5). Finalmente, en el capítulo 6 se presenta la propuesta de lineamientos para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica, construida a partir de la información recopilada de experiencias nacionales e internacionales en el tema, y finalmente, en el capítulo 7 se presenta una propuesta de articulación de dicha propuesta con la instrumentación vigente en materia de gestión del recurso hídrico.



2

MARCO DE POLÍTICA Y NORMATIVO

A continuación, se presenta un resumen de la normativa ambiental aplicable a la gestión de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica en Colombia.

2.1. NORMATIVA AMBIENTAL RELACIONADA CON LOS SEDIMENTOS

El manejo sostenible de sedimentos tiene sustento normativo en los siguientes artículos de la Constitución Política de Colombia de 1991 (República de Colombia, 1991):

- “Artículo 79. Derecho a gozar de un medio ambiente sano: Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. (...) Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines” (...).
- Artículo 80: El estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, y sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en la zona fronteriza.”

Por otra parte, a partir del Decreto - Ley 2811 de 1974¹ (Presidencia de la República de Colombia, 1974), se consideran los sedimentos como un factor que puede afectar y deteriorar el medio ambiente, en particular el recurso hídrico. En su artículo 8, el mencionado Decreto indica que:

“Se consideran factores que deterioran el ambiente, entre otros: (...) b. La degradación, la erosión y el revenimiento de suelos y tierras (...); d. Las alteraciones nocivas del flujo natural de las aguas; e. La sedimentación en los cursos y depósitos de agua; f. Los cambios nocivos del lecho de las aguas (...). Asimismo, se entiende por contaminante cualquier elemento, combinación de elementos, o forma de energía que actual o potencialmente puede producir alteración ambiental de las precedentemente escritas. La contaminación puede ser física, química, o biológica”.

Por su parte, el artículo 314 del aludido Decreto menciona que “Corresponde a la Administración Pública: a. Velar por la protección de las cuencas hidrográficas contra los elementos que las degraden o alteren y especialmente los que producen contaminación, sedimentación y salinización de los cursos de aguas o de los suelos”.

Adicionalmente, el artículo 2.2.3.2.24.1 del Decreto 1076 de 2015 (Presidencia de la República de Colombia, 2015), menciona como prohibiciones: “Por considerarse atentatorias contra el medio acuático se prohíben las siguientes conductas: (...) 3. Producir, en desarrollo de cualquier actividad, los siguientes efectos: (...) a. La alteración nociva del flujo natural de las aguas; b. La sedimentación en los cursos y depósitos agua; c. Los cambios nocivos del lecho o cauce de las aguas (...)”.

¹ Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

2.2. POLÍTICA NACIONAL DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

La Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico fue formulada por el entonces el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en el año 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), con el objetivo de orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional bajo un criterio de gestión integral, considerando el agua como un factor de desarrollo económico y de bienestar social e implementando procesos de participación equitativa e incluyente. La Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico se soporta en ocho principios y seis objetivos (oferta, demanda, calidad, riesgo, fortalecimiento institucional y gobernabilidad), para cada uno de los cuales se establecieron estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La implementación de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico se realiza mediante un marco normativo e instrumental que permite la materialización de sus seis objetivos en territorio. Desde el punto de vista de los instrumentos que permiten materializar los objetivos de la Política, es importante mencionar los siguientes:

- Instrumentos de control: concesiones, permisos o autorizaciones ambientales necesarios para el uso, aprovechamiento de los recursos naturales renovables y demás regulaciones para el control de la contaminación.
- Instrumentos económicos. incluyendo tasas por uso del agua, tasas retributivas e incentivos tributarios, los cuales se orientan a la protección del medio ambiente y al uso racional de los recursos naturales. Son aplicados para generar una estrategia eficiente de mínimo costo con el objeto de lograr niveles de contaminación aceptables, provocar un incentivo permanente para la disminución de la contaminación y la utilización de tecnologías no contaminantes.
- Instrumentos de información: se materializan en el Sistema de Información de Recurso Hídrico - SIRH, el cual integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico.
- Instrumentos de planificación: Incluyendo normas, guías técnicas e instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas y acuíferos. De acuerdo con la estructura jerárquica definida para la planificación del recurso hídrico en el país se tienen los siguientes instrumentos:
 - Planes estratégicos de macrocuencas, en áreas hidrográficas.
 - Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, en las Zonas Hidrográficas.
 - Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (Pomca), en subzonas hidrográficas o su nivel subsiguiente.
 - Planes de manejo ambiental de microcuencas en las cuencas de nivel inferior al del nivel subsiguiente de la subzona hidrográfica.

- Planes de manejo ambiental de acuíferos.
- Planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH).

Con el fin de alcanzar los objetivos de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico y orientar a las autoridades ambientales en la implementación de los instrumentos de gestión del recurso hídrico, la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico ha generado estrategias, normas, guías y procesos de articulación, incluyendo:

- Resolución 1433 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre planes de saneamiento y manejo de vertimientos, y se adoptan otras determinaciones (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).
- Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a), contiene los lineamientos básicos con los que las autoridades ambientales competentes llegarán a consolidar la propuesta programática y el plan de monitoreo y seguimiento con horizonte mínimo de diez años a lo largo de los cuales se buscará mejorar la disponibilidad y la calidad del recurso.
- Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).
- Definición del Protocolo de monitoreo del agua, en conjunto con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -Ideam (Ideam, 2007), asociado al monitoreo de la calidad y la cantidad del agua, a través de la actualización del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (Pnmrh).
- Construcción de un documento que contiene lineamientos ambientales para el manejo de sedimentos en embalses.
- Estructuración de la Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

2.3. POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL SUELO

La Política para la Gestión Sostenible del Suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) tiene como objetivo generar lineamientos nacionales para el adecuado manejo de los suelos del país, así como para el control de los procesos de degradación relacionados. La Política incluye instrumentos y mecanismos que permiten implementar estrategias encaminadas a reducir los efectos de la degradación de los suelos del país, incluyendo la erosión y la pérdida de materia orgánica.

Para el cumplimiento de los objetivos de la Política para la Gestión Sostenible del Suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) se propone una visión integral que involucra el manejo sostenible de los suelos, la conservación de la biodiversidad, el agua y el aire, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo. En este sentido, con los presentes lineamientos se pretende articular los objetivos de la Política Nacional para la (Ministerio de Ambiente y Desarrollo

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Sostenible, 2016) Gestión Sostenible del Suelo con los de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico, con el fin de aportar a una gestión integral de las cuencas hidrográficas que permita una gestión articulada de los recursos naturales, con miras a garantizar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como su prestación de servicios ecosistémicos.

2.4. NORMATIVA RELACIONADA CON EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL SECTORIAL

En términos generales, las actividades económicas que pueden generar mayor afectación sobre las producción y transporte de sedimentos en una cuenca hidrográfica corresponden a proyectos, obras y actividades de gran escala que son sujetos de procesos de licenciamiento ambiental. Los lineamientos asociados a dichos procesos de licenciamiento se definieron en la normativa ambiental vigente mediante el Decreto 2041 de 2014, hoy compilado en el Decreto 1076 de 2015 (Presidencia de la República de Colombia, 2015). En el marco de dichos procesos de licenciamiento, se deben identificar los posibles impactos generados por el proyecto, obra o actividad e implementar las medidas para prevenir, mitigar, corregir o compensar dichos impactos.

Por otra parte, con respecto al desarrollo de proyectos, obras o actividades que ocupan el lecho de los cuerpos de agua y, por tanto, pueden llegar a alterar su régimen de caudales líquidos y sólidos, en la Resolución 957 de 2018 del Minambiente, “Por la cual se adopta la Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones” (Minambiente, 2018c), se incorporaron lineamientos para la gestión de sedimentos en obras que impactan dichos regímenes y por ende el funcionamiento hidromorfológico y la calidad y disponibilidad de hábitats acuáticos y sus rondas hídricas. En el anexo III: “Criterios mínimos a considerar para la ocupación de rondas hídricas”, de la Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (Minambiente, 2018c), se menciona que:

“La construcción de estas obras² debe hacerse de tal forma que se garantice la continuidad del transporte de sedimentos que el río lleva considerando sus atributos de magnitud, estacionalidad, duración (e.g. compuertas a diferentes niveles de presa que permitan la descarga continua o periódica de los sedimentos según sea la capacidad de transporte de sedimentos de la corriente para diferentes periodos hidrológicos) y que se respete el caudal ambiental en los términos establecidos por la autoridad ambiental competente. Estos criterios deben incluirse como condicionantes para el diseño de las obras de captación y exigirse en los procesos de licenciamiento ambiental de dichas obras”.

Finalmente, teniendo en cuenta que la construcción de embalses es una de las actividades que mayor impacto genera sobre el régimen de sedimentos de un cuerpo de agua, a continuación, se presenta un resumen de la normativa vigente en el país en relación con el manejo de sedimentos en dicha actividad.

Como parte de los requisitos establecidos en los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA) para proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica, adoptados mediante la Resolución 1519 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017b), se establece que la caracterización del área de influencia deberá incluir la “caracterización del régimen sedimentológico natural de la cuenca aferente al cauce

² Hace referencia a “ocupación de cauces por obras de captación o presas”

principal, así como del área de drenaje asociada al sitio de presa o derivación y de la red fluvial aguas abajo, incluyendo la red receptora de la descarga de aguas turbinadas o trasvases, en el área de influencia del componente, teniendo en cuenta, como mínimo, lo siguiente:

- Identificación y distribución espacial de los procesos geomorfológicos dominantes a red fluvial objeto de análisis.
- Identificación de las zonas de producción y depósito de sedimentos a nivel de cuenca, y estimación del régimen de transporte de sedimentos, a partir de información secundaria. Caracterización física e hidráulica de los tramos representativos de la red de drenaje de acuerdo con los diferentes procesos geomorfológicos dominantes identificados (perfiles longitudinales, secciones topo-batimétricas, anchos de banca llena, distribución granulométrica del material del lecho, morfología del cauce, geometría hidráulica).
- Balance de sedimentos a nivel de cuenca, estimación de las cargas de sedimentos medias y máximas que se pueden presentar en la cuenca en condiciones naturales.
- Estimar las tasas espaciales y temporales de producción y depósito de sedimentos en el área de estudio y el análisis regional de cargas,
- Caracterización de la producción y transporte de sedimentos.
- Identificación de la dinámica fluvial de las fuentes que pueden ser afectadas por el proyecto, así como las posibles alteraciones de su régimen natural respecto a sus características principales como mínimo (magnitud, frecuencia, duración, tasa de cambio, momento de presentación), considerando régimen natural de sedimentos de manera integral.”

Asimismo, para la identificación y evaluación de impactos para el escenario con proyecto, los mencionados términos de referencia establecen que:

“Se debe evaluar la alteración de la dinámica y geomorfología fluvial aguas abajo y aguas arriba del punto de embalse, trasvase o desviación.

Realizar la descripción y análisis del ciclo sedimentológico de la(s) fuente(s) de agua afectada(s), realizando el análisis con y sin proyecto. Dicho análisis debe soportarse mediante la implementación y calibración de un modelo regional de producción/transporte de sedimentos, y un modelo local que permita estimar el impacto de la implementación de estrategias de manejo de sedimentos sobre la geomorfología, la calidad del agua y la ecología del cuerpo de agua, así como simular el lavado de sedimentos del embalse, cuando se produce el vaciado de este.

A partir de un modelo hidráulico simular el transporte de los sedimentos evacuados del embalse durante la maniobra de descarga de sedimentos y verificar la capacidad de transporte y las posibles zonas donde se presente depósito de los mismos. Con los resultados obtenidos, efectuar la simulación de los escenarios críticos (favorables y desfavorables) y con esto realizar la selección de las estrategias de manejo, que permitan establecer: volumen requerido para mantener el funcionamiento del embalse y el volumen requerido para mantener/restaurar el estado ecológico del río.”

3

MARCO INSTITUCIONAL

Por medio de la Ley 99 de 1993 (Presidencia de la República de Colombia, 1993) se creó el Sistema Nacional Ambiental -SINA, el cual, entre otras funciones, constituye la estructura institucional para la implementación de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico. El SINA se define como el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten poner en marcha los principios ambientales y la implementación de la política ambiental del país. Su organización partió de la necesidad de descentralizar el ejercicio del poder público mediante la creación de instituciones responsables de la generación de política ambiental y de su implementación, con miras a la protección del medio ambiente bajo el concepto de desarrollo sostenible.

Actualmente la estructura del SINA se encuentra reglamentada en el libro 1 del Decreto 1076 de 2015 (Presidencia de la República de Colombia, 2015). Con respecto a la gestión integral del recurso hídrico, se resaltan las siguientes instancias del SINA:

- El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, organismo rector del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de formular de manera participativa la política nacional ambiental y de coordinar el SINA, principalmente.
- El Consejo Nacional Ambiental cuyo objetivo es la coordinación intersectorial a nivel público de las políticas, planes y programas en materia ambiental y de recursos naturales renovables.
- Las unidades administrativas especiales adscritas al Ministerio, incluyendo Parques Nacionales Naturales de Colombia y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- Los institutos de apoyo científico y técnico del Ministerio, siendo estratégicos para la gestión integral del recurso hídrico el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” – Invemar.
- Las autoridades ambientales competentes, incluyendo las corporaciones autónomas regionales y las de desarrollo sostenible, las cuales se encargan de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En el marco de lo establecido en la Ley 99 de 1993 (Presidencia de la República de Colombia, 1993) el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es la cabeza del sector ambiental, encargado de desarrollar e instrumentalizar la política ambiental del país. Posteriormente, el Decreto 1682 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) modificó la estructura interna del Ministerio, mediante la creación de los viceministerios de Ordenamiento Ambiental del Territorio y de Políticas y Normalización Ambiental. Este último se encuentra conformado por cuatro direcciones:

- Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos
- Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos
- Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico
- Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Dentro de las funciones de la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico definidas en el artículo 18 del Decreto 3570 de 2011 (Presidencia de la República de Colombia, 2011), están las siguientes:

- Aportar los elementos técnicos para la elaboración de la política y regulación en materia de gestión integral del recurso hídrico continental, así como realizar el seguimiento y evaluación respectivos.
- Proponer las medidas dirigidas a promover el uso y ahorro eficiente del agua, en coordinación con el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Proponer los criterios y pautas generales para la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas.
- Dirigir las acciones destinadas a velar por la gestión integral del recurso hídrico a fin de promover la conservación y el aprovechamiento sostenible del agua.
- Proponer, en coordinación con las dependencias competentes, los criterios de calidad y las normas de vertimiento a los cuerpos de agua continentales.

En este capítulo se presenta una revisión general de los conceptos de: ciclo de sedimentos, régimen natural de flujo y transporte de sedimentos en los sistemas fluviales, así como la respuesta de dichos sistemas como consecuencia de diferentes intervenciones antrópicas.

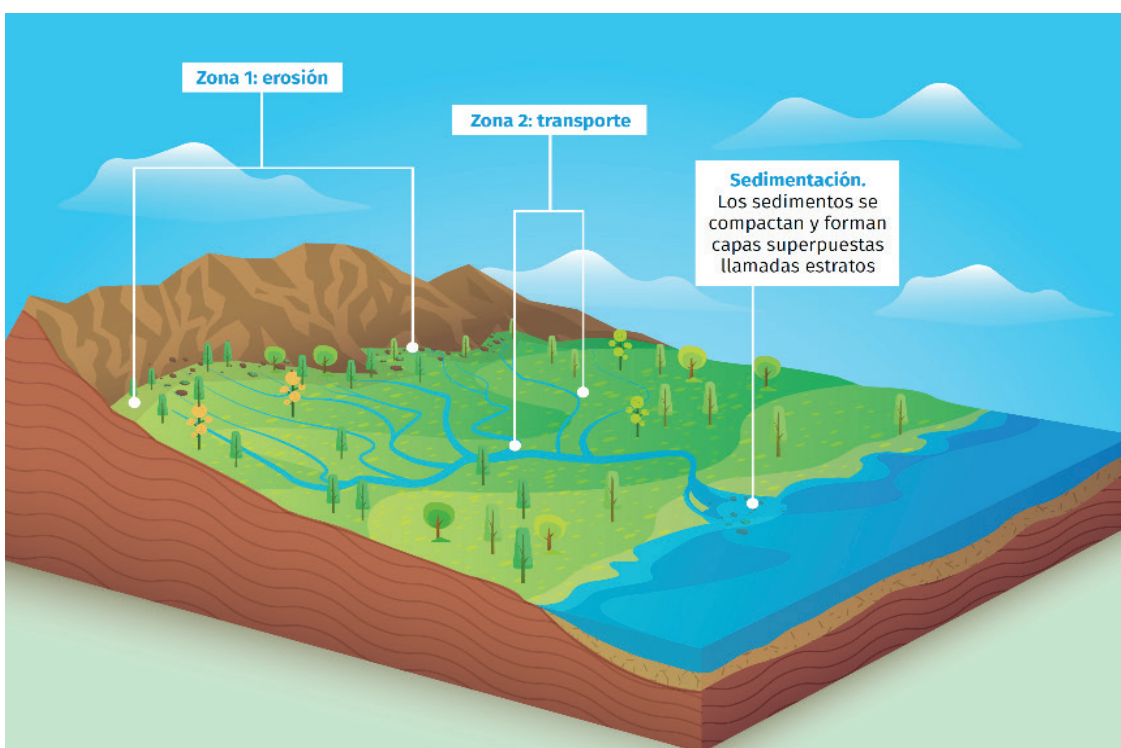


4

MARCO CONCEPTUAL

El ciclo de sedimentos en cuencas hidrográficas comprende los procesos de producción, transporte y depósito. En cuencas hidrográficas se puede generalizar la ocurrencia de estos procesos en zonas específicas de las mismas. Es así como la producción de sedimentos se presenta primordialmente en las zonas altas, el transporte se da en las zonas medias y el depósito en las zonas bajas de las cuencas (figura 1). Esta generalización da cuenta de las condiciones de energía del agente erosivo (el agua) y es válida de forma general, pues no tiene en cuenta otras características que condicionan los procesos de sedimentos, por ejemplo, las coberturas de la tierra, las propiedades de los suelos y el clima.

Figura 1. Ciclo de sedimentos en una cuenca hidrográfica.



Fuente: tomado de Ideam (2019).

Así mismo, Schumm (1977) propone que los sistemas fluviales se pueden subdividir conceptualmente en tres zonas según los procesos dominantes (figura 2), tal como se describe a continuación:

- La zona 1, o zona de producción de agua y sedimentos en la cuenca alta, se caracteriza por presentar fuertes pendientes y predominancia de los procesos de erosión, tanto en el cauce como en el valle. Corresponde a las cuencas de cabecera con alta capacidad de transporte de sedimentos. Predominan los deslizamientos, flujos de escombros y lodos y erosión en cárcavas como procesos de producción de sedimentos. Se presentan

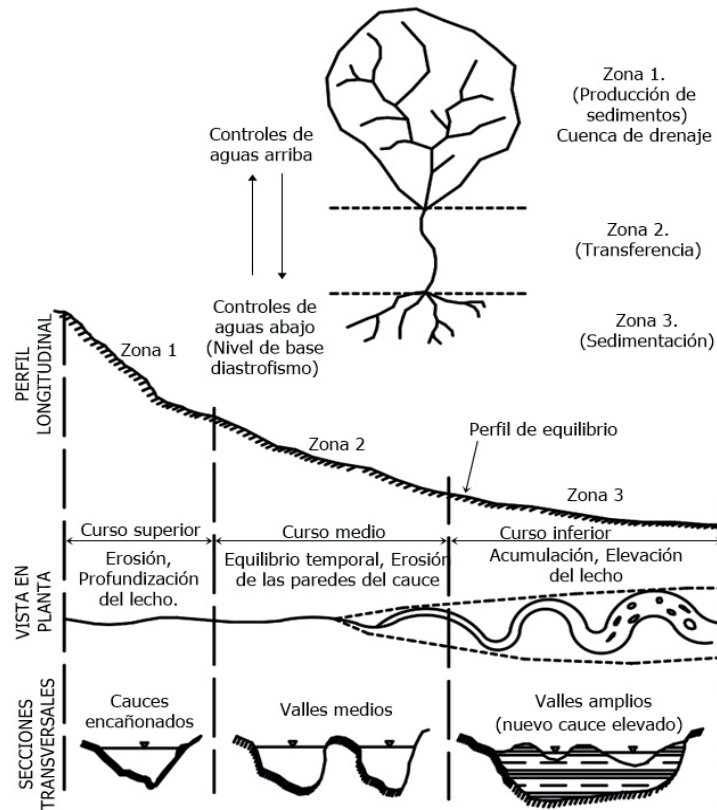
LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

almacenamientos temporales de sedimentos en los tributarios de orden cero y en laderas. Los cauces (ríos de montaña) son encajados en lechos rocosos, sin posibilidad de expansión lateral, alta pendiente, alta velocidad del flujo y presencia de depósitos aluviales temporales. El transporte de sedimentos se da principalmente en eventos de crecidas debido a la removilización de depósitos coluviales y aluviales. En Colombia las zonas de producción corresponden a las cuencas de montaña de las vertientes de los tres ramales de la cordillera andina y de la Sierra Nevada de Santa Marta.

- La zona 2, o zona de transferencia, es el sector por donde se transporta el agua y los sedimentos desde la zona 1 hasta la zona 3; es decir, presenta una condición cuasiequilibrada, ya que no predominan ni los procesos de erosión ni de acumulación de sedimentos en el canal. La transición de esta zona con la zona de acumulación generalmente se manifiesta por la presencia de depósitos aluvio-coluviales en forma de abanicos y conos aluviales. Los almacenamientos de sedimentos se dan en el cauce y en llanuras de inundación y terrazas aluviales en eventos de desbordamiento. Los cauces (denominados ríos de llanura) no están encajonados y con habilidad para expandirse lateralmente, presentan formas trenzadas y formación de barras e islas y cortes y depósitos en el relleno aluvial. En Colombia estas zonas se presentan en las partes bajas de las cuencas y los tributarios principales.
- La zona 3, definida como la zona de depósito o de acumulación de sedimentos, se caracteriza por presentar pendientes suaves tanto en el canal como en el valle (Julien, 2010). Corresponde a la zona de más baja energía de los cauces en su llegada a un tributario, un lago, un embalse o el mar. Se caracteriza por la presencia de deltas y conos aluviales. Los cauces presentan formas meándricas y anastomosadas, con flujo tranquilo. La disipación de energía en los cauces se da por divagación, representada en curvas y cambios de alineamiento. En Colombia se presenta en la desembocadura de algunos ríos a los mayores afluentes del país y a la llegada de estos ríos a los sistemas cenagosos (por ejemplo, la Mojana – Depresión Momposina – Ciénaga Grande de Santa Marta). Además, se encuentran en las colas de los embalses en los que el nivel base de los ríos se ha modificado.

Aunque en las tres zonas se pueden presentar procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos, cada zona presenta procesos dominantes que la definen (Biedenhorn et ál., 2008).

Figura 2. Esquema general de distribución de los sistemas fluviales según Schumm (1977).



Fuente: adaptado de Julien (2010).

Los esquemas mostrados en la figura 2 deben considerarse en los análisis tendientes al manejo de sedimentos a escala de cuencas puesto que, dependiendo de la zona en que se encuentre el objeto de análisis, se definirán acciones concretas sobre este objeto según sean los procesos dominantes.

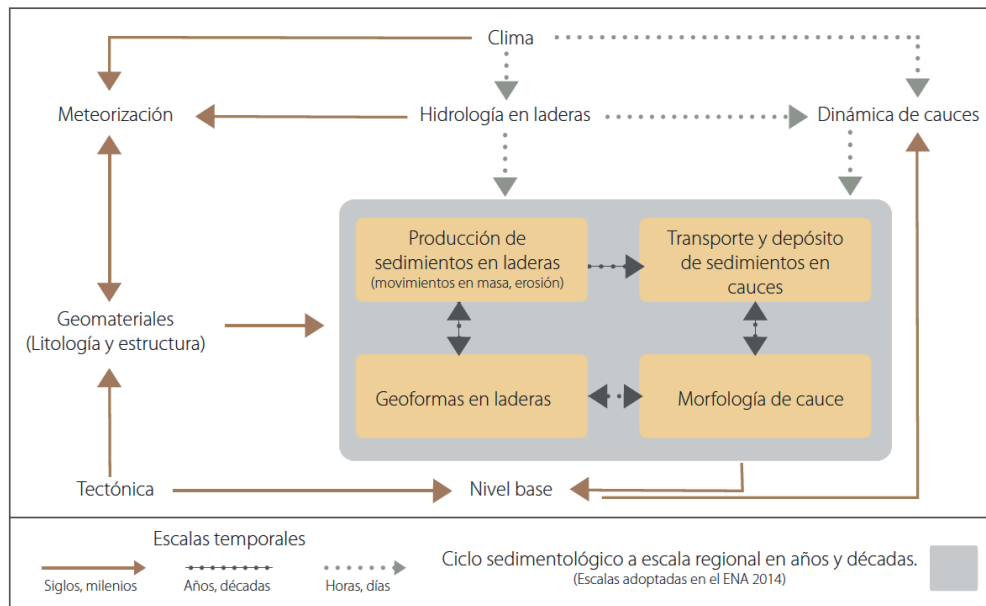
4.1. ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES DEL CICLO DE SEDIMENTOS

Con respecto a las escalas espaciales y temporales, el esquema mostrado en la figura 3 relaciona las escalas de los procesos con las geoformas producidas. Las escalas espaciales se enmarcan en los elementos fundamentales de las cuencas hidrográficas: las laderas en las que se dan los procesos de producción de sedimentos y los cauces los cuales se encargan de transportar los sedimentos. Según sea el objetivo del análisis, algunos elementos y escalas son considerados condiciones de frontera y no se consideran. En diseño ingenieril y planificación del territorio, no se consideran procesos en

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

escalas temporales de siglos y milenios tales como los cambios en las geoformas en laderas y cauces, cambios en los niveles bases debido a levantamientos tectónicos, cambios litológicos y estructurales ni procesos de meteorización. Las escalas temporales comprenden años y décadas. Tampoco se consideran eventos que ocurren en escalas temporales subdiarias, tales como las dinámicas de cauces en eventos extremos.

Figura 3. Componentes del ciclo de sedimentos en diferentes escalas temporales y espaciales.

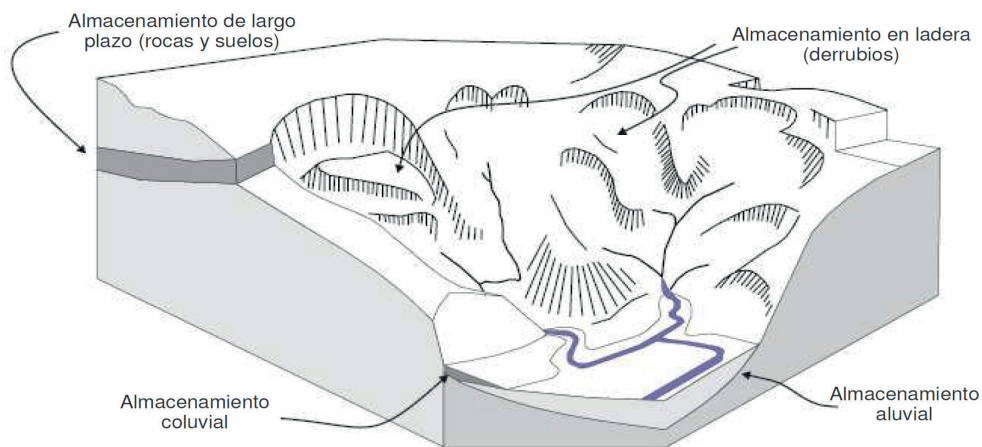


Fuente: tomado de Ideam (2015a), modificado de Preston & Schmidt (2003).

Dependiendo de la escala de análisis (espacial y temporal), varios de estos componentes pueden considerarse como elementos dinámicos del sistema, sujetos a presentar variaciones, y otros pueden considerarse como condiciones de frontera externas (Schumm y Lichty, 1965). Además, el sistema físico está sujeto a entradas de energía y a la aplicación de fuerzas de acuerdo con los procesos geomorfológicos que estén actuando. Al igual que los componentes físicos del sistema, algunas entradas de energía y procesos pueden hacer parte de las condiciones de frontera, mientras que otras actúan dinámicamente en el sistema.

Según Chorley y Kennedy (1971), el flujo de sedimentos en el paisaje puede concebirse como un sistema proceso - respuesta, considerando la morfología como un factor que controla los procesos y al mismo tiempo un producto de la evolución del sistema. Así, están implícitos en la definición del sistema los flujos de materia y energía. Los flujos de sedimentos, en un contexto sistémico, están concebidos como una serie de geoformas en el paisaje en las cuales los sedimentos se almacenan en diversidad de longitudes de tiempo (figura 4).

Figura 4. Esquema de un paisaje a escala de cuenca, se observan diferentes almacenamientos de sedimentos.



Fuente: adaptado de Preston y Schmidt (2003).

Debido a la diversidad de relaciones magnitud y frecuencia de los procesos que actúan en un sistema geomorfológico, las escalas temporales y espaciales se encuentran inevitablemente truncadas, en especial debido a la respuesta compleja y las diferentes reacciones de las geoformas de diferente magnitud a perturbaciones idénticas (Schumm, 1973, 1979).

Cuando se requiere analizar el ciclo de sedimentos es necesario considerar dos escalas de análisis: escala de tramo de corriente o escala de cuenca hidrográfica. Aunque ambas escalas están estrechamente relacionadas, según sea el objetivo del análisis, se define cual escala será la más importante. Por ejemplo, si se requiere analizar los impactos sobre el ciclo de sedimentos de obras hidráulicas (puentes, diques, embalses, puertos fluviales) será más relevante el estudio a escala de tramo de corriente. Si se requiere analizar los impactos de cambios en los usos del suelo sobre los aportes de sedimentos de una cuenca, el análisis debe profundizar en la escala de cuenca. En la figura 11 se esquematizan las escalas de análisis del ciclo de sedimentos.

4.2. EL CICLO DE SEDIMENTOS EN UNA MIRADA INTEGRAL

Una manera práctica de considerar de forma integral el ciclo de sedimentos tanto a escala de tramo de corriente como de cuenca es la propuesta por Julien (2010). Este acercamiento se basa en reconocer que los procesos de erosión, transporte y sedimentación que se presentan en flujos de agua, dependen tanto de la cantidad de material disponible como de la capacidad que tiene el flujo para arrancar y transportar esta cantidad de material. De esta forma la cantidad de material que puede transportar una corriente de agua depende de dos grupos de variables (Julien, 2010):

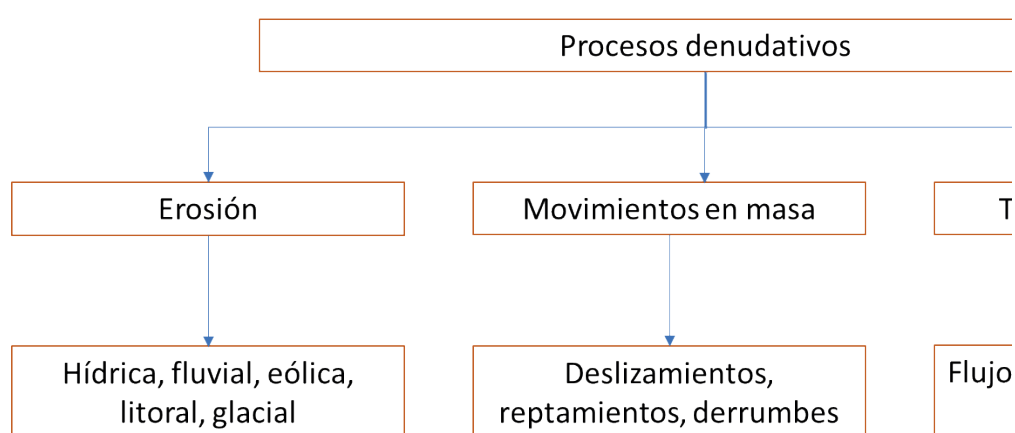
- Aquellas que gobiernan la capacidad de transporte de sedimentos de una corriente, tales como la geometría del cauce, la pendiente, la rugosidad, la distribución de las velocidades, las fuerzas de fricción, la turbulencia y el caudal, entre otras.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

- Aquellas que reflejan la cantidad y las propiedades de los materiales disponibles para el transporte, tales como la magnitud, intensidad y duración de la lluvia, la vegetación, la granulometría del suelo, la cohesión de los agregados, los movimientos en masa, entre otras.

Julien (2010) presenta una gráfica que resume estos conceptos (figura 5).

Figura 5. Capacidad de transporte vs. suministro de sedimentos.



Fuente: adaptado de Julien (2010).

Es difícil efectuar un análisis cuantitativo para determinar la cantidad de sedimentos disponibles en una corriente de agua debido a la complejidad de procesos físicos actuantes en toda el área de captación y a la variabilidad espacial y temporal de todos los parámetros involucrados en la erosión, los desprendimientos de banca y movimientos en masa que se dan en un evento de lluvia particular. Sin embargo, la capacidad de transporte de sedimentos en un cauce puede tratarse de forma analítica. A continuación, se tratan los aspectos conceptuales más relevantes a la producción y transporte de sedimentos con relación al manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica.

Tanto el suministro de sedimentos como la capacidad de transporte responden a una dinámica natural que debe permanecer para conservar las ofertas ambientales del río, pero que al desconocerlo trae problemas para la convivencia con los ríos y su aprovechamiento.

El río tiende a equilibrarse en el mediano plazo (Richards, 1982) ajustando naturalmente una capacidad de transporte, es decir la capacidad de llevar estos sedimentos con el flujo líquido. Para ello el río establece su propia geometría, de modo que transporte los volúmenes de sedimento que la cuenca suministra (Richards, 1982), gracias a unos procesos retroalimentados

positivamente que tienden al autoajuste (Montoya, 2008), con ritmos íntimamente ligados con la variabilidad hidrológica. Sin embargo, los cauces equilibrados se presentan sólo donde la morfología y sus controles asociados permiten el desarrollo de un valle aluvial, para que el río labre la sección de flujo sobre su propio sedimento.

De esta manera, a cada río o drenaje se le reconoce una capacidad de transporte, es decir la cantidad de sedimentos que pueden transportar. La capacidad de transporte presenta un comportamiento inverso a la producción. De manera que entre más sedimento se produce menor capacidad tendrá de transportar el cauce.

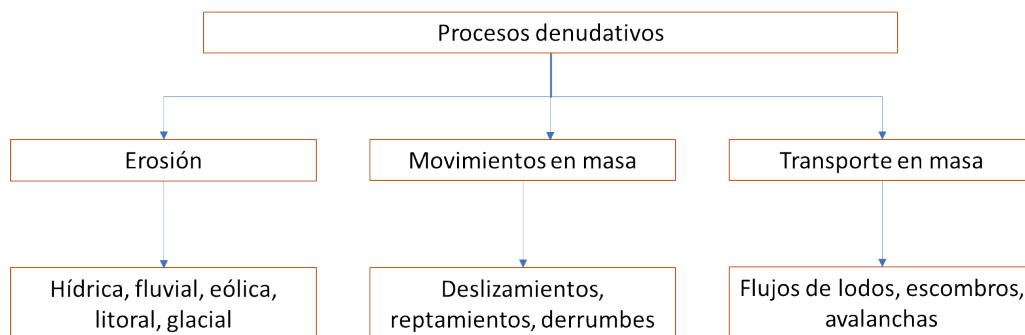
Los tramos de cauce aluvial, aunque se asumen balanceados entre entrada y salida de sedimentos (Morris & Fan, 2010) en la escala de años-décadas, con su geometría hidráulica en torno a un equilibrio (Mesa, 1990; Richards, 1982), alteran su morfología por desajustes de pendiente o suministro de agua o sedimento; debido por ejemplo a la deficiente operación de obras transversales (Brandt, 2000). Esto implica alteraciones del hábitat acuático, niveles freáticos y vegetación ribereña, navegabilidad e inundaciones (Richter et ál., 2010); además afecta márgenes, estructuras antrópicas y deltas continentales y costeros. Por eso la planeación de intervenciones debe procurar que se reduzcan los impactos, alterando poco la capacidad de transporte natural, lo que implica conocer la magnitud y el régimen del sedimento que llega desde la cuenca.

4.3. LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Los paisajes son dinámicos. Las rocas que afloran en la superficie terrestre están expuestas a la acción de agentes meteóricos y condiciones físicas, químicas y biológicas diferentes a las de su formación. Este desequilibrio hace que los constituyentes de las rocas se degraden y cambien, fenómeno conocido como meteorización. Las rocas meteorizadas se disgregan y se desprenden por la acción del agua, el viento, la nieve o la gravedad. Estos procesos se denominan denudativos y en largos períodos de tiempo forman la gran variedad de paisajes que observamos en la actualidad.

En la figura 6 se esquematizan las clases de procesos denudativos y algunos ejemplos. La diferencia fundamental entre los procesos erosivos y los movimientos y transporte en masa es que los primeros se presentan en partículas individuales mientras que los segundos se presentan en partículas agregadas.

Figura 6. Clases de procesos denudativos.



LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

No en todos los climas y paisajes se presentan todos los tipos de procesos denudativos y algunos de ellos son restringidos a ciertos paisajes. Cuando se analiza la producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica, es importante acotar cuáles procesos son los relevantes y concentrar los esfuerzos en la caracterización de estos. En la mayor parte de Colombia, en la que predominan condiciones climáticas húmedas y presencia de coberturas de vegetación, la producción de sedimentos se da principalmente por erosión hídrica y movimientos y transporte en masa. En zonas áridas y desérticas se debe considerar la erosión eólica, en zonas costeras la erosión litoral y en picos nevados la erosión glacial.

Cuando se considera el ciclo de sedimentos según los procesos fundamentales de producción, transporte y depósito de sedimentos, se hace evidente la dificultad inherente a la caracterización y cuantificación de la producción de sedimentos. Esto se debe a que la producción de sedimentos se da en toda la cuenca de captación que incluye múltiples laderas y cauces, a que involucra diversos procesos complejos (erosión hídrica, movimientos en masa, erosión fluvial, fuentes puntuales de sedimentos) y a que al interior de la cuenca se presentan procesos de transporte y depósito de sedimentos.

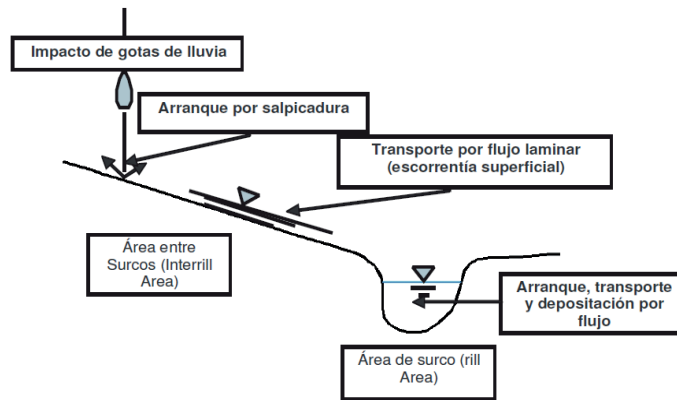
Estas complejidades y dificultades se abordan de forma práctica por medio de la modelación de procesos de producción de sedimentos. Al revisar diversas estrategias de análisis de sedimentos a diferentes escalas, se observa que la producción de sedimentos se estima y caracteriza por medio de la modelación y sólo en casos de parcelas experimentales se recurre a la medición.

4.3.1. Erosión hídrica en ladera

La erosión hídrica en ladera ocurre cuando el agua adquiere la energía suficiente para generar procesos de disgregación de la roca o del suelo, su movilización y transporte y es causada por la escorrentía superficial en eventos de lluvia. Es el tipo de erosión más estudiada y con mayor número de modelos debido a que afecta grandes extensiones y a que erosiona el horizonte superficial del suelo. Este horizonte es el que contiene materia orgánica y es soporte para la vegetación. De esta forma, cuando la erosión hídrica en ladera tiene altas tasas, las repercusiones económicas y sociales pueden ser severas. Además, es uno de los principales mecanismos de la desertificación.

La erosión hídrica en ladera se da de forma laminar y concentrada. Esta distinción se encuentra estrechamente relacionada con la ocurrencia de flujo de agua en ladera, el cual se da laminar o concentrado. Además, la erosión hídrica en ladera comprende los procesos de desprendimiento por impacto de gota de lluvia y arranque por salpicadura (figura 7).

Figura 7. Procesos erosivos en ladera.



Fuente: adaptado de Hagen y Foster (1990).

Cuando se analiza la erosión hídrica en ladera a escala de cuenca hidrográfica, la cual está compuesta por numerosas laderas y microcuencas, se recurre a la modelación. Los procesos de erosión hídrica resultan de la operación de leyes físicas y químicas que se suponen de aplicación universal, puesto que los modelos de erosión tratan de describir estos procesos es de esperarse que existan puntos en común en los modelos presentes en la literatura, lo cual no es cierto teniendo en cuenta la multitud de modelos con diferentes enfoques. Estas diferencias se dan básicamente por la conceptualización que cada modelo hace del sistema representado (el paisaje) y las relaciones matemáticas adoptadas, ya sea que tengan un sentido físico o que se basen en relaciones empíricas.

Las técnicas de predicción de la erosión se utilizan de forma sistemática desde aproximadamente 1940 como una herramienta para la planificación de sistemas de cultivos y para la adecuación de medidas de conservación del suelo. Esta aproximación se basa en la evaluación de varios sistemas de conservación alternativos para optar por aquel en el cual el valor calculado para la erosión total sea igual o menor que un valor de pérdida de suelo tolerable para cada suelo y situación de cultivo particular (Follett y Stewart, 1985). Luego de un análisis empírico a partir de una gran cantidad de datos tomados en parcelas de erosión en más de 40 localidades de los Estados Unidos de América, se desarrolló la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) por un grupo de trabajo de investigadores dirigidos por W.H. Wischmeier (Wischmeier y Smith, 1978).

Alternativamente, se implementó la USLE en otras partes del mundo y se realizaron numerosas investigaciones para adecuar los factores de la ecuación en zonas con características diferentes de las que se dedujeron inicialmente. Posteriormente se efectuaron investigaciones tendientes a revisar y actualizar los factores de la USLE obteniéndose la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés) (Renard et ál., 1989). Esta modificación se limitó a la transformación de los factores de la anterior USLE, pero no cambió su estructura.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

La agregación temporal de la ecuación se basa en condiciones medias anuales, así el resultado de la aplicación de la USLE y la RUSLE en una zona es la masa total de sedimentos producidos por superficie de terreno por año. Como un intento por utilizar la estructura de la USLE en eventos de lluvias generadores de erosión se desarrolló la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (William, 1975), que analiza eventos en vez de condiciones medias anuales.

La masificación y modernización de la agricultura se presenta unas décadas más tarde en Europa y consecuentemente la necesidad de desarrollar modelos de erosión se da posteriormente que en Estados Unidos (Jetten y Favis-Mortlock, 2006).

Una vez se reconocen y aceptan las limitaciones inherentes a los modelos basados en la USLE se hizo evidente la necesidad de desarrollar una nueva generación de modelos, tanto en Estados Unidos como en Europa. Estos modelos presentan variaciones en cuanto a las escalas de análisis, la conceptualización del sistema, los procesos tenidos en cuenta, la estimación de parámetros, la forma de discretizar el espacio y el tiempo, y las relaciones matemáticas utilizadas; en general, tienen en común su base física, en mayor o menor medida, y la integración espacial de áreas en las cuales los procesos que actúan se pueden diferenciar.

Son varias las formas de clasificar los modelos de erosión. Se pueden clasificar de acuerdo con la escala de análisis, que en el caso de la escala espacial varía desde la escala de parcela experimental hasta modelos de escala continental; en el caso de la escala temporal, se encuentran modelos de eventos con intervalos de simulación del orden de minutos o segundos hasta modelos de evolución de paisajes en donde es necesario considerar varios miles de años.

Otra forma de clasificación es de acuerdo con la forma en que el modelo representa el sistema físico (por ejemplo, la representación de la topografía). Además, es posible clasificar los modelos de acuerdo con la forma de encontrar las relaciones que explican los procesos de erosión: los métodos de evaluación empíricos y los que tienen base física.

La mayoría de los modelos de erosión son de tipo híbrido incluyendo tanto componentes empíricos como teóricos (Haan et ál., 1994). Los modelos empíricos, donde el más aceptado y usado es el método de la USLE (y sus derivados), se usan principalmente con fines de planificación territorial e interventoría de recursos naturales. Los modelos basados en procesos se basan en un mejor entendimiento de los principios físicos que actúan en la naturaleza, pero exigen gran cantidad de datos y más recursos computacionales, dificultando su implementación en situaciones reales. Los esfuerzos actuales en la modelación geomorfológica se centran en los modelos basados en procesos, discretizados tanto en el espacio como en el tiempo (Hagen y Foster, 1990).

4.3.1.1. Modelos de erosión empíricos

La totalidad de modelos de erosión empíricos que se encuentran en la literatura o que se utilizan actualmente en programas computacionales disponibles, se derivan de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

La USLE se diseñó para parcelas dedicadas a la agricultura, es válida para áreas de 1 hectárea. La USLE toma en cuenta la longitud de la pendiente (factor L), la inclinación (factor S), el clima (factor R), los suelos (factor K), el cultivo (factor C) y el manejo del suelo (factor P).

La ecuación evalúa la pérdida de suelo producida por la erosión hídrica por flujo laminar y en surcos en zonas en donde

no hay formación de cárcavas, no estima el transporte de sedimentos de la red fluvial ni la erosión que se deriva en las márgenes y lechos de los ríos.

La USLE y sus derivados son modelos totalmente empíricos y su bondad depende del rigor con que los multiplicandos que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio, por lo que se limita su capacidad de extrapolación a condiciones ambientales diferentes.

4.3.1.2. Modelos de erosión basados en procesos

Las técnicas y métodos de estimación de la erosión hídrica basados en procesos se caracterizan por utilizar relaciones matemáticas para describir los procesos fundamentales que actúan, esto es, el arranque, el transporte y la sedimentación, tanto de partículas individuales del suelo como de agregados.

Otra característica de los modelos de erosión basados en procesos es la integración espacial de áreas en las cuales los procesos que actúan se pueden diferenciar. Hagen y Foster (1990) indican el concepto de área fuente y señalan que la mayoría de los modelos de erosión basados en procesos dividen el paisaje en las siguientes áreas fuentes: áreas entre surcos, surcos y cárcavas efímeras, mientras que las zonas de acumulación se encuentran en las depresiones del terreno. Estas áreas representan elementos hidrológicos que pueden interrelacionarse de acuerdo con los patrones de flujo del paisaje.

El paisaje es representado y analizado como un conjunto de áreas entre surcos, en donde los procesos de erosión se dan por el impacto de las gotas de lluvia y por flujo superficial en ladera (laminar); y una red de surcos en donde se presentan procesos de arranque, transporte y sedimentación debido al flujo concentrado y turbulento del agua.

Los modelos de erosión basados en procesos tratan cada uno de los procesos de forma independiente, basados en relaciones matemáticas empíricas o con base física que relacionan propiedades del suelo con factores de erosionabilidad y con esfuerzos tangenciales producidos por los flujos de agua debido a las acumulaciones de flujo, ya sea en zonas entre surcos, en surcos o en cárcavas.

4.3.2. Movimientos en masa

Los movimientos de masa son desplazamientos del terreno en una ladera natural o un talud artificial que ocurren por la pérdida de equilibrio de la masa de suelo o roca debido a cambios internos de sus propiedades físicas. Normalmente estos cambios se asocian con cambios en la humedad del material o con alteraciones de las condiciones naturales de estabilidad (cortes debido a obras civiles, socavación fluvial de la base de la ladera, cambios en las coberturas vegetales).

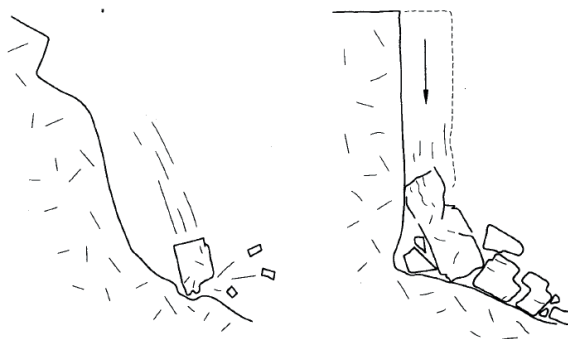
De las diversas clasificaciones que se encuentran en la literatura de los movimientos en masa encontrados en laderas y taludes, una forma práctica y útil de clasificación es según el mecanismo de ruptura del material. Se utilizará la clasificación propuesta por Corominas y García Yagüe (1997).

4.3.2.1. Movimientos con predominio de la trayectoria vertical

Los movimientos con predominio de la trayectoria vertical se presentan debido a la acción de la fuerza de la gravedad, el peso ejercido por una masa de roca o suelo adyacente o por la acción de fluidos en grietas preexistentes.

Desprendimientos y colapsos: se caracterizan por el despegue de una masa de suelo o roca de una ladera o talud de alta pendiente y el posterior descenso mediante caída libre y rodadura final a una alta velocidad (figura 8). En muchos casos, los desprendimientos y colapsos preceden a roturas de ladera de grandes proporciones (Corominas & García Yagüe, 1997). Un ejemplo son los colapsos ocasionados por la socavación de un río o el oleaje marino de la parte inferior de una ladera de alta pendiente.

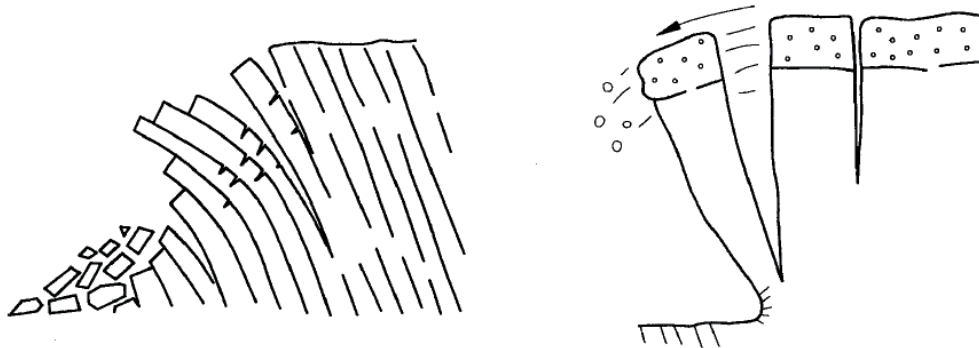
Figura 8. Desprendimientos y colapsos.



Fuente: Corominas & García Yagüe (1997).

Vuelcos: se trata de la rotación de una masa de suelo o roca hacia el exterior de una ladera o talud que involucra su caída alrededor de un eje desplazado por debajo del centro de gravedad de la masa. Se pueden diferenciar dos tipos de vuelcos: vuelco por flexión cuando las discontinuidades se rompen por flexión hacia adelante, y vuelco por desplome cuando masa normalmente en bordes de acantilados se desploma girando apoyada en la base inferior (figura 9).

Figura 9. Desprendimientos por flexión (izquierda) y por desplome (derecha).



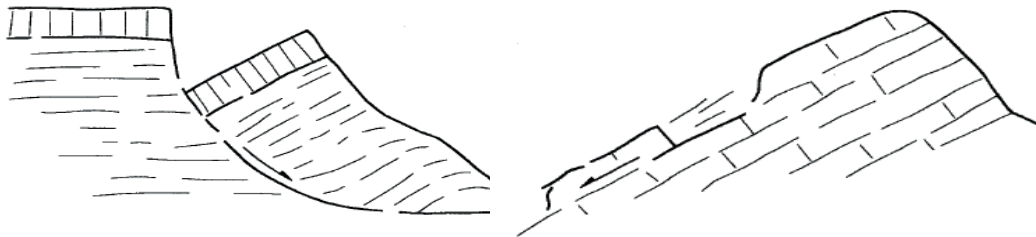
Fuente: Corominas y García Yagüe (1997).

4.3.2.2. Desplazamientos en masa

Deslizamientos: son movimientos de masas de suelo o roca que ocurren ladera abajo sobre una o varias superficies de rotura y pueden ser rotacionales y traslacionales. Las masas se desplazan a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada, pudiendo deslizar posteriormente sobre la superficie del terreno original y proseguir, si la inclinación es suficientemente fuerte (Corominas & García Yagüe, 1997).

En los deslizamientos rotacionales el terreno experimenta un giro a lo largo de una superficie de rotura curvilínea y cóncava. Se presentan en suelos no cohesivos homogéneos con alta presencia de agua. Por su parte, en los deslizamientos traslacionales las superficies pueden coincidir con planos estructurales o en horizontes de meteorización. Son comunes en macizos rocosos intensamente diaclasados. Los componentes de la masa desplazada se mueven con la misma velocidad y trayectorias paralelas, pudiendo fragmentarse o disgregarse si posteriormente aumenta su velocidad, derivando en un flujo más que en deslizamiento (figura 10).

Figura 10. Ejemplos de deslizamientos (izquierda rotacional, derecha traslacional).



Fuente: Corominas y García Yagüe (1997).

Reptamientos: se trata de movimientos viscosos muy lentos asociados a una deformación continua de terrenos no consolidados o relativamente sueltos, sin rotura o falla del mismo a lo largo de zonas planas sometidas a corte. Afectan principalmente a los depósitos y a los suelos residuales, pero pueden presentarse también en rocas. Afectan grandes extensiones y son difíciles de controlar; se asocian con zonas deforestadas o intervenidas de manera inadecuada. Los reptamientos se evidencian en árboles inclinados, grietas y afectaciones estructurales en obras civiles, movimientos y grietas en vías.

Subsidencia: se trata de desplazamientos verticales del terreno, asociados a remoción o consolidación del material subyacente. Son comunes en las zonas superiores de obras subterráneas (túneles, minería subterránea).

4.3.2.3. Transporte en masa

En el transporte en masa se incluyen los movimientos de material normalmente removido por procesos de deslizamientos, caídas o rupturas que con la presencia de altos contenidos de agua se mueve como un fluido viscoso y no newtoniano. Normalmente se presentan asociados a eventos catastróficos por su alto impacto social y económico.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Flujos: los flujos involucran mezclas de agua y materiales sueltos que se desplazan a lo largo de canales o depresiones. Los flujos de detritos (también llamados flujos de escombros) comprenden fragmentos de roca de diferente tamaño embebidos en matriz fina. Los flujos de tierras comprenden materiales predominantemente finos, y suelen ser más lentos que los flujos de escombros. Una vez el material del flujo cesa de moverse, produce un depósito con propiedades morfológicas: una zona de alimentación en la parte superior, el canal y el cono de deyección. Estos rasgos hacen posible su delimitación y caracterización a partir de trabajo de campo.

Avalanchas: estos procesos se definen como enormes volúmenes de rocas y detritos que se desplazan con extraordinaria rapidez a lo largo de hondonadas, aprovechando en parte los cauces naturales. La expresión morfológica de estos procesos es similar a la descrita para los flujos de detritos y tierras.

4.3.3. Fuentes puntuales de sedimentos

Al analizar la producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica es necesario considerar las fuentes puntuales de sedimentos. Estas fuentes están asociadas a actividades antrópicas de extracción minera de diversos tipos. Se hace necesario considerar, caracterizar y cuantificar la producción de sedimentos de las siguientes fuentes puntuales de sedimentos.

- Extracción de minerales tanto a cielo abierto como subterráneas.
- Explotación de material de arrastre para la industria de la construcción.
- Explotación de oro en aluvión. Cabe mencionar el impacto ocasionado por la explotación ilegal de oro de aluvión.
-

4.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sistemas fluviales que involucran la cuenca, los canales, el valle, la geología, el clima, el régimen hidrológico, el uso del suelo, entre otros componentes, manifiestan su respuesta en el río, el cual cumple la función natural de recoger y transportar el agua y los sedimentos a través de las cuencas (Schumm, 1977). Cuando el cauce de un río se modifica localmente, el cambio, por lo general, ocasiona perturbaciones en las características del canal tanto aguas arriba como aguas abajo, que pueden prolongarse por grandes distancias (Posada, 2002).

Generalmente, los análisis cualitativos de la respuesta de los ríos ante alteraciones en su régimen de caudales líquidos o sólidos se fundamentan en la relación de proporcionalidad propuesta por Lane (1955), en la cual se establecen las condiciones de equilibrio entre las características hidráulicas y las condiciones sedimentológicas del canal, dadas por el producto del caudal dominante (Q) y la pendiente de fondo del canal (S), que es proporcional al producto de la capacidad de transporte del cauce Q_s y el tamaño medio de los sedimentos D_{50} , según la siguiente relación:

$$Q S \sim Q_s D_{50}$$

Cuando se modifica una o varias de estas variables, el transporte de sedimentos en el río se modifica a través de cambios en los procesos morfológicos y dinámicos, buscando alcanzar un nivel de equilibrio a largo plazo. Esta condición de equilibrio de un río se alcanza cuando el potencial energético, definido principalmente por la pendiente longitudinal del lecho, es

suficiente para transportar los sedimentos que le llegan a través del sistema fluvial (Rodríguez, 2010). Teniendo en cuenta que los caudales líquidos transportados por un río, así como la tasa de producción de sedimentos de las cuencas hidrográficas, varían a lo largo del tiempo y del espacio, se entiende que la condición de equilibrio no es permanente, sino que cambia en el tiempo, de modo que en general los ríos tienden a mantener un equilibrio dinámico (Biedenhorn et ál., 2008).

4.4.1. Régimen natural de flujo

Teniendo en cuenta que el transporte de sedimentos incluye procesos físicos que ocurren en toda la cuenca y tiene implicaciones regionales en la salud de los ecosistemas y en la respectiva provisión de servicios ecosistémicos, se ha recopilado información relacionada con el régimen natural de sedimentos en las cuencas. El objetivo consiste en ilustrar los principales atributos de dicho régimen y su importancia desde el punto de vista de la cuenca, con el fin de establecer, a futuro, las medidas que se deberían implementar para gestionar de forma adecuada los regímenes de caudales sólidos y líquidos.

El régimen natural de flujo hace referencia a los patrones característicos del río en términos de sus caudales, periodicidad y variabilidad en diferentes escalas temporales: horarias, diarias, estacionales, anuales e incluso mayores. El régimen integra el flujo de agua y sedimentos en relación con su magnitud, frecuencia, duración, distribución temporal y tasa de cambio (Poff et ál., 1997).

La composición biótica, la estructura y la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos dependen ampliamente del régimen hidrológico (Richter et ál., 2010). Los fenómenos del régimen hidrológico como los flujos medios y los picos altos y bajos son críticos para la integridad del río como un ecosistema, dado que tienen la capacidad de formar y mantener distintos hábitats y de generar dinámicas en las que el canal se modifica continuamente. Por ejemplo, las descargas a banca llena con capacidad de transportar cantidades significativas de sedimentos de las bancas y del lecho con suficiente frecuencia, son determinantes para la formación de barras o de secuencias de rápidos y remansos (Poff et ál., 1997; Wolman & Miller, 1960).

El régimen de caudales no actúa sólo como un transformador de las características físicas asociadas con el arrastre de sedimentos y la formación de la estructura geomorfológica del canal. La estructura y la función de la vegetación de ribera y acuática también dependen ampliamente del régimen de flujo, el cual genera variaciones temporales en la disponibilidad de humedad en la zona ribereña (Gurnell et ál., 2012). Por otro lado, el régimen de flujo juega un papel fundamental en la adaptación y evolución de las especies de ribera (Wohl et ál., 2015), dado que dichas especies tienen diferentes tolerancias y respuestas de crecimiento frente a las inundaciones y cambios en el régimen de flujo, lo que las hace sensibles a los procesos hidrológicos y sus variaciones características (Erskine et ál., 2009; Gurnell et ál., 2012).

4.4.2. Régimen natural de sedimentos

A pesar de que, comúnmente, los sedimentos han sido vistos como una alteración o un contaminante que debe ser minimizado en los cuerpos de agua, actualmente se reconoce que son tan importantes como el agua y que hacen parte integral del ecosistema y de la cuenca hidrográfica (Brils, 2008), por lo que su comprensión se debe incluir en la gestión integral del recurso hídrico. El hábitat físico en ríos se encuentra condicionado por los procesos de transporte de sedimentos,

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

los cuales determinan aspectos como la morfología del cauce, las condiciones y heterogeneidad del lecho, el régimen de alteraciones, la estructura de las comunidades y la calidad del agua. Aspectos como la dinámica espacio-temporal de los hábitats acuáticos, la cual se encuentra asociada a procesos de erosión y sedimentación, surgen de las interacciones entre agua y sedimentos (Wohl et ál., 2015a).

Es importante tener en cuenta que en la caracterización del régimen de sedimentos con propósitos de gestión se deben incorporar las particularidades propias de la escala de trabajo. De acuerdo con Wohl et ál. (2015a), aunque los factores que operan a escala de cuenca condicionan y determinan el régimen de sedimentos, los procesos que ocurren a escalas menores (por ejemplo, a escala de tramo) son los que ejercen mayor control sobre las condiciones de abundancia, distribución y estabilidad de hábitats, en las escalas temporales de interés para implementar medidas de gestión. En todo caso, no se deben desconocer las interacciones que ocurren a nivel de cuenca, incluidas las interconexiones entre cuerpos de agua naturales, artificiales y trasvases, pues estas son necesarias para entender y caracterizar los procesos que ocurren a escala de tramo. En este sentido, como parte de los lineamientos propuestos en el presente documento se incluye una metodología de análisis y clasificación geomorfológica de sistemas hídricos que permite identificar, caracterizar y analizar las diferentes unidades morfológicas de los cuerpos de agua, y así establecer un vínculo entre las características físicas, químicas y biológicas de los mismos (Belletti et ál., 2017).

El régimen de sedimentos también guarda relación con las comunidades biológicas de los ecosistemas acuático y de ribera. Muchos organismos acuáticos dependen de la presencia de determinados tamaños de material para diferentes etapas de su vida, e incluso la movilidad de los sedimentos puede llegar a ser importante para determinados procesos biológicos (Wohl et ál., 2015a). Los sedimentos pueden generar condiciones de retención de humedad y estabilidad que facilitan el crecimiento de vegetación de ribera, en función de los tamaños del material depositado en las orillas del cauce (Wohl et ál., 2015a). Por lo tanto, los patrones de organización de los ecosistemas acuáticos y las adaptaciones de las especies asociadas tanto en el cuerpo de agua como en su ronda hídrica reflejan las variaciones temporales y espaciales de los regímenes de agua y sedimentos en un cuerpo de agua.

La continua y compleja interacción entre el transporte de agua y sedimentos en un cuerpo de agua genera condiciones aptas para el desarrollo de estructuras y hábitats dinámicos (Wohl et ál., 2015b); por lo tanto, la gestión integral de los cuerpos de agua y sus rondas hídricas debe realizarse de forma conjunta, incorporando el régimen de caudales líquidos y sólidos a los análisis realizados. Sin embargo, la incorporación del régimen de sedimentos en el análisis integral de un cuerpo de agua implica grandes retos como consecuencia de la escasez de información, la alta dinámica y complejidad de los procesos de transporte de sedimentos y la incertidumbre asociada a los mismos. La respuesta de los ríos ante cambios en la cantidad de agua y sedimentos que transportan ocurre a escalas temporales y espaciales substancialmente diferentes (Wohl et ál., 2015b).

Esta complejidad asociada al transporte de sedimentos contrasta con la gran importancia que dicho transporte tiene sobre la condición ecológica de los cuerpos de agua. Aunque la escasez de información y desconocimiento del régimen espacial y temporal de sedimentos dificulta la toma de decisiones relacionadas con su adecuado manejo, en la actualidad se cuenta con herramientas y marcos conceptuales que pueden proporcionar información acerca del tipo y grado de alteración de los procesos de producción, transporte y almacenamiento de sedimentos, así como los resultados de eventuales medidas de manejo (Wohl et ál., 2015b).

4.4.3. Balance de sedimentos y caracterización del régimen de sedimentos

La caracterización del régimen de sedimentos incluye procesos como su producción en las partes altas de la cuenca, las entradas (erosión, socavación, etc.) y salidas (sedimentación, áreas de desborde, etc.) y el almacenamiento, tanto en el cauce principal como las zonas inundables. Todos estos procesos se desarrollan en escalas temporales y espaciales características y se relacionan de acuerdo con el modelo conceptual simple presentado en las siguientes ecuaciones y en la figura 11 (Wohl *et ál.*, 2015a).

$$\Delta S = E - S \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\Delta S = (E_{lat} + E_{arr}) - (S_{lat} + S_{ab}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

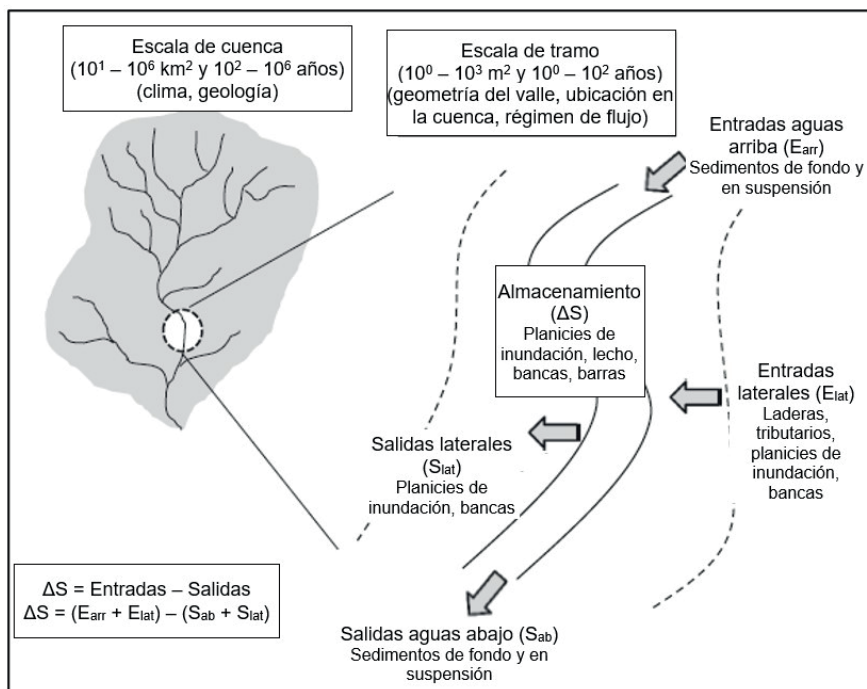
- ΔS es el cambio en el almacenamiento
- E son las entradas; S son las salidas
- E_{lat} son las entradas laterales
- E_{arr} son las entradas desde aguas arriba
- S_{lat} son las salidas laterales
- S_{ab} son las salidas aguas abajo

La predominancia de las diferentes entradas, salidas y zonas de almacenamiento de sedimentos varía a lo largo del cauce del río, generando variaciones espaciales en el régimen de sedimentos observados en diferentes tramos. Esta variación puede ser gradual, como la observada en los sólidos suspendidos medidos en el cauce, los cuales aumentan hacia aguas abajo por la presencia de bancas erosionables, o súbita, como la que ocurre como consecuencia de la entrada de un afluente con alto transporte de sedimentos (Wohl *et ál.*, 2015a).

En la literatura técnica, el concepto de régimen natural de sedimentos se usa para describir las condiciones de dicho régimen antes de la ocurrencia de intervenciones humanas, tales como construcción de presas, cambios en la cobertura del suelo, deforestación, etc. En la práctica, el régimen natural de sedimentos es difícilmente observable en un río, como consecuencia del alto grado de intervención humana al que se han visto expuestas la mayoría de las cuencas, incluyendo la alteración de coberturas vegetales y la construcción de estructuras que modifican la conectividad longitudinal y lateral de los cauces (Wohl *et ál.*, 2015a).

Por lo tanto, comúnmente se usa el concepto de régimen balanceado de sedimentos, el cual se refiere al régimen que ocurre en una corriente en la que la capacidad de transporte de sedimentos se encuentra en equilibrio con los aportes de sedimentos, de forma que se considera que el cauce se encuentra dinámicamente estable durante un periodo de tiempo (Wohl *et ál.*, 2015a). En otras palabras, un régimen balanceado de sedimentos se ve reflejado en que el río tiene la capacidad de transportar el sedimento que es aportado a su cauce con el caudal líquido disponible. Esta condición de régimen balanceado puede reflejar una nula o baja alteración humana, o una condición de alteración en la que los caudales líquidos y sólidos se encuentran en equilibrio.

Figura 11. Esquema general del balance de sedimentos en un tramo de río.



Fuente: adaptado de Wohl et ál., 2015a.

El concepto de régimen balanceado de sedimentos está construido sobre la premisa de que la estimación de un régimen natural es poco práctica, como consecuencia de la alteración que las actividades humanas han generado sobre las condiciones naturales de los cuerpos de agua, y por lo tanto la caracterización del régimen balanceado sería un procedimiento más costo-efectivo desde el punto de vista de la gestión de los recursos (Wohl et ál., 2015a).

4.5. ALTERACIONES ANTRÓPICAS SOBRE EL RÉGIMEN DE SEDIMENTOS

Las intervenciones antrópicas sobre las corrientes de agua generan impactos no sólo sobre el régimen de caudales líquidos, sino también sobre el régimen de sedimentos asociado. Estas intervenciones pueden ir desde cambios en las coberturas vegetales en la cuenca (por ejemplo, urbanización o modificación de la vegetación con fines de agricultura), hasta alteraciones en la conectividad longitudinal del cauce, como la generada por la construcción de presas y otras estructuras transversales.

Particularmente, la construcción de presas y embalses genera modificaciones sobre las condiciones naturales de flujo de caudales sólidos y líquidos (Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL, 2000). Estas modificaciones no sólo se limitan al área de influencia directa del embalse, en donde se pueden generar procesos de sedimentación y acumulación del material de arrastre que pueden modificar el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua, sino que se extienden hacia aguas

abajo del mismo, en donde la reducción en el flujo de sedimentos transportados puede generar procesos de socavación, como consecuencia del efecto erosivo de aguas claras con alta capacidad de transporte. En la actualidad, la colmatación de embalses es un problema ambiental de primer orden. Las consecuencias ambientales de la colmatación van más allá de la regresión de deltas o las pérdidas de volumen disponible, y pueden afectar el funcionamiento general de los embalses como ecosistemas acuáticos (Morris et ál., 2008).

La construcción de infraestructura transversal al cuerpo de agua para captaciones y embalsamientos genera una reducción en la velocidad aguas arriba de la intervención que reduce la capacidad de transporte de sedimentos (Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL, 2000). Lo anterior genera un proceso de sedimentación que varía longitudinalmente a lo largo del cuerpo de agua, con el depósito de los sedimentos más gruesos aguas arriba, y una reducción del tamaño de las partículas a medida que se avanza hacia la obstrucción (Julien, 2010). Adicionalmente, al constituir una barrera para el flujo, se genera una sedimentación adicional, lo que se refleja, a largo plazo, en la acumulación de sedimentos y la reducción de la sección efectiva de flujo.

La sedimentación puede generar otros problemas en los cuerpos de agua, tales como la acumulación de contaminantes adheridos al sedimento, el crecimiento de plantas acuáticas como consecuencia de la acumulación de depósitos de sedimentos finos, y alteraciones a la flora y la fauna del lecho del embalse, como consecuencia de la acumulación de materiales finos (Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL, 2000). Asimismo, dependiendo del tipo de contaminantes acumulados, se podrían generar problemas de olores, así como reducción del espejo de agua por el crecimiento de material vegetal.

Los diferentes cambios en la carga sedimentológica pueden alterar dramáticamente la ecología de los cuerpos de agua, afectando a las especies, la composición de las comunidades bióticas y la pesca como medio de sustento. Adicionalmente, un aumento en la carga de sedimentos transportada puede generar reducción en la penetración de la luz solar, pudiendo llegar a afectar especies y procesos naturales del cuerpo de agua. Asimismo, las partículas de componentes orgánicos y nutrientes pueden ser absorbidas por las arcillas, para luego precipitarse y consumir oxígeno esencial para las funciones de la biota acuática. Un aumento en la carga de sedimentos puede llegar a incrementar la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo la eutrofización y afectando los procesos fotosintéticos dentro del embalse, lo cual podría deteriorar el hábitat para invertebrados, anfibios y peces (Kemp, Sear, Collins, Naden, y Jones, 2011; Prestigiacomo et ál., 2007).

La tasa de sedimentación varía en función de la producción de sedimentos en la cuenca, la tasa de transporte de los ríos y quebradas, las características físicas de los sedimentos, entre otros aspectos. También es influenciada por el régimen del río y del comportamiento hidro-climático de la cuenca, la frecuencia de ocurrencia de avenidas, la geometría, el tamaño y el modo de operación de las intervenciones antrópicas existentes, el potencial de floculación y consolidación de los sedimentos, y la densidad y tamaño de los sedimentos (Julien, 2010).

Por otra parte, la acumulación de sedimentos debida a la construcción de estructuras transversales genera una reducción en el flujo natural de sedimentos observado aguas abajo, por lo que en estas zonas generalmente se observan aguas claras. Estas aguas tienen un alto potencial erosivo, por contar con una alta capacidad de transporte, generando procesos de erosión y socavación aguas abajo de la intervención. Adicionalmente, la regulación de caudales líquidos y sólidos debida a este tipo de intervenciones modifica el régimen natural de flujo de los ríos, lo que se refleja en modificaciones sobre la

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

morfología y la ecología del cauce (Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL, 2000; Wohl *et ál.*, 2015a).

Generalmente, aguas abajo de las estructuras transversales construidas en cauces, el agua cuenta con la energía necesaria para arrastrar gran cantidad de sedimentos, pero transporta una carga de sedimentos nula o mínima (pues dicha carga se ha quedado atrapada aguas arriba). El exceso de energía del agua clara descargada (conocida en inglés como hungry water: agua hambrienta) generalmente es transformado en procesos de socavación y transporte de los sedimentos que componen el lecho y las bancas del río, lo que se refleja en una profundización del lecho, en un proceso conocido como incisión del canal (Kondolf, 1997; Wohl *et ál.*, 2015a). La extensión temporal y espacial de este proceso de incisión depende en gran medida del tamaño y distribución de los sedimentos del cuerpo de agua, de las características de la intervención (Kondolf, 1997), de las características geológicas de la zona de divagación del cauce, de los controles estructurales e hidráulicos existentes en la zona y de la provisión relativa de sedimentos de las corrientes tributarias.

Las descargas de caudales altos como resultado de la operación de embalses hacia cuerpos receptores que presenten un déficit de sedimentos pueden generar procesos de erosión que deriven en profundización del lecho y desconexión con sus áreas inundables, así como erosión de las bancas, pérdida de vegetación de ribera y deterioro de los ecosistemas asociados. Por otra parte, descargas de caudales bajos de presas en cauces con un alto aporte de sedimentos pueden reducir la capacidad de transporte del cuerpo de agua, generando posibles consecuencias como sedimentación del lecho, pérdida de hábitats benthicos y de peces, y alteraciones en las condiciones de temperatura y calidad de agua del río (Wohl *et ál.*, 2015a).

La modificación en el régimen de transporte de sedimentos ha contribuido en ocasiones a la erosión de las zonas costeras, producto de la reducción de las cargas netas de los sedimentos que transitan hacia los océanos. De acuerdo con Syvitski (2003; citado por Kondolf *et ál.*, 2014), se ha estimado que la reducción neta de la carga de los sedimentos en los ríos (alrededor del mundo) es de aproximadamente 1400 millones de toneladas por el atrapamiento de los sedimentos en los embalses. Aunque no se cuenta con estudios en Colombia para evaluar el impacto de la erosión costera debido a las presas, es probable que estas estructuras estén contribuyendo a modificar la cantidad de aportes de sedimentos a la zona costera, así como su granulometría y distribución en el tiempo (Restrepo, 2005) y adicionalmente la construcción de estas en la parte alta de los ríos, puede repercutir en la erosión litoral (Posada y Henao, 2008).

Finalmente, otras actividades antrópicas como los cambios en los usos del suelo han aumentado las tasas de deforestación y erosión en diferentes zonas de las cuencas, aumentando así el volumen de sedimentos que ingresan a los cuerpos de agua y, por tanto, modificando el régimen de sedimentos (ver para el caso colombiano Restrepo & Kettner, 2012, Restrepo, 2013 y Restrepo, 2015, entre otros).

En términos ecológicos, las modificaciones en el régimen de sedimentos no solo pueden afectar las condiciones y disponibilidad de hábitats para especies, sino que también pueden afectar los flujos de nutrientes y alimentos. Por ejemplo, algunas especies de peces pueden requerir determinados tamaños de gravas en el lecho para las temporadas de desove y crianza, mientras que la presencia de turbidez o sólidos suspendidos puede afectar algunas cadenas tróficas, reduciendo la visibilidad para los predadores (Wohl *et ál.*, 2015a).



5

ANTECEDENTES SOBRE EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA

El presente capítulo presenta una revisión general de experiencias implementadas a nivel mundial en relación con el análisis y gestión de sedimentos a escala de cuenca, incluyendo una breve descripción de los métodos aplicados, los resultados obtenidos y las principales recomendaciones extraídos de los mismos. Las experiencias consultadas constituyen referencias de interés con respecto a la gestión de sedimentos en cuencas con múltiples características físicas y diferentes grados de alteración, así como avances en el análisis y modelación del régimen de sedimentos con diferentes niveles de disponibilidad de información.

5.1. CASOS DE ESTUDIO DE LA INICIATIVA INTERNACIONAL DE SEDIMENTOS – ISI

Liu et ál., 2018 en este artículo presentan una descripción de siete casos de estudio desarrollados por la Iniciativa Internacional de Sedimentos (ISI, por sus siglas en inglés) del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO. Dicha iniciativa busca avanzar en el desarrollo de la gestión sostenible de sedimentos a nivel mundial, para lo cual ha desarrollado un marco para la toma de decisiones que proporciona lineamientos en soluciones legislativas e institucionales. Los casos de estudio descritos incluyen los ríos Nilo, Mississippi, Rhin, Volga, Yellow, Haihe y Liaohe, los cuales representan un amplio rango de condiciones físico-bióticas y socioeconómicas.

Los casos de estudio analizados en el artículo consultado incluyen cuencas con alteraciones considerables con respecto a su régimen de producción y transporte de sedimentos, debido a actividades antrópicas tales como desarrollos urbanos, cambios en el uso del suelo e infraestructura de regulación de caudales (tabla 1). Como se observa en la tabla 1, si bien cada caso de estudio tiene particularidades específicas, las principales problemáticas identificadas coinciden con las problemáticas observadas a nivel nacional.

Tabla 1. Casos de estudio analizados

Cuenca	Longitud cauce principal (km)	Área de la cuenca (miles de km ²)	Principales problemáticas identificadas
Río Nilo	6671	3350	Degradación de suelos, sedimentación de embalses y de canales de irrigación
Río Mississippi	6021	3220	Pérdida de humedales, alteraciones de calidad del agua
Río Rhin	1320	190	Acumulación de sustancias tóxicas, degradación del lecho, sedimentación de embalses
Río Volga	3700	1380	Erosión, rotura de presas
Río Yellow	5464	152	Erosión, acumulación de sedimentos en canales y embalses, inundaciones
Río Haihe		318	Sedimentación de embalses, reducción en el ancho del río, inundaciones
Río Liaohe	1345	219	Sedimentación e inundaciones

Fuente: Liu et ál. (2018).

Las principales conclusiones de los casos de estudio analizados incluyen la necesidad de implementar estrategias de manejo de sedimentos que respondan a las particularidades locales de cada caso de estudio, teniendo en cuenta sus problemáticas específicas y sus características socioambientales. En este sentido, se han propuesto e implementado

múltiples alternativas de manejo que van desde actividades de conservación de los suelos y el agua, pasando por la implementación de soluciones de ingeniería para modificar la infraestructura existente en los cuerpos de agua, hasta modificaciones artificiales en la producción y transporte de sedimentos en la cuenca. En todo caso, se resalta la importancia de implementar programas de monitoreo y seguimiento que permitan evaluar en el tiempo la efectividad de las medidas implementadas.

5.2. ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES ENTRE EL RÉGIMEN DE CAUDALES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS Y EL TRANSPORTE DE MATERIA ORGÁNICA EN RÍOS DEL JAPÓN

En esta investigación de Nakamura *et ál.* (2017) se analizaron variaciones en los regímenes de transporte de sedimentos y materia orgánica (representada por grandes troncos de madera) con respecto a la precipitación, en cuencas con alteraciones antrópicas tales como construcción de presas, cambios en los usos del suelo y del agua, entre otras. El análisis se realizó dividiendo las cuencas de estudio en dos sectores, el primero localizado aguas arriba de las intervenciones antrópicas existentes (cuencas “cuasi-naturales”) y el segundo teniendo en cuenta la totalidad del área, para caracterizar el efecto de dichas intervenciones.

El análisis realizado permitió identificar que actividades tales como cambios en las coberturas vegetales, la construcción de presas, la explotación de materiales de arrastre y modificaciones morfológicas como la canalización de cauces, han sido factores predominantes en la reducción de la producción de sedimentos en las cuencas analizadas, generando procesos de socavación y profundización de los lechos (incisión de canales) y reducción de la presencia de barras y depósitos de sedimentos. Estos cambios en la geomorfología de los cuerpos de agua han generado alteraciones en los ecosistemas acuáticos y terrestres en Japón.

5.3. ANÁLISIS DE LAS RELACIONES ENTRE EL BALANCE DE SEDIMENTOS, LOS PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS Y CAMBIOS EN LA TOPOBATIMETRÍA EN EL RÍO YUBA, CALIFORNIA

Weber & Pasternack (2017), en este artículo describen la implementación de múltiples levantamientos tipo LiDAR para caracterizar la variación espacial del cambio topográfico, los procesos fluviales, los balances de sedimentos y las tasas de sedimentación e incisión en el lecho, para la cuenca del río Yuba, localizado en el estado de California, Estados Unidos. Además de una novedosa integración de los resultados de levantamientos tipo LiDAR en el análisis, se contrastan dos periodos decadales con regímenes de flujo contrastantes, lo que permite caracterizar la diferencia en la respuesta sobre aspectos hidráulicos y morfológicos del río.

El río Yuba ha experimentado múltiples cambios en su morfología debido, principalmente, a la existencia de actividades de

explotación de oro y materiales de arrastre, dragados, construcción de barreras de sedimentos y regulación moderada de caudales líquidos debido a la existencia de una cadena de generación hidroeléctrica distribuida en la cuenca.

El estudio constituye un interesante caso de estudio en el análisis de la respuesta de la cuenca ante cambios en los regímenes de caudales líquidos y sólidos en un río con múltiples intervenciones antrópicas, y en la caracterización de dicha respuesta a diferentes escalas espaciales, con condiciones de caudales líquidos variables.

5.4. ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA STEEPHOLLOW CREEK, CALIFORNIA, Y ANÁLISIS DE SU CONECTIVIDAD LONGITUDINAL

James et ál. (2019) describen la implementación de un modelo para el balance distribuido de sedimentos de la cuenca Steephollow Creek, localizada en California, Estados Unidos, a partir de métodos geoespaciales y levantamientos topobatiométricos tipo LiDAR. La cuenca analizada presenta un alto grado de intervención antrópica como consecuencia de las actividades de minería de oro desarrolladas desde el siglo XIX.

Mediante análisis multitemporales de la información disponible, se identificaron patrones de producción, transporte y depósito de sedimentos, lo que permitió caracterizar las principales fuentes de producción, siendo la minería la más significativa. Lo anterior es de especial interés para identificar depósitos de sedimentos posiblemente contaminados con mercurio y otras sustancias tóxicas, con el fin de orientar labores de restauración y remediación.

Este tipo de análisis permitió caracterizar la conectividad longitudinal del cauce y su relación con la variación temporal y espacial de las tasas de transporte de sedimentos. Teniendo en cuenta que los depósitos de sedimentos existentes en la cuenca tienen una alta probabilidad de encontrarse contaminados con sustancias tóxicas como el mercurio, los autores proponen implementar medidas de manejo encaminadas a reducir la conectividad lateral del río, con el fin de evitar la expansión de esta contaminación a otros ecosistemas cercanos.

5.5. EFECTOS DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA SOBRE EL RÉGIMEN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO YELLOW, CHINA

Sun (2020) en este artículo describe el análisis del efecto de la restauración ecológica de la cuenca media del río Yellow (el segundo más grande de China) sobre el régimen de transporte de sedimentos, a partir del análisis de 30 estaciones de monitoreo de caudales líquidos y sólidos con registros diarios, en el periodo comprendido entre 1950 y 2016. Durante este periodo se implementaron diferentes estrategias de restauración ecológica en la cuenca media del río Yellow, con lo cual el análisis de registros de cargas de sedimentos y caudales permitió caracterizar los efectos de las medidas implementadas sobre el régimen de sedimentos de la cuenca.

Los resultados obtenidos indican que, como consecuencia de las medidas de restauración ecológica implementadas entre las décadas de 1980 y 2000, las cuales incluyen barreras de retención de sedimentos, terraceo, reforestación, entre otras, se llegó a intervenir más del 50% del área de la cuenca para el año 2006. Dichas medidas de restauración generaron un cambio en el régimen de transporte de sedimentos en la cuenca media del río Yellow, caracterizado por menores cargas de sedimentos transportadas durante periodos de caudales medios y un aumento potencial en el transporte de sedimentos para condiciones extremas.

5.6. ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL MARCO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES A CONCESIONAR EN LA CUENCA DEL RÍO YELLOW, CHINA

Di et ál. (2020) proponen un método para la distribución de agua en la cuenca del río Yellow, el cual integra variables como la valoración integral del recurso hídrico, el sistema de administración y gestión requerido y un mecanismo de comercio asociado con el de optimizar la repartición de caudales en la cuenca a partir de una valoración integral del recurso. La valoración integral del recurso involucró un análisis de las cargas de transporte de sedimentos del lecho y suspendidos, así como la estimación de un valor asociado a dicho transporte de sedimentos.

5.7. HERRAMIENTA CASCADE PARA EL ANÁLISIS Y GESTIÓN DE LA CONECTIVIDAD DEL RÉGIMEN DE SEDIMENTOS

Tangi et ál. (2019) en este artículo describen el desarrollo de una herramienta de modelación para la cuantificación de la transferencia de sedimentos entre múltiples fuentes y sumideros, la cual es aplicable para el análisis del transporte de sedimentos en grandes redes de drenaje con diferentes niveles de disponibilidad de información. La herramienta desarrollada se basa en la aplicación del modelo de Conectividad y transporte de sedimentos a nivel de cuenca (Cascade, por sus siglas en inglés), se desarrolló en Matlab y permite la extracción y caracterización de la red de drenaje a partir de un modelo digital de terreno, la evaluación del transporte de sedimentos en dicha red y la visualización e interpretación de resultados.

El modelo Cascade permite el análisis y caracterización de redes de drenaje a escala de tramo, incluyendo la representación de fuentes de sedimentos y alteraciones antrópicas tales como las presas. Para el cálculo del transporte de sedimentos se usan cuatro fórmulas empíricas a escala de red de drenaje. La herramienta descrita puede ser descargada y usada libremente, lo que constituye un insumo de utilidad para el análisis del transporte de sedimentos a escala de cuenca, incluyendo el efecto de alteraciones antrópicas.

5.8. ANÁLISIS DEL EFECTO DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y EL AGUA SOBRE LAS CARGAS DE SEDIMENTOS SUSPENDIDOS TRANSPORTADAS DURANTE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO GUSHANCHUAN, CHINA

Hu (2020), señala que se analizaron cambios en la relación entre la escurritia y el rendimiento de sedimentos en la cuenca del río Gushanchuan en China, caracterizada por tener suelos arenosos, propensos a procesos de erosión. El análisis de dicha relación permite contar con información útil para la implementación de medidas de conservación del suelo y del agua, particularmente en cuencas con alto grado de erosión. A partir del análisis de registros de 62 años, se caracterizó el rendimiento de sedimentos en 342 eventos de inundación, ocurridos entre 1954 y 2015, agrupados en tres categorías a partir de diferentes atributos del régimen de caudales (duración, tasa de cambio y magnitud). Dichos resultados permitieron aplicar modelos para la predicción del rendimiento de sedimentos a escala de evento.

5.9. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE ESTRATEGIAS DE MANEJO DE SEDIMENTOS SOBRE UNA SUBCUENCA DEL RÍO AWASH, ETIOPIA

La cuenca de la presa Kesem constituye una subcuenca del río Awash, en Etiopía, caracterizada por la existencia de problemas asociados al transporte de sedimentos, causados principalmente por el desarrollo de actividades de agricultura intensiva. Tesema & Leta (2020), en este estudio describen la implementación, calibración y validación de un modelo de rendimiento de sedimentos para dicha subcuenca, desarrollado en la herramienta SWAT. El modelo se calibró a partir de registros de caudales y transporte de sedimentos en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2006 y calibrado con los registros disponibles entre 2007 y 2010.

Los resultados obtenidos del modelo implementado permitieron identificar aquellas áreas de la cuenca en las que se presenta el mayor rendimiento de sedimentos, las cuales constituyen zonas prioritarias para la implementación de estrategias para el manejo de sedimentos. Posteriormente, se simuló escenarios que involucraron estrategias de manejo, incluyendo el terrazo de taludes y estrategias de reforestación. Los escenarios simulados indican que la implementación de estrategias de manejo en zonas críticas permitiría reducir el rendimiento de sedimentos hasta en un 80%.

5.10. EXPERIENCIAS NACIONALES EN MANEJO SOSTENIBLE DE SEDIMENTOS A ESCALA DE CUENCA

La mayor parte de las experiencias relacionadas con el análisis e implementación de estrategias de manejo de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica en Colombia se han desarrollado a partir de ejercicios académicos, liderados por universidades

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

del país y por entidades estatales. Dichos ejercicios van desde análisis del régimen de transporte de sedimentos en ríos (centrados principalmente en el análisis de sedimentos en suspensión, dadas las limitaciones con respecto a la carga del lecho), analizando aspectos como variabilidad espacial y temporal (ver, por ejemplo, Restrepo-López et ál., 2015), incluyendo ejercicios de modelación regional con fines de caracterización y simulación del efecto de sedimentos para diferentes condiciones hidrológicas (ver, por ejemplo, Bernal et ál., 2005).

Recientemente, se ha avanzado en la realización de análisis más integrales, que involucran el eventual efecto de intervenciones antrópicas sobre las dinámicas naturales del régimen de producción y transporte de sedimentos y sus implicaciones sobre aspectos morfológicos, ecológicos y sociales de las cuencas hidrográficas. Este tipo de estudios han partido de aproximaciones aplicables a las limitaciones de información proveniente de redes de monitoreo de sedimentos en el país, para lo cual se han aplicado aproximaciones desde indicadores morfológicos que permiten caracterizar la dinámica espaciotemporal de cuerpos lóticos a partir de información de sensores remotos y modelos digitales de terreno (Soto y Cubillos, 2015; Alzate y Zambrano, 2019, entre otros).

Asimismo, se han aplicado ejercicios de modelación matemática a diferentes escalas espaciales y temporales y con diversos niveles de detalle, con el fin de caracterizar la producción y transporte de sedimentos en cuencas colombianas (ver, por ejemplo, Cataño-Álvarez y Vélez-Upegui, 2016).

Este tipo de análisis han permitido contar con experiencias de aplicación a nivel nacional de análisis de sedimentos a escala de cuenca que dan soporte a la toma de decisiones con respecto a la planificación y administración de los recursos naturales en cuencas hidrográficas.



6

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA

Como se ha discutido en los capítulos anteriores, las modificaciones que se inducen sobre las dinámicas naturales de los flujos de agua y sedimentos en los ríos, cuencas hidrográficas y demás elementos del sistema fluvial, conllevan a una serie de respuestas del sistema que se manifiestan en cambios en el comportamiento morfológico de las corrientes, el régimen de sedimentos, la calidad del agua, el hábitat de las diversas especies acuáticas, subacuáticas y terrestres asociadas, así como en transformaciones de las dinámicas territoriales en el mediano y largo plazo.

Por tanto, en el marco de la gestión integral de los recursos hídricos en Colombia, se busca mitigar los efectos derivados de la alteración del régimen natural de sedimentos en los ríos, mediante el establecimiento de un marco orientador general de actuación que involucre a los principales actores relacionados con dicho fenómeno. Se reconocen como sectores importantes en la alteración de dicho régimen la minería, el sector agropecuario, la industria, la urbanización y el sector hidro-energético.

En consecuencia, el objetivo principal de este documento es definir unos lineamientos generales que permitan orientar la toma de decisiones en torno al manejo sostenible de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica, desde la integración de la perspectiva ambiental y económica, con el fin de minimizar y mitigar las afectaciones sobre la geomorfología, la calidad del agua, la ecología y el hábitat, así como propender por la prestación de los servicios ecosistémicos a las poblaciones humanas. Adicionalmente, se busca promover el balance del régimen alterado de sedimentos de tal modo que se aproxime a las condiciones naturales o balanceadas de las corrientes de agua intervenidas con alteraciones antrópicas. Para esto, se requiere integrar las alternativas de manejo de sedimentos con un conocimiento detallado de la dinámica natural de los sedimentos en la cuenca hidrográfica, para así entender las posibles afectaciones que podrían generar diferentes alternativas de manejo de sedimentos sobre las condiciones naturales. Dicho conocimiento detallado debe ser el resultado de un estudio que incluya la caracterización de los procesos de producción de sedimentos en la cuenca y el transporte a través del cuerpo de agua, así como de los mecanismos de transporte que existen en condiciones naturales.

A continuación, se presentan los lineamientos recomendados para el manejo de sedimentos a escala de cuenca, incluyendo los requerimientos de información y estudios mínimos necesarios para orientar la toma de decisiones con respecto a las alternativas de gestión. En todo caso, es importante resaltar que los aspectos presentados en el presente documento corresponden a unos requisitos mínimos, que podrán ser complementados por análisis más rigurosos de acuerdo con las particularidades de cada sistema, y con la información disponible.

6.1. GENERALIDADES

En las últimas décadas, el conocimiento relacionado con el transporte de sedimentos en ríos y el efecto de las intervenciones antrópicas sobre dicho régimen de transporte ha aumentado como consecuencia de diversos estudios y experiencias internacionales relacionadas con el tema. Como resultado, se han ampliado el conocimiento científico y la experiencia relacionada con el manejo de sedimentos, lo que ha llevado al desarrollo de numerosas estrategias de manejo de sedimentos a escala de cuenca (Kondolf et ál., 2014; Peteuil et ál., 2014, entre otros), así como a la implementación de diversas técnicas para el manejo sostenible de los flujos de sedimentos en cuerpos de agua de tipo léntico, las cuales se han probado en diversas aplicaciones a nivel mundial (Kondolf et ál., 2014).

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Las estrategias para el manejo sostenible de sedimentos varían dependiendo de las características de cada cuerpo de agua y cada caso particular. En todo caso, en una adecuada estrategia de manejo se deben considerar diversos aspectos, dentro de los cuales el análisis del régimen hidrológico de la corriente, la medición del transporte y la caracterización de los sedimentos, la identificación de las fuentes de producción, y la comprensión de las características morfodinámicas de la corriente constituyen un punto primordial (Peteuil et ál., 2014; Morris y Fan, 2010). Adicionalmente, deben tenerse en cuenta particularidades relacionadas con las características fisicoquímicas de los sedimentos presentes en la cuenca.

Diversas experiencias a nivel mundial han demostrado que las particularidades con respecto a los flujos de sedimentos, la dinámica de transporte y la variabilidad inherente a los sistemas hídricos en general, hacen inapropiado el desarrollo de procedimientos estándares de manejo que se puedan generalizar a diversos ríos o regiones (Wohl et ál., 2015a). Lo anterior ha hecho que el desarrollo de estándares de calidad para el manejo de sedimentos sea bastante problemático, por lo que es más recomendable el desarrollo de estudios que permitan caracterizar el régimen de sedimentos a partir de las particularidades de cada caso (Wohl et ál., 2015a).

Por tanto, las estrategias de manejo de sedimentos a adoptar en el contexto colombiano deben responder a un estudio detallado y riguroso de cada cuenca hidrográfica, que involucre las características y particularidades respectivas. Aunque no se puede generalizar en torno a las estrategias de manejo de sedimentos a implementar a nivel nacional, en el presente documento se presentan los requisitos mínimos que deben contemplarse para el diseño e implementación de dichas estrategias, que son comunes a todos los casos.

La estructura y los componentes propuestos para el manejo sostenible de sedimentos se han definido con base en una revisión de la normativa internacional vigente en la materia, así como en la literatura técnica existente al respecto. Las acciones propuestas buscan lograr un manejo sostenible de los sedimentos, mediante la minimización de los impactos generados por las actividades antrópicas sobre el flujo natural de sedimentos.

Es importante anotar que el objetivo del presente documento es dar unas directrices generales acerca de los componentes mínimos que se deben incluir al plantear estrategias de manejo de sedimentos en el marco de la gestión integral del recurso hídrico. La descripción detallada de dichos componentes y las metodologías para el desarrollo de estos exceden el alcance del presente documento y para su consulta, se remite al lector a la literatura técnica especializada y a las referencias incluidas en el capítulo 8 del presente documento.

6.2. PROPUESTA METODOLÓGICA

Los presentes lineamientos para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica parten de la caracterización y conocimiento de los procesos que ocurren en la cuenca y que influyen el régimen de producción y transporte de sedimentos a diferentes escalas. Para esto, se propone un procedimiento flexible, en función de la información disponible, que permite caracterizar los procesos de producción y transporte de sedimentos, su influencia sobre la calidad del agua, la geomorfología, el componente hidrobiológico y, en general, la salud de los ecosistemas, la prestación de servicios ecosistémicos y el efecto que tienen las intervenciones antrópicas existentes en la cuenca sobre dichos procesos. A partir de esta caracterización se proponen estrategias de manejo de sedimentos que permitan alcanzar o mantener los

objetivos trazados por la autoridad ambiental, cuyo cumplimiento se deberá verificar mediante labores de seguimiento y monitoreo.

A partir de diversas experiencias internacionales sobre el manejo de sedimentos (ver el capítulo 5 de este documento), se han identificado unos requisitos mínimos para el diseño de estrategias de manejo sostenible de sedimentos, que incluyen la priorización de las estrategias según el contexto y las características de la cuenca, la caracterización del flujo natural de sedimentos, la caracterización fisicoquímica de los sedimentos, la estimación de los volúmenes requeridos para mantener o restaurar el estado del río, la simulación de escenarios de manejo de sedimentos, la evaluación y la selección de la técnica más adecuada, su implementación, seguimiento y monitoreo y la formulación de acciones de mejoramiento. Estas y otras acciones se pueden agrupar en cinco fases (Figura 12), que se deben ejecutar sistemáticamente.

Figura 12. Fases recomendadas para el manejo sostenible de sedimentos en cuencas hidrográficas.



En cada una de las fases presentadas se deben ejecutar una serie de actividades de levantamiento y análisis de la información que garanticen la toma de decisiones acertadas para el éxito de las estrategias a implementar y el manejo adecuado de sus impactos potenciales. En la tabla 2 se presenta un resumen de las actividades a desarrollar en cada una de las fases de la metodología propuesta.

Cabe anotar que la información requerida para el diseño e implementación de una estrategia para el manejo sostenible de sedimentos podría enmarcarse dentro del desarrollo de otros instrumentos de gestión integral del recurso hídrico, incluyendo los POMCA y los PORH, entre otros, para lo cual es necesario desarrollar una estrategia de articulación que conlleve a una caracterización de la cuenca que incluya la recopilación y análisis de información hidrológica, hidráulica, de calidad del agua, hidrobiológica, entre otros.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Tabla 2. Fases y actividades recomendadas para la implementación de un programa de manejo sostenible de sedimentos a escala de cuenca

Fase	Actividades
Fase 0. Conocimiento	1. Priorización de cuencas hidrográficas
	2. Recopilación de información secundaria
	3. Alistamiento institucional – Fortalecimiento red de monitoreo sedimentos
Fase I. Caracterización	Caracterización de la producción de sedimentos
	1. Modelo de erosión estático
	2. Modelo de erosión dinámico
	3. Movimientos en masa
	4. Fuentes puntuales de sedimentos
	Caracterización del sistema fluvial
	1. Caracterización morfológica del río
	2. Caracterización hidrológica del río
	3. Caracterización del régimen de sedimentos
	4. Caracterización fisicoquímica de los sedimentos
	5. Modelación/caracterización del transporte de sedimentos
	6. Caracterización de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua
	7. Caracterización ecológica
	Caracterización de las intervenciones y presiones antrópicas existentes
	1. Caracterización de aspectos antrópicos (aspectos sociales y económicos)
	2. Descripción de las características técnicas de presas y obras complementarias
	3. Descripción técnica de embalses
	4. Cambios en los usos del suelo
	5. Descripción y caracterización de otras alteraciones y presiones sobre el régimen de transporte de sedimentos
Fase II. Evaluación y selección de alternativas de manejo	1. Descripción de las alternativas consideradas
	2. Simulación de escenarios
	3. Análisis costo beneficio de las alternativas consideradas
	4. Evaluación de impactos ambientales, económicos y sociales y selección de la alternativa recomendada
	5. Socialización de la estrategia de manejo
Fase III. Implementación de estrategias para el manejo de sedimentos	
Fase IV. Evaluación y seguimiento	
Fase V. Formulación de acciones de mejora	

6.2.1. Fase 0 – Conocimiento

La fase de conocimiento incluye el desarrollo de actividades encaminadas a priorizar las cuencas en las que la autoridad ambiental implementará estrategias para el manejo de sedimentos, así como el levantamiento de información secundaria y el alistamiento institucional para el desarrollo del análisis, planteamiento, implementación y seguimiento de estrategias para el manejo de sedimentos en dichas cuencas. A continuación, se presenta la descripción de cada una de las actividades para el desarrollo de esta fase, las cuales se resumen en la figura 13.

Figura 13. Actividades propuestas para el desarrollo de la fase 0. Conocimiento



6.2.1.1. Priorización de cuencas hidrográficas

Es necesario definir criterios de priorización de cuencas hidrográficas y tramos de ríos para el análisis del manejo de sedimentos. Inicialmente se propone realizar un análisis multicriterio con el uso de factores de ponderación de los criterios definidos. Como punto de partida se propone usar la metodología propuesta en guías técnicas elaboradas por la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico tales como la Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas de Colombia (Minambiente, 2018c) y la Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial (Minambiente, 2018b).

La información requerida para la realización de la priorización puede ser tomada de estudios e instrumentos desarrollados previamente en la cuenca por la autoridad ambiental y otras entidades del orden nacional. Particularmente, instrumentos de planificación a diferentes escalas como los planes estratégicos de macrocuenca y los planes de ordenación y manejo de cuencas, (POMCA), que recopilan y generan información que permite identificar y priorizar aquellas zonas, subzonas hidrográficas y niveles subsiguientes en los que se requiere la implementación prioritaria de estrategias para el manejo de sedimentos a escala de cuenca.

6.2.1.2. Recopilación de información secundaria

Según sea el enfoque del análisis del manejo de sedimentos, es necesaria la recopilación de información lo que incluye información cartográfica, series de tiempo de variables hidro-climáticas e información bibliográfica. Cabe anotar que la información secundaria disponible será un condicionante de los análisis, por ejemplo, en cuencas hidrográficas no aforadas (sin información hidro-climática) no es posible la implementación de modelos dinámicos de erosión.

Para la caracterización de la producción y transporte de sedimentos se recomienda recopilar, como mínimo, la siguiente información:

- Mapa geológico. El mapa geológico es necesario si se va a implementar el modelo de erosión dinámico. A partir de la interpretación del mapa geológico y sus memorias es posible estimar la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica de la roca. Se recomienda usar el Mapa geológico de Colombia en escala 1:500.000 (Servicio Geológico Colombiano, 2007), aunque si se dispone de un mapa geológico a escalas más detalladas y que cubra toda la cuenca (por ejemplo, proveniente de instrumentos como los planes de ordenación y manejo de cuencas, POMCA), se recomienda su uso.
- Mapas de Suelos (IGAC, 2004) y memorias de los Estudios generales de suelos y zonificación de tierras departamentales en escala 1:100.000 (IGAC, s.f.). Este mapa y sus memorias permiten la estimación de propiedades físicas del suelo relativas a la erosión hídrica. Además, si se implementa un modelo dinámico, el mapa de suelos es necesario para la estimación de propiedades hidráulicas del suelo (capacidad de almacenamiento hídrico y conductividad hidráulica). Cabe anotar que si se dispone de mapas de suelos (y sus memorias) en escalas de mayor detalle y que cubran toda la cuenca hidrográfica de análisis, se recomienda su uso.
- Topografía. Se recomienda usar el modelo de elevación digital ASTER Global Digital Elevation Model (NASA, 2011) con resolución aproximada de 30 metros.
- Mapa de coberturas vegetales. Las coberturas vegetales son la base para la estimación de los factores de cobertura y prácticas de conservación, los cuales son usados tanto en el modelo estático como dinámico de erosión hídrica. Como una primera aproximación, se recomienda el uso del mapa de Coberturas de la tierra según la metodología CORINE Land Cover, escala 1:100.000 aplicada al territorio colombiano (Ideam, 2015a). Si se dispone de coberturas vegetales en escalas de mayor detalle y que cubran toda la cuenca hidrográfica, se recomienda su uso.
- Mapa de amenazas por movimientos en masa de Colombia. “Las amenazas por movimientos en masa de Colombia. Una visión a escala 1:100.000” (SGC, 2017).
- Mapa de Degradación de suelos por erosión en Colombia publicado por la Subdirección de Ecosistemas del Ideam en el año 2015 (Ideam, 2015b). Este mapa sirve para la validación del mapa de Erosión hídrica potencial en ladera.
- Series mensuales de transporte, concentración de sedimentos y caudal líquido de estaciones de monitoreo de sedimentos de la red nacional (operada por el Ideam) y regional o local (operadas por las autoridades ambientales) que se encuentren en la cuenca hidrográfica.
- Para implementar el modelo de erosión dinámico, se requieren series históricas diarias de caudales líquidos y sólidos, precipitación y evapotranspiración. En caso de estar disponibles, se recomienda recopilar registros de

caudales líquidos y sólidos a escalas horarias, los cuales permitirán calibrar y validar modelos dinámicos a escalas temporales detalladas.

- Estudios y cartografía local de procesos erosivos.
- Otra información. La información descrita puede complementarse con imágenes satelitales provenientes de fuentes globales de información, muchas de las cuales pueden consultarse y descargarse gratuitamente. Asimismo, es recomendable contar con información de coberturas y modelos digitales de terreno elaborados a partir del uso de drones, tecnología que permite contar con imágenes de alta resolución particulares para la zona de estudio.

La información mencionada se usará como insumo para el diagnóstico de los procesos de producción y transporte de sedimentos, a partir del cual se simularán escenarios y se definirán las estrategias de manejo a implementar para cada caso particular.

6.2.1.3. Alistamiento institucional – Fortalecimiento red de monitoreo de sedimentos

Se recomienda identificar y localizar las estaciones hidrológicas, climatológicas, de sedimentos y de calidad de agua (físicoquímicas, microbiológicas y del recurso hidrobiológico) existentes sobre la cuenca objeto de estudio e inventariar la información disponible. Se deben tener en consideración las redes nacionales, regionales y locales de observación y medición y en especial las que hayan sido utilizadas previamente por la autoridad ambiental competente en otros estudios.

Esta información será útil para establecer una continuidad en el monitoreo y de esta forma hacer seguimiento a la evolución temporal de diferentes aspectos, en fases posteriores. Asimismo, a partir del análisis de la información disponible se podrán plantear actividades relacionadas con el fortalecimiento de la red de monitoreo de sedimentos, con el fin de ampliar el conocimiento de la producción y transporte de sedimentos.

En esta actividad se debe considerar la estimación de los recursos humanos, económicos, tecnológicos y logísticos requeridos para el desarrollo de los lineamientos para el manejo de sedimentos, incluyendo la identificación de los perfiles profesionales y técnicos requeridos para el levantamiento de información primaria, modelación y desarrollo de los lineamientos, las comisiones requeridas para el desarrollo de campañas de monitoreo, los requerimientos computacionales necesarios para el desarrollo del proceso, entre otros aspectos. Como resultado de estas actividades se deberá elaborar un presupuesto y un cronograma de ejecución que orienten a la autoridad ambiental con respecto al tiempo y recurso requeridos. En todo caso, esta fase deberá armonizarse en función del instrumento de gestión en el marco del cual se desarrollen los lineamientos dados en el presente documento (ver capítulo 7).

A partir de la información recopilada y consolidada durante la fase de alistamiento institucional, la autoridad ambiental podrá planificar el ejercicio de levantamiento y análisis de información requerido y elaborar el presupuesto preliminar respectivo.

6.2.2. Fase 1 – Caracterización

La fase inicial consiste en conocer aspectos claves de la cuenca hidrográfica y el sistema fluvial, con el propósito de disminuir la incertidumbre en torno a la efectividad de las medidas a implementar y sus efectos sobre el sistema fluvial

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

(Morris y Fan, 2010). Las actividades propuestas para esta fase incluyen la caracterización de la producción de sedimentos, la caracterización del sistema fluvial, lo que comprende la generación de conocimiento con respecto al transporte de sedimentos y, la caracterización de las intervenciones y presiones antrópicas existentes. A continuación, se describen los aspectos a abordar en esta fase. Se anota que, para cuencas con poca información primaria disponible, la caracterización de la producción de sedimentos y del sistema fluvial puede realizarse con base en ejercicios de modelación, los cuales se deben complementar con mediciones en campo y fortalecimiento de la red de monitoreo de sedimentos, tal como se describe a continuación.

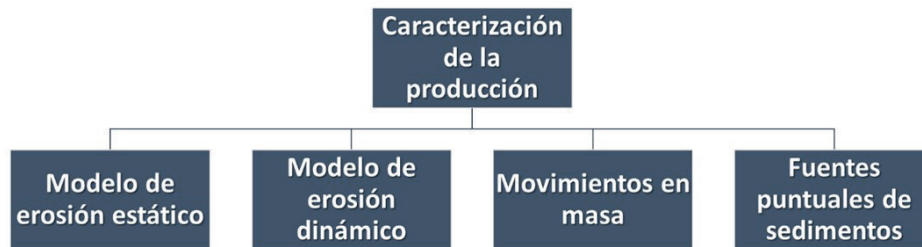
6.2.2.1. Caracterización de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica

Los procesos de producción de sedimentos dominantes dependerán de las condiciones climáticas, morfométricas y de coberturas vegetales de la cuenca hidrográfica. En las cuencas hidrográficas colombianas ubicadas en zonas de montaña con condiciones climáticas húmedas (cuencas del área hidrográfica Magdalena Cauca, cuencas de las áreas hidrográficas Pacífico, Orinoco, Amazonas, ubicadas en las vertientes de la cordillera de los Andes, y cuencas del área hidrográfica Caribe en las vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta) los procesos de erosión hídrica y movimientos en masa son los más predominantes en la producción de sedimentos. Además, la producción de sedimentos por erosión hídrica y por movimientos en masa tiene como agente erosivo el agua, afectando directamente el sistema hídrico. Por esta razón, se exponen metodologías para la caracterización de estos procesos, aunque es importante recalcar que algunas cuencas tendrán otros procesos dominantes de producción de sedimentos que será necesario analizar con el uso de modelos específicos.

Es importante resaltar que las metodologías descritas a continuación se han aplicado a escala nacional en el marco del Estudio Nacional del Agua 2018 (Ideam, 2019). Sin embargo, es necesario ampliar y detallar estos resultados en diferentes cuencas del país, con el fin de aplicar estas metodologías y estimar los respectivos factores a escalas más detalladas para aumentar el conocimiento y reducir la incertidumbre en la aplicación de los modelos respectivos.

En este sentido, para la caracterización de la producción de sedimentos se propone la implementación de modelos de erosión estáticos y dinámicos, así como la caracterización general de movimientos en masa y de fuentes puntuales de sedimentos en la cuenca. A continuación, se presenta la descripción general de cada una de las actividades propuestas para la caracterización de la producción de sedimentos en cuencas priorizadas, las cuales se resumen en la figura 14.

Figura 14. Actividades propuestas para la caracterización de la producción de sedimentos en el marco de la fase 1. Caracterización



6.2.2.1.1. Modelo de erosión estático

Un modelo de erosión estático se refiere a aquel que predice la producción de sedimentos por la erosión hídrica a partir de información hidro-climática con valores promedios mensuales y anuales. De esta forma, los resultados de la predicción de la erosión hídrica representan condiciones agregadas y promedios en el tiempo. Un ejemplo de este tipo de modelos es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés). Este tipo de modelos son útiles para la predicción de la variabilidad espacial de la erosión en cuencas que no dispongan de estaciones con medidas de caudales líquidos y sólidos.

Un ejemplo de un modelo de erosión estático es el implementado en el Estudio Nacional del Agua de 2018 denominado mapa de Erosión hídrica potencial en ladera (Ideam, 2019). Se recomienda la implementación de este modelo en la cuenca y según los resultados, analizar la variabilidad espacial de la erosión hídrica potencial. El término “potencial” se refiere a que el modelo predice la erosión según las características del medio físico de forma estimada y potencial, pero no mide la erosión real. Aun así, es útil para determinar las zonas en la cuenca donde se están produciendo sedimentos debido a la erosión hídrica y de esta forma priorizar acciones tendientes al control de la erosión. Además, este mapa se puede utilizar en la planificación de usos del suelo en la cuenca puesto que es posible predecir los efectos de cambios en los usos del suelo (por ejemplo, deforestación o reforestación) y su impacto en la producción de sedimentos. A continuación, se detalla la formulación e implementación del modelo.

El mapa de Erosión hídrica potencial en ladera de sedimentos del ENA 2018 (Ideam, 2019) utiliza una formulación empírica y distribuida basada en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés) (Wischmeier & Smith, 1978) de la cual utiliza los factores que dependen del suelo y las coberturas vegetales y que dan cuenta de la resistencia a la erosión; y en la ecuación de Kilinc y Richardson modificada por Julien (2010), la cual se basa en que la erosión se debe no a la lluvia (tal como lo plantea la USLE) sino a la potencia del flujo laminar en ladera.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

$$qs = 23210 * q^{2,035} * S^{1,664} * K * C * P$$

Donde,

- qs: caudal unitario de sedimentos (m²/s)
- q = caudal unitario (m²/s)
- S = pendiente (m/m)
- K, C y P = factores de la USLE (adimensionales) y con rango entre 0 y 1

El caudal unitario se a

$$q \text{ (m}^2\text{/s)} = \frac{Q}{w} \text{ aproximación en ladera } q \text{ (m}^2\text{/s)} \approx \frac{E * x^2 * fa}{dt * x}$$

Donde,

- Q = caudal (m³/s)
- w = unidad de ancho (m)
- E = escorrentía media anual o mensual (m)
- x = lado de la celda (31,01312 m)
- fa = número de celdas acumuladas
- dt = intervalo temporal (segundos)

La erosión superficial tot

$$\text{Erosión superficial total} = \int_{\text{tiempo}} \int_{\text{ancho}} qs * dx * dt$$

Con un intervalo temporal mensual y con mapas de valores promedios mensuales multianuales de la escorrentía se tiene que:

$$\text{Erosión anual por celda (m}^3\text{)} = \sum_{i=1}^{12} 23210 * \left(\frac{E_i * dx * fa}{dt_i} \right)^{2,035} * S^{1,664} * K * C * P * dx * dt_i$$

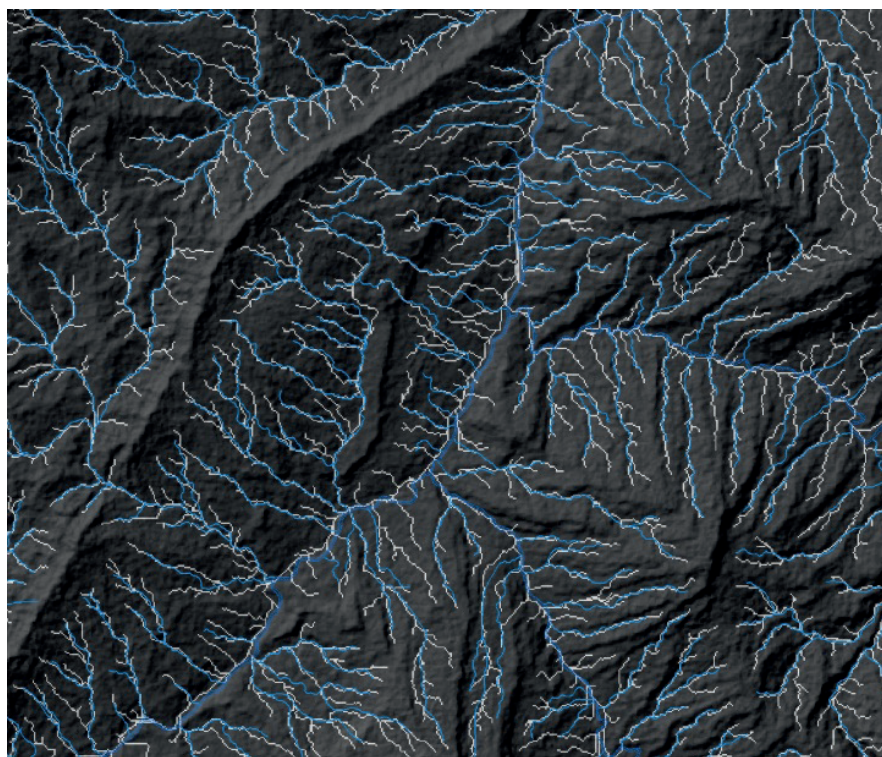
Donde,

- E_i = escorrentía mensual promedio multianual (m)
- fa = número de celdas acumuladas
- S = pendiente (m/m)
- K, C y P = factores de la USLE (adimensionales y con rango de valores entre 0 y 1)
- dx = 31,01312 m
- dt_i = 2613000 s (1 mes)

En la formulación para el cálculo de la erosión potencial en ladera, el área acumulada, la esorrentía y la pendiente dan cuenta de la potencia del flujo laminar en ladera, mientras que los tres términos de la USLE (K, C y P) dan cuenta de la resistencia a la erosión en ladera.

La ecuación es aplicable en ladera puesto que se basa en la potencia del flujo laminar. No tiene aplicación en elementos del paisaje en donde el flujo es concentrado, por ejemplo, en cárcavas y en cauces. En términos prácticos, es necesario definir el área umbral para flujo base (tamaño o longitud de ladera) y aplicar la ecuación sólo en celdas de ladera. La definición del tamaño de la ladera es de 10 hectáreas (100.000 m²), es decir de 104 celdas acumuladas en un modelo digital de elevación, DEM, de 1 arcseg ($\pm$ 31 m de lado). Este valor surge de un ajuste gráfico con la red de drenaje de la cartografía básica del IGAC en escala 1:100.000 (figura 15).

Figura 15. Red de drenaje derivada de un mapa de acumulación de flujo con un umbral de 10 hectáreas (en blanco) superpuesta a la red de drenaje de la cartografía básica del IGAC en escala 1:100.000.



El anexo 1 del presente documento contiene la descripción detallada del proceso recomendado para la construcción de los mapas de entrada para la ecuación de erosión potencial en ladera.

6.2.2.1.2. Modelo de erosión dinámico

Un modelo de erosión dinámico es aquel que simula los procesos de erosión en la cuenca hidrográfica de forma acoplada a un modelo hidrológico, de esta forma, los procesos de erosión, transporte y depósito están dirigidos por los procesos hidrológicos al interior de la cuenca. La escala temporal de un modelo dinámico permite reflejar la dinámica de sedimentos en la cuenca, por lo tanto, el intervalo de simulación es del orden de horas a un día. La formulación de un modelo dinámico se basa en la física de los procesos hidrológicos y de sedimentos en la cuenca y considera las leyes de conservación de materia y energía, utilizando simplificaciones conceptuales de estas leyes.

Los modelos dinámicos requieren una mayor parametrización y las entradas incluyen series temporales de variables climáticas (por ejemplo, precipitación, temperatura, evapotranspiración) y variables hidrológicas (caudales líquidos y sólidos) para su calibración y validación. Estos requerimientos de información limitan la implementación de modelos de erosión dinámicos a cuencas hidrográficas aforadas y con información cartográfica adecuada.

Los esfuerzos requeridos para la implementación de modelos de erosión dinámicos se traducen en una reducción categórica en la incertidumbre en el conocimiento de las dinámicas de la cuenca, además de permitir el análisis de amenazas, la identificación de zonas de producción, la toma de decisiones en cuanto a la planificación de los usos del suelo en la cuenca y el análisis de escenarios de cambios futuros (ambientales, climáticos, antrópicos) y su impacto en las dinámicas de sedimentos en la cuenca hidrográfica. Por tal motivo, se recomienda la implementación de un modelo de erosión dinámico en las cuencas que dispongan de información para tal efecto.

Un modelo de erosión dinámico de uso extendido en el país corresponde al software TETIS, desarrollado por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia, España (GIMHA, 2021). Este modelo conceptual distribuido permite simular eventos hidrológicos y los procesos sedimentológicos asociados (producción, transporte y depósito de sedimentos) y se ha implementado en diferentes cuencas hidrográficas del mundo, con diversidad de tamaños y condiciones hidro-climáticas y geomorfológicas. Las condiciones físicas de la cuenca se estiman a partir de mapas de parámetros con sentido físico los cuales se construyen con información geológica, geomorfológica, de suelos y coberturas vegetales disponibles para todo el país. Además, este modelo se ha utilizado en cuencas de montaña de Colombia con buenos resultados. Entre las limitaciones de esta herramienta se incluye la imposibilidad de modelar cambios en la geometría del cauce como consecuencia de los cambios en el balance de sedimentos, con lo cual esta aproximación debe complementarse con un modelo de transporte que permita tener en cuenta dichos cambios en la geomorfología de los cuerpos de agua.

Otras aproximaciones de modelación incluyen la simulación integrada de los procesos de producción en ladera y transporte de sedimentos a escala de cuenca, dando cuenta de los cambios morfológicos generados por los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos en la red de drenaje. Este tipo de aproximaciones han sido aplicadas en ríos colombianos y pueden aportar información más detallada del efecto de cambios en la producción de sedimentos sobre aspectos geomorfológicos e hidráulicos de los cuerpos de agua (ver, por ejemplo, Cataño y Vélez, 2021).

En todo caso, la selección de la herramienta de modelación a implementar debe ser el resultado de un análisis de las particularidades de cada caso de estudio, incluyendo la revisión de las capacidades y limitaciones de las herramientas

disponibles, el objetivo del ejercicio de modelación a implementar y la información disponible. Para dicha selección se recomienda aplicar protocolos de modelación de uso común que permitan, a partir de la definición de un modelo conceptual, seleccionar o desarrollar las herramientas que aporten al cumplimiento de los objetivos del ejercicio (ver, por ejemplo, Minambiente, 2018a).

6.2.2.1.3. Movimientos en masa

Los movimientos en masa son una fuente importante de sedimentos en cuencas de montaña, los cuales están asociados a eventos de lluvia extremos. Para considerar los movimientos en masa en el análisis integral a escala de cuenca hidrográfica se recomienda utilizar el mapa nacional de Amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000 (SGC, 2017).

Este mapa se basa en aspectos geológicos, suelos, coberturas de la tierra, topografía y geomorfología para definir la susceptibilidad del territorio ante movimientos en masa y en detonantes climáticos (precipitaciones máximas) y sísmicos (aceleraciones máximas) para definir la amenaza relativa por movimientos en masa.

Cabe anotar que este mapa utiliza fuentes de información cartográfica comunes a las utilizadas en el mapa de Erosión hídrica potencial y por tal motivo los rangos cualitativos tienden a coincidir. De esta forma, en zonas y subzonas con alto potencial de erosión hídrica, también es posible encontrar valores altos y muy altos de amenaza relativa de movimientos en masa.

Los resultados del mapa de Amenazas por movimientos en masa para Colombia se consideran una primera aproximación para el análisis de movimientos en masa en una cuenca hidrográfica. Para análisis más detallados se recomienda utilizar la misma metodología con el uso de cartografía base con escalas más finas. Además, es recomendable utilizar (o construir) mapas de procesos erosivos basados en fotografías aéreas y trabajo de campo. Asimismo, en caso de contar con información de otros instrumentos ambientales y de gestión del riesgo en los que se hayan generado análisis de movimientos en masa más detallados, incluyendo mapas de amenaza, inventarios, entre otros, se recomienda usar dicha información.

6.2.2.1.4. Fuentes puntuales de sedimentos

Las fuentes puntuales de sedimentos son aquellas actividades antrópicas que son altamente productoras de sedimentos debido a la remoción de vegetación y el horizonte superior del suelo. Estas fuentes puntuales no son susceptibles de modelar ni caracterizar por medio de metodologías de análisis. Se propone que las autoridades ambientales tengan caracterizadas, cartografiadas, monitoreadas, y si es posible cuantificada la producción temporal de sedimentos de las siguientes actividades:

- Actividades mineras subterráneas
- Minería de oro de aluvión
- Canteras de materiales de construcción
- Explotación de material de playa

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

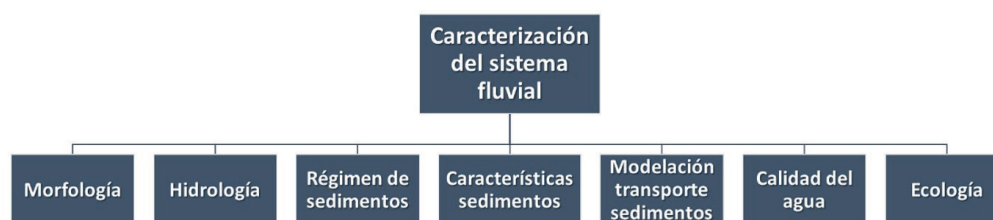
- Explotación ilegal de oro de aluvión
- Otras actividades no licenciadas como agricultura y ganadería extensivas, construcción de vías terciarias, entre otras.

Para la caracterización de las explotaciones ilegales de oro en aluvión, además de las bases de datos de la autoridad ambiental, se recomienda utilizar los resultados que la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (Unodc) y el Gobierno de Colombia han publicado desde el año 2014 con respecto a la línea base de evidencias de explotación de oro de aluvión con maquinaria en tierra, efectuada a partir de la interpretación de imágenes aéreas y sensores remotos (Unodc y Gobierno de Colombia, 2018).

6.2.2.2. Caracterización del sistema fluvial

Esta actividad incluye la caracterización morfológica e hidrológica del río, la caracterización del régimen de sedimentos y la caracterización fisicoquímica de los mismos, tal como se describe a continuación. Cabe anotar que los análisis descritos en el presente apartado son consistentes con los análisis que debe realizar la autoridad ambiental en el marco de la implementación de instrumentos de planificación del recurso hídrico como los POMCA, los PORH y el acotamiento de rondas hídricas, entre otros. En este sentido, y teniendo en cuenta que estos lineamientos se enmarcan en la instrumentación vigente para la gestión integral del recurso hídrico (ver capítulo 7), se considera que la caracterización del sistema fluvial puede tomarse de otros instrumentos de planificación implementados por las autoridades ambientales. En la figura 16 se presenta un resumen de las actividades propuestas para el desarrollo de la caracterización del sistema fluvial, las cuales se enfocan al entendimiento de los procesos de transporte de sedimentos.

Figura 16. Actividades propuestas para la caracterización del sistema fluvial en el marco de la fase 1.
Caracterización



6.2.2.2.1. Caracterización morfológica del río

La caracterización morfológica tiene como objetivo principal relacionar las características físicas del río con aspectos de su comportamiento y procesos hidráulicos (Peteuil et ál., 2014). Algunos de los principales aspectos para tener en cuenta incluyen la producción de sedimentos de la cuenca, la naturaleza de los materiales que componen el lecho del río, así como la historia geológica y las características geomorfológicas del cauce.

Esta caracterización permite identificar la distribución de los tamaños de los sedimentos, la estabilidad del cauce, la presencia de componentes como barras de sedimentos, islas y afloramientos de roca, entre otros. Como resultado de esta actividad, se debe contar con una clasificación descriptiva de los procesos que se presentan en el cuerpo de agua, que permita realizar predicciones iniciales acerca de la posible respuesta del sistema hídrico ante intervenciones humanas, así como la propagación de dicha respuesta a lo largo de la red de drenaje (Peteuil et ál., 2014).

Un primer aspecto por considerar para la caracterización morfológica de un río consiste en conocer la geología de la zona o tramo de estudio, lo cual se puede realizar a partir de la información regional existente, incluyendo la disponible en el Servicio Geológico Colombiano, corroborada mediante observación en campo. De manera simultánea, se deben interpretar los procesos morfológicos históricos y su evolución hasta las condiciones actuales, a partir de un análisis multitemporal, el cual se puede realizar a través del procesamiento de fotografías aéreas disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, e imágenes satelitales, preferiblemente de alta resolución espacial (tamaño de pixel <2m). Estos recursos, en conjunto con el trabajo de campo, permiten analizar la evolución histórica del cauce. Para la evolución vertical, se deben realizar levantamientos topo-batimétricos periódicos (anuales o semestrales, según la dinámica del sitio) en puntos estratégicos de control, guardando especial cuidado en la resolución espacial del levantamiento, la fijación de los puntos de amarre y sistemas de referencia tanto físicos como geográficos, de tal modo que los resultados sean comparables entre sí.

A partir de cada levantamiento topo-batimétrico se deben obtener perfiles longitudinales y líneas de flujo aproximadas, así como secciones transversales a lo largo del canal. Los perfiles longitudinales levantados en diferentes periodos son útiles para identificar características del lecho, pendiente longitudinal y sitios con cambios abruptos de pendiente, como piscinas y rápidos, entre otra información. Por su parte, el levantamiento y caracterización de secciones transversales permite contar con información de gran utilidad tal como el área y perímetro mojado, profundidad de flujo, ancho, entre otros, que puede usarse en la estimación de parámetros hidráulicos como el caudal de banca llena, velocidad de flujo, esfuerzo cortante, etc. La anterior información es de gran utilidad en la construcción de modelos hidráulicos y sedimentológicos que permitan analizar el impacto de la implementación de diferentes estrategias de manejo de sedimentos sobre el cuerpo de agua (Peteuil et ál., 2014). Es importante recalcar que la utilidad de la información topo-batimétrica aumenta en la medida en que se cuente con levantamientos realizados de forma periódica y durante varios años, en lo posible antes, durante y después de la ocurrencia de eventos con alto transporte de sedimentos (naturales y antrópicos). Lo anterior, debido a que la comparación entre la geometría del cauce medida en diferentes épocas permite inferir la dinámica y la respuesta del río ante condiciones diversas tales como crecientes, intervenciones antrópicas, entre otras.

La interpretación de la dinámica del canal a partir de observaciones en campo, el análisis de fotografías e imágenes satelitales, mapas geológicos y levantamientos topo-batimétricos periódicos, permite realizar deducciones acerca del comportamiento del cuerpo de agua, su dinámica, patrones de flujo, y los procesos que gobiernan el flujo de agua y sedimentos. Esta información, en conjunto con la información hidrológica, hidráulica y las propiedades físicas de los sedimentos, permiten aproximar la respuesta del cuerpo de agua ante intervenciones sobre caudales líquidos o sólidos de diferente magnitud (Peteuil et ál., 2014).

La configuración morfológica de una corriente permite diferenciar la forma en que ocurren procesos morfodinámicos y define la estructura física del hábitat fluvial la cual, junto con el régimen de caudales líquidos y sólidos, determina la idoneidad de

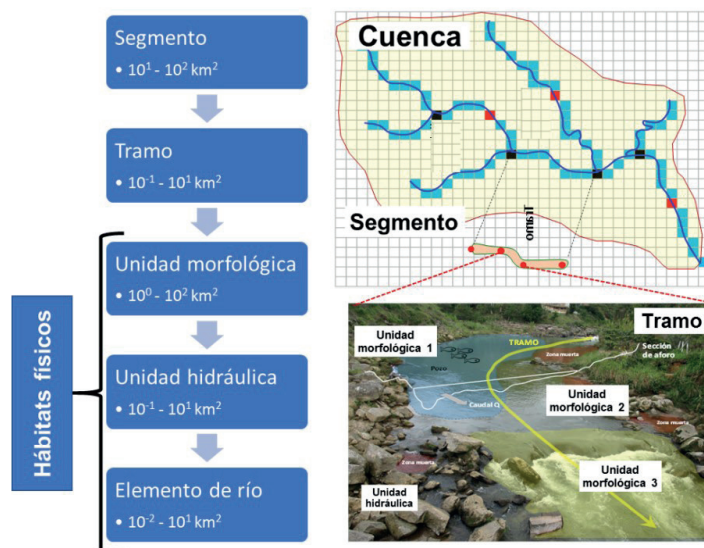
LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

dicho hábitat para el sustento de la biodiversidad y su provisión de servicios ecosistémicos. Por lo anterior, la caracterización morfológica debe ser robusta y escalable, de forma que permita identificar, caracterizar y analizar las diferentes unidades morfológicas de los cuerpos de agua, y así establecer un vínculo entre las características físicas y biológicas de los mismos (Belletti et ál., 2017).

Con el fin de contar con una clasificación que ha sido aplicada y verificada en diversos ambientes a nivel mundial, como método de referencia se recomienda la aplicación de metodologías como el Sistema de Identificación y Clasificación de Unidades Morfológicas (GUS, por sus siglas en inglés) desarrollado por Rinaldi et ál., (2015b), como parte del proyecto REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), financiado por la Comisión Europea. Este método de clasificación tiene como objetivo principal la caracterización de los hábitats físicos y la morfología de los ríos, y se diseñó de forma jerárquica, con miras a ser flexible y adaptable de acuerdo con los objetivos de la clasificación y la información disponible (Belletti et ál., 2017).

En la figura 17 se presenta un esquema de los componentes de la estructura jerárquica propuesta para la clasificación geomorfológica de ríos, la cual parte de unidades de gran escala: unidad de paisaje y cuenca hidrográfica, hasta llegar a escalas mucho más detalladas (unidad hidráulica y elemento de río). Dependiendo de la disponibilidad de información y de la escala respectiva, es posible realizar una clasificación de los diferentes ambientes hidro-morfométricos y asociarlos con la presencia de hábitats para diferentes especies (Belletti et ál., 2017). Asimismo, mediante el análisis de información proveniente, por ejemplo, de sensores remotos, es posible analizar el eventual cambio en las condiciones hidro-morfométricas del cuerpo de agua como consecuencia de alteraciones antrópicas como son la construcción de infraestructura, los cambios en el uso del suelo, etc.

Figura 17. Unidades espaciales propuestas para la clasificación geomorfológica de ríos.



Fuente: adaptado de Belletti et ál. (2017).

Una de las ventajas de la clasificación propuesta consiste en su utilidad para establecer enlaces entre las condiciones físicas y biológicas de los cuerpos de agua, tal como se describe a continuación. Las escalas espaciales correspondientes a las unidades morfológicas y menores (unidades hidráulicas y elementos de río) son las más apropiadas para realizar análisis de la presencia y diversidad de hábitats físicos para especies hidrobiológicas (Rinaldi et ál., 2015b). Generalmente, las unidades morfológicas e hidráulicas se asocian a la escala de meso-hábitat, mientras que los elementos de río usualmente coinciden con la escala de microhábitat.

Algunas ventajas adicionales de esta metodología incluyen los pocos requerimientos de información para su implementación (se puede realizar a partir de análisis de sensores remotos, complementado con verificaciones de campo), así como sus múltiples aplicaciones, no sólo como herramienta de caracterización, sino también para el análisis de la calidad morfológica de los ríos, y como herramienta de monitoreo y evaluación de los efectos de intervenciones antrópicas sobre la morfología y su respectivo vínculo con la ecología (Rinaldi et ál., 2015b).

6.2.2.2.2. Caracterización hidrológica del río

La caracterización del régimen hídrico de la corriente cobra importancia en el manejo de sedimentos principalmente porque la capacidad de transporte de caudales sólidos depende, en gran medida, de la magnitud de los caudales líquidos de la corriente. El conocimiento de las principales características del régimen de caudales proporciona información útil para la predicción de eventos de transporte de sedimentos y ayuda a establecer criterios de manejo de sedimentos en el sistema fluvial. Por otro lado, algunas de las estrategias de manejo de sedimentos existentes se realizan preferiblemente en determinadas épocas del régimen hidrológico.

La caracterización hidrológica se debe realizar con base en un análisis de los caudales históricos registrados en el cuerpo de agua, bien sea tomados de estaciones hidrométricas o a partir de un estudio hidrológico que permita estimar dichos caudales a partir de registros de estaciones climatológicas localizadas en el área de estudio. En todo caso, se recomienda contar con registros de caudales, observados o simulados, de por lo menos 15 años. Como resultado de dicha caracterización se debe contar, como mínimo, con la siguiente información:

- Clasificación de la serie de caudal de acuerdo con condiciones hidrológicas secas, promedio y, húmedas, teniendo en cuenta, por ejemplo, el efecto de fenómenos como el ENSO sobre la variabilidad climática.
- Caudales medios, máximos y mínimos mensuales, por condición hidrológica.

6.2.2.2.3. Caracterización del régimen de sedimentos

Además de obtener información acerca de las características fisicoquímicas de los sedimentos existentes en el río (granulometrías, características de calidad, etc.), es necesario conocer y caracterizar el régimen de sedimentos existente en el cauce, incluyendo sus variaciones espaciales y temporales. En la literatura técnica relacionada se proponen múltiples metodologías para la caracterización de dicho régimen, las cuales varían en función del grado de complejidad y necesidades de información requerida. En caso de contar con redes de monitoreo robustas, incluyendo la medición simultánea y por

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

periodos prolongados de las cargas de fondo y suspendidas de sedimentos, la caracterización del régimen puede hacerse mediante un análisis de los registros históricos disponibles. Sin embargo, teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos la información relacionada con el transporte de sedimentos es escasa, a continuación, se presenta una descripción general de una metodología simplificada para la caracterización del régimen de sedimentos, basada en la propuesta de Wohl et ál. 2015a).

La caracterización rigurosa del régimen natural de sedimentos en el sistema fluvial implica el uso de información de entradas, transporte y almacenamiento de largo plazo, la cual es casi siempre limitada. Adicionalmente, las actividades humanas han modificado sustancialmente el régimen natural de sedimentos, por lo tanto, es difícil encontrar ya condiciones de régimen inalterados. Por lo anterior, se propone realizar la caracterización del régimen de sedimentos con base en el concepto de “régimen balanceado de sedimentos”, el cual corresponde al régimen que se presenta cuando la energía de flujo disponible para el transporte está en balance con el suministro de sedimentos, de tal forma que la geomorfología del río permanece dinámicamente estable sobre un período de tiempo específico (Wohl et ál., 2015a).

El marco conceptual propuesto para la caracterización del régimen de sedimentos en ríos se compone de dos partes, la primera es el balance de sedimentos y la segunda es la caracterización de las interacciones del flujo de agua y sedimentos y sus relaciones con las condiciones del río a nivel de valle.

El balance de sedimentos (sediment budget en inglés) incluye todas las entradas y salidas de sedimentos que existan en un determinado tramo del río, así como los intercambios existentes entre los sedimentos transportados por el cauce principal y aquellos almacenados en el lecho, bancas, barras y zonas inundables que hagan parte del sistema. Este balance permite cuantificar y caracterizar cada uno de estos componentes del régimen de sedimentos. Teniendo en cuenta que las interacciones entre estos flujos de sedimentos influyen cuánto, cómo y dónde son transportados y almacenados los sedimentos, y por tanto la abundancia, distribución y estabilidad de hábitats en el río, un balance de sedimentos constituye una herramienta fundamental para el entendimiento de la dinámica del cuerpo de agua y su relación con la ecología.

La estimación del balance de sedimentos puede realizarse a escala de cuenca o de tramo, teniendo en cuenta las variabilidades espaciales y temporales asociadas. Es importante tener en cuenta que características del régimen como la magnitud, frecuencia, duración y estacionalidad o tiempo de ocurrencia de las entradas y salidas de sedimentos pueden presentar una alta variabilidad a lo largo de un mismo río. De manera particular, los sólidos suspendidos pueden obedecer a procesos de escorrentía en las partes altas de la cuenca y a la erosión de las bancas en las partes bajas de la misma. Por ejemplo, variaciones en los tiempos de ocurrencia de caudales capaces de transportar sedimentos, o en el volumen y granulometría en zonas de almacenamiento, en diferentes zonas de una misma red de drenaje, generan patrones particulares de transporte de sedimentos que se ven reflejados en diferencias en las condiciones de los hábitats en diferentes sectores del río, y diferentes niveles de estrés para los organismos como consecuencia de cambios en la turbiedad, abrasión, movimiento del material del lecho, etc.

La segunda parte del marco conceptual propuesto corresponde a una caracterización de las interacciones del flujo de agua y sedimentos y sus relaciones con las condiciones del río a nivel de valle. Lo anterior incluye una caracterización de la geometría del valle (incluyendo aspectos como pendiente longitudinal y ancho del lecho), material del lecho del cauce y presencia y características de la vegetación de ribera. Los aspectos mencionados son de especial importancia teniendo en

cuenta que el flujo de agua y sedimentos gobierna aspectos como la geometría del cauce, los hábitats acuáticos y de ribera, entre otros.

Es importante tener en cuenta que los aspectos mencionados involucran una complejidad que puede exceder el alcance de la estrategia de manejo de sedimentos, por lo que no se debe perder de vista el objetivo de la caracterización del régimen a realizar. Por lo tanto, es importante tener en cuenta algunos aspectos que permiten delimitar dicha caracterización:

- En primer lugar, debe definirse la escala temporal en la cual se enmarcará la caracterización, teniendo en cuenta que los eventos a corto plazo generan alteraciones rápidas que pueden afectar temporalmente algunos hábitats en el cuerpo de agua, pero no necesariamente son significativos a nivel morfológico.
- Por otra parte, es importante considerar el sistema hídrico de forma integral, analizando el posible efecto de los tributarios sobre el cuerpo de agua estudiado, e involucrando las condiciones hidrológicas a nivel de cuenca.
- Finalmente, se debe definir la escala espacial. Se recomienda tener en cuenta aspectos regionales que pueden impactar el régimen de sedimentos, como eventuales procesos de erosión existentes en las partes altas de la cuenca, o el posible efecto de los sedimentos varios kilómetros aguas abajo de estructuras transversales.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, es recomendable que el objetivo de la caracterización del régimen se centre en la estimación de un balance de sedimentos y en la determinación de cómo dicho balance puede relacionarse con el logro de unos objetivos de manejo determinados. Este análisis puede ser realizado mediante una comparación de los regímenes de sedimentos presentes aguas arriba y aguas abajo de una zona intervenida antrópicamente y puede ser de gran utilidad como un indicador de posibles tendencias de cambio morfológico en un río, mediante la identificación de zonas en las que la producción de sedimentos excede, iguala, o es superada por la capacidad de transporte del río. En este tipo de casos, es posible plantear estrategias de manejo que permitan llegar a un régimen balanceado, de forma que se obtenga una estructura y funcionamiento del río que corresponda con el escenario deseado.

Sin embargo, la medición directa del régimen de sedimentos en un cauce natural es un proceso que requiere la recolección de información primaria a largo plazo, la cual no siempre está disponible. Por lo anterior, se han desarrollado diversas herramientas y métricas que permiten estimar el régimen de sedimentos de forma indirecta, involucrando aspectos tales como cambios en la forma del lecho, características de los sustratos y cambio en las planicies de inundación. Wohl et ál. (2015a) presentan un resumen de las principales métricas existentes para la estimación del régimen de sedimentos, las cuales varían en complejidad desde el levantamiento y comparación de secciones transversales del lecho del cauce, pasando por la identificación de islas y barras, caracterización de materiales del lecho, medición directa de sólidos suspendidos y carga del lecho, caracterización de formas de canales, identificación de patrones de vegetación, hasta modelos más completos como el balance de sedimentos, modelos de evolución del canal y otras tecnologías emergentes. Para información detallada con respecto a los métodos existentes, se remite al lector a dicha publicación y referencias relacionadas (ver, por ejemplo, Wohl et ál., 2015a y Belletti et ál., 2017).

6.2.2.4. Caracterización fisicoquímica de los sedimentos

La caracterización de los sedimentos transportados por el cuerpo de agua constituye un aspecto de gran importancia para el entendimiento de los procesos de transporte y acumulación, así como para la posterior definición de las estrategias de manejo. En la caracterización se debe involucrar el muestreo sistemático de sedimentos de fondo y en suspensión en varias estaciones localizadas en distintos puntos de la cuenca hidrográfica, procurando que dicho muestreo abarque las diferentes épocas hidrológicas de la cuenca correspondiente.

Los lineamientos nacionales para el monitoreo de sedimentos se encuentran descritos en el Protocolo de Monitoreo del Agua (Ideam, 2018), el cual incluye las consideraciones a tener en cuenta con respecto a localización de puntos de monitoreo, frecuencia, tipos de muestra, instrumentos de medición, entre otros aspectos. Adicionalmente, se recomienda tener en cuenta las buenas prácticas y avances definidos en la literatura técnica relacionada (ver, por ejemplo, Ríos et ál., 2016).

Si bien existen diversos instrumentos y técnicas para el muestreo de sedimentos de fondo y en suspensión, el encargado de los estudios debe seleccionar los métodos que le ofrezcan la menor incertidumbre en los registros, ya que de ello depende en gran parte la posibilidad de éxito o fracaso de las medidas de manejo de sedimentos. La selección de la técnica de muestreo, su modo de aplicación y distribución espaciotemporal dependerá de los objetivos propuestos, los parámetros que se deseen medir, las características del lecho, el régimen hidrológico de la corriente, el tamaño de los sedimentos y de las características hidráulicas del flujo en el sitio de medición, entre otros aspectos (Peteuil et ál., 2014).

En términos generales, en la caracterización se deben contemplar como mínimo los siguientes requisitos:

- Distribución granulométrica de tamaños de sedimentos de fondo.
- Peso específico medio de los sedimentos de fondo y en suspensión.
- Concentración de sólidos en suspensión.
- Hidrógrafa de sedimentos en suspensión, a partir de la correlación entre la turbidez y la concentración de sedimentos.

De acuerdo con Peteuil et ál. (2014), la realización de una campaña exitosa de caracterización física de sedimentos depende de una correcta planificación de la misma, en la que se deben chequear prerrequisitos como la definición de los objetivos de las mediciones, la selección de los métodos más apropiados para cumplir con dichos objetivos, una evaluación precisa de los tiempos y tamaños de muestra requeridos para obtener una adecuada representación de los sedimentos presentes en el río y una adecuada planeación del muestreo (ver Ideam, 2018).

La determinación de la distribución de tamaños de sedimentos en diferentes sitios a lo largo del río se usa para caracterizar la variabilidad longitudinal y vertical de los sedimentos depositados, así como el potencial de erosión de los depósitos y el eventual riesgo de daños a la infraestructura existente en la cuenca (Peteuil et ál., 2014).

Por su parte, para realizar el análisis y la evaluación de la composición química y biológica de los sedimentos se recomienda tomar muestras representativas del material depositado en el lecho de los afluentes y en los cuerpos de agua receptores, en los mismos puntos seleccionados para la caracterización física. Esta caracterización debe realizarse tanto para la fase sólida como para la fase líquida (agua de poros) del sedimento y debe incluir ensayos para detectar y medir la presencia

de compuestos que se puedan encontrar tanto en el agua como en los sedimentos, dependiendo del uso del suelo en la cuenca y las características históricas de la calidad del agua. Es importante tener en cuenta que la definición de los parámetros a monitorear en las fases líquida y sólida de los sedimentos deberá realizarse a partir de un análisis detallado de las características particulares de cada caso de estudio. En todo caso, a continuación, se presentan algunos parámetros recomendados a tener en cuenta:

- Demanda béntica de oxígeno
- Potencial Redox
- Arsénico
- Bario
- Cadmio
- Cromo total
- Mercurio
- Plomo
- Selenio

Los anteriores metales y metaloides son de especial interés en aquellas cuencas en las que se desarrollen actividades de minería y otras actividades extractivas dentro de los cauces, así como en cuencas caracterizadas por tener material parental con altos contenidos de estos elementos. Adicionalmente, para la fase sólida de las muestras de sedimento recolectadas, se recomienda realizar ensayos para la determinación de:

- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Carbono orgánico total
- Carbonatos
- Hierro

Por su parte, se requiere realizar una caracterización de la calidad de la fase líquida, o agua de poros de las muestras de sedimentos recolectadas, para lo cual se recomienda medir, como mínimo, las siguientes variables (se anota que el listado definitivo de variables a monitorear dependerá de las particularidades de cada caso de estudio, incluyendo las actividades económicas existentes en la cuenca):

- Hierro total
- Cinc
- Manganeseo
- Magnesio
- Sodio

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

- Cloruros
- Sulfuros
- Sulfatos
- pH
- Temperatura
- Conductividad eléctrica
- Oxígeno disuelto
- Alcalinidad
- Grasas y aceites de la capa de sedimentos de fondo
- Fenoles de la capa de sedimentos de fondo
- Hidrocarburos totales del petróleo (HTP) de la capa de sedimentos de fondo
- Carbono orgánico disuelto
- Nitrógeno amoniacal
- Nitratos
- Fosfatos
- Cromo total
- Plomo
- Arsénico
- Bario
- Cadmio
- Mercurio
- Selenio
- Sulfuros
- Demanda química de oxígeno
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Otras sustancias de interés, como agroquímicos, dependiendo de la existencia y representatividad de actividades agrícolas en la cuenca.

Adicionalmente, en la etapa de caracterización es importante tener en cuenta los principales factores que afectan la producción de sedimentos a nivel de cuenca, incluyendo aspectos como las características climáticas de la cuenca, los tipos de suelo, la cobertura vegetal del mismo, topografía y geomorfología del área de estudio, características de la red de drenaje, proceso lluvia – escorrentía, entre otros (Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL, 2000).

6.2.2.2.5. Modelación/caracterización del transporte de sedimentos

Una vez analizados los procesos que gobiernan el régimen de sedimentos en el sistema hídrico bajo estudio, es necesario proceder a la implementación de un modelo de transporte de sedimentos que represente adecuadamente dichos procesos. La utilidad de este tipo de modelos consiste en que permiten realizar simulaciones de diferentes estrategias de manejo de sedimentos y evaluar su impacto sobre el régimen de transporte de sedimentos.

Es importante tener en cuenta que cualquier modelo matemático corresponde a una representación de la realidad; teniendo en cuenta la complejidad del sistema natural, cualquier modelo implementado requiere unas simplificaciones que permitan representar de forma eficiente los procesos a representar (Morris y Fan, 2010). Por lo tanto, en cualquier proceso de modelación es importante seguir un protocolo de modelación que permita involucrar en los análisis las fortalezas y limitaciones del modelo, así como un análisis de incertidumbre, de forma que el modelo implementado permita representar de forma adecuada los procesos naturales predominantes a las escalas de trabajo requeridas para el objeto de modelación. En general, los modelos de transporte de sedimentos que se implementen deben permitir representar los siguientes procesos:

- El aporte de agua y sedimentos generados por la cuenca aferente al cuerpo de agua.
- Caracterización del régimen de sedimentos observado incluyendo una caracterización de los procesos de transporte, depósito y socavación, bajo diferentes condiciones hidrológicas.
- Patrones de depósito y socavación generados por efecto de intervenciones antrópicas.
- El potencial impacto de los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos sobre la calidad del agua de los cuerpos lénticos y lóticos.

Dependiendo de la complejidad, la disponibilidad de información y las características particulares de cada cuenca y cada cuerpo de agua, se pueden priorizar algunos de los anteriores procesos sobre el resto, con el fin de reducir la complejidad y la incertidumbre asociada al proceso de modelación. Sin embargo, en la medida en que el modelo implementado incorpore un mayor número de procesos a nivel de cuenca, aumentará su utilidad para la estimación de diferentes alternativas de gestión (por ejemplo, si el modelo incorpora los procesos de erosión a nivel de cuenca, es posible evaluar el impacto de estrategias de reforestación sobre la cantidad de sedimentos generados en la cuenca).

Teniendo en cuenta lo anterior, es recomendable contar con un modelo regional que permita caracterizar los procesos de erosión, transporte y depósito que ocurren a nivel de cuenca, complementado con un modelo de mayor detalle que permita simular a una escala local los procesos que ocurren como consecuencia de la implementación de medidas de gestión de sedimentos. Es importante mencionar que actualmente existen numerosas herramientas de modelación regional que permiten realizar estimaciones acertadas del comportamiento a nivel de cuenca, a partir de información secundaria como: imágenes satelitales, registros de sedimentos de estaciones del Ideam, etc.

En todo caso, para que un modelo represente adecuadamente los procesos de transporte de sedimentos y, por lo tanto, sea útil para la simulación de estrategias de manejo de sedimentos, es necesario que dicho modelo integre diversos aspectos relacionados con la producción y transporte de agua y sedimentos. Entre dichos aspectos se resaltan el componente

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

hidrológico, la geometría del cauce, la hidrodinámica, el transporte de sedimentos, entre otros. En la actualidad existen diversas herramientas de modelación que involucran diferentes grados de complejidad y, por tanto, diversos requerimientos de información para su implementación y calibración. La literatura especializada contiene la descripción de los modelos más comúnmente usados y los procesos modelados (ver por ejemplo Morris y Fan, 2010).

Sin importar el tipo de modelo que se implemente para un sistema en particular, es importante que el proceso de implementación responda a un riguroso protocolo de modelación que involucre, por lo menos los siguientes aspectos (Morris y Fan, 2010):

1. Identificación del problema: todo proceso de modelación obedece a una problemática relacionada con el entendimiento de un problema determinado, como, por ejemplo, la selección de la mejor estrategia de manejo de sedimentos.
2. Desarrollo de un modelo conceptual: una vez se ha identificado el problema, es necesario desarrollar un modelo conceptual que parta de la identificación y análisis de los procesos y variables predominantes en el sistema. Para este caso, la modelación conceptual debe partir de la caracterización del régimen de sedimentos.
3. Definir los objetivos, el alcance y la metodología de modelación: a partir del modelo conceptual, es posible delimitar el alcance y definir los objetivos que se persiguen con el ejercicio de modelación. Este punto incluye la definición del alcance espacial y temporal de la modelación, de forma que estos contribuyan con los objetivos del estudio, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo y recursos, y buscando reducir la complejidad de la modelación, con el fin de no adicionar incertidumbre a los análisis.
4. Implementación y calibración del modelo: este paso debe iniciar con la selección o el desarrollo de la herramienta de modelación más apropiada para los propósitos definidos. Posteriormente, se debe proceder a la implementación de dicho modelo, incluyendo su verificación mediante simulaciones de condiciones conocidas o soluciones analíticas. Posteriormente, se debe realizar la calibración del modelo, entendida como el ajuste de sus parámetros dentro de un rango razonable, de forma que se reproduzcan de forma aceptable las condiciones observadas en el sistema natural. Para esto, deben usarse series de tiempo históricas o series medidas in situ.
5. Validación del modelo: finalmente, siempre que la disponibilidad de información lo permita, debe realizarse la validación del modelo previamente calibrado, la cual consiste en la simulación usando como datos de entrada series de tiempo diferentes a las usadas en la calibración, con el fin de verificar que el modelo representa de forma adecuada los procesos simulados en condiciones diferentes a las usadas en la calibración.

Una vez implementado, calibrado y validado, el modelo de transporte de sedimentos puede usarse en la simulación de diferentes estrategias de manejo de sedimentos y en la estimación del impacto de dichas estrategias sobre el régimen de sedimentos a nivel de cuenca. Para la implementación de este tipo de modelos se recomienda consultar los protocolos de modelación publicados por el Ideam y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (ver, por ejemplo, Minambiente, 2018a).

1.1.1.1.1 Caracterización de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua

Además de la caracterización física y química de las fases líquida y sólida de los sedimentos, es necesario realizar una determinación de la línea base, en términos de calidad del agua, de los cuerpos de agua sujetos a intervención durante la estrategia de manejo de sedimentos. Para esto, se recomienda realizar campañas de monitoreo de parámetros físicos, químicos y biológicos en la cuenca.

Se anota que, teniendo en cuenta que se espera que la implementación de estrategias para el manejo de sedimentos se realice en armonía con otros instrumentos de planificación del recurso hídrico, la caracterización de la calidad del agua puede hacerse en el marco de dichos instrumentos y usar los resultados como insumo para los análisis posteriores. En este sentido, se recomienda revisar otros documentos publicados por la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, incluyendo la Guía Nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales (Minambiente, 2018a) y la Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial (Minambiente, 2018b). Como resultado de dichos instrumentos, es posible contar con modelos de calidad del agua representativos de los procesos fisicoquímicos de los que depende la capacidad de asimilación de cargas contaminantes del cuerpo de agua, a partir de los cuales se podrá contar con una herramienta predictiva para la simulación de escenarios futuros que permitan identificar el efecto de la implementación de diferentes medidas de manejo sobre la calidad, los usos del agua y las comunidades hidrobiológicas.

6.2.2.2.7. Caracterización ecológica

Se recomienda hacer la caracterización ecológica del ecosistema, con base en la caracterización de la calidad del hábitat. Las metodologías más aplicadas para estimar la calidad del hábitat se basan en la determinación de índices de calidad, cuyos resultados establecen un insumo en procesos de restauración ecológica fluvial en tramos prioritarios, selección de tramos de mayor interés para la conservación y orientación de la gestión de las actividades que afecten al espacio fluvial. En el análisis se debe incluir la caracterización de las relaciones entre los ciclos biológicos de los indicadores seleccionados y los ciclos hidrológicos de los tramos y sitios de monitoreo definidos. Dichos indicadores permiten evaluar la efectividad o los impactos de las actuaciones orientadas al mejoramiento de la integridad ecológica de zonas degradadas, la conservación de la diversidad biológica y la mitigación de la pérdida de ecosistemas acuáticos (Camprodon et ál. 2012). En la tabla 3 se describen los tres tipos de indicadores recomendados para la evaluación.

Tabla 3. Tipos de indicadores para la evaluación de la calidad de hábitat

Parámetros	Descripción	Indicadores
Fisicoquímicos	Miden distintas variables de calidad del agua.	Demanda bioquímica de oxígeno Conductividad eléctrica pH Oxígeno disuelto Temperatura del agua Concentración de nutrientes (nitrógeno amoniacal, fosfatos, nitratos, etc.)

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Parámetros	Descripción	Indicadores
Biológicos	Se adaptan a cada grupo de organismos: bioindicadores ecológicos e índices bióticos.	Índice de Integridad Biótica (IBI) Índice de Integridad del Hábitat (IIH) Índices para fitobentos, macrófitas, vegetación riparia, macroinvertebrados acuáticos, peces
Hidromorfológicos	Caracterizar la morfología fluvial, tipología de la orilla, conectividad fluvial, caudal, heterogeneidad y calidad del hábitat del bosque de ribera.	Índice Calidad Bosque de Ribera (QBR) Índice de Hábitat Fluvial (IHF) Índice Hidromorfológico (IHG) Morphological Quality Index (MQI) Riparian Forest Evaluatios (RFV) River Habitat Survey (RHS)

Fuente: adaptado de Camprodon et ál. (2012); Confederación Hidráulica del Ebro (2013).

En todo caso, se recomienda que los indicadores a implementar para cada caso en particular sean definidos como resultado de un análisis de las particularidades de cada caso de estudio, teniendo en cuenta el nivel de detalle deseado y las limitaciones de información disponible. Es importante tener en cuenta que instrumentos de planificación como los PORH, los POMCA y el acotamiento de rondas hídricas incluyen el requerimiento de estimar indicadores como los presentados en la tabla 3, por lo que se recomienda que la selección de los indicadores más adecuados para cada caso particular se realice como resultado de un análisis integral de la instrumentación aplicable.

6.2.2.3. Caracterización de las intervenciones y presiones antrópicas existentes

Además de la caracterización del sistema fluvial de acuerdo con los aspectos descritos en las secciones anteriores, el diseño de la estrategia de manejo de sedimentos a implementar requiere del conocimiento que se tenga acerca de las diferentes alteraciones antrópicas que tengan un impacto considerable sobre el régimen de sedimentos. A continuación, se describen las actividades propuestas para realizar dicha caracterización, las cuales se resumen en la figura 18.

Figura 18. Actividades propuestas para la caracterización de las intervenciones y presiones antrópicas en el marco de la fase 1. Caracterización.



6.2.2.3. Caracterización de aspectos sociales y económicos

Este componente tiene como objetivo realizar una caracterización socioeconómica general de la cuenca, con miras a establecer una línea base que pueda usarse en fases posteriores para estimar el eventual impacto de la implementación de estrategias de manejo de sedimentos sobre las actividades antrópicas. Para esto, se recomienda describir, como mínimo, los siguientes aspectos:

- Usos del agua actuales y potenciales
- Población que habita en el área, así como su caracterización
- Actividades económicas predominantes
- Navegabilidad de ríos y transporte fluvial
- Actividad pesquera
- Obras de infraestructura tales como vías, puentes, viaductos, redes energéticas, gasoductos, poliductos, captaciones de acueducto, y otros a los que haya lugar
- Actividades agrícolas y pecuarias
- Asentamientos humanos por regulación o incremento de la frecuencia de inundaciones

De manera similar a lo descrito para la caracterización de la calidad del agua y la caracterización ecológica, los aspectos antrópicos pueden analizarse a partir de la información levantada en el marco de otros instrumentos de planificación del recurso hídrico como los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA) y los planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH).

6.2.2.3.2. Descripción de las características técnicas de presas y obras complementarias

En caso de existir presas y embalses en la cuenca de estudio, se deben caracterizar las condiciones técnicas de la presa (materiales, tamaño, estado físico), del vertedero, el estado operativo, tipo, ubicación y la capacidad de los sistemas de compuertas. También es necesario conocer el estado de los ductos de evacuación existentes (túneles o canales abiertos), así como la capacidad tecnológica y logística del operador de dicha infraestructura para implementar medidas de evacuación de sedimentos al mínimo nivel de riesgo, entre otros aspectos.

Esta información puede consultarse en la documentación de los estudios ambientales implementados para la construcción de los respectivos proyectos, sean estudios de impacto ambiental o planes de manejo, para lo cual se pueden consultar las bases de datos de la autoridad ambiental competente. En caso de que esta información no se encuentre disponible, se recomienda coordinar los procesos de levantamiento con la(s) empresa(s) operadora(s) del proyecto correspondiente. Este conocimiento permitirá entender las particularidades de cada proyecto, de modo que se puedan evaluar la factibilidad técnica y el grado de riesgo que representaría la implementación de una u otra alternativa de manejo a considerar.

6.2.2.3.3. Descripción técnica de embalses

En caso de existir embalses en la cuenca, es importante conocer el tamaño relativo o tamaño hidrológico que muestra la relación entre el volumen total del embalse y los caudales líquidos y sólidos medios anuales que ingresan al embalse. Según Morris y Fan (2010), el tamaño hidrológico es un factor primario que influye en la tasa de acumulación de sedimentos y es un determinante principal de los tipos de técnicas de manejo de sedimentos que se pueden utilizar en el embalse, ya que influyen en los tiempos de residencia.

Asimismo, es importante conocer el volumen total, el volumen útil, el volumen muerto y analizar la dinámica temporal de la pérdida de volumen de los embalses existentes, y las respectivas proyecciones para embalses futuros. Es importante describir la forma del embalse y la distribución espacial y temporal de los patrones de sedimentación que éste presenta. Para esto, se recomienda contar con registros históricos de batimetrías realizadas en el embalse que permitan caracterizar el avance de la cuña de sedimentos a través de los años (ver Morris y Fan, 2010).

Esta información puede consultarse en la documentación de los estudios ambientales implementados para la construcción de los respectivos proyectos, sean estudios de impacto ambiental o planes de manejo, para lo cual se pueden consultar las bases de datos de la autoridad ambiental competente. En caso de que esta información no se encuentre disponible, se recomienda coordinar los procesos de levantamiento con la(s) empresa(s) operadora(s) del proyecto correspondiente(s).

6.2.2.3.4. Cambios en los usos del suelo

Se deben identificar y caracterizar los cambios que se hayan generado en los usos del suelo, a partir de bases de datos y estudios previos realizados por la autoridad ambiental, complementados con imágenes aéreas y fuentes de información secundaria de entidades del orden nacional que permitan estimar aspectos como cambios en las coberturas y usos que puedan potencializar procesos de producción de sedimentos o deforestación, entre otros aspectos.

6.2.2.3.5. Descripción y caracterización de otras alteraciones y presiones sobre el régimen de transporte de sedimentos

Se recomienda identificar y caracterizar todas las posibles actividades y presiones antrópicas que puedan generar modificaciones en los regímenes de producción de sedimentos y transporte de caudales líquidos y sólidos. Para esto se deben tener en cuenta, entre otras, las recomendaciones presentadas en la sección 6.2.2.1.4 del presente documento.

6.2.3. Fase II: Evaluación y selección de alternativas de manejo de sedimentos

6.2.3.1. Descripción de las alternativas consideradas

Una vez caracterizado el sistema fluvial, los procesos de producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica y las principales intervenciones antrópicas existentes, se deben seleccionar las alternativas más adecuadas teniendo en cuenta

las condiciones dadas. Para esto, se debe realizar una descripción técnica detallada de cada una de las alternativas consideradas, teniendo en cuenta las particularidades del caso de estudio. Se deben incluir y justificar, como mínimo los siguientes aspectos:

- Descripción detallada de las actividades a adelantar, frecuencia, época según el régimen hidrológico, duración.
- En caso de requerirse modificaciones sobre la infraestructura existente en la cuenca para la implementación de la estrategia, dichas modificaciones deben ser descritas y, en lo posible cuantificadas. Esto incluye modificaciones tales como construcción de nuevas compuertas o túneles en las presas, modificación de actividades, etc.
- Requisitos operacionales para la implementación de cada alternativa.
- Análisis de costos de la implementación de la alternativa.

Para el planteamiento de escenarios de manejo, se deben tener en cuenta consideraciones técnico-económicas como el estado de la infraestructura existente o el costo y la posibilidad de construcción de nuevas estructuras para el manejo de sedimentos en proyectos existentes, la posibilidad de estrategias de reducción de aporte de sedimentos a nivel de cuenca, o diferentes técnicas de manejo como tránsito o remoción de sedimentos para proyectos nuevos.

6.2.3.2. Evaluación y selección de alternativas para el manejo de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica

Los factores físicos que determinan la producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica por los procesos de erosión hídrica y movimientos en masa son:

- Las propiedades físicas de los suelos
- Las propiedades físicas de las rocas
- La topografía
- Las coberturas vegetales
- Los aspectos climáticos

De estos factores, son las coberturas vegetales las que pueden controlarse y modificarse por acciones antrópicas, por ejemplo, a partir de procesos de planificación de usos del suelo (planes de ordenamiento territorial, planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas). De esta forma, todas las alternativas para el manejo de la producción de sedimentos en una cuenca involucran cambios en los usos del suelo.

Los resultados de los modelos de erosión reseñados en la fase 1 de conocimiento son dependientes de los usos del suelo (o coberturas vegetales), los cuales se expresan en factores numéricos según los factores de la USLE. De esta forma, cambios en los usos del suelo en la cuenca se reflejan en cambios en los resultados.

La evaluación y selección de alternativas en cuanto a la producción por erosión hídrica comprenderá entonces la definición

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

de usos del suelo que permitan el control de la erosión en zonas con alta producción de sedimentos. A partir del análisis de los mapas derivados de la modelación será posible determinar cuáles usos del suelo están acelerando los procesos de erosión en la cuenca hidrográfica. Además, dichos modelos servirán para ejercicios de prospectiva en la cuenca hidrográfica, pues permiten simular escenarios de cambios de usos del suelo y sus impactos en la producción de sedimentos.

En estos ejercicios de prospectiva se deben definir las tasas de producción de sedimentos por erosión hídrica tolerables para el sistema hídrico y a partir de este criterio, adecuar la planificación de usos del suelo para que se alcancen estas tasas.

6.2.3.3. Simulación de escenarios

Los modelos de transporte de sedimentos, adecuadamente calibrados y validados, pueden usarse para evaluar el efecto de diferentes alternativas de manejo de sedimentos sobre aspectos como la geomorfología del cuerpo de agua, patrones espaciales de sedimentación, así como posibles cambios en el régimen de sedimentos, incluyendo cambios morfológicos y de calidad del agua, dependiendo de las características del modelo usado. Lo anterior se realiza usando como base el modelo calibrado, el cual corresponde a la condición actual variando diferentes condiciones de acuerdo con la estrategia de manejo respectiva, incluyendo aporte de sedimentos de la cuenca, condiciones hidrológicas, acciones de operación, entre otras.

El nivel de detalle de los escenarios simulados y los resultados obtenidos dependerán de las características de la herramienta de modelación seleccionada y de la información disponible. En todo caso, aun cuando se implementen herramientas de modelación simplificadas, es posible apoyar la toma de decisiones con respecto a escenarios futuros con otras fuentes de información como imágenes aéreas, resultados de otros instrumentos de planificación del recurso hídrico, entre otros.

Adicionalmente, en los escenarios simulados se deben involucrar diferentes condiciones hidrológicas en el río, con el fin de estimar el efecto de dilución y los cambios sobre la capacidad de transporte del río, así como consideraciones ecológicas y de calidad del agua.

6.2.3.4. Análisis costo beneficio de las técnicas consideradas

Se deberá realizar un análisis de costos y beneficios de la implementación de cada alternativa analizada, con el fin de afianzar los criterios para la toma de decisiones.

6.2.3.5. Evaluación de impactos ambientales, económicos y sociales y selección de la alternativa recomendada

Después de incorporar las consideraciones técnicas y económicas respectivas en la simulación de escenarios, se deberá proceder a la realización de un análisis de riesgos para cada alternativa, así como un análisis de los impactos ambientales potenciales de cada una de ellas. Con esto se busca complementar, desde un punto de vista integral y de sostenibilidad, la toma de decisiones respecto a la alternativa a implementar. Se deberán tener en cuenta, como mínimo, los siguientes criterios:

- Impactos sobre los aspectos ambientales destacados en este documento: geomorfología, hidrología, calidad del agua, comunidades bióticas, calidad del hábitat. Para esto, es importante incorporar en el análisis aspectos como el régimen de sedimentos, la calidad del agua, cambios morfológicos esperados sobre el cuerpo de agua, aspectos hidrobiológicos tales como la disponibilidad de hábitats y la vegetación de ribera, entre otros.
- Impactos sobre las poblaciones humanas. Para esto, es importante tener en cuenta los usos del agua en la cuenca y su eventual afectación como consecuencia de la implementación de las alternativas de manejo.

6.2.3.5. Socialización de la estrategia de manejo de sedimentos

Durante todo el proceso de caracterización y definición de la estrategia de manejo de sedimentos se deben realizar espacios de divulgación, extendiendo la invitación a las autoridades municipales y regionales y otras instancias interesadas (incluyendo instancias como los consejos municipales de gestión del riesgo), así como a las comunidades localizadas dentro del área de influencia. Se informará sobre las características de las actividades por desarrollar y se promoverá la construcción colectiva de escenarios futuros que aporten a la recuperación o el mantenimiento del régimen de caudales líquidos y sólidos de la cuenca, sin afectar los servicios ecosistémicos prestados por los cuerpos de agua y, particularmente, el desarrollo de actividades antrópicas en la cuenca.

6.2.3.6. Fase III. Implementación de estrategias para el manejo de sedimentos

Como se ha mencionado, las medidas para el manejo de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica se definen por políticas de usos del suelo. De este modo, las herramientas para la ejecución de las estrategias serán los planes de ordenamiento territorial y los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, POMCA. Es necesario incluir en estas herramientas de planificación los resultados y análisis de los modelos de erosión y los ejercicios de prospectiva en los cuales deben participar todos los actores involucrados en los planes y políticas de usos del suelo en la cuenca hidrográfica.

Adicionalmente, las estrategias de manejo pueden incluir la implementación de medidas como la restauración de rondas hídricas, restauración geomorfológica de tramos del sistema fluvial, modificación de la operación de la infraestructura existente con el fin de restablecer el régimen o el balance de caudales líquidos y sólidos, construcción de estructuras para control de la erosión, entre otros aspectos.

Es importante tener en cuenta que cualquier estrategia que se implemente deberá tener una visión de largo plazo, toda vez que los tiempos de implementación y los efectos sobre la cuenca sólo serán visibles un periodo de tiempo después de su ejecución.

6.2.4. Fase IV. Evaluación y seguimiento

Para verificar la efectividad de las medidas definidas en relación con el manejo de sedimentos es recomendable conocer el comportamiento temporal de los caudales líquidos y sólidos en los diferentes cuerpos de agua. Esto implica que se debe disponer de mecanismos de medición de caudales líquidos y sólidos.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Dado que la relación entre el caudal sólido y el caudal líquido varía en el tiempo (Tuset et ál., 2014), deben medirse ambos de forma que se pueda determinar su hidrógrafa de manera acertada, especialmente en los casos en que la cuenca presente cambios como aportes o intervenciones antrópicas en sus cauces. Para sortear la dificultad para medir de manera continua la concentración de sólidos suspendidos se pueden usar los siguientes métodos (Morris & Fan, 2010).

1. Recolección de datos de concentración en puntos discretos en el tiempo de forma ponderada e integrada en la vertical, haciendo especial énfasis en monitorear los eventos de descarga más grandes, responsables del transporte de la mayoría de los sedimentos.
2. Recolección por bombeo de un número más grande de muestras puntuales recolectadas en diferentes tiempos a lo largo de la hidrógrafa para caracterizar mejor las etapas crecientes y decrecientes de la misma.
3. Mediciones continuas de turbiedad, que pueden o no correlacionarse bien con mediciones discretas de concentración de sólidos suspendidos, dependiendo de las características de la corriente.

Para estimar la carga del lecho, debido a la dificultad y el riesgo asociado a su medición directa, se podrían realizar estimaciones como un porcentaje de la concentración de sólidos suspendidos a partir de las características del sistema fluvial, o se podría calcular el valor aproximado a partir de la hidráulica fluvial y ecuaciones disponibles para la estimación de la carga del lecho.

Adicionalmente, se deben realizar campañas de monitoreo periódicas (se recomienda realizar por lo menos dos campañas anuales) con el fin de evaluar la calidad del agua y la calidad ecológica en términos de hábitat, de acuerdo con los protocolos descritos en este documento respecto de la caracterización del sistema fluvial.

Asimismo, se recomienda realizar levantamientos topo-batimétricos de seguimiento con el fin de verificar eventuales cambios en la morfología del cuerpo de agua. Se debe caracterizar el hábitat fluvial, para lo cual se sugiere establecer unidades morfológicas de control en el cauce de acuerdo con criterios definidos por el personal experto de la autoridad ambiental. La frecuencia de realización de este tipo de levantamientos dependerá de factores como la dinámica particular de cada cuerpo de agua, así como su grado de alteración y las presiones existentes sobre los regímenes de caudales líquidos y sólidos.

En todo caso, se deberán emplear los mismos criterios de análisis e indicadores definidos en la caracterización inicial del sistema fluvial, de modo que se pueda establecer un comparativo de forma cualitativa o cuantitativa de los efectos positivos o negativos ocasionados luego de la implementación de las medidas definidas. Se recomienda realizar el monitoreo de tal modo que abarque las diferentes épocas climáticas características de la zona.

Se deberá evaluar la incidencia que se haya podido tener sobre la infraestructura, las poblaciones ubicadas en las orillas del río, la continuidad del suministro de agua a los acueductos locales, el transporte fluvial, actividades agropecuarias, la minería artesanal o industrial, comunidades de pescadores, comunidades indígenas, campesinas o afrodescendientes, entre otros aspectos relevantes existentes en la cuenca.

6.2.5.1. Indicadores propuestos para la evaluación y seguimiento de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica

Para determinar la eficacia de las medidas adoptadas con relación a la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica, es necesario contar con al menos una estación hidrológica en la cuenca en la que se efectúen aforos líquidos y sólidos al menos cuatro veces al año y medidas diarias de sedimentos en suspensión. En las cuencas que cuentan con estaciones de medición de la red básica del Ideam, es posible hacer uso de los registros históricos.

Se propone el uso del indicador denominado “Rendimiento de Sedimentos”, el cual se define como la cantidad de sedimentos que pasan por un punto de control en un tiempo determinado sobre el área de la cuenca aferente a este punto. Este indicador da cuenta de los sedimentos producidos menos los sedimentos depositados en la cuenca aferente y tiene unidades de masa sobre tiempo por área $[M/T \cdot A]$. El uso de este indicador permite comparar los procesos de sedimentos en cuencas con áreas y condiciones físicas diferentes y hacer seguimiento en el tiempo de una misma cuenca hidrográfica.

Este indicador es usado ampliamente en el mundo y se agrega en intervalos temporales anuales. Los valores de rendimiento medio anual multianual se agrupan en rangos de valores que permiten clasificarlos en términos cualitativos. Estos rangos se adoptan según referencias bibliográficas en las que se compara el rendimiento de sedimentos en cuencas de diversos tamaños y condiciones morfoclimáticas a partir de bases de datos del transporte y rendimiento de sedimentos, incluyendo Walling & Webb (1983), Walling (1987), Milliman & Meade (1983), Martin & Meybeck (1979), Latrubesse & Restrepo (2014), Restrepo & Kjerfve (2000), Restrepo & Syvitski (2006) y Restrepo et ál. (2006). En la tabla 4 se muestran los rangos adoptados para el rendimiento de sedimentos anual multianual en el Estudio Nacional del Agua de 2018 (Ideam, 2019).

El rendimiento de sedimentos es un indicador que da cuenta de todos los procesos de sedimentos en la cuenca hidrográfica y agrega toda el área de drenaje a la estación, por lo que no permite entender la variabilidad espacial de los procesos. Esta limitación innata al indicador se puede reducir con el análisis de los patrones espaciales de los mapas que caracterizan la producción de sedimentos en la cuenca (erosión hídrica en ladera, movimientos en masa). Con el análisis integrado, tanto del rendimiento de sedimentos como de los mapas de producción, será posible identificar las estrategias adecuadas para el manejo de sedimentos en la cuenca hidrográfica, que como se ha mencionado, son altamente dependientes de la planificación y manejo de las coberturas vegetales y los usos del suelo.

Se propone que la evaluación integrada se efectúe con frecuencia de cuatro años. De esta forma, el análisis no estará tan condicionado por la variabilidad climática interanual.

Tabla 4. Rangos adoptados para el rendimiento medio de sedimentos anual multianual

Rango	Rendimiento [kilotoneladas/(año*km²)]
Muy bajo	0,0 – 0,2
Bajo	0,2 – 0,5
Medio	0,5 – 1,0
Alto	1,0 – 2,0
Muy alto	> 2,0

6.2.5.2. Indicadores propuestos para el transporte de sedimentos y su influencia sobre aspectos geomorfológicos, hidrobiológicos y de funcionalidad de los ecosistemas

Para el seguimiento de los efectos de la implementación de las estrategias definidas se recomienda tener en cuenta indicadores para la evaluación de la calidad del sistema fluvial consignados en la literatura técnica, principalmente desde enfoques hidromorfológicos como es el caso de la Directiva Marco del Agua en Europa (Rinaldi et ál., 2015a). Este tipo de indicadores son aplicables para diferentes niveles de información disponible, partiendo desde fuentes de información libre hasta levantamientos detallados en campo.

En este sentido, se recomienda tener en cuenta indicadores hidromorfológicos y de integridad ecológica que incorporan la respuesta de los ecosistemas acuáticos ante variaciones en los regímenes de caudales líquidos y sólidos, tales como los indicados en instrumentos y metodologías como el acotamiento de rondas hídricas, los planes de ordenamiento del recurso hídrico y la estimación de caudales ambientales. A manera de ejemplo, en la Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (Minambiente, 2018) se propone la aplicación del índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR por las siglas en catalán: Qualitat del Bosc de Ribera) propuesto por Munné et ál. (1998) para los ríos mediterráneos y del índice de Evaluación de Bosques Riparios (RFV, por sus siglas en inglés de “Riparian Forest eValuation”) propuesto por Magdaleno et ál. (2010) para ríos permanentes. El propósito es el de estimar el estado de las zonas riparias como zonas de transición entre las corrientes de agua (ecosistema acuático) y los ecosistemas terrestres adyacentes.

Adicionalmente, de acuerdo con la clasificación morfológica realizada, es posible considerar indicadores como soporte para la evaluación de las presiones antrópicas, procesos y respuestas morfológicas a dos escalas fundamentales: segmento y tramo (Gurnell et ál., 2012). Para la escala de segmento, es importante tener en cuenta procesos como el tamaño del corredor ripario, las funciones de la vegetación de ribera y los procesos de sucesión y provisión de madera, para lo cual se pueden usar indicadores sencillos como el ancho promedio del corredor ripario o la continuidad y edad de la vegetación de ribera a lo largo del río (Minambiente, 2018c). Por su parte, a escala de tramo los procesos claves incluyen la extensión de la inundación, tipo y dimensiones de las llanuras inundables y las dinámicas de la vegetación de ribera, para lo cual se pueden incorporar indicadores como el porcentaje de la llanura inundable accesible para el flujo de la inundación, la presencia de unidades morfológicas asociadas a la ribera y el porcentaje del corredor ripario con vegetación de ribera (Minambiente, 2018c).

6.2.6. Fase V. Formulación de acciones de mejora

La implementación de estrategias para el manejo de sedimentos y su posterior seguimiento permitirán contar con elementos de análisis para evaluar el cumplimiento o no de las hipótesis establecidas inicialmente, y determinar los ajustes pertinentes según sea el caso. Dicha evaluación debe documentarse junto con las modificaciones respectivas y considerarse para el ciclo de operación siguiente.

Las estrategias implementadas para el manejo de sedimentos deben estar orientadas a mejorar los resultados una vez inicie su implementación, de tal modo que al final de cada proceso se ajusten las hipótesis preestablecidas, ya sea respecto a la recuperación o conservación del régimen de sedimentos, a aspectos geomorfológicos, de calidad del hábitat, o de servicios

ecosistémicos, entre otros aspectos. En tal sentido, se debe realizar una evaluación periódica que permita establecer necesidades de ajuste o modificaciones a las estrategias implementadas.

Si bien es cierto que para algunos ríos de Colombia se dispone de información relativamente escasa respecto a la producción y transporte de sedimentos, es de destacar que en la medida en que se vaya avanzando en el estudio y manejo del régimen de sedimentos en cuencas se podrá mejorar la base de información existente. No obstante, teniendo en cuenta las limitaciones en cuanto a información disponible, se recomienda establecer metas relativamente conservadoras, las cuales se podrán ajustar según los resultados que se vayan obteniendo en el tiempo. Algunos de los ajustes que se podrán considerar son:

- Ajustes sobre las estrategias de manejo de sedimentos definidas, incluyendo cambios en su extensión espacial, implementación de nuevas tecnologías, entre otros.
- Mejorar la resolución espacial o temporal de los puntos de muestreo, en caso de ser necesario.
- Fortalecer la interacción con las comunidades y los actores sociales ubicados en la cuenca.

7

ARTICULACIÓN CON LA INSTRUMENTACIÓN VIGENTE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Tal como se ha mencionado a lo largo del documento, los presentes lineamientos se han desarrollado con una visión de gestión integral del recurso hídrico, y se entienden como uno de los componentes que deben tener en cuenta las autoridades ambientales en el marco de la planificación y administración del agua en la cuenca hidrográfica. En este sentido, estos lineamientos se entienden como un complemento a otros instrumentos de planificación existentes en el marco de la normativa ambiental vigente.

Cabe anotar que los análisis descritos en el presente documento son consistentes con los análisis que debe realizar la autoridad ambiental en el marco de la implementación de instrumentos de planificación del recurso hídrico como los POMCA, los PORH y el acotamiento de rondas hídricas, entre otros. En este sentido, y teniendo en cuenta que se busca enmarcar los presentes lineamientos dentro de la instrumentación vigente para la gestión integral del recurso hídrico, se considera necesario armonizarlos con los instrumentos de planificación ya implementados por las autoridades ambientales.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han analizado escenarios de armonización o integración de estos lineamientos con diferentes instrumentos de planificación, encontrando que el contenido y alcance de esta propuesta coincide en gran medida con el alcance de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, POMCA, instrumento a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca, en el que participa la población que habita en el territorio de la cuenca, conducente al buen uso y manejo de tales recursos.

A partir de esta propuesta inicial de articulación, el día 26 de noviembre de 2020, la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el apoyo del proyecto Comunica Colombia de Cooperación Canadiense, realizó el Taller Nacional: “Una construcción colectiva para la definición de lineamientos generales que permitan el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la gestión integral del recurso hídrico”. Dicho taller contó con la participación de funcionarios de autoridades ambientales competentes y expertos nacionales y tuvo como objetivo recibir retroalimentación con respecto a la definición de estos lineamientos, a partir de las experiencias y conocimientos compartidos por los expertos nacionales invitados.

Para tal fin, en la primera parte del taller se realizaron cuatro presentaciones, durante las cuales expertos de entidades del Sistema Nacional Ambiental y del sector académico compartieron experiencias, perspectivas y retos relacionados con la gestión integral de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica. Se abordaron temas como el monitoreo, caracterización y modelación del régimen de sedimentos a escala de cuenca, acciones necesarias para la gestión de sedimentos a escala de cuenca e instrumentación para el seguimiento y control en la gestión de sedimentos. Posteriormente, se presentó la propuesta de lineamientos y, en la parte final del taller, se desarrolló una metodología participativa mediante la cual se compilaban insumos, sugerencias y comentarios para fortalecer la propuesta de lineamientos.

A partir de los comentarios compilados durante el taller realizado, se concluyó que la mayoría de los asistentes se encuentran de acuerdo con la propuesta de integrar los lineamientos para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el alcance del POMCA, dada la coincidencia en los análisis y alcances de dicho instrumento con los análisis descritos. A manera de soporte, el anexo 2 del presente documento contiene las memorias del taller realizado, incluyendo los aportes y sugerencias realizados por los asistentes.

8

REFERENCIAS

- Alzate, M. & Zambrano, N. (2019). Geomorphological analysis of streams for support of early flood warning systems. Proceedings of the 38th IAHR World Congress. doi:10.3850/38WC092019-0920
- Belletti, B., Rinaldi, M., Bussetini, M., Comiti, F., Gurnell, A., Mao, L., Nardi, L. & Vezza, P. (2017). Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology* 283, 143-157.
- Bernal, G., Toro, M., Montoya, L. & Garizábal, C (2005). Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del golfo de Urabá. Informe final de investigación. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas.
- Biedenhorn D.S., Watson C.C. & Thorne C.R., (2008). Sedimentation engineering. Processes, Measurements, Modeling and Practice. Chapter 6. Fundamentals of fluvial Geomorphology. American Society of Civil Engineers - ASCE, p. 355-386
- Brandt, A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, v.40, p. 375-401.
- Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL. (2000). Reservoir sedimentation assessment guideline.
- Brils, J. (2008). Sediment monitoring and the European water framework directive. *Annali dell'Istituto Superiore Di Sanita*, 44(3), 218.
- Camprodon, J., Ferreira, M. T., Ordeix, M. (2012). Restauración y gestión ecológica fluvial. Un manual de buenas prácticas de gestión de ríos y riberas.
- Cataño-Álvarez, S. & Vélez-Upegui, J. (2016). Aggregated conceptual model of sediment transport for mountain basins in Antioquia- Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (39), 38-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rbct.n39.52888>.
- Cataño, S. & Velez, J. (2021). Fluvial HydroGeomorphology Model (FHGM): alluvial lateral supply and morphodynamics in compound gravel rivers. DOI: 10.13140/RG.2.2.28141.51680.
- Chorley, R. & Kennedy, B. (1971). *Physical Geography. A Systems Approach*. Prentice-Hall, London.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill, inc.
- Confederación Hidráulica del Ebro (2013). Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva del Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para indicadores hidromorfológicos. Madrid.
- Corominas, J., & García Yagüe, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. Paper presented at the IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España.
- Di, D., Wu, Z., Wang, H., & Huang, S. (2020). Optimal water distribution system based on water rights transaction with administrative management, marketization, and quantification of sediment transport value: A case study of the Yellow River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 722, 137801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137801>
- Erskine, W., Chalmers, A., Keene, A., Cheetham, M., & Bush, R. (2009). Role of a rheophyte in bench development on a sand-bed river in southeast Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(April), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.1778>

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

- Follett, R. & Stewart, B. (1985). Soil Erosion and Crop Productivity. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida - GIMHA (2021). Manual de usuario programa TETIS v.9. Universitat Politècnica de València, Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente.
- Gurnell, A., Bertoldi, W., & Corenblit, D. (2012). Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111(1–2), 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.005>
- Haan, C., Barfield, B. & Hayes, J. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press.
- Hagen, L. & Foster, G. (1990). Soil erosion prediction technology. *Proceedings of Soil Erosion and Productivity Workshop*, págs. 117-135.
- Hu, J. (2020). Effect of soil and water conservation measures on regime-based suspended sediment load during floods. *Sustainable Cities and Society*, 10.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales - Ideam (2007). Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. ISBN 978-958-8067-23-0.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales - Ideam (2015a). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales - Ideam (2015b). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales – Ideam (2018). Protocolo de Monitoreo del Agua.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales - Ideam (2019). Estudio Nacional del Agua, ENA 2018.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (2004). Mapas de suelos del territorio colombiano.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (s.f.). Estudios Generales de Suelos y Zonificación de Tierras, Escala 1:100.000. Bogotá.
- James, L., Monohan, C., & Ertis, B. (2019). Long-term hydraulic mining sediment budgets: Connectivity as a management tool. *Science of the Total Environment*, 12.
- Jetten, V. & Favis-Mortlock, D., (2006). Erosion modelling in Europe. En J. B. y Jean Poesen, ed., *Soil Erosion in Europe*, págs. 695-716. Wiley.
- Julien, P. (2010). *Erosion and sedimentation* (C. U. Press Ed. 2nd Edition ed.). United States of America by Cambridge University Press, New York: Colorado State University.
- Kemp, P., Sear, D., Collins, A., Naden, P. & Jones, I. (2011). The impacts of fine sediment on riverine fish. *Hydrol. Process.*, 25: 1800-1821. <https://doi.org/10.1002/hyp.7940>.

- Kondolf, G. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Kondolf, G., Gao, Y., Annandale, G., Morris, G., Jiang, E., Zhang, J., Wei, Z. (2014). Earth's Future Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents *Earth's Future*, 256-280. <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>.
- Lane, E. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings, American Society of Civil Engineers* No. 745, July. Reston, Virginia, USA.
- Latrubesse, E., & Restrepo, J. (2014). Sediment yield along the Andes: continental budget, regional variations, and comparisons with other basins from orogenic mountain belts. *Geomorphology*, 216, 225-233.
- Liu, C., Walling, D. E., & He, Y. (2018). Review: The International Sediment Initiative case studies of sediment problems in river basins and their management. *International Journal of Sediment Research*, 33(2), 216-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.05.005>.
- Magdaleno, F., Martínez, R. & Roch, V. (2010). Índice RFV para la valoración del estado del bosque de ribera. *Ingeniería Civil*, 157, 85-96. Malanson, G.P., 1993. *Riparian landscapes*
- Martin, J. & Meybeck, M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7, 173-206.
- Mesa, O. (1990). Estudio del equilibrio en ríos. Proyecto 1118-050004-88 de Colciencias. Universidad Nacional de Colombia- Facultad de Minas.
- Milliman, J., & Meade, R. (1983). Worldwide delivery of sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Resolución 1433 de 2004, "Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones".
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.: Colombia. 124 p.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2014). *Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. ISBN: 978-958-8491-89-9.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2017a). Decreto 1682 de 2017, "Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se determinan las funciones de sus dependencias".
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2017b). Resolución 1519 de 2017, "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica y se

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

toman otras determinaciones”.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2018a). Guía Nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales. ISBN: 978-958-8901-84-8.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2018b). Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial. ISBN 978-958-8901-99-2.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2018c). Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia.
- Montoya, J. (2008). Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Morris, G. & Fan, J. (2010). Reservoirs sedimentation handbook: desing and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable us. McGraw Hill.
- Morris, G., Annandale, G., & Hotchkiss, R. (2008). Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. American Society of Civil Engineers - ASCE, Reston, Va., U.S., 2008.
- Munné, A., Prat, N., Solà, C., Bonada, N., & Rieradevall, M. (2003). A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 13(2), 147–163. <https://doi.org/10.1002/aqc.529>
- NASA. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model.
- Nakamura, F., Seo, J., Akasaka, T., & Swanson, F. (2017). Large wood, sediment, and flow regimes: Their interactions and temporal changes caused by human impacts in Japan. Geomorphology, 279, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.001>.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito y Gobierno de Colombia (2018). Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2016. Bogotá.
- Peteuil, C., Frétau, T., Wirz, C., Camenen, B., Guertault, L., Le Coz, J., & Dramais, G. (2014). Importance of field observations for managing sediment fluxes in hydropower projects design and operation. Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam. ISBN: 978-604-82-1383-1
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration N. BioScience, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Posada, L. (2002). Hidráulica Fluvial. Ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Posada, B. & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No 13, Santa Marta, 200 páginas.
- Presidencia de la República de Colombia (1993). Ley 99 de 1994, “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales

renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”.

- Presidencia de la República de Colombia (2011). Decreto 3570 de 2011, “Por el cual se modifican los objetivos y la estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se integra el Sector Administrativo de Ambiente y Desarrollo Sostenible”.
- Presidencia de la República de Colombia (2015). Decreto 1076 de 2015, “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.
- Presidencia de la República de Colombia (1974). Decreto – Ley 2811 de 1974, “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.
- Prestigiacomo, A., Effler, S., O'Donnell, D., Hassett, J., Michalenko, E., Lee, Z. & Weidemann, A. (2007). Turbidity and Suspended Solids Levels and Loads in a Sediment Enriched Stream: Implications for Impacted Lotic and Lentic Ecosystems. *Lake and Reservoir Management - LAKE RESERV MANAG.* 23. 231-244.
- Preston & Schmidt. (2003). Modelling sediment fluxes at large spatial and temporal scales. En P. Schmidt, Long term hillslope and fluvial system modelling. Berlin: Springer.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G. & Porter, J. (1989). RUSLE - The Revised Universal Soil Loss Equation. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, IA.
- República de Colombia (1991). Constitución política de Colombia.
- Restrepo, J. (2005). Los sedimentos del Río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental. (Fondo editorial Universidad EAFIT).
- Restrepo, J. (2013). The perils of human activity on South American deltas: lessons from Colombia's experience with soil erosion. *Deltas: Landforms, Ecosystems and Human Activities*, 358(July), 143–152.
- Restrepo, J. (2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 39(51), 250. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.141>
- Restrepo, J. & Kjerfve, B. (2000). Magdalena River: interannual variability (1975 - 1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235, 137-149.
- Restrepo, J. & Syvitski (2006). Assessing the Effect of Natural Controls and Land Use Change on Sediment Yield in a Major Andean River: The Magdalena Drainage Basin, Colombia. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(2), 65–74. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[65:ATEONC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[65:ATEONC]2.0.CO;2)
- Restrepo, J., Kjerfve, B., Hermelin, M., & Restrepo, J. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316(1–4), 213–232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.002>
- Restrepo, J. & Kettner, A. (2012). Human induced discharge diversion in a tropical delta and its environmental implications: The Patía River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 424–425, 124–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.037>
- Restrepo-López, J., Ortiz-Royero, J., Otero-Díaz, L. & Ospino-Ortiz, S. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 39(153), 527-546. doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.209>

- Richards, K. (1982). *Rivers - form and process in alluvial channels*. Methuen & Co Ltd. 361 p.
- Richter, B., Postel, S., Revenga, C., Scudder, T., Lehner, B., Churchill, A. & Chow, M. (2010). Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams. *Water Alternatives*, v. 3(2): p. 14-42.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini M., Belletti B., Nardi L., Lastoria B., Golfieri, B. (2015a) Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI), Deliverable 6.2, Part 3, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Rinaldi, M., Belletti, B., Comiti, F., Nardi, L., Bussettini, M. Mao, L., Gurnell, A.M. (2015b). The Geomorphic Units Survey and Classification System (GUS), Deliverable 6.2, Part 4, of REFORM REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Ríos, J., Posada, L., Vélez, J., Zambrano, J. & Contreras, C. (2016). Buenas prácticas para la medición de cargas de sedimento en ríos de Colombia. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú-
- Schumm, S., (1973). Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. En *Fluvial Geomorphology*. Suny, Binghamton.
- Schumm, S., (1979). Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4, 485-515.
- Schumm, S., (1977). *The fluvial system*. Jhon Wiley & sons, New York.
- Schumm, S. & Lichty, R., (1965). Time, space, and causality in geomorphology. *American Journal of Science*, 263, 110-119.
- Servicio Geológico Colombiano, SGC (2007). Mapa geológico de Colombia en escala 1:500.000.
- Servicio Geológico Colombiano, SGC (2017). Las amenazas por movimientos en masa de Colombia. Una visión a escala 1:100.000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Soto, C. & Cubillos, C. (2015). Análisis de la dinámica fluviomorfológica en un cauce aluvial. Caso del río Cauca en su valle alto, período 1957-2012. 1er congreso iberoamericano sobre sedimentos y ecología. Querétaro, México.
- Sun, P. (2020). Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the Middle Yellow River Basin. *Science of the Total Environment*, 13.
- Syvitski, J. (2003). Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00008-0)
- Tangi, M., Schmitt, R., Bizzi, S., & Castelletti, A. (2019). The CASCADE toolbox for analyzing river sediment connectivity and management. *Environmental Modelling & Software*, 119, 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.008>

- Tesema, T. & Leta, O. (2020). Sediment Yield Estimation and Effect of Management Options on Sediment Yield of Kesem Dam Watershed, Awash Basin, Ethiopia. *Scientific African*, 9, e00425. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00425>.
- Tuset, J., Vericat, D., & Batalla, R. (2014). Patrones de histéresis de sedimentos en suspensión en una cuenca mediterránea de montaña. In *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014* (pp. 159-162). Universidad de Extremadura.
- U. S. Army Corps of Engineers (Usace), (2004). Evaluating environmental effects of dredged material management alternatives - A technical framework.
- Walling, D. (1987). Rainfall, runoff and erosion of the land: a global view. En K. J. Gregory, *Energetics of physical environments* (págs. 89-117). New York: John Wiley and Sons.
- Walling, D. & Webb, B. (1983). Patterns of sediment yield. En K. Gregory, *Changing river channels*. Chichester, U.K.: Wiley.
- Weber, M. & Pasternack, G. (2017). Valley-scale morphology drives differences in fluvial sediment budgets and incision rates during contrasting flow regimes. 13.
- William, J., (1975). Sediment yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. En: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. USDA - Agricultural Research Service.
- Wischmeier, W. & Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion - a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* 537. U.S. Department of Agriculture.
- Wohl, E., Bledsoe, B., Jacobson, R., Poff, N., Rathburn, S., Walters, D., & Wilcox, A. (2015a). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*, 65(4), 358-371. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>
- Wohl, E., Lane, S. & Wilcox, A. (2015b). The science and practice of river restoration, *Water Resources*, 51, 5974-5997, doi:10.1002/2014WR016874
- Wolman, M. & Miller, J. (1960). Magnitud and frequency of forces in geomorphic processes. Johns Hopkins University and Harvard University. Retrieved from http://geomorphology.sese.asu.edu/Papers/Wolman_and_Miller_1960.pdf
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K. & Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework. Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360, 117-131.

9

ANEXOS

9.1. ANEXO 1 – PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ENTRADA PARA LA ECUACIÓN DE EROSIÓN POTENCIAL HÍDRICA EN LADERA

Mapas derivados de la topografía

Los mapas derivados de la topografía necesarios para la aplicación de la ecuación son la pendiente (m/m) y las celdas acumuladas (número de celdas). Estos se pueden construir con el uso de las herramientas **slope** y **flow accumulation** en cualquier sistema de información geográfica, a partir del modelo de elevación digital (DEM) **ASTER Global Digital Elevation Model** (NASA, 2011) con resolución aproximada de 30 metros.

Mapa de escorrentía

Este mapa es un producto del capítulo del agua superficial en el Estudio Nacional del Agua 2018 (Ideam, 2019). Esta variable tiene asociada la ocurrencia de los fenómenos de flujo superficial y el flujo subsuperficial. En conjunto componen el flujo que termina llegando a las corrientes y cuerpos de agua. La variable se mide en lámina de agua y se calcula por medio de una ecuación de balance hídrico a largo plazo (despreciando los almacenamientos en la cuenca), es decir, la solución de la ecuación de continuidad o de conservación de masa.

La ecuación de continuidad en su forma integral puede simplificarse para tener en cuenta los elementos que influyan sobre el denominado volumen de control, obteniendo así la ecuación de balance hídrico (Chow *et ál.*, 1994). Simplificaciones para no tener en cuenta el cambio en el almacenamiento dentro del volumen de control analizado se pueden encontrar en Zhang *et ál.* (2008), en donde se propone ingresar las variables del ciclo hidrológico en extensas escalas de tiempo y, en consecuencia, poder suponer que los cambios en el almacenamiento son despreciables (almacenamientos dentro del volumen de control que simplifican también variables como la infiltración). Esto genera que la ecuación de balance hídrico quede de la siguiente manera:

$$Esc = P - ET_R$$

Con **Esc** representando la escorrentía (mm), **P** representando la precipitación (mm) y **ET_R** representando la evapotranspiración real (mm).

Mapa derivado de los suelos. El factor K (erodabilidad del suelo)

El factor de erodabilidad de la USLE (K) describe la susceptibilidad del suelo a la erosión, de acuerdo con sus características intrínsecas. Algunos suelos son más erodables que otros aun cuando están expuestos a las mismas condiciones; este fenómeno es expresado por el factor K.

Para la estimación del factor K se utiliza el mapa de suelos del IGAC, escala 1:100,000, para definir las unidades cartográficas de suelos (UCS). Las propiedades físicas de las UCS se toman de las memorias de los estudios generales de suelos y zonificación de tierras departamentales IGAC (s.f.), los cuales presentan una descripción detallada de las UCS y los perfiles modales, detallando las propiedades físicas de los diferentes horizontes de los suelos (textura, estructura, profundidad, drenaje).

Existen diversas fórmulas para la estimación del factor de erodabilidad de la USLE. Se propone utilizar la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), la cual tiene en cuenta diversas propiedades del suelo como la textura, el contenido de

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

carbono orgánico, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica.

$$100K = 2.71 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - a) + 4.2 * (b - 2) + 3.23 * (c - 3)$$

Donde,

- $M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena fina}) * (100 - \% \text{ arcilla})$
- $a = \% \text{ de carbono orgánico}$
- $b = \text{clase de estructura del suelo}$
- $c = \text{clase de permeabilidad}$

Con la clase de estructura del suelo asignado de la siguiente forma:

- $b = 1$ para la estructura muy fina granular
- $b = 2$ para la estructura fina granular
- $b = 3$ para la estructura media gruesa, granular
- $b = 4$ para la estructura blocosa, laminar, masiva

Y con la clase de permeabilidad asignada así:

- $c = 6$ para permeabilidad muy lenta (conductividad hidráulica menor que 0.12 cm/h)
- $c = 5$ para permeabilidad lenta (conductividad hidráulica entre 0.12 y 2.0 cm/h)
- $c = 4$ para permeabilidad moderada (conductividad hidráulica entre 2.0 y 6.0 cm/h)
- $c = 3$ para permeabilidad moderadamente rápida (conductividad hidráulica entre 6.0 y 12.5 cm/h)
- $c = 2$ para permeabilidad rápida (conductividad hidráulica entre 12.5 y 25.0 cm/h)
- $c = 1$ para permeabilidad muy rápida (conductividad hidráulica mayor que 25.0 cm/h)

Cuando no se dispone de datos de texturas, estructura y composiciones del suelo, es posible determinar el factor K por medio de tablas que relacionan la clase de texturas del horizonte superficial de los suelos con el factor K. En estos casos, la incertidumbre asociada a la estimación del factor K es mayor con relación a los casos en que se aplica la ecuación. En la tabla A1-1 se muestran los valores propuestos por Wischmeier & Smith (1978) para la relación entre las clases de texturas del horizonte superficial del suelo y el factor K.

Existen dos fuentes para la estimación del factor K en el territorio colombiano:

- El mapa de suelos del IGAC, escala 1:100,000 (figura A1-1). Este mapa surge de una correlación de unidades cartográficas de suelos (UCS) de los estudios generales de suelos y zonificación de tierras departamentales (IGAC, s.f.). Define los perfiles modales de las UCS. Contiene algunas propiedades de los suelos (fisiográficas, de texturas, profundidad, drenajes).
- Memorias de los estudios generales de suelos y zonificación de tierras departamentales (IGAC, s.f.). Presentan una descripción detallada de las UCS y los perfiles modales (para cada horizonte de los perfiles) detallando

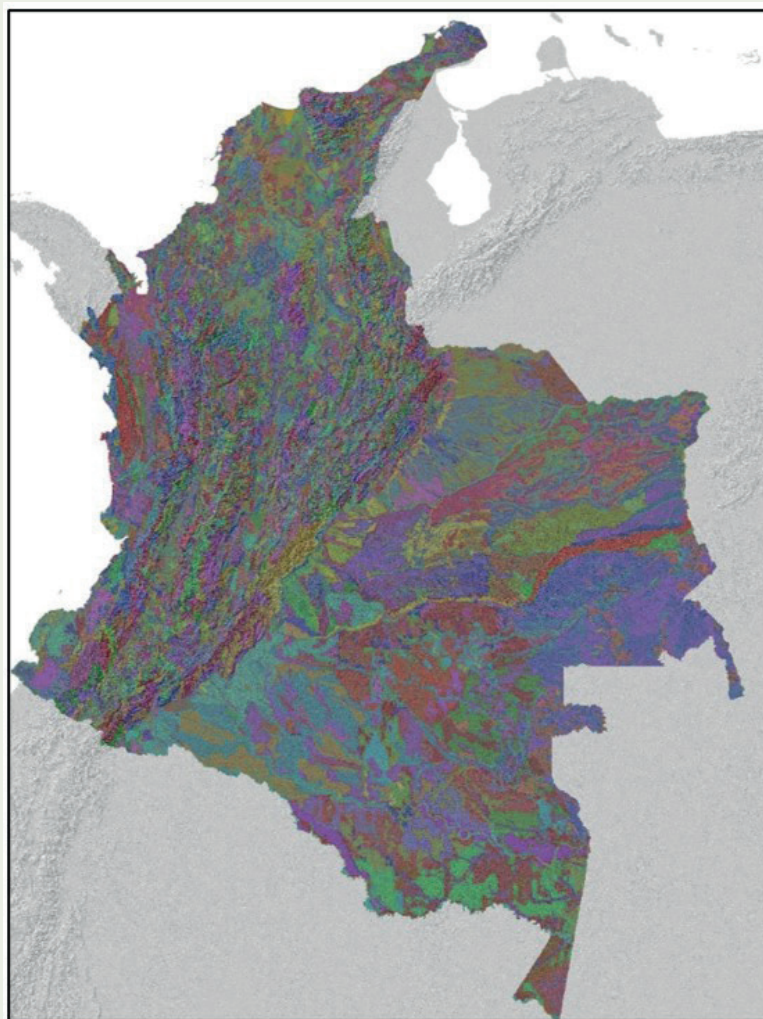
las propiedades físicas de los diferentes horizontes de los suelos (textura, estructura, profundidad, drenaje). Para su elaboración se encuentran metodologías similares para todos los departamentos, lo cual asegura la homogeneidad de los resultados. En algunos departamentos hay información más detallada que en otros por lo que la metodología para la estimación del factor K puede variar entre departamentos.

Tabla A1-1. Clases de textura, contenido de materia orgánica y Factor K de la USLE

Clase	Contenido de materia orgánica		
	0.5 %	2%	4%
	K usle	K usle	K usle
Arena	0,05	0,03	0,02
Arena fina	0,16	0,14	0,1
Arena muy fina	0,42	0,36	0,28
Arena franca	0,12	0,1	0,08
Arena fina franca	0,24	0,2	0,16
Arena muy fina franca	0,44	0,38	0,3
Franca arenosa	0,27	0,24	0,19
Franca arenosa fina	0,35	0,3	0,24
Franca arenosa muy fina	0,47	0,41	0,33
Franca	0,38	0,34	0,29
Franco limosa	0,48	0,42	0,33
Limo	0,6	0,52	0,42
Franco arcilloso arenoso	0,27	0,25	0,21
Franco arcilloso	0,28	0,25	0,21
Franco arcilloso limoso	0,37	0,32	0,26
Arcilla arenosa	0,14	0,13	0,12
Arcilla limosa	0,25	0,23	0,19
Arcilla	0,13	0,2	0,29

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Figura A1-1. Unidades cartográficas de suelos del mapa de suelos de Colombia (IGAC, 2004).

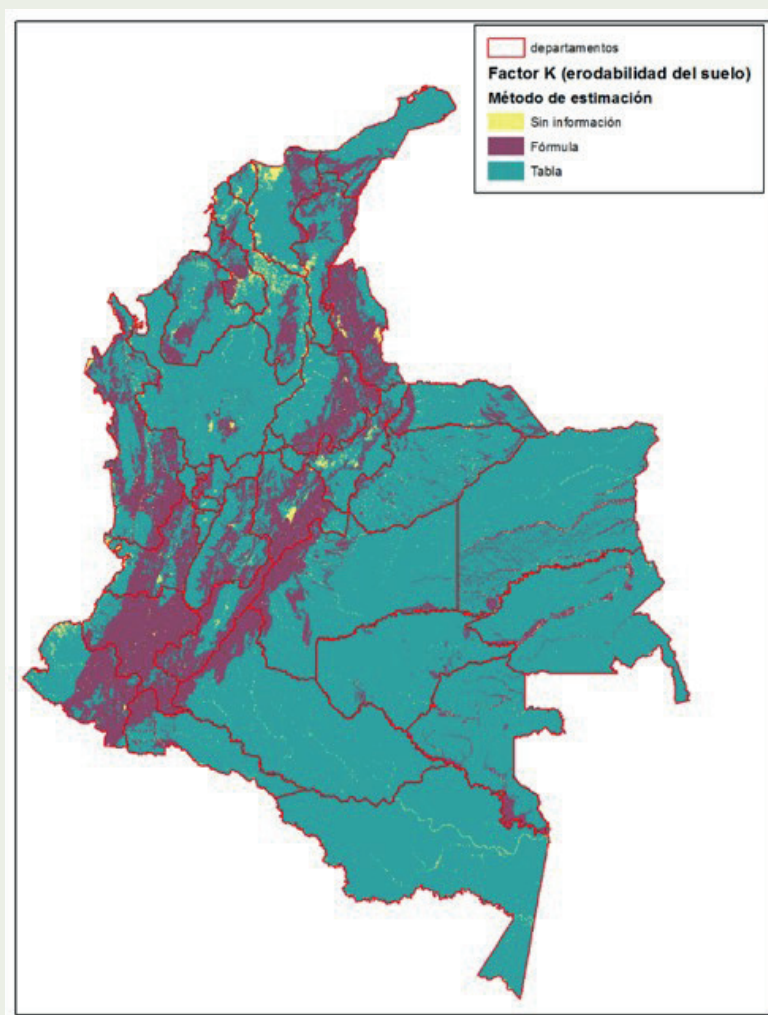


Para la estimación del factor K en todo el territorio colombiano se encuentran dos escenarios de información que determinan el uso de alguno de los métodos de estimación:

- En UCS con información de texturas y composición se aplica la ecuación.
- En UCS sin información de texturas se recurre a tabla según la descripción de los suelos.

En la figura A1-2 se muestra la extensión de los métodos de estimación aplicados en Colombia. En el mapa, las zonas sin información corresponden a cuerpos de aguas y zonas urbanas. En esos casos, se estima el factor K según las unidades cartográficas de suelos vecinas.

Figura A1-2. Métodos de estimación del factor K en Colombia.

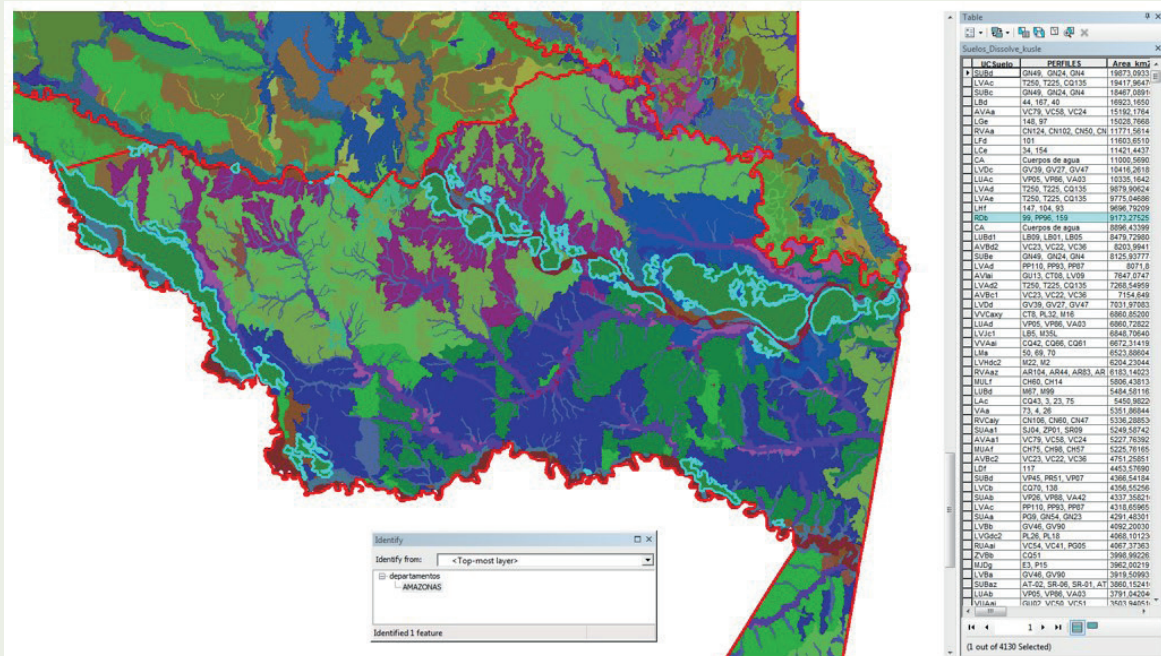


El proceso de construcción del mapa de factor K para cada unidad cartográfica de suelos a partir de las clases de texturas de suelos comprende los siguientes pasos:

- En un sistema de información geográfica se ubica el departamento al que pertenece la unidad cartográfica de suelos (figura A1-3). En el ejemplo, la UCS RDbc se encuentra en el departamento de Amazonas.

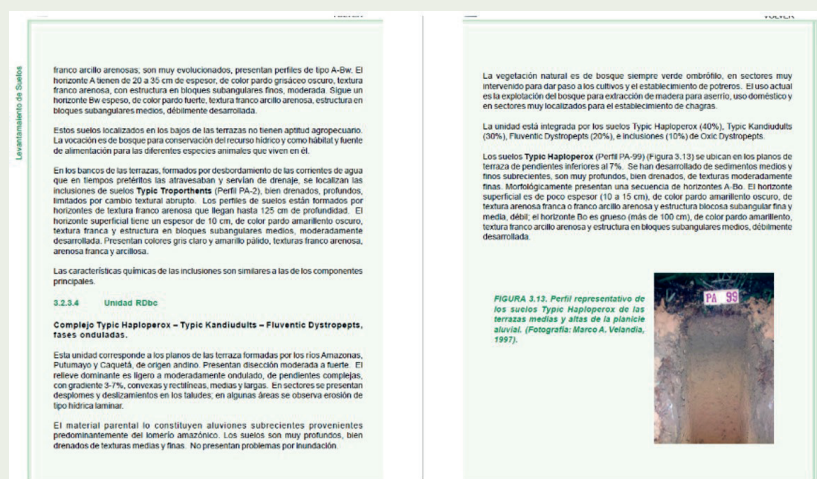
LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Figura A1-3. Localización de una unidad cartográfica de suelos en su respectivo departamento.



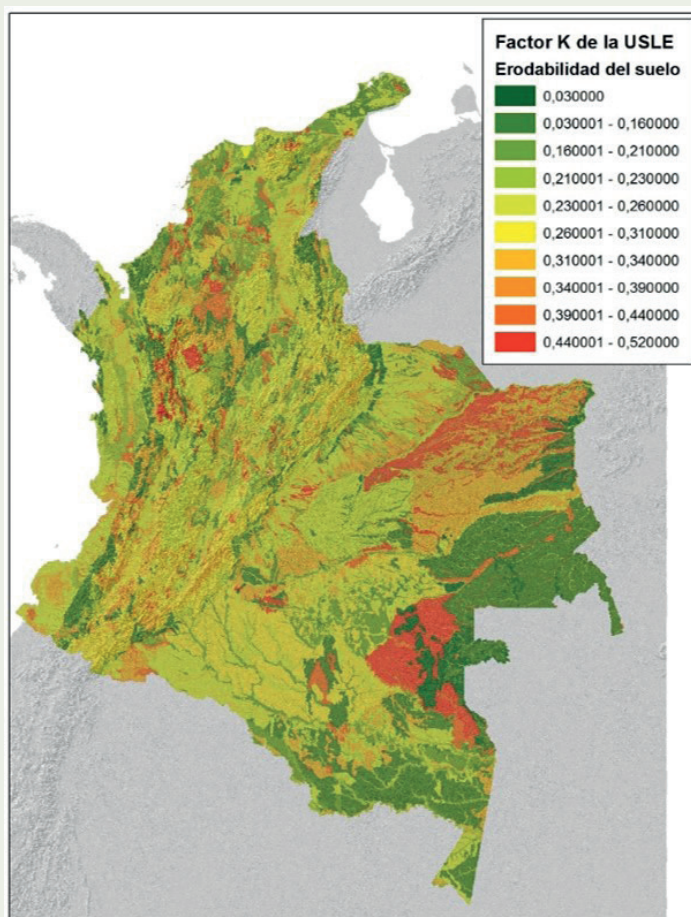
- En la memoria del mapa de suelos departamental, se buscan la UCS y la descripción de los perfiles modales. Se define la clase de textura del horizonte superficial del suelo del perfil con mayor representación de área en la UCS (figura A1-4). En el ejemplo, el perfil modal que representa mayor área de la UCS RDbe es el PA-99. El horizonte superficial posee una textura arenosa franca.

Figura A1-4. Descripción del perfil modal en la memoria del mapa de suelos departamental.



Se registran en una hoja de cálculo (.xlsx) la fuente, el método de estimación, el perfil utilizado, la clase de textura y el valor de K (según tabla). En el sistema de información geográfica se une la tabla con valores estimados de K al mapa de Suelos de Colombia (IGAC, 2004). En la figura A1-5 se muestra el mapa resultante de la estimación del factor K para todo el territorio colombiano.

Figura A1-5. Mapa del factor K de la USLE para el territorio colombiano.



Mapas derivados de las coberturas de la tierra. Factor C (cultivos) y factor P (prácticas de conservación)

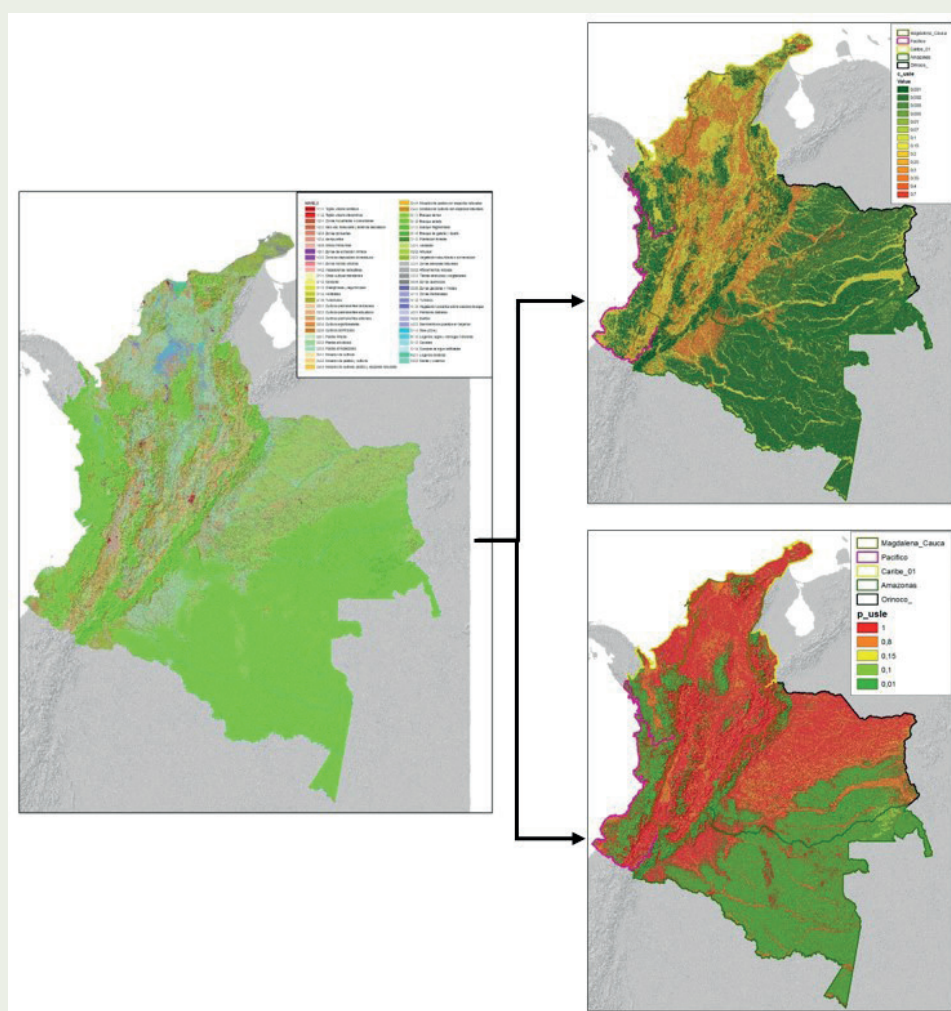
El factor de cobertura de la USLE (C) se define como la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno con una cobertura y manejo específicas respecto a las pérdidas de suelo en un terreno idéntico, en reastrojo y con labranza continua (Wischmeier y Smith, 1978). La vegetación protege el suelo de la erosión puesto que reduce la energía efectiva de la lluvia por interceptación, retiene los sedimentos que alcanzaron a desprenderse, y reduce la velocidad de la escorrentía.

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

El factor de prácticas de manejo (P) se define como la relación entre las pérdidas de suelo de un cultivo con una práctica específica de manejo, y las pérdidas de suelo en un terreno labrado en el sentido de la pendiente y sin ningún tipo de manejo (Wischmeier y Smith, 1978). Las prácticas de manejo incluyen labranza en el contorno, labranza en franjas y sistemas de terrazas. Además, encauzar las aguas para la eliminación del exceso de lluvia es una práctica de apoyo necesaria para contrarrestar la erosión. Los valores de este factor se asignan de acuerdo con el sistema de labranza que se utilice, la pendiente, la máxima longitud del terreno en el sentido de la pendiente y el ancho de la unidad homogénea.

Ambos factores se estiman según criterio de expertos. El mapa base corresponde a las **Coberturas de la tierra** según la metodología **CORINE Land Cover**, escala 1:100,000 aplicada al territorio colombiano (figura A1-6).

Figura A1-6. Mapa de Coberturas de la tierra (izquierda), factor C (derecha arriba) y factor P (derecha abajo).



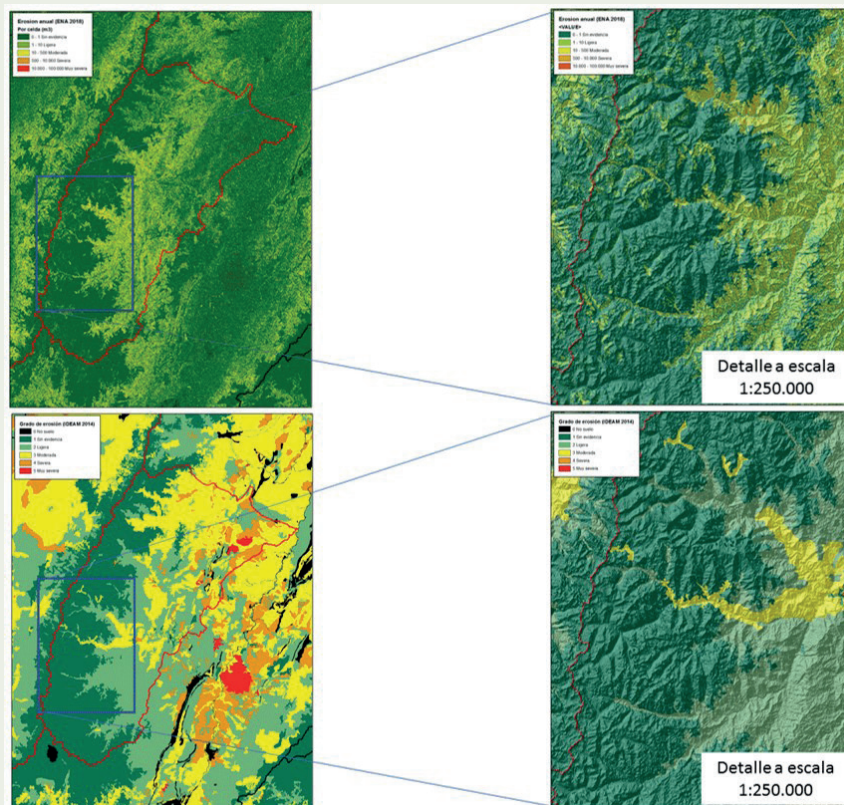
Validación del mapa de erosión

Puesto que el mapa de erosión potencial de sedimentos se construye a partir de un modelo, se hace necesario validar sus resultados con observaciones reales de la erosión en el territorio. La validación del mapa de erosión hídrica potencial de sedimentos se puede efectuar a partir de la comparación en diferentes escalas (cuenca hidrográfica, subcuenca, ladera) con el mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam, 2015b) y de los mapas resultado de ejercicios de modelación con un modelo de erosión dinámico en zonas donde se ha validado en campo. En este proceso se reconocen las potencialidades y limitaciones del mapa construido.

A modo de ejemplo, se muestra el proceso de validación del mapa surgido a partir del modelo estático en algunas zonas del país.

En la figura A1-7 se muestran el mapa de erosión hídrica potencial y el mapa de degradación de suelos por erosión en la zona hidrográfica Saldaña. Se observa que el mapa surgido a partir del modelo de erosión estático representa los patrones de variabilidad espacial que se observan en el mapa de degradación de suelos por erosión, tanto a escala regional como en un detalle a escala 1:250.000. Cabe anotar que el modelo presenta una variación espacial a escala de ladera que no se da en el mapa de degradación de suelos por erosión.

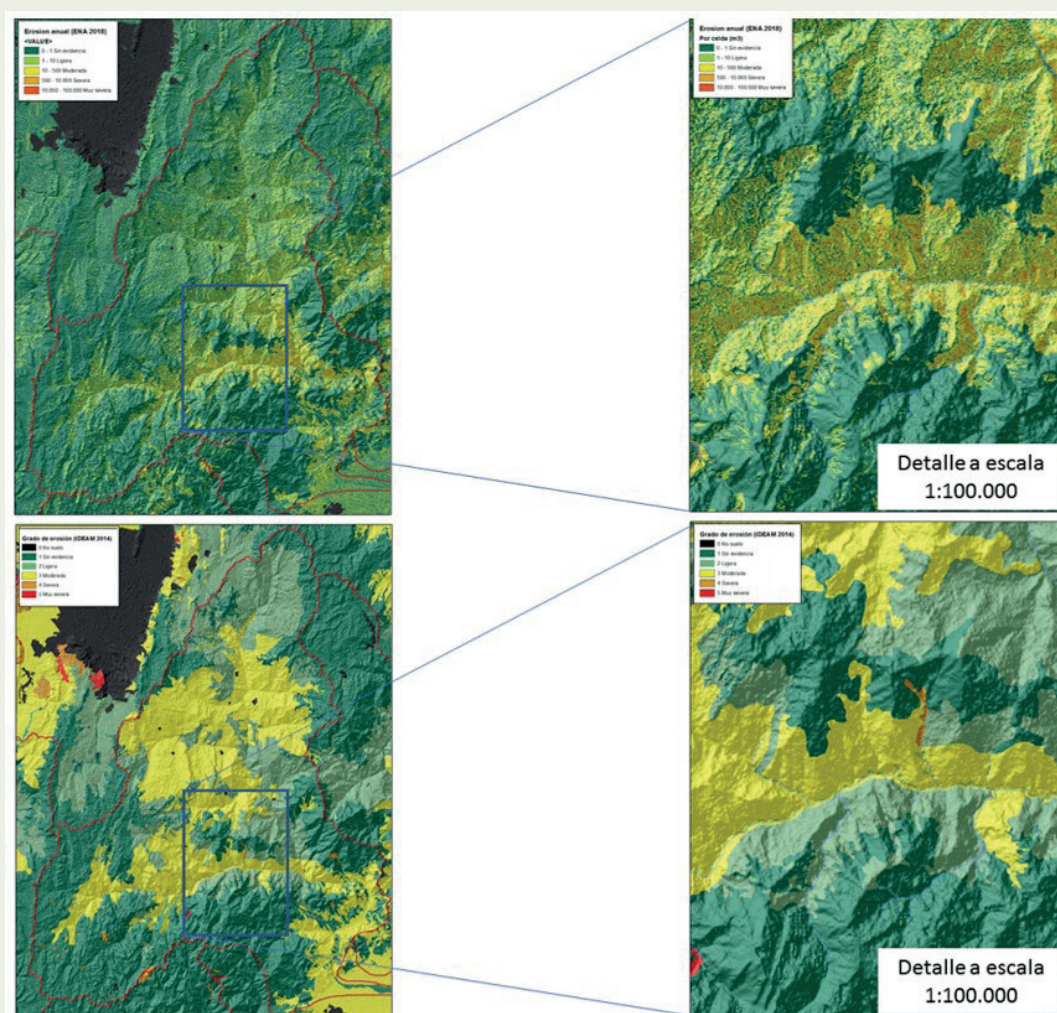
Figura A1-7. Comparación entre el mapa de erosión resultado del modelo estático (arriba) y el mapa de degradación de suelos por erosión (abajo) en la zona hidrográfica del río Saldaña.



LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

En la figura A1-8 se muestran el mapa de erosión hídrica potencial y el mapa de degradación de suelos por erosión en la subzona hidrográfica del río Guayuriba, la cual hace parte de la zona hidrográfica del río Meta. Los resultados son similares a los anotados en la zona del río Saldaña, tanto en los patrones de variabilidad espacial a escala regional como a escala de ladera.

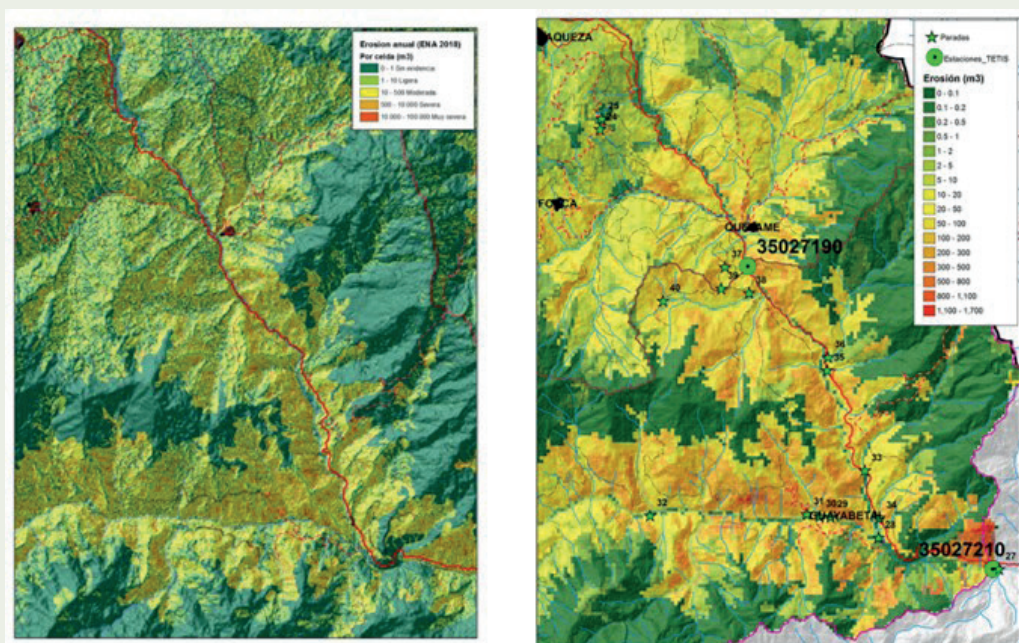
Figura A1-8. Comparación entre el mapa de erosión del ENA 2018 (arriba) y el mapa de degradación de suelos por erosión (abajo) en la subzona hidrográfica del río Guayuriba.



En la figura A1-9 se muestran el mapa de erosión hídrica potencial y el mapa producido por el modelo TETIS en la subzona hidrográfica del río Guayuriba. El comportamiento observado se explica por el hecho de que ambos modelos utilizan los mismos mapas de parámetros y se diferencian por la escala temporal. Mientras que el modelo de erosión

adoptado en el ENA 2018 tiene una agregación temporal anual, representada por la escorrentía media anual, el modelo implementado tiene una agregación diaria, dada por series de tiempo con esta resolución. Es de resaltar que, aunque el modelo del ENA 2018 no presenta un comportamiento dinámico y de tal forma no simula eventos extremos, los resultados de ambos modelos presenten los mismos patrones de variabilidad espacial.

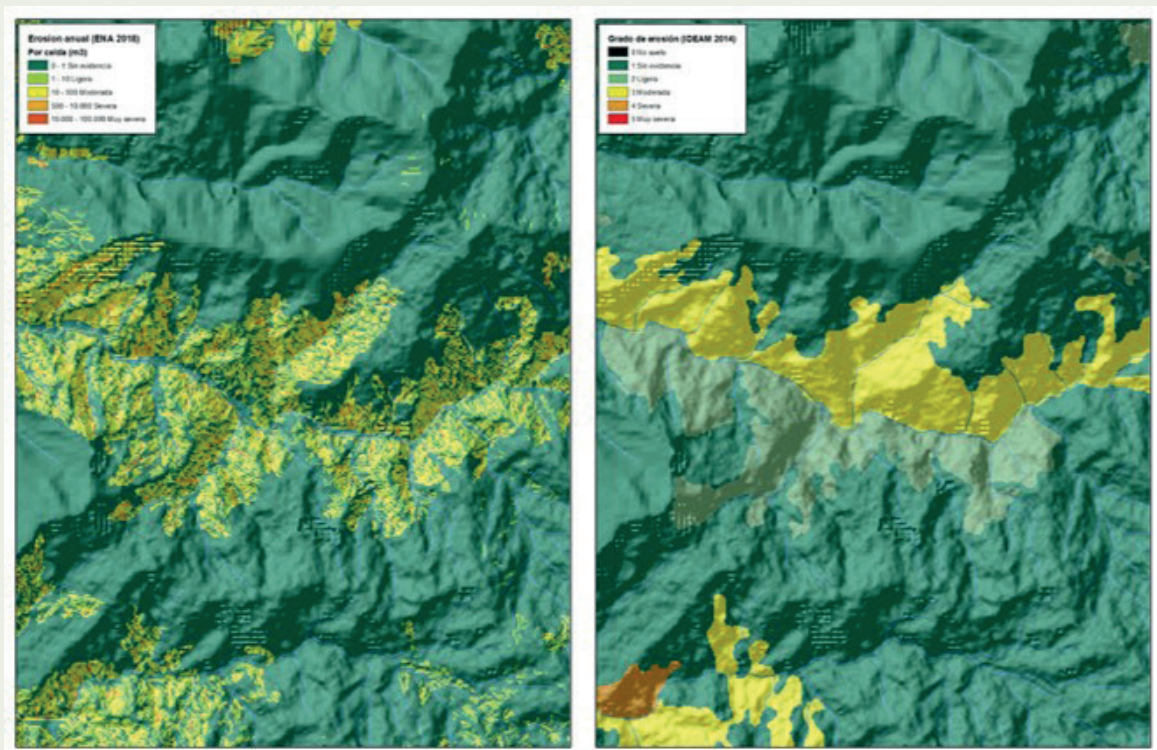
Figura A1-9. Comparación entre el mapa de erosión del ENA 2018 (izquierda) y el mapa de erosión producido por el modelo TETIS (derecha) en la subzona hidrográfica del río Guayuriba.



En la figura A1-10 se muestran el mapa de erosión hídrica potencial construido para el ENA 2018 y el mapa de degradación de suelos por erosión en la cuenca del río Taquiza en la subzona hidrográfica del río Fonce. En esta figura se observa con claridad el comportamiento del modelo a escala de ladera. La variabilidad espacial a escala de ladera predomina sobre los patrones regionales. Al considerar el área acumulada en su formulación, el modelo representa las zonas de acumulación de flujo en ladera, en las cuales se da mayor erosión. Estas zonas corresponden a elementos concretos del paisaje donde se concentran el flujo y los procesos erosivos (surcos y cárcavas). De esta forma, al tener un mayor detalle que el mapa de degradación de suelos por erosión, en una ladera en particular, se dan varios grados de erosión según el mapa de degradación de suelos por erosión.

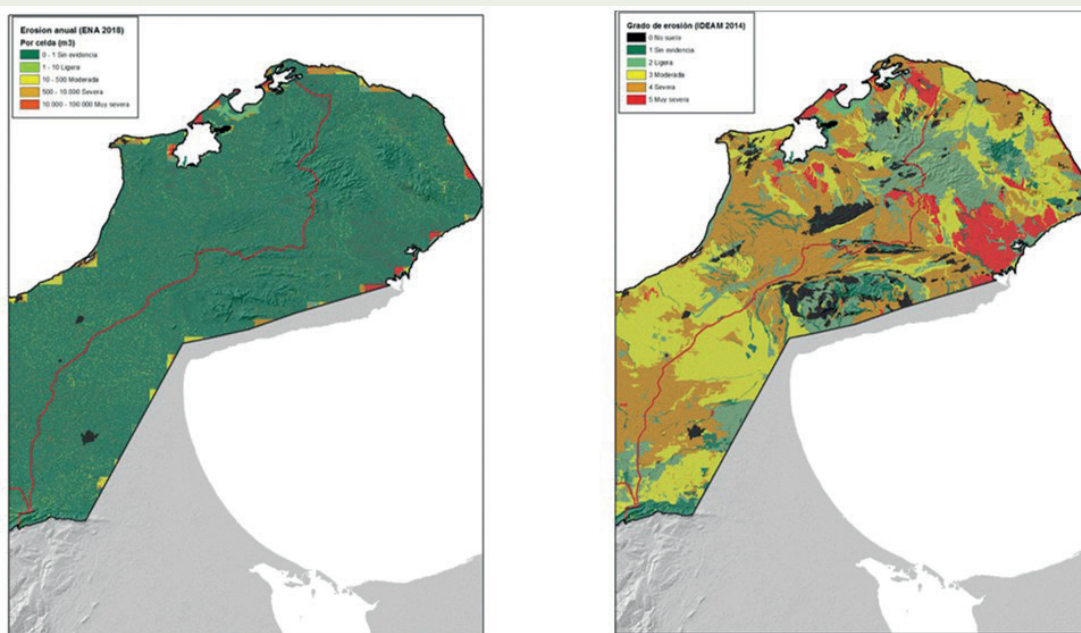
LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

Figura A1-10. Comparación entre el mapa de erosión del ENA 2018 (izquierda) y el mapa de degradación de suelos por erosión (derecha) en la cuenca del río Táquiza, subzona hidrográfica del río Fonce.



El modelo no está validando (con respecto al mapa de degradación de suelos por erosión) en las zonas donde el proceso de erosión predominante es la erosión eólica, tal como se aprecia en la figura A1-11. Puesto que el modelo está formulado para la estimación de la erosión hídrica, no refleja los grados de erosión en zonas desérticas y áridas. En estas zonas, el modelo subestima la erosión. Esta limitación del modelo está justificada por el hecho de que, en Colombia, los procesos erosivos predominantes son debidos a la erosión hídrica.

Figura A1-11. Comparación entre el mapa de erosión del ENA 2018 (izquierda) y el mapa de degradación de suelos por erosión (derecha) en la península de La Guajira.



En la figura A1-12 se muestran las conclusiones del proceso de validación del mapa de erosión hídrica potencial construido para el ENA 2018.

Tabla A1-2. Potencialidades y limitaciones del mapa de erosión hídrica potencial

Potencialidades	Limitaciones
Refleja los patrones de variabilidad espacial regional (coberturas de la tierra, suelo, escorrentia)	El modelo no está validando en las zonas donde predomina la erosión eólica y en zonas altamente intervenidas (por ejemplo, alrededor de grandes ciudades). En ambas condiciones se subestima la erosión
Presenta una variabilidad local (a escala de ladera) definida por la acumulación de flujo en ladera	
Permite análisis numéricos de la erosión hídrica a diferentes escalas	
Es una herramienta de ordenamiento de cuencas	
Permite análisis de cambios (cambios en los usos del suelo, escenarios de cambios climáticos)	

**9.2. ANEXO 2 – MEMORIAS DEL TALLER NACIONAL “UNA CONSTRUCCIÓN
COLECTIVA PARA LA DEFINICIÓN DE LINEAMIENTOS GENERALES
QUE PERMITAN EL MANEJO DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA HI-
DROGRÁFICA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO
HÍDRICO” (ANEXO DIGITAL)**

