

**ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ESTIMAR ALGUNOS
EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA OFERTA HÍDRICA
Y EL CICLO DE SEDIMENTOS A PARTIR DE REVISIÓN DE REFERENTES
BIBLIOGRÁFICOS**

**NATALIA ANDREA LONDOÑO ALVAREZ
DIDIER ORLANDO LIZCANO MURCIA**

**ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

2024

**ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ESTIMAR ALGUNOS
EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA OFERTA HÍDRICA
Y EL CICLO DE SEDIMENTOS A PARTIR DE REVISIÓN DE REFERENTES
BIBLIOGRÁFICOS**

NATALIA ANDREA LONDOÑO ALVAREZ

DIDIER ORLANDO LIZCANO MURCIA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

DIRECTOR:

GERMÁN RICARDO PAREDES GUZMÁN IA M.Sc.

ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

2024

ÍNDICE

1.	Introducción	9
2.	Objetivos.....	11
3.	Glosario	12
4.	Marco Teórico	14
5.	Planteamiento del problema.....	17
6.	Metodología	20
6.1	Criterios de selección	20
6.2	Criterios de inclusión y exclusión.....	21
6.3	Variables de comparación	21
6.4	Ecuaciones de búsqueda utilizadas.....	22
6.5	Bases de datos consultadas.....	22
6.6	Cantidad de muestra	23
6.7	Rango de años consultados	23
6.8	Modelos hidrológicos distribuidos.....	23
6.9	Modelos hidrológicas integrados con otras herramientas	24
6.10	Modelos y técnicas para el análisis de sedimentos	24
6.11	Estudios sobre el Impacto del Cambio Climático y la Erosión.....	24
6.12	Otros modelos relevantes.....	25
6.13	Clasificación de las bibliografías según la metodología planteada.....	25
6.14	Cantidad de muestra	26

	4
6.15 Bases de datos consultadas.....	26
6.16 Ecuaciones de búsqueda utilizadas.....	27
6.17 Variables de comparación	27
6.18 Criterios de inclusión y exclusión.....	28
6.19 Criterios de selección	28
6.20 Análisis del material de consulta de acuerdo con los elementos claves consultados	28
7. La modelación hidrológica para la estimación de la oferta hídrica.....	31
7.1 Modelos hidrológicos.....	37
7.2 Estudios aplicados	44
6 La modelación hidrológica para la estimación de los sedimentos en las cuencas hidrográficas.....	47
7 El cambio climático y sus efectos en los ciclos de los sedimentos en las cuencas hidrográficas.....	55
8 Revisión de los análisis del ciclo de sedimentos en Colombia mediante la modelación hidrológica.....	60
9 Conclusiones	71
10 Referencias.....	73

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 <i>Distribución de las bibliografías según el año de publicación.</i>	29
Figura 2 <i>Parámetros de calibración para las series de sedimentos en el modelo hidrológico SWAT.</i>	35
Figura 3 <i>Esquema de los procesos físicos del modelo hidrológico mesoescala mHM.</i> .	37
Figura 4 <i>Diagrama esquemático en la implementación del modelo conceptual del yacimiento en el proceso del modelado hidrológico SASER.</i>	39
Figura 5 <i>Esquema de los procesos físicos y flujos de agua del modelo hidrológico WFLOW_SBM.</i>	40
Figura 6 <i>Ecuación del balance hídrico implementado en el modelo hidrológico SWAT.</i>	42
Figura 7 <i>Proceso de producción hidrológica y sedimentos para la gestión del suelo aplicando el modelo hidrológico SWAT.</i>	51
Figura 8 <i>Expresión de la fórmula MUSLE aplicada en el modelo hidrológico SWAT.</i>	52
Figura 9 <i>Expresión de transporte de sedimentos en corrientes en el modelo hidrológico SWAT.</i>	53
Figura 10 <i>Esquema físico del balance hídrico aplicado en el distrito del Valle de Sibundoy modelo hidrológico SWAT.</i>	63
Figura 11 <i>Metodología implementada para la estimación de producción de sedimentos en la quebrada La María mediante el modelo hidrológico SWAT.</i>	66

PRÓLOGO

Uno de los fenómenos que ocurren en las cuencas hidrográficas que principalmente tienen gran interés e impacto en las comunidades son el ciclo hidrológico y su relación con los sedimentos, debido a que la presencia de estos últimos afecta en diversos niveles las actividades socioeconómicas. Los sedimentos en las corrientes hídricas mayormente se presentan de diversas maneras, pero se destaca debido a fuertes precipitaciones que erosionan las laderas y arrastran el material hasta los cauces principales, donde el movimiento a través del agua se da por medio de suspensión, saltación o arrastre de fondo, incluso se da la combinación de más de una manera de transporte, lo que presenta diversos niveles de impactos dado que afecta la geomorfología de los cauces, las estructuras hidráulicas, continuidad en el servicio de suministro de agua potable y transporte de contaminantes. La producción de sedimentos se da principalmente por la conjugación de diversos factores como la precipitación, tipo de suelos, coberturas presentes, topografía, capacidad de escorrentía, geomorfología y actividades antrópicas, sumado a esto pueden existir eventos locales de gran magnitud que realizan aportes significativos a la producción de sedimento como movimientos en masa, actividades mineras, etc. Los motivos que impulsaron la realización del presente trabajo es conocer los procesos de la modelación hidrológica de cuencas hidrográficas como herramienta de gestión, que permite analizar el ciclo hidrológico y a su vez el de sedimentos. Analizar las requerimientos, procesos y resultados a través de las diferentes investigaciones se realizó con el objetivo de conocer los avances en referencia al tema de la modelación de ciclo de sedimentos, que se enfocan por mejorar, conocer y estudiar la producción de sedimentos en las cuencas hidrográficas y su relación con el uso del suelo y los impactos del cambio climático en función de promover medidas a los tomadores de decisiones para promover directrices y políticas públicas en preservación del suelo y las cuencas hidrográficas.

RESUMEN

La erosión del suelo en las cuencas hidrográficas a nivel mundial es una de las problemáticas que afronta la sociedad y que afecta el suelo para diversas actividades productivas, debido a factores como precipitación, topografía, suelos, deforestación y usos del suelo. Estas problemáticas se exacerban debido a los efectos del cambio climático y el crecimiento exponencial de la población donde cada vez más se requieren el aprovechamiento de los recursos naturales. Se realizó el análisis literario de artículos de investigación publicados en los últimos años en relación de la modelación hidrológica para la estimación hídrica y la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas, y que a su vez se permitiera evaluar los efectos del cambio climático en el futuro. Adicionalmente, se realizó la revisión del panorama nacional para analizar el estado en que se manejan los análisis de sedimentos a nivel de cuenca, enfocados en temas de investigación que aporten conocimiento del comportamiento en las diferentes regiones. Los resultados permitieron conocer y describir los principales avances, técnicas, herramientas e insumos que se requieren a través de la modelación hidrológica para el análisis integral de las cuencas hidrográficas, permitiendo estimar la producción hidrológica y de sedimentos y los análisis del cambio climático de las principales investigaciones que han sido desarrolladas recientemente a nivel mundial y en el territorio nacional, debido a que estos generan directrices que permitan realizar una adecuada gestión para la sostenibilidad de los recursos naturales.

ASBTRAC

Soil erosion in watersheds worldwide is one of the problems faced by society and that affects the soil for various productive activities, due to factors such as precipitation, topography, soils, deforestation and land uses. These problems are exacerbated due to the effects of climate change and the exponential growth of the population where the use of natural resources is increasingly required. A literary analysis of research articles published in recent years was carried out in relation to hydrological modeling for water estimation and sediment production in hydrographic basins, and which in turn allowed evaluating the effects of climate change in the future. Additionally, a review of the national panorama was carried out to analyze the state in which sediment analyzes are handled at the basin level, focused on research topics that provide knowledge of the behavior in the different regions. The results allowed us to know and describe the main advances, techniques, tools and inputs that are required through hydrological modeling for the comprehensive analysis of hydrographic basins, allowing the estimation of hydrological and sediment production and the analysis of climate change of the main research that has been recently developed worldwide and in the national territory, because these generate guidelines that allow adequate management for the sustainability of natural resources.

1. Introducción

El ciclo de sedimentos es de gran importancia para el sostenimiento de diversos subsistemas e interacciones que se dan en las cuencas hidrográficas, debido al transporte de nutrientes que se considera en una fuente importante para la sostenibilidad de especies acuáticas y faunísticas. Para lograr conocer y caracterizar el proceso de los sedimentos en las cuencas hidrográficas se han desarrollado diferentes técnicas y métodos, que van desde el monitoreo hasta la modelación de los regímenes hidrológicos, que permiten hacer un uso planificado de las cuencas hidrográficas en aras de aprovechar mejor los recursos naturales. La variabilidad climática altera los diferentes regímenes y patrones asociados al recurso hídrico, que van ligados al ciclo y producción de sedimentos, es importante estimar y conocer cómo se afectarán en un futuro las cuencas hidrográficas especialmente por la erosión, transporte y deposición de los estos, asimismo estimar la producción de sedimentos es de gran importancia, en especial, es obras como las presas que su vida útil depende de los sedimentos, debido a que esta se acorta cada vez que se van depositando en los embalses y se pierde la capacidad de almacenamiento del recurso hídrico.

El presente trabajo monográfico consiste en una revisión bibliográfica de los principales avances en el análisis del ciclo de sedimentos y sus efectos por el cambio climático a través de la modelación hidrológica, lo que permite realizar el análisis de la simulación de flujos y ciclo de sedimentos, para así describir los principales hallazgos, métodos, técnicas y resultados a considerar la interacción del agua y el ciclo de los sedimentos en las cuencas hidrográficas. Igualmente, se analizan las consecuencias del cambio climático en el ciclo de los sedimentos que afectan de diversas maneras las actividades socioeconómicas de las comunidades. El alto transporte de sedimentos afecta a las estructuras de captación y conducción del recurso hídrico que son aprovechadas para los distintos usos, por lo que altas concentraciones de sedimentos implicará el cierre temporal o la colmatación de infraestructuras hidráulicas, igualmente la calidad del agua está directamente ligada al transporte de sedimentos pues altos flujos de estos

harán que no se puede aprovechar el recurso hídrico para diversas actividades socioeconómicas.

Finalmente, se realizó una revisión de diferentes estudios, normas e instrumentos encontrados a nivel nacional, lo cual permitió evidenciar los avances y las técnicas frente al monitoreo y análisis del ciclo de sedimentos en todo el territorio colombiano. Debido a la heterogeneidad climática y conjugado con los distintos fenómenos climáticos, se pueden presentar escenarios que afecten gravemente a las diferentes regiones del país, es por esto por lo que contar con herramientas robustas permiten gestionar de manera eficiente los recursos naturales y su aprovechamiento.

2. Objetivos

- Objetivo general

Analizar la modelación hidrológica distribuida para estimar los efectos del cambio climático en el comportamiento de la oferta hídrica y el ciclo de sedimentos mediante la revisión de referentes bibliográficos.

- Objetivos específicos

Examinar las estimaciones de las ofertas hídricas en escenarios de cambio climático a través de la modelación hidrológica distribuida.

Determinar la cuantificación de sedimentos en las cuencas hidrográficas por medio de la modelación hidrológica distribuida.

Identificar los efectos de los escenarios de cambio climático en la estimación de sedimentos en las cuencas hidrográficas a través de la modelación hidrológica distribuida.

3. Glosario

Erosión: proceso natural de la pérdida física – mecánica del suelo, con afectación en sus funciones y servicios ecosistémicos, que produce entre otras, la reducción de la capacidad productiva de los mismo (Minambiente, 2022).

Sedimentos: depósito no consolidado constituido por partículas minerales, fragmentos de roca y en ocasiones restos orgánicos (Instituto Geológico y Minero de España, 2018).

Escorrentía superficial: agua de lluvia que circula sobre la superficie, ríos y quebradas (Minambiente, 2023).

Caudal ambiental: volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas debajo de la fuente de la cual depende tales ecosistemas (Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Oferta hídrica: está asociada al ciclo o régimen hidrológico, que a su vez representa el proceso continuo de la circulación y transformación del agua en sus diversos estados en la esfera terrestre (CORPORBOYACÁ, 2022).

Cuenca hidrográfica: área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo a intermitente, que confluye en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar (Decreto 1729 de 2002 Departamento Administrativo de la función pública, 2002).

Variabilidad climática: fluctuaciones de las variables climatológicas alrededor de sus promedios (condiciones predominantes durante un periodo determinado) (Benavides & León, 2007).

Gases de efecto invernadero (GEI): componentes gaseosos de la atmosfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de

onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad produce efecto invernadero. Los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) el ozono (O_3), los halocarbonos, hidrofluorocarbonos (HFC) u los perfluorocarbonos (PFC) (IDEAM, 2021).

Modelo hidrológico: representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. El sistema físico real está representado por la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología (IDEAM, 2015).

4. Marco Teórico

La erosión se puede definir como un proceso complejo que incluye el desprendimiento, remoción y transporte de partículas de suelo o material rocoso por parte de agentes erosivos como el agua, el viento y la gravedad, este término de erosión se utiliza habitualmente en referencia a una unidad paisajística concreta (cuenca o ladera) pero cuando el transporte de las partículas erosionadas se produce más allá de la unidad, ya no se emplea el término erosión sino se pasa a hablar de producción de sedimentos (Alatorre & Beguería, 2009). Los estudios de Walling & Fang (2013) estiman que una sexta parte del suelo mundial se encuentra afectado por la erosión hídrica esto debido a las modificaciones ambientales inducidas por las actividades antrópicas, ellos también señalan que las actividades que influyen mayormente en la erosión son la deforestación y el cambio en el uso de los suelos (43%), el sobrepastoreo (29%), la mala gestión de la tierra agrícola (24%) y la sobreexplotación de la vegetación natural (4%). Alatorre & Beguería (2009), indican que la producción de sedimentos y su depósito alteran el funcionamiento de los ríos, la capacidad de retención de las zonas inundables y contribuye fuertemente a la colmatación de los embalses reduciendo su vida útil. Asimismo, los estuarios que son la vía por la que se transporta sedimentos de los ríos hasta el mar se han alterado por el continuo transporte y su disposición, los sedimentos también pueden quedar atrapados en las llanuras aluviales de los ríos y solo ser liberados en tiempos de inundación, alterando las propiedades químicas, entre muchos otros efectos negativos (Dyer, 1995). Los fenómenos anteriormente mencionados por Wallin y Fang (2013) han intensificado los efectos del cambio climático, según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático IPCC por sus siglas en inglés en su resumen publicado en el 2021, advierten que todas las regiones del mundo están experimentando eventos extremos como olas de calor, sequías y fuertes precipitaciones, que en general son más severos y ocurren con mayor frecuencia. El ciclo hidrológico al igual que los otros sucesos está íntimamente relacionado con el cambio climático, puesto que el clima depende de variables relevantes del ciclo hidrológico como la humedad y la

precipitación. Adicionalmente el sistema climático y el ciclo hidrológico están vinculados estrechamente con los océanos y su dinámica registra cambios importantes por efecto del calentamiento global, mismos que interactúan con el sistema climático global (Martínez & Patiño, 2012).

Es claro el esfuerzo realizado en las últimas décadas para evaluar y analizar el impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico, pero también es importante estudiar los efectos sobre el ciclo de sedimentos, dada la trascendencia que tienen los fenómenos de erosión del suelo y su deposición (Francés & Bussi, 2014). Los efectos del cambio climático sobre el ciclo de los sedimentos pueden clasificarse según Mullan en: efectos en la cuenca o internos (perdida de suelo y disminución de la productividad que afecta especialmente áreas tropicales y subtropicales) y efectos fuera de la cuenca o externos (incremento de la frecuencia de flujos hiperconcentrados que incorpora contaminantes en el agua y acelera su colmatación especialmente en zonas mediterráneas).

Teniendo en cuenta la influencia del cambio climático en los recursos hídricos se ha asumido la necesidad de incorporar modelos hidrológicos que permitan realizar una representación simplificada de los sistemas del mundo real para mejorar la comprensión, la predicción y la gestión del recurso hídrico, por esto se ha adoptado una amplia gama de aplicaciones como los modelos hidrológicos que desde sus orígenes en la década de 1850, han progresado constantemente a través del desarrollo de conceptos y teorías, recopilación y disponibilidad de datos, herramientas computacionales y de análisis, e integración con otras tecnologías y ciencias (Brendel et al., 2024). El primer paso de toda modelación hidrológica es establecer un modelo perceptual, decidir cuáles son los principales procesos y variables que intervienen en la generación de caudales (suelo, subsuelo y clima) y cuáles son los procesos más importantes que intervienen en la formación de escorrentía (evaporación, evapotranspiración, infiltración, humedad de suelo, flujo subterráneo, etc). Una vez reconocidas esas variables y procesos se relaciona mediante ecuaciones obteniendo un modelo conceptual

(Cabrera, 2012). Los tipos de modelos se pueden clasificar de múltiples maneras según la guía práctica sobre la modelización hidrológica del instituto IMDEA de Madrid; una de ellas es por su enfoque matemático (determinista o estocásticos) o por la forma que tiene de representar la superficie de la cuenca, aquí se encuentran: el modelo agregado, cuando independientemente de los procesos que considere, los parametriza como valores únicos para el conjunto de la cuenca, sin tener en cuenta su diversidad espacial; el modelo distribuido que intenta representar con mayor detalle dichos procesos y parámetros y por último el modelo semi distribuido que es aquel que da una representación intermedia de la diversidad espacial, utilizando zonas de comportamiento teóricamente similar que se consideran como agregadas.

5. Planteamiento del problema

El incremento de la población se ha convertido en una de las principales problemáticas, pues se requiere explotar más la producción agrícola para la obtención de alimentos, incentivando la generación de acciones sostenibles encaminadas a la gestión integral del recurso hídrico especialmente en las zonas donde este es limitado (Surinaidu, 2022). El recurso hídrico se encuentra de manera variable y limitada, recientemente influenciado por eventos extremos como las inundaciones y sequías, de tal manera que la humanidad se ha visto en la necesidad de implementar diferentes alternativas como infraestructuras hidráulicas para mitigar sus impactos, un ejemplo son las represas para embalsar el agua (Cenobio-Cruz et al., 2023). Los lagos como cuerpos de agua que cumplen diversas funciones actualmente presentan una reducción de sus niveles normales, lo que se constituye en una problemática por su importancia en la gestión del recurso hídrico que se dispone de reservorios de aguas, control de inundaciones y sostenimiento de los ecosistemas, sumado a la creciente demanda hídrica para las diferentes actividades que imposibilitan el adecuado desarrollo económico (Long et al., 2023).

La unidad de transporte natural de materiales como agua, sedimentos, sustancias químicas y biológicas desde la tierra hasta los estuarios, son los ríos, ese material trasladado cumple una función muy importante para la conservación de la forma deltaica de los estuarios, pero en algunos la fuerte influencia antrópica, está afectando negativamente tanto la descarga de agua como de sedimentos al océano, provocando el hundimiento de la tierra, aumento en el nivel del mar, marejadas ciclónicas y la eutroficación, que además de las actividades antrópicas se ve fuertemente afectado por el cambio climático que ha acentuado la disminución de la esorrentía (Wannasin et al., 2021).

En el área de los recursos hídricos es indispensable conocer los regímenes de caudales en las cuencas hidrográficas, con buena disponibilidad y confianza en los datos registrados por los distintos equipos de monitoreo, para que se pueda planificar acertadamente el recurso

hídrico y las estructuras hidráulicas (Ergün & Demirel, 2023). Si bien los registros de las series históricas de caudal pueden ser medidas periódicamente cada minuto, hora o día, los datos faltantes suelen ser comunes por diversas razones, que trae como consecuencia espacios de registro de días, semanas, meses o incluso años (Ergün & Demirel, 2023). No contar con registros históricos completos afecta la confiabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos, generando deficiencias en los cálculos y el análisis de la información (Ergün & Demirel, 2023).

La variabilidad climática y los efectos del cambio climático traerán como consecuencia mayor frecuencia e incremento en la magnitud de los eventos extremos, como lo son las sequias e inundaciones, generando afectaciones en el flujo del agua, trayendo escenarios preocupantes para la planificación y gestión del recurso hídrico donde la demanda de agua crece más (Gradiyanto et al., 2024).

A lo anterior, se suman problemáticas en cuanto a la falta de datos comunes incrementadas en mayor medida en los países en vía de desarrollo como lo menciona Ergün & Demirel (2023), debido a series de caudales incompletas que pueden generar errores en la interpretación de datos, calibración de modelos hidrológicos, resultados incongruentes y resultados de caudales máximos incorrectos, generando la necesidad de una eficiente gestión de los recursos hídricos, señalando la importancia de conocer realmente el régimen hidrológico de las cuencas (Cenobio-Cruz et al., 2023). Por otro lado, las sequias generan impactos negativos en el sostenimiento de los ecosistemas y las actividades sociales, por consiguiente, la gestión del recurso hídrico enfocado al análisis de caudales bajo es indispensable, sin embargo, llevarlo a la práctica mediante un modelo hidrológico distribuido representa grandes retos hoy en día (Cenobio-Cruz et al., 2023). El desconocimiento entre los flujos de agua superficiales y aguas subterráneas dificulta aún más la gestión integral del recurso hídrico, debido a que pueden enfrentar problemáticas por esta situación, como el deterioro de la calidad del agua, anegamiento y salinización, especialmente en las zonas donde la producción agrícola se desarrolla (Surinaidu, 2022).

Debido a los efectos del cambio climático, específicamente el aumento de las temperaturas intensificado por el aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), se espera que modifique considerablemente la intensidad y distribución de las lluvias en el siglo XXI, incluso cambios medidos en el clima pueden generar cambios trascendentales en los ríos y junto con esto en la producción de sedimentos (IPCC, 2023). Estudios realizados en siete cuencas típicas de China hacia el año 2000 evidenció que las actividades humanas como la deforestación y la urbanización, o cambios en el uso del suelo, han tenido mayor efecto que el cambio climático en el aumento del flujo de sedimentos del río, sin embargo, hay que destacar que, en ríos de mayor dimensión, el alcance de los impactos generados por el cambio climático y las labores humanas varía, pero lo que se desconoce que la interacción de ambos intensifican las problemáticas (L. Zhang et al., 2023). Los cambios en la descarga de agua y la carga de sedimentos están controlados o por el cambio climático o por la influencia de las represas, pero estacionalmente hay una correlación entre estos dos factores que cambian el mecanismo dominante en la desembocadura. Las obras civiles como las presas durante las temporadas de inundaciones logran reducir el impacto del cambio climático en la descarga de agua y en épocas de pocas precipitaciones o sequías, regulan el caudal, así mismo el clima influye en la reducción estacional de la carga de sedimentos pues en épocas de lluvias las cargas de sedimentos son mayores lo que aumenta el flujo de sedimentos. Interanualmente el cambio climático es el fenómeno que más aporta en la variación de la descarga de agua, pero son las presas las que influyen más en la descarga de sedimentos por su capacidad de almacenamiento (L. Zhang et al., 2023).

La represa es un factor determinante en la descarga de agua y de sedimentos además del cambio climático, puesto que pueden afectar sobre todo la cantidad de sedimentos si se compara con escenarios donde no las hay, ya que favorecen a la reducción del flujo de sedimentos en las desembocaduras, sin embargo hay que tener en cuenta que las cargas están relacionadas con la ubicación de dichas obras civiles, según el estudio realizado en la cuenca

Qian Jiang y en el afluente Yu Jiang en China la reducción anual de la carga de sedimentos en el periodo posterior a la construcción de la represa fue del 75,1%, sin embargo la represa construida aguas abajo tuvo un mayor impacto lo que generó una reducción más significativa (L. Zhang et al., 2023).

Debido a las problemáticas generadas por la producción de sedimentos en las corrientes hídricas, es de gran interés conocer los impactos sobre la gestión del recurso hídrico y sus aplicaciones mediante las obras hidráulicas (Jimeno-Sáez et al., 2022).

6. Metodología

La presente investigación se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la modelación hidrológica para la estimación de los efectos del cambio climático en el comportamiento de la oferta hídrica y el ciclo de sedimentos en cuencas hidrográficas. La selección de los estudios y la metodología empleada para su análisis fueron fundamentales para garantizar la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. A continuación, se detallan los elementos clave de la metodología utilizada.

6.1 Criterios de selección

La selección de los documentos se realizó con base en su relevancia para el tema de estudio, es decir, aquellos que abordan la modelación hidrológica, la estimación de sedimentos y los efectos del cambio climático en cuencas hidrográficas. Los estudios seleccionados se caracterizan por:

- Ser investigaciones científicas publicadas en revistas académicas revisadas por pares.
- Incluir estudios aplicados en cuencas hidrográficas a nivel global y nacional.
- Utilizar modelos hidrológicos reconocidos para la estimación de la oferta hídrica y los sedimentos.
- Tener un enfoque explícito en el impacto del cambio climático en la dinámica de los sedimentos en las cuencas hidrográficas.

6.2 Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Estudios que utilicen modelos hidrológicos distribuidos para la estimación de sedimentos y la oferta hídrica.
- Investigaciones que analicen explícitamente los efectos del cambio climático en los regímenes hídricos y de sedimentos.
- Artículos publicados entre 2000 y 2024 para garantizar que se incluyen los estudios más relevantes y actualizados.

Se excluyeron:

- Estudios que no aborden la modelación hidrológica ni el impacto del cambio climático en los sedimentos.
- Documentos que no proporcionen detalles metodológicos suficientes sobre el modelo utilizado o los resultados obtenidos.
- Artículos que no se refieren al contexto de cuencas hidrográficas o que no analicen estos efectos en áreas geográficas relevantes.

6.3 Variables de comparación

Para la comparación de los diferentes estudios se consideraron las siguientes variables:

- **Tipo de modelo hidrológico utilizado:** Distribuido, semi-distribuido o agregado.
- **Escenarios de cambio climático:** Cómo cada estudio aborda los efectos del cambio climático, especialmente en cuanto a las precipitaciones, temperatura y frecuencia de eventos extremos.
- **Región geográfica de estudio:** Se compararon estudios realizados en diferentes regiones del mundo, haciendo especial énfasis en estudios realizados en América Latina, Europa y Asia.

- **Parámetros modelados:** Los principales parámetros utilizados en los modelos, como escorrentía, precipitación, evapotranspiración, carga de sedimentos y calidad del agua.

6.4 Ecuaciones de búsqueda utilizadas

La búsqueda de los documentos se realizó mediante estrategias de búsqueda estructuradas que incluyen las siguientes palabras clave y ecuaciones:

- "Hydrological modeling AND sediment transport AND climate change"
- "SWAT model AND sediment yield AND climate impact"
- "Hydrological modeling AND watershed management AND climate change effects"
- "Sediment dynamics AND hydrological models AND watershed management"
- "Impact of climate change on sediment transport in river basins"

Estas ecuaciones se emplearon para garantizar que la búsqueda abarcara una amplia gama de estudios relevantes y específicos sobre los efectos del cambio climático en la hidrología y el ciclo de sedimentos.

6.5 Bases de datos consultadas

Se utilizaron varias bases de datos académicas y científicas para la recolección de información, incluyendo:

- Google Scholar: Para acceder a artículos científicos, tesis y libros.
- Scopus: Para una revisión exhaustiva de artículos académicos indexados en revistas científicas de alta calidad.
- Web of Science: Para acceder a investigaciones más especializadas en el campo de la hidrología y la modelación.
- ScienceDirect: Para revisar investigaciones sobre el uso de modelos hidrológicos en estudios relacionados con el cambio climático y la gestión de cuencas.
- SpringerLink: Para acceder a libros y capítulos sobre modelación hidrológica y sus aplicaciones en la estimación de sedimentos.

6.6 Cantidad de muestra

Se seleccionaron un total de 30 estudios relevantes, que incluyen artículos publicados entre 2000 y 2024. La cantidad de documentos seleccionados se determinó en función de su relevancia para los objetivos del estudio y la cobertura de las diferentes variables de comparación. Este número permite tener una muestra representativa de la literatura actual sobre la modelación hidrológica y sus aplicaciones para la estimación de sedimentos y los efectos del cambio climático.

6.7 Rango de años consultados

El rango de años consultados para los estudios fue de 2000 a 2024, con el fin de incluir investigaciones recientes y relevantes para la evaluación de la modelación hidrológica frente a los efectos del cambio climático. Este rango permite captar tanto estudios pioneros en el campo como investigaciones más recientes que aborden las últimas metodologías y modelos.

Esta metodología proporciona una base sólida para la revisión bibliográfica y asegura que los estudios seleccionados sean pertinentes, relevantes y representativos del estado actual de la investigación en la modelación hidrológica y sus aplicaciones frente al cambio climático.

De acuerdo con los elementos claves consultados y descritos anteriormente, se obtuvo la información clasificados de la siguiente manera, con el propósito de mejorar la organización y claridad de la investigación.

6.8 Modelos hidrológicos distribuidos

- Ergün & Demirel (2023)

Descripción del modelo de mesoescala (mHM), que simula el proceso de lluvia-escorrentía distribuyendo las características físicas de la cuenca, como la vegetación, evaporación, almacenamiento subterráneo, y flujo base .

- Wannasin et al. (2021)

Utilización del modelo WFLOW_SBM para la simulación diaria de flujos en cuencas del Gran Río Chao Phraya (Tailandia), empleando datos globales debido a la falta de información local. Este modelo se destacó por su aplicación en cuencas naturales.

- Cenobio-Cruz et al. (2023)

Implementación del modelo hidrológico distribuido SASER, con un módulo externo que regula los caudales base durante períodos secos en la cuenca del Ebro.

- Long et al. (2023)

Aplicación del modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool), enfocado en la simulación de flujos y sedimentos en cuencas hidrográficas.

6.9 Modelos hidrológicas integrados con otras herramientas

- Surinaidu (2022)

Uso del modelo SWAT combinado con el modelo hidrogeológico MODFLOW para estudiar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Nagavali (India).

6.10 Modelos y técnicas para el análisis de sedimentos

- Chiang et al. (2023)

Análisis de la precisión del modelo SWAT para la simulación de sedimentos en diversas condiciones de uso del suelo y cambio climático.

- Zantet oybitet et al. (2023)

Evaluación de prácticas de gestión para reducir el rendimiento de sedimentos en la cuenca Gilo, utilizando el modelo SWAT.

- Jimeno-Sáez (2022)

Propuesta de la ecuación Universal del Suelo Modificada (MUSLE) dentro del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos.

6.11 Estudios sobre el Impacto del Cambio Climático y la Erosión

- Fan et al. (2023)

Investigación sobre los efectos del cambio climático en la escorrentía y la carga de sedimentos en la cuenca del río Amarillo, con el uso de series temporales reconstruidas mediante aprendizaje automático.

- Zhang et al. (2020)

Estudio sobre la relación entre el cambio climático, el uso de la tierra y las cargas de sedimentos, utilizando el modelo SWAT para evaluar los impactos en cuencas subtropicales.

6.12 Otros modelos relevantes

- Gradiyanto et al. (2024)

Análisis del impacto del cambio climático sobre los caudales y los extremos hidrológicos en la cuenca del río Kupang, utilizando el modelo SWAT.

6.13 Clasificación de las bibliografías según la metodología planteada

- Rango de Años Consultados:

2000-2009:

Alatorre, L. C., & Beguería, S. (2009). Los Modelos de Erosión: Una Revisión. *Revista C&G*, 29–48.

Benavides, H., & León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático.

López, S. A., & Restrepo, J. (2007). Modelos morfodinámicos de los deltas fluviales colombianos.

2010-2019:

Akinnawo, S. O. (2023). *Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies*. Elsevier B.V.

Moragoda, N., & Cohen, S. (2020). Climate-induced trends in global riverine water discharge and suspended sediment dynamics in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 191.

2020-2024:

Barman, S., et al. (2024). A hybrid SWAT-ANN model approach for analysis of climate change impacts on sediment yield. *Journal of Environmental Management*, 365.

Cenobio-Cruz, O., et al. (2023). Improvement of low flows simulation in the SASER hydrological modeling chain. *Journal of Hydrology X*, 18.

Gradiyanto, F., et al. (2024). Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia. *Water Science and Engineering*.

Deng, C., Zhang, H., & Hamilton, D. P. (2024). Sensitivity of streamflow and nutrient loads to changes in leaf area index and soil organic carbon in a sub-tropical catchment subject to climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52.

6.14 Cantidad de muestra

- Estudios con Muestras Grandes:

Cenobio-Cruz, O., et al. (2023). Estudio en la cuenca del río Ebro (31 estaciones hidrológicas, 35 años de datos).

Gradiyanto, F., et al. (2024). Estudio sobre el río Kupang (cuenca extensa con datos de caudal de largo periodo).

Barman, S., et al. (2024). Estudio en la sub-cuenca del Brahmaputra (muestra grande, múltiples años de simulaciones).

- Estudios con Muestras Más Pequeñas:

Akinnawo, S. O. (2023). Estudio de eutrofización con enfoque en técnicas de mitigación en ambientes acuáticos.

Zhang, L., et al. (2023). Estudio de un río subtropical heterogéneo (menos de 10 años de datos y datos limitados de sedimentos).

6.15 Bases de datos consultadas

- Scopus y Web of Science:

Barman, S., et al. (2024). Investigación sobre los impactos del cambio climático en el rendimiento de sedimentos mediante el modelo SWAT-ANN.

Gradiyanto, F., et al. (2024). Análisis del impacto del cambio climático sobre el flujo en la cuenca del río Kupang.

- Google Scholar:

Moragoda, N., & Cohen, S. (2020). Investigaciones globales sobre la dinámica de descarga de agua y sedimentos.

Cenobio-Cruz, O., et al. (2023). Estudio de flujos bajos en cuencas naturales utilizando SASER.

6.16 Ecuaciones de búsqueda utilizadas

- Palabras clave principales:

"SWAT model AND sediment transport AND climate change"

"Sediment dynamics AND hydrological models AND river basins"

"Impacts of climate change AND sediment yield AND water resources"

- Otras Ecuaciones Específicas:

"Impact of land use change AND water quality AND sediment loads"

"Climate change AND hydrological response AND sediment yield"

6.17 Variables de comparación

- Variables en Modelos Hidrológicos:

Cenobio-Cruz, O., et al. (2023) compara la simulación de flujos bajos y su relación con el cambio climático en distintas cuencas.

Barman, S., et al. (2024) compara la producción de sedimentos bajo escenarios de cambio climático en la región del Himalaya oriental.

- Comparación de Métodos de Modelación:

Chiang, L. C., et al. (2023) compara la precisión del modelo SWAT en condiciones de uso de suelo y cambio climático.

Jimeno-Sáez, P., et al. (2022) compara el rendimiento del modelo SWAT con modelos de aprendizaje automático en una cuenca forestal.

6.18 Criterios de inclusión y exclusión

- Incluidos:

Artículos que analicen explícitamente los efectos del cambio climático en el ciclo de sedimentos utilizando modelos como SWAT.

Estudios que utilicen metodologías de modelación hidrológica ampliamente reconocidas.

- Excluidos:

Artículos que no traten sobre el cambio climático o la dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas.

Estudios que no proporcionen suficientes detalles metodológicos o que utilicen enfoques obsoletos.

6.19 Criterios de selección

- Selección basada en la relevancia temática y metodológica:

Barman, S., et al. (2024): Selección de modelos híbridos SWAT-ANN para evaluar impactos climáticos en sedimentos, basándose en estudios de alta precisión.

Moragoda, N., & Cohen, S. (2020): Inclusión debido al enfoque global e interrelación de agua y sedimentos, relevante para estudios comparativos a nivel mundial.

Estas clasificaciones permiten observar cómo se han seleccionado y analizado las fuentes consultadas, y cómo se ha aplicado la metodología para clasificar las bibliografías de acuerdo con los criterios previamente establecidos.

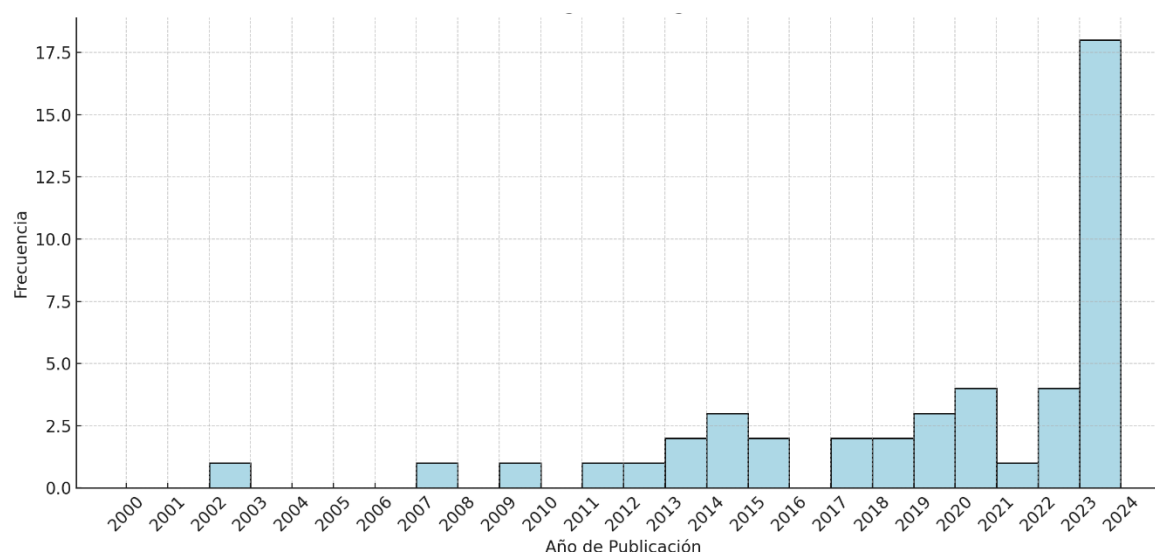
6.20 Análisis del material de consulta de acuerdo con los elementos claves consultados

El análisis de las bibliografías consultadas para el desarrollo de este trabajo de grado ha permitido identificar una amplia variedad de enfoques y metodologías aplicadas al estudio de los impactos del cambio climático sobre el ciclo de sedimentos y la oferta hídrica en cuencas hidrográficas. En cuanto al rango de años consultados, se observó que la mayoría de los estudios relevantes han sido publicados en los últimos años, con una clara tendencia hacia la

actualización de modelos y técnicas de simulación en el periodo comprendido entre 2020 y 2024. Esto refleja la continua evolución de las metodologías aplicadas a la modelación hidrológica, especialmente en relación con el cambio climático, y la necesidad de incorporar nuevas tecnologías y enfoques computacionales, como los modelos híbridos que combinan herramientas de modelación hidrológica con técnicas de aprendizaje automático.

Figura 1

Distribución de las bibliografías según el año de publicación.



La Figura 1, muestra la distribución de las bibliografías según el año de publicación. La mayoría de los estudios relevantes se han publicado hace poco, especialmente en los últimos cinco años, lo que refleja un enfoque continuo en la modelación hidrológica y el cambio climático. Esto resalta la tendencia hacia la actualización constante de las metodologías empleadas para abordar estos fenómenos en diferentes contextos geográficos.

Los estudios con muestras grandes, que abarcan periodos largos y utilizan múltiples estaciones hidrológicas, presentan una ventaja significativa al permitir una evaluación más completa de los fenómenos hidrológicos en diversas condiciones climáticas y geográficas. Sin embargo, también se destacan estudios con muestras más pequeñas, los cuales, aunque limitados en cuanto a la cantidad de datos, proporcionan valiosos análisis en contextos específicos o con datos

limitados, como es el caso de estudios realizados en cuencas con poca información. La diversidad en el tamaño de las muestras refleja las distintas realidades y desafíos a los que se enfrentan los investigadores, quienes deben adaptar sus enfoques metodológicos a la disponibilidad de datos.

La variedad de bases de datos consultadas, como Scopus, Web of Science y Google Scholar, también resalta la importancia de acceder a fuentes de alta calidad y diversificadas para garantizar una revisión exhaustiva de la literatura. Estas bases de datos han facilitado la recopilación de artículos relevantes, desde investigaciones aplicadas en cuencas específicas hasta estudios globales que permiten comparaciones a gran escala. El uso de ecuaciones de búsqueda bien definidas, que incluyen términos clave como "SWAT model AND sediment transport AND climate change", ha sido fundamental para identificar los estudios más pertinentes para el análisis de los efectos del cambio climático sobre los sedimentos.

En cuanto a las variables de comparación, los estudios revisados abordan principalmente la relación entre el cambio climático y la producción de sedimentos, así como la comparación de distintos modelos hidrológicos en diversas condiciones de uso de suelo y clima. Estos estudios han permitido identificar los efectos directos del cambio climático sobre los regímenes de precipitación, temperatura y escorrentía, y cómo estos cambios afectan la dinámica de los sedimentos en las cuencas hidrográficas. Además, se ha observado un creciente interés en comparar el rendimiento de modelos como SWAT con nuevas metodologías basadas en inteligencia artificial, lo que refleja la tendencia hacia la innovación y la mejora de las predicciones en este campo.

Los criterios de inclusión y exclusión aplicados en la selección de las bibliografías también han sido esenciales para garantizar la pertinencia de los estudios analizados. Se incluyeron investigaciones que abordan de manera explícita los efectos del cambio climático en la dinámica de los sedimentos, utilizando modelos reconocidos en el campo de la hidrología, como el modelo SWAT. Por otro lado, se excluyeron aquellos estudios que no trataban el cambio

climático o que carecían de una metodología sólida y detallada. Esta rigurosidad en los criterios de selección ha permitido obtener una muestra representativa y actualizada de la literatura relevante.

De acuerdo con lo anterior, el análisis de las bibliografías consultadas demuestra que la modelación hidrológica es una herramienta crucial para entender los efectos del cambio climático sobre los sedimentos y la oferta hídrica en cuencas hidrográficas. A lo largo de los últimos años, ha habido un avance significativo en el desarrollo de modelos más precisos y complejos, que incorporan tanto aspectos climáticos como humanos. Estos avances metodológicos, combinados con una selección adecuada de las fuentes de información y la comparación de variables clave, han permitido una mejor comprensión de los desafíos que enfrenta la gestión de los recursos hídricos y la conservación del suelo en el contexto del cambio climático.

7. La modelación hidrológica para la estimación de la oferta hídrica

Un modelo hidrológico puede definirse como el resultado de un conjunto de fórmulas matemáticas que representan y caracterizan el ciclo hidrológico y sus procesos físicos mediante un balance hídrico. Esta herramienta se aplica en diversos campos relacionados con el manejo de los recursos hídricos, como el análisis de cuencas hidrográficas, la gestión del recurso hídrico, la producción agrícola y el estudio de los flujos de caudal. (Ergün & Demirel, 2023). Los modelos hidrológicos se pueden clasificar en agregados o distribuidos, esto en función del análisis espacial, si bien ambos tienen el objetivo de emular el proceso lluvia-escorrentía en la cuenca, el modelo agregado obtiene un valor promedio de todos los parámetros en el análisis, mientras que, el modelo distribuido analiza el fenómeno lluvia-escorrentía teniendo en cuenta la variabilidad espacial en toda la cuenca (Wannasin et al., 2021). El modelo hidrológico como herramienta permite mejorar la gestión sostenible del recurso hídrico, debido a que caracteriza aceptablemente el proceso del ciclo hidrológico (Surinaidu, 2022). Los modelos hidrológicos se han aplicado ampliamente para la gestión de las cuencas hidrográficas, enfocadas en evaluar el

rendimiento hídrico producto de la escorrentía, cambios en el uso del suelo y efectos del cambio climático (Chiang et al., 2023)

Los modelos hidrológicos son aplicados para investigar los efectos del cambio climático en el futuro, debido a que permite simular los cambios o tendencias en los regímenes de caudales teniendo en cuenta las diferentes proyecciones climáticas en el futuro. Dentro de los análisis de modelación hidrológica, incluir los escenarios de cambio climático se realizan por medio del cambio en los valores de temperatura (Gradiyanto et al., 2024). En los últimos años se han implementados los modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para comprender mejor los procesos en las cuencas hidrológicas y que a su vez, se convierten en importantes herramientas de gestión para la toma de decisiones (Wannasin et al., 2021).

Los modelos hidrológicos surgieron en la década de 1970, siendo los de tipo distribuido más complejos de aplicar en la práctica que los modelos agregados. Esta diferencia se debe a la necesidad de calibrar los parámetros que se emplean en los modelos hidrológicos. En los modelos agregados, dichos parámetros se consideran homogéneos para todo el sistema, mientras que en los modelos distribuidos se toma en cuenta la heterogeneidad de las cuencas hidrográficas, considerando propiedades físicas como la topografía, las pendientes, la red de drenaje, la morfología, la cobertura del suelo y la geología. Esto permite realizar análisis más completos, robustos y específicos. Sin embargo, la calibración de un modelo hidrológico distribuido implica altos costos computacionales. Además, se requiere información precisa y detallada para obtener resultados confiables, lo cual representa un desafío cuando no se dispone de cuencas con una instrumentación adecuada ni con registros históricos suficientes, una situación común en muchos países en vías de desarrollo. (Wannasin et al., 2021).

En el caso de las cuencas que se encuentran reguladas por embalses se pueden simular por modelos hidrológicos distribuidos, para tal fin se requiere información directa de su operación y puede ser analizados en distintos escenarios con enfoques de cambios del uso del suelo en la cuenca, cambio climático y la misma operación de presas (Wannasin et al., 2021).

Los modelos hidrológicos requieren información confiable sobre las cuencas de estudio. Sin embargo, en muchas zonas esta información es limitada o inexistente. Para enfrentar esta dificultad, se ha implementado la regionalización, una técnica que permite transferir datos y análisis desde áreas monitoreadas hacia aquellas sin información. La investigación hidrológica se ha enfocado en desarrollar métodos, herramientas y teorías, como los modelos lluvia-escorrentía regionalizados, para estimar los regímenes de caudal en zonas no monitoreadas, aprovechando datos de sectores dentro de la misma cuenca donde sí se cuenta con registros. A pesar de que el método de regionalización logra resultados para conocer información hidrológica en las zonas que no se tienen monitoreadas, en ocasiones su desarrollo resulta dispendioso, puesto que se requiere información registrada precisa o por las diferencias morfométricas de las zonas de análisis en las cuencas. Bajo estas dificultades se han implementado técnicas de acoplamiento de modelos hidrológicos con modelos hidráulicos, con el objetivo de reducir la incertidumbre en los resultados y obtener valores de simulación confiables (Long et al., 2023).

Un modelo hidrológico puede ser aplicado para el conocimiento de los recursos hídricos en las cuencas en épocas de estiaje y conocer las condiciones de caudales bajos. Sin embargo, debido a la complejidad de caracterizar los procesos de lluvia - escorrentía, especialmente en cuencas grandes, los análisis de caudales bajos pueden ser limitados. Por estas razones, se han mejorado los procesos con técnicas de enfoques físicos o conceptuales, como la aplicación de modelos hidrológicos distribuidos basados en análisis físicos para emular los regímenes hidrológicos a diferentes escalas de cuencas (Cenobio-Cruz et al., 2023).

Los avances en técnicas y herramientas computacionales disponibles en la actualidad han facilitado el desarrollo de modelos distribuidos, haciéndolos más viables y confiables. Además, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite obtener información espacial de los parámetros físicos de las cuencas, mientras que los sensores remotos ofrecen datos amplios y de acceso público. Asimismo, la aplicación de métodos de pedotransferencia

(PTF) para estimar propiedades hidráulicas del suelo representa una valiosa herramienta, especialmente en el desarrollo de modelos distribuidos en cuencas con escaso monitoreo (Wannasin et al., 2021).

El modelo hidrológico construido de manera integral con escalas de análisis diarias es una exigencia como herramienta de gestión frente a eventos catastróficos como las inundaciones y sequías, su desarrollo permite establecer programas de alertas temprana que permitan gestionar la ocurrencia de los eventos. La implementación de modelos hidrológicos robustos permite analizar los procesos del fenómeno lluvia - escorrentía asociados a los eventos, convirtiéndose en herramientas para la gestión del recurso hídrico en la toma de decisiones, predicciones y simulaciones de eventos (Wannasin et al., 2021).

Para realizar análisis hidrológicos enfocados a las caudales máximos y mínimos, así como sus tendencias, se requieren series históricas disponible de caudales con periodos superiores a los 30 años (Ergün & Demirel, 2023). Se incluyen criterios de datos faltantes en las series históricas para ser incluidas en análisis hidrológicos, según los umbrales permisibles a criterio de los investigadores, como el 1%, 10%, 15% y hasta 20% de la totalidad de la serie histórica. Los modelos hidrológicos son una de las técnicas que se implementan para el llenado de datos faltantes en las series medidas de caudales, que resultan útiles en la gestión del recurso hídrico, debido a que considera las propiedades físicas de las cuencas hidrográficas y la información climática permitiendo la simulación de caudales cuando estos se calibran eficientemente (Y. Zhang & Post, 2018).

Para lograr evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos distribuidos aplicados en cuencas hidrográficas se requiere realizar la calibración y validación de los parámetros mediante las mediciones directas y así satisfacer los estándares de medida vigentes (Chiang et al., 2023), para ello se puede aplicar la ecuación de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) y la Eficiencia Espacial (SPAEF) (Ergün & Demirel, 2023). La calibración de parámetros empleados en el modelo hidrológico se utiliza para el mejoramiento

de resultados obtenidos frente a los observados, con esto se logra emular mejor las variables deseadas, como lo muestra Jimeno-Sáez et al. (2022) donde implementan seis (6) parámetros del modelo SWAT en la cuenca del río Oskots en Navarra España (Figura 2).

Figura 2

Parámetros de calibración para las series de sedimentos en el modelo hidrológico SWAT.

<i>Parameters used to calibrate SSL</i>			
v_CH_COV1. rte	Channel erodibility factor	0 to 1	0.35
v_CH_COV2. rte	Channel cover factor	0 to 1	0.42
v_SPCON.bsn	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be re-entrained during channel sediment routing	0.0001 to 0.01	0.0001
v_SPEXP.bsn	Exponent parameter for calculating sediment re-entrained in channel sediment routing	1 to 1.5	1.45
v_USLE_P.mgt	USLE equation support practice factor	0 to 1	0.85
r_USLE_K.sol	USLE equation soil erodibility (K) factor	-0.2 to 0.2	0.04

Nota: Rangos de parámetros aplicado en la calibración para sedimentos en el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Jimeno-Sáez et al., 2022).

En el trabajo desarrollado por Long et al. (2023) se analizó la eficiencia del modelo hidrológico aplicado en la cuenca del lago Dongting mediante la ecuación Nash-Sutcliffe NSE obteniendo valores superiores a 0.69, el coeficiente de determinación R² con valores superiores a 0.69 y el error porcentual relativo PBIAS inferior al 10%. Los resultados del estudio fueron satisfactorios al realizar un análisis de rendimiento de caudal sobre un área de la cuenca del lago Dongting que no supera el 20%, para realizar la simulación de caudales de manera correcta, disminuyendo el error en las simulaciones del 24.64% al 10.50%.

En los últimos años se ha destacado la inclinación en la investigación de la interacción de las aguas superficiales y las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico, implementando el acoplamiento de modelos, por ejemplo, el modelo hidrológico SWAT y el modelo hidrogeológico

MODFLOW (Surinaidu, 2022). Cada vez más se espera que los fenómenos hidrológicos de inundaciones y sequías se presenten con mayor fuerza en el futuro, lo que obligó a los países y sus gobiernos iniciar una gestión de los recursos hídricos con mayor rigurosidad y para esto se requieren la implementación de modelos más robustos para el análisis integral de las cuencas en temporalidades diarias, permitiendo la implementación de mecanismos como los sistemas de alertas tempranas (Wannasin et al., 2021).

En el sudeste asiático, la escasez de información dificulta la gestión del recurso hídrico y limita la aplicación de modelos hidrológicos en cuencas clave para la región, donde los sistemas enfrentan alta presión y demanda. Ante esta situación, se ha recurrido al desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos que utilizan datos espaciales globales y parámetros estimados, como una alternativa para reproducir los caudales diarios en ausencia de series históricas de variables hidroclimatológicas (Wannasin et al., 2021).

Los modelos hidrológicos aplicados en las cuencas hidrográficas permiten emular los procesos hídricos, permitiendo incorporar las características físicas y climáticas de manera distribuida. Con los resultados obtenidos de un modelo hidrológico distribuido correctamente calibrado y evaluado se pueden utilizar para la gestión eficiente de los recursos hídricos, al conocer las dinámicas hidrológicas en toda la cuenca hidrográfica. Es importante destacar que los modelos hidrológicos son herramientas robustas para la gestión de cuencas hidrográficas, pero su aplicación requiere grandes requerimientos a nivel de información medida de la misma, así como también, grandes gastos computacionales y conocimiento de su manejo especializados. El modelo permite conocer las condiciones internas de una cuenca hidrográfica mediante el método de regionalización si es previamente validado con información existente, de esta manera, es posible obtener información en zonas donde no se cuenta. Dada todas las posibles aplicaciones de un modelo hidrológico distribuido, se constituye como una de las herramientas hidrológicas ampliamente usadas y aceptadas por los expertos.

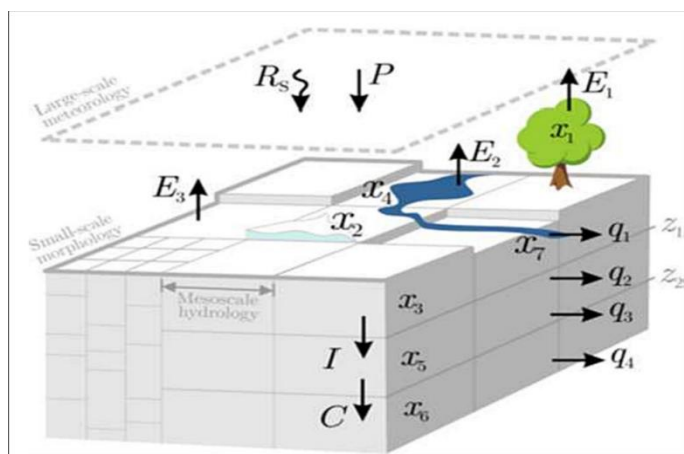
7.1 Modelos hidrológicos

En la investigación científica del campo de la hidrología se implementa ampliamente los modelos hidrológicos que representan el fenómeno lluvia – escorrentía para simular el proceso hidrológico superficial, algunos de los modelos que se encuentran principalmente son Capacidad de Infiltración Variable (VIC); Evaluación del Agua y del Suelo SWAT; Sistema de Modelado de Precipitación y Escorrentía (PRMS) y Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS); sin embargo, los modelos hidrológicos superficiales no tienen en cuenta los procesos físicos ni las interacciones del agua subterránea con el agua superficial (Surinaidu, 2022). A continuación, se describen algunos de los modelos hidrológicos encontrados en la revisión bibliográfica del presente trabajo.

El modelo hidrológico de mesoescala (mHM) aplicado por Ergün & Demirel (2023) describe el proceso del ciclo del agua de manera distribuida, teniendo en cuenta diversos procesos en el fenómeno lluvia escorrentía de los cuales se destaca la interceptación del dosel de la cobertura vegetal; evaporación y transpiración; almacenamiento subterráneo y generación de descarga, percolación profunda y flujo base, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Esquema de los procesos físicos del modelo hidrológico mesoescala mHM.



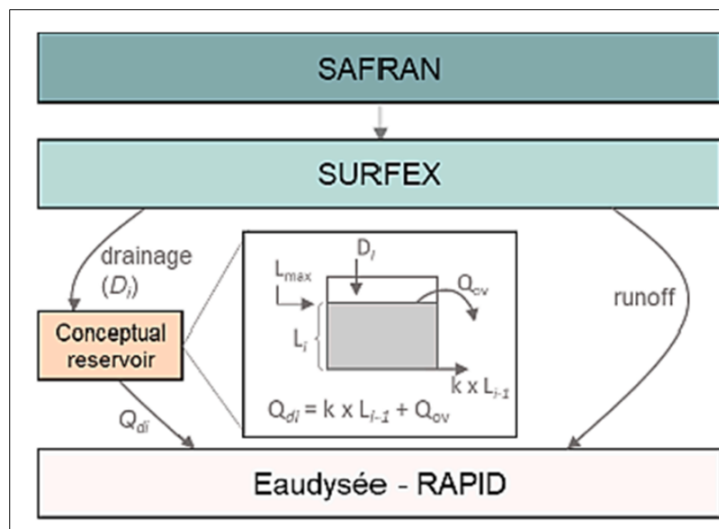
Nota: se presenta esquemáticamente los procesos físicos del modelo hidrológico mesoescala mHM con sus variables de entrada, transporte y salida. Fuente: (Ergün & Demirel, 2023).

El modelo hidrológico distribuido de mesoescala (mHM) requiere inicialmente insumos climatológicos de entrada como precipitación, temperatura y evapotranspiración, entregados en formato netCDF para conocer el régimen espacial de la escorrentía; e información fisiográfica de la cuenca como el Modelo de Elevación Digital (DEM), mapa de pendientes; mapa de cobertura y mapa geológico. Este modelo ha sido implementado exitosamente en Alemania que se ha propagado por Europa, donde se han desarrollado análisis para cuencas de diversos tamaños (Ergün & Demirel, 2023).

El modelo hidrológico distribuido Safran-Surfex-Eaudysee-Rapid SASER es un modelo hidrológico tipo Modelo de Superficie Terrestre (LSM) de base física, este aplica información meteorológica, el esquema LMS SURFEX (Surface Externalisée, en francés) y un esquema de enrutamiento. La información que requiere el modelo hidrológico corresponde a datos meteorológicos de un modelo meteorológico e información medida en la cuenca hidrográfica. El LMS SURFEX utilizado por SASER es un esquema de interacción entre el suelo y la atmósfera (Figura 4), que simula los procesos naturales para la generación de escorrentía y drenaje que fluye a través de la red hidrográfica de la cuenca que se calcula a través del esquema de enrutamiento al final de la descarga (Cenobio-Cruz et al., 2023).

Figura 4

Diagrama esquemático en la implementación del modelo conceptual del yacimiento en el proceso del modelado hidrológico SASER.

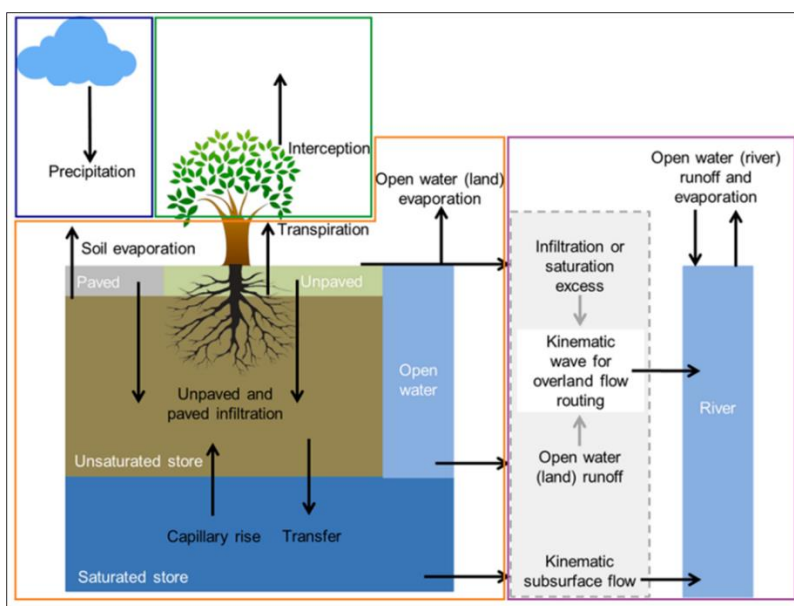


Nota: Diagrama esquemático del modelo hidrológico SASER. Fuente: (Cenobio-Cruz et al., 2023).

El modelo hidrológico WFLOW_SBM representa el fenómeno lluvia - escorrentía de manera distribuida, implementando en su desarrollo códigos de programación PCRaster y Python como se explica en la Figura 5. Es un modelo que se aplica en grandes cuencas y en distintos análisis mostrando un buen rendimiento, representa el proceso físico del flujo del agua en la cuenca, así como los análisis fluviales, terrestres y subterráneos (Wannasin et al., 2021).

Figura 5

Esquema de los procesos físicos y flujos de agua del modelo hidrológico WFLOW_SBM.



Nota: esquema de la interacción de los procesos que implementa el modelo hidrológico WFLOW_SBM en el ciclo hidrológico de cuenca. Fuente: (Wannasin et al., 2021).

La mecánica del modelo WFLOW_SBM consta de cuatro procesos para describir el flujo en la cuenca hidrográfica, el primero consiste en la precipitación como entrada al sistema; seguido de la interceptación que se presenta por la cobertura vegetal; luego se describe el proceso hidráulico en el suelo que describe la infiltración y dirección del flujo entra las zonas no saturadas y las saturadas; y finalmente la generación de la escorrentía o flujo (Wannasin et al., 2021).

El modelo SASER es un modelo hidrológico distribuido de base física que requiere para su desarrollo la entrada de información meteorológica, información de bases de superficie y esquemas de enrutamiento, logrando caracterizar los procesos del ciclo del agua en la cuenca hidrológica (Cenobio-Cruz et al., 2023). Este modelo presenta limitaciones en la representación en condiciones de caudales bajos debido a que no se toman en cuenta los flujos hidráulicos en el suelo, ya que carece de módulos que incorporen la interacción bidireccional de las

cuadrículas entre el río y el acuífero aluvial y no se simulan la interacción de las aguas subterráneas, permitiendo que el proceso lluvia-escorrentía sea más acelerado.

El modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool), desarrollado en Estados Unidos en 1994, es una herramienta que permite representar de forma detallada los procesos físicos del ciclo hidrológico. Se trata de un modelo distribuido que integra herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se aplica ampliamente para simular la relación lluvia-escorrentía, evaluar impactos del cambio climático, actividades antrópicas sobre los recursos hídricos y realizar análisis de calidad del agua. SWAT es uno de los modelos más utilizados para analizar la descarga de agua y la carga de sedimentos, y puede aplicarse tanto en pequeñas cuencas como en cuencas fluviales de gran extensión. Permite simular la cantidad y calidad del agua superficial y subterránea a partir de la caracterización del suelo y el agua. Gracias a su capacidad para representar de manera robusta los procesos hidrológicos, resulta especialmente útil en áreas con escasa información, donde se requiere estimar el flujo de caudales (Long et al., 2023).

El modelo hidrológico SWAT agrupa áreas homogéneas en su interior principalmente por combinaciones de usos del suelo y tipos de suelos que producen las mismas condiciones hidrológicas y dan resultados en cada una de ellas, a estas se le denominan Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU por sus siglas en inglés), y aplica en su proceso físico de emulación la ecuación de balance hídrico (Figura 6), donde S_{wt}/S_{w0} corresponden al contenido de agua inicial y final en el sistema respectivamente, t es el tiempo en días, R_{day} es la cantidad de precipitación en mm, Q_{surf} es la escorrentía superficial en mm, E_a es la evapotranspiración en mm, w_{seep} es el agua que se infiltra a la zona vadosa en mm y Q_{qw} es el agua que retorna al flujo base en mm (Ma et al., 2024).

Figura 6

Ecuación del balance hídrico implementado en el modelo hidrológico SWAT.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Nota: Ecuación para el cálculo de balance hídrico implementado en el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Ma et al., 2024).

Hasta ahora se han mencionado los diferentes procesos que pueden simular modelos hidrológicos empleados para análisis de rendimiento hídrico. No obstante, algunos de estos modelos también cuentan con la capacidad de analizar la producción de sedimentos. Para ello, es fundamental representar y validar previamente el régimen hidrológico, lo cual permite estimar de manera confiable la dinámica sedimentológica. El modelo hidrológico Dymanic RUSLE aporta estimaciones distribuidas espacialmente de la erosión del suelo, contemplando la dinámica de la nieve, la capa de nieve y la estacionalidad de la vegetación. El modelo Poly – Hidro empleado para medir el parámetro de la erosividad de la lluvia que junto con imágenes satelitales se puede evaluar la erosión del suelo y el transporte de sedimentos bajo el cambio climático (Maruffi et al., 2022).

Otro de los modelos hidrológicos utilizados para la estimación de producción de sedimentos es el WBMsed, el cual es un modelo distribuido que predice las cargas de sedimentos suspendidos en ríos a escala global y estudia también los impulsores que están relacionados con esos procesos. Bajo este modelo, se predice un cambio significativo en la descarga natural de los ríos y las cargas de sedimentos en suspensión en la última década del siglo XXI; se estima que habrá variaciones heterogéneas de precipitaciones, en las latitudes altas del hemisferio norte, el sur de Asia, el este de África, Asia y parte de América del Norte, se considera un incremento en las precipitaciones, mientras que en el norte de África, regiones mediterráneas, el Sur, oeste de Europa y algunas partes de Australia, unas disminución de las mismas y un aumento claro de temperatura a nivel global.

El Modelo distribuido de Erosión del Suelo de Limburgo (LISEM por sus siglas en inglés) se basa en ecuaciones físicas, lo que permite su aplicación eficiente en la gestión de las cuencas hidrográficas, siendo implementado en diferentes partes del mundo para integrar el análisis de la producción de escorrentía y de sedimentos basados en eventos extremos y así representar los procesos hidrológicos. El modelo LISEM aplica la ecuación de balance hídrico teniendo en cuenta el Índice de Área a Foliar LAI para la retención del dosel en función de la cubierta vegetal, aplicación de ecuaciones de infiltración en función de la disponibilidad de información acerca del suelo, datos de información de rugosidad aleatoria del suelo y ecuaciones de Manning para simular el flujo de escorrentía; mientras que para el análisis de sedimentos se implementa los principios de erosión y depositación del suelo, donde la erosión se da a través de la salpicadura de la lluvia y el desprendimiento por flujo de escorrentía superficial. El modelo LISEM debido a su estructura distribuida requiere información espacial de la cuenca objeto de análisis, donde algunos de los parámetros de entrada corresponden a textura del suelo, Modelo de Elevación Digital DEM, y cobertura y uso del suelo, adicionalmente, requiere información detallada de datos hidroclimatológicos para conocer la respuesta de los eventos extremos (Grum et al., 2017).

Otro modelo es el denominado TETIS, el cual está fundamentado en estructura de tanques, permitiendo que sea más flexible ya que acepta eliminar o agregar tanques según las condiciones geográficas específicas, también considera la erosión y la deposición de diversas fuentes, como, laderas, barrancos y canales y por último no tiene un número elevado de requisitos de datos o parámetros (Francés & Bussi, 2014).

El modelo SWAT es uno de los más utilizados por su capacidad para la evaluación tanto del suelo como del agua, este simula la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas y logra pronosticar los impactos ambientales generados por el cambio climático. SWAT a su vez se divide en subcuencas y en unidades de respuesta hidrológica, a través de la mezcla del uso de la tierra, el tipo de suelo y la pendiente.

Los modelos distribuidos también significan una gran ventaja debido a sus amplias escalas temporales y espaciales para calcular los factores que contribuyen en las alteraciones, los más usados como MIKE SHE, ANSWERS, EUROSEM y SWAT, han demostrado alrededor del mundo que la reforestación es el tratamiento más rápido para mitigar y reducir la producción de sedimentos.

7.2 Estudios aplicados

El estudio aplicado por Wannasin et al. (2021) para la representación del flujo diario en la cuenca superior del Gran Río Chao Phraya (GCPR) en Tailandia, implementó el modelo hidrológico distribuido WFLOW_SBM con análisis espacial de celdas de resolución de 1 km², recopilando información global debido a las limitaciones de información en la región siendo el primer estudio aplicado con dichas características que logra mitigar la escasez de información y datos. Para lograr configurar el modelo hidrológico se necesitó consultar información geoespacial, datos meteorológicos e hidrológicos. Los datos geoespaciales se resumen en el Modelo de Elevación Digital DEM, los mapas de cobertura, información geológica y la hidrografía; la información meteorológica consiste en los datos de precipitación y evapotranspiración potencial; y finalmente los datos hidrológicos consisten en la información medida diaria de los caudales de los ríos de las cuencas de estudio, así como los embalses en cuanto su almacenamiento y caudal de salida. Los resultados obtenidos en la aplicación del modelo hidrológico distribuido WFLOW_SBM con datos globales e información espacial, así logra obtener caudales de flujo diario en cuencas naturales, incluyendo los años denominados húmedos y secos que son importante en la gestión de recursos hídricos. Mientras que los resultados del estudio en las cuencas que se encuentran influenciadas por grandes embalses no mostraron datos satisfactorios, debido a las discrepancias entre los datos diarios medidos en la operación y los resultados de las descargas de aguas simuladas por el modelo, especialmente en los periodos húmedos. En conclusión, el modelo WFLOW_SBM es aplicable satisfactoriamente en cuencas naturales no aforadas, pero limitada para cuencas altamente

intervenidas por embalses con escasez de datos y la simplificación del modelo en cuanto al módulo de embalses. Wannasin et al. (2021) finalmente menciona que el modelo aplicado en su estudio supera el rendimiento del modelo SWAT que había sido previamente aplicado al área de interés con datos meteorológicos observados, incentivando el uso del modelo hidrológico distribuido WFLOW_SBM.

En el estudio realizado por Cenobio-Cruz et al (2023) se implementó el modelo hidrológico distribuido de base física SAfran-Surfex-Eaudysee-Rapid SASER para representar los caudales bajos en la cuenca del Ebro ubicada en los Pirineos del Istmo de la península Ibérica, donde fue necesario realizar un enfoque conceptual implementando un sistema de embalse subterráneo para simular las condiciones de flujo lentos en épocas de sequía, debido a la complejidad propia de los modelos para representar los caudales bajos en cuencas que se encuentran fuertemente influenciadas por procesos de flujo lento. Se realizó el análisis para una cuadrícula de escala espacial de 1 km² de la cuenca del río Ebro con alrededor de 31 estaciones hidrológicas y 35 años de registro, estas estaciones se seleccionaron de manera que se encontraran en cuencas con condiciones naturales, es decir que no se encontraran fuertemente influenciadas por estructuras hidráulicas como embalses. Como resultado de los análisis implementando el módulo adicional, se obtuvo que su ejecución es positiva siendo de fácil aplicación y calibración, especialmente en cuencas naturales pocamente intervenidas por las acciones del hombre. Al incorporar otro elemento en el análisis del modelo SASER en la representación física del fenómeno lluvia - escorrentía, se evidenció que no altera los resultados en épocas de lluvias.

El estudio de Gradiyanto et al. (2024) aplicó el modelo hidrológico distribuido de Evaluación de Suelos y Agua SWAT en la cuenca del río Kupang en Tailandia, con el objetivo de analizar los efectos del cambio climático en el futuro como herramienta de gestión del recurso hídrico, ante la disponibilidad del agua, frecuencia y magnitud de eventos extremos (inundaciones y sequías). El modelo requirió información de entrada, tal como; datos

geoespaciales (Modelo de Elevación Digital DEM); mapa de coberturas y usos del suelo, datos hidrometeorológicos que requirieron información de variables climatológicas e hidrológicas comprendidas entre los años 1998 – 2020 y los escenarios de cambio climático para los periodos de 2030 a 2049 corto plazo y 2050 2069 largo plazo. Los resultados para los efectos de cambio climático en los escenarios planteados muestran que en el periodo de 2030 a 2049 no habrá cambios significativos, mientras que, para el periodo a largo plazo entre los años 2050 a 2069 evidencia la tendencia a incrementar las precipitaciones especialmente entre los meses de enero y febrero, siendo más fuertes e intensas, mientras que, las sequías se presentarán más reducidas entre los meses de octubre y noviembre. Para los caudales en los escenarios futuros se muestra la propensión a incrementar comparado con los caudales medidos históricamente, esto se evidencia en los meses de enero a mayo. Frente a los caudales extremos que producen inundaciones o sequías, se obtuvo que el caudal alto tiene un incremento del 14% para los escenarios analizados y el cambio del caudal bajo en épocas secas con un resultado de disminución del 11%.

En la cuenca del río Nagavali, ubicada en los estados de Orissa y Andhra Pradesh (India), predominan las actividades agrícolas y el uso de aguas subterráneas sin evidencias de sobreexplotación. Surinaidu, (2022) desarrolló un estudio integrando los modelos SWAT (hidrológico) y MODFLOW (hidrogeológico) para analizar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas entre 1985 y 2018. El acoplamiento entre modelos se logró mediante la transferencia de variables como la recarga y la evapotranspiración, representando de manera precisa el ciclo hidrológico. Los resultados muestran que el 43,2% de la precipitación se pierde por evapotranspiración, el 24% corresponde a escorrentía, el 21% a percolación, y el 69% se convierte en recarga del acuífero. Se identificó una recarga subterránea en la parte alta de la cuenca y un sostenimiento de los flujos superficiales por agua subterránea en las zonas bajas. Finalmente, se advierte que el cambio en el uso del suelo, junto con la variabilidad y el cambio climático, están modificando el régimen hidrológico, aumentando la escorrentía y

reduciendo la recarga. En este contexto, los modelos acoplados se consolidan como herramientas clave para la gestión del recurso hídrico y la planificación frente al cambio climático.

Long et al. (2023) realizó el acoplamiento entre el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico para la cuenca del lago Yangtze en el país de China, con el objetivo de mejorar la simulación de los caudales en la cuenca contemplando el análisis de las zonas sin información histórica, permitiendo un análisis robusto en la obtención de los rendimientos hídricos. La cuenca del Lago Yangtze presenta diversas problemáticas, inicialmente el 20% de su área no tiene información, sumado a que la presa de las Tres Gargantas comenzó su funcionamiento y sus condiciones hidrológicas sufrieron grandes cambios, incrementando la reducción del lago y fuertes sequías. El desarrollo del estudio se llevó a cabo en tres fases: implementación del modelo hidrológico, desarrollo del modelo hidráulico y finalmente el acoplamiento de los modelos. Para el modelo hidrológico se aplicó la herramienta de Evaluación de Suelos y Agua SWAT, que estima el rendimiento hídrico para toda la cuenca del lago Dongting. Seguidamente se aplicó el modelo hidrodinámico MIKE21 para conocer el comportamiento hidráulico del lago. Finalmente, se realizó el acoplamiento de los modelos permitiendo evaluar sus resultados analizando las zonas donde se escasea los datos hidrológicos. La información implementada para el desarrollo del estudio requirió por parte del modelo hidrológico el Modelo de Elevación Digital DEM, información de cobertura de la tierra, la geología, información meteorológica e hidrométrica y para la esquematización del modelo hidráulico se requirió información topográfica a escala 1:5000 y datos hidrológicos de caudal diario.

6 La modelación hidrológica para la estimación de los sedimentos en las cuencas hidrográficas.

Los modelos hidrológicos como herramienta de gestión de las cuencas hidrográficas permiten simular los procesos de sedimentos. En la actualidad para simular los procesos asociados con la estimación y transporte de sedimentos en las cuencas hidrográficas existen

diversos métodos: físico, empíricos y conceptuales, donde el enfoque principal se realiza en analizar la producción de sedimentos en diferentes escenarios para la gestión de suelos en cuencas no instrumentadas (Jimeno-Sáez et al., 2022). Existen enfoques en la investigación de sedimentos donde se mezclan modelos hidrológicos de base física entre modelos empíricos o redes neuronales, para mejorar los resultados aplicados, como el caso de Barman et al. (2024) que acopló el modelo físico SWAT y el modelo empírico ANN, mejorando los resultados de manera ostensible en el análisis hidrológico y de producción de sedimentos.

Los análisis de investigación acerca de la producción de sedimentos mediante la modelación hidrológica tiene amplio interés con enfoques asociados a los impactos de los efectos de cambio climático, lo que apremia y se incrementa la investigación mediante implementación de modelos hidrológicos bajo el análisis de escenarios de cambio climático para conocer y estimar los cambios futuros en los sedimentos, debido a que estos son fundamentales en la geomorfologías de los ríos, quienes afectan la capacidad fluvial; funcionamiento de obras hidráulicas y aprovechamiento de recursos hídricos (Ma et al., 2024). La implementación de modelos hidrológicos y estimación de sedimentos son útiles para la gestión de las estructuras hidráulicas ubicadas en las cuencas, especialmente en los eventos extremos donde sus magnitudes elevadas son importantes (Grum et al., 2017).

Debido a la necesidad de conocer las tendencias y variabilidad de los rendimientos hídricos y producción de sedimentos, para la aplicación de medidas y técnicas en la gestión de conservación de suelos, se han desarrollado diversos modelos distribuidos, de los que se destacan Respuesta Ambiental de Cuencas Hidrográficas de Fuentes Difusas (RESPUESTA); Modelo de Contaminación Agrícola de Fuentes Difusas (AGNPS); Modelo Europeo de Erosión del Suelo (EUROSEM); Modelo de Erosión del Suelo de Limburgo (LISEM); Proyecto de Predicción de la Erosión del Agua (WEPP); y la Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT) (Zantet oybitet et al., 2023). Dada la importancia de los modelos hidrológicos, estos se

aplican en muchos estudios para analizar escenarios de efectos de cambio climático, producción hídrica y herramientas de gestión de impactos (Chiang et al., 2023).

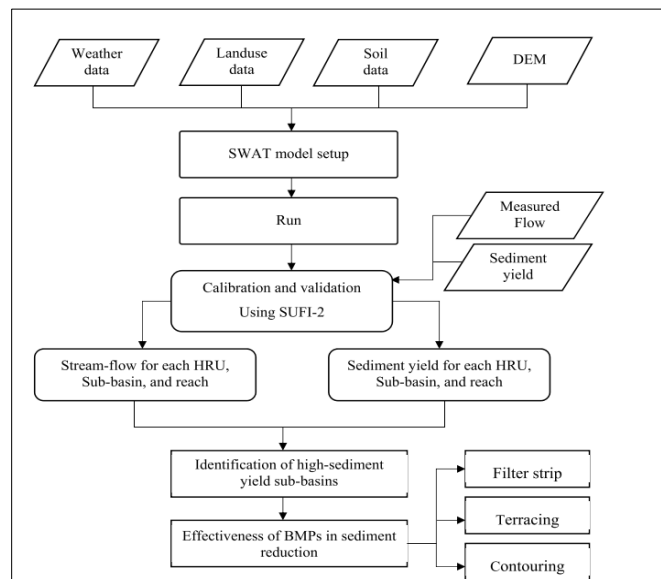
Los modelos hidrológicos de base física se aplican para simular los sedimentos a partir de la precipitación basándose en las leyes de conservación de masa y energía, de esta manera, se logra comprender mejor los procesos en las cuencas hidrográficas para aplicar las medidas de gestión y conservación (Jimeno-Sáez et al., 2022). Los modelos hidrológicos permiten simular las variables y condiciones de las cuencas hidrográficas, en diferentes escalas espaciales y temporales, para poder estimar los rendimientos hídricos y de sedimentos, logrando identificar las zonas críticas y de variabilidad espacial en la producción de sedimentos en las cuencas hidrográficas (Regasa & Nones, 2024). Sin embargo, el modelo hidrológico para la estimación de sedimentos asociado a eventos extremos tiende a sobreestimar la producción de sedimentos, esto debido a la gran dificultad que representa la erosión del suelo debido a la variabilidad espacial y diversos factores que lo controlan (Grum et al., 2017), esto se debe a que se requieren grandes recursos de información para la estimación de la producción de sedimentos mediante la modelación hidrológica, lo que se convierte en una desventaja donde no se cuenta con amplios conocimientos o es inexistente la información (Jimeno-Sáez et al., 2022).

El modelo hidrológico distribuido Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas SWAT es la herramienta computacional de base física, que se implementa para la evaluación de la gestión de recursos hídricos y de suelo, ampliamente aplicado en numerosos estudios debido a que sus resultados se obtienen de manera satisfactoria. El modelo SWAT es aplicado en diversos estudios para el análisis de la producción de sedimentos (Regasa & Nones, 2024), debido a su gran capacidad descriptiva para analizar cuencas complejas de diversos tamaños, así como la facilidad de considerar diversos componentes en la hidrología como escorrentía, evaporación y transpiración, infiltración, rendimientos de agua y producción de sedimentos. El modelo SWAT fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos

(USARS por sus siglas en inglés) de manera conceptual para resolver la producción hídrica, tasa de rendimiento de sedimentos y pérdida de nutrientes en escalas de cuencas hidrográficas (Zantet oybitet et al., 2023). La aplicación del modelo SWAT se ha realizado en numerosos estudios para analizar los efectos del cambio climático en cuencas hidrográficas y a su vez la producción de sedimentos (Ma et al., 2024). SWAT también es aplicado ampliamente como modelo hidrológico para análisis eficientemente de cuencas hidrográficas enfocados a la hidrología, uso y cambio de suelo, impacto hidrológico y estimar el rendimiento de sedimentos (Barman et al., 2024). El modelo hidrológico distribuido SWAT requiere información referente a la cuenca de estudio, por lo que necesita insumos de la topografía, mapas de uso y cobertura de la tierra, datos de suelos e información hidroclimatológica, y así aplicar la ecuación del balance hídrico (Zantet oybitet et al., 2023). La información hidroclimatológica (precipitación, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura y radiación) se requiere a escala diaria, para lograr emular los procesos hidrológicos y la respuesta en cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica HRU del modelo SWAT (Chiang et al., 2023). Debido a que el modelo hidrológico SWAT permite estimar la producción hidrológica y de sedimentos, no siempre es eficaz debido a la heterogeneidad de la cuenca que está dominada por procesos físicos no lineales, lo puede conllevar a no dar resultados de manera precisa (Barman et al., 2024). Los procesos realizados por el modelo hidrológico SWAT para obtener la simulación de rendimiento hídrico y producción de sedimentos para la gestión de técnicas para el uso del suelo se puede observar en la Figura 7.

Figura 7

Proceso de producción hidrológica y sedimentos para la gestión del suelo aplicando el modelo hidrológico SWAT.



Nota: Proceso esquemático del proceso hidrológico y de sedimentos para la gestión del suelo aplicando en el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Zantet oybitet et al., 2023).

El modelo hidrológico SWAT implementa la ecuación Ecuación Universal del Suelo Modificada MUSLE, quien posee la capacidad de estimar la producción de sedimentos a diario por medio de las variables precipitación, escorrentía, erosionabilidad del suelos, uso y cobertura del suelo, pendiente e índice de fragmentación del suelo (Regasa & Nones, 2024). La ecuación MUSLE incorporada en el modelo hidrológico SWAT permite simular el rendimiento de sedimentos, lo que genera resultados confiables siempre y cuando se haya incorporado datos medidos robustos y el modelo se encuentre debidamente configurado, validado y calibrado (Barman et al., 2024). La ecuación de MUSLE responde a procesos físicos, por lo cual sus resultados se estiman a través de los procesos mecánicos que ocurren en el suelo como la erosionabilidad, longitud e inclinación de las laderas y coberturas, por lo que al final lo resultados de la producción de sedimentos se obtienen a partir de la erosión generada del suelo (Zantet oybitet et al., 2023). MUSLE logra estimar la erosión del suelo a partir del factor de

escorrentía que incorpora la energía que se necesita para el desprendimiento y transporte de sedimentos (Jimeno-Sáez et al., 2022). La aplicación de fórmula MUSLE (Figura 8) para la producción de sedimentos se calcula en unidades de medida en toneladas; el volumen producido por medio de escorrentía superficial es en m³; el caudal pico qp en m³/s; mientras que los otros son coeficientes que representan la erosionabilidad del suelo K, topográfica LS, manejo de cultivo C y factores de apoyo P (Barman et al., 2024).

Figura 8

Expresión de la fórmula MUSLE aplicada en el modelo hidrológico SWAT.

$$\text{Sediment yield} = 11.8 \times (Q.q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P$$

Nota: fórmula del cálculo para la producción de sedimentos MUSLE implementada en el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Barman et al., 2024).

Adicionalmente, el modelo hidrológico SWAT en su módulo de sedimentos analiza el equilibrio de estos mediante el arrastre y deposición, en el escenario en que ocurre que la capacidad de transporte de la corriente es superada por la cantidad de sedimentos se presenta la deposición, mientras que, cuando ocurra caso contrario se da el arrastre del material (Ma et al., 2024), esto se establece en SWAT mediante la ecuación de transporte de sedimentos en corrientes (Figura 9) donde, Sed_{ch} corresponde a la cantidad de sedimentos producidos en la corriente en toneladas, $Sed_{ch,i}$ corresponde a la cantidad de sedimentos en el inicio del tramo en toneladas, Sed_{dep} corresponde a la cantidad de sedimentos depositado en ton, Sed_{deg} corresponde a la cantidad de sedimentos nuevamente arrastrado en ton, V_{out} es el volumen al final durante todo el tiempo en m³ y V_{ch} es el volumen de agua en la corriente en m³ (Ma et al., 2024).

Figura 9

Expresión de transporte de sedimentos en corrientes en el modelo hidrológico SWAT.

$$Sed_{out} = Sed_{ch} \bullet \frac{V_{out}}{V_{ch}}$$

$$Sed_{ch} = Sed_{ch,i} - Sed_{dep} + Sed_{deg}$$

Nota: Expresión de transporte de sedimentos en corrientes en el modelo hidrológico SWAT.

Fuente: (Barman et al., 2024).

Debido a la dificultad de tener disponible datos e información detalladas en la cuenca hidrográfica se pueden generar afectaciones en el proceso de validación y calibración de los modelos, estos se deben en la deficiencia de estaciones de medición, así como periodos con información insuficiente y discrepancia en los datos (Chiang et al., 2023). El modelo hidrológico en la simulación de caudal y sedimentos requiere la validación y calibración para su aplicación una vez configurado a partir de todas las variables y parámetros de la cuenca, por lo cual se requieren registros históricos en el tiempo, y así evaluar la capacidad del modelo mediante análisis de validación estadístico como por ejemplo el Coeficiente de Determinación R^2 y la Eficiencia de Simulación de Nashe Sutcliffe. En el proceso de calibrar el modelo hidrológico con objetivo de análisis de producción sedimentológica se realiza inicialmente para la simulación del rendimiento hídrico, una vez se valide satisfactoriamente, se continua con la calibración para la simulación de producción de sedimentos (Zantet oybitet et al., 2023).

Para un buen proceso de modelación hidrológico se debe contar con información robusta y medida de los rendimientos de sedimentos en las corrientes hídricas para el análisis de los efectos e impactos asociados a la erosión y producción de sedimentos, sin embargo, no es fácil contar con sistemas certeros para la medición de estos debido a que corresponde a un proceso fluvial complejo donde se ve afectado por factores hídricos, morfométricos, climáticos, sociales y ambientales (Jimeno-Sáez et al., 2022). Para el análisis del transporte de sedimentos, se debe tener en cuenta diversos factores como: la erosividad de la lluvia,

vegetación como protector de la erosión, pendiente y las prácticas de manejo de suelos. Se debe tener en consideración las actividades humanas para que los resultados se adapten a la realidad y así lograr tomar decisiones en las nuevas políticas de gestión para mitigar los efectos del cambio climático (Moragoda & Cohen, 2020).

A pesar de las limitantes, los modelos hidrológicos como el SWAT configurados, calibrados y validados correctamente es ampliamente funcional para la gestión de cuencas hidrográficas, debido a que permite evaluar los impactos por el cambio y uso del suelo; escenarios de cambio climático y escenarios futuros por prácticas de gestión de la tierra (Jimeno-Sáez et al., 2022). Cuando se presentan diferencias ostensible entre las series de producción de sedimentos simuladas en el modelo hidrológico SWAT frente a las observadas por redes de estaciones, es posible que sean principalmente por eventos de erosión localizados (remoción en masa, socavación y transporte en el cauce) asociados a las altas precipitaciones que el modelo no puede modelar (Chiang et al., 2023).

Los modelos hidrológicos principalmente se caracterizan por procesar los procesos hidrológicos de las cuencas hidrográficas, requiriendo grandes recursos de información, conocimiento y requerimiento computacional. Algunos modelos hidrológicos poseen la robustez suficiente para caracterizar de manera precisa la interacción de los procesos físicos en las cuencas hidrográficas. Inclusive, varios de estos modelos incorporan módulos específicos para el análisis del ciclo de sedimentos a partir de los regímenes hidrológicos, lo que amplía su aplicación a estudios relacionados con la producción y dinámica sedimentológica en las cuencas. Para poder realizar análisis sedimentológicos de las cuencas hidrográficas mediante la modelación hidrológica, se requiere primeramente realizar el modelamiento hidrológico validado y calibrado, y así aplicar el módulo de sedimentos que también se deberá validar y calibrar. El modelo hidrológico que permite analizar los sedimentos se convierte en una herramienta de gestión sólida para las cuencas hidrográficas, enfocadas a las prácticas de conservación, uso y manejo de los suelos.

7 El cambio climático y sus efectos en los ciclos de los sedimentos en las cuencas hidrográficas

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático en su quinto informe (IPCC, 2014), asegura que la influencia humana en el clima a través de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) están provocando el calentamiento del sistema climático global, induciendo a transformaciones significativas en el comportamiento del ciclo hidrológico, incrementando la necesidad de comprender de una manera integral la respuesta de los sistemas fluviales a futuros cambios en las descargas de agua y flujos de sedimentos (Moragoda & Cohen, 2020).

Este transporte de sedimentos por los cuerpos de agua, juegan un papel esencial en el funcionamiento y la conectividad de los ecosistemas, ya que influyen en los procesos ecohidrológicos, biogeoquímicos y geomorfológicos, los cuales son indicadores de los cambios en los procesos de la Tierra (Moragoda & Cohen, 2020). En las últimas décadas se ha observado tendencias decrecientes significativas en la carga de sedimentos fluviales en aproximadamente el 50% de los ríos a nivel mundial sin embargo, no se ha alcanzado un consenso científico sobre las magnitudes de las disminuciones y los efectos cuantitativos de cada factor determinante (H. Zhang et al., 2020).

Estudios de Moragoda & Cohen (2020), mencionan también que según las observaciones realizadas por el modelo hidrológico a escala global WB;sed, predice cambios considerables en las cargas de sedimentos en suspensión para los grandes ríos globales en la última década del siglo XXI bajo los efectos del cambio climático (aumento de la temperatura y disminución de la precipitación), estas transformaciones en el flujo de sedimentos corresponden estrechamente con los patrones de descarga de agua, sin embargo, se observan aumentos mayores en el flujo de sedimentos con acrecentamientos relativamente pequeños en la descarga de los ríos en muchas regiones del mundo, como en el norte de Europa y el sudeste

asiático, pero la relación de la descarga y el flujo de sedimentos no es lineal en el espacio y el tiempo, tanto en los modelos hidrológicos como en la realidad.

Se ha realizado un esfuerzo en los últimos periodos para evaluar y analizar el impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico, pero también se han estudiado los efectos sobre el ciclo de los sedimentos, aunque en menor medida, aun dada la importancia que tiene los fenómenos de erosión y su deposición en muchos lugares de la tierra (Francés & Bussi, 2014). Para entender mejor los efectos del cambio climático sobre el ciclo de sedimentos deben clasificarse en: efectos en la cuenca, también denominados internos y en efectos fuera de la cuenca o externos. Los internos son, la pérdida de suelo y disminución de la productividad de este y los externos, incluye el incremento de la frecuencia de flujos hiperconcentrados, contaminación de las aguas y acortamiento de la vida de los embalses debido a una aceleración de su colmatación (Francés & Bussi, 2014).

La interacción entre el cambio climático y el cambio de uso y la cobertura de los suelos, se consideran los dos factores principales que contribuyen a los cambios en la descarga de agua y sedimentos en muchas regiones del mundo (H. Zhang et al., 2020). El fenómeno del cambio climático trae consigo alteraciones en las temperaturas, las precipitaciones y la evapotranspiración que transforman los ciclos hidrológicos, esto sumado a un cambio en el uso de los suelos y las coberturas vegetales que modifican las descargas no solo de agua sino también de los sedimentos, por el incremento de la erosión (H. Zhang et al., 2020). Este fenómeno puede causar daños, como deterioro de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos, pérdidas de nutrientes, reducción de la productividad agrícola y pérdida de tierras cultivables, además de deposición de sedimentos fluviales y la sedimentación de embalses y enterramientos de canales que pueden generar importantes pérdidas económicas (Choukri et al., 2020), en estudios recientes se comprobó que los impactos directos del cambio climático sobre la erosión hídrica son causados por las precipitaciones (cantidad, intensidad, distribución espacial y temporal), como se menciona anteriormente y por efectos indirectos relacionados con

las actividades antropogénicas y las temperaturas, así pues, un clima cálido afectara a la erosión del suelo principalmente por los cambios en la cubierta vegetal y la humedad de este. Otros factores que pueden modificar las cargas de sedimentos son; el relieve, el área de la cuenca y la litología teniendo en cuenta que contribuyen en la dinámica del flujo (Moragoda & Cohen, 2020). Sin embargo, el análisis estadístico y los modelos hidrológicos son los métodos principalmente utilizados para separar los efectos del cambio climático de los efectos generados por los cambios en el uso y la cobertura del suelo (H. Zhang et al., 2020).

Los sedimentos fluviales suspendidos han sido identificados como indicadores importantes en la degradación de la tierra y el cambio de los recursos del suelo. En la actualidad hay una conciencia renovada sobre la importancia de los sedimentos en suspensión debido a su papel en las exportaciones en el ciclo global de carbono y otros procesos biogeoquímicos (Shi et al., 2022), se ha demostrado que el cambio climático ha contribuido con cantidades significativas de material de arrastre a los ecosistemas acuáticos aguas abajo, por lo que la evaluación de la respuesta de las cargas de sedimentos fluviales suspendidos en ríos criosféricos (regiones de alta latitud y altitud) es muy importante pues tiene implicaciones para esos ecosistemas y los ciclo biogeoquímicos.

Como se viene señalando el cambio climático está afectando los recursos hídricos a nivel mundial, lo que lleva a una mayor frecuencia de eventos meteorológicos e hidrológicos extremos, como sequías, tormentas e inundaciones (Deng et al., 2024). Muchos estudios han incorporado escenarios futuros de uso y cobertura del suelo en modelos hidrológicos para examinar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua y las cargas de nutrientes y sedimentos. Los escenarios que se han contemplado incluyen cambios en la urbanización, la cobertura del suelo y la deforestación (Peng et al., 2024), con el uso de la modelación encontraron que habría una tendencia a la reducción de la descarga de hasta 54% y sería más prominente hacia finales del siglo XXI y una disminución de la escorrentía

superficial de hasta 41%, pero cuando se trata de sedimentos en cuencas boscosas los resultados son muy variados.

Según el estudio “La respuesta de la carga de sedimentos en suspensión de las cabeceras del río Brahmaputra al cambio climático”, realizado por Shi et al. (2022) mediante la integración de dos modelos hidrológicos (ARNO/VIC) arrojó que; la fecha temprana del inicio del deshielo dio una mayor relación entre la carga y la descarga de sedimentos, lo que contribuyó al 71% del aumento de estos. El crecimiento de las precipitaciones son el segundo factor más importante y contribuyó aproximadamente en un 43%, el incremento en la proporción de escorrentía glacial representó el 14% de la intensidad en la carga de sedimentos. La mejora de la cubierta vegetal que se produjo durante el estudio por el clima cálido y húmedo aumentaron las condiciones de almacenamiento de agua lo que redujo la capacidad de producción de esta y provocó una contribución negativa al aumento de la carga de sedimentos en un 29%, compensando la magnitud del aumento potencial de los factores positivos

En otros estudios como los de Choukri et al. (2020), sugieren que un cambio del 1% en las precipitaciones provocarían un cambio del 2% en las descargas de sedimentos y un cambio del 1,3% en las entradas de agua, estudios como estos han demostrado que un cambio en la estacionalidad de las precipitaciones puede tener efectos significativos en las pérdidas de suelo, sin embargo el mismo afirma que las complejas interacciones entre el uso de la tierra y el clima dificultan la predicción de los efectos del cambio climático sobre la escorrentía y la erosión por posibles efectos antagonistas o sinérgicos. Un ejemplo de estos efectos son los analizados por Nunes & Nearing en el 2011 en su estudio “modelización de los impactos del cambio climático: estudios de caso utilizando la nueva generación de modelos de erosión”, el cual determina que una disminución de las precipitaciones puede causar menos erosión, pero a su vez puede reducir la cubierta vegetal que favorecería a la misma, otra singularidad es la conocida como “la paradoja de Sahel” que describe Choukri et al. (2020), que alude al hecho de que en el Sahel (zona ecoclimática, norte del continente africano) se produjo un aumento de las

aguas superficiales a pesar de una disminución general de las precipitaciones en las últimas décadas, lo que puede ampliar los desafíos para la modelización.

Debido a la complejidad y la alta no linealidad de los fenómenos de erosión y los eventos de escorrentía superficial en condiciones climáticas cambiantes, la forma más habitual para evaluar los efectos del cambio climático en los ciclos del agua y los sedimentos es mediante modelos determinísticos distribuidos en el espacio que pueden explicar mejor los cambios en la redistribución de sedimentos y en la modificación de las zonas de erosión y deposición debido a cambios en el uso de suelo (Francés & Bussi, 2014). Pero uno de los principales problemas para la aplicación de estos modelos matemáticos es la escasa disponibilidad de observaciones continuas del flujo de sedimentos que permitan una correcta calibración y validación de los parámetros del modelo (Francés & Bussi, 2014).

Los modelos hidrológicos distribuidos como se menciona cumplen un papel muy importante en la estimación de sedimentos, pues permiten la simulación de los procesos erosivos teniendo en cuenta múltiples factores como, la precipitación, el relieve del terreno, los tipos de suelo y la cobertura de los mismos, a su vez los modelos también brindan información sobre el traslado de los sedimentos a través de la red de drenaje considerando otros factores como la velocidad del agua contemplando obras civiles presentes en la zona de estudio como embalses o canales, lo que facilita hábilmente la evaluación de los efectos en el cambio del uso y cobertura del suelo, la deforestación y los cambios en el clima como el aumento de las precipitaciones que afectan la producción y transporte de los sedimentos, sin embargo se enfrentan a numerosas dificultades como la disponibilidad de datos, la complejidad de la cuenca y las condiciones climáticas alteradas por el cambio climático sin mencionar las actividades antrópicas que acentúan no solo la crisis ambiental sino que aceleran la pérdida de los suelos. Los modelos empleados en algunos de los estudios revisados reflejan que la dinámica de los sedimentos es altamente sensible al cambio climático.

8 Revisión de los análisis del ciclo de sedimentos en Colombia mediante la modelación hidrológica

Los avances en cuanto a la caracterización y análisis del ciclo de sedimentos aplicando la modelación hidrológica en el territorio nacional mediante investigaciones, se ha encontrado que se desarrollan principalmente por universidades en ejercicios académicos. Estudios elaborados para analizar la variabilidad espacial y temporal de la producción de sedimentos, que permitan conocer los efectos y las tasas en la producción de sedimentos en cuencas colombianas.

La universidad nacional bajo su programa de Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos ha producido estudios de tesis como requisitos de grado para sus estudiantes, un ejemplo de estos, es la investigación: "*Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta: caso de estudio Cuenca del río Grande Antioquia*". El objetivo del estudio se centró en replicar el ciclo de sedimentos en la cuenca del río Grande con escasa información, se analizó el río desde su afloramiento hasta su confluencia con la cuenca del embalse del río Grande II departamento de Antioquia, que tuvo su función como estación de control por medio de los volúmenes de sedimentación, de manera que resulta en un método indirecto para su aplicación. Fue implementado el modelo hidrológico distribuido SHIA-SED permitiendo realizar la estructuración de la cuenca a través del análisis espaciotemporal, dando como resultado poder caracterizar el ciclo de sedimentos y su producción en la cuenca del río Grande. El modelo distribuido en el componente hidrológico es calibrado y validado satisfactoriamente mediante estaciones de caudal en el área de estudio, mientras que para la validación para el componente sedimentológico implementaron los registros de volúmenes de sedimentos a escala inter-anual en el embalse del río Grande II. La información base para el desarrollo del modelo se consigue a través de información local disponible, los parámetros de caracterización de la cuenca a través de distintas entidades públicas, así como la información climatológica, sin embargo, se resalta que la información

sedimentológica es escasa, pues esta se realiza más que todo para cuencas aún experimentales. Los resultados muestran a satisfacción la validación y calibración para la simulación de los valores de caudal en la cuenca bajo el periodo de análisis aplicado (2001-2010), similarmente, la simulación para el componente sedimentológico arrojó valores satisfactorios en los años donde se contaba con registro de los volúmenes de sedimentos producidos en el embalse. El ciclo hidrológico y de sedimentos reproducido mediante el modelo hidrológico distribuido detalla que corresponde a la climatología principalmente, siendo un comportamiento bimodal, que los mayores episodios de producción de sedimentos en la cuenca obedecen a los eventos de lluvias en temporadas húmedas, que en condiciones bajas o normales los sedimentos no son un gran factor en el sistema natural de la cuenca. El estudio concluye que, si bien se realiza el intento de simular la producción de sedimentos, la incertidumbre de los resultados puede ser alta, debido a la escasa información hidrológica para replicar las condiciones de la cuenca y la inexistencia de mediciones de los caudales sólidos que permitan caracterizar apropiadamente los ciclos asociados, por lo que en el futuro se espera contar con nuevos y mejores sistemas de medición que permitan optimizar el trabajo realizado (Osorio, 2016).

El trabajo desarrollado por Ocampo & Ramirez (2013) como requisito parcial para optar por el título de la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad del Tolima, consistió en aplicar el modelo hidrológico distribuido SWAT en la cuenca del río Coello (departamento del Tolima) con el objetivo de analizar y estimar la producción de sedimentos bajo escenarios de cambio climático, integrando los Modelos Atmosféricos de Circulación General MCG y Modelos de Circulación Regional MCR que se analizan a partir de la emisión de los Gases de Efecto Invernadero GEI, de esta manera, se estudió el periodo de referencia con los análisis reales de la cuenca entre los años 1988 – 2007 y escenario proyectado para el periodo comprendido entre los años 2011-2030. En la aplicación del modelo SWAT se requirió información morfológica y climática de la cuenca, logrando precisar las Unidades de Respuesta

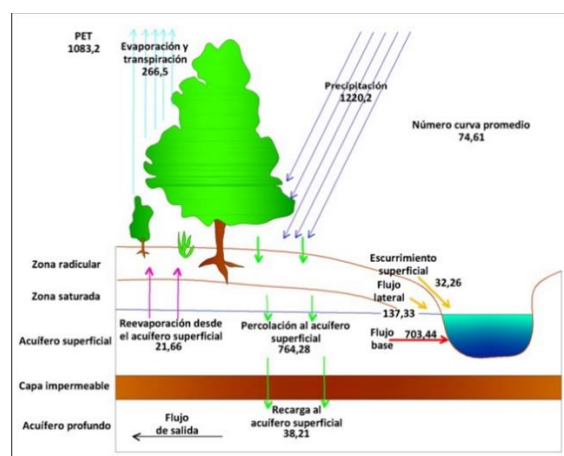
Hidrológica URH, que se definen a partir de la homogeneidad físicas de subáreas existentes. La cuenca del río Coello es una cuenca relativamente poco monitoreada, aun así, para el análisis de caudal fue posible obtener series históricas, mientras que, para los análisis correspondientes a la producción de sedimentos no fue factible obtener valores medidos dentro del tiempo del análisis realizado. En los resultados del análisis del cambio climático se presentó que, para el escenario planteado en el futuro, en comparación con el de referencia, se alcanzó una disminución en la precipitación media en los meses de enero, abril, junio, agosto y diciembre e incremento en los demás meses. Para la temperatura se encontró aumentos de 0.6 °C hasta 2.7°C en los meses de febrero, marzo y agosto en comparación del escenario de referencia, mientras que se evidencia disminución de 0.1 °C hasta 0.9 °C en los demás meses. Los resultados para el análisis en la producción de sedimentos a partir de la modelación hidrológica en el río Coello, estableció que los meses de mayor producción fueron octubre y noviembre para el periodo de referencia, además, con los resultados fue posible construir las curvas de permanencia de sedimentos en diferentes escalas temporales. Finalmente, en el análisis de la influencia de los efectos del cambio climático en la producción de sedimentos en la cuenca del río Coello por medio del modelo SWAT, indicados con base en el periodo de referencia, el mes más bajo de producción de sedimentos (agosto) tendrá una reducción aproximada de 6067%, mientras que el valor mensual que más se incrementaría (julio) sería de hasta el 19.51%. En cuanto a las áreas de producción de sedimentos, los resultados de ambos escenarios (referencia y proyectado) presentan igualdad en las subcuencas de mayor producción, siendo la parte media y la cabeza del afluente río Combeima las más afectadas debido a las prácticas agrícolas y las coberturas y uso del suelo principalmente.

La investigación desarrollada por Delgado (2019) consistió en implementar el modelo hidrológico SWAT para simular el balance hídrico y de sedimentos en el distrito de drenaje del Valle de Sibundoy, en un intento por conocer las condiciones actuales y analizar los efectos bajo escenarios de cambio climático. Debido a las condiciones propias del distrito de drenaje del

Valle Sibundoy, donde se evidencian fuertes procesos erosivos debido a las condiciones de pendientes fuertes, conflictos por uso del suelo y en algunas zonas se coincide en la zona de fallamiento que se presenta en el área, consiste en un escenario de interés para el análisis en la caracterización del recurso hídrico y su influencia con la producción de sedimentos. Si bien el estudio desarrollado implementa el modelo hidrológico SWAT que permite aplicar análisis de manera distribuido, se aplicó las Unidades de Respuesta Hidrológica URH, que consiste en agrupar la cuenca en menores áreas homogéneas para el análisis de manera semi distribuida. El método aplicado consistió en estructurar el modelo SWAT con sus requerimientos, que obedecen a la base física de los ciclos existentes en la cuenca hidrográficas (**Figura 10**), de esta manera, se requirió información climática, cartográfica y datos observados de las variables (caudal, sedimentos) para la calibración y validación del modelo. El modelo SWAT en su conceptualización física para el análisis hidrológico aplica el balance hídrico donde estima las entradas, retenciones y salidas del sistema, mientras que, para el análisis de los sedimentos se aplica la Ecuación Modificada de la Pérdida de Suelo MUSLE.

Figura 10

Esquema físico del balance hídrico aplicado en el distrito del Valle de Sibundoy modelo hidrológico SWAT.



Nota: Representación del proceso del balance hídrico aplicado en el estudio hidrológico del Valle de Sibundoy mediante el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Delgado, 2019).

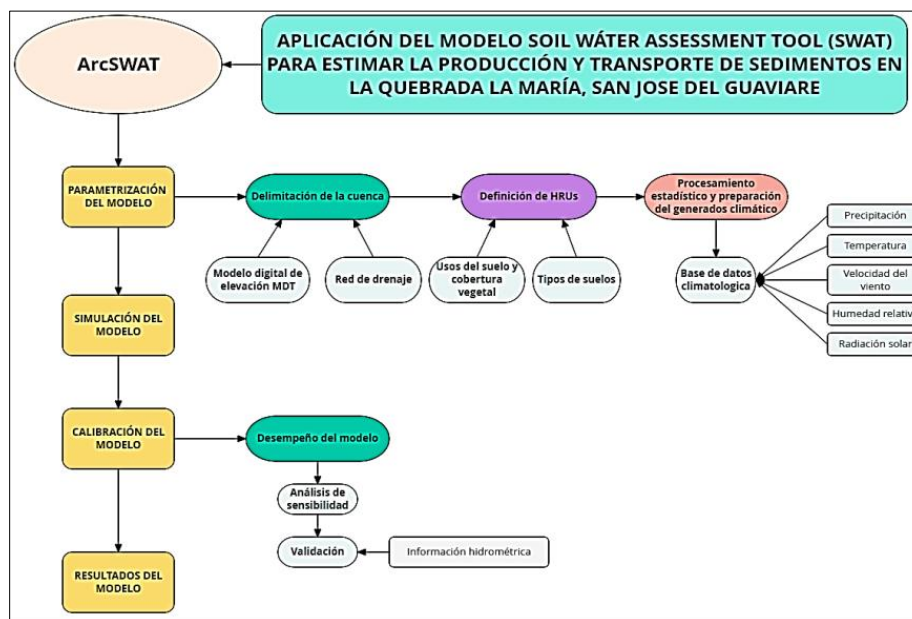
Delgado (2019) implementó tres escenarios para la simulación, el primero consiste en las condiciones actuales sin presentar alteraciones, los escenarios B1 y A2 que presenta la proyección en el futuro para el año 2046 con el cambio en los usos del suelo y las tendencias antrópicas como la expansión de la frontera agrícola, ampliación de los tejidos urbanos y el incremento de la deforestación; en el primer escenario se consideran condiciones positivas mientras que en el segundo condiciones negativas. El modelo una vez configurado, fue calibrado y validado mediante la aplicación del coeficiente de Nash-Sutcliffe con un resultado de 0.76, lo que se cataloga como bueno. Los resultados encontrados en el estudio son un intento por aplicar técnicas y métodos en la cuenca de estudios, que permita gestionar de manera eficiente los recursos de la cuenca, a partir de las condiciones actuales y proyectadas. Mediante la modelación de SWAT Se determinó que la cuenca produce una oferta hídrica aproximada de 32.26 m³/s (caudal promedio mensual). Frente a los análisis de los sedimentos los resultados obtenidos para las condiciones actuales son de una producción anual de 1.18 T/ha/a, para el escenario B1 arroja 3.13 T/ha/a y para el escenario A2 5.78 T/ha/a, lo que configura escenarios de reducción de capacidad hidráulica de los canales que favorece la ocurrencia de las inundaciones. La recomendación del estudio es mejorar las prácticas actuales en el manejo y uso del suelo, debido a que si se continúan pueden resultar en un incremento en la producción de sedimentos de hasta el 200% en el área de drenaje del distrito del Valle de Sibundoy (Delgado, 2019).

Otro estudio que implementó el modelo Soil Water Assessment Tool SWAT fue el llevado a cabo por Acosta Sanchez (2017) para optar por el título del programa de pregrado de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Pamplona. El objetivo del estudio consistió en estimar el ciclo de sedimentos en la microcuenca de la quebrada La María ubicada en el municipio de San José del Guaviare, permitiendo establecer las mayores zonas de producción, transporte y deposición de los sedimentos generados, producto de la actividad llevada a cabo en la cuenca de estudio, como las malas prácticas agrícolas y la deforestación para la expansión de la

frontera agrícola. Se estimuló el desarrollo del estudio bajo la necesidad de analizar los factores que dominan los ciclos en la microcuenca La María debido a que no se cuenta con estudios en ella, por consiguiente, los retos se enfocaron en el nivel de información disponible debido al bajo o nulo monitoreo, donde no fue posible obtener datos hidroclimáticos debido a la carencia de estaciones en la microcuenca. Bajo lo anterior, se implementó información climatológica de zonas aferentes, pero para la información respecto a las variables de caudal y nivel no fue posible aplicarlas en la investigación. Se realizaron muestreos en el marco del proyecto a lo largo de una semana, con el objetivo de aforar en distintos puntos de interés de la microcuenca, así como su nivel y muestras de sedimentos obtenidas a partir de muestreadores de sedimentos tipo Trampa Bunte diseñados y elaborados por fuente propia. La investigación que requirió trabajo de campo corresponde a la información del suelo, obtenido a partir de la cartografía del departamento del Guaviare en escala 1:50.000 complementada con trabajo y muestreo de campo en la microcuenca, el resto de información se obtuvo mediante el modelo de elevación y cartografía disponible. El proceso de desarrollo del análisis de la estimación de sedimentos de la quebrada la María se logra observar en la Figura 11.

Figura 11

Metodología implementada para la estimación de producción de sedimentos en la quebrada La María mediante el modelo hidrológico SWAT.



Nota: Metodología aplicada para la producción de sedimentos en la quebrada La María mediante el modelo hidrológico SWAT. Fuente: (Acosta Sanchez, 2017).

El análisis de la microcuenca La María aplicando el modelo hidrológico SWAT por (Acosta Sanchez, 2017) les permitió comparar los escenarios de coberturas para los años 2002 y 2017 en la producción de caudal y sedimentos, asociando las principales razones por las que se contribuye al fenómeno. Se obtuvo que factores propios de la cuenca como la geología, climatología, morfometría, coberturas, hidrología, suelos, y de carácter antrópicos como los usos del suelo afectan en gran medida la producción de sedimentos. El modelo hidrológico SWAT permitió analizar la cuenca de la quebrada La María de manera espacial, permitiendo identificar las zonas de producción, transporte y deposición de los sedimentos generados, donde se observa la correlación espacial entre coberturas y usos del suelo siendo factores influyentes.

Entre los estudios de trabajo de grado de monografía para optar por títulos de pregrado se encuentran los estudios desarrollados por Navas (2014) y Pinzón (2019), ambos son el desarrollo de la representación de tránsito de flujo de sedimentos a través de la aplicación del modelo hidráulico HEC-RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Si bien no son estudios que desarrolla la producción y estimación de sedimentos mediante la modelación distribuida de cuencas, emplean estimaciones de producción de sedimentos mediante la aplicación de ecuaciones empíricas desarrolladas con base en información particular de las propiedades de sedimentos medidos en las áreas de cada estudio. La finalidad de los estudios de transporte de sedimentos es importante para el análisis de tramos de interés en cualquier corriente determinada, por lo que su aplicación integrada con modelos hidrológico-distribuidos para la estimación de la producción de sedimentos de manera que se caracterice la cuenca permitirá obtener resultados con mayor precisión y acordes a las realidades, logrando establecer los sectores donde se presentan socavación y erosión.

El ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – Minambiente en el marco de la *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia* y dada la importancia de los sedimentos en las cuencas hidrográficas, publica el documento denominado “*Lineamientos generales para el Manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico*” en el año 2022. El documento representa una guía para el manejo de manera general y a grandes rasgos en el ciclo de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica para el territorio nacional, constituyéndose como una referencia fundamental para la gestión de sedimentos en cuencas que requieren aplicar estudios, proyectos, manejo, directrices y/o actividades relacionadas con la producción de sedimentos en las cuencas prioritarias y con grandes proyectos hidráulicas en ellas. Los lineamientos para el manejo de sedimentos publicado por Minambiente (2022) resulta el primer esfuerzo para unificar términos referentes al manejo, seguimiento, caracterización y monitoreo de sedimentos en las cuencas del territorio nacional, entregando los sustentos normativos y políticas para la

gestión de los sedimentos, permitiendo ser articulado con los diferentes instrumentos de planificación ambiental disponibles (Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCA, Plan de Ordenación de Recurso Hídrico PORH y acotamiento de Rondas Hídricas), que contiene indicaciones mínimas para todo el público en relación con la gestión del recurso hídrico, especialmente las autoridades ambientales competentes. El documento presenta una propuesta metodológica que establece los procesos a llevar a cabo para la gestión de los sedimentos encabezada por las autoridades ambientales y entidades de desarrollo sostenible, quienes se encargaran de realizar el alistamiento institucional inicialmente a partir de la información disponible y recolección de información secundaria (Fase 0: conocimiento), permitiendo identificar las cuencas hidrográficas prioritarias encabezadas para desarrollar y definir las diferentes estrategias de manejo (Fase I: Caracterización, Fase II: Evaluación y selección de alternativas, Fase III: Implementación de estrategias de manejo; Fase IV: Evaluación y seguimiento, Fase V: Formulación de acciones de mejora). En la Fase I: Caracterización de los lineamientos para las estrategias de manejo propuestas por Minambiente se presentan las técnicas robustas para el conocimiento, monitoreo y caracterización del ciclo de sedimentos e información fundamental para el análisis de la producción.

Se menciona de manera general sin profundizar las técnicas sugeridas para la caracterización de la producción de sedimentos, del sistema fluvial y de las intervenciones y presiones antrópicas en las cuencas hidrográficas, procesos fundamentales que intervienen directamente en los ciclos de los sedimentos. Se establece la modelación y caracterización hidrológica y del régimen de sedimentos como herramientas fundamentales para el conocimiento de manera integral de la cuenca en la producción de caudales sólidos y líquido, permitiendo identificar las zonas de mayor producción y deposición de sedimentos a través de las cuencas y sistemas fluviales, para lo cual es indispensable contar con información primaria y robusta para aplicar las metodologías que permitan generar conocimiento y así definir estrategias fuertes en la gestión de los ciclo de sedimentos. Se sugiere que debido a la escasa

información, en algunos casos la nula instrumentación de las cuencas hidrográficas colombianas, se deben generar proyectos de campañas para monitorear periódicamente los sedimentos en las corrientes principales de las cuencas, especialmente en las de mayor interés previamente identificadas por los actores. De esta manera y de manera general, el documento promulgado por Minambiente (2022) por es un esfuerzo por generar los primeros impulsos normativos y técnicos de manera sistemática a nivel nacional, para poder caracterizar los ciclos de sedimentos en las cuencas hidrográficas colombianas encabezadas por las entidades delegadas por el gobierno nacional para tal fin, implementando en el proceso los modelos hidrológico con análisis sedimentológicos, constituyendo en herramientas indispensables para la gestión y conocimiento de los diferentes procesos dinámicos en los sistemas fluviales.

En la normativa del territorio nacional relacionada con los sedimentos en las cuencas hidrográficas se sujeta de la siguiente manera:

Inicialmente la Constitución Política de la República de Colombia de 1991 consagra en su 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 (...).”*, y 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”* (Constitución política de Colombia, 1991).

En el Decreto Ley 2811 de 1974 *“Por la cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”* los sedimentos son mencionados como agente que puede lograr afectar al recurso hídrico, estipulado en el artículo 8 *“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”.

Asimismo, en el presente Decreto Ley 2811 en su artículo 314 consagra 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*” (Decreto 2811 “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”, 1974).

En el Decreto 1076 de 2015 “*Por medio de la cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*” en su artículo 2.2.3.2.24.1 que “*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 (...)*” (Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

9 Conclusiones

- La aplicación de modelos hidrológicos distribuidos para emular la hidrología y los sedimentos en las cuencas hidrográficas es beneficioso debido a su base física que permite obtener resultados eficientes, sin embargo, la exigencia de buena información depende fundamentalmente del éxito de la emulación debido a que requiere información temporal y espacial histórica, para obtener una calibración y validación lo cual es complejo debido a las numerosas variables y parámetros implicadas.
- No todos los modelos hidrológicos incorporan análisis de sedimentos, sin embargo, algunos de los más importantes incorporados en diversas investigaciones presentan el módulo sedimentológico para los análisis de producción de sedimentos. Se requiere inicialmente esquematizar, parametrizar, analizar y validar hidrológicamente el modelo, y así, se permite aplicar los análisis mediante el módulo sedimentológico.
 - Los resultados obtenidos a través de la simulación bajo diversos escenarios del cambio climático en la dinámica de sedimentos en las cuencas estudiadas por los diferentes autores revela que las alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura principalmente producen modificaciones importantes en los procesos hidrológicos que controlan no solo la producción sino también el transporte de sedimentos, algunas de estas alteraciones se manifiestan según los estudios en una tendencia decreciente significativa en la carga de los sedimentos fluviales en al menos el 50% de los ríos a nivel mundial y exacerbación de los procesos erosivos por lluvias intensas y pérdida de la cobertura vegetal, también se ha visto reflejado en alteraciones en el caudal de los ríos afectando el transporte de los sedimentos, asimismo se ha logrado identificar que los dos factores más importantes que contribuyen a los cambios

en la descarga de agua y sedimentos en muchas regiones del mundo son la interacción entre el cambio climático y el cambio de uso y la cobertura de los suelos. La modelación hidrológica distribuida demuestra que es una herramienta valiosa para comprender la complejidad de estos efectos, siendo un mecanismo importante para la implementación y adecuación de estrategias de gestión integrada de cuencas. Esta revisión bibliográfica reconoce la necesidad de incorporar los posibles escenarios del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos y la sedimentación en cuencas hidrográficas, reduciendo su vulnerabilidad y garantizando su sostenibilidad, sin embargo, hay un largo camino por recorrer pues las investigaciones sobre el impacto del cambio climático en el ciclo de los sedimentos no ha sido estudiado en la misma medida que sobre su impacto en el ciclo hidrológico aun cuando el uno se ven fuertemente impactado por el otro.

- Colombia como nación en vía de desarrollo implican mejorar e incrementar las investigaciones el análisis de las cuencas hidrográficas, especialmente el ciclo de sedimentos que define su producción, transporte y depositación para la toma de decisiones, debido a que actualmente no se han desarrollado investigaciones recientes de manera robusta por medio de la modelación hidrológica. A nivel normativo, se cuenta con la guía de prácticas para el análisis y monitoreo de los sedimentos en las cuencas hidrográficas colombianas publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible recientemente, lo que establece como precedente o punto de inicio para establecer lineamientos sistemáticos para los análisis de los rendimientos de sedimentos y sus consecuencias ante la influencia del cambio climático.

10 Referencias

- Acosta Sanchez, R. T. (2017). *Aplicación del modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) para estimar la producción y transporte de sedimentos en la quebrada La María, San Jose del Guaviare* [Universidad de Pamplona].
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5757/1/Acosta_2018_TG.pdf
- Alatorre, L. C., & Beguería, S. (2009). LOS MODELOS DE EROSIÓN: UNA REVISIÓN. *C&G*, 29–48.
- Barman, S., Singh, W. R., Tyagi, J., & Sharma, S. K. (2024). A hybrid SWAT-ANN model approach for analysis of climate change impacts on sediment yield in an Eastern Himalayan sub-watershed of Brahmaputra. *Journal of Environmental Management*, 365.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121538>
- Benavides, H., & León, G. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*.
- Brendel, C., Capell, R., & Bartosova, A. (2024). Rational gaze: Presenting the open-source HYPEtools R package for analysis, visualization, and interpretation of hydrological models and datasets. *Environmental Modelling and Software*, 178.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106094>
- Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos*.
- Cenobio-Cruz, O., Quintana-Seguí, P., Barella-Ortiz, A., Zabaleta, A., Garrote, L., Clavera-Gispert, R., Habets, F., & Beguería, S. (2023). Improvement of low flows simulation in the SASER hydrological modeling chain. *Journal of Hydrology X*, 18.
<https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100147>
- Chiang, L. C., Shih, P. C., Lu, C. M., & Jhong, B. C. (2023). Strategies analysis for improving SWAT model accuracy and representativeness of calibrated parameters in sediment simulation for various land use and climate conditions. *Journal of Hydrology*, 626.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130124>

Choukri, F., Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunes, J. P., Huard, F., Hérivaux, C., Sabir, M., & Pépin, Y. (2020). Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 141–153.

<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.003>

Constitución política de Colombia (1991).

CORPORBOYACÁ, C. A. R. de B. (2022). *Oferta Hídrica*.

<http://gobiernoagua.corpoboyaca.gov.co:2157/oferta/#:~:text=La%20oferta%20h%C3%ADdrica%20est%C3%A1%20asociada,estados%20en%20la%20esfera%20terrestre>.

Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015).

Decreto 1729 de 2002 Departamento Administrativo de la función pública, Departamento Administrativo de la Función Pública (2002).

Decreto 2811 “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”. (1974).

Delgado, M. (2019). Evaluación de la generación de sedimentos en el distrito de drenaje del Valle de Sibundoy, departamento del Putumayo Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 23(44).

<https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd23-44.egsd>

Deng, C., Zhang, H., & Hamilton, D. P. (2024). Sensitivity of streamflow and nutrient loads to changes in leaf area index and soil organic carbon in a sub-tropical catchment subject to climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101682>

Dyer, K. R. (1995). Sediment transport processes in estuaries. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*, 53.

Ergün, E., & Demirel, M. C. (2023). On the use of distributed hydrologic model for filling large

- gaps at different parts of the streamflow data. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101321>
- Francés, F., & Bussi, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *RIBAGUA*, 14–25.
- Gradiyanto, F., Parmantoro, P. N., & Suharyanto. (2024). Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia. *Water Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2024.03.005>
- Grum, B., Woldearegay, K., Hessel, R., Baartman, J. E. M., Abdulkadir, M., Yazew, E., Kessler, A., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM). *Catena*, 159, 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.018>
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2015, mayo 14). *Modelación Hidrológica*. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,representado%20por%20una%20expresi%C3%B3n%20anal%C3%ADtica>.
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2021, mayo 15). *Cambio climático*. [http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico#:~:text=Los%20gases%20de%20efecto%20invernadero%20\(GEI\)%20o%20gases%20de%20invernadero,la%20atm%C3%B3sfera%20y%20las%20nubes](http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico#:~:text=Los%20gases%20de%20efecto%20invernadero%20(GEI)%20o%20gases%20de%20invernadero,la%20atm%C3%B3sfera%20y%20las%20nubes).
- Instituto Geológico y Minero de España, O. A. P. N. (2018). *Parque Nacional de Monfragüe*. https://www.igme.es/librose/guiasgeo/monfrague_sp/4/index.html.
- IPCC. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva,

- Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan (eds.)). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jimeno-Sáez, P., Martínez-España, R., Casalí, J., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2022). A comparison of performance of SWAT and machine learning models for predicting sediment load in a forested Basin, Northern Spain. *Catena*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105953>
- Long, Y., Chen, W., Jiang, C., Huang, Z., Yan, S., & Wen, X. (2023). Improving streamflow simulation in Dongting Lake Basin by coupling hydrological and hydrodynamic models and considering water yields in data-scarce areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101420>
- Ma, D., Bai, Z., Xu, Y. P., Gu, H., & Gao, C. (2024). Assessing streamflow and sediment responses to future climate change over the Upper Mekong River Basin: A comparison between CMIP5 and CMIP6 models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101685>
- Martínez, P., & Patiño, C. (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México El cambio climático: Vol. III* (Número 1).
- Maruffi, L., Stucchi, L., Casale, F., & Bocchiola, D. (2022). Soil erosion and sediment transport under climate change for Mera River, in Italian Alps of Valchiavenna. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150651>
- Minambiente, M. de A. y D. S. (2022). *Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- Moragoda, N., & Cohen, S. (2020). Climate-induced trends in global riverine water discharge and suspended sediment dynamics in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103199>

- Navas, A. (2014). *Caracterización y modelación del transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Bogotá tramo-Chingacio-Puente Santander*.
- Nunes, J. P., & Nearing, M. A. (2011). *Modelling Impacts of Climatic Change: Case Studies using the New Generation of Erosion Models*.
- Ocampo, L., & Ramirez, L. (2013). *Determinación de la producción de sedimentos, bajo escenarios de cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Coello, departamento del Tolima*. <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/bc58581e-35d7-424b-ae16-a88ed0ab5ef7/content>
- Osorio, S. (2016). Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta. Cuenca del Río Grande, Antioquia. En *Universidad Nacional de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59050?show=full>
- Peng, S., Mihara, K., Xu, X., Kuramochi, K., Toma, Y., & Hatano, R. (2024). Modeling hydrological processes under Multi-Model projections of climate change in a cold region of Hokkaido, Japan. *Catena*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107605>
- Pinzón, T. (2019). *Modelación y simulación del arrastre y transporte de sedimentos en la cuenca media del río Caney, mediante HEC RAS, Municipio de Restrepo Meta*.
- Regasa, M. S., & Nones, M. (2024). Modeling best management practices to reduce future sediment yield in the Fincha watershed, Ethiopia. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.04.010>
- Shi, X., Zhang, F., Lu, X., Zhang, Y., Zheng, Y., Wang, G., Wang, L., Jagirani, M. D., Wang, T., & Piao, S. (2022). The response of the suspended sediment load of the headwaters of the Brahmaputra River to climate change: Quantitative attribution to the effects of hydrological, cryospheric and vegetation controls. *Global and Planetary Change*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103753>
- Surinaidu, L. (2022). Quantifying stream flows and groundwater response under the climate and land use change through integrated hydrological modelling in a South Indian River basin.

Water Security, 17. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100129>

Wannasin, C., Brauer, C. C., Uijlenhoet, R., van Verseveld, W. J., & Weerts, A. H. (2021). Daily flow simulation in Thailand Part I: Testing a distributed hydrological model with seamless parameter maps based on global data. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100794>

Zantet oybitet, M., Sambeto Bibi, T., & Abdulkerim Adem, E. (2023). Evaluation of best management practices to reduce sediment yield in the upper Gilo watershed, Baro akobo basin, Ethiopia using SWAT. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20326>

Zhang, H., Meng, C., Wang, Y., Wang, Y., & Li, M. (2020). Comprehensive evaluation of the effects of climate change and land use and land cover change variables on runoff and sediment discharge. *Science of the Total Environment*, 702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134401>

Zhang, L., Lai, Z., & Syvitski, J. (2023). Variation of material fluxes in a large heterogenic subtropical river: A combination of climate change and human damming influences. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101560>

Zhang, Y., & Post, D. (2018). How good are hydrological models for gap-filling streamflow data? *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4593–4604. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4593-2018>