



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis comparativo entre los criterios internacionales y los requerimientos para la descarga de sedimentos de embalses en Colombia

Jorge Andrés Arcila Posada, I.C.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2019

Análisis comparativo entre los criterios internacionales y los requerimientos para la descarga de sedimentos de embalses en Colombia

“Comparative analysis between international criteria and colombian requirements for reservoir flushing”.

Jorge Andrés Arcila Posada, I.C.

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Carlos Eduardo Cubillos Peña, I.C., M.Sc.

Línea de Investigación:

Hidráulica Fluvial

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2019

A mi papá, quién siempre me motivó a seguir adelante y me enseñó lo apasionante de la Ingeniería Civil.

“Ningún hombre puede ser llamado educado, si no tiene una buena voluntad, un deseo y una capacidad entrenada para hacer su parte en el trabajo del mundo”.

Robert Baden-Powell

Agradecimientos

A mi familia, quienes han sido el soporte y motivación para seguir adelante.

A mi director, por su disposición, tiempo dedicado, orientación desde su conocimiento y experiencia.

Al ingeniero Juan Diego Parra González y al presidente del Comité de sedimentación en Embalses de ICOLD, Martin Teal, por su disposición a atender mis inquietudes y aportar información importante para este trabajo.

Resumen

La pérdida de capacidad de almacenamiento en los embalses a causa de la sedimentación se ha convertido en una preocupación a nivel mundial, incluso en Colombia, por lo que se hace necesario implementar estrategias para la gestión de sedimentos con el fin de recuperar el volumen perdido y reestablecer el flujo de sedimentos aguas abajo de la presa. El flushing o descarga de fondo en los embalses es una de las estrategias con gran potencial de implementación por su facilidad de realización y economía respecto a otros métodos. Teniendo en cuenta los principales criterios y consideraciones hidrosedimentológicas para su ejecución en tres de los casos más representativos a nivel mundial (Génissiat – Francia, Dashidaira – Japón y Álamo – Estados Unidos de América), se realiza un análisis comparativo con los requerimientos por parte de la Autoridad Ambiental en Colombia presentados a los casos de Calderas (Antioquia) y Bajo Anchicayá (Valle del Cauca) en el marco del proceso de autorización de un protocolo para la descarga de fondo para cada uno de estos embalses.

Han sido identificados criterios y requerimientos relacionados con las concentraciones de sedimento máximas y los caudales pico generados durante la descarga, así como la necesidad de implementar esquemas de monitoreo para la evaluación de impactos producidos aguas abajo de la presa, generar protocolos para mitigación de impactos asociados al retiro de cuñas que pudiera generar el flushing y realizar tantas pruebas piloto como sean necesario para contar con la información suficiente que permita definir las condiciones de ejecución. Los criterios aplicados para cada uno de los casos considerados son diferentes según el propósito de la descarga, el tipo de flushing realizado y las condiciones de cada sitio, sin embargo, la realización del flushing durante un periodo de altos caudales afluentes al embalse es un criterio común para todos los casos. A través del estudio experimental deberán definirse los criterios para lograr las condiciones más adecuadas para su ejecución de tal manera que se mitiguen las posibles afectaciones a los ecosistemas aguas abajo de la presa. A pesar de que, a través del flushing no se logre una recuperación de la pérdida total del volumen del embalse a causa de la sedimentación,

puede producir aporte significativo a la gestión conjunta con diferentes estrategias para la gestión de sedimentos en embalses.

Palabras clave: flushing, descarga de fondo, gestión de sedimentos, embalse, Colombia

Abstract

The loss of volume in reservoirs due to sedimentation has become a concern for many countries, including Colombia. Therefore, it is necessary to implement sediment management strategies in order to recover the lost volume and restore sediment flow downstream the dam. Flushing in reservoirs is one strategy with great potential for implementation, compared with other methods, due to its easy execution and optimal value given its economic cost. Based on main hydrosedimentological considerations for flushing, a comparative analysis between three of the most representative cases worldwide (Génissiat - France, Dashidaira - Japan and Alamo - United States of America) and colombian cases of Calderas (Antioquia) and Bajo Anchicayá (Valle del Cauca) is presented. It is worth noting that the colombian cases were developed in the framework of the authorization process of a protocol for flushing, supervised by the Environmental Authority in Colombia.

In this study it has been identified criteria and requirements related to flushing, such as, maximum sediment concentrations, peak flows generated during the discharge, monitoring schemes performing impact evaluation downstream of the dam. Also, it has been stressed the importance of generating protocols in order to mitigate the impact of excess of sediment in the reach produced by flushing and performing as many pilot tests as necessary to have enough information to define the conditions of execution. The criteria applied and the values for each case are different depending on the purpose, the type of flushing performed and the conditions of each site. However, the execution of flushing during a period of high flows affluent to the reservoir is a commonality. In flushing, the experimental study is the best way to achieve the most appropriate conditions for execution, to define the possible effects on the ecosystems downstream the dam and to find ways to mitigate them. Although, using flushing to recover the total loss of the reservoir volume due to sediments

is not possible, it can produce a significant contribution when it is a part of a larger scheme of different strategies for sediment management in reservoirs.

Key words: flushing, bottom outlet, sediment management, reservoir, Colombia

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVI
Lista de abreviaturas	XVII
Introducción	1
1. Marco conceptual	5
1.1 Sedimentación en embalses	5
1.2 Gestión de sedimentos	10
1.3 Método de <i>flushing</i> o descarga de fondo	13
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. Metodología	23
4. Casos de flushing en el exterior	27
4.1.1 Presa Génissiat - Francia	27
4.1.2 Presa Dashidaira - Japón	32
4.1.3 Presa Álamo - Estados Unidos de América.....	34
5. Descargas de fondo en Colombia	41
5.1 Protocolos de descarga de fondo ejecutados	41
5.1.1 Central hidroeléctrica Calderas.....	42
5.1.2 Central hidroeléctrica Anchicayá	49
5.2 Requerimiento de la autoridad ambiental.....	54
6. Comparación de las consideraciones hidrosedimentológicas para la gestión de embalses en el exterior y en Colombia a través del flushing.	61
6.1 Propósito del flushing	61
6.2 Características del embalse	63
6.3 Características de la ejecución.....	67
6.4 Resultados y efectos de la descarga de fondo.....	72

7. Conclusiones y recomendaciones	75
7.1 Conclusiones.....	75
7.2 Recomendaciones.....	78
Bibliografía	81

Lista de figuras

	Pág.
Ilustración 1-1. Distribución granulométrica longitudinal típica de un embalse.	6
Ilustración 1-2. Clasificación de estrategias para la gestión de sedimentos.....	12
Ilustración 1-3. Flushing con vaciado total.....	14
Ilustración 1-4. Flushing con vaciado parcial.	15
Ilustración 1-5. Comportamiento hidráulico y de sedimentos durante la ejecución del flushing.....	16
Ilustración 1-6. Casos de flushing realizados en el mundo y su relación con capacidad y caudales anuales.	17
Ilustración 3-1. Esquema metodológico.....	25
Ilustración 4-1. Hidrograma esperado en la descarga de marzo de 2018 en Álamo.....	36
Ilustración 5-1. Resultados de los dos modelos implementados para estimar las concentraciones en la descarga de fondo del embalse Calderas.	45
Ilustración 5-2. Evolución del volumen del embalse Calderas estimado por medio de batimetrías.	45
Ilustración 5-3. Comparación entre los sólidos sedimentables modelados antes de la descarga, con el modelo ajustado al caudal real y los observados durante la prueba.....	46
Ilustración 5-4. Cantidad de descargas de fondo realizadas por año en el embalse de Anchicayá.	51
Ilustración 6-1. Características de diferentes casos de aplicación del flushing a nivel mundial.	65
Ilustración 6-2. Evaluación de la potencialidad del flushing como método de gestión de sedimentos.....	66
Ilustración 6-3. Hidrograma de descarga de fondo en Central Calderas.....	68

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 6-1. Características geométricas de los embalses considerados.....	63

Lista de abreviaturas

Abreviatura Término

ACOLGEN	Asociación Colombiana de Generadores de Energía, Colombia.
ACWI	Federal Advisory Committee on Water Information, Estados Unidos.
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Colombia.
CNO	Consejo Nacional de Operación, Colombia.
CNR	<i>Compagnie Nationale du Rhone</i> , Francia.
CTA	Centro de Tecnología de Antioquia, Colombia.
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Colombia.
CWA	<i>Clean Water Act</i> , Estados Unidos.
DA	<i>Department of Army</i> , Estados Unidos.
EIA	Estudio de Impacto Ambiental.
ENA	Estudio Nacional del Agua.
EPA	Environmental Protection Agency, Estados Unidos.
EPSA	Empresa de Energía del Pacífico.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.
IHA	International Hydropower Association, Reino Unido.
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.
MMA	Ministerio del Medio Ambiente, Colombia.
NPDES	National Pollutant Discharge Elimination System, Estados Unidos.
NWF	National Wildlife Federation, Estados Unidos.
PMA	Plan de Manejo Ambiental.
RHA	Rivers and Harbors Act, Estados Unidos.
SOS	Subcommittee on Sedimentation, Estados Unidos.
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética, Colombia.
USACE	U.S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos.
USBR	U.S. Bureau of Reclamation, Estados Unidos

Introducción

La disponibilidad del recurso hídrico en muchos casos es limitada por la ubicación geográfica o incluso por la variabilidad del ciclo hidrológico en determinadas zonas. Considerando que el agua es el eje de desarrollo de las comunidades humanas, la sociedad se ha enfocado en aprovechar sus servicios ecosistémicos para diferentes fines como: abastecimiento, regulación, generación hidroeléctrica y hasta recreación. Aprovechar estos servicios ecosistémicos requiere disponibilidad del agua, por lo general en grandes volúmenes, por lo que se hace necesario realizar obras de contención, como presas, que permitan almacenarla en determinado sector.

Colombia es reconocida por ser uno de los países con mayor disponibilidad del recurso hídrico; según el Estudio Nacional del Agua (ENA) realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Colombia cuenta con un caudal promedio de 63.789 m³/s (IDEAM, 2015). Por sus las altas pendientes y encañonamientos de los ríos, la geografía colombiana ha permitido que, en el sector de la cordillera de los Andes sea viable realizar proyectos de embalsamiento de agua. Para el 2014, Colombia contaba con una capacidad de almacenamiento aproximada de 16.455 millones de metros cúbicos, cuya mayor proporción (36%) se encontraba almacenada en la macro-cuenca Magdalena-Cauca (IDEAM, 2015), zona ubicada entre las tres cordilleras que conforman los Andes.

Con miras a aprovechar este recurso disponible y teniendo en cuenta la necesidad energética del país para su crecimiento, gran parte de los proyectos se han enfocado en la generación hidroeléctrica como principal función del complejo presa-embalse. Es así como para diciembre del 2017, según la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, el 70% de la capacidad instalada en Colombia para la generación de energía, proviene del agua. Esto corresponde a un volumen de almacenamiento promedio de 10.115 millones de metros cúbicos para la generación hidroeléctrica (UPME, 2018), representado el 62% de agua total almacenada en el país.

A pesar de la importancia económica y proyección de desarrollo que otorga a nivel nacional un proyecto hidroeléctrico, no hay que dejar de lado la afectación que produce en el cauce del río, en los ecosistemas y en las comunidades, por el impacto ambiental y social que genera. La construcción de estructuras de retención de flujo, como presas, permiten almacenar grandes volúmenes de agua, sin embargo, representan una barrera para el flujo de sedimentos y nutrientes, que no pueden continuar con su curso aguas abajo hacia las desembocaduras de los ríos en el mar.

En el estudio hidrosedimentológico, los embalses representan una trampa de sedimentos en donde, debido a la reducción de la velocidad del flujo, se pierde su capacidad de transporte, generando la depositación de los mismos en el fondo del embalse (Morris y Fan, 1998). Estos sedimentos se van acumulando año tras años causando que la capacidad de almacenamiento de agua disminuya y produciendo una reducción de la carga hidráulica necesaria para la generación de energía proyectada, paso de sedimento a través de las estructuras de captación, e incluso en largo plazo, la colmatación total del mismo. La sedimentación y volumen de sedimentos retenido dependerá de la carga de sedimentos que los ríos afluentes aporten al embalse, que a su vez dependerán de la erosión producida en las respectivas cuencas. Factores como el potencial erosivo de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía, el uso del suelo, sus coberturas vegetales y las prácticas de conservación del suelo, determinarán la cantidad de erosión producida y por tanto la producción de sedimentos.

En Colombia, la producción de sedimentos se origina principalmente en las zonas de alta pendiente, es decir, las cordilleras. Los movimientos en masa, pero sobre todo la erosión hídrica (producida por la lluvia), representan las mayores fuentes de erosión en estas zonas, cuyos rendimientos de producción de sedimentos pueden estar por encima de las 2.0 kTon/año/km² (IDEAM, 2015). Buena parte de este volumen de sedimento puede quedar atrapado en los embalses y no continúa con su curso natural en el río, afectando el régimen de sedimentos aguas abajo de la presa.

La pérdida progresiva de volumen útil de almacenamiento de agua se ha convertido en un tema de principal interés para los operadores energéticos y de embalses, quienes requieren mantener las capacidades iniciales del embalse para conservar la producción de energía. Esta preocupación no se ve únicamente reflejada en Colombia, sino a nivel

mundial, donde día a día se buscan y evalúan estrategias que permitan conservar los volúmenes de los embalses, a la vez que se adoptan criterios para reestablecer procesos naturales interrumpidos, como el flujo de sedimentos a lo largo del río.

Con base en lo anterior, el esquema de operación de los embalses no debe limitarse únicamente a la producción de energía sino enfocarse en realizar una operación que se proyecte en el largo plazo, buscando alternativas que permitan la correcta gestión de sedimentos, de tal forma que no se afecte la capacidad del embalse y se mitiguen los efectos negativos en el ambiente y los ecosistemas. A pesar de que Colombia cuenta con una gran disponibilidad de recurso hídrico y basa su producción energética en la hidroenergía, los conocimientos respecto a sedimentos en los embalses y su gestión no son muy amplios ni aplicados. Países como Francia, Japón, Estados Unidos, entre otros, se han encargado de estudiar su comportamiento más detalladamente (Chaudhry y Habib-Ur-Rehman, 2012). Se han propuesto diferentes alternativas para la gestión de sedimentos como reducir la generación de sedimentos en la cuenca, la extracción mecánica por dragado, el bombeo de los sedimentos, la construcción de by-passes para alejar los sedimentos del embalse durante las crecientes, descarga de fondo, entre otros (Morris y Fan, 1998). El “*flushing*” o descarga de fondo, generado principal interés como alternativa de retiro y gestión de sedimentos por su facilidad de operación y economía respecto a otras estrategias. Teniendo en cuenta el potencial del método y que en muchos casos surge como primera opción, este trabajo se centrará en el estudio de sus consideraciones y criterios hidrosedimentológicos más relevantes para esta estrategia.

La descarga de fondo o *flushing*, consiste en la apertura de la compuerta de los conductos ubicados en el fondo de la presa para que los sedimentos depositados sean evacuados a través del caudal descargado por la carga hidrostática en el embalse. La descarga de fondo representa un procedimiento económico respecto a otros, ya que, el agua almacenada y el caudal de los ríos afluentes al embalse, son los encargados de lavar y extraer los sedimentos atrapados en el embalse (Morris y Fan, 1998), sin que se requiriera un gasto de energía adicional. Sin embargo, esta técnica ha sido fuertemente cuestionada a nivel ambiental por afectaciones que pueden llegar a producirse aguas abajo del embalse por las altas concentraciones de sedimento en el flujo una vez se realiza la apertura de la compuerta y su difícil control durante el proceso de vaciado y descarga.

Esta estrategia de gestión de sedimentos ha sido estudiada y ejecutada en algunos países, donde se ha logrado documentar su funcionamiento y los principales criterios para tener en cuenta al momento de realizar una descarga de este tipo. En Colombia, se han realizado estudios por parte de las empresas operadoras de embalses con el fin de presentarlos a las autoridades ambientales colombianas como sustento a los procedimientos que les permitan realizar descargas de fondo para mantenimientos, remoción de sedimentos, entre otros (ANLA, 2017). Sin embargo, no se cuenta con una política de regulación de manejo de sedimentos en embalses que permita establecer si los estudios presentados cumplen con los requerimientos suficientes para viabilizar la ejecución, por lo que se deben buscar criterios y consideraciones que permitan evaluar de manera objetiva los protocolos. Para esto, entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) han comenzado a trabajar en una propuesta de lineamientos para el manejo sostenible de sedimentos en embalses para Colombia (Parra González, 2017).

Teniendo en cuenta la importancia de los embalses para el país surge la necesidad de establecer los requerimientos para el retiro y la gestión de sedimentos, ejecutando alternativas de lavado como la descarga de fondo. Evaluando las consideraciones y aplicando los correctos criterios hidrosedimentológicos se podrá garantizar la sostenibilidad operacional de los embalses y la correcta disposición de los sedimentos mitigando los impactos negativos que se pudieran generar sobre el medio ambiente.

Para lograr establecer cuáles son las consideraciones y criterios hidrosedimentológicos más importantes para el estudio del flushing como estrategia de gestión de sedimentos, se comenzará por describir el proceso de sedimentación, la necesidad de la gestión de los sedimentos y el funcionamiento particular de esta estrategia. Más adelante se tomarán como referencia algunos de los casos más representativos del exterior en los que se ha estudiado y aplicado el flushing y dos casos documentados de aplicación del flushing en Colombia. Con base en los casos estudiados y sus respectivas consideraciones y regulaciones será posible establecer una definición y comparación de los criterios más importantes para la ejecución de esta estrategia de gestión. Finalmente se presentarán algunas conclusiones y recomendaciones según lo encontrado durante el desarrollo de este trabajo final.

1. Marco conceptual

Para entender el flushing como estrategia para el manejo y gestión de sedimentos en embalses, es necesario conocer, en primera medida, cómo y por qué ocurre la sedimentación. Para hacerle frente a la problemática de pérdida de capacidad de almacenamiento en el vaso, se requiere la implementación de estrategias que permitan darle un manejo al sedimento adecuado, enfocando los esfuerzos a la mitigación de los posibles impactos aguas abajo de la presa. El flushing es una de las estrategias viables para el retiro de los sedimentos depositados en el fondo de los embalses. A continuación, se describen desde la literatura la sedimentación en embalses, la gestión de sedimentos y el flushing:

1.1 Sedimentación en embalses

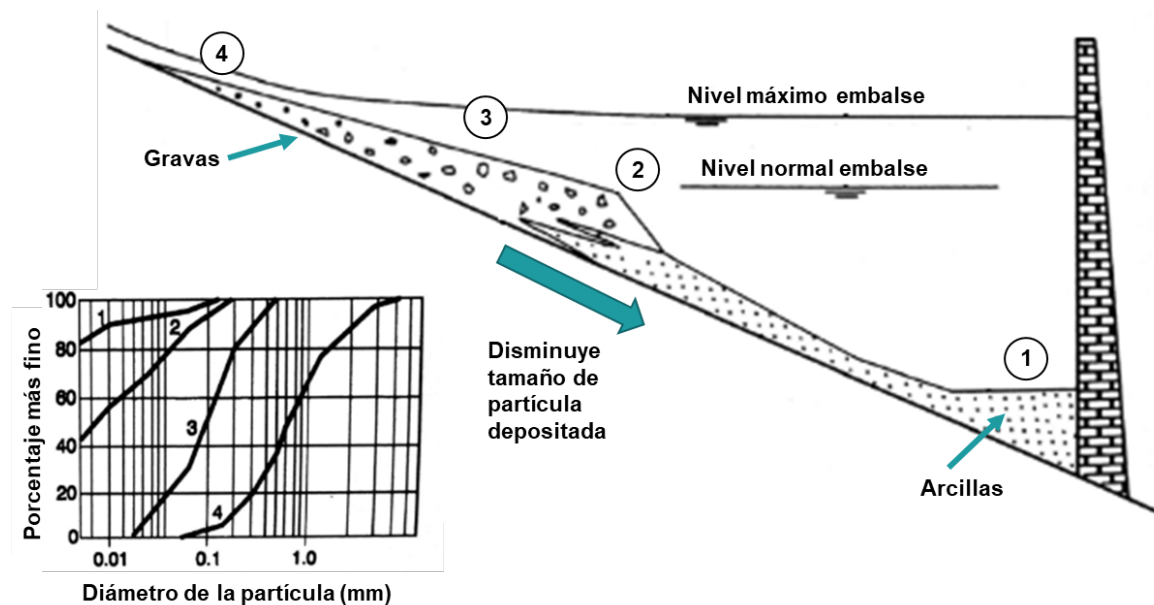
Un embalse es generado por la acumulación de agua luego de ubicar una presa, o una barrera de retención que permita dicha acumulación, de manera transversal en el cauce de un río. Sin embargo, esta estructura no sólo produce la retención del caudal líquido que fluye por el cauce sino también otros elementos que fluyen con el agua, como los sedimentos. Con ello, se ocasiona que las características hidrosedimentológicas de la corriente y su régimen de flujo sean alterados de manera casi inmediata, no solo en el punto específico de la presa sino aguas arriba y aguas abajo de la misma.

El efecto de un embalse sobre la corriente corresponde en primera medida a la reducción de los picos de caudal (atenuación del hidrograma) y la disminución o incluso pérdida total de la capacidad de transporte del río (Kondolf y Schmitt, 2018). Con la atenuación de los picos de caudal se busca disminuir, en muchos casos, el riesgo de inundación en las zonas aguas abajo de la presa, consiguiendo regular el caudal y convirtiéndolo en uno más homogéneo a través del tiempo. La pérdida de capacidad de transporte de sedimentos se presenta como consecuencia de la retención de agua, que genera una disminución de la

velocidad del flujo encargada de elevar y transportar por suspensión y arrastre los sedimentos a lo largo del río. La capacidad de transporte de sedimentos depende de la posibilidad de que las fluctuaciones turbulentas del flujo puedan elevar cierta partícula de sedimento y ésta sea transportada aguas abajo (Einstein, 1950). Estas fluctuaciones turbulentas, asociadas a los esfuerzos de corte, serán mayores a medida que la velocidad del flujo es mayor, por lo que el momento en que la velocidad disminuye, la fuerza que sustenta la partícula disminuirá y el sedimento se depositará en el fondo del cauce.

La reducción de la velocidad del flujo una vez entra en el embalse, se presentará de manera gradual, comenzado con la velocidad con la que llega el flujo desde el río y aproximándose a cero, a medida que entra al embalse. Que la velocidad se aproxime o no a cero, dependerá de la geometría del embalse. A medida que la velocidad reduce, los sedimentos se van depositando desde el más grande hasta el más pequeño, lo que produce una distribución de sedimentos gradada a lo largo del embalse, comenzando con los sedimentos más gruesos en la entrada y los más finos cerca de la presa (Morris y Fan, 1998) como se muestra en la Ilustración 1-1. Si las condiciones del embalse lo permiten, y el tiempo de retención del embalse es bajo, una porción de los sedimentos más finos seguirá en suspensión durante todo el tránsito del embalse y será descargado aguas abajo a través del vertedero de excesos o del caudal turbinado.

Ilustración 1-1. Distribución granulométrica longitudinal típica de un embalse.



Fuente: Adaptado de Morris y Fan, 1998.

La depositación de los sedimentos ocurrirá aguas arriba de la presa, sin embargo, al ser liberada el agua aprovechada o de exceso del embalse, los sedimentos serán muy pocos. La capacidad de transporte aguas abajo será alta producto de la descarga a altas velocidades y el abastecimiento de sedimentos muy bajo, por lo que comenzará un proceso de socavación en búsqueda del equilibrio dinámico del río (Wohl et al., 2015), donde el flujo transporte completamente su capacidad. Cada pequeña alteración en el régimen natural de sedimentos del río iniciará la búsqueda de un nuevo equilibrio, que no tendrá las mismas condiciones del anterior, pero sus características de pendiente longitudinal del cauce, caudal líquido, caudal sólido y sedimentos se encontrarán equilibradas. En la mayoría de los casos será difícil lograr este equilibrio antes de que exista una nueva perturbación en determinado tramo del sistema fluvial.

Dependiendo del lugar de la presa y de las características de la cuenca, la alteración en el régimen de sedimentos podrá ser notoria incluso hasta la desembocadura del río, es decir, el río no podrá lograr nuevamente su equilibrio y producirá procesos predominantes de socavación. Con el aumento de construcción de presas en el mundo (Annandale, Randle, Langendoen, Hotchkiss, y United States National Reservoir Sedimentation And Sustainability Team, 2018), luego de varias décadas, se ha observado cambios notorios en los sistemas aguas abajo del río; como en los deltas. Los deltas se forman en la desembocadura del río al mar; un punto donde la velocidad se reduce por la entrada a la gran masa de agua, similar a la llegada de la corriente a un embalse, donde se tiene un cuerpo de agua casi estático (en comparación al río). Esto genera una gran acumulación de sedimentos en la zona costera, que provienen de la cuenca hidrográfica, desde el nacimiento del río hasta su desembocadura.

Tras la construcción de una presa, el flujo de sedimentos es interrumpido y la cuenca hidrográfica que aporta sedimentos al río es mucho menor, por lo que el volumen de sedimentos depositados en el delta disminuirá drásticamente y con ello su extensión. El río Mississippi ha perdido más de 4800 km² debido a la retención de sedimento en los embalses a lo largo de su cauce (Kondolf et al., 2014). Por otra parte, en el río Mekong, tras la construcción de 140 presas, la carga de sedimentos del río ha resultado en una reducción del 96% (Kondolf et al., 2014). La disminución de los deltas es solo uno de los impactos notorios en el régimen de sedimentos.

El río con su flujo de agua y sedimentos también transporta nutrientes de vital importancia para el desarrollo y preservación de ecosistemas y especies en la ribera y en las planicies de inundación, por lo que se convierte también en un problema socio-económico el momento que estos no llegan y quedan detenidos en el embalse (Kantoush y Sumi, 2010), afectando el desarrollo de plantas y peces que sirven como sustento para las comunidades de la ribera aguas abajo de la presa. Tanto las afectaciones en el régimen de sedimentos como en los ecosistemas de ribera deberán ser estudiadas incluso antes de la construcción de la presa durante el proceso de licenciamiento ambiental del proyecto, a través de un correcto desarrollo del Estudio de Impacto Ambiental (EIA). El aspecto ecosistémico y biológico será importante a la hora de estudiar el impacto de la construcción de complejos presa-embalse, sin embargo, para este trabajo final se limitará el alcance al análisis del aspecto hidrosedimentológico.

Adicionalmente, las afectaciones de carácter morfológico son notorias en el cauce del río tras reducir la carga de sedimentos. El desbalance en el régimen de sedimentos causa socavación en el lecho, inestabilidad en las bancas (Guertault, Camenen, Peteuil, y Paquier, 2014) y daño a estructuras como puentes y diques (Kantoush y Sumi, 2010). La retención de los sedimentos en el embalse podrá producir aguas abajo el efecto conocido como *"Hungry Water"* o "Agua Hambrienta" en el agua descargada del embalse como exceso o turbinada, para el caso de la generación hidroeléctrica, tiene una capacidad de transporte mucho mayor que la disponibilidad de sedimentos y que en búsqueda de la compensación existirá un proceso predominante de socavación. Que se presente o no este fenómeno será particular de cada caso de estudio y dependerá del balance y las características de los sedimentos del río (Kondolf y Schmitt, 2018).

La sedimentación en el embalse trae consigo no solo problemas para el río por la alteración del régimen de caudales y de sedimentos en el cauce, sino también se generan problemas para el embalse propiamente dicho. A pesar de que el objetivo de la presa será almacenar agua, también se almacenarán troncos, basura y otros elementos que transporte el río, pero principalmente sedimentos. Los sedimentos retenidos comenzarán a ocupar un volumen importante en el volumen total disponible del embalse, que inicialmente estaba considerado para almacenar agua. La tasa de sedimentación del embalse dependerá principalmente de los sedimentos generados en la cuenca y de la eficiencia de atrapamiento del vaso. Como se mencionó anteriormente, según la geometría y del caudal

que llega y sale del embalse podrá liberarse una porción del sedimento que entra. Hay que tener en cuenta que el aumento en la producción de sedimentos por actividades humanas en las riberas de los ríos y en general en la cuenca, ha generado que la tasa de sedimentación aumente, producto de un crecimiento en la escorrentía por urbanización y cambios de coberturas de suelo. (Kondolf y Schmitt, 2018).

Según Kantoush y Sumi (2010), a nivel mundial, el aumento de la capacidad de almacenamiento de agua por construcción de nuevos embalses es menor que la pérdida de volumen debido a la depositación de sedimentos en los embalses ya construidos, alrededor de 1%-2% de la capacidad total mundial se pierde anualmente. El aumento en el volumen almacenado de sedimentos implica una disminución en el volumen almacenado de agua, por lo que los operadores de embalses han empezado a preocuparse por recuperar el volumen perdido o por lo menos garantizar que no se siga perdiendo. Como consecuencia de la acumulación de sedimentos, pueden producirse afectaciones en las estructuras de captación en los embalses y obstrucciones que comprometen la correcta operación de las estructuras logrando afectar incluso los equipos de generación por ingreso de aire y sedimentos.

Dentro de los sedimentos, es importante distinguir entre el sedimento grueso y el sedimento fino, ambos relevantes en las dinámicas del embalse y del río (Guertault et al., 2014). Las gravas y arenas, identificadas como sedimentos gruesos, normalmente constituyen el material del lecho, por su mayor tamaño se transportan como carga de arrastre y en general determinan la morfología del río. La pérdida de material grueso en el flujo por la retención en el embalse resulta en deterioro del hábitat, socavación en el lecho y sobre estructuras como puentes aguas abajo de la presa. Por otra parte el sedimento fino, considerado dentro de limos y arcillas, generalmente se asocia a las formas del lecho, genera la turbidez en el agua y transporta nutrientes, así como absorbe contaminantes en las arcillas (Kondolf et al., 2014). Una disminución del material grueso no permitirá el correcto desarrollo de los hábitats, así como un aumento en los sedimentos finos producirá una colmatación de los poros que sirven de hábitat (Kondolf y Schmitt, 2018).

Generalmente, las presas generan una retención del 100% del material grueso tipo grava y solamente en embalses cuya pendiente sea considerable, estas partículas podrán ser evacuadas a través de la presa. Para el caso de las arenas, como pueden ser transportadas por arrastre o por carga de lavado, los valores de retención son variables

(Kondolf et al., 2014) y dependen del tiempo retención, mejor representado por la relación entre capacidad de almacenamiento y el volumen de agua que entra anualmente al embalse (Kondolf y Schmitt, 2018).

Siendo el sedimento el principal problema en la pérdida de capacidad y en el desequilibrio causado en el cauce, en los últimos años se ha buscado la manera de gestionarlos de manera adecuada, de tal forma que los impactos producto de su retención tanto en el embalse, como en el río, sean mitigados.

1.2 Gestión de sedimentos

El esquema de diseño de presas y embalses se ha basado en el concepto de “vida útil”, que corresponde a la proyección de tiempo en la que podrá operar el embalse hasta que pierda su capacidad de almacenamiento debido a la colmatación por sedimentos (Kantoush y Sumi, 2010). A través de estudios de producción de sedimentos en la cuenca se puede determinar en qué momento el embalse perderá su capacidad y ya no podrá continuar su operación, dejando de prestar los servicios para los cuales fue concebido.

El esquema de vida útil fue tomado en cuenta para las primeras presas que comenzaron a operar desde finales del siglo XIX. Generalmente se tenía en cuenta una vida útil de entre 50-100 años para el embalse, por lo que, pasado más de un siglo, se ha tenido que buscar una solución para garantizar la operabilidad tanto para las presas ya construidas como para las nuevas.

Por lo anterior, los sedimentos se han convertido en un tema de interés mundial y se ha comenzado a cambiar la concepción y operación de los proyectos hacia una gestión sostenible de los sedimentos en embalses, no solo con el fin de recuperar la capacidad de almacenamiento comprometida por la sedimentación sino para reestablecer el régimen natural de los sedimentos, que son parte esencial en la dinámica fluvial del río y del desarrollo ecosistémico en las zonas de ribera y en el cauce mismo (Kondolf et al., 2014).

Lograr entender el volumen de almacenamiento del embalse como un recurso renovable y no como uno agotable hasta su vida útil, requiere del desarrollo e implementación de estrategias que logren reestablecer de la manera más aproximada las condiciones existentes antes de la construcción de la presa. La gestión de sedimentos debería

entonces resolver los principales problemas causados por la sedimentación, asociados a la afectación en las estructuras de captación, la pérdida de capacidad de los embalses y el déficit de sedimentos aguas abajo de la presa (Kantoush y Sumi, 2010). Adicionalmente se busca que la gestión de los sedimentos sea sostenible; el término sostenible ha tomado fuerza en los últimos años, buscando que las actividades que se desarrollan puedan lograr un mínimo de afectación sobre otras y puedan mantenerse en marcha de manera autónoma a lo largo del tiempo, sin comprometer recursos de difícil recuperación o no renovables, así como la disponibilidad para futuras generaciones. Para el caso de los sedimentos, Kantoush y Sumi (2010) ha identificado que para que exista una gestión de sedimentos en los embalses de carácter sostenible, deben tenerse en cuenta 6 aspectos de vital importancia:

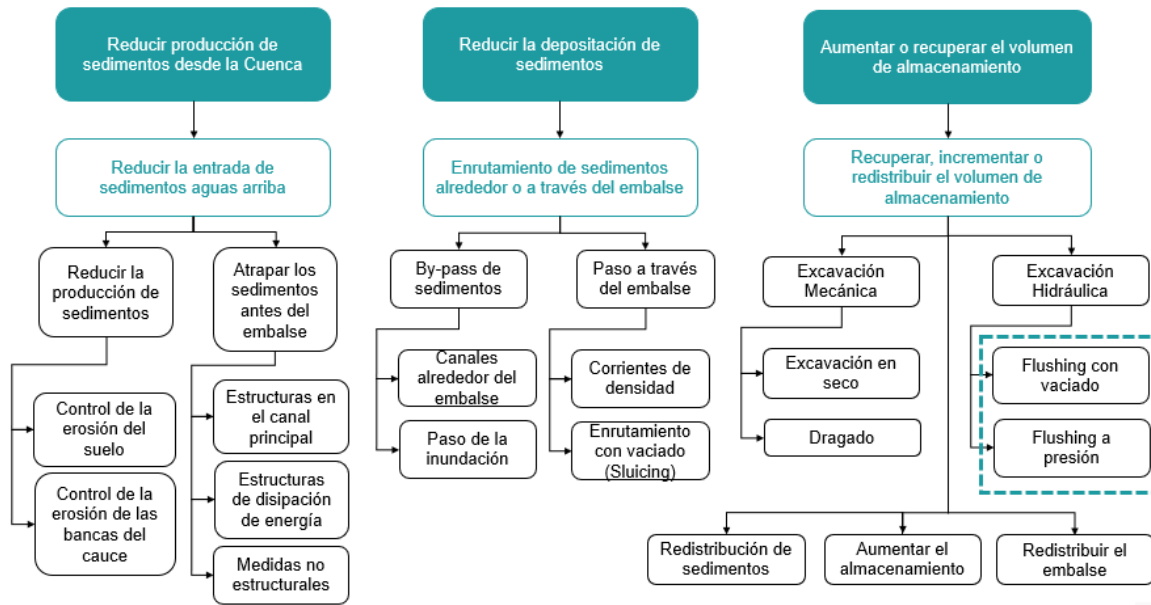
- 1) Seguridad y funcionamiento aceptable.
- 2) Preservar la capacidad del embalse.
- 3) Producir el mínimo impacto.
- 4) Minimizar el riesgo potencial por falla de infraestructura.
- 5) No afectar generaciones futuras.
- 6) Tener en cuenta todos los procesos hidrosedimentológicos.

Así mismo, y teniendo en cuenta que la actividad de presas y embalses no es nueva, la gestión sostenible de los sedimentos puede abordarse según la necesidad específica de cada embalse. En primera medida, la *gestión a escala correctiva*, principalmente para embalses que ya cuentan con problemas de sedimentación en sus embalses y que la pérdida de capacidad ha sido tal que compromete la operación futura del proyecto. En segunda medida está la *gestión preventiva*, para embalses ya desarrollados no comprometidos o en fase de desarrollo donde se busca no afectar las condiciones actuales del río y buscar su preservación. Para cualquiera de los dos esquema el objetivo es lograr adaptar la operación de tal forma que se garanticen las condiciones para ser proyectadas al futuro y sus nuevas generaciones (Kantoush y Sumi, 2010). Para la mayoría de los casos existentes en el mundo, primero deberá atravesarse por la fase correctiva y luego instaurar una gestión preventiva para garantizar la sostenibilidad.

Kantoush y Sumi (2010) ha identificado 3 grupos de estrategias para la gestión de sedimentos en embalses: la reducción de producción de sedimentos en la cuenca, el

enrutamiento de sedimentos a través o por fuera del embalse y la remoción de sedimentos ya depositados dentro del embalse (Ver Ilustración 1-2). La gestión de sedimentos no se trata de una estrategia específica para lograr la reducción en los volúmenes depositados dentro del embalse, sino la agrupación, combinación y aplicación de estrategias que permitan conservar el volumen de almacenamiento de la manera óptima.

Ilustración 1-2. Clasificación de estrategias para la gestión de sedimentos.



Fuente: Adaptado de (Kondolf et al., 2014)

Recuperar la capacidad de un embalse una vez se ha colmatado es económicamente inviable (Annandale et al., 2018), por esto, actualmente, el no aplicar técnicas de manejo de sedimentos en los embalses, representa la pérdida de oportunidades para mantener o mejorar su almacenamiento, así como proyectar su uso hacia el futuro, minimizar el impacto del déficit de sedimentos aguas abajo de la presa y la garantizar la conservación de los ecosistemas (Kondolf et al., 2014). Por tratarse de un tema actual, la experiencia en casos anteriores representa un punto de referencia muy importante en cuanto al manejo de sedimentos, considerando poco avance y desarrollo de las técnicas de gestión (Annandale et al., 2018).

Se ha propuesto para este trabajo final el análisis de una de las estrategias clasificada como gestión correctiva de remoción para la recuperación del volumen perdido, estrategia de aparente fácil operación y de bajo costo, que consiste en la apertura de las compuertas

de fondo de la presa para la liberación del material sedimentado: el flushing o descarga de fondo. Algunos autores como Kondolf et al. (2014) y Kantoush y Sumi (2010), han clasificado las descargas de fondo dentro de la categoría de excavación hidráulica de sedimentos como se muestra en la Ilustración 1-2.

Por otra parte, en el flushing no solo se busca la liberación de sedimentos retenidos en el embalse para la recuperación de volumen, sino lograr reestablecer los procesos naturales que se desarrollaban antes de la construcción de la presa, regresando los sedimentos al cauce. Así, cobra vital importancia la simulación de procesos naturales como las inundaciones, de tal forma que se garantice la continuidad de los sedimentos y el desarrollo de procesos geomorfológicos (Kondolf y Schmitt, 2018).

1.3 Método de *flushing* o descarga de fondo

El flushing, descarga de fondo o lavado de sedimentos, es un método o estrategia utilizado para la liberación de sedimentos retenidos en embalses. Consiste en la apertura de las compuertas de fondo de una presa, permitiendo el vaciado del embalse hasta un nivel en el que se produzca flujo a superficie libre y se genere una fuerza de corte lo suficientemente fuerte como para que el material depositado sea socavado, transportado a través del embalse y liberado aguas abajo de la presa, dando continuidad a su recorrido natural (Kantoush y Sumi, 2010).

Existen dos características para que el flushing sea diferente al enrutamiento de sedimentos (sluicing), considerado otro método para la gestión de sedimentos. El primero, en el flushing se remueve sedimento ya depositado mientras que en el enrutamiento se hace pasar el sedimento que viene en los afluentes del embalse, evitando que se sedimente. Segundo, las concentraciones de descarga en el flushing son mucho mayores que las concentraciones de entrada al embalse, siendo en el enrutamiento muy similares. Generalmente, durante una descarga por flushing las concentraciones de sedimentos en el agua son muy altas, comparadas con las concentraciones normales del río. (Morris y Fan, 1998)

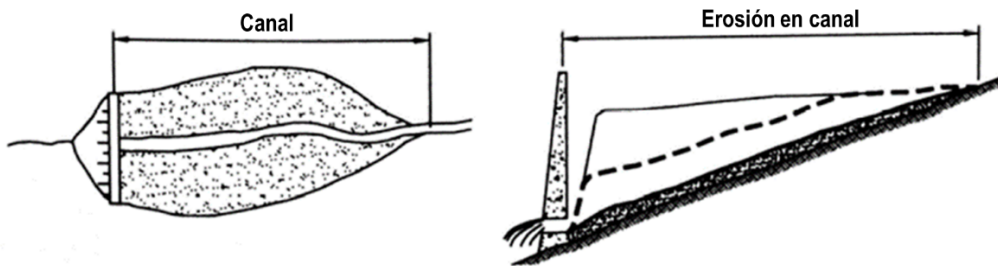
Con el aumento de la fuerza de corte generada por el flujo a superficie libre, se comienza la socavación del fondo, generalmente no consolidado, formándose un canal similar al cauce existente anterior al embalse y que va desde el ingreso del río al embalse hasta la

compuerta de fondo. El flushing solo genera un canal angosto en el que se producirá la socavación, el resto del área de embalse no tendrá el mismo nivel de socavación, y por ende el retiro de sedimentos será mucho menor en el área de inundación que en el canal principal. Por lo anterior, el flushing, puede recuperar y mantener volúmenes de almacenamiento de agua en embalses preferiblemente largos y angostos (Kondolf et al., 2014). Para aumentar su eficiencia, la utilización de técnicas como canales auxiliares o división de flujo que permitan aumentar el área de socavación del fondo son prácticas recomendadas (Morris y Fan, 1998).

El vaciado (parcial o total) del embalse es una de las condiciones para llevar a cabo el flushing (Kondolf et al., 2014). El caudal que salga a través de la compuerta de fondo será el encargado de retirar los sedimentos, lo que podría implicar una disminución del nivel que incluso puede llegar a su cota mínima para generar el flujo a superficie libre. Sin embargo, el vaciado del embalse corresponde a una de las principales limitaciones del método, ya que, los embalses con su agua almacenada garantizan la operación de ciertas actividades como riego, abastecimiento o generación hidroeléctrica, en cuyo caso implicaría la suspensión de estas actividades. Por ello, la realización del flushing es viable en el momento en que pueda producirse un vaciado (total o parcial) del embalse. Según el vaciado del embalse pueden presentarse dos tipos de flushing (Morris y Fan, 1998):

Flushing con vaciado completo: implica vaciar el embalse hasta el nivel de la compuerta de fondo de la presa con el fin de producir altos esfuerzos de corte sobre el fondo del embalse a través de un flujo de superficie libre. Se genera el canal de socavación a lo largo del embalse desde el ingreso del río hasta la salida de la compuerta de fondo.

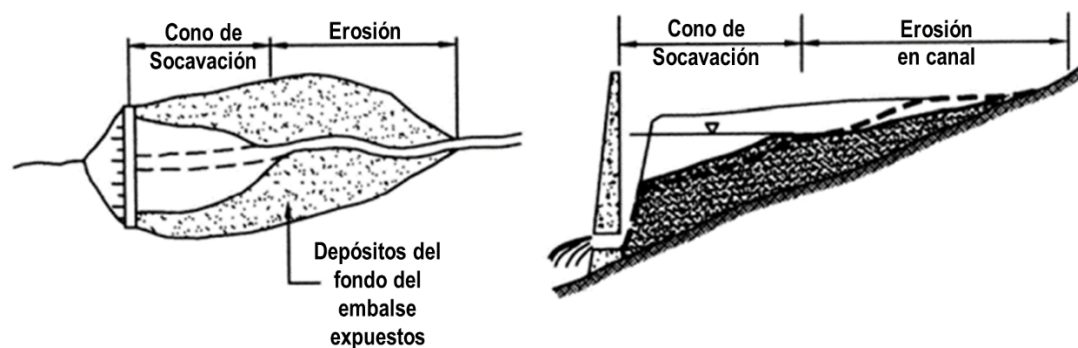
Ilustración 1-3. Flushing con vaciado total.



Fuente: Adaptado de Morris y Fan, 1998.

Flushing con vaciado parcial: requiere una menor liberación de agua, generando un flushing a presión, producto de la columna de agua encima de la compuerta de fondo (operación como un orificio hidráulico), llevando el nivel del agua hasta cierto nivel que garantice la operación del complejo. El flushing a presión es mucho menos efectivo, ya que a pesar de que se liberan sedimentos, el mecanismo que realmente los retira del fondo es la fuerza de corte generada por el flujo a superficie libre, una vez se haya vaciado totalmente el embalse; por esta razón este método no es comúnmente usado para la gestión de sedimentos. El flushing a presión puede ser utilizado como alternativa para mantener operacionales las captaciones o tomas agua del embalse (Kondolf et al., 2014). Estudios empíricos han permitido desarrollar fórmulas para la predicción del cono de socavación y de tal forma realizar un diseño adecuado de las compuertas de captación (Morris y Fan, 1998).

Ilustración 1-4. Flushing con vaciado parcial.



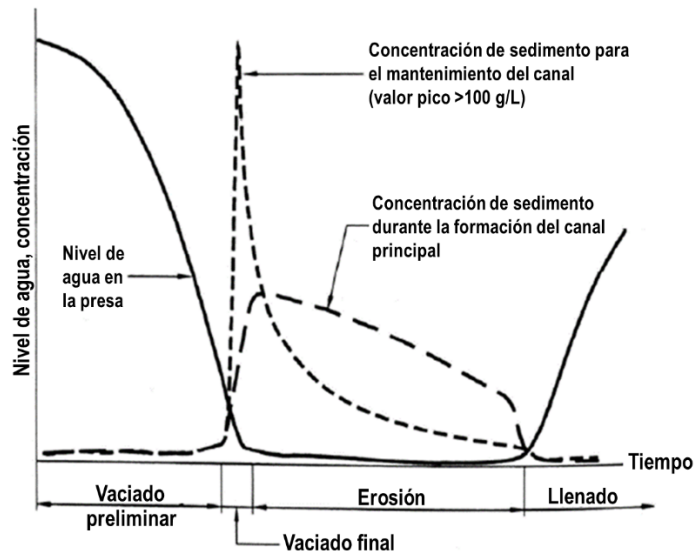
Fuente: Adaptado de Morris y Fan (1998).

Dentro de las limitaciones del flushing, como se ha mencionado anteriormente, se encuentran los altos niveles de concentración de sedimentos en el caudal descargado, los cuales pueden producir afectaciones aguas abajo de la presa como: colmatación de captaciones de agua, generar condiciones de anoxia en el flujo y muerte de organismos vivos, afectar condiciones de navegabilidad y aumentar el riesgo de inundación por acumulación de sedimentos aguas abajo (Morris y Fan, 1998).

Al ser la fuerza de corte sobre el fondo el mecanismo que hace efectivo el flushing, los mayores niveles de concentración de sedimento (y mayores volúmenes de lavado) se producirán cuando el embalse esté vacío y exista flujo a superficie libre. Así mismo, la cantidad de sedimento liberado dependerá del tiempo en el que se permita esta condición

de flujo. Sin embargo, como se muestra en la Ilustración 1-5, el comportamiento de la concentración es asintótico con el tiempo, por lo que, en cierto tiempo, una vez erosionado y formado el canal principal, el flujo no será capaz de erosionar y transportar una cantidad de sedimento apreciable.

Ilustración 1-5. Comportamiento hidráulico y de sedimentos durante la ejecución del flushing.



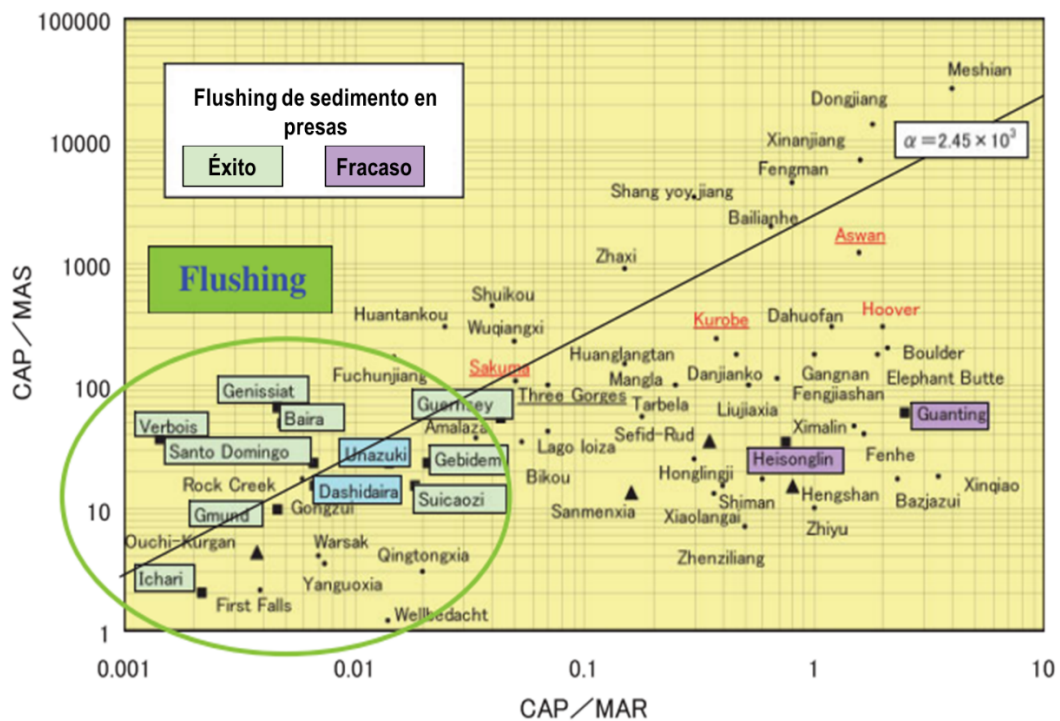
Fuente: Adaptado de Morris y Fan (1998).

Según la Ilustración 1-5, dentro del flushing se distinguen 4 etapas: Primero, el vaciado preliminar, momento en el que se comienza el vaciado y se genera un flushing a presión. Segundo, el vaciado final, donde se presentan las condiciones de concentración máxima del proceso y el punto donde se genera el flujo a superficie libre. Tercero se presenta el proceso de socavación del canal principal y canales auxiliares producido por las altas velocidades del flujo. Por último, en la etapa de llenado, se cierra la compuerta de fondo y comienza a aumentar nuevamente el nivel de agua del embalse.

La efectividad del flushing depende de características como el área de la cuenca, la capacidad de almacenamiento del embalse, el tipo de vaciado (total o parcial) y de la presencia de compuertas de fondo para realizar la descarga (Peteuil et al., 2014), así como de qué tan angosto sea el embalse y la pendiente del cauce original (Kondolf y Schmitt, 2018). Se ha comprobado que el flushing es un método efectivo para un rango amplio de características físicas de embalses, pero con tamaños hidrológicos pequeños, logrando

retirar sedimentos desde partículas de arcilla hasta incluso gravas (Kondolf y Schmitt, 2018), donde las condiciones de pendiente del fondo y longitud del embalse son adecuadas. Se ha podido determinar que para que el flushing sea eficiente, el embalse deberá almacenar solo el 4% del caudal medio anual, ya que para embalses mayores el vaciado es difícil (Kondolf et al., 2014). En la Ilustración 1-6, se presentan casos exitosos y fallidos de flushing a nivel mundial.

Ilustración 1-6. Casos de flushing realizados en el mundo y su relación con capacidad y caudales anuales.



Fuente: Adaptado de Kondolf et al (2014).

En la Ilustración 1-6 se relacionan las características de vida útil del embalse y tiempo de retención. La vida útil del embalse está calculada como la relación entre la capacidad de almacenamiento (CAP) y el volumen anual de sedimentos que se depositan en el embalse (MAS), el tiempo de retención del agua almacenada será la relación entre la capacidad de almacenamiento del embalse (CAP) y el caudal líquido medio anual (MAR). Según el criterio de Kondolf et al. (2014), el flushing presenta buenos resultados para el manejo de sedimentos en embalses de poco tiempo de retención y una vida útil reducida, esto está representado en la esquina inferior izquierda de la gráfica.

El flushing puede ser evaluado según su eficiencia hidráulica, que corresponde a la relación del volumen de sedimentos socavados y el volumen de agua utilizada para cualquier intervalo de tiempo.

$$F_e = \frac{(V_o C_o - V_i C_i) / \rho}{V_o}$$

V_o y V_i representan los volúmenes de agua a la salida (*output*) y a la entrada (*input*) del embalse en m^3 , C_o y C_i las concentraciones de sedimento en kg/m^3 y ρ la densidad del depósito en kg/m^3 . En general la eficiencia del flushing dependerá de la concentración en la descarga (Morris y Fan, 1998), en muchos casos, esta efectividad no es un buen parámetro para evaluar el éxito del método, ya que para no afectar el ecosistema se buscan diluciones de sedimento en el caudal líquido evacuado que estén cerca de las concentraciones naturales, por lo que para evacuar un determinado volumen de sedimento se requerirán grandes volúmenes de agua y por tanto se tendrán valores mínimos de eficiencia hidráulica.

La capacidad de transporte del flujo depende de la velocidad; a mayor velocidad la capacidad de transporte será mayor. A medida que la velocidad es mayor, el flujo podrá transportar sedimentos de mayor tamaño. Sin embargo, en muchos casos, algunos de los sedimentos que llegan al embalse son lo suficientemente grandes para que no puedan ser transportados, incluso durante una creciente de época húmeda. Por tanto, estos sedimentos gruesos no podrán ser evacuados y siempre existirá una pérdida de capacidad del embalse o se deberá complementar con medios mecánicos que trasladen el sedimento al canal aguas abajo (Kondolf y Schmitt, 2018). Esto ocasiona que en algunos casos la gestión de sedimento no pueda realizarse únicamente a través del flushing.

La pérdida de capacidad de almacenamiento dependerá totalmente de las características del embalse y de los sedimentos que allí lleguen. No es posible generalizar que el flushing no puede retirar material grueso del embalse; en algunos casos sí se podrá retirar el 100% del material grueso. En el caso del retiro de un valor menor del 100% la capacidad disminuirá hasta llegar a cero, situación que se podrá presentar luego de muchos años de operación. Para los casos en donde el sedimento que entra al embalse no se pueda evacuar totalmente, deberán utilizarse técnicas de gestión complementarias al flushing

como erosión lateral a través de canales auxiliares, erosión longitudinal a través de canales paralelos al principal, división del flujo, asistencia mecánica o estructuras dentro del embalse para modificar las condiciones de flujo durante el flushing (Morris y Fan, 1998).

Debido a las condiciones mencionadas anteriormente, y con el fin de garantizar buenas velocidades y un caudal suficiente para generar una buena dilución de los sedimentos, siempre se recomienda realizar las descargas de fondo en épocas húmedas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las crecientes utilizadas para realizar el lavado deben ser menores a la capacidad de la compuerta de fondo (Kondolf et al., 2014), con el fin de conservar siempre un flujo a superficie libre. Adicionalmente, deberán tenerse en cuenta características como la magnitud del caudal, su frecuencia, la duración de la apertura y la cantidad y calidad del sedimento (Kondolf y Schmitt, 2018).

Uno de los principales atractivos del método de flushing corresponde al factor económico. El hecho de que el mismo caudal líquido que transporte el río en ese punto, sea el encargado de remover y transportar los sedimentos, así como garantizar que los sedimentos quedan en el cauce a donde pertenecen, hace que la ejecución del flushing sea muy económica en comparación a otras técnicas como el dragado (Christophe Peteuil et al., 2013), que además de requerir maquinaria, necesita un sitio de disposición de los materiales dragados.

La ejecución del flushing de manera regular, corresponde a una orientación hacia la sostenibilidad del manejo de sedimentos. Además de generar una liberación frecuente de sedimentos aguas abajo de la presa para buscar el equilibrio de los sedimentos y permitir una dilución suficiente de los mismos para no afectar los ecosistemas y organismos aguas abajo de la presa, ayuda a evitar la consolidación de los sedimentos en el fondo del embalse, que en caso de presentarse, puede complejizar las labores de retiro del sedimento, requiriendo en algunos casos asistencia mecánica (Kondolf et al., 2014).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo entre los criterios hidrosedimentológicos considerados para el lavado de sedimentos en embalses mediante descarga de fondo a nivel mundial, y los requerimientos por parte de las autoridades ambientales para su autorización y ejecución en Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los criterios y requerimientos aplicados a nivel mundial en la práctica del lavado de sedimentos en embalses mediante descarga de fondo, desde el punto de vista hidrosedimentológico, para el manejo sostenible de sedimentos.
- Analizar las consideraciones y requerimientos establecidos para el lavado de sedimentos mediante descarga de fondo, correspondientes a las respuestas dadas por las autoridades ambientales colombianas ante las solicitudes formuladas por los operadores de embalses.

3. Metodología

Este trabajo final parte de un estudio de casos para determinar los principales criterios hidráulicos y sedimentológicos que deben ser tenidos en cuenta para el lavado de sedimentos por medio de la descarga de fondo de un embalse como alternativa para la gestión de sedimentos. Durante el trabajo se tendrán dos ejes temáticos: el primero será enfocado para el estudio de casos a nivel mundial y el segundo para los casos colombianos. Los dos ejes serán desarrollados de manera independiente, buscando extraer de los casos analizados, los principales criterios hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos de los embalses y las características de los procedimientos de descarga de fondo realizados.

Para los casos del exterior se busca extraer la información más relevante acerca del manejo de la descarga de fondo de sedimentos en embalses a partir de artículos de revistas indexadas, documentos, estudios y consultorías realizadas por organizaciones, asociaciones y empresas especializadas. Será de principal importancia documentar los casos exitosos de descargas de fondo con el fin de establecer las buenas prácticas. Sin embargo, también será importante establecer qué condiciones no son adecuadas para la descarga de fondo como estrategia para la gestión de sedimentos en embalses.

En el caso de Colombia, la principal fuente de información será la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), en cuyo repositorio se almacena toda la información relacionada con los estudios y requerimientos presentados para dar viabilidad a descargas de fondo para cada uno de los casos particulares. Teniendo en cuenta que, en primera medida, los proyectos hidroeléctricos en Colombia son licenciados para su operación, la información relevante para este trabajo estará desarrollada luego la de construcción de los proyectos, por lo que habrá que depurar de manera adecuada los expedientes que allí se manejan. Adicional a los estudios presentados por las empresas operadoras para la autorización de la descarga de fondo, serán de vital importancia las respuestas efectuadas

por la ANLA durante el proceso de revisión, para dar autorización al procedimiento, ya que allí se encontrarán los requerimientos para su ejecución.

La primera etapa del trabajo corresponde a la obtención, clasificación y análisis preliminar de la información, con el objetivo de determinar si es relevante para el trabajo. El marco conceptual será el comienzo de la aproximación a la construcción del trabajo; en él se definirán conceptos clave para el entendimiento del método de flushing como alternativa para la gestión sostenible de sedimentos.

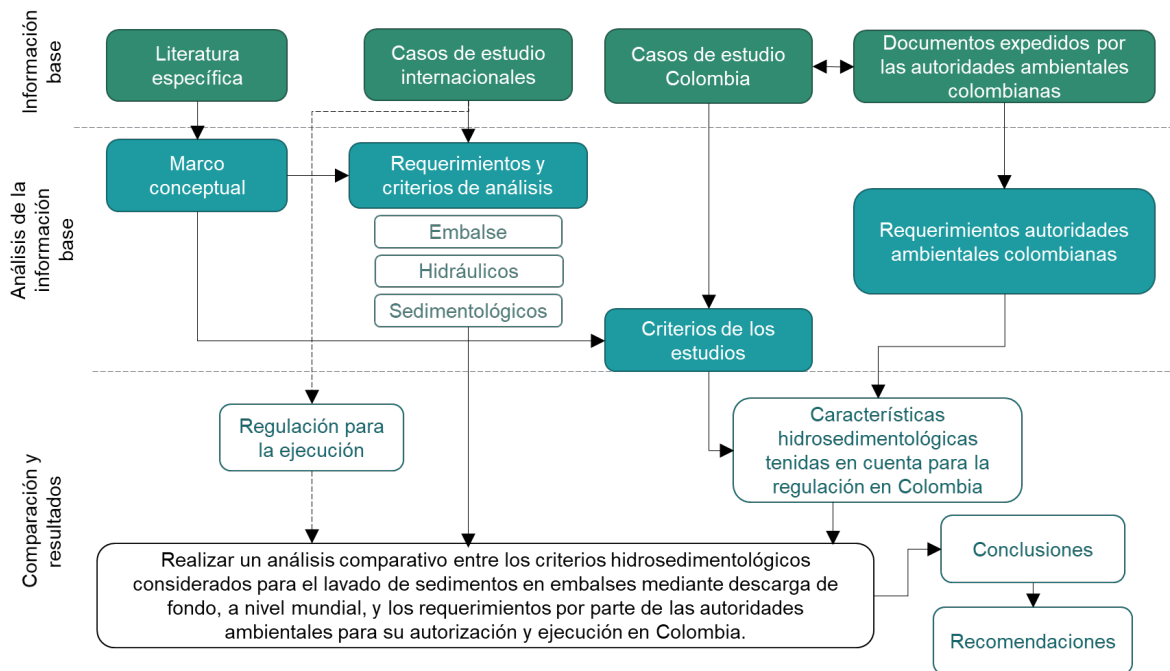
Luego de analizar de manera independiente cómo se maneja la ejecución y regulación de las descargas de fondo para cada uno de los casos, se integrarán los conceptos y se compararán con el fin de determinar si los criterios aplicados hasta el momento en Colombia son adecuados para el desarrollo de este procedimiento en las condiciones de embalses nacionales, así como establecer posibles diferencias conceptuales y de aplicación para la adecuada gestión de sedimentos, respecto de los casos mundiales considerados.

Para los casos de estudio colombianos cobrarán principal importancia los requerimientos exigidos por las autoridades ambientales para la realización de esta práctica, teniendo en cuenta que no existe una regulación formal ni un procedimiento con lineamientos específicos para la autorización y ejecución de la descarga de fondo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que ya se han realizado requerimientos particulares para embalses específicos en Colombia.

Es importante entender que los criterios hidrosedimentológicos que puedan establecerse como importantes dentro de este trabajo no pretenden llegar a valores numéricos o rangos de aceptabilidad para la viabilidad de las descargas de fondo. Cada caso en particular requiere establecer características propias de cada sistema (Kantoush y Sumi, 2010). El objetivo será establecer cuáles serán los criterios de principal relevancia a evaluar. Los casos encontrados y referenciados en este trabajo no serán limitados por condiciones hidrológicas, hidráulicas o sedimentológicas diferentes a las de Colombia, por el contrario, serán clave para la caracterización general de los estudios.

A continuación, en Ilustración 3-1, se presenta un esquema de la metodología a seguir durante el desarrollo del Trabajo Final:

Ilustración 3-1. Esquema metodológico.



Fuente: Elaboración propia

Al final, con toda la información recolectada y analizada se podrá dar cumplimiento al objetivo de este trabajo final de grado. Lograr establecer cuáles son las características hidrosedimentológicas más importantes para tener en cuenta en la ejecución de una descarga de fondo, las cuales deberán ser tenidas en cuenta por las autoridades ambientales colombianas, ante una regulación del proceso en el país.

4. Casos de flushing en el exterior

El flushing no es un método nuevo; este ha sido desarrollado y aplicado en diferentes partes del mundo. Sin embargo, ha sido estudiado de manera experimental y se ha ido puliendo a través de pruebas y variaciones de las características de ejecución a través de los años teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada proyecto, y ajustando descarga tras descargas las condiciones necesarias para lograr una gestión de sedimentos a través de este método. A continuación, se presentan 3 casos de gestión de sedimentos en diferentes partes del exterior:

4.1.1 Presa Génissiat - Francia

El río Ródano, nace en los Alpes suizos y cruza por la parte oriental del territorio francés para finalmente desembocar en el mar mediterráneo. Es uno de los principales ríos de Europa y un notable ejemplo de operación de 19 presas en serie (Kondolf et al., 2014). El río pasa a través del lago de Ginebra donde la carga de sedimentos que transporta se anula casi totalmente. Desde el efluente del lago hasta la afluencia del río Arve, sedimento transportado es muy poco. Sin embargo, el río Arve sí transporta una cantidad considerable de sedimentos (entre 1 y 3 millones de m³ al año), considerando que es a partir de allí, que existe el transporte de sedimentos en el río Ródano. En 1948 fue construida la presa Génissiat, aguas abajo de otras presas como Verbois y Chancy-Pougny, con una altura de 70m de alto y que genera un embalse con una longitud de 23 km y una capacidad de almacenamiento de 56 millones de m³ (Guertault et al., 2014).

Los operadores suizos de los embalses Verbois y Chancy-Pougny comenzaron a realizar continuas descargas de fondo de los embalses, con el fin de disminuir el riesgo de inundación en la ciudad de Ginebra por acumulación de sedimentos en la cola del embalse, aguas arriba de las presas, pero sin tener en cuenta las implicaciones de estas descargas aguas abajo, y que produjeron un impacto considerable en el entorno del río aguas abajo

y sobre la el embalse de Génissiat (Christophe Peteuil et al., 2013). Por tal motivo, la *Compagnie National du Rhone* (CNR), administradora y operadora de Génissiat, tuvo que implementar un programa de manejo de sedimentos que le permitiera no comprometer el volumen de almacenamiento ni operación del embalse, afectado por la descarga continua de grandes cantidades de sedimento proveniente de los embalses suizos ubicados aguas arriba.

Poco a poco, descarga tras descarga, la CNR fue determinando cuales eran las condiciones necesarias para la realización de la descarga de sedimentos. Se realiza una descarga cada tres años, a través de la compuerta de fondo, teniendo en cuenta seis retos principales para garantizar el éxito de la descarga:

- 1) Evitar la obstrucción de la salida de fondo.
- 2) Limitación de sedimentos acumulados en el embalse.
- 3) Pasar los flujos de sedimentos que vienen de aguas arriba.
- 4) Regular la concentración de sedimentos.
- 5) Reservar las secciones naturales del río.
- 6) Limitar el impacto de la liberación de sedimentos en actividades humanas.

Al asegurar la viabilidad de estos seis puntos, la CNR logró garantizar las condiciones más adecuadas de operación de las descargas de fondo como estrategia para la gestión sostenible de sedimentos. De manera más general, un “flushing ambientalmente amigable” que se logró a través de tres criterios generales:

Respetar las concentraciones de sedimentos liberados: En Génissiat se tiene definidos los máximos de concentración de la siguiente manera: 5 g/l en promedio para toda la descarga, 10 g/l en promedio para un periodo de 6 horas y 15 g/l en promedio para un periodo de 30 minutos. Comparativamente la concentración durante una creciente natural en el río es de alrededor de 3 g/l. Con el fin de preservar la integridad ecológica, en caso de superar una concentración de 2 g/l durante una hora, se cierran completamente los embalses aguas abajo para generar un punto de control en el que se regulen nuevamente las concentraciones (Peteuil et al., 2013). Para una descarga realizada en junio del 2012, en la presa ubicada aguas arriba de Génissiat, Chancy-Pougny, se presentó una concentración máxima de 48.6 g/l, lo que produjo daños severos en la vida acuática.

La elevada concentración de sedimentos es quizás una de las principales críticas del método por parte de ambientalistas, debido a la afectación que puede presentarse en el hábitat de ribera y por tanto en la vida de los peces y otros organismos que allí habitan. El caso ideal será garantizar las concentraciones naturales del río antes de la construcción de la presa, sin embargo, teniendo en cuenta el volumen ya almacenado de sedimentos en el embalse, la liberación se realizará con concentraciones mayores. A pesar de que se busca que las concentraciones en la descarga sean similares a las concentraciones de las crecientes que llegan al embalse, se podrán tener concentraciones mayores durante la descarga sin que esto signifique afectaciones a los ecosistemas aguas abajo.

Óptimo diseño de presa: el diseño de la presa cobra un papel importante, ya que la gestión de sedimentos a través de flushing requiere características geométricas que permitan que el método sea lo suficientemente efectivo para definirlo como principal estrategia para la gestión de sedimentos. Este aspecto es relevante para las presas nuevas, y que para el caso de Génissiat se consideró desde la etapa de diseño del proyecto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que muchos de los proyectos de presas ya se encuentran construidas y, por tanto, las condiciones que ya están dadas deberán adaptarse para viabilizar la aplicación de esta estrategia para la gestión de sedimentos. Génissiat fue diseñada con descargas en 3 niveles, que permiten manipular las concentraciones en la descarga a partir de la apertura gradual en cada uno de los niveles. Las compuertas bajas evacuarán sedimentos y las compuertas altas agua clara (Kondolf et al., 2014).

Gestión de operación basada en una larga experiencia práctica: el caso de Génissiat ha sido uno de los más estudiados del mundo y por ello han logrado establecer una gestión sostenible de los sedimentos a través del flushing. Tras 40 años de realización del flushing, el análisis y retroalimentación de las observaciones de las descargas ha permitido establecer los valores límites adecuados para mitigar los impactos al ambiente. Incluso las descargas que no ha resultado bien han llevado a mejoramientos considerables en las condiciones de operación del flushing (Peteuil et al., 2013). A pesar de que se pueda entender de manera teórica el funcionamiento del método y los procesos hidráulicos y físicos involucrados, el conocimiento generado a través de la experiencia y para las condiciones físicas de cada embalse, se hace aún más valioso. El estudio de la ingeniería de ríos es complejo, en el que intervienen muchos factores que pueden alterar o determinar el comportamiento del río, por tanto, es solo en el estudio en sitio donde se pueden

considerar todos los factores que determinan el comportamiento y por tanto donde se conseguirá la información más relevante y certera.

Por la condición de presas en serie del río Ródano, la CNR ha desarrollado un esquema de operación de flushing que permite un manejo simultáneo de los sedimentos en las presas. Se inicia con el vaciado de la presa aguas abajo hasta lograr el estado de flujo a superficie libre sobre el fondo del embalse por varios días, permitiendo que se socave el fondo y se retiren parcialmente los sedimentos acumulados. Luego, se cierran las compuertas de fondo de presa aguas abajo y se realiza el vaciado de los embalses superiores, elevando el nivel de agua del embalse aguas abajo mientras los embalses aguas arriba se mantienen vacíos liberando los sedimentos retenidos. Esto garantiza la regulación de los sedimentos en el embalse aguas abajo, donde se controla nuevamente la concentración de sedimentos en el caudal del río. Es importante durante esta operación el monitoreo en tiempo real de las concentraciones de sedimentos tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa, de tal forma que se pueda conocer si las concentraciones durante la descarga exceden el máximo estipulado, lo que conllevaría a ajustes o suspensión en la apertura de la compuerta de fondo (Petuill et al., 2013).

El monitoreo en Génissiat permite un seguimiento en tiempo real para las estaciones de medición, donde a través de técnicas como densitometría con rayos X se miden las concentraciones de sedimento suspendido. Adicionalmente se realizan mediciones regulares de batimetrías en el embalse, granulometría y parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, pH, NH₄, conductividad y turbidez), toxicidad y bacteriología. Las mediciones realizadas han permitido caracterizar el material que entra al embalse dentro de un rango de gravas gruesas hasta arena fina, mientras que el material aguas abajo está compuesto por sedimentos que van desde gravas finas hasta arenas finas (Petuill et al., 2013), indicando que las gravas gruesas quedan retenidas en el embalse y no se pueden remover a través del flushing.

En Génissiat, se ha encontrado el flushing como un método adecuado para la gestión de sedimentos retenidos en el embalse. En los cuarenta años de operaciones de flushing cada tres años, de las 23 millones de toneladas que se han podido depositar en el embalse sólo lo han hecho 4.5 millones de toneladas (Kondolf et al., 2014). Hasta el momento, el embalse ha perdido unos 14 millones de m³ de almacenamiento por sedimentos (Guertault

et al., 2014) producto de los sedimentos gruesos atrapados y de los sitios de sedimentación que no son alcanzados por el canal principal durante el flushing. En un convenio transfronterizo con Suiza, se ha establecido un esquema mixto de gestión de sedimento para el río Ródano compuesto tres estrategias: enrutamiento de sedimentos durante la época de altos caudales, flushing aplicado cada tres años y dragado mecánico (Christophe Peteuil, 2016).

La liberación recurrente de sedimentos desde 1997 hasta el 2012 ha ayudado a que el río aguas abajo de la presa haya entrado en una etapa de cuasi-equilibrio (Guertault et al., 2014). Sin embargo, hay que entender que el estado de cuasi-equilibrio no será igual a uno anterior, pero que sí habrá balance ente el abastecimiento y la capacidad de transporte del río, que había sido alterado por la construcción de la presa.

El gobierno francés, a través del *Code de l'environnement (Código del medio ambiente)*, en cabeza del Ministerio de Ecología, Desarrollo Sostenible y Transporte de Francia, en el Artículo L214-17, ha implementado como requisito, dar continuidad a los sedimentos con el fin de evitar la pérdida de sustratos para la vida acuática, para todas aquellas construcciones que dificulten la migración de peces o la alteración del régimen del río (República Francesa, 2019).

En el Código se presenta una nueva clasificación de los ríos según su estado ecológico: (1) Ríos para preservar; donde no se autorizan obstáculos nuevos y se requiere una renovación de autorización para los existentes. (2) Ríos para ser restaurados; se otorga un plazo de 5 años para plantear e implementar los nuevos esquemas de manejo para garantizar el óptimo transporte de sedimentos del río (República Francesa, 2019).

Según el tipo de estructuras presentes en el río se pueden identificar 3 categorías en las cuales se deben aplicar determinadas acciones para la gestión de sedimentos (ICOLD y CIGB, 2019).

1. Diques o pequeños embalses: se debe garantizar el adecuado tránsito de los sedimentos por medio de la apertura regular de las descargas de fondo, prestando atención a sedimentos potencialmente contaminados y a la vulnerabilidad de las especies aguas abajo.
2. Presas de gran capacidad: El impacto en el tránsito de sedimentos es tan alto que medidas como la apertura de la descarga de fondo no son suficientes, por lo que

se requieren medidas adicionales como modificación de la infraestructura de la presa, transferencia mecánica de los sedimentos, excavaciones, etc.

3. Estructuras diseñadas para la retención del sedimento: en este caso las consideraciones deben ser diferentes, ya que se estaría eliminando el objetivo de esta. Por ello se deberá analizar si la estructura ya no es necesaria y se puede dismantelar, si se puede hacer una transferencia parcial de los sedimentos, o si definitivamente no se debe hacer nada.

A través de este tipo de requerimientos se garantiza que las actividades realizadas irán orientadas a priorizar el medio ambiente y los procesos naturales que allí ocurren. A pesar de que pueda parecer un requerimiento general, es el punto de partida para regulaciones más específicas y estrictas más adelante.

4.1.2 Presa Dashidaira - Japón

Por su condición geográfica y geológica, Japón cuenta con montañas jóvenes y empinadas con regímenes de flujo efímeros en ríos cortos. Incluso, el río Shinano, el más largo de Japón, tiene una pendiente pronunciada respecto a otros ríos de la misma longitud alrededor del mundo, lo que puede acrecentar procesos erosivos en las cuencas japonesas y por tanto un mayor requerimiento de manejo de sedimentos (Kantoush y Sumi, 2010).

En el río Kurobe, se ubica Dashidaira, una presa en concreto de 76.7m de altura y con una capacidad instalada de 124 MW que fue construida en 1958. La presa forma un embalse de 2.9 km de largo con una capacidad de almacenamiento inicial de 9.01 millones de m³ y que luego de una década de funcionamiento había perdido el 50.7% de su capacidad original (IHA, 2019). El embalse fue diseñado para recibir una carga de sedimentos anual de 250.000 m³, sin embargo, los valores reales actuales son datos reservados por el operador y no se encuentran disponibles al público (IHA, 2019).

Desde el diseño de la presa, fue considerada la realización de flushing para manejo de sedimentos. Por medio de tres compuertas de fondo de 5m x 5m se esperaban liberar un promedio de 90.000 m³ de sedimento anualmente. A partir del año 1991 se comenzaron las descargas recurrentes de flushing en la presa, obteniendo mejores resultados de remoción de sedimentos a los esperados y permitiendo que el volumen se mantenga en una condición estable (IHA, 2019).

Las descargas son realizadas cada año durante la época de invierno correspondiente a las mayores precipitaciones, entre los meses de junio y agosto, y sin importar qué tanto sedimento se haya depositado en el año anterior (Kantoush y Sumi, 2010). El proceso de vaciado total del embalse se realiza durante un día, liberando un volumen de agua correspondiente al 0.78% del volumen anual con una concentración promedio del flushing de 13 g/l y una concentración máxima de 48 g/l (IHA, 2019). La eficiencia hidráulica del flushing es de alrededor del 2% (Kantoush y Sumi, 2010), este bajo porcentaje indica que los volúmenes de agua para la descarga son considerablemente mayores respecto a los volúmenes de sedimento evacuado, con el fin de garantizar las correctas diluciones. En Dashidaira el flushing tiene un nivel de efectividad del 94% para la remoción de sedimentos depositados (IHA, 2019).

En el año 2001, y con el fin de reducir la depositación de los sedimentos que llegan al embalse transportados por los eventos de creciente, se implementó como estrategia complementaria el enrutamiento de sedimentos o sluicing en embalse. Esta técnica produce concentraciones de sedimento de 12 g/l y una efectividad del 50% (la mitad de los sedimentos transportados por la creciente pasan a través de la presa y no se depositan) (IHA, 2019). En conjunto con el sluicing se ha logrado pasar a través de la presa un volumen cercano un millón de metros cúbicos al año (Kantoush y Sumi, 2010).

Aguas abajo de la presa Dashidaira, se ubica la presa Unazuki, que por su proximidad debe realizarse la gestión de los sedimentos de manera conjunta. El esquema de funcionamiento para el flushing consiste en la reducción de los niveles de los dos embalses por medio de la compuerta de fondo, aplicando simultáneamente técnicas de flushing y sluicing en los embalses durante varias horas y hasta remover el sedimento necesario, finalmente se cierran las compuertas y se reestablecen los niveles de los embalses (IHA, 2019). Es común que luego de una operación de flushing se realice una descarga de lavado con agua clara (sin sedimentos) con el fin de remover el sedimento depositado en exceso en el cauce aguas abajo de la presa (Kondolf et al., 2014). Esta operación de descarga de agua clara requerirá un restablecimiento del nivel del embalse para lograr la disponibilidad de agua clara a través del vertedero de excesos.

El monitoreo en Dashidaira está programado con una campaña durante el mes de mayo, otra durante la ejecución del flushing y una final para el mes de septiembre. Las mediciones incluyen las concentraciones de sedimento y análisis granulométricos aguas arriba y aguas

abajo de la presa, muestras de los sedimentos depositados en el embalse y batimetrías anuales para analizar la variabilidad del fondo del embalse (IHA, 2019).

En Japón, se define la importancia de estudiar la sedimentación en embalses a través del *Technical Criteria for River Works*, desarrollado en 1958 por el Ministerio de Construcción. Se han tenido actualizaciones de este en 1976 y 2005, siendo esta última realizada por el Ministerio de Territorio, Infraestructura, Transporte y Turismo japonés (ICOLD y CIGB, 2019).

Según el *Technical Criteria for River Works* la gestión de sedimentos se debe realizar desde el entendimiento de las características del movimiento de los sedimentos, lo que implica conocer las características del río y realizar monitoreos al sedimento. Debe considerarse la continuidad espacial y temporal de los sedimentos, los cuales se desplazan desde aguas arriba hacia aguas abajo de la corriente y se presentan de manera permanente, tanto en épocas de inundaciones como en periodos normales, modificando la morfología del cauce (ICOLD y CIGB, 2019).

La recolección de información es de gran importancia en Japón. La toma de datos en los embalses comenzó en 1966 con el objetivo de estudiar la sedimentación en el lecho y el sector aguas arriba del embalse para prevenir inundaciones, luego esta información ha sido de gran ayuda para estudiar la gestión de sedimentos. A pesar de que se inició la recolección de información con otro objetivo, hoy Japón reconoce la importancia de contar con estos datos para el estudio de los sedimentos. Para complementar esta información, a partir de 1982, se requiere que los dueños de embalses por almacenamientos por encima de 1 millón de m³ deben reportar las condiciones de sedimentación al Ministerio de Construcción cada año (ICOLD y CIGB, 2019), lo que permite complementar la información disponible para estudios.

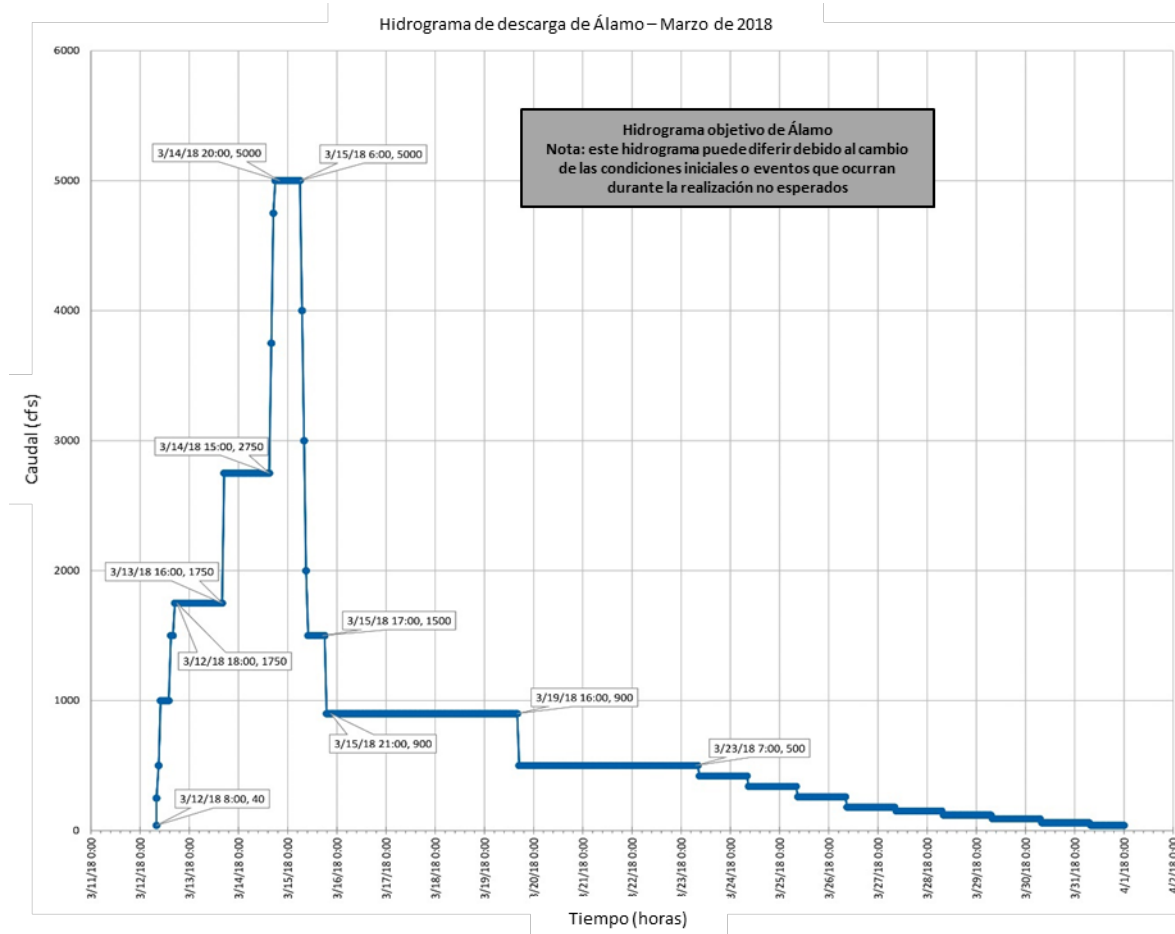
4.1.3 Presa Álamo - Estados Unidos de América

En el estado de Arizona, Estados Unidos, se ubica la presa Álamo, situada sobre el cauce del río Bill Williams (Afluente del río Colorado), la cual fue concebida y construida para el control de inundaciones, pero licenciada posteriormente para la generación de hidroenergía, la conservación del agua, abastecimiento y recreación. La presa fue construida en 1967, con una estructura en tierra y recubierta con roca por ambas caras. A

pesar de contar con los permisos para producir energía, el proyecto nunca se desarrolló en esta etapa y conservó como principal aprovechamiento, el control de inundaciones y la recreación (USACE, 2018).

Dentro de los esquemas propuestos para el mantenimiento del complejo, se estableció que cada 5 años debía realizarse una inspección de la tubería de descarga de fondo para garantizar la integridad de la estructura y realizar el mantenimiento para su conservación. Sin embargo, esta inspección se realizó por última vez en el año 1990. En 2018, para realizar la respectiva inspección y mantenimiento se analizaron diferentes alternativas, dentro de las cuales el flushing resultaba viable por dos condiciones: primero, la descarga de fondo permitiría retirar el sedimento acumulado cerca de la estructura de acceso al túnel de descarga y segundo permitiría reducir el nivel del embalse para que la profundidad de buceo del personal de mantenimiento fuera segura (USACE, 2018).

El concepto más importante del *United States Army Corps of Engineer* (USACE) para la realización de la descarga de fondo fue que las condiciones de descarga debían realizarse bajo condiciones similares a las naturales, por lo que debía imitarse el hidrograma de un pulso de inundación durante la época correcta. Adicionalmente se estableció un caudal pico máximo del hidrograma de descarga basado en las condiciones naturales y ambientalmente aceptables por los organismos, cuyo valor fue fijado en 5.000 ft³/s. De igual forma, el desembalse del agua debía realizarse en un periodo de 20 días, en donde la rama de ascenso del hidrograma debía ser empinada, de aproximadamente 3 días, de tal forma que se permitiera a los organismos responder a la crecida, y una recesión del hidrograma con pendiente más suave, como se muestra en la Ilustración 4-1, permitiendo un comportamiento similar al natural y un regreso gradual del caudal al flujo base. Se determinó que la descarga debía realizarse en época húmeda, teniendo en cuenta que los organismos vivos aguas abajo se encuentran adaptados a los caudales más altos durante este periodo, además para no afectar los periodos de reproducción y migración de las aves (USACE, 2018). Para el final de la descarga, se encargó al USACE para realizar monitoreos a la vegetación y recolectar información que permita estudiar de manera más adecuada futuras descargas.

Ilustración 4-1. Hidrograma esperado en la descarga de marzo de 2018 en Álamo.

Fuente: Adaptado de USACE (2018).

Técnicas categorizadas dentro del dragado hidráulico, como el flushing y sluicing (enrutamiento de sedimentos a través del embalse), se encuentran reguladas a través de la sección 404 del Clean Water Act (CWA) y de la sección 10 del Acto de Ríos y Puertos (RHA), sin embargo, se han producido guías para el manejo de las liberaciones de agua y sedimentos que resulten en el transporte, reducción o eliminación del fondo de sedimentos de los embalses como la Carta de Dirección Regulatoria realizada por el USCE (USACE, 2008). El Department of Army (DA) ha sido el encargado de regular este tipo de actividades y las de los ríos, a través de la aplicación de los Actos anteriormente mencionados.

Para el DA, bajo circunstancias específicas y bajo su autorización es posible reintroducir los sedimentos al cauce del río, siempre que se garantice a través de ciertas acciones, que

se podrán minimizar los efectos adversos potenciales generados por el desarrollo de la actividad. (USACE, 2008).

Los requerimientos para la autorización se basan en la existencia de cambios del proyecto relacionados con: (1) Construcción u operación del complejo, (2) Características del agua donde se descarga, (3) Criterio aplicado a la calidad del agua y (4) Limitaciones aplicables al efluente u otros requerimientos adicionales aplicables que no se habían tenido en cuenta (U.S. Senate, 2002).

Existen tres casos para la regulación estadounidense en cuanto al flushing: la primera, aquellas acciones que no requieren regulación, correspondientes a descargas consistentes con las cargas de entrada de sedimentos al embalse aguas arriba; esto ya que se está manteniendo el caudal sólido del río y no existe un almacenamiento de este en el embalse. En segundo lugar, se encuentran los casos exentos de regulación a través del CWA sección 404, que corresponden a aquellos realizados con propósito de mantenimiento, incluyendo reconstrucción de partes dañadas. Por último, existen aquellas descargas que deberán ser reguladas por el CWA en cabeza del DA, que corresponden a las no mencionadas anteriormente y por tanto las que tendrán un efecto sobre el río aguas abajo de la presa (USACE, 2008).

Es importante recalcar que ni la guía del USACE ni el CWA establece una cantidad específica de sedimento que puede ser considerado como mínimo, por lo que habrá que analizar detalladamente cada uno de los casos de estudio. Para el DA, algunos de los factores que deben ser considerados, corresponden a: el tiempo del año en que se desarrolla la descarga, si corresponde a una época seca o húmeda, el tamaño del río aguas arriba y aguas abajo, el hidrograma natural del sistema, la velocidad de vaciado del embalse, la cantidad natural de sedimento en la cuenca y el potencial de daño en el medio ambiente (USACE, 2008).

Durante la descarga, podrán implementarse acciones que permitan reducir el daño que se pueda presentar aguas abajo de la presa, como el vaciado a través de bombeo, dragado mecánico, disposición adecuada de los sedimentos retirados, realizar las descargas en periodos de grandes volúmenes de agua para favorecer la dilución o complementar con estrategias como la reducción de producción de sedimentos en la cuenca (USACE, 2008).

En Estados Unidos se han creado instituciones para trabajar en el fortalecimiento de las políticas relacionadas con la gestión de sedimentos, como el *Federal Advisory Committee on Water Information* (ACWI) y el *Subcommittee on Sedimentation* (SOS), buscando que las agencias federales desarrollen estrategias para el manejo de sedimentos a largo plazo (Annandale et al., 2018). La recolección de datos es de vital importancia para soportar los estudios sobre gestión de sedimentos, por lo que el USACE y el *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) se han encargado de garantizar la toma de datos (Annandale et al., 2018).

La regulación de las descargas de fondo en los Estados Unidos ha sido llevada a cabo a través de la sección 404 del CWA, como fue mencionado anteriormente. Sin embargo, instituciones como la *National Wildlife Federation* (NWF) ha solicitado que las regulaciones sean aún más exigentes y se incluya una regulación a través de la sección 402 del CWA que incluye el *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES), donde se regula la liberación de contaminantes para fuentes puntuales y se le da particular importancia a la calidad del agua desde el punto de vista fisicoquímico. Esta solicitud ha generado una disputa legal entre la *Environmental Protection Agency* (EPA) y la NWF, ya que la EPA se niega a realizar una regulación de las descargas de los embalses a través del NPDES basados en la diferencia de conceptos de:

1. ¿Qué es considerado un contaminante?
2. El punto de origen del contaminante.
3. La adición de un contaminante.
4. La adición a un cuerpo de agua.

Para defender su postura, la EPA argumenta que parámetros como el oxígeno disuelto o el frío no son contaminantes, que las nuevas condiciones son generadas en el mismo cauce del río y el agua es vertida desde el cauce hacia el mismo cauce. Por otra parte, la NWF argumenta que los embalses generan condiciones que no son naturales en el cauce y enfatizan en la generación de condiciones nocivas para el ambiente aguas abajo del embalse una vez es liberada el agua, adicional que el proceso de retención de agua en el embalse implica un uso de esta y por tanto se debe considerar un vertimiento.

Enion (2011) describe cómo este proceso ha sido llevado a las cortes de Estados Unidos con el fin de obtener una decisión definitiva, concluyendo por su parte que los complejos

presa-embalse son los responsables de liberar contaminantes aguas debajo de la presa y por tanto deben ser regulados por la NPDES. Por ahora, por decisión de las cortes en los diferentes casos la regulación se sigue realizando a través de la sección 404 del CWA.

5.Descargas de fondo en Colombia

Colombia, para el 2015, contaba con una capacidad de almacenamiento de agua en embalses de 16.455 millones de metros cúbicos aproximadamente (IDEAM, 2015). Obras de embalsamiento se encuentran principalmente en la cuenca Magdalena-Cauca, particularmente en los departamentos de Antioquia y Huila, los cuales cuentan con los mayores volúmenes almacenados para generación hidroeléctrica del país. Sin embargo, la pérdida de capacidad en los embalses por retención de sedimentos ha comenzado a ser una preocupación para los operadores de los embalses colombianos, los cuales deben garantizar la operabilidad de estas obras. La necesidad de gestionar los sedimentos allí retenidos los ha llevado a buscar alternativas para recuperar los volúmenes ocupados por los sedimentos depositados. Este es el caso particular del embalse de Calderas y del Bajo Anchicayá, los cuales han iniciado un proceso de autorización para la ejecución recurrente del flushing como método de gestión de sedimento. La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) es la encargada en Colombia de revisar y aprobar este tipo de actividades para garantizar que bajo condiciones específicas no se producirán afectaciones al ambiente tras realizar la descarga de fondo.

5.1 Protocolos de descarga de fondo ejecutados

En Colombia, dos proyectos hidroeléctricos han llevado a cabo descargas de fondo, con el objetivo de establecer un protocolo que les permita gestionar los sedimentos de manera recurrente y garantizar los volúmenes útiles de los embalses y por tanto su operatividad. En el archivo de la ANLA, se encuentra documentado el proceso de estudio y revisión para la aprobación de la descarga de fondo a través de los expedientes LAM 3888 para la central hidroeléctrica Calderas y LAM2230 para la central hidroeléctrica del Bajo Anchicayá. A pesar de que algunos documentos no se encuentren disponibles y se considere una información limitada, este archivo representa la mayor fuente de información para lograr establecer los requerimientos de la Autoridad Ambiental para la autorización de la descarga

de fondo en Colombia. A continuación, se presenta la descripción de cada una de estas obras y el proceso que se ha llevado con cada una para la autorización de la descarga de fondo.

5.1.1 Central hidroeléctrica Calderas

En el nororiente antioqueño se encuentra la central hidroeléctrica Calderas, en jurisdicción de los municipios de San Carlos y Granada, en Antioquia. El proyecto, propiedad de la empresa ISAGEN, empresa privada de generación y comercialización de energía, cuenta con una capacidad instalada de 26 MW. El complejo está compuesto por una presa en concreto 25 m de altura y 152 m de longitud, que almacena un volumen de 330.000 m³ de agua. En el diseño del proyecto se consideró el trasvase de agua desde el río Tafetanes, aumentando el caudal para la generación de energía, por lo que se construyó una presa auxiliar aguas arriba de Calderas que permite la desviación de un caudal aproximado de 1 m³/s a través de un pozo vertical de 53m y una tubería de 1.230 m (CTA e ISAGEN, 2016).

La construcción de la presa fue realizada entre los años 1982-1986, y entró en operación para el año 1988. Sin embargo, en 1990 se presentó un evento de avalancha sobre la quebrada La Arenosa que produjo afectaciones en la casa de máquinas y en los equipos, por lo que se suspendió el servicio, y sólo hasta 1996 fue posible su reapertura luego de las obras de reconstrucción. Para 1998, la casa de máquinas de la central fue blanco de un atentado terrorista, cuyos daños comenzaron a ser reparados en el año 2005, poniéndose en servicio nuevamente en el año 2006 (CTA e ISAGEN, 2016). El tiempo de operación ha sido corto debido a los incidentes anteriormente mencionados, sin embargo, la sedimentación del embalse no se ha detenido y se han presentado algunos problemas de operación asociados a la obstrucción de las rejillas de cribado en la captación lo que genera disminución del caudal captado, paso de sedimentos a los equipos e ingreso de aire a los sistemas mecánicos de generación (ANLA, 2012).

ISAGEN en su necesidad de reducir los sedimentos atrapados en el vaso y realizar labores de mantenimiento, solicitó a la ANLA la autorización para realizar una primera descarga del agua almacenada a través de las compuertas de fondo del proyecto. Esta primera descarga permitió recolectar datos importantes para presentar una propuesta sobre el protocolo que debía seguirse para la apertura de la compuerta de fondo. La primera

apertura fue realizada del 13 al 19 de noviembre del 2013, con propósitos de mantenimiento al canal de aducción y las rejas coladeras. El procedimiento comprendió la apertura del embalse calderas, el levantamiento de las batimetrías del embalse antes y después de la descarga, un programa de monitoreo para variables fisicoquímicas, hidrobiológicas e hidrosedimentológicas, así como un acompañamiento de personal de la ANLA (ANLA, 2014).

Al solicitar la autorización para realizar la descarga, el primer requerimiento por parte de la autoridad ambiental fue el Plan de Manejo Ambiental (PMA), como requisito establecido según la ley 99 de 1993, con el que no contaba el proyecto por dar viabilidad y ejecutar la construcción antes de la fecha en que se convirtiera en requerimiento. Sin embargo, es autorizada una primera prueba piloto para la toma de datos y monitoreo que permitieran estudiar más a fondo posteriores descargas. La definición de la duración de la prueba, el porcentaje de apertura de la compuerta y los caudales de dilución o respaldo hidrológico para controlar las concentraciones de la descarga fueron los primeros requerimientos de definición por parte de la ANLA (ANLA, 2012).

Para autorizar una segunda descarga la Autoridad ambiental requirió un estudio más detallado, basado en los datos recolectados durante la primera descarga, donde se pudieran determinar las posibles afectaciones al medio ambiente y se establecieran las medidas a tomar para mitigarlas. Los criterios iniciales propuestos por ISAGEN para realizar el estudio fueron cuatro: La realización de monitoreos hidrosedimentológicos, hidrobiológicos y fisicoquímicos, un protocolo social y de comunicaciones, un sistema de alarma y un plan de contingencia para los peces (CTA e ISAGEN, 2016).

Con los monitoreos realizados antes y durante la primera descarga, se contaba con la información necesaria para lograr implementar, calibrar y validar un modelo conceptual empírico para representar el lavado de sedimentos en el embalse, con el cual predecir las concentraciones en futuras aperturas. Con estas concentraciones se podrían conocer los posibles impactos al medio ambiente y ajustar las condiciones de apertura en la segunda descarga para mitigarlos.

Los objetivos del estudio realizado por ISAGEN titulado “Desarrollo de un protocolo de apertura de la descarga de fondo en la central hidroeléctrica Calderas” eran los siguientes:

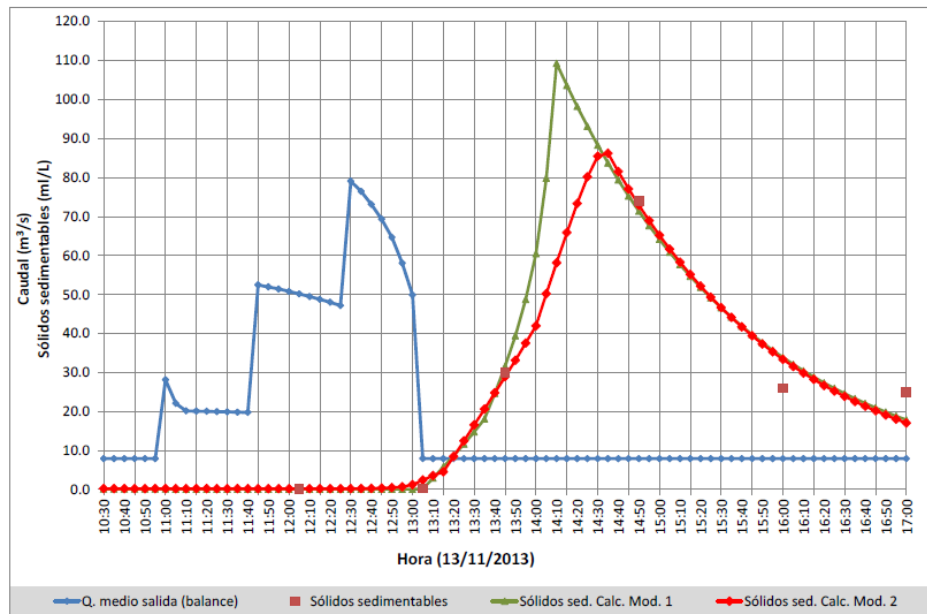
1. Caracterización fisicoquímica, hidrosedimentológica y limnológica del río y el embalse, antes, durante y después de la descarga.
2. Determinar la afectación a comunidades hidrobiológicas.
3. Establecer posibles impactos de la descarga de fondo.
4. Estimar el aporte de sedimentos de la cuenca y su relación con las diferentes condiciones hidrológicas.
5. Conocer las cargas de sedimentos medias y máximas en la cuenca y comparar con las generadas por la apertura de la compuerta.
6. Implementar, calibrar y validar un modelo de lavado de sedimentos.
7. Implementar, calibrar y validar un modelo hidráulico y sedimentológico, con el que a través de la capacidad de transporte se puedan establecer posibles zonas de agradación (sedimentación) durante la descarga.
8. Establecer casos en que se pueden realizar las aperturas y con sus respectivos esquemas de apertura. (CTA e ISAGEN, 2016).

Para el lavado de sedimentos se propusieron dos modelos. El primero estimaba las concentraciones en la descarga en función del nivel, y el segundo en función del nivel del embalse y del área superficial. Luego de correr los modelos se encontró que el primero sobreestimaba los picos, por lo que el segundo fue seleccionado para el estudio (CTA e ISAGEN, 2016). En la Ilustración 5-1 se pueden comparar los resultados de los dos modelos con las concentraciones medidas para la primera descarga.

La cuenca del río Calderas no se encuentra instrumentada por parte del IDEAM, por lo que no se contaban con datos de caudales líquidos ni sedimentos para la cuenca. Sin embargo, para el estudio del régimen hidrológico y sedimentológico se propuso un modelo que para estimar las características típicas de la cuenca. A través de un modelo hidrológico TETIS y a una escala diaria, se estimaron caudales para la cuenca y la producción de sedimentos en la cuenca por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (CTA e ISAGEN, 2016). Como no se contaban con datos de transporte de sedimentos, la calibración del modelo se realizó a través de las batimetrías realizadas en el embalse (Ilustración 5-2), donde los volúmenes de sedimentos producidos en la cuenca en cierto periodo correspondían a la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua del embalse, teniendo en cuenta que para sedimentos finos la eficiencia de atrapamiento no es 100% y puede ser establecida a través de metodologías como la Churchill (1948), en donde a

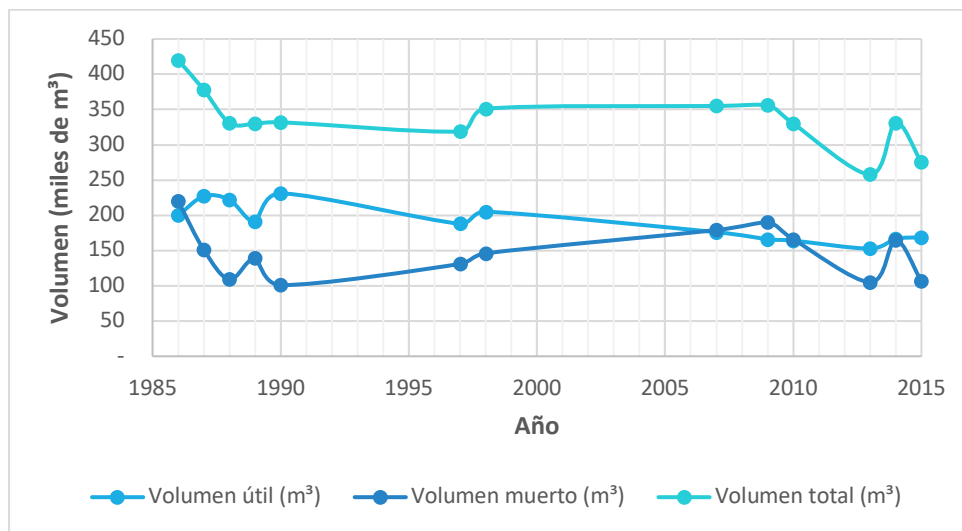
través del índice de sedimentación, función de la gravedad, la capacidad del embalse, el caudal medio de afluencia y la longitud del embalse, es posible determinar el porcentaje de sedimento fino que pasa a través del embalse.

Ilustración 5-1. Resultados de los dos modelos implementados para estimar las concentraciones en la descarga de fondo del embalse Calderas.



Fuente: Tomado de CTA e ISAGEN (2016).

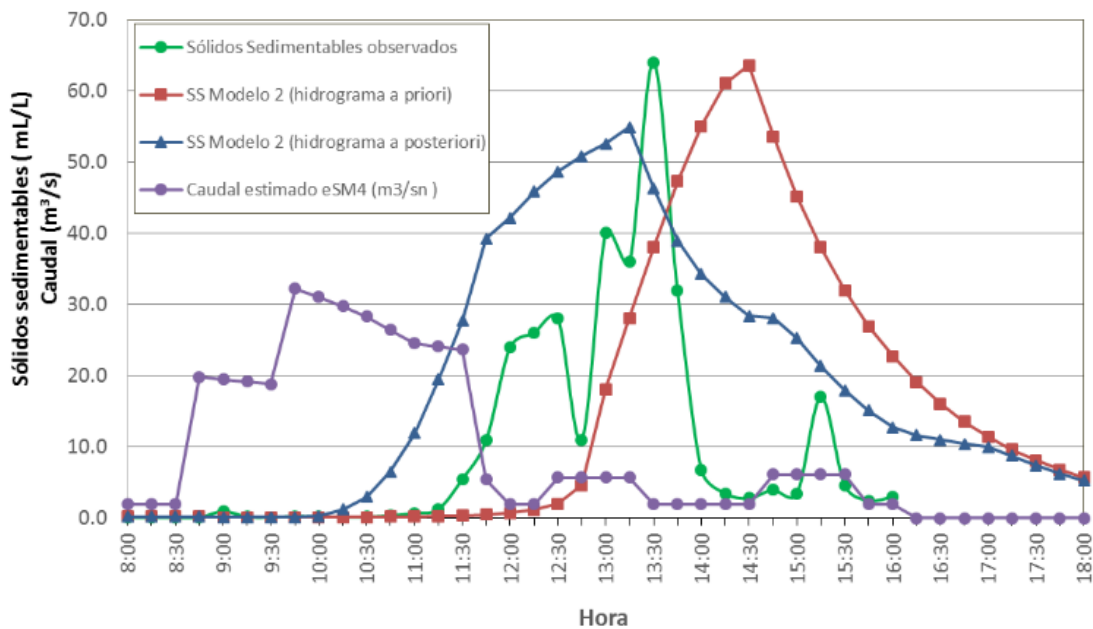
Ilustración 5-2. Evolución del volumen del embalse Calderas estimado por medio de batimetrías.



Fuente: Adaptado de CTA e ISAGEN (2016).

Un desembalse gradual que permita una dilución correcta de los sedimentos a través de la regulación adecuada del porcentaje de apertura de la compuerta garantiza condiciones adecuadas para el ecosistema aguas abajo, prestando particular atención a los cambios que pudieran generarse durante la etapa final del vaciado donde se presentan las mayores concentraciones. Tener un esquema de apertura que permita ajustarse según los caudales de entrada al embalse es muy importante, teniendo en cuenta la difícil predicción de condiciones que se tendrán durante la descarga y para la cual se realizan las simulaciones. Para la segunda descarga en Calderas, el modelo estaba calculado para ciertas condiciones de caudal a la entrada que no se presentaron, lo que demostró variabilidad en los resultados reales respecto al modelo (Ver Ilustración 5-3). Lograr establecer comportamientos válidos para rangos de caudal (como condición inicial del modelo) permite tener en cuenta las incertidumbres que pudieran presentarse sin comprometer las adecuadas condiciones para el ambiente y ecosistemas aguas abajo durante la descarga.

Ilustración 5-3. Comparación entre los sólidos sedimentables modelados antes de la descarga, con el modelo ajustado al caudal real y los observados durante la prueba.



Fuente: Tomado de CTA e ISAGEN (2016).

Para garantizar el caudal suficiente para realizar la correcta dilución de los sedimentos, la ANLA solicitó se realizara la descarga durante la época de invierno, en donde las altas precipitaciones permitieran tener los caudales de respaldo adecuados. De igual forma esto

beneficia a la recuperación rápida del volumen del embalse para continuar con la generación de energía. La alta tasa de liberación de sedimentos aguas abajo podrá producir cuñas de sedimentos en los que por las características morfológicas del río no sea posible transportar la totalidad de sedimentos liberados, para lo cual la ANLA requirió se estableciera un protocolo para el retiro de estas barras. Para el monitoreo, la ANLA consideró que debía incluir no solo los parámetros fisicoquímicos del río sino también del embalse, y que se debían realizar mediciones antes, durante y después de la descarga para contar con información de la evolución de los parámetros. Estos muestreos debían realizarse en cada uno de los puntos de monitoreo, previamente concertados con la autoridad ambiental, a la misma hora para que fueran comparables entre estaciones de medición. Las técnicas de medición y muestreo debían ser las adecuadas y estar basadas en estándares internacionales para obtener datos representativos (ANLA, 2014).

Dentro de los requerimientos para establecer los posibles impactos ambientales y su mitigación, la ANLA hizo especial énfasis en los procedimientos de muestreo y análisis de comunidades hidrobiológicas, los criterios de selección y caracterización de los tramos de estudio, la implementación de métricas basadas en el estado sanitario de las especies ícticas y la representatividad de los distintos tipos de meso hábitats (ANLA, 2014). La afectación de las comunidades hidrobiológicas era el punto de partida para establecer los impactos ambientales de la liberación de los sedimentos.

Al final del estudio (CTA e ISAGEN, 2016) se establecieron 5 casos o escenarios para los cuales se realizaría una descarga de fondo en Calderas:

Caso I – Remoción de sedimentos en el canal de aducción: Se asemeja a la primera prueba piloto realizada en Calderas, cuyo objetivo era limpiar el canal de aducción, para lo cual es necesario conservar el embalse vacío durante 3 a 5 días mientras se realizan labores de remoción mecánica de los sedimentos hacia el canal principal. Esta remoción mecánica es necesaria considerando la geometría del embalse y la posición de la estructura de captación respecto al canal principal formado durante la descarga de fondo. Este vaciado para mantenimiento del canal de aducción será necesario una vez las rejas de captación se encuentren colmatadas en un 40% en altura.

Caso II – Limpieza de las rejas coladeras: este esquema es similar a la segunda prueba piloto, y comprende una maniobra de aproximadamente 8 horas, mientras se realiza el

vaciado del embalse y se realiza la limpieza de las rejjas de la captación. En un día podrá ejecutarse el protocolo sin necesidad de realizar un vaciado total del embalse, sino hasta los niveles requeridos para la limpieza, lo que genera una disminución en los sedimentos liberados. La apertura de las compuertas de la descarga de fondo deberá realizarse regularmente, incluso varias veces al año.

Caso III – Contingencia por crecida extrema: este esquema se ejecuta para mantener las condiciones de seguridad de la presa, garantizando que no existirá un sobrepaso del agua a través de esta, lo que podría generar socavaciones no esperadas en la base de la presa u otro fallo no contemplado. Por tratarse de un esquema de contingencia no existiría un protocolo de comunicación previa, sino que existiría un aviso inmediato a través de alarma y no se realizarían monitoreos antes, durante ni después de la descarga.

Caso IV – Contingencia por extrema sequía: en caso de que el régimen hidrológico de la cuenca se vea afectado por un fenómeno como El Niño, por ejemplo, y genere una temporada de sequía prolongada, podría ser necesario el mantenimiento de las rejjas coladoras para garantizar la operación de la central y la transferencia de caudal aguas abajo. Para este caso, incluso en una temporada no invernal se propone la realización de la descarga, pero como una medida de contingencia.

Caso V – Crecidas ordinarias: Permitir el tránsito de sedimentos a través del embalse durante las crecidas ordinarias, permitiendo que los volúmenes de sedimentos transportados por el río no sean retenidos en el embalse, sino que sigan su curso natural. Esta estrategia es conocida como sluicing o enrutamiento de sedimentos a través del embalse, sin embargo, para su realización es necesario el vaciado del embalse.

El esquema de operación para cada uno de los casos anteriormente descritos contempla un desembalse de manera gradual y controlado, la limitación del caudal máximo de salida al controlar el porcentaje de apertura de la compuerta, procurar pocos cambios en el porcentaje de apertura de la compuerta y realizar los ajustes de ésta si los caudales presentados durante la ejecución son diferentes a los inicialmente simulados con el fin de obtener resultados similares (CTA e ISAGEN, 2016).

En un principio el objetivo principal del protocolo de la descarga de fondo era la apertura recurrente de la compuerta para labores de mantenimiento y conservar el volumen de

almacenamiento. Sin embargo, a lo largo del proceso de revisión y autorización del protocolo por parte de la autoridad ambiental terminó definido para 5 casos de los cuales ninguno se encuentra orientado a la remoción de sedimentos para recuperar la capacidad de almacenamiento o a reestablecer las condiciones de régimen de sedimentos del río.

5.1.2 Central hidroeléctrica Anchicayá

La central hidroeléctrica de Anchicayá comenzó su construcción en 1950 y entró en operación en el año 1955 con dos de las cuatro turbinas tipo Francis diseñadas. Las dos restantes fueron habilitadas en 1956 para una capacidad total instalada de 79 MW (EPSA S.A., 2007). El complejo se encuentra ubicado en el departamento del Valle del Cauca a 105 km de la ciudad de Buenaventura, sobre el cauce del río Anchicayá y aguas abajo de la confluencia del río Digua, y se encuentra dentro del área de reserva forestal del pacífico cerca al parque Nacional Natural Farallones de Cali (MAVDT, 2006).

Está compuesta por una presa de concreto tipo arco de gravedad de 60m de alto y 206.5m de largo de estribo a estribo, cuenta con un vertedero tipo salto de ski de 26m de ancho, 53m de alto y 141m de largo diseñado para descargar un caudal máximo de 5700 m³/s. La presa se encarga de generar un embalse de 18 Ha de espejo de agua cuya capacidad de diseño es de 5.1 millones de m³, de los cuales, 2.8 millones de m³ es volumen muerto. El agua embalsada es conducida a través de un túnel de 1367m de largo y 6.3m de diámetro hacia la casa de máquinas, donde se realiza una transición a tres tuberías de acero de 3m de diámetro. La presa se encuentra equipada con una descarga de fondo compuesta por dos túneles de 1.54m x 1.8m, cada uno con una compuerta principal y una compuerta de guarda en la recámara rectangular de acceso que conecta a los dos túneles (MAVDT, 2006).

El río Anchicayá nace en los farallones de Cali a una altura aproximada de 3.400 m.s.n.m., una zona cuya humedad relativa está por encima del 95% y las condiciones hidrológicas están dominadas principalmente por las masas de aire que llegan desde el océano pacífico produciendo precipitaciones por encima de los 4.000 mm/año (EPSA S.A., 2007). Las altas precipitaciones, sumado a las altas pendientes, debilidades geológicas, deforestación, explotaciones mineras y técnicas inadecuadas de cultivos han causado en la cuenca una producción importante de sedimentos que resultan acumulados en el embalse (EPSA S.A., 2002). Anualmente la cuenca, hasta el punto de la presa, produce alrededor de 3 millones

de m³ de sedimentos, de los cuales el 50% salen por el rebose de la presa, que no cuenta con tiempos de retención altos, por lo que el sedimento fino permanece suspendido y es liberado aguas abajo. El 50% restante es retenido y sedimentado en la presa. Con volúmenes tan altos de sedimento se han desarrollado estrategias para trasladar el sedimento aguas abajo de la presa (MAVDT, 2010a).

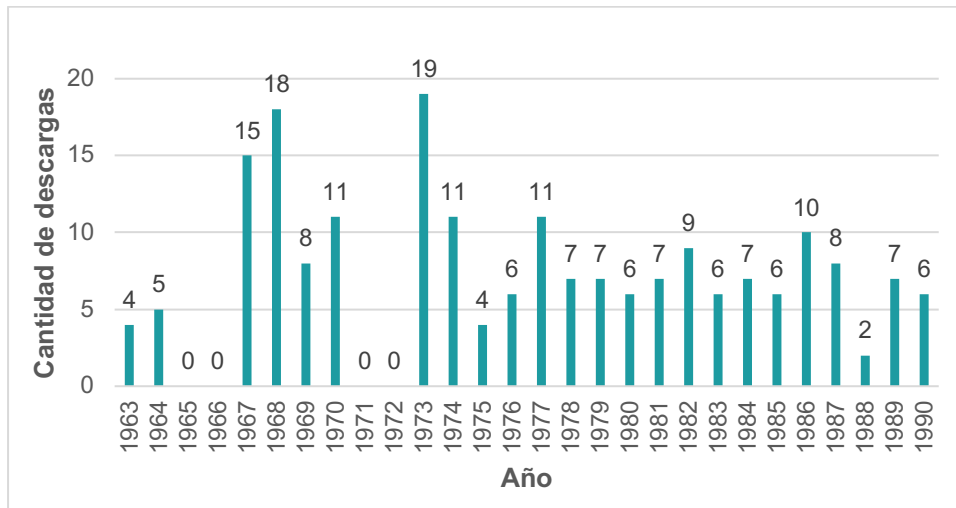
Del 50% de volumen de sedimentos retenido, el 30% es evacuado a través de una draga flotante que opera entre los 100m y 400m de la presa, logrando retirar sedimentos depositados hasta 10m sobre la superficie y una pala tipo Sawerman localizada a 400m encargada de atrapar sedimentos gruesos. Los sedimentos retirados por estos métodos son bombeados aguas abajo de la presa a través de una tubería de 1.5m de diámetro. El 15% es liberado a través de descargas de fondo recurrentes y el 5% restante es liberado a través del caudal turbinado en la central (sedimentos únicamente finos) (MAVDT, 2010a).

Con los altos volúmenes de sedimento que llegan a la presa, para el año 1960, tan sólo 5 años después de su entrada en operación, el embalse ya presentaba niveles de sedimentación críticos que comprometían la operabilidad del proyecto. Por esto, la sociedad Central Hidroeléctrica del Río Anchicayá Ltda y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) debieron implementar estrategias para el manejo de sedimentos dentro de las que se incluían el dragado mecánico y el dragado hidráulico a través de descargas recurrentes de la descarga de fondo del proyecto (MMA, 2001). Desde el inicio de su operación se realizaron en promedio 7 descargas anuales, como se muestra en la Ilustración 5-4, permitiendo estabilizar el volumen útil del embalse entre 0.5 y 1 millón de m³ (MAVDT, 2010b).

Sin embargo, para el año 2001, durante el proceso de apertura de la descarga de fondo, cuyo objetivo era realizar el mantenimiento a las rejillas de la captación, la extracción de una pala de la draga del fondo del embalse y la recuperación del volumen útil del embalse, se realizó una descarga de alrededor de 500.000 m³ de sedimento, produciendo impactos negativos aguas abajo de la presa dentro de los que se incluyen la afectación de las especies hidrobiológicas del río y la zona de ribera, así como a la comunidad ribereña compuesta por alrededor de 3.500 personas. Luego de esta descarga, una investigación fue abierta por parte del entonces Ministerio de Medio Ambiente (MMA) hacia la empresa

de Energía del Pacífico S.A. (EPSA) encargada de la operación y generación de la Central Hidroeléctrica de Anchicayá (MMA, 2001).

Ilustración 5-4. Cantidad de descargas de fondo realizadas por año en el embalse de Anchicayá.



Fuente: Adaptado de MAVDT (2010b).

La CVC concluyó que EPSA no consultó a la autoridad ambiental para realizar las labores de mantenimiento y que esta apertura de la descarga produjo una afectación negativa en todas las formas de vida del río Anchicayá. Ante esta situación el MMA solicitó a la EPSA entregar un informe con las afectaciones producidas por la descarga, el Plan de Manejo Ambiental (PMA), el plan de actividades para la reubicación de la ictiofauna, así como la necesidad de una viabilidad por parte del MMA ante cualquier actividad futura de mantenimiento en la presa o el embalse.

Dentro de las afectaciones determinadas por la CVC generadas por EPSA se encontraron:

1. Desequilibrio total del ecosistema, incluyendo la desaparición del sustrato para los microorganismos que sirven de alimento a los peces.
2. Deterioro de los ecosistemas acuáticos por el taponamiento de poros del sedimento grueso que sirven como hábitat para diferentes organismos.
3. Desequilibrio del sistema acuático por aumento de sólidos suspendidos y turbiedad del agua que afectaron las actividades fotosintéticas de los organismos en el río.
4. Afectación de los procesos de respiración y transpiración en organismos que saturan oxígeno a través de branquias por la obstrucción de partículas sólidas.

5. Afectación de las comunidades aguas abajo de la presa. (MMA, 2001)

Teniendo en cuenta la necesidad de la descarga de fondo para la gestión de sedimentos en el embalse y de conservar la operabilidad de la central, EPSA solicitó al entonces MMA la autorización para realizar la descarga recurrente de sedimentos a través de esta compuerta. Justificando esta actividad para evitar problemas potenciales como la colmatación del embalse y cierre de la central por taponamiento de la captación produciendo un racionamiento del servicio eléctrico en la ciudad de Buenaventura (Principal puerto marítimo del pacífico en Colombia), cuya red depende de la generación de la central (EPSA S.A., 2002). El MMA solicitó y autorizó realizar una serie de pruebas piloto que permitieran establecer las condiciones adecuadas para que las descargas de sedimentos no produjeran efectos negativos sobre los ecosistemas aguas abajo de la presa (MMA, 2003). De igual forma, con las pruebas piloto se deberían establecer la magnitud de las concentraciones, calibrar las ecuaciones utilizadas para estimar los caudales sólidos descargados y definir los valores máximos permisibles en la descarga (MAVDT, 2010a).

Como criterios generales para apertura de la descarga de fondo, se tuvo en cuenta el mantener el balance los sedimentos a lo largo del cauce del río, así como la realización de labores de mantenimiento en estructuras que pudieran resultar afectadas por la sedimentación en el vaso. No alterar las condiciones naturales del río, contribuir a la sostenibilidad ambiental del ecosistema y reducir la vulnerabilidad del sistema de generación, también fueron las bases para establecer un sistema de descargas recurrentes del embalse del Bajo Anchicayá (MMA, 2003).

La primera descarga fue realizada el 2 de diciembre del 2004, donde EPSA proponía 3 escenarios:

- Escenario 1: realizar la descarga para realizar monitoreos de las concentraciones de sedimentos y calibrar las ecuaciones empíricas utilizadas para estimar el caudal sólido de descarga.
- Escenario 2: Operación normal de la descarga.
- Escenario 3: Operación de contingencia de la descarga.

Las descargas propuestas conservan un balance de masas entre la entrada y la salida del embalse, es decir que los caudales son iguales y por tanto no debería existir un descenso en la cota del embalse. Esto quiere decir que el procedimiento realizado corresponde a una descarga de fondo con vaciado parcial o flushing a presión, lo que implica que los volúmenes de sedimento liberado no serán tan altos en comparación a un desembalse total del volumen de agua almacenada, como lo propone Morris y Fan (1998).

Para esta primera prueba se programaron 3 descargas diarias de 20 minutos de duración cada 5 horas, comenzando a las 8 a.m. seguido de la 1:00 p.m. y la final a las 6:00 p.m. con un programa de monitoreo durante la descarga; si se superaba una concentración de sólidos sedimentables de 6.000 mg/l la prueba debía suspenderse, de lo contrario las descargas cada 5 horas se seguirían realizando. EPSA calculó que para retirar el material que afectaba la captación de la central se requerirían 38 días de descargas (MMA, 2003).

Dentro del esquema de monitoreo propuesto para la prueba, fueron medidos parámetros fisicoquímicos como: nivel de agua en el embalse, caudales, temperatura, pH, conductividad, turbidez, concentración de sólidos totales, DBO, DQO, oxígeno disuelto, hierro y mercurio (MAVDT, 2010a).

En el informe presentado por EPSA al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) se describió que no se registraron impactos negativos durante la primera prueba piloto de la apertura de la descarga de fondo (MAVDT, 2006). En general, el flushing a presión era la estrategia que se estaba llevando a cabo en el embalse, a diferencia de la descarga realizada en el 2001, donde se documentó un flushing con vaciado total, además de una asistencia mecánica para trasladar los sedimentos depositados en el fondo hacia el canal formado por la salida del agua almacenada a través de la compuerta de fondo (MMA, 2001). Este cambio en el tipo de flushing produjo concentraciones por encima de las normales y como consecuencias afectaciones importantes aguas abajo de la presa.

En general, durante el proceso de revisión y aprobación de la primera prueba piloto por parte del MMA se generaron algunos requerimientos básicos para la presentación del estudio y para ser aplicados durante el desarrollo de la descarga. Se realizó particular énfasis en el monitoreo de calidad del agua, tanto para aguas arriba como aguas abajo de

la presa, donde se debía incluir el muestreo hidrobiológico en el río y en el embalse, así como la caracterización fisicoquímica en 9 estaciones de medición.

El MMA consideró que una sola prueba piloto de la descarga no era suficiente para lograr establecer un programa o protocolo de descarga de fondo recurrente para la gestión de sedimentos en el embalse de la central del Bajo Anchicayá, por lo que solicitó una segunda prueba piloto que se debía realizar durante la época invernal de tal forma que se garantizaran las diluciones correctas. Los objetivos propuestos para esta segunda prueba fueron:

- Comprobar las mediciones de la primera prueba.
 - Calcular el volumen de sedimentos liberados a través de batimetrías pre y post descarga.
 - Corroborar que el efecto de las concentraciones de sedimentos es temporal.
 - Corroborar el valor máximo de la concentración en descargas sucesivas.
 - Corroborar que los efectos de desembalses sucesivos no son sinérgicos.
 - Comprobar si detener la prueba súbitamente reduce los efectos negativos.
- (MAVDT, 2010a)

En este momento, y luego de haber realizado pruebas piloto para la apertura de la descarga de fondo, no se ha establecido un protocolo aprobado por la Autoridad Ambiental para las descargas recurrentes como alternativa de gestión de sedimentos para el embalse del Bajo Anchicayá.

5.2 Requerimiento de la autoridad ambiental

En Colombia, las regulaciones ambientales se encuentran a cargo del actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Este ministerio ha ido evolucionando a través de los años y de las administraciones nacionales, quienes han modificado o agrupado algunas de sus labores con base en sus objetivos para la administración estatal de turno. Este ministerio fue creado en el año 1993 por medio de la ley 99 de 1993 como Ministerio de Medio Ambiente (MMA), para el año 2002 se fusionó con el Ministerio de Vivienda formando el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y para el 2011 fueron nuevamente separados en el Ministerio de Vivienda y el Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Con la separación entre estos ministerios fue creado un organismo técnico que se encargara del estudio, aprobación y expedición de licencias, permisos y trámites, y que a su vez contara con autonomía administrativa y financiera. A través del Decreto 3573 del 2011 del Departamento Administrativo de la Función Pública se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Actualmente es la ANLA la encargada de trámites, permisos y licencias ambientales a nivel nacional, así como del control ambiental, cuyos propósitos son descritos en el artículo 2.22.3.9.11 del Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015:

1. Verificar la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo implementadas en relación con los Planes de Manejo Ambiental (PMA).
2. Constatar y exigir el cumplimiento de todos los términos, condiciones y obligaciones.
3. Corroborar el comportamiento de los medios bióticos, abióticos y socioeconómicos.
4. Revisar los impactos acumulativos generados por los proyectos.
5. Verificar el cumplimiento de los permisos, concesiones o autorizaciones.
6. Verificar el cumplimiento de la normatividad ambiental.
7. Verificar hechos y medidas ambientales implementadas para corregir contingencias ambientales.
8. Imponer medidas ambientales adicionales para prevenir, mitigar y corregir impactos. (ANLA, 2015, p37)

Para el caso particular del manejo de sedimentos, no existe en el país una normativa particular en donde se establezcan parámetros o procedimientos sobre los cuales los sedimentos deban ser manejados. Por esto, la ANLA debe basarse en la legislación existente, que aborda de manera muy general el tema de sedimentos y su manejo.

La normativa más general comienza desde la Constitución Política de Colombia de 1991, destacando los siguientes artículos:

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las

áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o 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 las zonas fronterizas. (Const., 1991).

Según estos artículos es claro que el Estado debe velar por la protección del medio ambiente, sin embargo, no permiten analizar de manera detallada y específica la viabilidad de una descarga de fondo de un embalse.

En 1974, a través del Decreto 2811 se establece el “Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente” con el fin regular y preservar los recursos naturales (como el agua, la atmósfera, el suelo, fauna, flora, entre otros) del territorio nacional como función del gobierno nacional. En el código, la sedimentación en cursos y depósitos de agua es considerada como contaminación, según el literal (e) del Artículo 8, por lo que los sedimentos se convierten en objeto de regulación (Macías Gómez, 2015).

En el 2010, y como instrumento direccionador para la gestión integral del recurso hídrico es presentada la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGHI), que con un horizonte de 12 años propone 6 objetivos con sus respectivas estrategias para que las instituciones y usuarios que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico dirijan sus acciones.

Los objetivos están enfocados a:

- *Objetivo 1. OFERTA: Conservar los ecosistemas y los procesos hidrológicos de los que depende la oferta de agua para el país.*
- *Objetivo 2. DEMANDA: Caracterizar, cuantificar y optimizar la demanda de agua en el país.*
- *Objetivo 3. CALIDAD: Mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico.*

- *Objetivo 4. RIESGO: Desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua.*
- *Objetivo 5. FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL: Generar las condiciones para el fortalecimiento institucional en la gestión integral del recurso hídrico.*
- *Objetivo 6. GOBERNABILIDAD: Consolidar y fortalecer la gobernabilidad para la gestión integral del recurso hídrico. (MAVDT, 2010c)*

A pesar de la directa relación que se presenta entre el recurso hídrico y los sedimentos, la política no incluye criterios ni reglas para enfrentar el manejo de sedimentos en los embalses (Macías Gómez, 2015).

Para el 2015, el MADS a través de la Resolución 631 de ese mismo año se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. A pesar de que esta norma no detalla nada sobre la gestión de sedimentos dentro de su contenido, sí se tiene en cuenta como uno de los parámetros los “sólidos sedimentables”, por lo que la autoridad debe regular el vertimiento de sedimentos a fuentes hídricas.

Según la normativa anteriormente presentada, es posible afirmar que en Colombia se cuentan con políticas para la protección de recursos naturales y gestión de algunos de ellos como lo es el agua, sin embargo, no se cuenta con una política particular para la regulación y gestión de los sedimentos. Por esto, el MADS ha estado trabajando en una “*Propuesta de lineamientos para el manejo sostenible de sedimentos en embalses*”, la cual ha sido orientada a establecer los requisitos mínimos necesarios para la elaboración de un protocolo de manejo de sedimentos en embalses, con miras a la minimización de los impactos sobre los siguientes aspectos de los cuerpos de agua: geomorfología, calidad de agua y sedimentos, régimen de sedimentos, ecología y aspectos sociales (Parra González, 2017).

Por ahora y mientras se establece esta política para orientar y regular el manejo de los sedimentos, particularmente en los embalses, los encargados de aplicar los criterios para la revisión y aprobación de actividades como el flushing han sido el MMA (1993-2002), MAVDT (2002-2010) y ANLA (2010-Actualidad), cada una de estas instituciones dentro de su periodo de vigencia.

Con base en los casos estudiados de la Central de Calderas y del Bajo Anchicayá, es reconocible que los criterios aplicados para la revisión y autorización de las descargas de fondo no son los mismos. Esto se debe a que no existe una política establecida para este tipo de procedimientos, por lo que su revisión se basa en el criterio y experiencia de los profesionales encargados para dar posterior aprobación. Con esta práctica se puede incurrir en que algunos criterios que puedan tener una gran relevancia posiblemente no sean tenidos en cuenta. Adicionalmente, la existencia de una política garantizaría tanto para la parte solicitante como para la parte revisora una mayor agilidad en los procesos, ya que se encontró durante la revisión de casos que algunos de los requerimientos exigidos por la autoridad ambiental son comunicados al solicitante tiempo después de haber iniciado el trámite y no desde el inicio, lo que se traduce en reprocesos.

Particularmente para la autorización de apertura de la descarga de fondo y teniendo en cuenta los expedientes de los proyectos Calderas y el Bajo Anchicayá se han podido determinar los siguientes requerimientos por parte de la autoridad ambiental:

1. Estudio del régimen hidrológico.
2. Estudio del régimen hidrosedimentológico del río.
3. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua del río en diferentes puntos de medición debidamente validados por la autoridad ambiental, incluyendo aguas abajo y aguas arriba de la presa, así como en el embalse.
4. Monitoreo de comunidades hidrobiológicas.
5. Medición de volumen de sedimento liberado por medio de batimetrías antes y después de la descarga.
6. Desarrollo durante época de invierno para garantizar los caudales de respaldo para una correcta dilución de los sedimentos.
7. Simulación de condiciones cercanas a las naturales de inundación.
8. Definición y verificación de las concentraciones máximas de sedimentos.
9. Criterios de suspensión de la apertura con variaciones negativas en parámetros de oxígeno disuelto, concentración de sólidos suspendidos o conductividad.
10. Evaluación de los impactos ambientales puntuales y acumulativos por la descarga de sedimentos.
11. Evaluación de los cambios morfológicos producidos por la descarga de sedimentos.
12. Calibración del porcentaje de apertura de la compuerta.

13. Análisis del índice de integridad del hábitat.
14. Realización de pruebas piloto para el correcto estudio y calibración de modelos matemáticos para predecir los niveles de concentración en la descarga.
15. Protocolos de suspensión de la prueba y sistemas de alarma en caso de emergencia.

Es importante tener en cuenta que estos requerimientos o criterios corresponden a productos finales que permitan ser la base para la toma de decisiones, pero que su desarrollo debe estar debidamente fundamentado y justificado. En ingeniería existen diversidad de metodologías para obtener determinado resultado, algunos empíricos, otros teóricos, sin embargo, es importante que se conozcan las limitaciones y ventajas de cada uno de los métodos para realizar una selección y aplicación adecuada, de tal forma que se produzcan resultados relevantes que representen las condiciones reales del proyecto.

A pesar de que cobra principal relevancia la selección de la metodología para llevar a cabo el estudio, el mejor método o modelo para realizar por ejemplo un estudio hidrológico, de régimen de sedimentos del río entre otros, deberá definirse para cada caso particular y será responsabilidad de las autoridades ambientales reguladoras validar y aprobar los estudios presentados.

6. Comparación de las consideraciones hidrosedimentológicas para la gestión de embalses en el exterior y en Colombia a través del flushing.

Luego de estudiar las condiciones más relevantes para la ejecución de la descarga de fondo en tres embalses en diferentes partes del mundo y dos en Colombia, se propone realizar un análisis comparativo que permita establecer las principales diferencias y similitudes que existen entre estos casos, las cuales están asociadas al propósito de la ejecución, las características del embalse, las condiciones de la ejecución del flushing y a los resultados y efectos producidos por dicha descarga. Lo anterior, enfocado en las consideraciones y criterios aplicados a los casos del exterior y los requerimientos de la Autoridad Ambiental colombiana para su regulación, tratados desde el punto de vista hidrosedimentológico.

6.1 Propósito del flushing

A partir de la revisión de los casos se destacan dos propósitos generales por los cuales ejecutar una descarga de fondo: el primero responde a una problemática de carácter mundial: la pérdida de capacidad de almacenamiento en los embalses por efecto de la sedimentación. Se realiza el flushing con el objetivo de remover los sedimentos depositados y recuperar parcialmente el volumen del embalse. Ejecutar descargas de fondo de manera recurrente busca reducir la pérdida de volumen a través de los años, extendiendo su vida útil. En las presas de Génissiat y Dashidaira se implementó el flushing con este fin. Al implementar el flushing para la remoción de sedimentos es recomendable utilizar flushing con vaciado total del embalse, ya que permite una mejor remoción de los sedimentos allí depositados gracias a los esfuerzos de corte generados por el agua fluyendo a superficie libre, los cuales se encargan de socavar el fondo del embalse. Sin

embargo, casos como el Bajo Anchicayá permiten demostrar que se puede utilizar el flushing a presión como estrategia para la remoción de sedimentos, pero con tiempos de ejecución (38 días para el caso del Bajo Anchicayá) mucho mayores a los que se tendrían con un vaciado total (cercano a un día como para el caso de Calderas y Dashidaira).

El segundo propósito corresponde a la disminución del nivel del embalse para realizar labores de mantenimiento y limpieza en las estructuras anexas como la captación para la generación de energía e incluso la misma descarga de fondo. Para el caso de Calderas al igual que en Álamo, el flushing se realizó con un propósito de mantenimiento. A pesar de que en un inicio la central Calderas solicitó a la autoridad ambiental la autorización para realizar las descargas con el propósito de retirar sedimento y propuso un esquema de flushing con vaciado total, durante el proceso cambió el propósito a uno de mantenimiento las estructuras de captación de agua, proponiendo en 5 escenarios en los que realización de flushing sería viable y dentro de los cuales ninguno tenía como objetivo la remoción de sedimentos depositados en el embalse. En el caso de Álamo se realizó el vaciado parcial del embalse para conseguir los niveles seguros que permitieran actividades de buceo para la inspección y mantenimiento del túnel y la compuerta de fondo de la presa. Las estructuras de captación, generalmente ubicadas en niveles altos del embalse, son las principalmente afectadas por efecto de la sedimentación. Para realizar su mantenimiento y teniendo en cuenta su posición, para descubrirlas de agua y limpiarlas es necesario únicamente realizar un vaciado parcial del embalse, permitiendo conservar un volumen de agua retenido, haciendo más rápido el proceso de vaciado y relleno y disminuyendo los tiempos fuera de operación del embalse.

El tipo de flushing incidirá principalmente en el tiempo de vaciado del embalse, en el caudal líquido descargado, en las concentraciones de sedimento que se producen en el flujo y en el volumen total de sedimento lavado del fondo del embalse. Desde luego, decidir el tipo de flushing para un propósito particular determinará las condiciones de la ejecución del proceso; si bien existen recomendaciones, no hay un criterio único para definir el tipo de flushing según el propósito. En Colombia la autoridad ambiental no ha realizado distinciones concretas para el tipo de flushing a ejecutar ni requerimientos particulares para su regulación.

6.2 Características del embalse

Se han encontrado características geométricas diversas en los embalses analizados. Los volúmenes de almacenamiento están entre los 330.000 m³ y los 1.227,6 millones m³. Cuatro de los casos cuentan con volúmenes relativamente bajos, Calderas con 330.000 m³, Bajo Anchicayá con 5,1 millones de m³, Dashidaira con 9,01 millones de m³ y Génissiat con 56 millones de m³, en comparación con Álamo, que tiene un volumen muy superior al resto (1.227,6 millones m³). Morris y Fan (1998) recomiendan el flushing como estrategia para la gestión de sedimentos en embalses largos y angostos, ya que es en el canal principal que se forma donde se socavan los sedimentos. De esta forma se logra abarcar un área superficial del fondo del embalse mayor para la remoción de sedimentos. En los casos de estudio, las longitudes de los embalses van desde los 2.5 km hasta los 23 km. En los casos de Génissiat, Dashidaira, Calderas y Bajo Anchicayá los embalses se encuentran en zonas encañonadas, por lo que el ancho de los embalses es similar a la longitud de la presa, entre los 130m y 300m, lo que los hace embalses angostos. A medida que se tiene una mayor relación L/B, que describe la angostura del embalse, la efectividad del flushing para remover sedimentos será mayor (Morris & Fan, 1998), las relaciones L/B para los casos estudiados se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Características geométricas de los embalses considerados.

Presa/Embalse	Longitud (L)	Ancho promedio del embalse (B)	Relación L/B
Génissiat	23 km	240 m*	95
Dashidaira	2,9 km	130 m*	22
Álamo	6,6 km*	1.460m*	4
Calderas	1,75 km**	152 m	11
Bajo Anchicayá	2,5 km	206 m	12

Las fuentes de la información aquí presentada se encuentran relacionadas en la descripción de cada caso.

* Información aproximada obtenida de Google Earth.

** Información aproximada obtenida de Basemap ArcGIS – Esri.

Fuente: Elaboración propia.

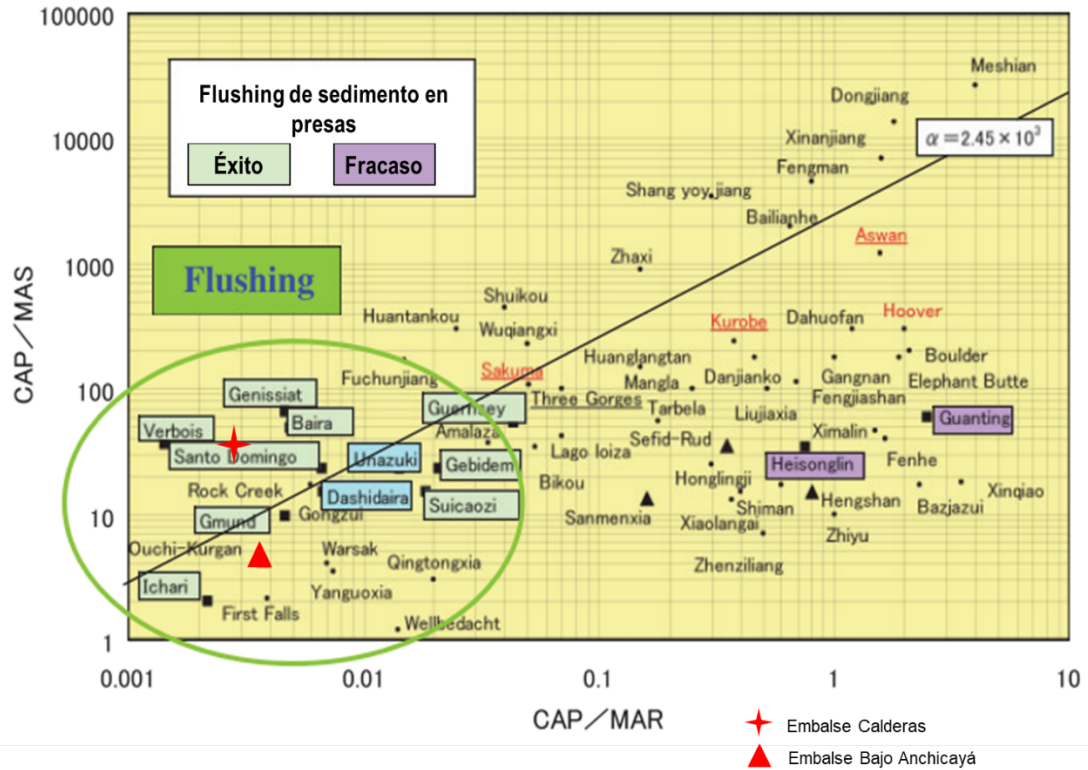
La geometría del embalse será realmente importante al momento de utilizar el flushing con un propósito de remoción de sedimentos del vaso. Esto sucede con el caso

de Álamo, donde aplicar el flushing para manejar los sedimentos no resultaría efectivo debido al considerable ancho promedio del embalse, un canal de socavación no sería representativo en un ancho tan extenso. Sin embargo, cuando el propósito del flushing sea únicamente la disminución del nivel del agua del embalse, su geometría no será relevante y podrá aplicarse el flushing para cualquier tipo de embalse, solo bastará con contar con una compuerta de fondo que permita evacuar un mayor caudal que el caudal de afluencia al embalse.

El tiempo de retención del embalse está asociado a la afluencia de caudal líquido, el cual, para los casos considerados es variable. En promedio a la presa Génissiat llegan 335 m³/s, en Dashidaira el caudal medio es 58.3 m³/s, en Álamo 1.4 m³/s, en Calderas 6 m³/s y en el Bajo Anchicayá 37 m³/s. Entre 335 m³/s y 1.4 m³/s existe una diferencia considerable, por esto se busca obtener una proporción del caudal que llega al embalse (MAR) respecto a su capacidad (CAP), de esta manera los datos se vuelven comparables entre los diferentes embalses. Los resultados presentados por Kondolf et al. (2014) (ver Ilustración 6-1) están asociados a este parámetro; tomando como referencia las características de varios embalses en los que se aplicó el flushing y el resultado obtenido, con esto se pudo verificar que para aquellos embalses con tiempos de retención inferiores a 0.04 (4% del volumen anual es retenido) años se tenían buenos resultados del método, mientras que para embalses cuyo tiempo de retención estaba por encima de este valor, se consideraba un fracaso. Este bajo tiempo de retención a su vez se asocia a la vida útil del embalse, representada como la relación entre la capacidad de almacenamiento (CAP) y el volumen de sedimento que llega y se deposita en el embalse (MAR). Los embalses pequeños en general tendrán una vida útil corta respecto a aquellos de gran almacenamiento como se puede observar en la

De manera similar Annandale et al. (2018) plantean zonas de la gráfica (ver Ilustración 6-2), en las cuales es potencialmente sustentable la aplicación de ciertas estrategias de gestión de sedimentos. Esta vez el análisis de las estrategias de gestión de sedimentos se realiza teniendo en cuenta otros métodos implementados, sin embargo, los resultados obtenidos son concordantes con los presentados por Kondolf et al. (2014), el flushing es potencialmente aplicable para embalses de pequeño tamaño y que tengan una vida útil entre los 5 y 100 años.

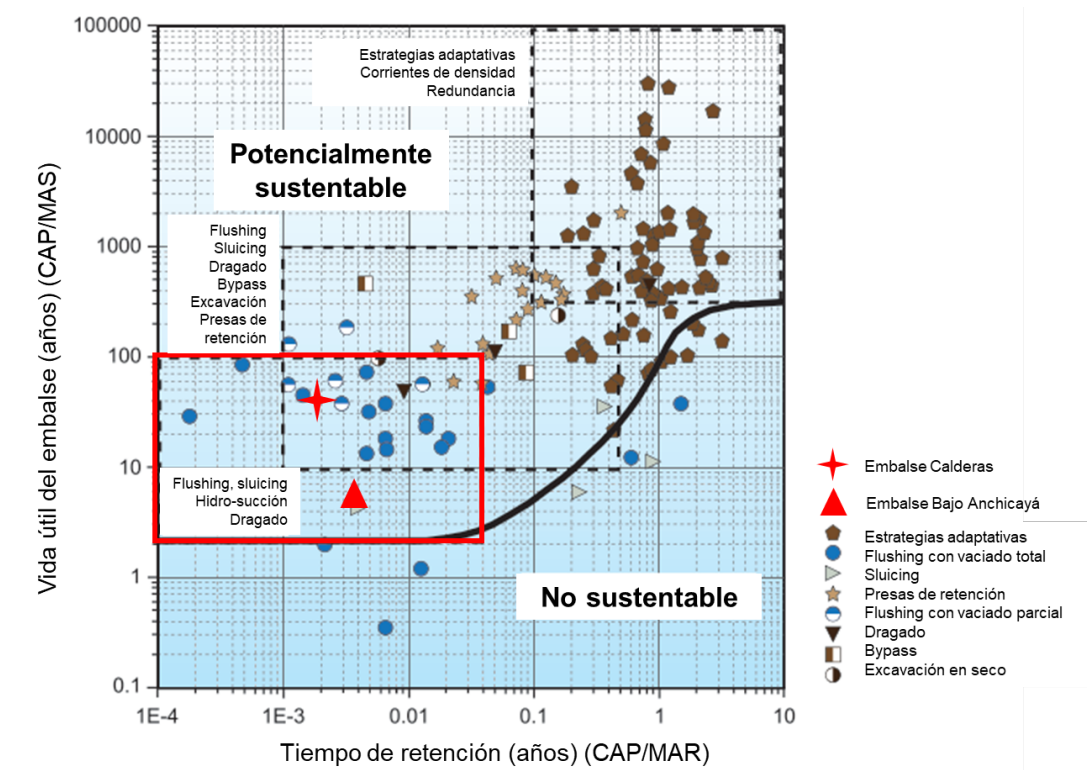
Ilustración 6-1. Características de diferentes casos de aplicación del flushing a nivel mundial.



Fuente: Adaptado de Kondolf et al. (2014).

Para embalses de mayor capacidad será más recomendable utilizar técnicas como presas de retención aguas arriba de embalse, que no permitan la llegada del sedimento al embalse principal y en las cuales sea más sencillo manejar el sedimento, por tratarse de volúmenes mucho más pequeños. En estos casos de volúmenes de embalses intermedios se recomienda que las acciones estén enfocadas a la disminución de la sedimentación en el vaso. Finalmente, para los embalses de mayor tamaño, técnicas de retiro de sedimento son mucho más difíciles de aplicar, por lo que se recomiendan realizar acciones adaptativas, lo implica modificar las características de la presa o el embalse sin manipular los sedimentos, por ejemplo, aumentar la cota de presa para aumentar el volumen o modificar las captaciones de agua para la generación de energía. Estas estrategias están enfocadas a la conservación del volumen y a la operación, más que a la gestión de sedimentos

Ilustración 6-2. Evaluación de la potencialidad del flushing como método de gestión de sedimentos.



Fuente: Adaptado de Annandale et al. (2018).

Es posible realizar esta evaluación de potencialidad para los casos de Calderas y Bajo Anchicayá, en la Ilustración 6-1 y en la Ilustración 6-2 se verifica una potencialidad del flushing para el manejo de los sedimentos en estos dos embalses colombianos. Sin embargo, hay que tener en cuenta, esta evaluación corresponde únicamente a un indicador de cual estrategia debe ser implementada; deben tenerse en cuenta las condiciones específicas de cada proyecto para realizar una evaluación más profunda de pre- factibilidad de aplicación de cada método (Annandale et al., 2018).

Se advierte que la Autoridad Ambiental colombiana no tiene ningún requerimiento ni restricción para el flushing que estén relacionados con la geometría, el tiempo de retención en el embalse o con su vida útil.

6.3 Características de la ejecución

Una descarga de fondo puede ser desarrollada para satisfacer condiciones aguas arriba o aguas abajo de la presa, lo cual impone algunos requerimientos a la ejecución del flushing tales como el caudal pico o la forma del hidrograma de salida. En el caso de Álamo se realizó una descarga condicionada aguas abajo, teniendo en cuenta que se debía favorecer la adaptación de las especies aguas abajo a los cambios de caudal de manera que se generara un hidrograma similar a los de avenida. Un caso diferente se presenta para el caso de Calderas, en el que la condición de vaciado del embalse, que fue impuesta por la Autoridad Ambiental colombiana, estaba dada por un vaciado con una duración inferior a un día, de tal forma que el vaciado y las labores de mantenimiento se realizaran en un mismo día para que la liberación de sedimento no quedara sin control y seguimiento durante la noche.

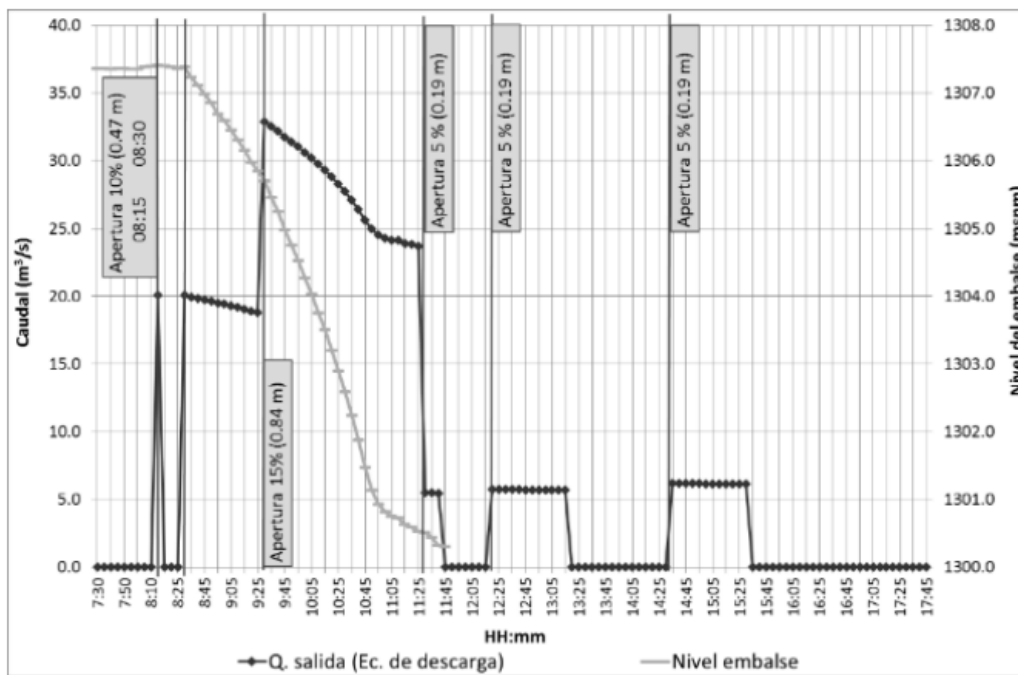
Otra posibilidad de condicionamiento para la descarga de fondo, esta vez aguas arriba de la presa, fue el presentado en el caso del Bajo Anchicayá, donde debía mantenerse el nivel del embalse durante el lavado de sedimentos para permitir la operación del embalse. Para garantizar que no exista variación en la cota del embalse se debe garantizar que el caudal a la entrada del embalse sea igual al caudal liberado. Una operación de este tipo definirá implica necesariamente la realización de un flushing a presión, por cuanto no existirá un vaciado del embalse, pero sí una salida de caudal a través de la compuerta de fondo.

Para una operación de descarga, el manejo de la compuerta de fondo ha de ser función de las condiciones requeridas para el vaciado del embalse, ya que los caudales liberados dependen del nivel del embalse y de la apertura de la compuerta. Controlar los caudales que se liberan a través de la descarga de fondo requerirá que se calibre la apertura de la compuerta para tal fin. Este fue uno de los requerimientos de la autoridad ambiental tanto para el caso de Calderas como para el caso del Bajo Anchicayá.

El principal criterio para la ejecución de la descarga de fondo en la presa Álamo fue lograr un ajuste del hidrograma de descarga a las características de un hidrograma natural, es decir, con un gradiente fuerte en la rama del ascenso y un gradiente leve en la recesión del hidrograma. Esta consideración específica se encontró únicamente en el caso estadounidense; en Calderas la Autoridad Ambiental requirió que durante la ejecución del

flushing se presentasen condiciones de caudal que fuesen cercanas a las naturales de creciente; sin embargo, el énfasis estaba dado para los caudales máximos producidos, más que para la forma del hidrograma producido. Desde luego, lograr que los hidrogramas de salida tengan una forma específica ira directamente ligado a los tiempos de operación de la compuerta y su apertura, para lo cual se requerirá su calibración. Hay que tener claro que la forma del hidrograma generado en la descarga de fondo presenta escalonamientos producto del cambio en la apertura de la compuerta de fondo, como se muestra en la Ilustración 6-3 para el caso Calderas o en la Ilustración 4-1 para Álamo, luego la similitud deseada con un hidrograma natural, es tan solo una aproximación.

Ilustración 6-3. Hidrograma de descarga de fondo en Central Calderas.



Fuente: Tomado de CTA y ISAGEN (2016).

Al hablar de las concentraciones de sedimento, el requerimiento de la Autoridad Ambiental colombiana, tanto en Calderas como en el Bajo Anchicayá, se ha limitado a la producción de concentraciones que sean similares a las concentraciones naturales del río en época de creciente, sin definir valores máximos específicos. Si se analiza la restricción de concentraciones establecida en Génissiat, éstas se encuentran definidas para lapsos específicos, en el que para un periodo de 30 minutos la concentración no puede superar los 15 g/l, para un periodo de 6 horas no puede superar los 10 g/l y para toda la descarga

la concentración promedio debe ser inferior 5 g/l. Se encontró que con concentraciones por encima de los 48 g/l se producían impactos negativos al ambiente. Sin embargo, lograr definir estas condiciones de tiempo y concentración requirió un estudio experimental a través de varias pruebas en las que, incluso, algunas de ellas generaron afectaciones a los ecosistemas aguas abajo de la presa.

En el caso de Dashidaira, el valor promedio límite para toda la descarga está definido en 13 g/l y la concentración máxima instantánea en 48 g/l. Para la descarga de Álamo no se documentan concentraciones máximas. En los casos colombianos se midieron concentraciones máximas de 62 mg/l en Calderas y 6 g/l para el Bajo Anchicayá, valores muy inferiores a los definidos en los casos del exterior, lo cual resulta llamativo teniendo en cuenta que se encuentran en el trópico, donde se producen mayores concentraciones. En ninguno de los dos casos colombianos se encuentran definidas concentraciones máximas por encontrarse en una etapa de estudio y desarrollo de pruebas piloto, situación que sí se presenta en los casos de Francia y Japón donde la ejecución recurrente de flushing ha permitido definirlos. Es claro que la definición de concentraciones máximas irá ligada a las condiciones de cada lugar, mientras para Génissiat el valor de concentración de sedimentos promedio de la descarga es de 5 g/l, en Dashidaira alcanza los 12 g/l, aproximadamente 2.5 veces; lo que podría producir en Génissiat impactos negativos considerables a los ecosistemas aguas abajo de la presa.

Las frecuencias de descarga son variables en los casos en los que se ha establecido el flushing como método de gestión. En Génissiat se realiza una descarga cada tres años, en Dashidaira una cada año e incluso en el Bajo Anchicayá se llegaron a realizar en promedio siete descargas anuales en el periodo de 1963-1990. Para la prueba piloto en el Bajo Anchicayá, el esquema de apertura consistió en la apertura de un 15 % de la compuerta tres veces al día durante veinte minutos cada una y por un periodo de 38 días. En Calderas y Álamo no se han establecido frecuencias de descarga, ya que solamente se han documentado dos y una descarga respectivamente. La frecuencia de descarga será definida específicamente en cada proyecto según las condiciones de sedimentación en el embalse, facilidades operacionales y aún más importante, conforme se haya desarrollado el estudio empírico del flushing en el lugar. Podrá ser razonable realizar descargas cada año o cada dos meses según las condiciones del lugar, sin embargo, se ha comprobado

que a medida que aumenta la frecuencia de realización del flushing disminuyen los impactos negativos que se puedan generar aguas abajo de la presa por efecto de los sedimentos liberados (Petueil et al., 2013).

Una característica común para todos los casos estudiados es la época en la que se ejecuta el método. En la literatura se recomienda que el flushing sea realizado en épocas de altos caudales para garantizar que se cuenten con los caudales líquidos suficientes que produzcan las diluciones correctas del sedimento. Junio para Génissiat, el periodo entre julio y agosto para Dashidaira, marzo para Álamo, octubre o noviembre para Calderas y diciembre para el Bajo Anchicayá fueron las épocas seleccionadas para realizar estas descargas. La diferencia en meses se debe a las diferencias en el ciclo hidrológico para cada una de las zonas en las que se encuentran ubicadas las presas, sin embargo, en cada zona estos meses corresponden a los de mayor precipitación.

La realización de campañas de medición y monitoreo es muy relevante para el estudio del flushing, que en gran medida debe realizarse de forma empírica y según las condiciones particulares de cada embalse. La toma de decisiones debe basarse en la información recolectada y realizar las respectivas evaluaciones del impacto del flushing luego de su ejecución. En la presa de Génissiat se ha implementado un sistema de monitoreo continuo y en tiempo real que a partir de técnicas de rayos X mide las concentraciones de sólidos suspendidos, lo que permite realizar modificaciones inmediatas al esquema de apertura durante la ejecución para garantizar que las concentraciones se encuentran por debajo de los valores máximos. En la presa francesa las mediciones incluyen concentración de sólidos suspendidos, batimetrías del embalse, distribución granulométrica de los sedimentos en el embalse y en el cauce aguas abajo y aguas arriba, parámetros fisicoquímicos, toxicidad y bacteriología de los sedimentos. En Dashidaira las mediciones para el flushing incluyen una campaña en el mes de mayo, aproximadamente un mes antes del lavado de sedimentos, otra durante el flushing y una final en el mes de septiembre. Las mediciones en la presa japonesa incluyen calidad del agua (parámetros fisicoquímicos) en el embalse, en el río e incluso en el área costera, así como las concentraciones de sedimento, y seguimiento a los organismos acuáticos. En Álamo por tratarse de una descarga única en la que no cobró mayor importancia el volumen de sedimento que se pudiera liberar del embalse durante la descarga de fondo el monitoreo se realizó únicamente luego del flushing con vaciado parcial.

El esquema de monitoreo requerido para la ejecución en Calderas por parte de la Autoridad Ambiental incluyó una campaña antes de la descarga de fondo, una durante su realización y tres luego de la descarga en la que se debían abarcar periodos de altos caudales, bajos caudales y periodos de transición. Adicional a esto batimetrías antes y después de la descarga y el análisis de los sedimentos depositados en el embalse para evaluar su potencial de contaminación. En el caso del Bajo Anchicayá se requirieron monitoreos de caudal, concentración de sólidos, aforos líquidos y sólidos y la caracterización fisicoquímica (temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, metales pesados, entre otros) en cada una de las 9 estaciones de medición. En los casos colombianos las ubicaciones de las estaciones de mediciones debieron ser previamente concertadas y aprobadas por la Autoridad Ambiental en puntos estratégicos, tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa, dentro de los cuales se debía incluir uno cercano a la base de la presa y uno por cada afluente al río localizado aguas abajo de la presa.

Las presas de Génissiat, Dashidaira, Calderas y Bajo Anchicayá, se encuentran cerca de otras presas aguas arriba o aguas abajo de las estudiadas. Aguas arriba de Génissiat existe la presa de Chancy-Pougny, aguas abajo de Dashidaira está la presa Unizuki, aguas arriba de la presa Calderas se encuentra Tafetanes y aguas arriba del Bajo Anchicayá está la presa del Alto Anchicayá. En Génissiat se ha implementado un esquema de operación de flushing en serie que permite manejar los sedimentos de manera conjunta en ambos embalses. Allí se realizan las descargas de sedimento de manera escalonada, es decir, desde la presa aguas arriba hacia el embalse aguas abajo. Se comienza por el vaciado y descarga de fondo aguas abajo, una vez vacío el embalse se cierran las compuertas y se realiza la descarga de fondo aguas arriba, reteniendo el caudal liberado en la presa aguas abajo donde se regulan las concentraciones y se realiza una nueva descarga. Un esquema diferente se ha implementado en Dashidaira, donde se realiza un vaciado rápido y simultaneo de ambos embalses, permitiendo condiciones de flujo a superficie libre sobre el fondo de los embalses para luego ser llenados nuevamente. En Colombia, la Autoridad Ambiental considera que la descarga simultanea de dos embalses en serie no es conveniente ya que en ninguno de los casos estudiados se cuenta con la suficiente información que permita considerar los efectos que puedan producirse sobre los ecosistemas acuáticos y las comunidades.

6.4 Resultados y efectos de la descarga de fondo

Tras una pérdida del 50% de la capacidad de almacenamiento en el embalse de Dashidaira luego de una década de operación, la implementación del flushing como estrategia de gestión de sedimentos ha permitido mantener un volumen constante en el vaso desde 1994. Se retiran del embalse y se liberan aguas abajo al cauce anualmente en promedio 380.000 m³ de sedimento depositado, lo que ha permitido un estado de cuasi-equilibrio del río aguas abajo de la presa, logrando que no existan procesos dominantes de socavación o depositación. En el caso de Génissiat se ha observado igualmente un cuasi-equilibrio en el río al permitir el flujo de sedimentos a través de 19 descargas fondo realizadas en el embalse. Los anteriores resultados se presentan considerando que, tanto en la presa francesa como en la japonesa, se tiene implementado todo un sistema de gestión de sedimentos en los embalses, con la información de un amplio periodo de tiempo.

Colombia se encuentra en una etapa de estudios y regulación para la implementación de descargas de fondo recurrentes. En los dos casos estudiados, se han evaluado y verificado con pruebas piloto los posibles impactos generados por las descargas de fondo como uno de los requerimientos de la Autoridad Ambiental. Así, por ejemplo, en Calderas ha atribuido la elevación de 10cm en el lecho del río en el corto plazo a las descargas realizadas, lo que se ha considerado como no relevante para el río. Adicionalmente la autoridad ha solicitado presentar esquemas de monitoreo para el balance de sedimentos en el río y la evaluación de los impactos acumulativos que pudieran presentarse producto de descargas de fondo recurrentes. Es importante que las metodologías de evaluación de impactos asociadas a la sedimentación producida luego de la descarga de fondo sean consecuentes con el comportamiento natural del río, por ejemplo, para la determinación de altura de sedimentación será necesario analizar los cambios en la altura del lecho producto del aumento de caudales. El lecho de los ríos presenta un comportamiento variable ante diferentes caudales; podrá mantenerse la cota del nivel de agua, pero aumentarse considerablemente la profundidad del agua en la sección, por lo que estas estimaciones podrían no ser acertadas.

A través del flushing, en Génissiat se ha logrado remover 18.5 millones de m³ de los 23 millones de m³ de sedimento que hubieran podido quedar atrapados desde la implementación del flushing en 1955, sin embargo, hasta el 2014 el embalse había perdido

cerca de 14 millones de m³ de capacidad de almacenamiento. Los casos colombianos, debido a su reciente realización de pruebas piloto y que aún no se encuentran establecidos protocolos para las descargas recurrentes, se encuentran perdiendo capacidad de almacenamiento año tras año. Incluso para el caso del Bajo Anchicayá la pérdida de capacidad actual compromete la futura operación de la central hidroeléctrica, luego suspender actividades de flushing recurrentes realizadas desde 1963 por requerimiento de regulación de las descargas de fondo por parte de la Autoridad Ambiental.

El flushing es un método que no garantiza por completo la conservación de la capacidad de almacenamiento por su incapacidad de remover sedimentos gruesos, generando una pérdida inminente del volumen, particularmente en las entradas al vaso de los cauces afluentes. Sólo ante características muy específicas del embalse, como una corta longitud y una pendiente del fondo muy pronunciada es posible remover sedimentos gruesos. La necesidad de manejar estos sedimentos gruesos ha obligado a los operadores a implementar estrategias complementarias que les permitan reducir aún más la pérdida de capacidad por efecto de la sedimentación.

En el Bajo Anchicayá se ha tenido que implementar el dragado y trampas de sedimento localizadas en diferentes sectores de la presa (draga entre los 100m y 400m de la presa y una pala tipo Sawerman localizada a 400m encargada de atrapar sedimentos gruesos) para reducir los efectos de la sedimentación; tan sólo el 15% del material retirado se realiza a través del flushing, el cual se produce en las proximidades de la descarga. El mayor volumen es retirado por dragado, que representa el 50% de los sedimentos removidos, con un costo mayor que debe asumir el operador de la central para asegurar su operación. En Calderas no se ha documentado la implementación de estrategias complementarias al flushing. El sluicing, técnica de enrutamiento de sedimentos a través del embalse durante las crecientes (previo vaciado), ha sido implementado en las presas de Génissiat y Dashidaira como estrategia complementaria al flushing. En muchos casos los volúmenes que puedan depositarse por efecto de la llegada de una nueva creciente al embalse son muy superiores a los que se puedan remover a través de la descarga de fondo, por lo que implementar estrategias que permitan la disminución de la sedimentación en el embalse contribuyen muy positivamente a reducción de la pérdida de la capacidad de

almacenamiento. En ninguno de los casos se registra una eliminación total de la pérdida de capacidad del embalse, pero sí una disminución considerable.

Las afectaciones más importantes dentro de los casos estudiados en este trabajo fueron las producidas por la descarga de fondo del Bajo Anchicayá en el 2001, donde se afectaron significativamente las especies acuáticas y la población en la que gran parte de su economía y sustento está basado en la pesca. Tras las afectaciones la autoridad ambiental requirió implementar medidas que contribuyeran a la mitigación del impacto generado como repoblación piscícola y acompañamiento a la comunidad afectada. En los casos de estudio del exterior no se documentaron afectaciones particulares a los ecosistemas aguas abajo de la presa, sin embargo, en la presa Génissiat si se reconoce la existencia de operaciones “desafortunadas” que llevaron incluso a mejoramientos significativos en la definición de un procedimiento de descarga de fondo.

Para la autorización de la descarga de fondo en la central Calderas, la Autoridad Ambiental solicitó presentar un protocolo para el manejo de cuñas de sedimento que se hubieran podido generar por efecto de la liberación de sedimentos como una estrategia para mitigar los impactos del flushing. En los casos analizados del exterior, únicamente para Dashidaira se ha documentado la liberación de agua clara una vez se ha finalizado el flushing. Una vez se han reestablecido los niveles en el embalse, es posible liberar un caudal de agua clara a través del vertedero de exceso o alguna compuerta superior (si llegase a existir), permitiendo que este caudal adicional con alta capacidad de transporte retire los sedimentos que hubieran podido quedar depositados en el cauce y con esto mitigar impactos negativos para los ecosistemas por el taponamiento de hábitats con sedimentos y reducir los posibles cambios morfológicos del río por efecto del flushing. En los casos restantes no se documentaron actividades posteriores al flushing que permitan mitigar los impactos negativos.

7. Conclusiones y recomendaciones

Luego de identificar los principales criterios y consideraciones para la ejecución del flushing como estrategia para la gestión de sedimentos desde la experiencia de tres embalses en el exterior (Génissiat en Francia, Dashidaira en Japón y Álamo en Estados Unidos) documentados en artículos científicos, fueron comparados con los requerimientos por parte de la autoridad ambiental colombiana para su regulación y ejecución. De Colombia, se han tomado como referencia los casos de estudio de Calderas (Antioquia) y Bajo Anchicayá (Valle del Cauca), los cuales tienen un proceso de revisión y autorización en curso para la realización de descargas de fondo recurrentes. Documentación e información limitada de dichos procesos se encuentra disponible a través de la oficina de atención al ciudadano de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), encargada de la regulación, revisión y autorización de este tipo de actividades. A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones del análisis comparativo anteriormente mencionado:

7.1 Conclusiones

El tipo de flushing a realizar podrá definirse según el propósito de la descarga de fondo; la literatura recomienda que para el caso de retiro de sedimentos depositados en el embalse se utilice un flushing con vaciado total, permitiendo que la fuerza de corte del flujo a superficie libre socave el fondo, mientras que para las labores de mantenimiento de estructuras de captación o estructuras complementarias de la presa se recomienda el flushing con vaciado parcial, el cual se logra abriendo la compuerta con la consecuente disminución de la cota del embalse hasta niveles requeridos, sin necesidad de vaciarlo por completo. A pesar de esto, según las condiciones del embalse y su operación, puede ser posible realizar vaciados parciales para la remoción de sedimentos como en el caso del Bajo Anchicayá o vaciados totales para labores de mantenimiento como en el caso de Calderas. La Autoridad Ambiental colombiana no ha realizado requerimientos específicos para los tipos de flushing, sin embargo, si ha requerido que se definan concentraciones

máximas de sedimento, caudales pico y tiempos de ejecución para las descargas de fondo, los cuales, para el caso del flushing con vaciado parcial siempre presentan valores menores que para el vaciado total. Por lo tanto, es posible establecer el tipo de flushing más conveniente para dar cumplimiento a los requerimientos presentados por la Autoridad Ambiental para estas tres consideraciones

Con excepción del embalse de Álamo, la geometría de los embalses aquí considerados, se pueden clasificar como de pequeño volumen (por debajo de los 56 millones de m³), angostos (relación longitud/ancho mayor de 10) y con anchos similares a la longitud de presa; características que los hacen ideales para la aplicación del flushing con el propósito de remoción de sedimentos depositados, al permitir que el canal principal formado durante el flushing socave una zona más amplia. Los criterios propuestos por Kondolf et al. (2014) y Annandale et al. (2018) confirman lo anteriormente dicho: el flushing es una estrategia de gestión de sedimentos potencialmente sustentable en embalses cuyo tiempo de retención sea inferior a 0.04 años y su vida útil inicial esté entre 5 y 100 años, la cual está directamente relacionada con la forma y el volumen del vaso. En consecuencia, los embalses colombianos de Calderas y Bajo Anchicayá cuentan con las características geométricas ideales para una aplicación del flushing de manera eficaz.

La Autoridad Ambiental colombiana ha solicitado a los operadores de dichos embalses definir criterios relacionados con las concentraciones de sedimento máximas que no afecten los ecosistemas aguas abajo y los caudales pico generados tras la apertura de la compuerta de fondo. De igual forma, ha solicitado implementar esquemas de monitoreo para la evaluación de impactos producidos aguas abajo de la presa, generar protocolos para mitigación de impactos asociados al retiro de cuñas que pudiera generar el flushing y realizar tantas pruebas piloto como sean necesario para contar con la información suficiente que permita definir las condiciones de ejecución. Estos requerimientos para la autorización del flushing se han formulado de manera libre, es decir, sin restricción, para que sean los propios operadores quienes realicen los estudios y análisis que sustenten tales decisiones. Teniendo este esquema, los requerimientos para los casos de Calderas y Bajo Anchicayá han resultado ser diferentes y respondiendo a criterios diferentes. Es importante que la Autoridad Ambiental participe activamente en el estudio y recolección de datos para la definición de criterios particulares, de tal forma que estos sean la base para

la construcción progresiva de una política general para el manejo de sedimentos a través del flushing.

Sin duda, las condiciones de ejecución más adecuadas deben ser el resultado del estudio experimental en el sitio, ensayando diferentes condiciones de ejecución y verificando las características hidrosedimentológicas y de calidad del agua, para evaluar el impacto ambiental en cada descarga de fondo realizada. Mediante un proceso de prueba y error se podrá definir cuáles son las mejores condiciones de operación, teniendo en cuenta el error como oportunidad de aprendizaje. El mayor logro del estudio experimental del flushing habrá de ser la determinación de las condiciones del hidrograma de descarga y la concentración máxima admisible de sedimentos para garantizar que se mitigan los impactos generados, teniendo en cuenta los efectos puntuales y acumulados que se puedan generar aguas abajo de la presa por efecto de las recurrentes descargas de fondo, si llegara a ser factible su aplicación. Los casos de estudio de Génissiat y Dashidaira demuestran que es posible reducir los impactos producidos por el flushing con un adecuado esquema de operación; incluso podrán reducirse aún más con la implementación de descargas recurrentes, logrando que estas hagan parte frecuente de las condiciones del río y de los ecosistemas aguas abajo.

Después de realizar el análisis comparativo de los criterios y consideraciones sobre las experiencias en el exterior con los requerimientos para los casos de estudio en Colombia, es posible concluir que el único criterio aplicado en todos los casos de estudio y exigido por la Autoridad Ambiental colombiana para la realización de la descarga de fondo es el de la época de su ejecución, la cual ha de corresponder al periodo de altas afluencias de caudal al embalse (periodo lluvioso en la cuenca). Con esto se busca garantizar que las diluciones del sedimento sean adecuadas y que la concentración esté por debajo del valor máximo que se establezca para la ejecución.

En ninguno de los casos considerados en este trabajo, se ha logrado que la aplicación exclusiva del flushing produzca la recuperación del volumen perdido producto de la sedimentación, debido a la imposibilidad de retiro de sedimento gruesos por esta estrategia; por lo cual es necesaria la implementación de acciones complementarias de gestión de sedimentos que permitan remover volúmenes adicionales del embalse, así como reducir los volúmenes que se sedimentan. Para esto último el sluicing (enrutamiento de sedimentos a través del embalse) ha sido implementado en presas como Génissiat y

Dashidaira o el dragado en el Bajo Anchicayá como complemento al flushing, logrando reducir considerablemente los efectos de la sedimentación. La gestión de sedimentos no necesariamente consiste en aplicar una estrategia única sino articular varias de tal manera que se cumpla el objetivo propuesto de conservar la capacidad de almacenamiento de los embalses sin deteriorar el medio ambiente.

Mientras en Colombia se comienza el estudio y regulación del flushing por parte de la Autoridad Ambiental como estrategia para la gestión de sedimentos, las experiencias como las de Génissiat y Dashidaira demuestran un desarrollo avanzado de implementación, en la cual se ha logrado establecer las condiciones de operación adecuadas del flushing para ejecutarlo de manera recurrente. En Colombia, hasta el momento se cuenta con algunos datos medidos en pruebas piloto, insuficientes para establecer criterios que permitan una política, y por lo tanto hace falta desarrollar mayor conocimiento del flushing para condiciones específicas basada en la experiencia.

Los procesos de revisión y autorización de flushing en Colombia se han llevado a cabo a partir la información levantada e interpretada por los operadores de los embalses, interesados primordialmente en la remoción de los sedimentos depositados en el vaso. Como contraparte, la Autoridad Ambiental colombiana, deberá desarrollar una alta capacidad técnica de control y amplio conocimiento basado en su propia información de campo e interpretación, permitiendo un análisis y valoración objetiva de los datos, las propuestas y protocolos presentados por los operadores, y que pueda dar lugar a un debate técnico que tenga como resultado la definición de las mejores condiciones de ejecución particulares para cada embalse acordes con una política general adecuada a las condiciones ambientales del país. De igual manera, la presencia permanente de la autoridad ambiental no debe ocurrir únicamente durante el proceso de revisión y autorización sino también a lo largo de la operación normal de este tipo de obras hidráulicas.

7.2 Recomendaciones

- Iniciar la toma de información hidrosedimentológica en embalses incluso en los que no se haya aplicado el flushing para la gestión de sedimentos, de tal forma que sirva como insumo para estudios posteriores. Debe garantizarse la disponibilidad

de la información pública a través de entidades gubernamentales para que desde la academia y la ingeniería nacional se pueda aportar a este tipo de problemáticas.

- Divulgar y compartir la experiencia obtenida y el conocimiento desarrollado tanto por entidades privadas, en muchos casos las empresas operadoras de los embalses, como por parte de entidades públicas como del gobierno y de ministerios para el ágil estudio de estrategias de gestión, respondiendo a una problemática de interés mundial como lo es la sedimentación en los embalses.
- Estudiar el comportamiento y las condiciones de gestión del flushing para embalses en serie en Colombia, considerando que es una condición frecuente y que fue descartada en primera medida por la autoridad ambiental para el caso de la central Calderas y del Bajo Anchicayá.
- En Colombia se deben concentrar los esfuerzos en la exploración y fortalecimiento del conocimiento de los métodos para la gestión sostenible de sedimentos en embalses por parte de los actores involucrados, principalmente operadores y autoridades ambientales. A través del estudio particular de los casos, la realización de pruebas piloto de descargas de fondo, la toma de información y el análisis objetivo de la misma; contar con un fundamento técnico que permita proyectar la liberación de sedimentos de los embalses como una actividad recurrente, favoreciendo el régimen del río y sin afectar negativamente los ecosistemas aguas abajo de la presa.
- Establecer una política clara que defina los lineamientos para el estudio del flushing como estrategia de gestión de sedimentos, que regule su estudio y establezca los requerimientos por parte de la autoridad ambiental para autorizar la actividad de manera recurrente.

Bibliografía

ANLA. (2012). *Resolución 0706 del 28 de Agosto de 2012.*

ANLA. (2014). *Resolución 0828 del 23 de julio de 2014.*

ANLA. (2015). *Resolución 0754 del 25 de junio de 2015.*

ANLA. (2017). *Estado de las acciones de la ANLA en torno a los sedimentos en proyectos hidroeléctricos.*

Annandale, G. W., Randle, T. J., Langendoen, E. J., Hotchkiss, R. H., & United States National Reservoir Sedimentation And Sustainability Team. (2018). *Reservoir Sedimentation Management : A Sustainable Development Challenge.* (3), 72-75.

Chaudhry, M. A., & Habib-Ur-Rehman, A. (2012). Worldwide Experience of Sediment Flushing Through Reservoirs. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 31(3), 395-408. Recuperado de http://publications.muet.edu.pk/research_papers/pdf/pdf655.pdf

Constitución política de Colombia [Const.] (1991)

CTA, & ISAGEN. (2016). *Desarrollo de un protocolo de apertura de la descarga de fondo en la central hidroeléctrica Calderas.*

Einstein, H. A. (1950). *The Bed-load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows* (p. 71). p. 71. Recuperado de <http://books.google.com/books?id=xlhv2wpR9oC&pgis=1>

Enion, M. R. (2011). The Case for NPDES Regulation of Dam Discharge Rethinking National Wildlife Federation v. Gorsuch: The Case for NPDES Regulation of Dam Discharge. *Ecology Law Quarterly*, 38(4), 797-850. <https://doi.org/10.15779/Z383V8V>

- EPSA S.A. (2002). *Operación descarga de fondo Bajo Anchicayá*.
- EPSA S.A. (2007). *Segunda prueba de apertura de compuertas de fondo del proyecto Bajo Anchicayá*.
- Guertault, L., Camenen, B., Peteuil, C., & Paquier, A. (2014). Long term evolution of a dam reservoir subjected to regular flushing events. *Advances in Geosciences*, 39(October 2016), 89-94. <https://doi.org/10.5194/adgeo-39-89-2014>
- ICOLD, & CIGB. (2019). *SEDIMENT MANAGEMENT IN RESERVOIRS: National Regulations and Case Studies - Draft*. (February).
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional Estudio Nacional del Agua 2014*. Recuperado de www.ideam.gov.co
- IHA. (2019). Sediment Management - Japon Dashidaira. Recuperado 13 de abril de 2019, de <https://www.hydropower.org/case-studies/japan-dashidaira>
- Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2010). *River Morphology and Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoir in Japan and European Alps*. 53B, 821-839.
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., ... Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256-280. <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>
- Kondolf, G. M., & Schmitt, R. J. (2018). Dams , Sediment Discontinuity , and Management Responses. *HydroLink*, (3), 68-71.
- Macías Gómez, L. F. (2015). *Marco regulatorio actual y riesgos normativos en cuanto a la gestión de sedimentos en embalses* (p. 25). p. 25.
- MAVDT. (2006). *Auto 2404 del 31 de octubre de 2006*.
- MAVDT. (2010a). *Auto 3616 del 28 de septiembre de 2010*.
- MAVDT. (2010b). *Informe Descargas de Fondo Proyecto Bajo Anchicayá*.

- MAVDT. (2010c). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- MMA. (2001). *Concepto Técnico 684*.
- MMA. (2003). *Auto 0144 del 10 de febrero de 2010*.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Parra González, J. D. (2017). *Propuesta de lineamientos para el manejo sostenible de sedimentos en embalses*.
- Peteuil, C, Wirz, C., Camenen, B., Guertault, L., Coz, J. L. E., & Dramais, G. (2014). Importance of Field Observations for Managing Sediment Fluxes in Hydropower. *Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress*, (October), 1-8.
- Peteuil, Christophe. (2016). *Feedbacks from Asia and Europe for designing sediment passing facilities in hydropower dam projects* *Feedbacks from Asia and Europe for designing sediment passing facilities in hydropower dam projects*. (March).
- Peteuil, Christophe, Fruchart, F., Abadie, F., Reynaud, S., Camenen, B., & Guertault, L. (2013). Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by environmental friendly flushing: the case study of the Génissiat dam on the Upper Rhône River (France). *ISRS Kyoto, Japan*, (October 2016), 1147-1156.
- República Francesa. (2019). *Code de l'environnement - Article L214-17*.
- U.S. Senate. (2002). *Federal water pollution control act*. 234.
- UPME. (2018). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano - Diciembre de 2017*. Recuperado de http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2017/Informe_de_variables_Dic_2017.pdf
- USACE. (2008). *Regulatory Guidance Letter*.
- USACE. (2018). *Alamo Dam Flushing Flow Release Draft Environmental Assessment*.

Recuperado de
http://www.spl.usace.army.mil/Portals/17/Users/117/09/1909/Alamo_Dam_PN.pdf?ver=2018-01-09-181714-643

Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*, 65(4), 358-371.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>