

Revisión del Estado del Arte de la Extracción de Sedimentos en Embalses

Autores:

Leidy Rocio Betancourth Jaimes

Diego Alexander Delgado Serrano

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Andrés Almeyda Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Marco Conceptual.....	16
2.1 Sedimentación en embalses	16
2.2 Origen de los sedimentos	16
2.3 Propiedades de los sedimentos.....	17
2.4 Transporte de sedimentos	18
2.5 Distribución de sedimentos en embalses	20
2.5.1 Depósitos Longitudinales.....	20
2.5.2 Depósito Latera	21
2.6 Implicaciones ambientales	22
2.7 Importancia del estudio de sedimentación en embalses.	22
3. Metodología	23
3.1 Búsqueda bibliográfica	24
3.2 Filtrado de documentos.....	24
3.3 Organización y estructura de los datos	25
3.4 Revisión y análisis de los documentos.....	26
4. Resultados y discusión.....	27
4.1 Estado del conocimiento	27
4.1.1 Resultados de filtrado y selección.....	27

4.1.2 Evolución y estado actual de la información	28
4.2 Métodos para la extracción de sedimentos	31
4.2.1 Remoción de sedimentos	31
4.2.2 Métodos para prevenir la entrada de sedimentos al embalse	31
4.2.3 Sistemas de control de la sedimentación	32
4.2.4 Métodos indirectos	32
4.2.5 Métodos de diseño	32
4.2.6 Métodos directos	33
4.2.6.1 Dragado	34
4.2.6.2 Lavado (flushing) o remoción de sedimentos	49
4.3 Sedimentación embalse de Bucaramanga	61
4.3.1 Caracterización y depósito de sedimentos	61
4.3.2 Sedimentos en suspensión	65
4.3.3 Sedimentos en fondo	66
4.4 Evaluación de los métodos a emplear en el embalse de Bucaramanga	66
5. Conclusiones	73
6. Recomendaciones	74
Referencias Bibliográficas	75
Apéndices	82

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso erosivo de una cuenca (Sánchez Blum, 2014)	17
Figura 2. Esquema básico del depósito de sedimentos, (Vásquez Rivera, 2016).	21
Figura 3. Artículos encontrados según años de publicación.....	28
Figura 4. Artículos filtrados por país de estudio.....	29
Figura 5. Distribución de los artículos por país de estudio.....	29
Figura 6. Distribución por área de investigación	30
Figura 7. Dragas mecánicas de retroexcavadora, (USACE, 2015).....	36
Figura 8. Partes principales de la draga Dragalinas, (Catalunya, 2003).	37
Figura 9. Dragado mecánico con cuchara, (Elzinga, 2017).	38
Figura 10. Dragas tipo Cangilones o Rosario, (Elzinga, 2017).	40
Figura 11. Dragado de succión estacionaria, (USACE, 2015).	42
Figura 12. Dragado por corte, (USACE, 2015).	43
Figura 13. Dragado Dustpan, (Moreno Avalos, 2012).	44
Figura 14. Dragas de succión en marcha, (USACE, 2015).	45
Figura 15. Cantara de una draga de succión (USACE, 2015).	46
Figura 16: Proceso de remoción hidráulica de sedimentos durante la extracción, (Atkinson, 1996).	49
Figura 17. Apertura de los desagües de fondo. Formación de conos de remoción. Presa Belesar España (Cobo, 2008).	50
Figura 18. Lavado hidráulico de sedimentos durante avenidas. (Sánchez Blum, 2014).	52
Figura 19. Vaciado del embalse efectuando remoción por chorros de agua. (Sánchez Blum, 2014).	54

Figura 20. Modelo de corriente de densidad en embalses. (Fuentes Norambuena, 2018).	55
Figura 21. Lavado hidráulico de sedimentos a flujo presurizado (Sánchez Blum, 2014).	57
Figura 22. Remoción hidráulica de sedimentos utilizando el método de sifones con flotadores para mantener constantes la presión (Ortiz & Mora, 2018).	59
Figura 23. Ilustración volúmenes en cotas características 2018, (AMB & SAS, 2019).	61
Figura 24. Perfil transversal de las cotas Km1+450 hasta la cota Km1+520 (AMB & SAS, 2019).	63
Figura 25. Perfil transversal de las cotas Km1+530 hasta la cota Km1+620 (AMB & SAS, 2019).	64
Figura 26. Afluente del río Toná.....	67
Figura 27. Afluente quebrada las Ranas	67
Figura 28. Afluente quebrada la Reforma.....	68
Figura 29. Afluente quebrada los Monos.....	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación del transporte de sedimentos.....	19
Tabla 2. Comparación de volúmenes en cotas características.....	62
Tabla 3. Volúmenes sedimentación vs erosión.....	63
Tabla 4. Comparación de las dragas en función del terreno.....	70
Tabla 5. Equipo más adecuado para cada terreno.....	71

Lista de Apéndices

Apéndice A. 56 documentos seleccionados.....	82
Apéndice B. Esquema de organización de los artículos en la herramienta X-Mind.....	90
Apéndice C. Proceso de revisión	91
Apéndice D. Localización de los afluentes del embalse de Bucaramanga.	91
Apéndice E. Localización en planta del depósito de sedimentos del embalse de Bucaramanga..	92
Apéndice F. Tasas de descarga de dragado de tuberías hidráulicas.	92

Resumen

Título. Revisión del estado del arte de la extracción de sedimentos en embalses*

Autores: Leidy Rocio Betancourth Jaimes
Diego Alexander Delgado Serrano**

Palabras Clave: Embalses, colmatación, sedimentación, remoción, extracción de sedimentos.

Los embalses son estructuras que presentan una interrupción en el cauce de los ríos, por tal motivo, los sólidos suspendidos son arrastrados y retenidos en el cuerpo del embalse, debido a la disminución de la velocidad en el flujo, dicho arrastre trae como resultado la retención de material en forma de sedimentos que posteriormente da lugar a la colmatación. Esta última es un problema que se presenta en todos los embalses sin excepción alguna, lo cual ocasiona una pérdida considerable del volumen útil y la disminución de la vida útil del mismo. Remover los sedimentos dentro de los embalses no tiene soluciones definitivas, pero los métodos que se describen en este trabajo pueden contribuir a minimizar el proceso de colmatación. Para tal motivo se realizó una revisión sistemática de documentos científicos que fueron sometidos a un proceso de búsqueda, selección y análisis arrojando como resultado 56 artículos relevantes, de los cuales se encontraron parámetros para el estudio de la distribución y depositación de los sedimentos, y el proceso de colmatación en los embalses, así mismo, se analizaron y determinaron las diferentes metodologías de extracción de sedimentos, con el fin de identificar cuáles de estas pueden ser usadas en la limpieza de sedimentos en el embalse de Bucaramanga.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Ingeniero Civil.

Abstract

Title. The state of art review of the extraction of sediments in reservoirs*

Authors: Leidy Rocio Betancourth Jaimes
Diego Alexander Delgado Serrano**

Keywords: Reservoir, clogging, sedimentation, removal, sediment extraction.

Reservoirs are structures that present an interruption in the riverbed, for this reason, the suspended solids are dragged and retained in the body of the reservoir, due to the decrease in flow velocity, such dragging results in retention of material in the form of sediments that subsequently results in clogging. The latter is a problem that occurs in all reservoirs without exception, which causes a considerable loss of the useful volume and a decrease in the reservoir's time. The remotion of sediments inside the reservoirs has no definitive solutions, but the methods described in this work can contribute to minimize the clogging process. For this reason, a systematic review of scientific documents was carried out, where the search, selection and analysis process, resulted in 56 relevant articles, that provide information regarding sediment distribution and deposition, the process of clogging in reservoirs, and methodologies of sediment extraction. This review contribute to identify alternatives for the cleaning of sediments in the Bucaramanga reservoir.

*Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Civil Engineering

Introducción

Uno de los principales problemas que a menudo afectan a los embalses, es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. Se estima que un 0.5-1% del volumen embalsado en el mundo se pierde cada año por la sedimentación (Velandía Roncancio, 2016). Este proceso ocurre principalmente por acarreo y transporte de las partículas mediante el flujo de agua, es decir, que está estrechamente ligada al proceso de erosión hídrica de los suelos, que incluye el desprendimiento de partículas y su subsecuente transporte y depósito a lo largo de laderas (Maza Álvarez & García Flores, 1995; MÉNDEZ & GALBÁN, 2009). Es por esto que la sedimentación de los cuerpos de agua tiene un alto costo ambiental y social (Martínez León & Suarez Rodríguez, 2019; Durgunoglu & Singh, 2017) y está asociada con el deterioro de los ríos, la alteración de los hábitats acuáticos, la disminución de la capacidad de almacenamiento y los costos directos relacionados con la necesidad de dragar las presas.

A pesar de que en el diseño de los embalses se dispone de un volumen para almacenar dichos sedimentos, muchas veces es rápidamente rebasado con la consecuente pérdida de volumen útil y en casos extremos el embalse puede ser inutilizado totalmente (Perea Mesa, 2013; Revel, Ranasiri, Rathnayake, & Pathirana, 2015). En algunas presas el volumen reservado para sedimentos no ha sido sobrepasado en un momento determinado, pero la velocidad con que se pierde hace prever que el embalse perderá capacidad de almacenamiento antes de lo estimado, con la consecuente disminución de la disponibilidad de agua (García Flores & Maza Álvarez, 1985).

En varios embalses construidos en Colombia han ocurrido problemas por efecto de la sedimentación durante su operación, que en parte es debida a la falta de investigaciones adecuadas en la etapa de estudios y preparación de diseños para las obras. Es crucial para el éxito de un

proyecto de construcción de embalses la planificación adecuada (Walter, Gunkel, & Gamboa, 2012), ya que los sedimentos tienen una gran influencia sobre la factibilidad técnica, económica y la operación de proyectos de recursos hídricos y estructuras hidráulicas.

En los últimos años se han realizado notables avances y aportes dando una importancia vital para el aprovechamiento hidráulico y la conservación de las obras construidas (Augusto & Ávila, 2016; Ramírez León, 2005). Un correcto análisis de los métodos existentes para la limpieza hidráulica de sedimentos desde embalses (García Camacho, 2005; Marengo Mogollón, 2001; Sánchez Blum, 2014), permitirá establecer la manera más óptima y económica para mitigar los efectos ambientales y así realizar la remoción hidráulica de estos, tomando en cuenta las características propias de cada embalse como su geometría, ubicación, y características de los sedimentos (AMB, 2012b, 2012; AMB, Embalse de Bucaramanga, & Ingenieros consultores S.A., 2008).

El objetivo general de la investigación es desarrollar una revisión sistemática de la literatura acerca de los métodos de extracción de sedimentos en embalses, con el fin de comprender cuales se podrían implementar en el embalse de Bucaramanga. Los objetivos específicos incluyen: i) realizar una revisión literaria de los métodos de extracción de sedimentos en embalses; ii) clasificar los métodos de extracción de sedimentos en embalse según sus requerimientos técnicos, montajes y afectaciones ambientales a partir del análisis de las diferentes fuentes de información; iii) estimar los efectos de la sedimentación en el embalse de Bucaramanga; iv) evaluar cuales métodos podrían proponerse para ser estudiados, analizados e implementados en el embalse de Bucaramanga. Con el presente trabajo se busca identificar alternativas que permitan reducir la cantidad de sedimentos en el embalse, teniendo en cuenta sus características e implementación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar una revisión sistemática de la literatura acerca de los métodos de extracción de sedimentos en embalses, con el fin de comprender cuales se podrían implementar en el embalse de Bucaramanga.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión literaria de los métodos de extracción de sedimentos en embalses.
- Clasificar los métodos de extracción de sedimentos en embalse según sus requerimientos técnicos, montajes y afectaciones ambientales a partir del análisis de las diferentes fuentes de información.
- Estimar los efectos de la sedimentación en el embalse de Bucaramanga.
- Evaluar cuales métodos podrían proponerse para ser estudiados, analizados e implementados en el embalse de Bucaramanga.

2. Marco Conceptual

2.1 Sedimentación en embalses

Cuando se interpone una presa a un río se origina un estancamiento, por el cual el sedimento transportado se comportará de la siguiente forma: al entrar la corriente al embalse, el material grueso se depositará según la disminución de la velocidad del agua por el efecto de la ampliación del cauce y el crecimiento del tirante, formando en la cola del vaso una acumulación de sedimento denominado delta (Balbontín Beltrán, 2013; Muñoz, Ariztia, & Campusano, 2007). El sedimento más fino continuara hacia adentro del embalse como una corriente de densidad, para posteriormente depositarse en el fondo del mismo (Ortiz & Mora, 2018). Existen embalses en los que tal corriente no llega a formarse, y se produce en el vaso una turbidez generalizada que evolucionará según la dinámica particular del almacenamiento (Cobo, 2008). El mecanismo de sedimentación descrito depende de muchos otros factores como son la estratificación del embalse por defecto de la radiación solar y la profundidad, forma, dimensiones y características especiales del embalse (Soucková & Kominkova, 2017; Ramírez León, 2005).

2.2 Origen de los sedimentos

Los sedimentos son aquellas partículas procedentes de las rocas o suelos, que son transportadas por las aguas que escurren y por los vientos, estos materiales después de cierto transporte finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, ríos, en el mar y las partes

bajas de la cuenca, principalmente en la planicie (Scheuerlein, 1986). En la Figura 1 se observa el origen de los sedimentos, las zonas de transporte y deposición (Sánchez Blum, 2014).

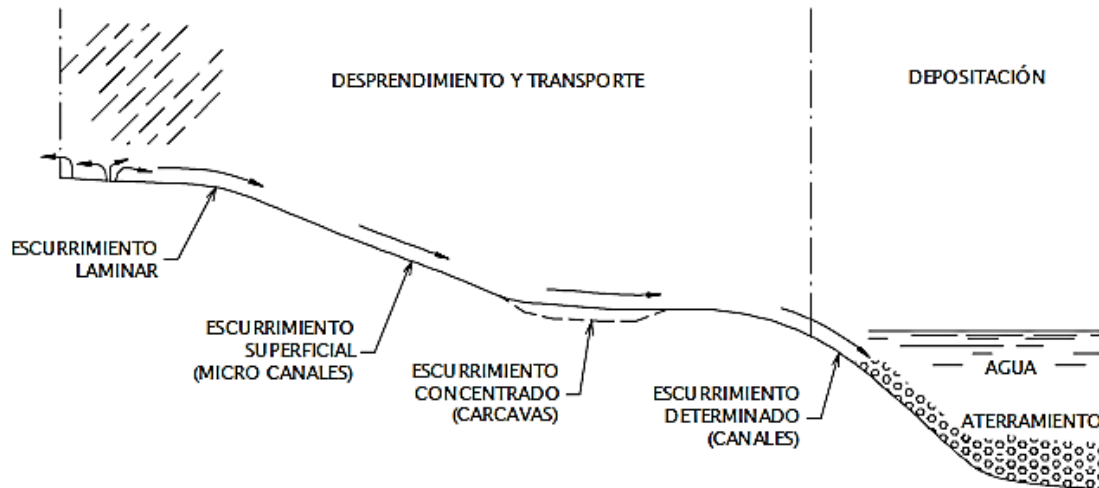


Figura 1. Proceso erosivo de una cuenca (Sánchez Blum, 2014)

2.3 Propiedades de los sedimentos

Los sedimentos son aquellas partículas procedentes de las rocas o suelos, que son transportadas por las aguas que escurren y por los vientos, estos materiales después de cierto transporte finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, ríos, en el mar y las partes bajas de la cuenca, principalmente en la planicie (Scheuerlein, 1986). En la Figura 1 se observa el origen de los sedimentos, las zonas de transporte y deposición (Sánchez Blum, 2014).

Por su comportamiento al ser transportados, se distinguen tres clases de material.

- No cohesivos o granular o friccional
- Cohesivo
- Rocoso

Dentro de las propiedades granulares que constituyen el suelo granular se encuentran las siguientes:

- Peso específico
- Forma
- Tamaño
- Velocidad de caída

Los sedimentos se constituyen de gran variedad de partículas que difieren en forma y tamaño.

Cuando las partículas finas son puestas en suspensión, pueden permanecer algún tiempo en este estado, para determinar su comportamiento es necesario conocer:

- La concentración de partículas en suspensión
- La viscosidad de un líquido con material en suspensión
- El peso específico de un líquido con material en suspensión

2.4 Transporte de sedimentos

El transporte de los sedimentos puede ser por rodamiento o deslizamiento sobre el fondo o soportado por el flujo durante el tiempo que es transportado. Las arenas y gravas son sedimentos que generalmente ruedan y se deslizan conformando lo que se conoce como la fracción de sedimentos arrastrados por una corriente. El transporte de los sedimentos se clasifica de acuerdo al material como se especifica en la Tabla 1. (Fernández Carrasco, Avendaño Salas, & Cobo Rayan, 2001).

Tabla 1.

Clasificación del transporte de sedimentos.

Tipo de transporte	Descripción
Transporte en la capa de fondo	Material del fondo del cauce que rueda, salta o es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo.
Transporte de fondo en suspensión	Material del fondo del cauce que es transportado en suspensión debido a la velocidad y turbulencia de la corriente.
Transporte total de fondo	Material de fondo transportado por la corriente tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión.
Transporte lavado	Material generalmente fino (limo y arcillas) transportado en suspensión, el cual es originado en la superficie de la cuenca al ser erosionada por las gotas y el escurrimiento de la lluvia.
Transporte en suspensión	Es constituido por el material de fondo, así como por material de lavado arrastrado de la cuenca por el escurrimiento, los cuales son transportados en suspensión debido a la turbulencia de la corriente y su reducción de peso.
Transporte total	El total del material que es transportado por el río, considera las diferentes fuentes del material y las diferentes formas de transporte.

Nota: Clasificación del transporte de sedimentos, (Moreno Avalos, 2012).

2.5 Distribución de sedimentos en embalses

Embalses formados por una sola corriente y operados con un nivel constante presenta un esquema de depósito simple. Sin embargo, eso no ocurre para todos los embalses, debido a las diversas condiciones morfológicas se pueden presentar cambios en las condiciones hidrológicas, el tamaño de las partículas y la geometría del embalse (Adler, 2006; Vásquez Rivera, 2016).

Según (Jiménez Ramírez & Farias, 2003) los sedimentos son transportados dentro del embalse hacia las zonas de depósito siguiendo alguno de estos procesos:

- Transporte de material grueso en forma de carga de fondo a lo largo de la zona alta
- Transporte de material fino en forma de material suspendido

2.5.1 Depósitos Longitudinales. La geometría varía enormemente de un embalse a otro, esto debido a la estructura del vaso, el gasto y tamaño de las partículas, las características de la carga de entrada y la operación del embalse (Quiñones, 2009). Estos depósitos muestran cuatro esquemas básicos que dependen de la entrada de sedimentos y operación del embalse, tal y como se muestra en la Figura 2 (Vásquez Rivera, 2016).

a. Depósito en deltas: Conformado por la fracción gruesa del sedimento, el cual se deposita en la zona de entrada del flujo al embalse (diámetro de partícula de sedimentos $D > 0.062\text{m}$), en ocasiones puede contener fracciones de material fino como limos (Sánchez Blum, 2014).

b. Depósito en cuña: Estos depósitos son muy gruesos al pie de la presa y se van haciendo delgados hacia aguas arriba. Este esquema es típico de los sedimentos que son depositados por corrientes de densidad. Los depósitos en forma de cuña se pueden encontrar en pequeños embalses en los que la captación de sedimentos es grande (Moreno Avalos, 2012).

c. Depósitos de barra estrecha: Ocurre cuando el depósito se adelgaza progresivamente conforme se va acercando a la cortina, es común en embalses que mantienen un nivel alto (Callevelasco, 2018).

d. Depósito uniforme: Son poco usuales pero pueden ocurrir y se presentan en embalses encañonados con fluctuaciones frecuentes en los niveles del mismo (Moreno Avalos, 2012).

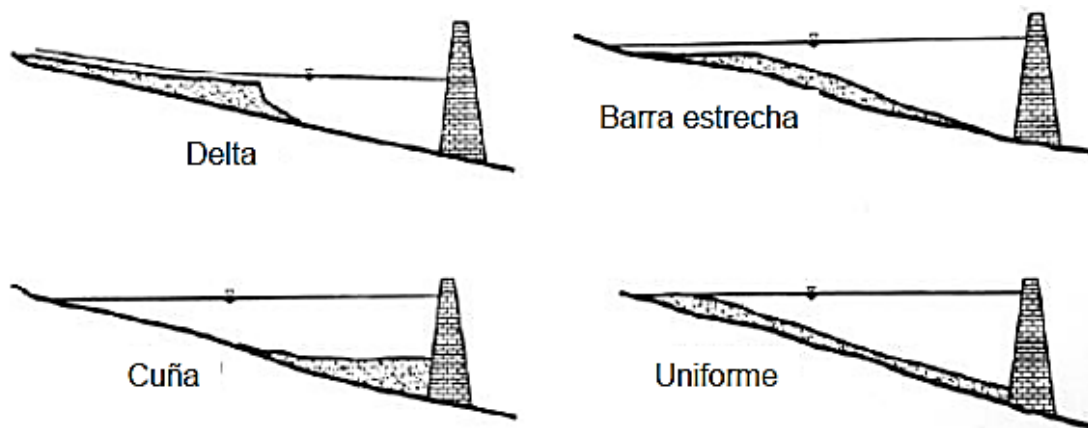


Figura 2. Esquema básico del depósito de sedimentos, (Vásquez Rivera, 2016).

2.5.2 Depósito Lateral. Los sedimentos se depositan inicialmente en la parte baja de una sección (transversal), formando depósitos que cubren las zonas bajas hasta llenarlas formando capas y presentan una superficie casi horizontal (Méndez & Galbán, 2009). Existen tres procesos que contribuyen a la concentración de sedimentos en las partes bajas de las secciones transversales:

- El transporte y depósito de sedimentos a lo largo del cauce producido por la erosión aguas arriba (Moreno Avalos, 2012).

- El perfil vertical de concentraciones de sedimentos suspendidos dentro de la columna de agua que se pueden agrupar en las partes bajas de la sección transversal (Vásquez Rivera, 2016).
- La distribución uniforme de los sedimentos suspendidos a lo largo de la sección transversal y su asentamiento en caída vertical el depósito de sedimentos será directamente proporcional al tirante en la sección (García Camacho, 2005).

2.6 Implicaciones ambientales

Algunos de los problemas asociados a la sedimentación de embalses son el aumento en el perfil aguas arriba (Bravo García, 2017). Se pueden presentar condiciones ambientales indeseables aguas arriba del embalse, estancamiento de agua y terrenos pantanosos, deterioro del canal natural por incremento en las concentraciones de sedimentos (Salazar et al., 2013). Además, señala que el delta puede causar inundaciones potenciales que puede no ser anticipada de manera previa a la construcción de la presa (Walker & Thoms, 1993).

2.7 Importancia del estudio de sedimentación en embalses.

Según (Velandia Roncancio, 2016), los escenarios en los cuales tiene cabida el estudio de la sedimentación de embalses son los siguientes:

- En la construcción de autopistas y puentes en el área del delta, para definir áreas de inundación tanto urbana como rural, y para el diseño de estructuras de protección para el control de inundaciones.

- Prevención o disminución de problemas de aumento de los niveles de inundación del nivel del lecho.
- Definición de acciones de manejo de la sedimentación en embalses y control del costo anual de reposición de pérdida de almacenamiento por la depositación de sedimentos. Si la sedimentación puede manejarse satisfactoriamente como se ha hecho en algunos reservorios, la pérdida de capacidad de almacenamiento del reservorio puede reducirse significativamente. Estudios de reservorios en Irán muestran que el porcentaje de pérdida de volumen debido a sedimentación esta entre el 0.15% y el 3.94%, el promedio puede estar alrededor del 1% anual (Gomeshi, 1995).

No obstante, en Colombia aún no se cuenta con estadísticas sobre la reducción o pérdida del volumen debido a la sedimentación del embalse (Vargas Lozano, 2017), ya que usualmente esta reducción en la capacidad de almacenamiento no se suele contemplar en las etapas de factibilidad y diseño del proyecto, por cuanto es usual que la pérdida de la capacidad se suponga que ocurre únicamente en la parte más baja del vaso, o “volumen muerto” (Velandia Roncancio, 2016).

3. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se realizó una revisión sistemática de literatura que permitió la evaluación y análisis de información disponible respecto a una temática particular, en este caso, evaluar los métodos de extracción de sedimentos en embalses, con el fin de proporcionar una síntesis de las investigaciones existentes para dar paso a proyectos futuros.

3.1 Búsqueda bibliográfica

Para iniciar con el proceso de investigación fue necesario profundizar en definiciones y conceptos que abarcan de forma general el tema. Posteriormente se inició la búsqueda de documentos en las bases de datos electrónicas disponibles en el catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander – UIS como: Scopus, Sciece@Direct, Emerald Insight, sumando a estas, se utilizaron otras fuentes de información como Google Scholar y Mendeley, en la búsqueda se emplearon ciertas palabras claves como: “Sediments AND extraction AND reservoir”, “Sediments AND extraction AND reservoir AND América”, “Sediments AND extraction AND reservoir AND Colombia”, “extracción AND sedimentos AND embalses”, “extracción AND sedimentos AND embalses AND América”, “extracción AND sedimentos AND embalses AND Colombia”, “extracción AND sedimentos AND embalses AND Santander”, “extracción AND sedimentos AND embalses AND Bucaramanga”.

3.2 Filtrado de documentos

Una vez terminado el proceso de búsqueda, se dio inicio a la selección de documentos que presentaban información de las metodologías, parámetros empleados y efectos ambientales para la evaluación de la extracción de sedimentos en embalses, teniendo en cuenta:

- Título del artículo: El primer filtro fue el título de los artículos los cuales debían estar relacionados con la temática del proyecto.

- Año de publicación del artículo: Luego de filtrar los artículos por su título, se tuvieron en cuenta solo los publicados en los últimos 34 años (investigaciones más recientes), por lo que se consideraron del año 1985 al 2019.
- Resumen y contenido general: En primer lugar, con el fin de conocer los artículos, se inició con la lectura del resumen y se seleccionaron los relacionados con la temática a estudiar. Así mismo, se realizó la lectura total de los artículos y se tuvieron en cuenta aquellos que contenían información importante sobre la investigación.
- Metodologías de extracción: Luego de tener seleccionados los artículos afines con la temática, se realizó la identificación y clasificación de documentos relacionados con diferentes metodologías para la extracción de sedimentos en embalses.

3.3 Organización y estructura de los datos

Para la sistematización de la información recolectada, se emplearon diferentes aplicaciones y herramientas como Mendeley que permiten gestionar las referencias bibliográficas y proporcionar la factibilidad de búsqueda (título, fecha, autor, año, etc.). De igual modo, se utilizó el software Excel que permitió organizar y tabular la información más relevante de cada documento, empleando diferentes hojas de cálculo como se muestra en el anexo A. Así mismo, se realizaron diferentes representaciones gráficas para presentar información relevante de las investigaciones. Por medio de la herramienta X-Mind se facilitó el análisis de los documentos con la implementación de mapas conceptuales mostrados en el anexo B y C.

3.4 Revisión y análisis de los documentos

En la revisión se identificaron los artículos de acuerdo con el objetivo que se planeaba cumplir; inicialmente se analizaron artículos relacionados con la sedimentación y colmatación de los embalses. De otro lado, se estudiaron los documentos que tenían investigaciones sobre las diferentes metodologías para la extracción de sedimentos en embalses y los efectos ambientales con su implementación. En este proceso de revisión se observaron y analizaron investigaciones realizadas en otros países e igualmente se encontraron artículos sobre los métodos de extracción de sedimentos en diversas zonas, los cuales se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto de investigación por la relevante información que presentaban.

El análisis de la información se llevó a cabo contestando diferentes preguntas de investigación que se habían formulado y se presentan a continuación:

- ¿Cuáles son los métodos que se han implementado en embalses para la extracción de sedimentos?
- ¿En qué consisten estos métodos?
- ¿En qué lugares se han implementado este tipo de métodos?
- ¿Qué recursos se requieren para su aplicación?
- ¿Qué ventajas y desventajas presentan este tipo de métodos para la extracción de sedimentos?
- ¿Qué tipo de limitaciones se evidencian en la implementación de estos métodos de extracción?
- ¿Cuáles son los impactos ambientales generados al implementar los métodos de extracción de sedimentos?

- ¿Cómo afecta la sedimentación el embalse de Bucaramanga?

4. Resultados y discusión

4.1 Estado del conocimiento

4.1.1 Resultados de filtrado y selección. Inicialmente se realizó un filtro empleando palabras claves así:

Búsqueda: “extracción AND sedimentos AND embales”, Artículos: 14.287 documentos. Búsqueda: “extracción AND sedimentos AND embales AND América”, Artículos: 8.124 documentos. Búsqueda: “extracción AND sedimentos AND embales AND Colombia”, Artículos: 5.265 documentos. Búsqueda: “extracción AND sedimentos AND embales AND Santander”, Artículos: 1.204 documentos. Búsqueda: “extracción AND sedimentos AND embales AND Bucaramanga”, Artículos: 380 documentos.

A partir de estos, por medio del título de cada artículo se eligieron 150 documentos, luego de la lectura del resumen y del contenido general se seleccionaron finalmente 56 documentos, que serían sometidos al proceso de análisis y clasificación según su contenido sobre métodos de extracción de sedimentos en embales. Del análisis de los documentos seleccionados, 25 artículos contenían información detallada de los métodos de extracción de sedimentos en embales, 10 con contenido acerca de impactos ambientales, 4 documentos con información detallada del embalse de Bucaramanga y los 17 documentos restantes proporcionaban información general que era útil para comprender la sedimentación y la colmatación de los embales.

4.1.2 Evolución y estado actual de la información. Con la revisión de literatura y el análisis de la información se determinó el progreso en el campo de investigación del área a estudiar y el estado actual de la información, siendo estos indicadores del avance de la investigación. Teniendo en cuenta la documentación encontrada y seleccionada se observa que en los años 1985 al año 1999 las investigaciones realizadas fueron menores como se evidencia en la Figura 3. Pero se ve reflejado el interés de los investigadores en China y Estados Unidos en el estudio de métodos para la extracción de sedimentos en embalses.

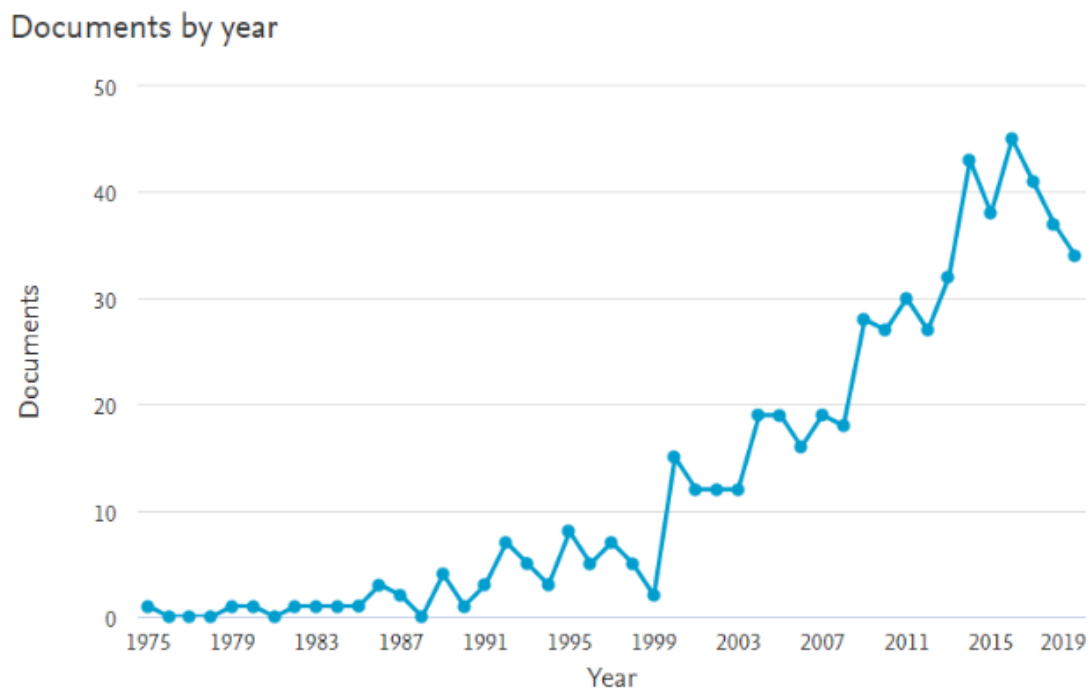


Figura 3. Artículos encontrados según años de publicación

En las Figuras 4 y 5 se evidencia la cantidad de artículos encontrados por país y además seleccionados por incluir investigaciones sobre estudios de las metodologías para la extracción de sedimentos en embalses. En la mayoría de los documentos analizados se aprecia un evidente interés por el estudio de la sedimentación y la colmatación de los embalses y la búsqueda de

metodologías para así extender la vida útil de dichas presas, sobre todo en países como China y Estados Unidos.

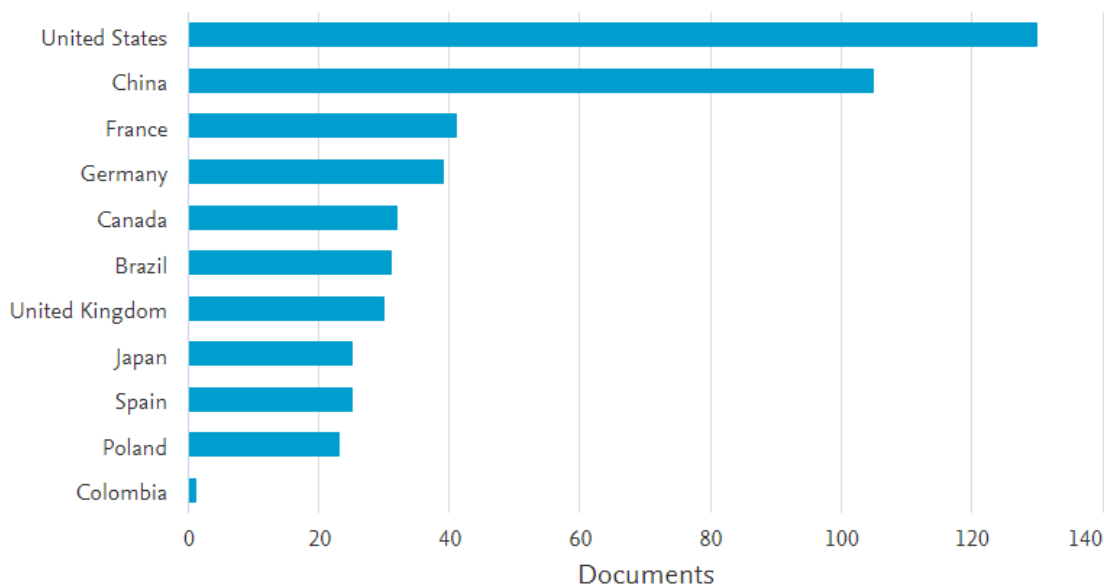


Figura 4. Artículos filtrados por país de estudio

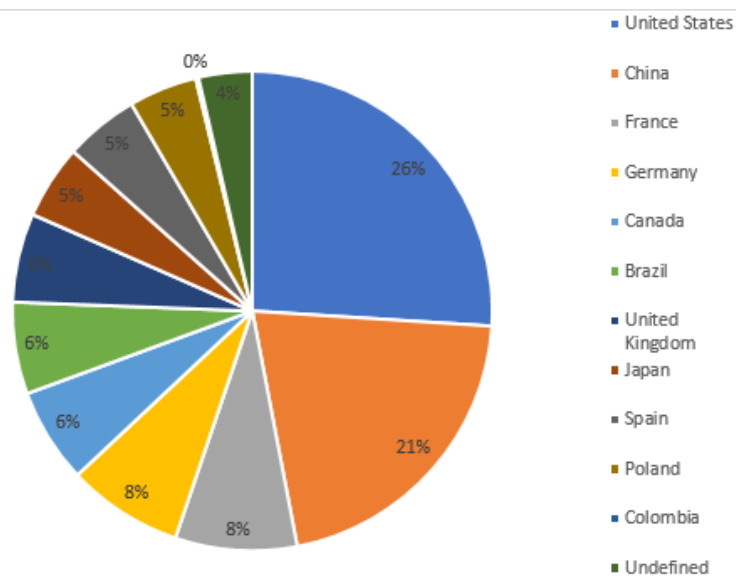


Figura 5. Distribución de los artículos por país de estudio

En la Figura 6 se evidencia el análisis de los documentos seleccionados por áreas de estudio, en la cual se ve un gran interés por las Ciencias del medio ambiente, la Ingeniería y la Energía, que son de interés en el presente proyecto.

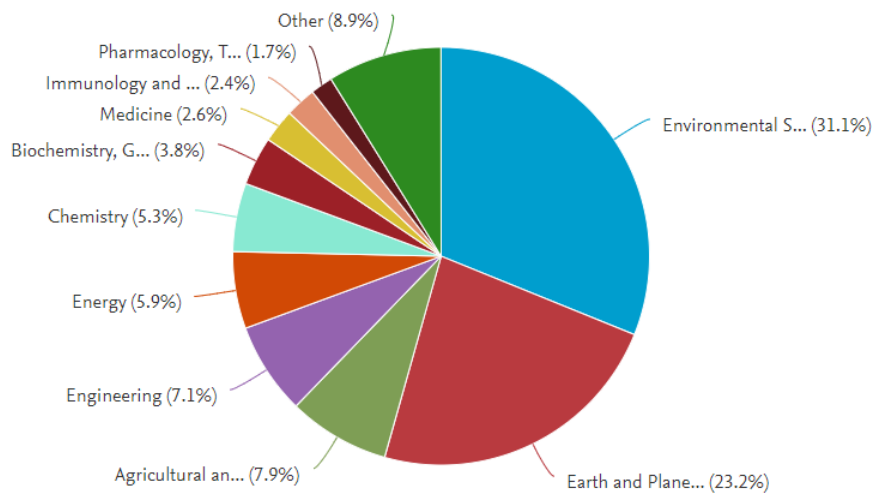


Figura 6. Distribución por área de investigación

4.2 Métodos para la extracción de sedimentos

4.2.1 Remoción de sedimentos. La explotación a gran escala de los recursos de agua comenzó hace aproximadamente más de 100 años construyendo presas y creando depósitos artificiales. Con el tiempo las técnicas de construcción y dimensionamiento han cambiado algunos problemas básicos que se presentan en la pérdida del volumen útil al depositarse los sedimentos (Quevedo, 2006). Determinar la cantidad de material sólido que entra en un embalse, es sin duda uno de los aspectos más importantes en el estudio del problema de sedimentación, pero también es la parte más difícil de evaluar. A medida que se avanza en el estudio de remoción de sedimentos se han implementado métodos de extracción para las diversas distribuciones de depositación en los embalses (García Flores & Maza Álvarez, 1985).

4.2.2 Métodos para prevenir la entrada de sedimentos al embalse. La consideración del control del sedimento se debe comenzar en la etapa de planeación. La selección de un sitio favorable puede tener un efecto positivo. La mejor manera de reducir al mínimo la entrada de sedimentos a un depósito (Mayorca & Muñoz, 2017), es tomar medidas de control del sedimento en el área de captación (creación de una cubierta de vegetación, de una repoblación forestal, terraplenes, etc.) y en los diferentes afluentes (estabilización de los bancos de depósito del cauce de río). Una manera muy eficaz de guardar el sedimento grueso de entrada al depósito es construir presas auxiliares de control de sedimento aguas arriba (Vásquez Rivera, 2016).

4.2.3 Sistemas de control de la sedimentación. Existen diversas alternativas para evitar la sedimentación (o eliminar el ya sedimentado) dentro de un embalse, sin embargo, la solución no depende de la aplicación de una sola técnica sino de la combinación de varias de acuerdo a cada problema en particular (Kondolf et al., 2014).

4.2.4 Métodos indirectos. El mejor procedimiento para evitar la pérdida de capacidad en los embalses es la prevención de la erosión de los suelos de las cuencas mediante prácticas de conservación de suelo y agua. Detener el desgaste del suelo aminora la problemática de sedimentación en embalses (Armengol, 1998), también impedir que se pierda el suelo normalmente útil para fines agrícolas y forestales. Sin embargo, en el caso de grandes cuencas con condiciones de naturaleza muy pobre es difícil conservar los suelos en periodos cortos, implica un gran costo inicialmente y demanda tiempo para ver los beneficios sobre los usuarios (Andrade et al., 2016).

4.2.5 Métodos de diseño. A nivel de diseño las soluciones no son aplicadas únicamente a los nuevos proyectos, en embalses en operación es posible revisar y rediseñar algunos aspectos que contribuyan a evitar el problema de la sedimentación (Pérez & López, 2015).

a. Selección adecuada del sitio para ubicar al embalse: Esto implica tratar de seleccionar sitios donde el aporte de sedimentos no sea alto, dicha solución es utópica, debido a que muy probablemente los mejores sitios ya han sido empleados, por lo tanto, los menos adecuados serán los que en un futuro deben aprovecharse (Marengo Mogollón, 2001).

b. Determinar adecuadamente la capacidad reservada para aterramientos: Gran parte de los trabajos realizados sobre sedimentación de embalses, tienen como objetivo final calcular o

predeterminar con la mayor aproximación posible la ubicación del sedimento dentro del embalse y así poder definir la capacidad que deberá reservar para este fin (Cobo, 2008). Sin embargo, conviene señalar que, en un caso extremo, esto implica construir una presa con una gran capacidad para almacenar el sedimento, lo cual evidentemente no sería aceptable desde el punto de vista económico y tendría que plantearse otro tipo de solución (Maza Álvarez & García Flores, 1995).

c. Reducir la capacidad de retención de aterramiento: Se pretende tratar que el sedimento que ingresa a el embalse no tenga tiempo suficiente para depositarse. El interés fundamental que tiene estudiar las corrientes de densidad desde el punto de vista de aplicación en campo, está en la posibilidad de que estas puedan ser extraídas del vaso antes de que se depositen (Fuentes Norambuena, 2018).

d. Intercepción del sedimento antes del embalse: Se considera que el sedimento grueso es el principal problema dentro del embalse, es posible diseñar represas aguas arriba del vaso, que permitan la sedimentación del material. En países como Japón este procedimiento ha sido muy empleado, e incluso el material depositado se ha implementado como agregado para concreto. Estiman que el 90% del sedimento puede ser atrapado en la zona, con lo cual se evita su depósito del vaso (García Camacho, 2005).

4.2.6 Métodos directos. Por medio de los cuales se hace una remoción del sedimento depositado dentro del vaso, estas consisten en la remoción de sedimentos depositados en el embalse (García Camacho, 2005). Estas soluciones pueden clasificarse en tres:

- Técnicas de dragado
- Remoción hidráulica
- Remoción hidráulica de sedimentos con sifones

4.2.6.1 Dragado. Este proceso se encarga de mantener la profundidad del embalse y de los canales, colocando en suspensión los materiales que se han sedimentado, trasladándolos hasta una zona de extracción y transporte, situada en el lecho del embalse (USACE, 2015). Estas comenzaron usando medios similares a los empleados en las excavaciones en tierra firme, como lo fueron: cucharas, palas, entre otras. Con el tiempo surgieron las dragas de rosario, con esclava vertical primero y luego inclinada, lo que generó un gran desarrollo en los medios de dragado y permitió su empleo de forma casi general. Estos tipos de dragas se llaman de acción mecánica y su trabajo es sencillamente el mismo que hace cualquier elemento de excavación terrestre (Elzinga, 2017). Posteriormente surgieron las llamadas dragas hidráulicas o de succión, basadas en la posibilidad de transportar el material sólido mezclado con el líquido en proporciones aceptables y constituyendo la misma corriente líquida establecida por la bomba, el medio de excavación del terreno (Moreno Avalos, 2012). Este método permite realizar no solo el dragado, sino también el transporte por medio de tuberías a distancia variable, de acuerdo con la potencia de la bomba, pérdida de energía por el conducto y accesorios (Vásquez Rivera, 2016).

Los sistemas de dragados convencionales se clasifican en los siguientes tipos:

- Dragas Mecánicas
- Dragas Hidráulicas

Dragas mecánicas. Son equipos de dragados cuya acción sobre el terreno para su arranque y posterior extracción se realiza exclusivamente por medio mecánico, a diferencia de los equipos hidráulicos donde la extracción se realiza mediante una acción combinada de medios mecánicos de succión (Leonel, 2016). El medio por el cual se lleva a cabo la extracción del material constituye el elemento básico diferencial dentro de este tipo de dragas, por lo que su clasificación se suele realizar en función de las características del mismo. Los dragados mecánicos (de cucharón o de almeja) son limitados en lo que se refiere a la profundidad de dragado (Elzinga, 2017), pero la mayor desventaja es la turbiedad causada durante la operación y el retorno de los sedimentos al estado de suspensión, lo cual produce turbidez en el agua del embalse (Ortiz & Mora, 2018).

Dicho procedimiento es muy costoso, no obstante, el continuo incremento en la demanda de agua y el decrecimiento de sitios para ubicar nuevos embalses, probablemente harán que este tipo de soluciones dejen de ser antieconómicas (Moreno Avalos, 2012). Dentro de las dragas de acción mecánica se encuentran las siguientes:

- Draga de Pala Retroexcavadora
- Draga Dragalinas
- Draga de Cuchara
- Draga de Rosario o Cangilones

Draga de Pala Retroexcavadora. Es una máquina de robusta construcción y articulada mediante cables, aunque en la actualidad, dicho diseño se ha sustituido por las palas de accionamiento hidráulico. Ambos equipos, de cables o hidráulico, se montan en pontones rígidos, que aportan la reacción necesaria al esfuerzo de excavación como se evidencia en la Figura 7. La descarga se realiza en barcazas situadas en los laterales del pontón (Vargas Lozano, 2017). Esta draga cuenta

con un sistema de retro excavación que permite mejorar las condiciones de trabajo para casos específicos. Es muy apropiada para trabajar en terrenos de consistencias medias, conglomerados, gravas gruesas y medias, arenas gruesas, arcillas compactas y rocas quebrantadas. Por su sistema de trabajo se adapta en pequeños espacios de maniobra, pudiendo retirar rápidamente del tajo, los cazos tienen capacidades de 1 m^3 a 8 m^3 pudiendo llegar hasta 18 m de profundidad. Presenta un rendimiento de $23 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $765 \text{ m}^3/\text{h}$ (USACE, 2015).



Figura 7. Draga mecánica de retroexcavadora, (USACE, 2015)

Draga Dragalinas. La dragalina consta de una grúa con una pluma de gran longitud y dos tambores de cable, uno de elevación y otro de arrastre, montados sobre una pontona. Como se puede observar en la Figura 8, del cable de elevación se suspende una cuchara que, una vez

depositada sobre el fondo, se desplaza mediante el cable de arrastre. En caso de dragados en cauces estrechos, la dragalina trabaja desde tierra (Catalunya, 2003).

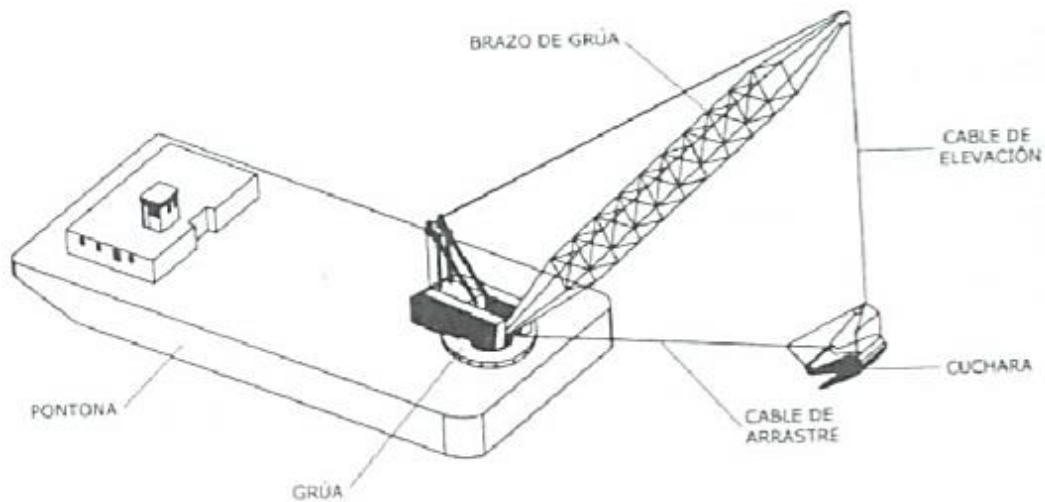


Figura 8. Partes principales de la draga Dragalinas, (Catalunya, 2003).

La cuchara no se deja caer verticalmente, como en el caso de las dragas de cuchara, sino que se lanza lo más lejos posible de la grúa, aprovechando la inercia producida por el giro de la grúa. A medida que se va recuperando el cable, la cuchara se arrastra por el fondo creando un agujero y llenándose de material (Cobo, 2008). Una vez llena la cuchara, se eleva y se gira la grúa hasta colocarla encima del gánguil para descargar el material. Una de sus principales ventajas es sin duda el hecho de ser una maquinaria en muchos casos convencional y que permite además trabajar en superficies estrechas. Sin embargo, el uso de la cuchara como elemento extractor conlleva una pérdida de eficiencia por la fuga de material en el proceso de izado (García Flores & Maza Álvarez, 1985). La profundidad de dragado oscila entre los 30 m y 60 m.

Draga de Cuchara. Es una simple grúa con una cuchara o almeja. Se usa para la conservación de los frentes de los muelles de atraque, puertos y embalses. Para fijar el buque se emplean varias anclas con lastres de arrastre, para evitar interferencias (Leonel, 2016). Existe algunos tipos de almejas los cuales son: sin diente, con grandes dientes y las de gajos o pulpo, dependiendo del material de fondo. En la actualidad se utilizan cucharas con un sistema hidráulica de apertura y cierre para lograr mayor fuerza y rendimiento como se muestra en la Figura 9. A pesar de que la capacidad de trabajo en el terreno es similar al de las cucharas terrestres, trabaja muy bien en terrenos sueltos o poco cohesivos, como fangos o arenas sueltas. La capacidad de la cuchara es muy diversa, llegando en las mayores hasta 200 m^3 , la profundidad alcanzada depende de la longitud del cable, siendo esta hasta de 200 m. Tiene un rendimiento de $23\text{ m}^3/h$ hasta $1,530\text{ m}^3/h$ (Elzinga, 2017).

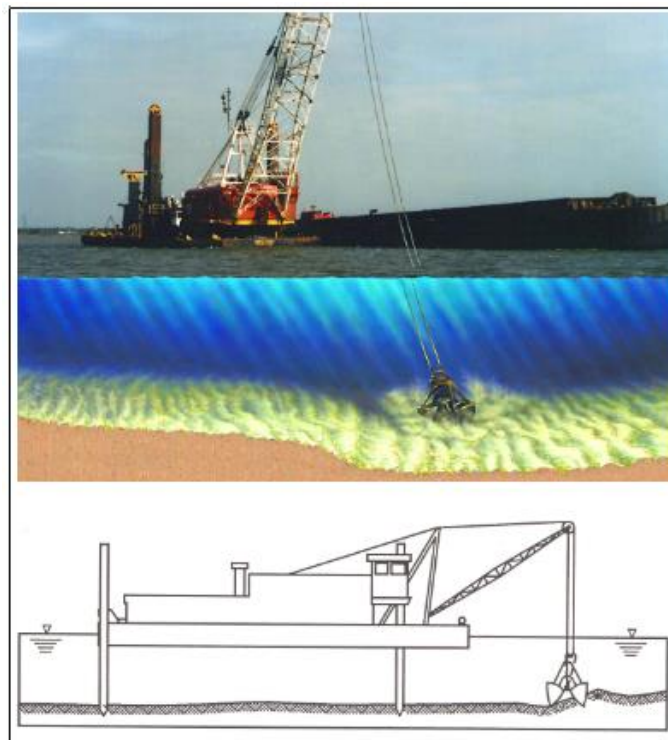


Figura 9. Dragado mecánico con cuchara, (Elzinga, 2017).

En el embalse de Rand Maines Sudáfrica, se ha llegado a dragar $6.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ usando una draga tipo almeja y en Lake Roslyn Oregón, se ha dragado con métodos similares $7.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ de arena volcánica durante un año (USACE, 2015).

Dragas de Rosario o Cangilones. Es la más importante de las dragas mecánicas y consiste fundamentalmente en un pontón rectangular con un pozo en un tercio extremo del mismo. Para dejar pasar el rosario cuenta con una torre central que sirve de soporte a la banda que en otro extremo cuelga de un poste del que puede izarse o bajarse hasta el fondo (Calle-velasco, 2018).

Este consiste en cierto número de cangilones unidos por eslabones, formando una cadena que corre a lo largo del soporte y de los tambores en sus extremos. La forma de trabajo es barrer el fondo con un movimiento pendular, para estos se disponen seis cables sobre anclas, uno en proa, otro en popa y cuatro laterales en proa y popa. Requiere de un poco calado para moverse, pero en cambio necesita un amplio espacio de maniobra y anclaje y cierta profundidad para trabajar, puede abrirse ella misma el camino. En la Figura 10 se aprecia la draga tipo cangilones o rosario. Dan gran rendimiento y se presta a trabajar en casi todos los terrenos, siendo muy adecuada en zonas con piedras sueltas, cantos rodados, leños, entre otros, donde las bombas de succión no son adecuadas por no haber zonas de descarga o no poder instalar tuberías flotantes o sumergidas (Moreno Avalos, 2012).

Entre los inconvenientes presentados se encuentra que es muy costosas, necesitan mucho espacio para extender los anclajes y no son apropiadas para el trabajo en aguas someras o cuando el espesor a trabajar es pequeño. Además, la necesidad de barcazas o el vertido directo dificulta su

uso en tareas de regeneración costera. La profundidad de dragado oscila entre los 5 m y 35 m (Elzinga, 2017).

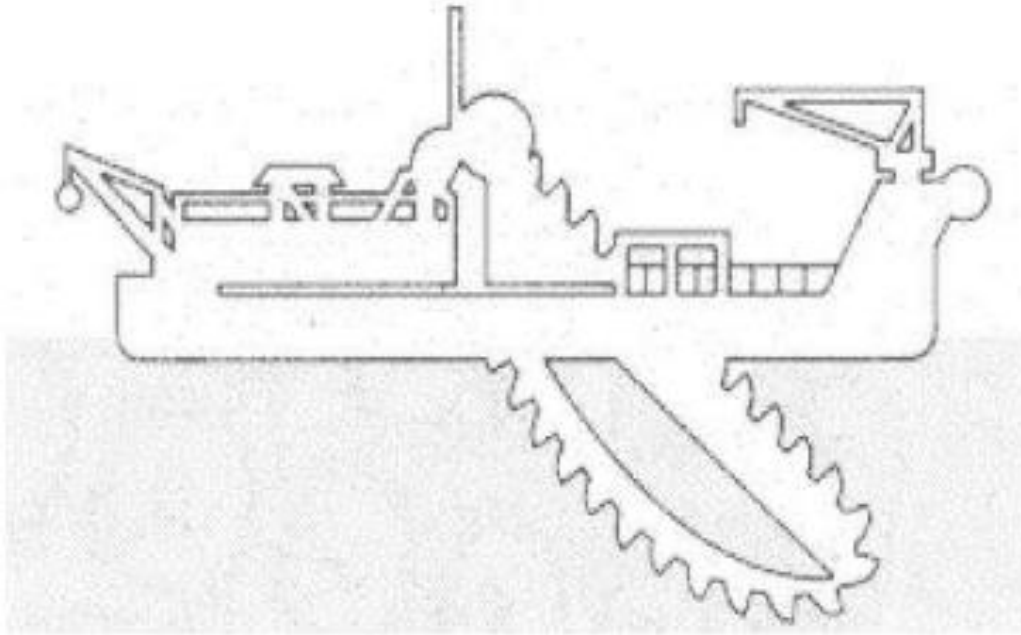


Figura 10. Dragas tipo Cangilones o Rosario, (Elzinga, 2017).

Esta draga puede clasificarse según la capacidad de cada cangilón, que puede variar entre 0.15 m^3 y 1.2 m^3 . Esta draga tiene un rendimiento de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $750 \text{ m}^3/\text{h}$ dependiendo de las barcasas de transporte (Calle-velasco, 2018).

Dragas hidráulicas. Remueven los sedimentos depositados en el embalse utilizando para ello un dispositivo que extrae directamente del fondo del embalse el sedimento y lo coloca en un contenedor para su posterior depósito (USACE, 2015). Se basan en la acción de una bomba centrífuga que a través de un tubo de succión o aspiración, arrastra e impulsa el material por una bomba a una tubería de descarga. Este sistema de dragado es eficiente en terrenos sueltos no cohesivos (arena, arcilla, limos, etc.) (Méndez & Galbán, 2009).

Dragas de Succión Estacionaria o Portadora. El sistema de esta draga se compone de una boca de succión, una tubería desde ésta a la bomba, la bomba y la tubería de evacuación. Al poner en contacto la boca de succión con el suelo, la corriente originada con el agua hace que los materiales puedan ser arrastrados formándose una mezcla de agua y sólidos, que pasan a través de la bomba y posteriormente es impulsada hacia el exterior (Leonel, 2016).

Esta draga está equipada con una cabeza de succión especial de forma similar a la boca de una maquina aspiradora dotada de inyectores de agua que ponen en suspensión los productos que son aspirados por la bomba, la cual es de poca altura manométrica, pero de gran capacidad, adecuada para terrenos sueltos. Su forma de trabajo es similar a una draga ordinaria, moviéndose sobre anclas en sentido longitudinal, cambiando posteriormente en otra dirección paralela, atracando el fondo hacia el ancla de la proa sobre la que se hace avanzar el barco, como se muestra en la Figura 11 (Marengo Mogollón, 2001). Estas dragas pueden excavar hasta los 3 m de profundidad y tiene profundidades máximas de 50 m. Los rendimientos de estas máquinas pueden ser de hasta $100,000 \text{ m}^3/\text{día}$, pudiendo dragar desde materiales sueltos a arcillas o rocas blandas (USACE, 2015).

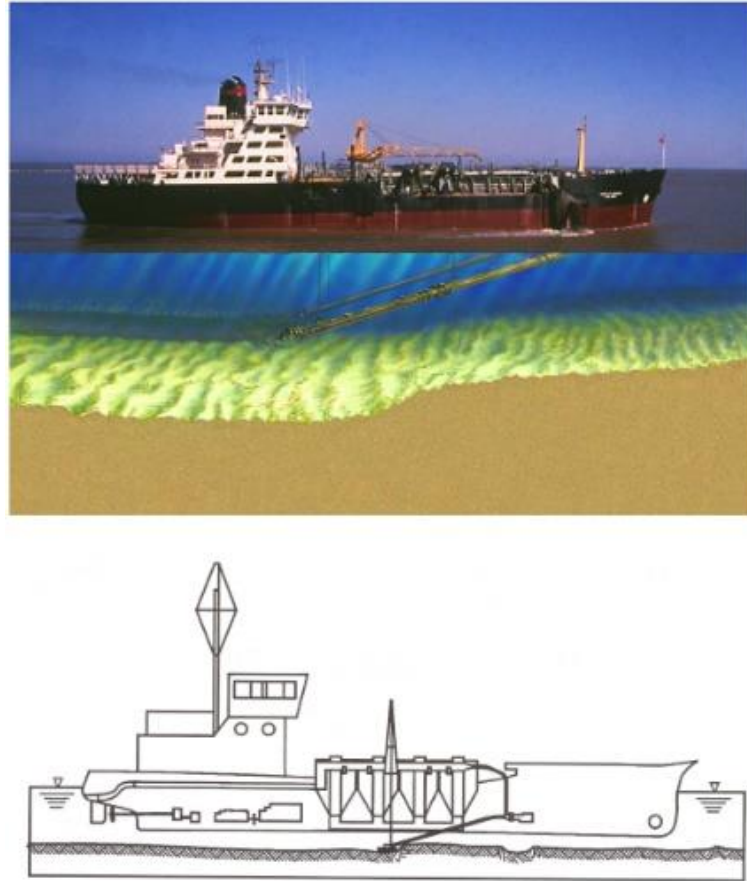


Figura 11. Dragado de succión estacionaria, (USACE, 2015).

Dragas Cortadoras “Cutter”. Este tipo de draga es una mejora directa de la draga de succión estacionaria, que incorpora además un dispositivo disgregador del terreno montado en el extremo del tubo de succión, como se evidencia en la Figura 12. Las dragas cortadoras son dragas estacionarias, es decir que no se desplazan conforme realizan el dragado (Walter et al., 2012). El cabezal cortador permite trabajar sobre materiales más cohesivos y con una resistencia al corte superior que los permitidos con el resto de dragas hidráulicas. Este cabezal giratorio disgrega el material y succiona la pulpa mediante un sistema de bombeo (Kondolf et al., 2014). Para optimizar el proceso, el cabezal cortador debe situarse próximo a la zona donde la bomba absorbe la pulpa.

Prácticamente se puede utilizar en todos los terrenos, salvo en las rocas duras y bolos, pudiendo verter en cangilones, aunque generalmente se utilizan tuberías. Las dragas con cortador pueden dragar profundidades de hasta 35 m. La capacidad de extracción de estas dragas es de $76 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $3,820 \text{ m}^3/\text{h}$, pero esta puede variar de acuerdo al tamaño de la tubería de succión (USACE, 2015).

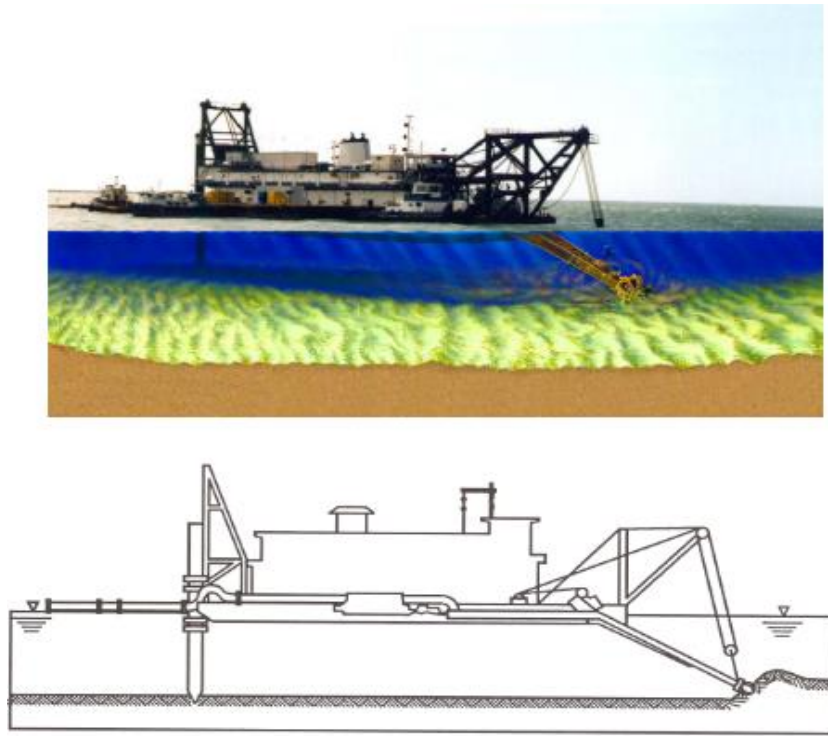


Figura 12. Dragado por corte, (USACE, 2015).

En el Anexo F se presentan las tasas de descarga como funciones de la velocidad de la tubería para dragas que varía entre 8 in y 30 in (Elzinga, 2017).

Dragas Dustpan. Denominada así por su similitud con el funcionamiento de una aspiradora, la draga dustpan de tubería hidráulica autopropulsada utiliza una cabeza de dragado ampliamente ensanchada a lo largo de la cual se montan chorros de agua a presión (Figura 13), los cuales aflojan

y agitan los sedimentos, que luego se capturan en la cabeza del recogedor a medida que la draga se arrastra hacia la excavación (Moreno Avalos, 2012). Estas dragas trabajan con una profundidad mínima de 1.5 m y máxima de 20 m, y presentan un campo de aplicación muy limitado para los materiales que draga los cuales son limos y arenas sueltas (Quiñones, 2009). Presenta un rendimiento de extracción de materiales de $900 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $4,350 \text{ m}^3/\text{h}$ (Leonel, 2016). No son apropiadas para trabajos de dragados de apertura o para áreas abiertas y expuestas. Estas unidades generan una gran cantidad de sedimentos en suspensión cuando operan, por lo que su aplicación es limitada a materiales sueltos (Catalunya, 2003).

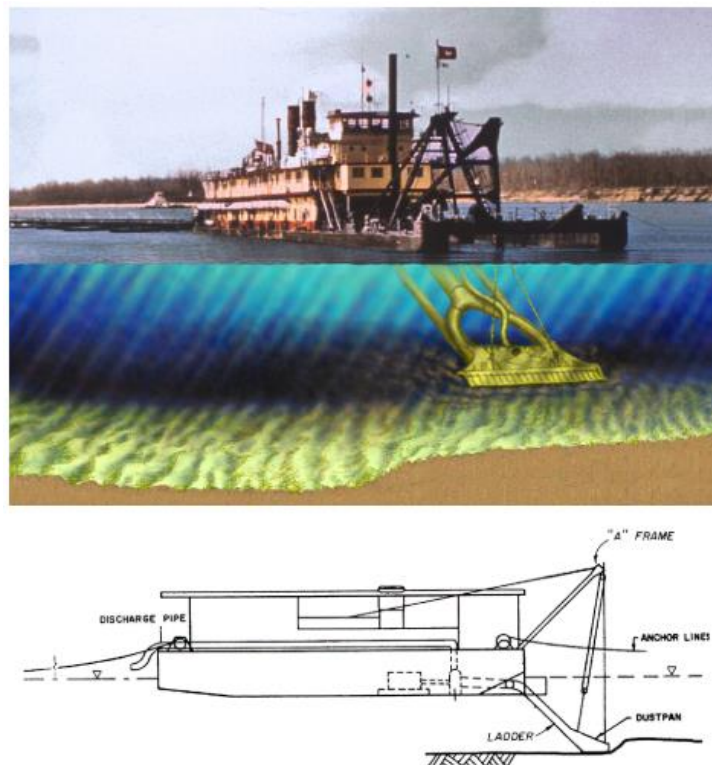


Figura 13. Dragado Dustpan, (Moreno Avalos, 2012).

Dragas de Succión en Marcha o de Arrastre. Una draga de succión en marcha es una embarcación autoportante y autopropulsada, de dimensiones variables, diseñada para dragar de forma continua elevados volúmenes de material de una forma sencilla y económica (Vargas

Lozano, 2017). El material es aspirado por un tubo dotado en su extremo de un cabezal de succión. A bordo de la embarcación se instala una bomba que crea el vacío necesario en el cabezal para poner en suspensión los materiales sueltos en el agua, y se aspira la mezcla agua-material que se almacena en la cántara de la propia draga (Sánchez Blum, 2014). La Figura 14 muestra los elementos principales de una draga de succión en marcha (USACE, 2015).



Figura 14. Dragas de succión en marcha, (USACE, 2015).

Durante el proceso de dragado el material aspirado se vierte en la cántara, donde los sólidos decantan hacia el fondo y el agua que queda por encima y se va evacuando a través de un dispositivo de rebose (Elzinga, 2017). En la Figura 15 se puede observar la cántara de una draga de succión (USACE, 2015).



Figura 15. Cantara de una draga de succión (USACE, 2015).

La capacidad necesaria de la cántara dependerá del trabajo a realizar, pudiendo variar desde los 100 m^3 hasta los $20,000\text{ m}^3$. Una de las grandes ventajas de este tipo de dragas es la posibilidad de transportar el material dragado a grandes distancias (Catalunya, 2003). La descarga del material puede realizarse por apertura del fondo o por bombeo. Las dragas de succión están principalmente diseñadas para dragar terrenos blandos, no demasiado compactos ni cohesivos, como fangos, arcillas blandas, arenas y ciertas gravas. Las dragas de succión en marcha suelen trabajar entre 4 m y 50 m de profundidad, aunque ya se han alcanzado profundidades de trabajo que llegan a 120 m y 150 m, pueden llegar hasta producciones de $25,000\text{ m}^3/h$ (Armengol, 1998).

Impactos ambientales generados por el dragado. Los procesos de dragado y de descarga del material dragado tienen el potencial para generar impactos negativos en las características físicas, químicas y biológicas del ambiente. Los potenciales impactos negativos generados son: impactos sobre la calidad del agua, suspensión y distribución de sedimentos contaminados, impactos sobre peces, flora y otros organismos y cambios físicos del fondo acuático (Scheuerlein, 1986).

Impactos sobre la calidad del agua. Durante y después del dragado y la descarga del material dragado, los sedimentos del fondo son mecánicamente removidos y suspendidos en la columna de agua. Los sedimentos más pesados como gravas y arenas rápidamente se sedimentan, pero los sedimentos finos como arcillas y limos permanecen en suspensión (Landaeta, 2012). Esos sedimentos finos son transportados por las corrientes y el oleaje cubriendo grandes áreas, algunos estudios han reportado hasta 5 kilómetros cuadrados de la nube de sedimentos generando turbidez y por ende reducción de la penetración de la luz necesaria para los procesos de fotosíntesis y cambios en el calor de radiación (Landaeta, 2012). Algunos de los parámetros que reflejan los cambios químicos sobre la calidad del agua, producto del dragado y la descarga son: la demanda de oxígeno, el aumento de nutrientes, presencia de trazas de metales pesados y pesticidas en la columna de agua y la modificación de los niveles de salinidad. (Walker & Thoms, 1993).

Suspensión y distribución de sedimentos contaminados. Usualmente, los sedimentos localizados en puertos y canales de navegación ubicados en las cercanías de grandes ciudades con complejos industriales o petroleros, altos volúmenes de tráfico comercial y descarga directa de aguas servidas presentan altos niveles de contaminación. Una de las causas de esta situación es la presencia de partículas de arcillas y limos con cargas negativas, las cuales tienden a absorber los contaminantes. En consecuencia, los procesos de dragado y descarga no incorporan nuevos

contaminantes al medio acuático simplemente tienen el potencial para poner en suspensión y distribuir los sedimentos contaminados por las fuentes de polución antes citadas (Landaeta, 2012).

Potenciales impactos sobre peces, flora y otros organismos vivos. Los sistemas acuáticos son muy diversos, dinámicos y cambiantes en espacio y tiempo por ello los cambios físicos y químicos generados durante y después del dragado y la descarga del material dragado pueden afectar la distribución de las diferentes especies presentes. Esos impactos son complejos y difíciles para predecir. La complicación es el grado de tolerancia de cada especie o de cada miembro de una especie (Muñoz et al., 2007). Durante el dragado y descarga se pueden producir cambios en los nutrientes y en la renovación del agua en el área de dragado y descarga, destrucción del hábitat por efecto de la remoción de los suelos, cobertura de los organismos vivos por efecto de las descargas, altos niveles de turbidez y cambios de temperatura, los cuales pueden ser intolerados por muchas de las especies vivas del área (Armengol, 1998).

Potenciales cambios físicos del fondo acuático. Los ecosistemas acuáticos como sistemas integrales y dinámicos generan respuestas físicas a las alteraciones producidas por los procesos de dragado y descarga del material dragado. Las alteraciones en la topografía de los fondos acuáticos dragados, entre otros cambios, pueden modificar los patrones de flujo de las zonas afectadas. Esta situación genera cambios en los perfiles transversales y longitudinales de los canales o sea físicamente los canales muestran por ejemplo dunas, contra dunas y barras. La distribución de sedimentos que resulta de los cambios de patrones de circulación no siempre es predecible, por lo cual se pueden generar efectos indeseados (Landaeta, 2012).

4.2.6.2 Lavado (*flushing*) o remoción de sedimentos. Consiste en remover los sedimentos del embalse, valiéndose únicamente de la gran fuerza erosiva que tiene el agua, la cual socava a los depósitos de sedimentos y posteriormente transportar esta carga junto con el agua a través del cuerpo del embalse, para que sean evacuados cuando las estructuras de descarga de fondo de la presa sean abiertas (Atkinson, 1996), tal y como se indica en la Figura 16.

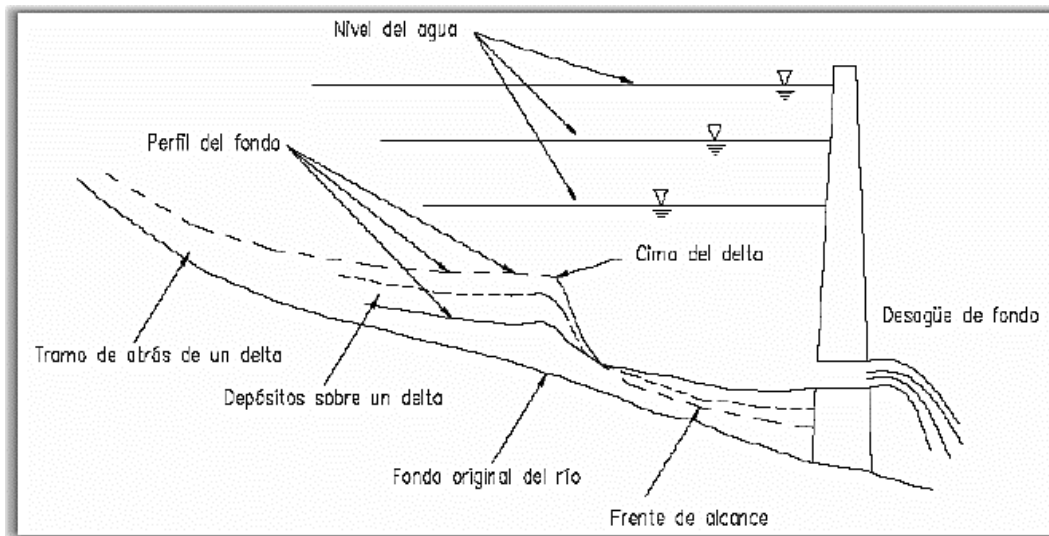


Figura 16: Proceso de remoción hidráulica de sedimentos durante la extracción, (Atkinson, 1996).

Si la extracción o remoción hidráulica del sedimento es maniobrada en embalses con depósito que han sido acumulados cerca de la estructura de descarga de fondo, estos pueden ser removidos abriendo todas las válvulas por tiempos muy cortos (Avenidaño & Cobo, 1998) , durante estos cortos periodos se dará lugar a la formación de una especie de embudo en forma de cráter, el mismo que es conocido como cono de remoción (Figura 17) (Vásquez Rivera, 2016).



Figura 17. Apertura de los desagües de fondo. Formación de conos de remoción. Presa Belesar España (Cobo, 2008).

La importancia de la formación de estos conos de remoción, radica principalmente en que si es posible bajar el nivel del embalse (Pérez & López, 2015), pueda generarse la formación de un flujo de elevada velocidad, que erosiona el borde del cono y por tanto se producirá la erosión retrogresiva (Sánchez Blum, 2014).

Entre los métodos más utilizados tenemos:

- Lavado hidráulico de sedimentos durante avenida (Sánchez Blum, 2014)
- Vaciado del embalse efectuando remoción por chorros de agua (Olsen, 1999)
- Desfogado de corrientes densas (Sánchez Blum, 2014)
- Lavado hidráulico de sedimentos en condiciones de flujo presurizado o hidrosucción y con superficie libre (Sánchez Blum, 2014)

- Remoción hidráulica de sedimentos con sifones (Ortiz & Mora, 2018)

Lavado hidráulico de sedimentos durante avenidas. Éste método de remoción hidráulica de sedimentos puede aplicarse para embalses que tienen varios años de funcionamiento en donde la capa de sedimentos se encuentra completa o parcialmente formada dentro del espacio destinado para el volumen muerto (Olsen, 1999). Los embalses deberán estar dentro de la clasificación de grandes, con una profundidad de 500 m, con una capacidad de embalse superior $1'000,000 m^3$ y una capacidad de desagüe superior a $2,000 m^3/s$, debido a la gran cantidad de agua a ser evacuada junto con los sedimentos (Marengo Mogollón, 2001), dicho método puede emplearse con mayor rango de seguridad en zonas con lluvias constantes y prolongadas, o en sitios menos lluviosos pero en épocas máximas de invierno, lo que garantizará que una vez culminada la avenida se efectúe el lavado hidráulico de sedimentos, y el embalse recupere inmediatamente su nivel normal de operación (Ortiz & Mora, 2018).

Para cada embalse existe una condición granulométrica, y para cada condición de operación una determinada eficiencia de retención, de ahí la importancia de conocer la curva granulométrica del material que ingresa al embalse y también sus propiedades físicas (Benblidia, Salem, & Demmak, 2001). El método puede aplicarse total o parcialmente como se muestra en la Figura 18, esto dependerá exclusivamente de lo que haya en las inmediaciones aguas abajo del embalse (Vargas Lozano, 2017). Si el lavado hidráulico se lleva a cabo en un sitio en donde el área a inundar aguas abajo de la presa está poblada su aplicación será evidentemente parcial debido al riesgo que se corre con la población, por el contrario, si en el sitio aguas abajo de la presa no existe peligro alguno podrá hacerse de forma total, y conforme avanza la corriente de agua junto con los sedimentos este paulatinamente disminuirá su profundidad (Walter et al., 2012).

También se debe tener en cuenta el uso del agua embalsada, si es para generación eléctrica o para suministrar agua, en donde el abastecimiento tanto de energía como de agua no se puede suspender por ningún motivo, el lavado hidráulico de sedimento durante avenidas se efectuará de manera parcial (Walker & Thoms, 1993). Al aplicar este método de limpieza hidráulica se corre el riesgo de socavar el cauce aguas abajo de la presa, debido a la cantidad de agua y sedimento que es evacuada por las compuertas, debido a la velocidad alta a la que se produce el impacto (Callevelasco, 2018).



Figura 18. Lavado hidráulico de sedimentos durante avenidas. (Sánchez Blum, 2014).

Para la puesta en marcha del método se requiere que las compuertas de fondo sean abiertas, le corresponderá un valor diario estimado de 1/10000 del costo total del proyecto, en el cual se incluyen los costos operativos y de funcionamiento (Olsen, 1999).

Vaciado del embalse efectuando remoción por chorros de agua. Este método no puede realizarse cuando el agua retenida en el embalse se utiliza exclusivamente para la generación de energía, o para agua potable debido que el vaciado conllevaría a una disminución o suspensión del servicio que se mantendrá hasta que el embalse vuelva nuevamente a llenarse (Pérez & López, 2015). En el caso de que trabajen en conjunto con otros embalses u otras fuentes de generación, se podría llevar a cabo como se observa en la Figura 19. Si se calcula que será llenado a la brevedad posible, o en su defecto que el embalse no contemple una extensa área de inundación, y que no existan en la zona comunidades, o de existir deberán estar ubicadas a una cota en donde el agua evacuada no cause ninguna destrucción o inundación (Palau Ybars, 1998).

Cuando el método es ejecutado y si no se ha elaborado e implementado un plan para rescatar a las especies acuáticas, éstas perecerán producto de la fuerza con que el agua es expulsada, y que con el pasar del tiempo generará un problema ambiental debido a los olores que son propios de la descomposición de la materia orgánica junto con la fauna muerta (Rosell et al., 1998).



Figura 19. Vaciado del embalse efectuando remoción por chorros de agua. (Sánchez Blum, 2014).

Este método se utilizó en el embalse de la presa Cachi en Costa Rica, el cual fue construido en 1966, tiene una altura de 76 m y una longitud de 184 m, con una presa en arco con un vertedor controlado por dos compuertas radiales. El lavado hidráulico del embalse aplicando el vaciado reduce su capacidad de atrape de sedimentos del 82% al 27%. El vaciado del embalse ha demostrado gran efectividad en la remoción de sedimentos, especialmente cuando estos se realizan de manera periódica (Calle-velasco, 2018).

Desfogado de corrientes densas. Al entrar una corriente a un embalse, es muy posible que el sedimento fino llegue a formar una corriente de densidad como se observa en la Figura 20, la cual

vijajara a través del embalse y condicionara el depósito del sedimento (Artigas, López, & Córdova, 2016).



Figura 20. Modelo de corriente de densidad en embalses. (Fuentes Norambuena, 2018).

Este método se puede aplicar en embalses jóvenes y en embalses con varios años de operación; obteniéndose mejores resultados en los primeros, debido a que en estos el agua se encuentra un poco más clara, y por lo tanto es mucho más fácil distinguir en donde se encuentra exactamente la corriente de densidad (Sánchez Blum, 2014). El principal problema que requiere para su aplicación es conocer con exactitud en donde se encuentra estas corrientes de densidad, ya que las corrientes de densidad para los embalses son un tema que en la actualidad se encuentra en estudio, y sólo son fáciles de representar en laboratorio (Calle-velasco, 2018).

Este método no requiere de la extracción de un volumen considerable de agua del embalse ya que el gasto sólido es menor al gasto de entrada al embalse, además con esto se reduce en gran medida la acumulación de sedimentos dentro del embalse (Vásquez Rivera, 2016). Si el sedimento fino que está ingresando a un embalse es igual o menor a 0.02 mm es muy conveniente la utilización de éste método de limpieza hidráulica, pues este diámetro de sedimento garantiza que en el embalse desde su puesta en marcha se está formando una corriente de densidad, por el contrario, si el sedimento es mayor a éste diámetro también puede formarse dicha corriente de densidad, pero depende de la velocidad del cauce del río con la que ingresa al embalse (Sánchez Blum, 2014).

El ejemplo más celebre en la extracción de sedimentos aplicando el método de desfogue de las corrientes densas, tuvo lugar en la presa Ighil Emda en Argelia, donde fue posible extraer el 53% del sedimento entrante (García Camacho, 2005). En China y en Irán también ha sido muy satisfactorio este procedimiento en embalses de mediano tamaño, sin embargo, en los grandes embalses el procedimiento no es tan efectivo (Mayorca & Muñoz, 2017).

Lavado hidráulico de sedimentos en condiciones de flujo presurizado o hidrosucción y con superficie libre. Este sistema presenta una alta efectividad si es instalado en la etapa de construcción, mientras que para embalses antiguos el método se vuelve un poco menos efectivo debido a la complejidad de la instalación, y a la ubicación de las tuberías de descarga (Marengo Mogollón, 2001). El método presenta un principal inconveniente, y es el constante taponamiento de la tubería de descarga la cual se observa en la Figura 21, principalmente para los embalses antiguos, en embalses nuevos y en aquellos en los que se ha contemplado desde la puesta en marcha del mismo que la limpieza se va a efectuar por éste método difícilmente se llega a dar un

taponamiento de tubería, debido a que los sedimentos que se encuentran ingresando al embalse pueden ser evacuados de forma inmediata, sin causar éste problema (Annandale, Randle, Langendoen, & Hotchkiss, 2018).

Cuando la mezcla agua-sedimento viaja dentro del embalse en condiciones de flujo presurizado se crea un medio en donde la presión atmosférica hace que los depósitos de sedimentos sean expulsados del embalse, usando únicamente la energía que es suministrada por la diferencia entre el nivel de aguas arriba y el de aguas abajo de la presa, para ellos se utiliza un dispositivo que extrae directamente del fondo del embalse el sedimento y lo coloca en un contenedor para su posterior depósito, o simplemente lo deposita aguas abajo de la presa (Sánchez Blum, 2014).

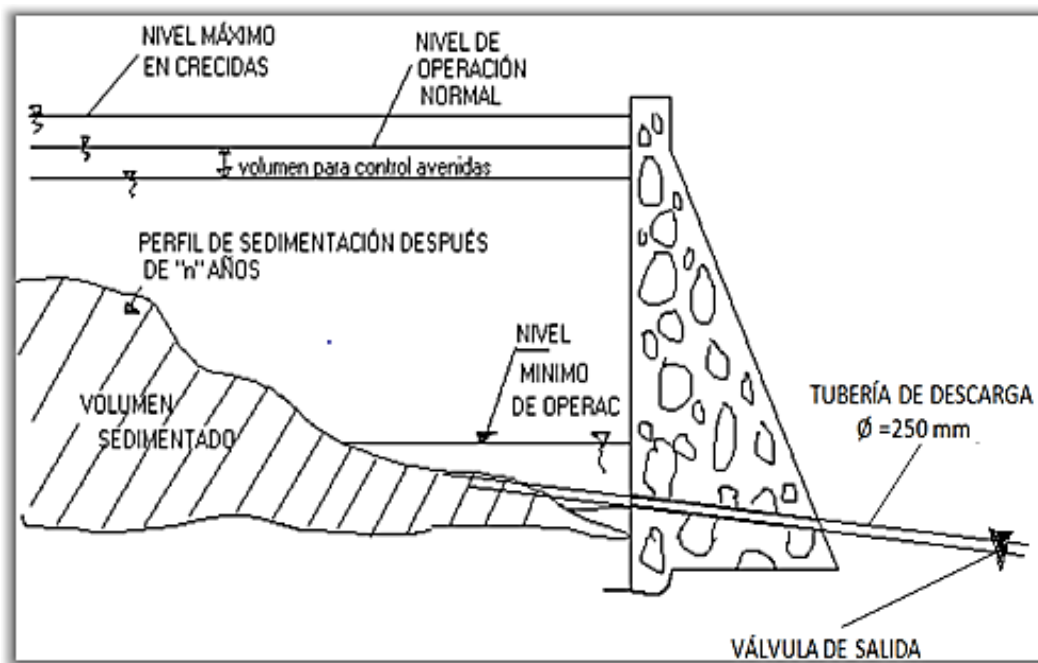


Figura 21. Lavado hidráulico de sedimentos a flujo presurizado (Sánchez Blum, 2014).

El método se aplicó en 1980 en el embalse de Sefid-Rud en Irán, los resultados obtenidos muestran que se removió 320'000,000 m^3 de sedimento durante los 10 primeros años, se utilizó 10'670,000 m^3 de agua, lo cual indica que se obtiene un promedio de 33 m^3 de agua por cada 1 m^3 de sedimento, y además se incorporan sedimentos suspendidos de 48 gramos por cada litro de agua (Atkinson, 1996).

Remoción hidráulica de sedimentos con sifones. Este método remueve sedimentos no cohesivos desde el fondo del embalse usando un sifón que succiona el sedimento y lo lleva aguas abajo de la presa como se muestra en la Figura 22. La ventaja de este método es que el sifón puede ser instalado en cualquier parte del embalse y retirado en caso de ser necesario. La capacidad del sifón se determina por la carga disponible y por el diámetro del tubo o de las mangueras (García Camacho, 2005). Antes de seleccionar este método para llevar a cabo una remoción y manejo de sedimentos es necesario determinar el tipo de material que se encuentra en el sitio, así como sus propiedades (granulométricas, cohesión, etc.), (de la Riva, Ibarra, Montorio, & Rodrigues, 2016).

Cuando se aplica este método el principal inconveniente que puede presentarse es el cebado del sifón, ya que para poder efectuar un correcto cebado del mismo se necesita de una bomba hidráulica, su potencia depende directamente de la longitud del ramal que corresponde a la boca de entrada de sedimentos, por lo tanto, esta altura debe de ser obligatoriamente menor a la capacidad de succión de la bomba (García Camacho, 2005). En ciertas ocasiones, aunque la longitud de este ramal sea inferior a la capacidad de la bomba se vuelve muy difícil cebar el sifón, y se debe en gran parte al peso propio y densidad de los sedimentos, lo que ocasiona que en la tubería se produzcan grandes pérdidas por fricción, lo cual impide el correcto proceso (Fernández Carrasco et al., 2001).

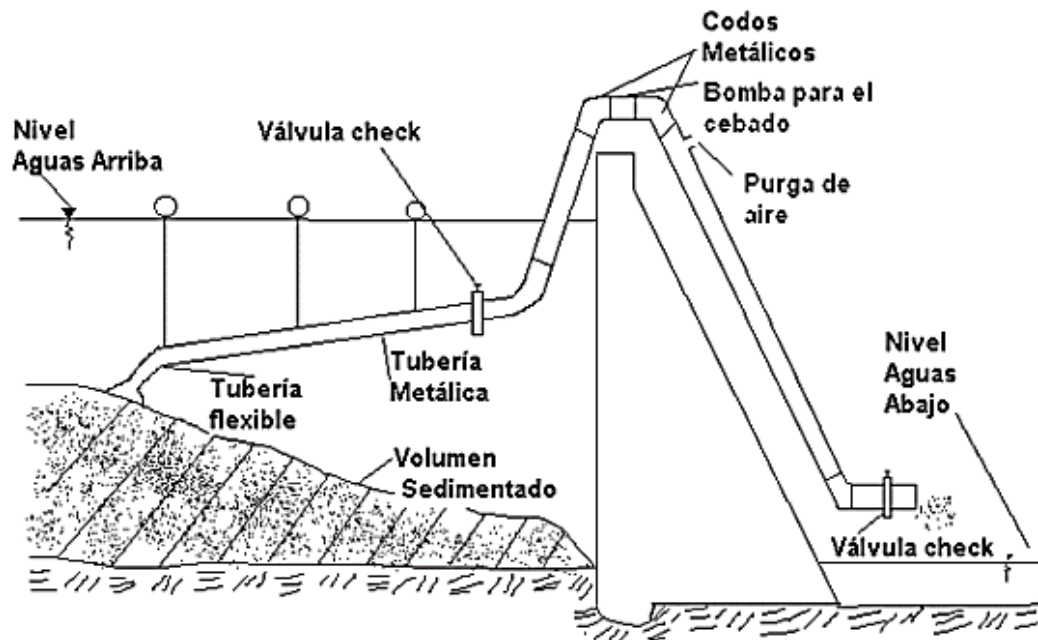


Figura 22. Remoción hidráulica de sedimentos utilizando el método de sifones con flotadores para mantener constantes la presión (Ortiz & Mora, 2018).

Los sedimentos que son removidos pueden variar desde muy finos como arcillas cohesivas hasta llegar a limos, arenas, piedras y grava con diámetros máximos de 400 mm (Calle-velasco, 2018). La capacidad típica promedio se encuentra en el rango de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ cuando los sedimentos son cohesivos y para sifones con diámetro de 200 mm, y más de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ cuando el sedimento está comprendido por material arenoso con diámetro del sifón de 400 mm (Vásquez Rivera, 2016).

Impactos ambientales del lavado hidráulico de sedimentos.

Durante el vaciado:

- Variación del caudal del río aguas abajo del embalse. Inicialmente aumento del caudal y reducción hasta caudal en régimen fluyente durante la última fase (Rosell et al., 1998).

- Aumento de la turbiedad del río aguas abajo del embalse por el lavado de las márgenes al aumentar el caudal (Rosell et al., 1998).
- La reducción rápida a régimen fluyente puede provocar el aislamiento de peces en pozas generadas en los márgenes (Walker & Thoms, 1993).
- Reducción del contenido de oxígeno disuelto y de habitabilidad física por disminución del volumen de agua embalsada (Salazar et al., 2013).
- Aumento de la turbiedad de las aguas del embalse por la erosión del cauce o por la descompresión de sedimento en el cuenco (Landaeta, 2012).

Durante el llenado:

- Reducción del caudal que puede provocar el aislamiento de peces en aguas embalsadas río abajo (Walker & Thoms, 1993).
- Disminución de concentración de oxígeno disuelto por oxidación del sedimento (Salazar et al., 2013).
- Presencia de turbiedad al aumentar la altura de la lámina de agua (Rosell et al., 1998).

4.3 Sedimentación embalse de Bucaramanga

4.3.1 Caracterización y depósito de sedimentos. El embalse de Bucaramanga es considerado joven debido a que inicio su etapa operativa en el año 2015, tiene un área de espejo de agua aproximada de 48.6 ha, cuenta con cuatro afluentes de agua, las cuales son tres quebradas (la Reforma, las Ranas y los Monos) y el río Tona como se evidencia en el Anexo D, igualmente se consultó información batimétrica y sedimentológica del embalse, tanto previo a la construcción de la presa, como en diferentes etapas de operación como se evidencia en la Figura 23, en un periodo de 2015 a 2018 (AMB & SAS, 2019).

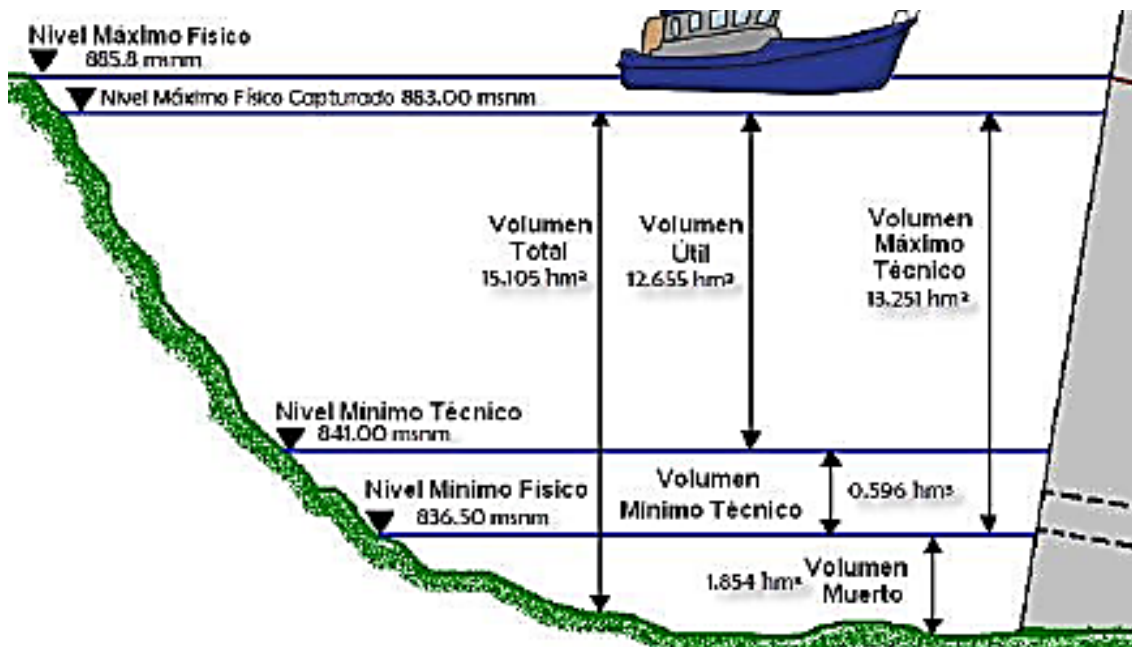


Figura 23. Ilustración volúmenes en cotas características 2018, (AMB & SAS, 2019).

A partir de la información batimétrica, fue posible obtener algunas de las características del embalse, dentro de la información obtenida, se determinaron valores de los volúmenes

característicos del embalse como se muestra en la Tabla 2 (AMB & SAS, 2019). En la cual se especifica el cambio del volumen total del embalse en los últimos cuatro años, evidenciando un volumen inicial de 15.96 hm^3 y un volumen al final de 15.105 hm^3 , con una pérdida de 0.86 hm^3 . Del mismo modo se registra un volumen muerto inicial de 2.52 hm^3 y un volumen final de 1.854 hm^3 , mostrando una pérdida de 0.666 hm^3 (AMB & SAS, 2019).

Tabla 2.

Comparación de volúmenes en cotas características.

Nivel para cálculo		Volúmenes 2015 hm^3	Volúmenes 2017 hm^3	Volúmenes 2018 hm^3
836,50		2,52	1,99	1,85
841,00		3,18	2,60	2,45
883,00		15,96	15,18	15,10
Embalse Bucaramanga AMB				
Niveles de Referencia (msnm) para 2018				
Mínimo Físico	N_{MIF}	836,50	836,50	836,50
Mínimo Técnico	N_{MIT}	841,00	841,00	841,00
Máxima captura por Batimetría SAS	N_{CCB}	883,00	883,00	883,00
Máximo Físico de Operación	N_{MAFO}	885,8	885,8	885,8
Volúmenes Característicos (hm^3)		2015	2017	2018
Volumen Muerto	V_{Muerto}	2,52	1,99	1,854
Volumen Mínimo Técnico	V_{MIT}	0,66	0,61	0,596
Volumen Útil	V_U	12,78	15,52	12,655
Volumen Máximo Técnico	V_{MAT}	13,44	13,13	13,251
Volumen Total	V_T	15,96	15,96	15,105

Nota: Comparación de volúmenes en cotas características, (AMB & SAS, 2019).

En todos los periodos de tiempo se tomó como cota máxima la 883.00, en vista que fue el nivel máximo que se capturo en el estudio realizado para el año 2018. También se determinaron en los

periodos de 2015 a 2018 la sedimentación y erosión del embalse como se muestra en la Tabla 3 (AMB & SAS, 2019).

Tabla 3.

Volúmenes sedimentación vs erosión.

Embalse Bucaramanga		
Periodo	Sedimentación m ³	Erosión m ³
2015-2017	1'071.742,66	296.268,89
2017-2018	254.086,84	168.043,32

Nota: Volúmenes sedimentación vs erosión, (AMB & SAS, 2019).

A partir de los estudios de batimetría se pudieron observar los perfiles transversales comparativos a lo largo del embalse representados en el anexo E. En los cuales se ve representado en azul, verde y magenta las batimetrías de los años 2015, 2017 y 2018 como se representa en la Figura 24 y 25. Los perfiles analizados corresponden al sector en el cual están depositados la mayor cantidad de sedimentos en el embalse (AMB & SAS, 2019).

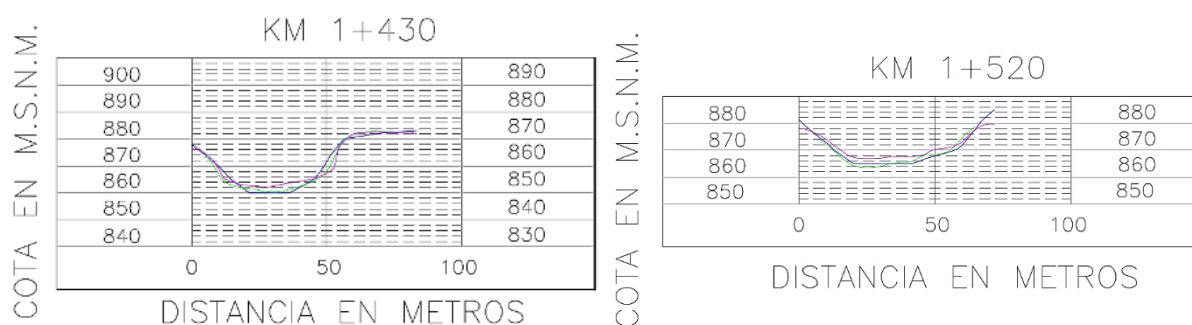


Figura 24. Perfil transversal de las cotas Km1+450 hasta la cota Km1+520 (AMB & SAS, 2019).

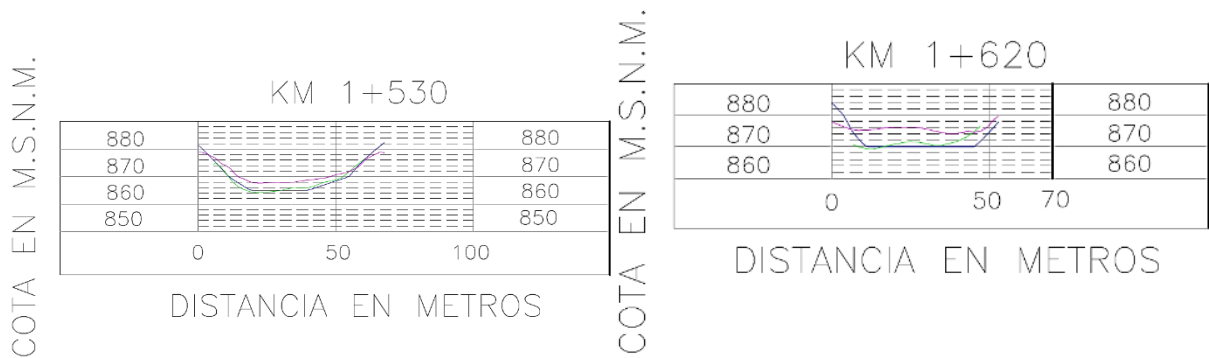


Figura 25. Perfil transversal de las cotas Km1+530 hasta la cota Km1+620 (AMB & SAS, 2019).

Con las batimetrías que se obtuvieron entre el año 2015 y 2018 especificadas anteriormente, en las cuales se pudo evidenciar la pérdida de volumen muerto del embalse de Bucaramanga que corresponde a 0.666 hm^3 equivalente al 26.43% del volumen, y la pérdida de volumen total es de 0.86 hm^3 equivalente a 5.36% desde la primera batimetría realizada en el 2015 hasta el 2018. Con lo anterior se puede estimar que el embalse se colmataría en aproximadamente 200 años pero si hay presencia de avenidas con grandes cantidades de sedimentos su periodo de colmatación estaría alrededor de los 100 años, mientras que el volumen muerto llegaría a la colmatación dentro de 13 años (AMB, 2012b).

4.3.2 Sedimentos en suspensión. La información sobre sedimentos recopilada en los estudios de INTEGRAL S.A. (AMB, 2012b), partió de los registros diarios de concentración superficial de sedimentos en suspensión, en el periodo de febrero de 2005 a octubre de 2006 y sus caudales asociados; sin embargo, no se contó con curvas granulométricas del material muestreado que permitiera realizar una caracterización del tipo de sedimentos en suspensión presentados en el cauce del río Tona (AMB, 2012a). Tampoco se obtuvieron registros de aforos de sedimentos completos, que integren la variación de la concentración de material en suspensión a lo ancho y alto de la sección hidráulica del río, lo que incide de manera directa en la calidad de los resultados obtenidos, con una tendencia a subestimar el transporte de sedimentos de la cuenca (AMB, 2012b).

Ante esta situación, INTEGRAL S.A. planteó una serie de aforos sólidos realizados en diferentes períodos climatológicos en dos sitios específicos, uno de estos puntos aguas arriba del embalse y otras aguas abajo del sitio de presa en el puente sobre el río Toná, los cuales incluyeron una recuperación de muestras tanto del material en suspensión como del material de lecho para su posterior caracterización. La granulometría encontrada para el material en suspensión en las dos estaciones de aforo definidas, en las cuales se observa una distribución de tamaños correspondientes a materiales tipo limos y arenas muy finas para la composición de la carga de material en suspensión (AMB, 2012a).

4.3.3 Sedimentos en fondo. Para la caracterización de los sedimentos de fondo se contó con curvas granulométricas del material de lecho, obtenidas en el estudio anterior por medio de barras puntuales localizadas sobre el eje proyectado de la presa y a 350 m y 500 m aguas arriba del mismo, adicionalmente se contó con el resultado de las granulometrías del material de lecho realizadas sobre las muestras recuperadas durante el año 2011 y que fueron mencionadas anteriormente. A partir de la información disponible se puede observar una composición característica de un material predominantemente arenoso. Sin embargo, el cauce presenta una distribución diferente para el material del lecho, observándose grandes bolones de roca superiores a un metro de diámetro, que no están incluidos en la curva granulométrica (AMB, 2012a; AMB et al., 2008).

4.4 Evaluación de los métodos a emplear en el embalse de Bucaramanga

Se determinó mediante una caracterización de materiales el tipo de suelo sedimentado obteniendo como resultado suelos arenosos con alta presencia de limos y en el lecho del embalse gravas de gran diámetro (AMB et al., 2008). Por medio de batimetrías realizadas en los años 2015, 2017 y 2018 se determinó que el afluente del río Toná es la zona más afectada por la sedimentación presentando profundidades de 2 m a 10 m (AMB & SAS, 2019) como se evidencia en las Figura 26, mientras que en los afluentes de las quebradas las Ranas y la Reforma existe presencia de sedimentos pero en menor cantidad (Figura 27 y Figura 28 respectivamente), por otro lado, la quebrada los Monos no evidencia presencia de sedimentos en su afluente puesto que se presenta un canal de disipación de energía donde los sedimentos quedan depositados como muestra en la Figura 29.



Figura 26. Afluente del río Toná



Figura 27. Afluente quebrada las Ranas



Figura 28. Afluente quebrada la Reforma



Figura 29. Afluente quebrada los Monos

La fracción de sedimentos que continúan su trayecto al interior del embalse terminan siendo depositados en el volumen muerto el cual presenta una pérdida del 26.43%; según la rata entre el año 2017 y 2018 de 75,000 m^3 de sedimentos muestran que el embalse podría llegar a colmatarse a los 200 años, no obstante, si hay presencia de avenidas con grandes cantidades de sedimentos su periodo de colmatación estaría alrededor de los 100 años (AMB et al., 2008).

Siendo este un embalse en funcionamiento se puede determinar que los métodos indirectos y de diseño no pueden ser implementados en la extracción de sedimentos debido a que su aplicación se realiza durante la etapa previa o de construcción del embalse.

De acuerdo a la revisión literaria se elaboraron las Tablas 4 y 5 las cuales resumen de forma general el comportamiento de los principales tipos de dragas en función del material a dragar y se muestran los equipos más adecuados para cada tipo de terreno.

Tabla 4.

Comparación de las dragas en función del terreno.

	Buen comportamiento	Mal comportamiento
Pala	Casi todos, incluso terrenos muy duros y compactados	Terrenos fluidos
Cuchara	Terrenos sueltos o algo cohesivos	Terrenos fluidos o duros
Rosario	Fangos, arcillas y arenas compactadas hasta rocas blandas	Arcillas muy cohesivas
Succión estacionaria	Arenas sueltas o semicompactadas, fangos sueltos	Arenas compactadas o cohesivas
Cortadora	Todo tipo de terreno excepto rocas duras	Rocas
Dustpan	Limos, arenas sueltas	Terrenos compactados
Arrastre	Gravas, arenas sueltas, arenas fangosas, limos, etc.	Terrenos compactados

Nota: Comparación de las dragas en función del terreno, (Catalunya, 2003).

Tabla 5.

Equipo más adecuado para cada terreno.

Tipo de extracción		Dragado mecánico			Dragado Hidráulico			
		Pala	Cuchara	Rosario	Succión			
Profundidad (min-max) [m]		0 - 18	0 - 200	5 - 35	Estacionaria 1,5 - 50	Cortadora 1,5 - 35	Dustpan 1,5 - 20	Arrastre 4 - 50
MATERIALES	Arena compacta	X		X		X		
	Arena suelta			X	X	X	X	X
	Arena fangosa		X	X	X			X
	Fangos		X	X	X			X
	Arcilla suelta		X	X		X	X	X
	Arcilla plástica	X	X	X		X	X	
	Arcilla compacta	X		X		X	X	
	Arena con grava	X	X	X		X		X
	Margas	X		X		X		
	Roca sin voladura					X		
	Rocas (previa voladura)	X	X	X		X		

X Equipo adecuado

Utilizando como filtro de selección los impactos ambientales entre los cuales se encuentran problemas relacionados con la calidad del agua, suspensión y distribución de sedimentos contaminados, impactos en peces, flora-fauna y otros organismos vivos y cambios físicos en

cuanto al fondo acuático (Landaeta, 2012), se puede determinar que el dragado hidráulico por su mecanismo de succión presenta menores alteraciones en la calidad del agua.

Dentro de la clasificación de los dragados hidráulicos se puede determinar que aquellos que se adaptan en cuanto a condiciones físicas de los sedimentos, a su profundidad y al equipo más adecuado de trabajo se encuentran las dragas Dustpan y de Arrastre, ya que como se mencionó anteriormente sus impactos ambientales se presentaran en menor magnitud. Para extraer el volumen de sedimentos de $860,000 m^3$ mencionado anteriormente y analizando los rendimientos presentes en las dragas se puede ver que la de arrastre presenta un rendimiento de $25,000 m^3/h$ (Armengol, 1998) teniendo la capacidad de remover los sedimentos en el embalse de Bucaramanga en aproximadamente 35 horas de trabajo, mientras que la draga Dustpan presenta un rendimiento entre $900 m^3/h$ y $4,350 m^3/h$ (Leonel, 2016), con una capacidad para extraer los sedimentos en 950 horas equivalente a 20 semanas o en 198 horas equivalentes a 4 semanas, dependiendo del tamaño de la draga a utilizar.

Basados en el análisis anterior y en las condiciones topográficas del embalse de Bucaramanga es más eficiente el uso de una draga pequeña debido a la ubicación de los sedimentos, ya que se debe llegar al afluente del río Tona situado en un lugar estrecho de difícil acceso.

Con la revisión literaria de los métodos de extracción de sedimentos por medio del lavado hidráulico o flushing se determinó que no son de aplicación a embalses de suministro de agua potable como es el caso del embalse de Bucaramanga, debido a que debe tener un continuo funcionamiento y este no puede llegar a ser vaciado en ningún momento. Del mismo modo, en cuanto a la estructura para el control del volumen de excesos del embalse cuenta con vertedero de excesos mas no con una compuerta de fondo, lo cual es otro de los limitantes para la aplicación de este tipo de métodos. Además, en cuanto a impactos ambientales no es recomendado por la

cantidad de organismo vivos presentes en el embalse los cuales se ven afectados directamente por la alteración de su habitat.

5. Conclusiones

Basados en la caracterización de los materiales sedimentados en el embalse de Bucaramanga el cual evidencia la presencia de limos y arenas con profundidad de sedimentos de 2 a 10 metros, permite filtrar y limitar los métodos de extracción de sedimentos a dragado.

Dada la presencia de materia orgánica en los sedimentos se podría contaminar el agua la cual perderá porcentaje de oxígeno disuelto y afectará el hábitat de los seres vivos en el embalse, por lo tanto, las dragas hidráulicas que se adapta a las condiciones del embalse son de arrastre y la Dustpan debido a que su mecanismo de trabajo presenta menor alteración del estado de reposo de los sedimentos y además permiten remover una gran cantidad de agua contaminada y así evitar la propagación de los contaminantes orgánicos.

El lavado hidráulico de sedimentos o Flushig no puede ser aplicado al embalse de Bucaramanga, debido a que su uso es de agua potable y por lo tanto se debe mantener en funcionamiento constantemente.

En estudios de batimetría realizados en los años 2015, 2017 y 2018 se observó que el embalse perdió aproximadamente el 5.36% de su capacidad de volumen, con lo cual se evidencia que se podría colmatar a los 200 años, pero si hay presencia de avenidas con grandes cantidades de sedimentos su periodo de colmatación estaría alrededor de los 100 años.

6. Recomendaciones

Cualquier mecanismo de extracción de sedimentos en embalses trae consigo problemas ambientales, motivo por el cual las medidas de manejo adecuado de los sedimentos extraídos requieren de permisos y licencias ambientales, así como también se requieren licencias de explotación minera para conocer la mejor alternativa de tratamiento y disposición final.

Se encontró que las pendientes que rodean los afluentes del embalse son elevadas y con abundante vegetación, por lo cual es de difícil acceso para transportar los sedimentos, por lo tanto, se debe realizar un estudio de las vías de acceso al embalse por las cuales se va a hacer ingreso de las dragas para la extracción de sedimentos.

Evaluar la posibilidad de implementar nuevos métodos fuera de los convencionales que impliquen mayor comodidad y cercanía al área de depositación de los sedimentos del embalse.

Se deben realizar estudios de granulometría empleando diferentes tipos de ensayos que permitan comparar y valorar los resultados, obteniendo de esta manera valores más idóneos para así determinar qué tipo de sedimento es el encontrado a profundidad.

Se deben realizar sondeos del suelo para determinar el perfil estratigráfico y las características físicas del suelo bajo el embalse.

Referencias Bibliográficas

- Adler, F. (2006). Los Embalses y los Recursos Hídricos Superficiales. *Cet ISSN 1668-9178*, 12.
- AMB, E. de B. (2012a). *Estudios y diseños del proyecto de regulación del río tona - Hidrología - Clima - Sedimentos*. 5(28 (3)), 13–15.
- AMB, E. de B. (2012b). *Estudios y diseños del proyecto de regulación del río tona embalse de bucaramanga - Memorando Técnico 03 - Anexo 4*.
- AMB, Embalse de Bucaramanga, & Ingenieros consultores S.A., P. de león. (2008). *Estudios y diseños fase 2 para el proyecto de regulación embalse de Bucaramanga*.
- AMB, & SAS, B. (2019). *Informe de levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Bucaramanga*. 1–64.
- Andrade, C., Cristina, E., Chucay, N., Resumen, L. E., Salud, L. A., Universidad De Cuenca, A. M., & Enrique, L. (2016). *Estado del arte en manejo de sedimentos en cuencas andinas en el ecuador, caso de estudio cuenca del Rio Paute*. Retrieved from [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26236/1/PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26236/1/PROYECTO_DE_INVESTIGACIÓN.pdf)
- Annandale, G. W., Randle, T. J., Langendoen, E. J., & Hotchkiss, R. H. (2018). *Reservoir Sedimentation Management : A Sustainable Development Challenge*. (3), 72–75.
- Armengol, J. (1998). Efectos ecológicos del dragado y vaciado del embalse de barasona. *Armengol, J., 1998. Efectos, ecológica*, 17–33.
- Artigas, J. L., López, J. L., & Córdova, J. R. (2016). *Modelo de Operación para el Control de Sedimentos en el Embalse de Santo Domingo*. (October).
- Atkinson, E. (1996). *The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs*.

- Augusto, L., & Ávila, S. (2016). *Estudio de proveniencia de los sedimentos de la formación Bucaramanga, al sur de Río Frio, en los municipios de Floridablanca y Giron.*
- Avendaño, C., & Cobo, R. (1998). Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa. *Limnetica*, 14, 113–120.
- Balbontín Beltrán, J. E. (2013). *Modelación de la sedimentación en el embalse Rapel: delta y corriente de turbidez.*
- Benblidia, M., Salem, A., & Demmak, A. (2001). Extraction des sédiments dans les retenues. *La Houille Blanche*, (6–7), 76–78. <https://doi.org/10.1051/lhb/2001074>
- Bravo Garcia, F. (2017). *Evaluación De La Metodología De Eficiencia De Atrapamiento De Brune Para Cuantificar La Alteración Del Caudal Sólido Del Río Magdalena Aguas Abajo De Los Embalses Quimbo Y Betania.*
- Calle-velasco, S. (2018). *Estudio de las técnicas de descolmatación de embalses.*
- Catalunya, U. P. de. (2003). *Técnicas de dragado.*
- Cobo, R. (2008). *Los sedimentos de los embalses españoles.* 15(4).
- de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., & Rodrigues, M. (2016). *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación.*
- Durgunoglu, A., & Singh, K. P. (2017). *The economics of using sediment-entrapment reduction measures in lake and reservoir design.* (21).
- Elzinga, L. (2017). *Dredging of Reservoirs.* 151. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aa4f54843-399e-4d03-abcd-4944bb685e9c>
- Fernández Carrasco, P., Avendaño Salas, C., & Cobo Rayan, R. (2001). *Gestión comparada de sedimentos en embalses.* 1–9.

- Fuentes Norambuena, A. P. (2018). *Evaluación de alternativas de reducción del volumen para almacenamiento*.
- García Camacho, S. (2005). *Estudio teórico y experimental de la remoción hidráulica de sedimentos en un embalse*. 4–5.
- García Flores, M., & Maza Álvarez, J. A. (1985). *Colmatación en embalses*. 2–10.
- Jiménez Ramírez, O., & Farias, H. D. (2003). Problemática De La Sedimentación Del Embalse De Valdesia, República Dominicana. *Primer Simposio Regional Sobre Hidráulica De Ríos, Buenos Aires, Argentina.*, 29. Retrieved from https://www.academia.edu/17820116/Problemática_de_la_Sedimentacion_del_Embalse_de_Valdesia_Rep._Dominicana
- 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>
- Landaeta, C. J. (2012). Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga de material dragado. *Ingeniería UC*. Retrieved from <http://ocw.um.es/ciencias/ecologia/lectura-obligatoria-1/landaeta-01.pdf>
- Leonel, M. S. (2016). Optimización de los procesos de dragado aplicación río Magdalena Colombia. *IOSR Journal of Economics and Finance*, 3(1), 56. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>
- Marengo Mogollón, H. (2001). Aplicación en modelos físicos de la remoción hidráulica de sedimentos. *Ingeniería Hidráulica En México*, 16(1), 99–124.
- Martínez León, A. C., & Suarez Rodríguez, J. K. (2019). Valoración económica de los impactos

- ambientales generados por la sedimentación aguas abajo del embalse de la central hidroeléctrica Ituango, ubicada en el departamento de Antioquia. *Αγαη*, 8(5), 55.
- Mayorca, M., & Muñoz, N. (2017). *Aplicación de metodologías para la estimación de la eficiencia de atrapamiento de sedimentos en los embalses Colombianos - Betania, Miel y Urrá I*. 2–4.
- Maza Álvarez, J., & García Flores, M. (1995). *Trasporte de sedimentos Manual de ingeniería de rios*.
- Méndez, A., & Galbán, E. (2009). Evaluación Espacio–Temporal De La Sedimentación En El Embalse Burro Negro, Estado Zulia/Venezuela Mediante El Uso Combinado De Sig–Ecosonda–Dgps. *Geofocus.Rediris.Es*, 209–231. Retrieved from http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo10_2009.pdf
- Moreno Avalos, V. M. (2012). *Optimización de la succión de sólidos sumergidos utilizando bombas centrífugas con velocidad variable*. 268.
- Muñoz, G., Ariztia, F. D., & Campusano, D. (2007). Estudio De Sedimentación En El Embalse Rapel Memoria. *ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE RAPEL MEMORIA, Universidad de Chile*.
- Olsen, N. R. B. (1999). Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs modélisation numérique bidimensionnelle d’un procedé de chasse dans un réservoir. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1), 3–16. <https://doi.org/10.1080/00221689909498529>
- Ortiz, P., & Mora, J. (2018). *Estimacion de la sedimentacion en un embalse usando el modelo hidraulico*.
- Palau Ybars, A. (1998). El vaciado de embalses: consideraciones ecológicas y gestión

- medioambiental. *Ecología*, (12), 79–92.
- Perea Mesa, I. M. (2013). *Modelación del delta de sedimentos en un embalse que presenta rápidas fluctuaciones de nivel*.
- Pérez, M. L. G., & López, M. S. (2015). *Problemática ambiental derivada del vaciado de embalses : propuesta de protocolo de desembalse*. 1659–1668.
- Quevedo, U. T. E. de. (2006). *Estudio de Impacto Ambiental Definitivo - Proyecto Multiproposito BABA - Consorcio Hidroenergetico del Litoral*. (c), 2–6.
- Quiñones, F. (2009). *Análisis de la sedimentación y estrategias para el dragado de los embalses Loíza y Dos Bocas*. 1–24.
- Ramírez León, J. M. (2005). *Estimación de la producción de sedimentos en cuencas revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco*. 7(March), 294–313.
- Revel, N. M. T. K., Ranasiri, L. P. G. R., Rathnayake, R. M. C. R. K., & Pathirana, K. P. P. (2015). Estimation of Sediment Trap Efficiency in Reservoirs - an Experimental Study. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 48(2), 43. <https://doi.org/10.4038/engineer.v48i2.6833>
- Rosell, C., Nadal, J., Cahill, S., Campeny, R., Parpal, J., Pedrocchi, V., & Ruíz-Olmo, J. (1998). *Efectos del vaciado del embalse de Joaquín Costa sobre anfibios, aves y mamíferos vinculados al ambiente de ribera*.
- Salazar, G. J. P., Alfaro-De la Torre, M. C., Aguirre, R. N. J., Briones-Gallardo, R., Cedeño, C. J., & Peñuela, M. G. A. (2013). Geochemical fractionation of manganese in the Riogrande II reservoir, Antioquia, Colombia. *Environmental Earth Sciences*, 69(1), 197–208. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1947-x>
- Sánchez Blum, E. A. (2014). *Análisis de métodos para la limpieza hidráulica de sedimentos desde*

embalses.

- Scheuerlein, H. (1986). *RESERVOIR SEDIMENTATION - A VITAL PROBLEM OF THE FUTURE AND A CHALLENGE TO DREDGING TECHNOLOGY*. 294–300.
- Soucková, L., & Kominkova, D. (2017). The sediment of the Hostivar Reservoir (Prague, Czech Republic) as a memory of 45 years of pollution. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 28, pp. 204–213. <https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2015-0174>
- USACE, U. S. A. C. of E. (2015). *Dredging and Dredged Material Management*. (July), 920. Retrieved from http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-5025.pdf
- Vargas Lozano, H. N. (2017). *Gestión sostenible de sedimentos en el embalse de la central hidroeléctrica del bajo Anchicayá*. (29).
- Vásquez Rivera, M. del P. (2016). *Solución Al Problema De Sedimentación De La Represa Gallito Ciego*. 158. Retrieved from <http://servicios.uss.edu.pe/bitstream/handle/uss/4194/VasquezRivera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Velandia Roncancio, Y. C. (2016). *Análisis comparativo de metodologías para la predicción de la acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos*. 179. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/55575/>
- Walker, K. F., & Thoms, M. C. (1993). Environmental effects of flow regulation on the lower river Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management*, 8(1–2), 103–119. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450080114>
- Walter, K., Gunkel, G., & Gamboa, N. (2012). An assessment of sediment reuse for sediment

management of Gallito Ciego Reservoir, Peru. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 17(4), 301–314. <https://doi.org/10.1111/lre.12008>

Apéndices

Apéndice A. 56 documentos seleccionados.

Titulo	Autor	Año
An assessment of sediment reuse for sediment management of Gallito Ciego Reservoir, Peru	Walter, Katja; Gunkel, Günter; Gamboa, Nadia	2012
Análisis comparativo de metodologías para la predicción de la acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos	Velandia Roncancio, Yuli Carolina	2016
Análisis de la sedimentación y estrategias para el dragado de los embalses Loíza y Dos Bocas	Quiñones, Ferdinand	2009
Análisis de métodos para la limpieza hidráulica de sedimentos desde embalses.	Sánchez Blum, Enrique Alexis	2014
Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación	de la Riva, Juan; Ibarra, Paloma; Montorio, Raquel; Rodrigues, Marcos	2015
Aplicación de metodologías para la estimación de la eficiencia de atrapamiento de sedimentos en los embalses colombianos - Betania, Miel i y Urrá i	Mayorca, Maria; Muñoz, Nicole	2017
Aplicación en modelos físicos de la remoción hidráulica de sedimentos	Marengo Mogollón, Humberto	2001

Colmatación de embalses	Garcia Flores, Manuel; Maza Alvarez, José Antonio	1985
Dredging and Dredged Material Management	United States Army Corps of Engineers	2015
Dredging of Reservoirs	Elzinga, Louwrens	2017
Efectos del vaciado del embalse de Joaquín Costa sobre anfibios, aves y mamíferos vinculados al ambiente de ribera	Rosell, C.; Nadal, J.; Cahill, S.; Campeny, R.; Parpal, J.; Pedrocchi, V.; Ruíz-Olmo, J.	1998
Efectos ecológicos del dragado y vaciado del embalse de barasona	Armengol, Joan	1998
El vaciado de embalses: consideraciones ecológicas y gestión medioambiental	Palau Ybars, Antonio	1998
Environmental effects of flow regulation on the lower river Murray, Australia	Walker, K. F.; Thoms, M. C.	1993
Estado del arte en manejo de sedimentos en cuencas andinas en el ecuador, caso de estudio cuenca del Rio Paute	Andrade, Calle; Cristina, Elizabeth; Chucay, Naula; Resumen, Luis Enrique; Salud, L A; Universidad De Cuenca, Adultos Mayores; Enrique, Luis	2016

Estimación de la producción de sedimentos en cuencas revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco	Ramírez León, José Manuel	2009
Estimacion de la sedimentacion en un embalse usando el modelo hidraulico	Pedro, Jose; Ortiz, Mora	2018
Estimation of Sediment Trap Efficiency in Reservoirs - an Experimental Study	Revel, N.M.T.K.; Ranasiri, L.P.G.R.; Rathnayake, R.M.C.R.K.; Pathirana, K.P.P.	2015
Estudio de Impacto Ambiental Definitivo - Proyecto Multiproposito BABA - Consorcio Hidroenergetico del Litoral	Universidad Técnica Estatad de Quevedo	2006
Estudio de las tecnicas de descolmatacion de embalses	Calle-velasco, Sergio	2018
Estudio de proveniencia de los sedimentos de la formacion Bucaramanga, al sur de Rio Frio, en los municipios de Floridablanca y Giron	Augusto, Leonardo; Ávila, Solano	2016
Estudio De Sedimentación En El Embalse Rapel Memoria	Muñoz, Gabriela; Ariztia, Federico Delfín; Campusano, David	2007
Estudio teórico y experimental de la remoción hidráulica de sedimentos en un embalse	García Camacho, Saúl	2005

Estudios y diseños del proyecto de regulación del río tona - Hidrología - Clima - Sedimentos	Embalase de Bucaramanga	2012
Estudios y diseños del proyecto de regulación del río tona - Memorando Técnico 03 - Anexo 4	Embalase de Bucaramanga	2012
Estudios y diseños fase 2 para el proyecto de regulación embalse de Bucaramanga	AMB; Embalse de Bucaramanga; Ingenieros consultores S.A., Ponce de león	2008
Evaluación de alternativas de reducción del volumen para almacenamiento	Fuentes Norambuena, Angela Patricia	2018
Evaluación De La Metodología De Eficiencia De Atrapamiento De Brune Para Cuantificar La Alteración Del Caudal Sólido Del Río Magdalena Aguas Abajo De Los Embalses Quimbo Y Betania	Bravo Garcia, Phanor	2017
Evaluación Espacio–Temporal De La Sedimentación En El Embalse Burro Negro, Estado Zulia/Venezuela Mediante El Uso Combinado De Sig–Ecosonda–Dgps	Méndez, Adelmo; Galbán, Eloy	2009
Extraction des sédiments dans les retenues	Benblidia, Mohammed; Salem, Abderrahmane; Demmak, Abdelmajid	2001
Geochemical fractionation of manganese in the Riogrande II reservoir, Antioquia, Colombia	Salazar, G. J.P.; Alfaro- De la Torre, M. C.;	2013

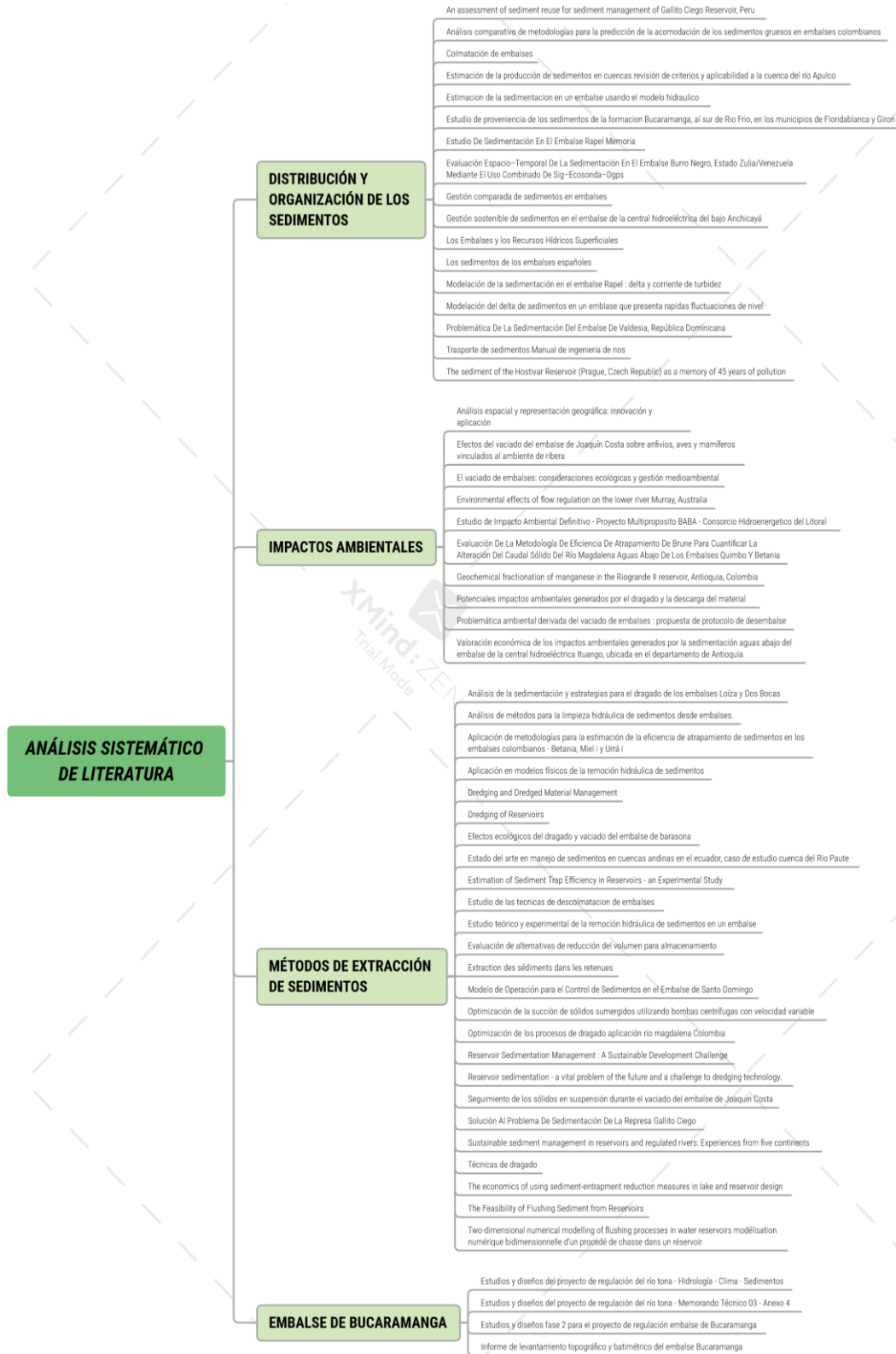
	Aguirre, R. N.J.; Briones- Gallardo, R.; Cedeño, C. J.; Peñuela, M. G.A.	
Gestión comparada de sedimentos en embalses	Fernández Carrasco, Pedro; Avendaño Salas, Cándido; Cobo Rayan, Rafael	2001
Gestión sostenible de sedimentos en el embalse de la central hidroeléctrica del bajo Anchicayá	Vargas Lozano, Henry Nelson	2017
Informe de levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Bucaramanga	AMB, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P; BATIMETRIA S.A.S	2019
Los Embalses y los Recursos Hídricos Superficiales	Adler, Franklin	2006
Los sedimentos de los embalses españoles	Cobo, Rafael	2008
Modelación de la sedimentación en el embalse Rapel : delta y corriente de turbidez	Balbontín Beltrán, Javier Esteban	2013
Modelación del delta de sedimentos en un embalse que presenta rápidas fluctuaciones de nivel	Perea Mesa, Inés Maryorie	2013
Modelo de Operación para el Control de Sedimentos en el Embalse de Santo Domingo	Artigas, J.L.; López, J.L.; Córdova, J.R.	2016

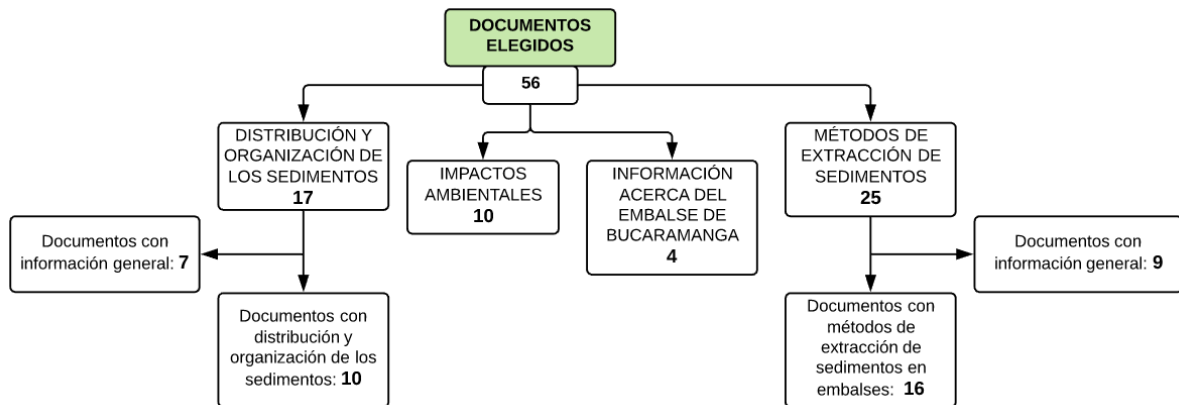
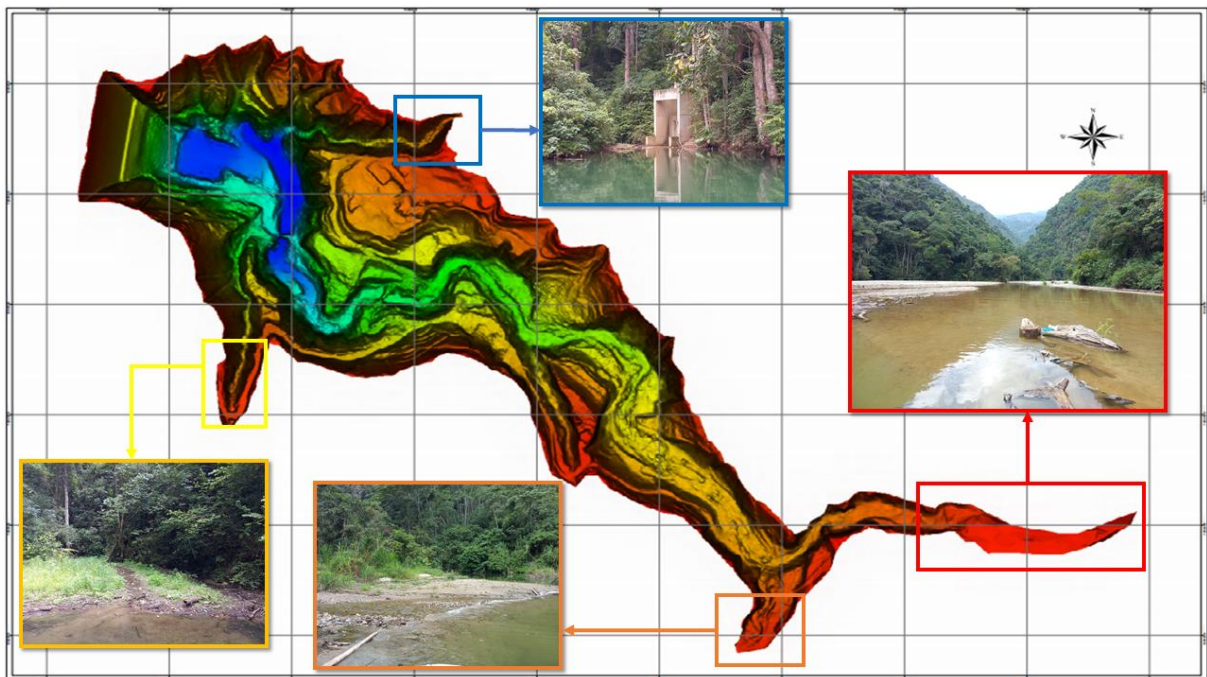
Optimización de la succión de sólidos sumergidos utilizando bombas centrífugas con velocidad variable	Moreno Avalos, Víctor Manuel	2012
Optimización de los procesos de dragado aplicación rio magdalena Colombia	Leonel, Marcelino Serretti	2009
Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material	Cruz J., Landaeta	2005
Problemática ambiental derivada del vaciado de embalses : propuesta de protocolo de desembalse	Pérez, M Ll Gual; López, M Sebastián	2015
Problemática De La Sedimentación Del Embalse De Valdesia, República Dominicana	Jiménez Ramírez, Oscar; Farias, Herctor Daniel	2003
Reservoir sedimentation - A vital problem of the future and challenge to dredging technology.	Scheuerlein, H.	1986
Reservoir Sedimentation Management : A Sustainable Development Challenge	Annandale, George W; Randle, Timothy J; Langendoen, Eddy J; Hotchkiss, Rollin H	2018
Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa	Avendaño, C.; Cobo, R.	1998
Solución Al Problema De Sedimentación De La Represa Gallito Ciego	Vásquez Rivera, Marcelita del Pilar	2016

Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents	Kondolf, G. Mathias; Gao, Yongxuan; Annandale, George W. ; Morris, Gregory L.; Jiang, Enhui; Zhang, Junhua; Cao, Yongtao; Carling, Paul; Fu, Kaidao; Guo, Qingchao; Hotchkiss, Rollin; Peteuil, Christophe; Sumi, Tetsuya; Wang, Hsiao- Wen; Wang, Zhongmei; Wei, Zhilin; Wu, Baosheng; Wu, Caiping; Yang, Chih Ted	2014
Técnicas de dragado	Universidad Politécnica de Catalunya	2003
The economics of using sediment-entrapment reduction measures in lake and reservoir design	Durgunoglu, Ali; Singh, Krishan P.	2017
The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs	Atkinson, E	1996

The sediment of the Hostivar Reservoir (Prague, Czech Republic) as a memory of 45 years of pollution	Soucková, Lucie; Kominkova, Dana	2017
Trasporte de sedimentos Manual de ingenieria de ríos	Maza Álvarez, José; García Flores, Manuel	1995
Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs modélisation numérique bidimensionnelle d'un procedé de chasse dans un réservoir	Olsen, Nils R.B.	1999
Valoración económica de los impactos ambientales generados por la sedimentación aguas abajo del embalse de la central hidroeléctrica Ituango, ubicada en el departamento de Antioquia	Martínez León, Aixa Catherine; Suarez Rodríguez, Jenny Katerine	2019

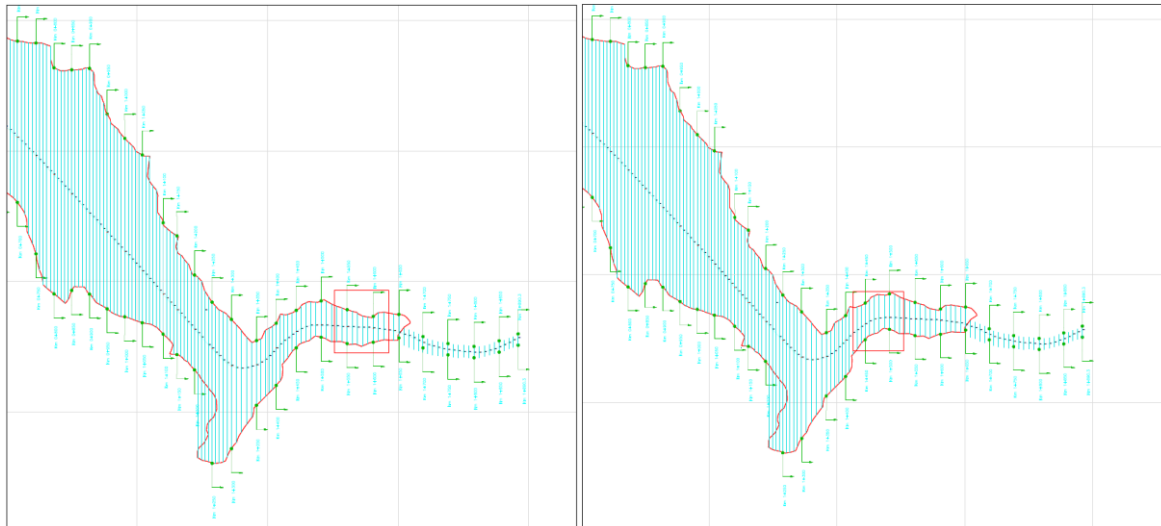
Apéndice B. Esquema de organización de los artículos en la herramienta X-Mind.



Apéndice C. Proceso de revisión**Apéndice D. Localización de los afluentes del embalse de Bucaramanga.**

Nota: Localización de los afluentes del embalse de Bucaramanga (AMB & SAS, 2019).

Apéndice E. Localización en planta del depósito de sedimentos del embalse de Bucaramanga.



Nota: Localización en planta del depósito de sedimentos del embalse de Bucaramanga (AMB & SAS, 2019).

Apéndice F. Tasas de descarga de dragado de tuberías hidráulicas.

Velocidad de descarga		Diámetro de Tubería de Descarga yarda ³ /seg (m ³ /seg) (gal/min)											
m/s	(pie/s)	8 pulg. (203 mm)			18 pulg. (457 mm)			24 pulg. (610 mm)			30 pulg. (762 mm)		
3	10	0.13	(0.1)	(1,575)	0.65	(0.5)	(7,877)	1.16	(0.9)	(14,100)	1.82	(1.4)	(22,056)
4.5	15	0.19	(0.15)	(2,303)	0.98	(0.75)	(11,876)	1.75	(1.33)	(21,207)	2.73	(2.09)	(33,083)
6	20	0.26	(0.2)	(3,150)	1.31	(1.0)	(15,875)	2.33	(1.78)	(28,236)	3.64	(2.78)	(44,111)
7.6	25	0.32	(0.24)	(3,876)	1.64	(1.25)	(19,874)	2.91	(2.23)	(35,265)	4.54	(3.47)	(55,018)

Nota: Rata de descarga = área de la tubería x velocidad de descarga.

Nota: Tasas de descarga de dragado de tuberías hidráulicas (Elzinga, 2017).