



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CRITERIOS PARA EL MANEJO DE EMBALSES  
COLMATADOS**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

Presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título del

**INGENIERO CIVIL**

**REALIZADO POR:**

**Br. ALBERTO L. RIERA**

**Br. JESSICA M. VASCONCELOS**

**TUTOR:**

**ING. JOSÉ M. DIVASSÓN**

**FECHA:**

Caracas, Octubre de 2015

A mi familia.

*Alberto Luis Riera Toro.*

A mis padres y hermana.

*Jessica Maria Vasconcelos De Brito.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres, abuelos y hermanas, por su incondicional apoyo a lo largo de toda la experiencia que ha significado nuestra formación como Ingenieros Civiles. Por su cariño y palabras de ánimo en los momentos difíciles.

A nuestro tutor, el Ing. José Miguel Divassón, por cedernos su valioso tiempo, conocimientos e información durante el proceso de desarrollo de este Trabajo Especial de Grado. También por motivarnos a seguir adelante en los momentos de desaliento y servir de guía para la meta que nos trazamos.

Al Ing. José De Jesús Gaspar, por su dedicación y seguimiento desde el inicio de las fases del trabajo, así como también, por compartir sus investigaciones realizadas y facilitarnos gran cantidad de material con el cual no hubiese sido posible la ejecución de este trabajo.

A los Ingenieros Arturo Marcano y Luis Miguel Suárez, por sus útiles aportes de información, conocimientos y experiencias personales acerca del tema.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Planteamiento del problema .....	2
1.2.	Antecedentes .....	3
1.3.	Objetivos .....	4
1.3.1.	Objetivo General .....	4
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	4
1.4.	Alcance y Limitaciones .....	5
1.5.	Metodología .....	5
2.	SEDIMENTACIÓN .....	7
2.1.	Sedimentación de Embalses .....	7
2.2.	Métodos para el Cálculo de Sedimentos .....	9
2.3.	Distribución de los Sedimentos en los Embalses .....	15
2.3.1.	Zonas de Deposición de Sedimentos .....	16
2.3.2.	Patrones de Deposición según Tipo de Sedimentos.....	17
2.4.	Métodos de Distribución de los Sedimentos en los Embalses.....	20
2.4.1.	Método del Área Incremental .....	20
2.4.2.	Método de Reducción Empírica de Áreas .....	22
2.4.3.	Método de la Reducción Empírica de Áreas Modificadas .....	24
3.	MANEJO SUSTENTABLE DE SEDIMENTOS .....	25
3.1.	Acciones en la Cuenca .....	25

3.2. Acciones en el Embalse .....	34
3.2.1. Corrientes de Turbiedad .....	35
3.2.2. Método Español o Flushing.....	39
3.2.3. Dragado .....	45
3.2.4. EXCAVACIÓN DE LOS SEDIMENTOS.....	51
3.2.5. Tránsito de Sedimentos .....	53
3.2.6. Presas de Retención de Sedimentos.....	68
4. MANEJO DE EMBALSES COLMATADOS .....	75
4.1. Generalidades.....	75
4.2. Necesidad del Embalse.....	77
4.3. Existencia de Fuentes Alternas .....	78
4.4. Sobre Elevación de Presas .....	79
4.4.1. Ventajas.....	84
4.4.2. Limitaciones.....	85
4.5. Desmantelamiento de las Presas .....	85
4.5.1. Aspectos a tomar en cuenta.....	87
4.5.2. Opciones para Suspensión de una Presa.....	89
4.6. Restauración de Ríos.....	102
4.6.1. Manejo de los Sedimentos .....	105
5. MATRIZ PARA ORIENTACIÓN EN LA TOMA DE DECISIÓN .....	113
5.1. Descripción.....	113
5.1.1. Condición Normal ( $V_s < V_m$ ).....	115
5.1.2. Atarquinamiento Primario ( $V_s \leq 25\%V_{util}$ ).....	115

5.1.3. Operatividad Reducida ( $25\%V_{\text{útil}} \leq V_s \leq 75\%V_{\text{útil}}$ ) .....	116
5.1.4. Embalse Colmatado ( $V_s > 75\%V_{\text{útil}}$ ) .....	117
5.2. Aclaratorias.....	117
5.2. Aplicación de la Matriz a un caso particular: Matícora.....	122
5.2.1. Embalse Matícora .....	123
5.2.2. Condición de Sedimentación.....	126
5.2.3. Aplicación de Matriz de decisiones a caso Embalse Matícora .....	127
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>131</b>
6.1 Conclusiones.....	131
6.2. Recomendaciones .....	133
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>136</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Índice de Captación de Brune .....	15
Fig. 2.2 Zonas de deposición de los sedimentos.....	17
Fig. 2.3 Patrón longitudinal de formación de un delta en el embalse.....	18
Fig. 2.4 Patrón longitudinal de acumulación de los sedimentos.....	18
Fig. 2.5 Patrón longitudinal de deposición gradual. ....	19
Fig. 2.6 Patrón longitudinal de deposición uniforme .....	19
Fig. 2.7 Representación gráfica del Método de Área Incremental .....	21
Fig. 3.1 Demostración del uso de gramíneas para la protección de taludes. ....	29
Fig. 3.2 Protección de un talud con el soporte de mallas plásticas.....	29
Fig. 3.3 Cárcava. Inmediaciones de Píritu estado Falcón.....	30
Fig. 3.4 Cárcava llamada “El Volcán”. Embalse Santo Domingo.....	31
Fig. 3.5 Proceso de Corrientes de Turbiedad.....	36
Fig. 3.6 Paso de corriente de agua turbia a través de una descarga de fondo.....	38
Fig. 3.7 Paso de corriente de turbiedad al aplicar ventilación .....	38
Fig. 3.8 Etapas del Flushing. ....	40
Fig. 3.9 Sección Transversal. Cañón formado por efectos del flushing .....	44
Fig. 3.10 Efectos del Flushing en el Embalse Santo Domingo. ....	44
Fig. 3.11 Representación Gráfica del proceso de dragado de un embalse.....	45
Fig. 3.12 Equipo utilizado para el dragado (A) .....	46
Fig. 3.13 Equipo utilizado para el dragado (B) .....	47
Fig. 3.14 Representación gráfica de una draga hidráulica y sus componentes....	48

Fig. 3.15 Embalse Rungue, Chile..	51
Fig. 3.16 Embalse Rungue luego de ser dragado.....	51
Fig. 3.17 Excavación de Sedimentos en un embalse .....	52
Fig. 3.18 Representación esquemática de proceso de tránsito de sedimentos .....	55
Fig. 3.19 Ruta de sedimentos. Embalse de las Tres Gargantas en China .....	58
Fig. 3.20. Etapa de almacenamiento .....	61
Fig. 3.21 : Etapa de disminución .....	61
Fig. 3.22 Etapa de vaciado completo .....	62
Fig. 3.23 Etapa de recarga .....	62
Fig. 3.24 Representación del proceso de desvío de sedimento.....	66
Fig. 3.25 Representación de una presa de retención.....	69
Fig. 3.26 de retención de sedimentos de concreto abierta .....	71
Fig. 3.27 Presa de retención de sedimentos de concreto abierta.....	72
Fig. 3.28 Presa de retención de sedimentos de gaviones .....	72
Fig. 4.1 Vista de la cola del embalse, entrada del río Aracay.....	76
Fig. 4.2 Sección transversal de la presa Shimonohara ubicada en Japón .....	82
Fig. 4.3 : Presa Shimonohara antes de su sobre elevación .....	83
Fig. 4.4 : Presa Shimonohara después de su sobre elevación .....	83
Fig. 4.5 Eliminación parcial de Presa .....	93
Fig. 4.6 Inicio de la eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma .....	93
Fig. 4.7 Proceso de eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma .....	94
Fig. 4.8 Eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma.....	94
Fig. 4.9 : Sección luego de remoción de presa .....	97

Fig. 4.10 Río Elwha, Washington, Estados Unidos.....	98
Fig. 4.11 Presa Elwha, antes de su desmantelamiento y eliminación.....	99
Fig. 4.12 Sitio donde se encontraba la Presa Elwha luego de su eliminación... ..	100
Fig. 4.13 Fotografía aérea del río Elwha. ....	100
Fig. 4.14 Etapas de eliminación de presa .....	101
Fig. 4.15 Canalización .....	107
Fig. 4.16 Proceso de canalización.....	108
Fig. 4.17 Presa parcialmente eliminada .....	110
Fig. 5.1 Vista Aérea del Embalse Matícora .....	122
Fig. 5.2 Planta Aliviadero de la Presa Matícora .....	124
Fig. 5.3 : Sección de la Presa Matícora. ....	125
Fig. 5.4 : Planta de la Presa Matícora .....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Cálculo de Sedimentos Transportados .....	11
Tabla 2.2 Clasificación de tipos de embalses según Método de Reducción Empírica de Áreas.....	23
Tabla 4.1 Tabla de opciones para el manejo de los sedimentos .....	112

## **SINOPSIS**

Los embalses constituyen obras hidráulicas que permiten la regulación de los aportes provenientes de los ríos para obtener un aprovechamiento uniforme de sus aguas a lo largo de su vida operativa. Son de gran utilidad e importancia para las sociedades, ya que brindan múltiples funciones, entre ellas: producción de energía, control de inundaciones, y almacenamiento de grandes volúmenes de agua para su posterior abastecimiento. La planificación del aprovechamiento de los recursos hidráulicos, el diseño de los embalses y su posterior operación, se basan en la suposición de una vida útil, que es determinada principalmente, por la deposición de los sedimentos en el embalse, así como también la importancia que posee la obra y otros factores económicos involucrados.

La construcción de una presa representa una modificación sustancial del ambiente y un obstáculo para el curso de aguas, alterando el paso del flujo de manera dinámica y la migración y traslado de algunas especies animales que ahí habitan. La formación de un embalse modifica entonces las condiciones naturales del entorno y de todos los ecosistemas presentes.

El acarreo y transporte de sedimentos por la corriente de agua es uno de los elementos que altera la presencia de un embalse, puesto que la entrada de las aguas al vaso de almacenamiento y la modificación de su capacidad de acarreo establece la acumulación progresiva de sus materiales. De no ser tomadas las medidas preventivas adecuadas para el control de la erosión y el manejo de los sedimentos, éstos pueden llegar a colmatarse el embalse, anulando así el funcionamiento para el cual fue concebido dicho sistema.

***Crterios para el manejo de embalses colmatados***

En Venezuela, ya sea por la complejidad de los parámetros que modelan la respuesta de las cuencas en todo lo relativo a la producción y acarreo de sedimentos, o por la escasa medición de estas variables en los ríos, la estimación de los volúmenes de sedimentos ha quedado muy por debajo de los volúmenes reales acarreados. Es por ello que existen algunos ejemplos de embalses donde ha ocurrido una pérdida de su capacidad reguladora, y una colmatación acelerada del mismo. Esta situación plantea una disyuntiva fundamental, tal es, ¿Debe continuar la explotación de las aguas del río con el concurso de un embalse como el existente o es posible atender la necesidad para la cual fue creado en una forma alterna y, por ello, es posible la suspensión de sus operaciones?. El Trabajo Especial de Grado que a continuación se presenta evalúa ambos escenarios y desarrolla una matriz de decisión que permite identificar los parámetros que deben ser tomados en cuenta a la hora de responder el planteamiento antes descrito, tomando en consideración aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos.

En el desarrollo de las actividades incluidas en el presente T.E.G<sup>1</sup> se hace una recopilación de información de las medidas y soluciones adoptadas internacionalmente para la operación de embalses colmatados, con la finalidad de ubicar al lector en el estado del arte de los métodos utilizados para el control de erosión, manejo de sedimentos, así como otras medidas aplicadas en diferentes embalses.

Palabras Claves: Embalses, Erosión, Sedimentación, Colmatación.

<sup>1</sup> Se llamará al Trabajo Especial de Grado: T.E.G.

***Crterios para el manejo de embalses colmatados***

## 1. INTRODUCCIÓN

En el instante en que nuestros antepasados pasan de ser nómadas a sedentarios, brota la necesidad de almacenar agua en las épocas de exceso, para luego poder disponer de ella en las épocas de sequía. De esta manera surgen las primeras civilizaciones y con ellas los primeros embalses.

El problema de acumulación de sedimentos comienza desde el momento mismo en que se inicia la operación de los embalses, debido a la retención de agua y a la desestabilización del funcionamiento natural de los ríos. Esta acumulación de sólidos, afecta el cumplimiento de las funciones principales de un embalse y, en la mayoría de los casos, causa la pérdida de capacidad de almacenamiento, hasta llegar al punto de perder su operatividad.

Esta situación lleva al hombre a estudiar la dinámica del transporte de los sedimentos y cómo evitar su deposición progresiva en zonas indeseadas, para así alargar la vida útil de las obras hidráulicas existentes y aplicar estos conocimientos en la construcción de presas a futuro.

El estudio de los sedimentos, su transporte y deposición constituye una parte importante al momento del diseño de un embalse y su posterior operación, ya que la construcción de una obra hidráulica tan importante como esta, no sólo implica el manejo y almacenamiento de grandes volúmenes de agua, sino también debe incluir el estudio de los volúmenes de sedimentos que acarrea el río a regular y sus características. La colmatación de un embalse es producida por la deposición de grandes cantidades de sedimentos en el vaso de almacenamiento, en donde, estos ocupan el volumen que en un inicio era destinado para el agua. Según la práctica común en nuestro país, la cual a su vez es similar a la adoptada por el U.S Bureau of Reclamation, de la capacidad total de almacenamiento que posee un embalse, se destina un volumen para el almacenamiento de sedimentos

denominado Volumen Muerto y se diseña con una capacidad tal que los sedimentos acarreados por el río durante su vida útil sean acumulados en esta zona inferior del vaso de almacenamiento. Usualmente se espera que los embalses tengan una vida comprendida entre 50 y 100 años dependiendo de su importancia y de factores económicos (Bolinaga, 1999).

### **1.1. Planteamiento del problema**

Todo embalse es construido con una vida útil durante la cual se espera la regulación de los caudales líquidos que el río conduce a lo largo del año. En dicho cauce se altera la escorrentía, no sólo de las aguas que el río conduce sino que, adicionalmente, se modifica la capacidad del río de trasladar sedimentos de fondo y suspensión, que paulatinamente van rellorando las cotas inferiores de todos los embalses.

La existencia de un embalse lleno de sedimentos reduce la vida útil del mismo, transformando a esta obra hidráulica en un elemento de baja utilidad que puede traer riesgos para la comunidad. Así, una vez que un embalse pierde su propósito principal se abren dos (2) grandes espacios de actuación. El primero es aquel donde la pérdida del embalse constituye un problema fundamental porque su propósito (por ejemplo abastecimiento) es necesario recuperarlo al no existir ninguna fuente alterna del vital líquido. El segundo escenario es aquel donde el embalse, ya sea por existir fuentes alternas de abastecimiento o por cualquier otro motivo, se hace innecesaria su rehabilitación.

El objetivo del presente Trabajo de Grado es el de orientar al profesional encargado de la evaluación de un embalse, donde se conoce de una gran acumulación de sedimentos, sobre las acciones que pudieran realizarse para disminuir los volúmenes depositados o la retención de sedimentos durante las operaciones diarias con miras a mejorar su funcionamiento y tratar de evitar, sino alargar, los tiempos en los cuales los sedimentos afecten el propósito principal de esta obra hidráulica. Igualmente se analiza y presentan las acciones que pudieran realizarse en aquellos embalses donde el volumen de sedimentos

impide su operación normal y su operatividad es vital para la Comunidad que atiende o, por el contrario se puede prescindir de éste.

Para lograr este cometido se recopila el estado del arte de la ingeniería internacional en ambos escenarios a manera de definir para cada situación un grupo de actividades que deberán analizarse para así restablecer la operatividad del sistema o permitir el uso y disfrute de los espacios que fueron alterados por la presencia del conjunto presa-embalse.

## **1.2. Antecedentes**

En Venezuela, al igual que en el resto del mundo, los vasos de almacenamiento son objeto de procesos de sedimentación continua debido al escaso conocimiento del proceso real. Esto se debe principalmente a que no existen rutinas claras de monitoreo de la presencia de sedimentos en los embalses. A la fecha sólo se conoce acciones de remoción de sedimentos en la presa Gral. José Antonio Páez, ubicada sobre el río Santo Domingo en el Estado Mérida, con el fin de mantener operativo las plantas de generación hidroeléctrica allí instaladas y que surten una parte importante del suroccidente del país.

En cuanto a la intervención en presas ya construidas, es importante destacar la elevación o recrecimiento de presas en Venezuela, y hacer mención de los trabajos realizados en las presas Simón Bolívar (Guri) y Antonio José de Sucre (Macagua) por EDELCA con el fin de ampliar la capacidad de almacenamiento y el salto de agua en ambas presas hidroeléctricas o la modificación de la captación (obra de toma) del embalse Dr. Carpóforo Olivares Sosa (Pao en La Balsa) para convertir en selectiva una toma de fondo o en la implantación de un aliviadero tipo laberinto en esta misma presa, debido al riesgo hidrológico que esta posee por limitaciones en la capacidad de descarga de la obra de alivio original.

Actualmente, no existen políticas de manejo de este tipo de embalses en Venezuela, por lo que el presente Trabajo Especial de Tesis constituye una primera acción en este sentido.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Establecer una matriz de decisión que permita al profesional encargado de rehabilitar o inhabilitar un embalse colmatado, las acciones que pueden desarrollarse para lograr el restablecimiento del servicio o el disfrute y uso de las áreas afectadas por el conjunto presa-embalse.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Recopilar el estado del arte de acciones tendientes a la rehabilitación de embalses colmatados.
- Identificar y hacer acopio de todas las metodologías adoptadas internacionalmente para la restauración de ríos en zonas donde existían embalses.
- Analizar las condiciones de cada uno de los planteamientos e identificar los parámetros que establecen su factibilidad de ejecución.
- Identificar al menos un (1) caso de una presa venezolana colmatada y aplicar los parámetros y criterios previamente definidos para evaluar su potencial uso.
- Establecer una metodología general o matriz de resolución para la toma de decisiones en aquellas obras de embalse que deban ser rehabilitadas o que puedan o deban ser removidas.

- Evaluar la problemática social y ambiental asociada a embalses colmatados.

#### **1.4. Alcance y Limitaciones**

El Trabajo Especial de Grado desea concentrar las mejores prácticas en la ingeniería de presas y restauración de ríos en embalses cuyo propósito primordial ha sido alterado o inutilizado por la acumulación de sedimentos y proveer al profesional encargado de criterios que le permitan tomar la decisión más conveniente a los intereses de la comunidad y el entorno, tomando en consideración aspectos físicos, hidráulicos y ambientales.

Para el desarrollo del TEG es de suma importancia las limitaciones que imponen la carencia o dificultad en el acceso a información operativa y de inspección y seguimiento en los embalses de Venezuela por parte de las autoridades encargadas, la cual será parcialmente sustituida por la experiencia de profesionales de larga trayectoria en el diseño, operación y mantenimiento de embalses en Venezuela.

#### **1.5. Metodología**

La primera etapa de los trabajos se encuentra orientada a la recopilación de información sobre las acciones que se han emprendido a nivel internacional ante la colmatación y pérdida de funcionalidad de un embalse según su uso.

En este caso se definen criterios, parámetros y condiciones que favorecen el uso de una u otra metodología de rehabilitación para cada embalse en particular y su relación con el propósito primario y secundario de cada embalse.

Posteriormente se revisan las acciones desarrolladas en el contexto de embalses que por su ubicación, funcionalidad o por condiciones ambientales específicas se optó por remover, tratando de recuperar las condiciones iniciales del cauce (restauración de ríos) y, sobre la base de experiencias previas y criterios válidos internacionales proceder a su estructuración desde el punto de vista de matriz de decisión.

Todos los criterios que se analizan, parámetros de diseño adoptados y condiciones de borde descritas en los diversos escenarios a los cuales se pueda acceder se analizan para verificar su viabilidad en Venezuela o su criterio análogo en el país.

Al culminar esta fase del Trabajo Especial de Grado se busca al menos un (1) embalse venezolano que pueda ser analizado con esta matriz, para verificar su idoneidad, facilidad de aplicación y establecer su utilidad futura para otros profesionales.

El trabajo pretende, sin ánimo de sustituir el criterio del ingeniero y estableciendo de antemano que existen condiciones físicas, sociales y operativas específicas para cada proyecto, identificar con una serie de decisiones relativamente simples, proporcionar un abanico de opciones a evaluar en cada presa y, de antemano, descartar todas aquellas que no sean viables. A continuación, se hace una descripción sucinta del contenido de los capítulos en que se ha estructurado el trabajo.

- En el segundo capítulo, se describen los diversos patrones de distribución de sedimentos en los embalses, así como también los métodos para su cálculo.
- En el tercer capítulo, se dan a conocer los diferentes métodos para el manejo sustentable de los sedimentos en los embalses, a manera de que el lector se familiarice con las características de cada uno y su aplicación a los embalses colmatados.
- En el cuarto capítulo, se discute acerca de la problemática de los embalses que se encuentran totalmente colmatados y las posibles soluciones aplicables.
- En el quinto capítulo, se presenta la matriz de toma de decisión y se analiza su aplicabilidad en una presa venezolana.

## 2. SEDIMENTACIÓN

### 2.1. Sedimentación de Embalses

Los sedimentos son principalmente generados por la acción de la lluvia sobre el suelo que desprende la superficie del mismo y lo transporta a los cursos de agua principalmente mediante la acción de la gravedad. Este proceso se denomina Erosión y ocurre de dos (2) maneras, una en donde el efecto de la lluvia va removiendo pequeñas capas de suelo superficial y la segunda, las cárcavas, donde, al existir una concentración de agua, se incrementa el potencial de arrastre y los volúmenes y tamaños de los trozos de suelo movilizados.

La cantidad de sedimentos que puede producir una cuenca se ve condicionada por la pluviosidad, topografía, cobertura vegetal, el sistema de drenaje y la actividad humana. En este sentido se puede indicar que las siguientes características pueden incrementar individual o grupalmente la cantidad y tamaño de sedimentos movilizados: alta pluviosidad; relieve topográfico pronunciado, cobertura vegetal escasa, concentraciones de flujos superficiales de agua y alta actividad humana. La cobertura vegetal es quizás uno de los parámetros más importantes puesto que protege la superficie del suelo y, por lo tanto, minimiza el desgaste de la tierra y la movilización de las partículas.

La topografía también representa una condicionante, ya que a mayores pendientes del suelo, mayor será el efecto cortante del agua y por lo tanto, mayor es la cantidad de partículas que serán transportadas. Por último, el otro factor de gran importancia dentro de la producción de sedimentos es la actividad humana, ya sea como consecuencia del deterioro de la cobertura vegetal (deforestaciones), la impermeabilización de los suelos que incrementa la velocidad y volumen de las aguas escurridas así como consecuencia de malas técnicas agrícolas y otras actividades que ejerce el hombre que aumentan los aportes de sedimentos dentro de la cuenca.

Las partículas de suelo transportadas por los ríos son depositadas en el vaso de almacenamiento como consecuencia de una reducción brusca de la velocidad de las aguas. Las partículas más gruesas, debido a la acción de la gravedad, se acumulan en las zonas más alejadas del embalse (usualmente denominado “cola del embalse”) mientras que las más pequeñas, viajan dentro del embalse y terminan depositándose en las áreas más profundas. Este transporte de partículas de suelo al llegar al embalse, genera acumulación de sedimentos como se mencionó anteriormente, ocasionando una reducción de la capacidad del almacenamiento de agua en el embalse.

La deposición de sedimentos es el principal problema que afecta la vida útil de los embalses. El conocimiento de la tasa y el patrón de sedimentación de un embalse es necesario para poder estimar la vida útil remanente que se ha de asignar a un embalse durante su etapa operativa y, analizando su comportamiento, se podrán definir estrategias que, de implementarse, podrían disminuir la tasa de azolvamiento y prolongar su subsistencia.

El proceso de sedimentación es mucho más complejo de lo pensado, ya que depende de varios factores entre los cuales se encuentran las dimensiones y forma del embalse, la estratificación de temperaturas, la operación del mismo y por supuesto, el tipo de sedimentos que contiene y sus características. La complejidad de este proceso sólo puede ser comprendida cabalmente si se mantiene un continuo proceso de análisis que permita identificar los movimientos de los sedimentos en el embalse (con batimetrías), la cuantía de las partículas que son transportadas por la corriente tanto en la mayor parte del tiempo con sus caudales medios y mínimos, como en aquellos momentos de la ocurrencia de eventos extraordinarios (con mediciones de los caudales sólidos de los principales afluentes), así como, el tipo, tamaño y caracterización geotécnica de éstos (mediante muestreo).

El monitoreo rutinario de los sedimentos en el embalse permite, adicionalmente, verificar si las condiciones previstas durante el proyecto, relacionadas con la velocidad de acumulación de sedimentos, se cumplen o si, por el contrario, la velocidad es mayor y, por

lo tanto se hace necesario incorporar nuevas rutinas preventivas que mantengan, al menos, los tiempos originalmente estimados como vida útil del embalse.

## 2.2. Métodos para el Cálculo de Sedimentos

El procedimiento de cálculo de la cantidad de sedimentos que produce una cuenca, en la mayoría de los casos está fundamentado en mediciones de sedimentos suspendidos. Estas mediciones se hacen en las estaciones de aforo y su resultado se expresa en un gráfico denominado “Curva de Sedimentación” que vincula la cantidad de sedimento transportado, expresado en Ton/día vs. El Caudal Medio Diario, expresado en  $m^3/s$ . La cuantía total de los sedimentos conducidos por una corriente resulta de combinar la mencionada Curva de Sedimentación con la Curva de Duración de Caudales e integrando los resultados. Este procedimiento conduce usualmente a la subestimación del aporte de sedimentos debido a que existe una discretización de los caudales en valores no representativos de los caudales picos, los cuales son los que presentan mayor aporte de sedimentos.

El método para el cálculo de los sedimentos más conocido está basado en el uso de las curvas de duración de caudales y las curvas de sedimentación, en donde los pasos a seguir son los siguientes:

- Discretización de valores de la curva de duración de caudales:
- Se realiza una tabla como la mostrada en la Tabla N°1: En donde en la primera columna se coloca los intervalos del porcentaje de duración de caudales cada 10%, en la segunda columna se coloca las diferencias entre los intervalos correspondientes, en donde la diferencia será siempre igual a 0,10.
- En la siguiente columna se coloca el punto medio correspondiente de cada uno de los intervalos antes mencionados, es el valor leído de la curva del caudal de agua.

- El caudal de agua que corresponde al punto medio, permite determinar a su vez el caudal de sedimentos, que se obtiene de la curva de sedimentación.
- Por último, el caudal de sedimentos esperado para esa probabilidad de ocurrencia será la multiplicación del caudal de sedimentos por el porcentaje de duración correspondiente para cada intervalo. Lo mismo aplica para el caudal de agua.

De esta manera, la sumatoria de todos los caudales obtenidos correspondientes a los intervalos darán como resultante el caudal de aguas y de sedimentos en Ton/días.

Este método presenta una desventaja, ya que se subestima el aporte de sedimentos, debido a que se toma el valor del Caudal medio de los hidrogramas para así obtener el caudal de sedimentos correspondiente, pero este Caudal líquido no va a ser el que va a producir mayor aportes de sedimentos; además debe incluirse el arrastre de fondo, ya que este método no lo incluye en sus cálculos.

Tabla 2.1 Cálculo de Sedimentos Transportados

Intermedio Curva de Duración C1	% De Duración C2	Punto Medio C3	Caudal de Agua C4	Caudal de Sedimentos C5	Q <sub>w</sub> C6	Q <sub>s</sub> C7
0,10-0,20	10	15	11,50	1,10	1,15	0,11
0,20-0,30	10	25	17,00	4,20	1,70	0,42
0,30-0,40	10	35	18,00	6,10	1,80	0,61
0,40-0,50	10	45	21,00	8,00	2,10	0,80
0,50-0,60	10	55	24,00	14,00	2,40	1,40
0,60-0,70	10	65	30,00	20,00	3,00	2,00
0,70-0,80	10	75	38,00	41,00	3,80	4,10
0,80-0,90	10	85	50,50	100,00	5,05	10,00
0,90-1,00	10	95	100,10	350,00	10,01	35,00

<b>Caudal medio diario esperado</b>	<b>31,61 m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Caudal medio diario de sedimentos esperado</b>	<b>54,46 ton/día</b>
<b>Sedimentos en un año</b>	<b>19.877,90 ton</b>

En donde, cada columna es:

- Valores intermedios en los que se ha dividido la curva de duración de caudales. (Columna C1)
- Porcentaje del intervalo (diferencias entre los valores de la primera columna). (Columna C2)
- Valor medio de cada intervalo. (Columna C3)

- Caudal de agua leído en la curva de duración de caudales para cada intervalo. (Columna C4)
- Caudal de sedimentos obtenido de la curva de sedimentación correspondiente a los valores de los caudales de aguas. (Columna C5)
- Caudal esperado, producto de la multiplicación de la columna C2 con la C4 (Columna C6).
- Caudal de sedimentos esperado, producto de la multiplicación de la columna C2 con la C5. (Columna C7)

El proceso de consolidación da inicio una vez que los sedimentos han sido depositados sobre el embalse, por lo que el peso específico se va incrementando a medida del avance de la vida útil, por lo que la determinación del peso específico resulta un procedimiento complicado que dependerá de la composición de los sedimentos, las características de los sedimentos finos, por la operación del embalse y las condiciones de las aguas del embalse y permite obtener este parámetro en volumen de sedimentos.

Para determinar el peso específico se utiliza la fórmula de Miller:

$$\gamma_F = \gamma_i + 0,4343.K. \left[ \frac{T}{T-1} \log_c T - 1 \right] \quad (1)$$

En donde:

- $\gamma_F$  : Es el peso específico final de los sedimentos en lbs/pie<sup>3</sup>
- $\gamma_i$  : Es el peso específico inicial en lbs/pie<sup>3</sup>
- K : Es una constante que depende de la operación del embalse y de la composición de los sedimentos.

- T : Es el tiempo en años en que los sedimentos con un peso específico inicial  $\gamma_i$  alcanzan el valor  $\gamma_F$ .

Para calcular el peso específico inicial, se tiene la siguiente fórmula:

$$\gamma_i = \gamma_c p_c + \gamma_m p_m + \gamma_s p_s \quad (2)$$

En donde:

- $\gamma_c, \gamma_m$  y  $\gamma_s$  Son los pesos específicos iniciales de las fracciones de arcilla, limos y arenas respectivamente que forman los sedimentos.
- $p_c, p_m$  y  $p_s$  son los correspondientes porcentajes de arcillas, limos y arenas presentes en el sedimento arrastrado.

La ecuación de Miller incluye una constante que depende de la operación del embalse y de la composición de los sedimentos a los efectos de desecación de vientos y sol, por lo que clasificó los embalses en tres (3) categorías de la siguiente manera:

- Embalses que siempre se encuentran sumergidos.
- Embalses con sedimentos moderadamente expuestos.
- Embalses que todos los años se secan.

Esta constante “K” se determina de la siguiente manera:

$$K = K_c * p_c + K_m * p_m \quad (3)$$

En donde:

- Los valores de  $K_c$  y  $K_m$  son constantes para sedimentos arcillosos y limos, para cada tipo de embalse.

- Los valores de  $p_c$  y  $p_m$  son los correspondientes porcentajes.
- Las arenas no presentan valores de “K”, ya que no sufren el proceso de consolidación, por lo que el peso específico inicial es igual al peso específico luego de muchos años.

Es práctica común, descartar el uso de la fórmula para la obtención del valor de “K” y tomar un valor de  $1,1 \text{ Ton/m}^3$  para cambiar el peso anual de sedimentos a volumen anual.

La eficiencia de retención de los embalses se encuentra definido como la porción de la carga de sedimento que ingresa y que es retenido en el embalse. Existen métodos empíricos que permiten predecir la eficiencia de retención que poseen los embalses, suelen ser replantados por gráficos como los desarrollados por investigadores como Churchill (1947), Brune (1953) y Heinemann(1981). De estos, la curva de Brune, Fig.2.1, es la más popular en la práctica, debido a la sencillez de su aplicación y los resultados satisfactorios obtenidos (Mahmood, 1987).

Brune mediante investigaciones hechas a diferentes embalses, realizó un gráfico que relaciona el parámetro denominado “Índice de Captación” correspondiente al porcentaje de sedimentos que retiene el embalse, con la relación Volumen útil de embalse y aporte anual promedio.

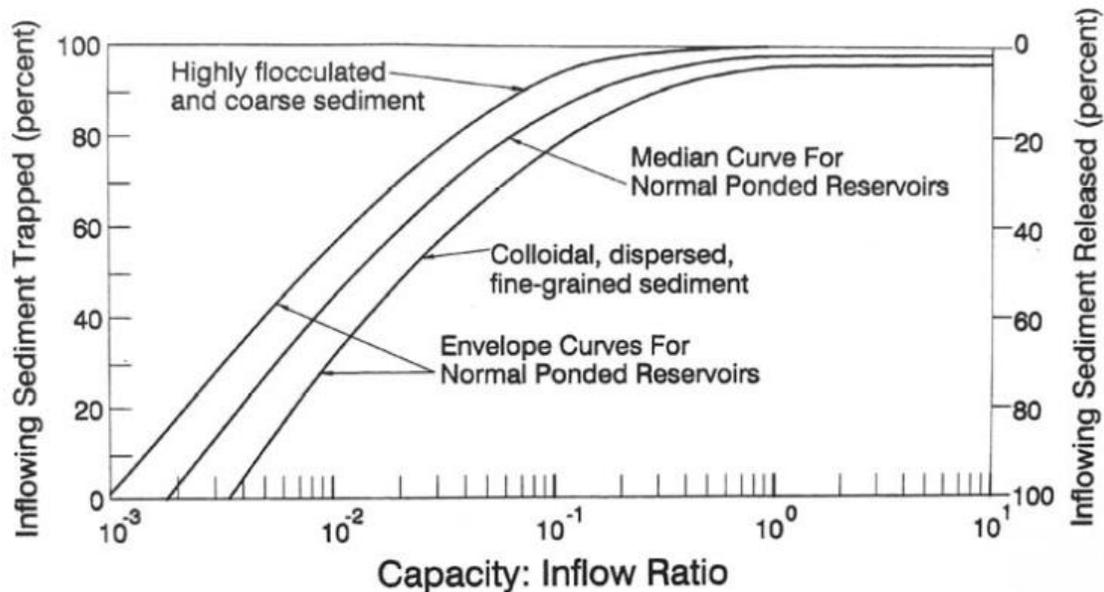


Fig. 2.1 Índice de Captación de Brune

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, Fan y Morris (1998)

Al aumentar las dimensiones del embalse con respecto al aporte de la cuenca, se incrementa la captación de los sedimentos. Este gráfico resulta de utilidad para embalses pequeños.

### 2.3. Distribución de los Sedimentos en los Embalses

Cuando un curso de agua entra a un embalse, las fuerzas que influyen sobre las partículas son principalmente una horizontal, la cual corresponde a la velocidad del flujo, y la otra vertical producto de la gravedad. Cuando la velocidad disminuye debido a la entrada del flujo en el embalse, los sedimentos que acarrea comienzan a depositarse. Primeramente, ocurre la deposición de la fracción de partículas gruesas, las cuales se depositan, formando un delta, mientras que los sedimentos finos, con menores velocidades de deposición, son transportados a lo largo del embalse mediante un flujo, que puede ser estratificado o no estratificado.

En la mayoría de los embalses en los que su operación mantiene los niveles de agua prácticamente constantes, el patrón de deposición de los sedimentos característico corresponde a una distribución uniforme, el cual a su vez, es el patrón más sencillo. Sin embargo, dependiendo de las condiciones hidrológicas, el tipo de sedimentos, y la geometría del embalse, diferentes y muy complejos tipos de patrones pueden ocurrir en el sistema. Otro factor a tener en cuenta, es la operación del embalse, ya que dependiendo de la frecuencia de vaciado, y de esta manera, las fluctuaciones en los niveles del reservorio, dan origen a patrones de distribución de sedimentos muy variados y poco predecibles. (Mahmood, 1987)

### 2.3.1. Zonas de Deposición de Sedimentos

La distribución longitudinal de los sedimentos se puede identificar como tres (3) zonas. La Figura N° 2.2 muestra un esquema de las zonas de sedimentación que se detallan a continuación, según la bibliografía americana.

- 1) **Topset Beds:** Son las primeras partículas que se depositan, y dan origen al delta del embalse. Están conformadas principalmente por partículas gruesas, ya que son las que poseen velocidades de deposición más altas.
- 2) **Foreset Deposits:** Corresponden a la zona continua al Topset, y se diferencia de éste debido a la presencia de un aumento en la pendiente de fondo, y los tamaños de las partículas encontradas son de menor diámetro.
- 3) **Bottomset Beds:** Comprende la deposición de las partículas finas más allá del delta, mediante el proceso de corrientes de turbiedad y/o flujos no estratificados. También puede contener materia orgánica, tal como algas, y plantas acuáticas.

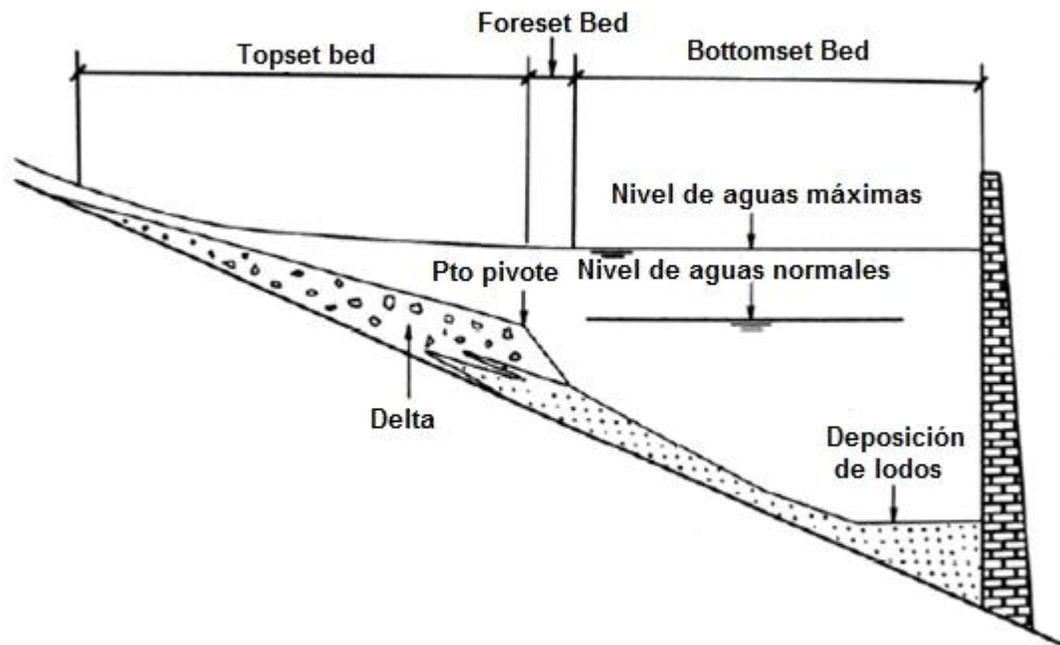


Fig. 2.2 Esquema de las zonas de deposición de los sedimentos en los embalses.

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, Fan y Morris (1998)

### 2.3.2. Patrones de Deposición según Tipo de Sedimentos

- **Delta:** Ocurre cuando las partículas de sedimentos encontradas corresponden a tamaños gruesos, las cuales se depositan en la zona de la entrada del flujo al embalse. Puede contener cantidades pequeñas de partículas finas. (Ver Fig.2.3)

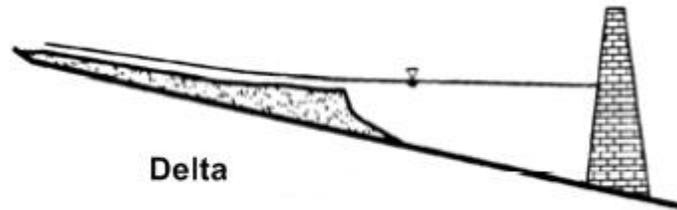


Fig. 2.3 Patrón longitudinal en donde se observa la formación de un delta en el embalse.

Foto cortesía:Manual de Sedimentación de Embalses, Morris y Fan (1998)

- **Depósitos en cuña:** Este tipo suele encontrarse en embalses pequeños que poseen grandes aportes de sedimentos finos, así como también, en grandes embalses operados a niveles de agua bajos durante la ocurrencia de crecidas. El patrón se caracteriza por la presencia de partículas finas al pie de la presa, transportadas mediante corrientes de turbiedad, y a medida que se aleja del cuerpo de la presa, se encuentran partículas de mayor tamaño. (Ver Fig.2.4)

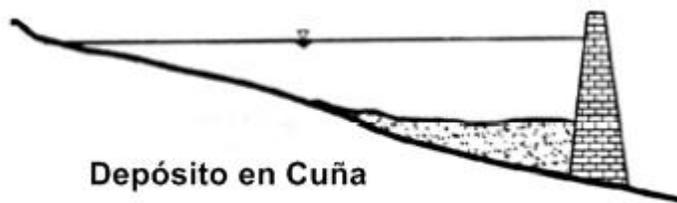


Fig. 2.4 Patrón longitudinal en donde se observa la acumulación de los sedimentos al pie del embalse.

Foto cortesía:Manual de Sedimentación de Embalses, Morris y Fan (1998)

- **Depósito de fondo:** Suele encontrarse en grandes embalses grandes, operados a niveles de agua altos, y se caracteriza por la deposición de partículas finas progresivamente hacia el pie de la presa. (Ver fig 2.5)

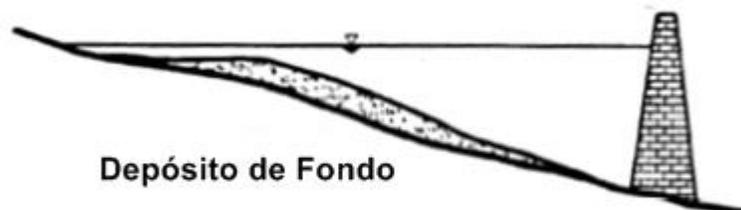


Fig. 2.5 Patrón longitudinal en donde se observa la deposición gradual en el fondo del embalse.

Foto cortesía: Manual de Sedimentación de Embalses, Morris y Fan (1998).

- **Depósito Uniforme:** Ocurre en embalses angostos, que debido a su operación presentan fluctuaciones constantes de los niveles de agua, y que el tipo de sedimentos encontrados corresponden a partículas principalmente finas, las cuales se depositaran de forma uniforme a lo largo del fondo del embalse. Este patrón es poco común, pero existen situaciones en los que se presenta. (Ver Fig.2.6)

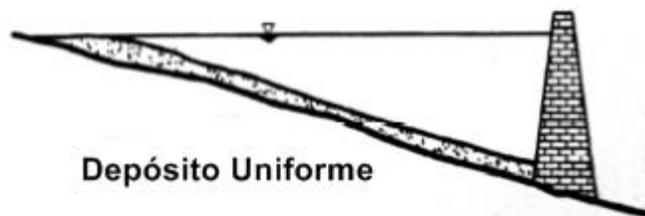


Fig. 2.6 Patrón longitudinal en donde se observa la deposición uniforme en el fondo del embalse.

Foto cortesía: Manual de Sedimentación de Embalses, Morris y Fan (1998).

#### 2.4. Métodos de Distribución de los Sedimentos en los Embalses

Los métodos empíricos a tratar han sido realizados por el U.S.B.R (United States Bureau of Reclamation) y se han desarrollado para distribuir la deposición de los sedimentos en los embalses en función de las profundidades, basados en la proyección sobre la curva de área-capacidades. Estos métodos son mucho más rápidos y fáciles de utilizar que los modelos matemáticos, además requieren de mucha menos información que los mismos. En los casos en que existe suficiente información acerca de los sedimentos en un embalse, los patrones de deposición observados pueden ser utilizados para seleccionar el método empírico que más se ajuste a la situación, y así realizar la estimación de cómo se modificará la relación entre el área y la capacidad durante la vida de operación que ha de tener el sistema. La limitación que poseen estos métodos, es que sólo predicen el cambio que presentará la curva de área-capacidades, más no las zonas que serán ocupadas por los sedimentos.

##### 2.4.1. Método del Área Incremental

Este método supone la reducción constante del área del embalse, entre el nivel de aguas muertas y por debajo del nivel de aguas normales (Ver Fig. 2.7). Se basa en la realización de aproximaciones sucesivas hasta obtener el valor correspondiente al Volumen Útil del embalse. Este se determina mediante la diferencia del Volumen Total y el Volumen Muerto el cual fue estimado según la vida útil asignada para el embalse. (Morris & Fan, 1998)

La ecuación básica para la aplicación del método es la siguiente

$$V_s = V_o + A_o (H - h) \quad (4)$$

Donde:

- $V_s$ : Volumen de sedimento a ser distribuido en el embalse
- $V_o$ : Volumen de sedimento por debajo de la nueva elevación cero o volumen muerto.
- $A_o$ : Factor de corrección de las áreas, es la reducción constante de áreas.
- $H$ : Profundidad del embalse al pie de la presa
- $h_o$ : Profundidad a la cual se llena el embalse completamente con sedimento (nueva elevación cero) o altura del Nivel de Aguas Muertas al pie de presa.

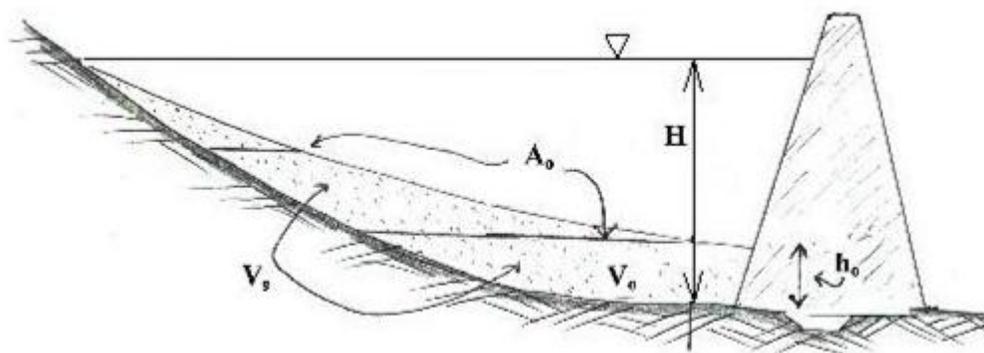


Fig. 2.7 Representación gráfica del Método de Área Incremental

Fuente: Ing. José De Jesús Gaspar.

El procedimiento de cálculo a utilizar es el siguiente:

- Se supone la profundidad a la cual se llena el embalse completamente con sedimentos o altura del Nivel de Aguas Muertas al pie de la presa ( $h_o$ ).
- Se procede a buscar el valor correspondiente de  $A_o$  y  $V_o$ , en la curva de Áreas-Capacidades, conocido  $h_o$ .
- Se realiza el cálculo del Volumen Muerto ( $V_s$ ), mediante la ecuación (4).

- Se compara el valor obtenido del Volumen Muerto, con el Volumen Muerto estimado a repartir.
- Se repite el proceso hasta que ambos valores de  $V_s$  converjan. Una variante de este proceso, es que luego de haber realizado tres (3) o más tanteos, se pueden graficar los valores de  $h_o$  vs  $V_s$ , y así ingresar en ella con el valor correspondiente de  $V_s$  según el proyecto, y obtener la altura del Nivel de Aguas muertas al pie de la presa.
- Se determina el Volumen de Sedimentos acumulados entre cotas sucesivas entre el nivel de aguas muertas y el nivel de aguas normales. Este proceso permite obtener la curva de Altura-Área-Capacidad para el transcurso de la vida útil del embalse.

#### **2.4.2. Método de Reducción Empírica de Áreas**

Este método fue desarrollado a partir de los datos procedentes de 30 embalses con características distintas (topografía de vaso de almacenamiento, modos de operación, capacidades, y propiedades de sedimentos). Esta información fue utilizada para el desarrollo de curvas de porcentaje de sedimentos depositados vs. Porcentaje de profundidad de aguas, para cuatro tipos de embalses, los cuales fueron clasificados mediante un parámetro  $M$  que corresponde al inverso de la pendiente de la curva Áreas-Capacidades graficada en papel log-log. (Strand & Pemberton, 1982)

A partir de esta clasificación, se realizaron curvas características de cada tipo, que relacionan Porcentaje de Sedimentos vs Porcentaje de Profundidad, las cuales a su vez poseen ecuaciones matemáticas que las rigen, y de esta forma se obtiene el valor del área relativa de sedimentos para una profundidad dada.

La clasificación para cada tipo de embalse y su respectiva ecuación se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 2.2 Clasificación de tipos de embalses según Método de Reducción Empírica de Áreas**

M	TIPO DE EMBALSE	CLASIFICACIÓN	FÓRMULA PARA "Ap"
1,0 - 1,5	Desfiladero	IV	$A_p = 4,2324 p^{0,1} (1-p)^{2,5}$
1,5 - 2,5	Montaña	III	$A_p = 15,882 p^{1,1} (1-p)^{2,30}$
2,5 - 3,5	Colinario	II	$A_p = 2,3240 p^{0,5} (1-p)^{0,40}$
3,5 - 4,5	Llanuras	I	$A_p = 3,4170 p^{1,5} (1-p)^{0,2}$

El procedimiento es el siguiente:

- Se supone un valor de  $h_o$ .
- Se calcula  $A_p$ , mediante la ecuación correspondiente según la clasificación antes hecha.
- Se calcula  $A_s$  y el parámetro  $K$ :

$$A_s = A_p \cdot K \quad (5)$$

$$K = \frac{A_o}{A_p(o)} \quad (6)$$

### **2.4.3. Método de la Reducción Empírica de Áreas Modificadas**

Este método presenta una variante del método de reducción empírica de áreas, fue presentado por Moody en el año 1962. Se basa en la introducción de gráficos que permiten la determinación de la profundidad de sedimentos al pie de la presa (ho) o nivel “cero” de forma directa, eliminando así los tanteos. También incorpora curvas de diseño reajustadas por el método de mínimos cuadrados. (Sánchez, 2010) .

### **3. MANEJO SUSTENTABLE DE SEDIMENTOS**

Desde el momento en que se termina la construcción de una presa, los sedimentos producidos en la cuenca se empiezan a depositar en su vaso de almacenamiento y, con ello, se inicia un proceso que en un futuro acarreará problemas al embalse. Es por ello que, así como en otros aspectos, es necesario que desde el inicio de su operación existan rutinas y planes de acción relacionadas con el manejo de los sedimentos y así, prolongar su vida útil y alcanzar a largo plazo la sustentabilidad de los procesos que involucran la sedimentación de embalses.

A continuación se desarrollan los métodos para el manejo sustentable de los sedimentos en los embalses antes de su colmatación y las acciones a tomar en la cuenca para evitar la producción excesiva de sedimentos como consecuencia de malas prácticas en labores agrícolas o en cualquier otra que, de una manera u otra afecten el potencial de erosión de los suelos, explicando en detalle en qué consisten los procesos recomendados y sus posibles ventajas y desventajas.

#### **3.1. Acciones en la Cuenca**

Las acciones más eficientes desde el punto de vista de manejo de sedimentos son aquellas encaminadas a evitar la erosión de los suelos y su acarreo hasta el vaso de almacenamiento. La disminución en la producción de sedimentos en una cuenca, debe estar precedida por actividades orientadas a la conservación de la cuenca, la protección de los suelos y la disminución de los parámetros que potencian la erosión superficial del mismo: interacción, velocidad y concentración.

Estas acciones garantizan principalmente el alargamiento de la vida útil del embalse, lo que resulta de gran importancia cuando se trata del manejo de los embalses colmatados o en proceso acelerado de colmatación. Si bien brindan beneficios ambientales

que se fundamentan en el control de erosión de los suelos y su conservación, de igual manera permiten la prevención de la ocurrencia de deslaves pero, debido a su gran extensión, requieren de inversiones importantes de dinero y sus efectos se perciben a largo plazo, razón por la cual deben ser actividades continuas y de larga aplicación.

Las labores para preservar la cuenca muchas veces no son tomadas con la seriedad que ameritan, ya que se considera que su ejecución no es vital para la preservación del aprovechamiento de la fuente de agua o por las razones económicas y temporales antes mencionadas: alto costo y larga duración en su aplicación y visualización de los efectos, por lo cual usualmente son postergadas.

Entre las actividades que usualmente se practican para el tratamiento de la cuenca, podemos encontrar:

- Control de la actividad humana.
- Protección de los suelos que tienen gran aporte de sedimentos.
- Control del movimiento de tierra en las obras civiles.

### **3.1.1 Control de la Actividad Humana**

El control de la actividad humana se enfoca principalmente en el desarrollo de políticas de orientación que se apliquen a largo plazo y de manera constante, estas políticas constituyen acciones de índole social y económica, lo cual no corresponde una actividad sencilla, ya que se necesitan cambiar las costumbres típicas humanas a manera de que no perjudique la cuenca y poder generar cambios.

Entre estas políticas podemos encontrar la concientización de la sociedad para el uso de manera racional del suelo, de tal forma de evitar la erosión y arrastre del mismo. Esto se puede lograr mediante la implementación de drenajes en el suelo; así como también la eliminación de actividades como la agricultura de conuco, talas y quemas de suelos. El

ordenamiento del territorio también constituye otra acción de control de la actividad humana, de esta manera se delimitan las zonas que no son adecuadas para el desarrollo agrícola o las que sí son aptas para la agricultura de ciertos cultivos que no generen daños al ambiente; este ordenamiento incluye también las zonas que pueden ser capaces de permitir nuevos asentamientos urbanos.

Las actividades agrícolas en suelos de alto potencial, conforman una de las actividades que producen mayor cantidad de sedimentos. Labores relacionadas con el arado o la construcción de drenajes y surcos orientados en el sentido de la recta de máxima pendiente de los terrenos propician la concentración de flujo, incrementan su velocidad, disminuyen su infiltración y, finalmente, acarrearán ingentes volúmenes de suelos superficiales. En caso de ser importante económicamente el desarrollo agrícola de estos suelos, se deben adoptar prácticas que antes de incrementar la velocidad de las aguas superficiales las detengan y, por ello, se propicia la construcción de canales y surcos que sigan las curvas de nivel; es decir, perpendicular a las líneas de máxima pendiente., y su descarga pausada hacia los cauces naturales.

La creación de Monumentos Naturales y Parques Nacionales es una acción de preservación muy importante ya que garantiza la conservación a largo plazo de las cuencas, manteniendo sus condiciones naturales e impidiendo el desarrollo urbano y los procesos antrópicos que usualmente redundan en el aumento de la exposición de los suelos a los agentes erosivos; un ejemplo de esta acción es la creación de algunos parques nacionales como el Henry Pittier, Guatopo, entre otros. (Gaspar, 2003)

La aplicación de estos criterios depende de las condiciones sociales en las que se encuentren, en donde muchas veces los entornos sociales comprometen el mantenimiento del ambiente, ya que actividades como los desarrollos agrícolas de cultivos no aptos para la zona, la tala y quema de árboles, entre otros, es permitida por la presión social generada, causando un incremento en el aporte de los sedimentos, lo que no permite darle el tratamiento adecuado a la cuenca.

### **3.1.2 Protección de los Suelos**

La reforestación comprende una actividad de alto costo y de trabajo a largo plazo, que ofrece grandes beneficios desde el momento en que se inicia su aplicación, por lo que constituye uno de los procesos más eficientes para la protección del suelo ante la exposición de las aguas que pueden generar el proceso de erosión. Debe realizarse con especies adecuadas a los suelos, ya que para que tenga efectos positivos es necesario que adapten a las características climatológicas, geológicas y topográficas del suelo que se está tratando.

Cuando se trata de la construcción de obras civiles como carreteras, nuevos urbanismos y vialidades que requieran grandes movimientos de tierra, debe considerarse que la acumulación de material suelto en grandes cantidades no debe ser dispuesta sin compactar, ya que permite que el arrastre de este material sea mucho más fácil. Por lo que la protección de las zonas que se encuentran descubiertas y en posible peligro de generar arrastre de sedimentos es una de las opciones más viables, en donde los taludes deben ser protegidos con la vegetación apropiada, ya que pueden representar una fuente de gran aporte de sedimentos. La protección se puede realizar con gramíneas que resulta una opción económica y muy eficiente con el concurso o no de algunos elementos que permitan su desarrollo temprano tales como, fajinas, geotextiles, mallas, etc.



**Fig. 3.1 Demostración del uso de gramíneas para la protección de taludes.**

**Fuente: COMOPA C.A, 2015.**



**Fig. 3.2 Protección de un talud con el soporte de mallas plásticas.**

**Fuente: GEOFIX, C.A.**

Cuando no se le da la adecuada protección a los suelos o cuando se ha deforestado una zona de alta pendiente, el paso de agua va generando erosión dando como resultado la formación de cárcavas, que son zanjas profundas generadas por socavamientos repetidos sobre el terreno, debido al paso incontrolado del agua que escurre ladera abajo y constituyen uno de los más grandes portadores de sedimentos.

La formación de las cárcavas como se mencionó anteriormente se debe a la ocurrencia de caudales mayores a los que puede manejar la cuenca, en donde el incremento del caudal pico, genera un aumento de los esfuerzos cortantes del suelo creando la cabeza de la cárcava, que se va desplazando aguas arriba hasta formar un canal que va incrementando su ancho así como también su profundidad debido a la erosión del suelo, el proceso de erosión se detiene una vez que alcanza un estrato de suelo resistente.



**Fig. 3.3 Cárcava formada debido a la erosión de los suelos. Inmediaciones de Píritu estado Falcón.**

**Foto cortesía del Ing. José Gaspar. Sedimentación de Embalses, problemática y soluciones. Situación de los embalses en Venezuela (2003)**



**Fig. 3.4 Cárcava llamada “El Volcán” formada por alteraciones ocasionadas por la actividad humana y resultado de los movimientos de la falla de Boconó. Embalse Santo Domingo**

**Foto Cortesía del Ing. José De Jesús Gaspar.**

Existen varios criterios para la estabilización de estas cárcavas, entre los cuales podemos encontrar la protección de las laderas con el uso de gramíneas, que permiten el paso de las corrientes de agua con bajas velocidades y cumplen una función muy semejante a una trampa para sedimentos. La construcción de las presas de retención también constituyen un método para la estabilización de las cárcavas, que permiten el control de socavación de los sedimentos en los taludes de la misma.

*Criterios para el manejo de embalses colmatados*

### **3.1.3 Otras acciones a considerar**

El agua en una cuenca es una variable difícil de manejar puesto que por un lado es el agente principal de arrastre de suelos superficiales pero, simultáneamente es de suma importancia mantener condiciones de humedad adecuadas en los suelos para la preservación y crecimiento de las especies vegetales.

Así, por un lado se desea que existan elementos de captación, conducción y descarga de las aguas que evite la saturación de los suelos potencialmente deslizables y por la otra se propiciarán obras de detención temporal de las aguas con el fin de favorecer la infiltración de las mismas y la disminución de la escorrentía.

Si se considera necesaria la incorporación de obras de drenaje en las cuencas, éstas deben ser diseñadas y construidas de tal manera que su flujo no genere procesos erosivos y en su descarga existan elementos de disipación y amortiguación que protejan el entorno y faciliten la entrega de las aguas hacia los cauces naturales.

En ocasiones, el movimiento de sedimentos puede ser controlado o reducido con el concurso de obras de retención de sedimentos a construir en los espacios donde existen o se esperan concentraciones importantes de partículas de suelo. Estas obras pueden ser tan simples como una trampa de sedimentos, desarenadores, lagunas de detención a obras complejas como presas de retención de sedimentos.

Las presas de retención de sedimentos también conocidas como trampas de sedimentos, son presas pequeñas utilizadas con el doble fin de disminuir la potencia erosiva de las corrientes y el almacenamiento de las partículas transportadas por la corriente propiciando la recuperación de los cauces. Al construirlas, interpuestas en el curso de ríos o quebradas, crean obstáculos en donde el agua pasa de manera escalonada actuando como una torrentera de gran escala. Se colocan a distancias determinadas de manera tal que tengan una pendiente que disminuya el transporte de los sedimentos, este distanciamiento entre las presas dependerá también del número de presas, por lo general, se usan distancias

que permitan obtener una cantidad mínima de presas, en donde las aguas pasan a velocidades pequeñas y menor capacidad de arrastre.

Para ciertos casos en donde el embalse ha sido totalmente colmatado y su rehabilitación no es realizada, es común la construcción de una nueva presa, en donde la presa antigua cumpla la función de trampa de sedimentos, la cual actúa disminuyendo la velocidad del flujo y permitiendo que los sedimentos se vayan depositando.

En fin, existen múltiples acciones para el tratamiento de la cuenca a manera de controlar los sedimentos, estos dependerán de diferentes características como lo son la geología, los factores económicos y climatológicos, la topografía, pluviosidad, entre otros, que permitirán la aplicación de diversas soluciones.

Antes de proceder a la implementación de cualquiera de las acciones de protección y preservación de las cuencas con el fin de disminuir la producción de sedimentos es necesario analizar los sedimentos acarreados hasta el embalse, su caracterización, establecimiento de sus fuentes originarias principales y procesos involucrados y, de esta forma, seleccionar aquel o aquellos procedimientos más idóneos para la cuenca en estudio.

En Venezuela, son muy pocos los embalses en donde se han aplicado medidas para el tratamiento de las cuencas, entre uno de los sitios en donde se ha realizado alguna acción fue en la Central Hidroeléctrica San Agatón ubicada en el estado Táchira, en donde, por las numerosas deforestaciones hechas en las montañas que conforman la cuenca, se desestabilizó y se recurrió a la protección de la Hidroeléctrica con la construcción de tres (3) presas de concreto que tienen como función el control de los sedimentos acarreados por una quebrada intermitente, de esta manera fue posible la estabilización de su cauce. Otro ejemplo lo constituye el río Onia, ubicado en el estado Mérida, en donde se ha intentado aplicar medidas para el control de las actividades humanas para que el embalse Onia pudiera cumplir con su función de retención de sedimentos, pero ha sido imposible ya que por las condiciones sociales, se ha permitido la tala, quemas y las actividades agrícolas

inadecuadas; así como en muchos otros estados del país resulta de gran dificultad el manejo de las actividades humanas que perjudican los suelos y las cuencas.

No es tarea sencilla el análisis de todos estos criterios para el manejo y tratamiento de la cuenca, es por esto que en muchos países no se le da la importancia necesaria y se aplican medidas sin tomar en cuenta ciertas condiciones que pueden ser las que generen la problemática con los sedimentos o incluso nunca se llega a estudiar las condiciones de la cuenca, aplicando medidas en el embalse que no brindarán efectos positivos para el manejo de los sedimentos ya que no corresponden al tratamiento del embalse sino de la cuenca, por esto es de vital importancia el estudio de estas medidas y de las condiciones en las que se encuentre el embalse, de esta manera las acciones correctivas empleadas surgen efectos positivos en el tratamiento de la cuenca y por lo tanto en el acarreo de los sedimentos en el embalse.

Quizás la principal acción para la protección de los efectos nocivos del sedimento en las obras de una presa será la de concientizar a la Autoridades, a la Población y a las personas encargadas de la operación del embalse en que éstas deben ir hacia la fuente de los sedimentos; es decir, a la protección de su cuenca.

### **3.2. Acciones en el Embalse**

Como se ha mencionado a lo largo de este T.E.G existen diferentes métodos que permiten la prevención de la acumulación de los sedimentos en el embalse, así como también su manejo una vez que han sido depositados, disminuyendo la capacidad de almacenamiento del embalse. Los criterios utilizados en innumerables embalses se enfocan en la operación de los mismos mediante la disposición de las descargas de fondo, de esta manera se permite la limpieza de estos sedimentos mediante las obras de descargas; y el otro enfoque constituye métodos que permiten el incremento de la capacidad del volumen muerto del embalse.

A continuación se desarrollarán los diferentes métodos más utilizados para el manejo de los sedimentos en los embalses:

### **3.2.1. Corrientes de Turbiedad**

Una corriente de turbiedad o también llamada corriente de densidad consiste en el movimiento inducido por la gravedad de un fluido, el cual pasa a través o sobre otro fluido, debido a la diferencia de densidad entre ambos. En el caso de los embalses, las diferentes densidades que tiene el agua, generan diferenciales en la temperatura, en donde, el agua con temperaturas mayores, fluye como una corriente superficial por encima del agua más fría y densa del embalse; estos diferenciales de densidad, turbiedad y temperaturas generan que el agua se encuentre en un flujo estratificado. Es importante mencionar, que estas corrientes son de vital importancia para el entendimiento de cómo se mueven y distribuyen los sedimentos en los embalses.

Las corrientes de turbiedad se generan cuando una corriente de agua cargada de sedimentos finos, entra en un gran cuerpo de agua, lago o un embalse, dando origen a la formación de una corriente secundaria que escurre en el fondo de las aguas más claras, las cuales se transportan aguas abajo a lo largo del fondo del embalse, pudiendo alcanzar el cuerpo de la presa, generando una acumulación de sedimentos. Esta condición puede ser aprovechada favorablemente si se descargan los sedimentos aportados en crecientes, siempre que se tengan estructuras de descarga de fondo aptas para la movilización de estas partículas. La eficiencia de la evacuación de sedimentos estará condicionada por su abertura, ubicación y tamaño así como por las rutinas de apertura y cierre que se realicen consecuentemente. (Ver Fig. 3.5)

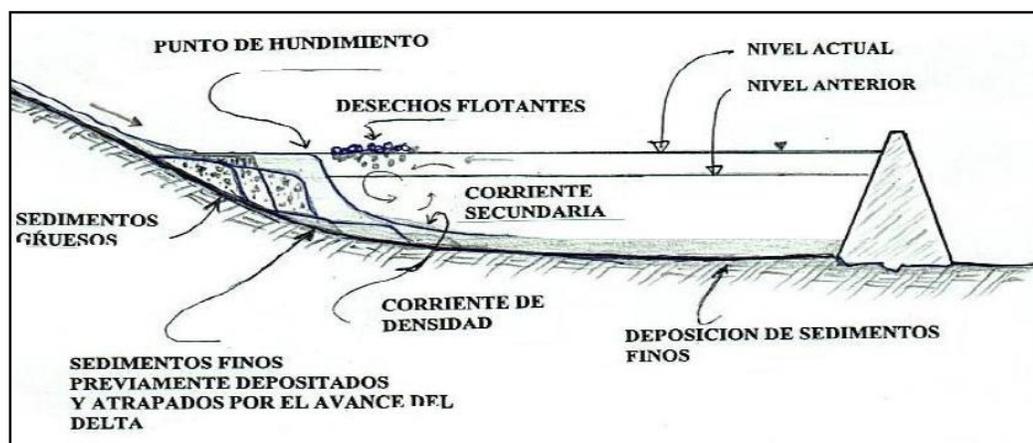


Fig. 3.5 Proceso de Corrientes de Turbiedad.

Fuente: Gaspar, 2003

### 3.2.1.1 Factores que afectan la eficiencia de las corrientes de turbiedad

Lo ideal, es que la operación de la descarga de fondo se realice de manera de captar la mayor cantidad de sedimentos posible y sacarlos del embalse, lo que se puede realizar garantizando que el caudal a descargar será igual al caudal de la corriente, esto no sólo captaría la mayor cantidad de partículas sino que permitiría que las más densas de esta corriente salgan por la descarga de fondo.

El embalse debe proporcionar ciertas condiciones que permitan la formación de estas corrientes de turbiedad, a manera de conservar velocidades altas que mantengan la suspensión de los sedimentos y no su deposición. El estudio de estas velocidades de suspensión según Fan (1986), obtuvo que las velocidades requeridas para el movimiento de partículas con diámetros iguales o menores a 0,04 mm era de 1 m/s, mientras que para las partículas de diámetros menores a 0,01 mm la velocidad adecuada era de 0,3 m/s.

A manera de que la descarga sea eficiente, lo ideal es conocer cuándo ocurrirá la corriente de turbiedad y cuándo terminará, esto se puede conocer mediante el uso de ciertos

instrumentos en el embalse o puede ser estimado determinando las condiciones del flujo de entrada, lo que permitirá conocer la duración aproximada de la descarga.

### 3.2.1.2 Cálculo de la altura de corriente de turbiedad mínima

Cuando ocurre una corriente de turbiedad que alcanza la presa y se evacúan los sedimentos, el agua es succionada por la descarga de fondo, lo que genera la entrada de las aguas claras de la superficie a la corriente. Esta captación de aguas claras, constituye un problema a tomar en cuenta, ya que se generan pérdidas de agua limpia.

Por lo mismo, es necesario el cálculo de una altura de corriente de turbiedad mínima (h), por encima del eje de la descarga de fondo, a manera de evitar la captación de las aguas claras. El cálculo de esta altura fue estudiado por Fan (1960), en donde la expresó en términos del número densimétrico de Froude.

$$h = F\rho \left[ \frac{Q^2}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)g} \right]^{1/5} \quad (7)$$

$$F\rho = \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} g \frac{h^5}{q^2} \right)^{1/3} = 0,75 \quad (8)$$

En donde, para compuertas rectangulares:

- $F\rho$  : es el número densimétrico de Froude.
- $\Delta\rho$ : diferencia de densidades
- $h$  : es la altura de aguas turbias en metros sobre el eje de la compuerta para impedir el atrape de aguas claras.
- $g$ : es la aceleración de gravedad,  $m/s^2$
- $q$ : es el caudal por unidad de ancho en  $m^3/s.m$

Para el caso de una descarga de fondo con forma de orificio circular:

$$F_{\rho} = 0,80$$

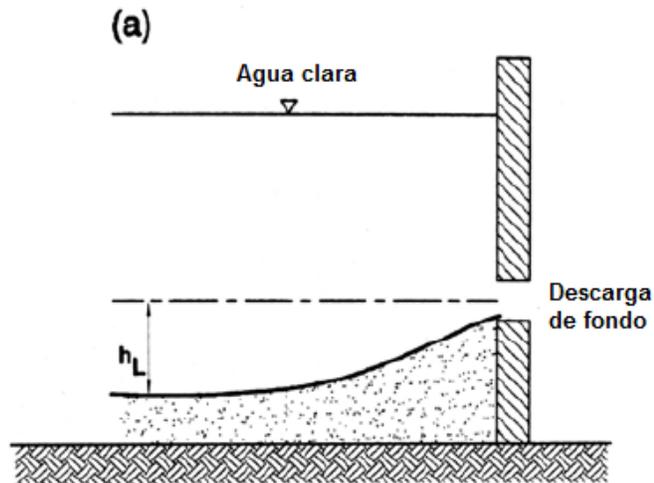


Fig. 3.6 Definición esquemática de la configuración en las condiciones límites: (a) Paso de corriente de agua turbia a través de una descarga de fondo

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, Fan y Morris (1998)

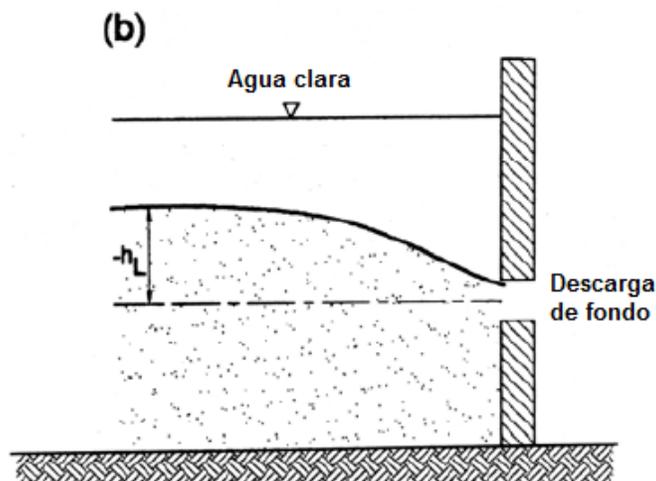


Fig. 3.7 Definición esquemática de la configuración en las condiciones límites: (b) Paso de corriente de turbiedad al aplicar ventilación

. Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, Fan y Morris (1998)

### **3.2.1.3 Limitantes de las corrientes de turbiedad**

Las corrientes de turbiedad representan un método que tiene como ventajas el manejo de los sedimentos dentro del embalse, lo que a su vez supone la prolongación de la vida útil de estos, pero tiene sus limitantes que pueden hacer de éste, un proceso no tan favorable en muchos casos. A continuación se presentan algunas de las limitantes de este método:

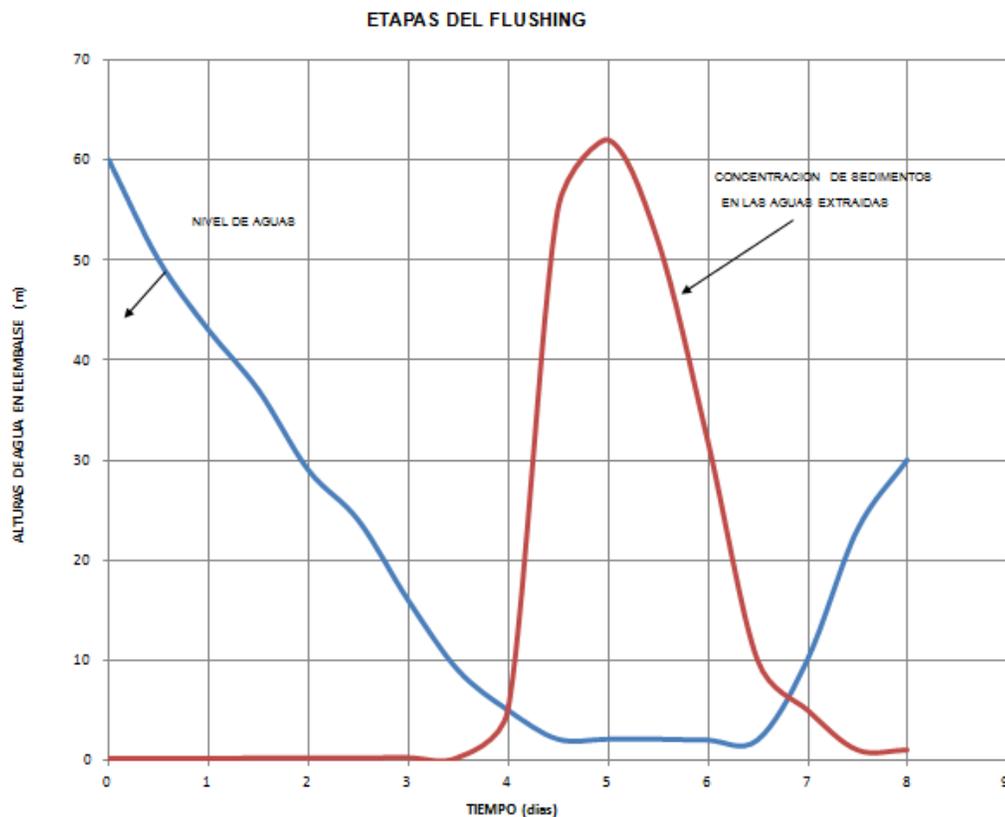
- Es necesaria la presencia de una descarga de fondo en el embalse para poder aprovechar la corriente de turbiedad y extraer los sedimentos.
- Sólo pueden extraerse sedimentos finos, arcillas y limos.
- Se debe tener un conocimiento preciso de cuándo ocurrirán las corrientes de turbiedad y su duración, de esta manera se pueden evitar las grandes pérdidas de agua. Este seguimiento requiere el uso de equipos especiales para la medición de estas corrientes.
- Efectos aguas abajo.

### **3.2.2. Método Español o Flushing**

El método español o Flushing, consiste en la disminución del nivel o vaciado de un embalse mediante la operación de compuertas de fondo, estableciendo temporalmente el flujo del cuerpo de agua a través del cauce principal y de esta manera generar erosión en el canal, con el fin de remover los depósitos de sedimentos, cualquier tipo de desecho atrapado, y también los mismos sedimentos que acarrea el flujo en el transcurso de la aplicación del método; a manera de retirarlos del embalse a través de las compuertas antes mencionadas.

Su operación se divide en tres (3) etapas (Gaspar, 2003) :

- Se realiza el vaciado total del embalse, mediante el uso de las descargas de fondo.
- Se da inicio al proceso de lavado, en donde el paso del agua a través del fondo genera erosión y el arrastre de los sedimentos, transportándolos a lo largo del embalse hasta su posterior salida.
- Llenado del embalse.



**Fig. 3.8 Etapas del Flushing.**

**Gaspar, 2003.**

El tiempo de implementación de este método varía según el tamaño del embalse y se lleva a cabo principalmente en las épocas de lluvia, para así aprovechar las crecidas, las

*Crterios para el manejo de embalses colmatados*

cuales son las que poseen mayor energía para el arrastre de los sedimentos. Por otra parte, este método posee una gran limitante ambiental, ya que la concentración de sedimentos en el cuerpo receptor se verá incrementado en una cantidad que algunas veces sobrepasa el nivel tolerable, es por ello que requiere de la realización previa de estudios de impacto ambiental, para así conocer cuáles son los valores tolerables de concentración de sedimentos, de tal manera que no perjudiquen la flora y la fauna que ahí habitan. Siempre tomando en cuenta la factibilidad técnico-económico.

Al aplicar este método en canales de secciones anchas no se suele recuperar el tamaño de la sección original, sin embargo, se logra alcanzar una sección de equilibrio mediante la aplicación periódica y continua del proceso, que suelen ser intervalos anuales.

Los sedimentos que se depositan en el canal anualmente se logran evacuar mediante la implementación de este método, de igual manera la mayoría de los sedimentos que acarrea la crecida utilizada para Flushing son retirados a través de la compuerta de fondo, sin embargo algunos desechos se podrían depositar en los márgenes del cauce, lo cual se puede solventar mediante la implementación de maquinaria auxiliar para así removerlos, promoviendo la erosión y posteriormente su extracción del sistema.

#### 3.2.2.1. Clasificación de las Técnicas

A nivel internacional se han empleado dos (2) clasificaciones, Fan (1985):

- **Vaciado completo:** Consiste en llevar el embalse a un nivel de agua que coincida con el nivel de las descargas de fondo. Logrando establecer el flujo del río de manera natural a través de las compuertas.
- **Vaciado parcial o Flushing presurizado:** Consiste en disminuir el nivel de agua del embalse, hasta una cota determinada, pero sin llegar al nivel de las descargas de fondo. Suele ser entre  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{3}$  del nivel de aguas normales. Este método es menos efectivo, y por lo mismo su implementación es menos común.

Estas dos clasificaciones se pueden subdividir según la temporada en que se ejecutan, puede ser en época de invierno (crecidas) o en épocas de verano. Ambas estrategias se han llevado a cabo satisfactoriamente a nivel internacional, sin embargo, la implementación del método español en las épocas de invierno ofrece resultados mucho más eficientes debido a que en este período ocurren los caudales picos, los cuales poseen mayor energía para erosionar los canales, y de esta manera los sedimentos son expulsados del embalse con mayor facilidad.

### **3.2.2.2 Aplicación**

Este método se utiliza principalmente para reducir o detener la acumulación de sedimentos, con el fin de recobrar o mantener la capacidad de almacenamiento del embalse. El período de aplicación varía según el tamaño del mismo, puede abarcar desde pocos días para embalses pequeños, así como meses en embalses de mayores dimensiones.

Los tamaños de partículas que se logran remover mediante esta técnica van desde arcillas hasta gravas.

### **3.2.2.3 Limitaciones**

La aplicación de este método posee dos grandes limitaciones:

- **Suspensión del embalse:** La necesidad de disminuir el nivel de agua, o el vaciado completo del embalse. Esto implica que el embalse se ha de colocar en suspensión durante el período en que se aplique el método. Es por ello que esta técnica suele ser factible en sistemas que poseen ciclos hidrológicos relativamente pequeños, y en aquellos donde los beneficiarios del sistema poseen otra fuente de abastecimiento.
- **Aumento de la concentración de sedimentos en el cuerpo receptor:** El período inicial de la aplicación del método, entre pocas horas y pocos días dependiendo del tamaño del embalse, es caracterizado por el aumento abrupto de la concentración

de sedimentos, típicamente excediendo los 100 g/L en el sitio de presa, y en algunos casos llegando a valores de 1000 g/L.

Debido a este factor, la aplicación del método se verá afectada dependiendo de los valores tolerables de concentración de sedimentos que posea el cuerpo receptor, de tal manera que la afectación de la flora y la fauna sea un grado controlable.

- También es de tomar en consideración que estos caudales con valores extremos de concentración de sedimentos, los cuales son básicamente lodos, pueden bloquear los canales de riego (en los casos en que el sistema suple demandas de riego).

#### **3.2.2.4 Características**

En el momento en que se inicia el vaciado del embalse, dos fases de lavado se identifican, la primera comprende la formación de los canales, en donde el fondo del embalse es erosionado por el paso del agua generando el “Canal Principal” (Ver Fig 3.9 y Fig. 3.10), el cual se mantiene en constante lavado debido al arrastre de los sedimentos, también se forman los depósitos denominados planicies laterales que no se ven afectados por el proceso erosivo del agua.

La segunda fase corresponde al mantenimiento de estos canales con el paso del tiempo, en donde el canal ya alcanzó su tamaño adecuado, lo que permite que cuando se realice el flushing el agua ya tenga un canal central por donde pasar y arrastrar todos los sedimentos.

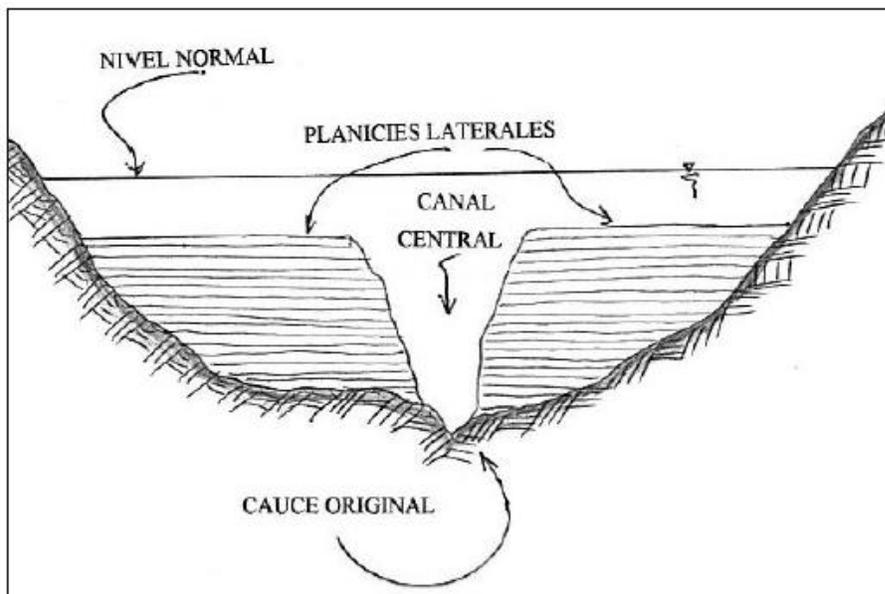


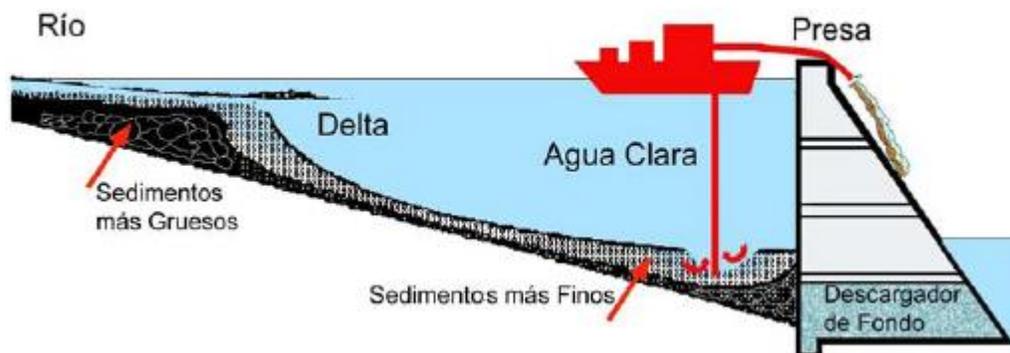
Fig. 3.9 Sección Transversal de un embalse en el cual los lavados tipo flushing, crean un cañón central y en consecuencia un volumen útil sustentable. Fuente: Sánchez, 2010.



Fig. 3.10 Efectos del Flushing en el Embalse Santo Domingo. Vista aguas abajo, es importante ver que el lavado solo logra abrir un cañón dentro de lo que fue el delta y que es necesario proceder a modificar el cauce del río para arrastrar los sedimentos depositados. Fuente: Ing. José de Jesús Gaspar

### 3.2.3. Dragado

El dragado es un proceso mediante el cual se puede remover de manera mecánica grandes volúmenes de sedimentos de un embalse, tomándolos desde el fondo del mismo (bajo el agua) mediante equipos especializados denominados “dragas” y transportándolos ya sea por bombeo al sitio de descarga o de manera mecánica fuera del canal de agua (Ver Fig 3.11). La extracción de estos sedimentos constituye una solución costosa debido a los grandes volúmenes de material a remover y transportar. Es un método que se implementa cuando el flushing, las corrientes de turbidez o las demás opciones no son viables para su aplicación. Por lo general, resulta ser una de las opciones más utilizadas para el manejo de los embalses que presentan problemas con los sedimentos, ya que es un método bastante eficiente, debido a que asegura la remoción total de las zonas afectadas por la colmatación, permitiendo recuperar la capacidad original de almacenamiento del embalse. Tiene como gran ventaja que no interfiere con el servicio del embalse, ya que no es necesario vaciarlo, especialmente útil en centrales hidroeléctricas, debido a que pueden seguir produciendo energía mientras se realiza el dragado del embalse.



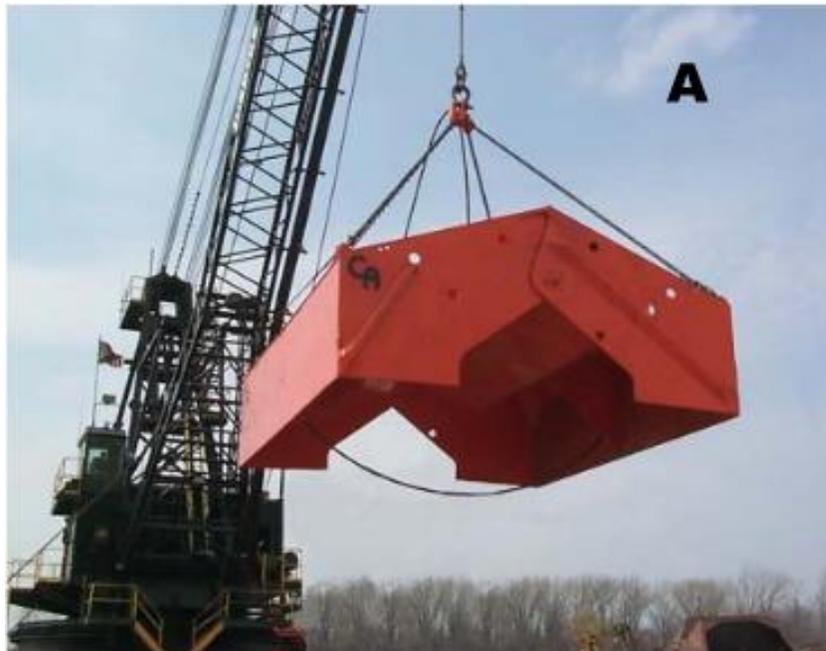
**Fig. 3.11 Representación Gráfica del proceso de dragado de un embalse**

Fuente: “Combate a la Colmatación en Embalses y Represas” de Dragatec.

### 3.2.3.1 Tipos de dragado

#### 3.2.3.1.1 Dragado Mecánico

El dragado mecánico o convencional utiliza como principio de funcionamiento el mecanismo de corte para la penetración del suelo, las dragas utilizadas corresponden a las mismas usadas para hacer canalizaciones, y emplean equipos semejantes a los empleados para los movimientos de tierra, se encuentran provistas de motores que tienen la energía para excavar, succionar y transportar los sedimentos por el sistema de tuberías hasta el sitio de descarga final. Tiene como principal ventaja que descarga los sedimentos con poco contenido de agua y poca perturbación, pero como desventaja tiene que el proceso de remoción de las partículas es muy lento en comparación con otras prácticas. Suele ser utilizado en embalses que tienen gran cantidad de gravas o materiales largos.



**Fig. 3.12 Equipo utilizado para el dragado (A)**

**foto cortesía: Cable Arm, Corp y Barbara Bergen, U.S. EPA.**



**Fig. 3.13 Equipo utilizado para el dragado (B)**

Foto cortesía: Cable Arm, Corp y Barbara Bergen, U.S. EPA.

### **3.2.3.1.2 Dragado Hidráulico**

El dragado hidráulico funciona mediante el aprovechamiento de la energía que proporciona la altura de aguas del embalse, en donde el sedimento es mezclado con el agua y transportado desde el punto de extracción hasta el de descarga como una suspensión de agua con sedimentos, puede utilizar bombas para producir la succión de agua necesaria y transportar el material dragado, así como también para la remoción de los sedimentos mediante corte.

En comparación con el dragado mecánico, tiene como ventajas que presenta bajo costo unitario de remoción, alta tasa de producción, no requiere de grandes cantidades de energía, lo cual lo hace mucho más eficiente. Este método funciona también para el dragado de materiales de mayores tamaños, pero requiere de grandes costos, debido a las altas velocidades que se tienen en los ductos que generan desgaste en los equipos. Durante el proceso de dragado, el bombeo de los sedimentos hasta el sitio de descarga hace que los materiales finos sean lavados de las arenas.

*Crterios para el manejo de embalses colmatados*

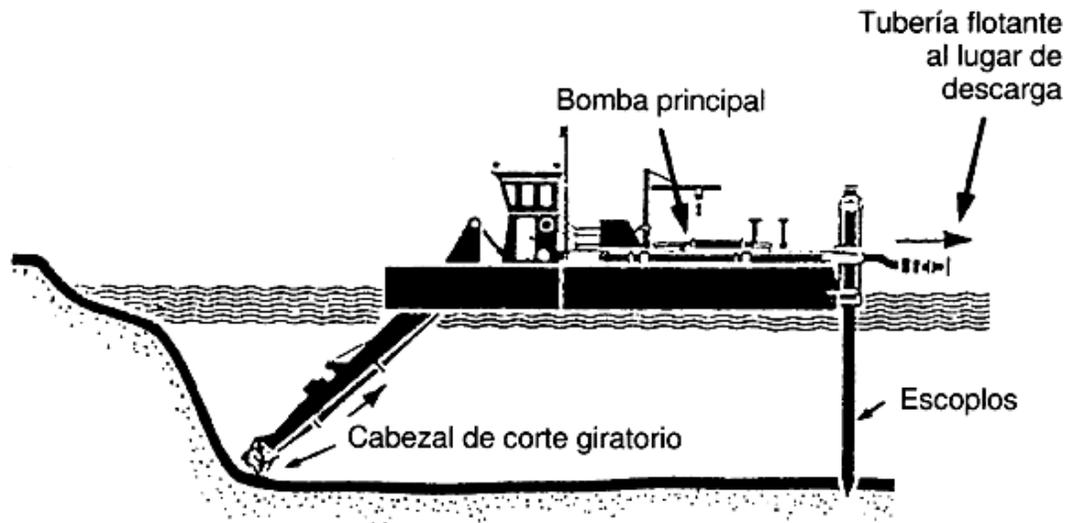


Fig. 3.14 Representación gráfica de una draga hidráulica y sus componentes

Fuente: FAO org.

### 3.2.3.2 Consideraciones para el dragado de los embalses

#### 3.2.3.2.1 Tipo de sedimentos a extraer del embalse y sitio de dragado

- Es importante conocer las características de los sedimentos que se van a dragar, como lo es el tamaño de las partículas, con el fin de determinar el porcentaje de gruesos a extraer, lo que permite conocer la velocidad mínima necesaria para el transporte de los sedimentos en las tuberías luego de su remoción del embalse. A su vez, el conocimiento del tipo de sedimentos predominantes, permite conocer el patrón de deposición de los mismos y cómo será su extracción posterior.
- El sitio de dragado también constituye un factor de importancia, en términos de área y profundidad, ya que dependiendo del tipo de sedimentos se considerará el uso del tipo de dragado a utilizar para la extracción de los sedimentos, esto a su vez es importante, ya que se debe tener espacio suficiente para el montaje y operación de los equipos de dragado y todos los demás instrumentos necesarios.

### **3.2.3.2.2 Equipos para el dragado**

- La selección del tipo de dragado dependerá de diversos factores, como lo son las características de los sedimentos, por lo que el equipo a utilizar para el dragado cambiará si se trata de un dragado convencional o hidráulico. Como se mencionó en el Punto 3.2.3.1, el tamaño de dragado necesario dependerá de las velocidades de producción, la excavación, nivel de dragado y de la descarga, tipo de sedimentos, entre otros factores.

### **3.2.3.2.3 Sistema de tuberías para el transporte de los sedimentos:**

El transporte de los sedimentos se realiza mediante el uso de tuberías, el sistema de tuberías a utilizar dependerá de los sedimentos a transportar desde el sitio de dragado hasta el punto de descarga de los mismos, en donde se deben tomar consideraciones en el diámetro de la tubería, la ruta que seguirá y las bombas a utilizar para transportarlos.

Estas tuberías pueden estar hechas de acero o de otros materiales, dependiendo de los sedimentos que transportarán, ya que esto afectará el desgaste por abrasión que puede sufrir la tubería. Cuando predomina el transporte de sedimentos con gravas y arenas gruesas se deben utilizar en las tuberías materiales con altas resistencias, a manera de evitar que la abrasión perjudique de forma definitiva las tuberías.

También se debe tomar en cuenta para el sistema de las tuberías, la localización de la ruta, ya que es mucho más complicado cuando se trata de zonas urbanas, debido a la presencia de carreteras, ferrocarriles, etc. Así como también la necesidad de bombas, debido a la existencia de desniveles para el transporte de los sedimentos desde el punto de dragado hasta el de descarga.

### 3.2.3.3 Ventajas

Los beneficios de este método utilizado para el manejo de los sedimentos, constituye el aumento del volumen del embalse y la prolongación de su vida útil, ya que permite la extracción de los sedimentos de manera casi total y sin uso de innumerables equipos. No se generan pérdidas notables de agua, ya que no es necesario el vaciado del embalse, ni la suspensión de sus servicios de abastecimiento o energía para la remoción de los sedimentos, lo cual constituye una gran ventaja en comparación a los demás métodos mencionados, que por lo general requieren de la ocurrencia de crecidas para poder funcionar o de la disposición de descargas de fondo para su vaciado.

Como permite la extracción total de los sedimentos, este proceso mejora la operación de las compuertas de fondo que pudieron estar fuera de servicio por la deposición de los sedimentos. Así como también provee el suministro de agua de mejor calidad para el riego y no requiere de grandes procedimientos para su potabilización si se utiliza para el abastecimiento.

### 3.2.3.4 Limitaciones

Como todos los procesos, el dragado también presenta algunas limitaciones:

- Requiere de grandes inversiones de dinero, debido al alto costo del dragado por el movimiento y transporte de los sedimentos, así como el uso de maquinaria de elevado costo.
- Necesita de áreas grandes para la colocación de los equipos en el sitio de dragado.
- La descarga de los sedimentos dragados pueden superar las concentraciones permisibles por el cauce del río, lo que genera problemas ambientales.
- Requiere del manejo del nivel del embalse dependiendo del tipo de dragado a utilizar.



**Fig. 3.15** “Embalse Rungue, ubicado en Chile. Se puede observar que los sedimentos han ocupado gran parte del volumen del embalse dejando solo una pequeña lámina de agua disponible. Fue un embalse construido en 1960 para riego”.

Foto cortesía “Combate a la Colmatación en Embalses y Represas” de Dragatec.



**Fig. 3.16** “Embalse Rungue luego de ser dragado. Como se puede observar los sedimentos fueron extraídos de manera total, recuperando el embalse su capacidad original”.

Foto cortesía “Combate a la Colmatación en Embalses y Represas” de Dragatec.

### **3.2.4. EXCAVACIÓN DE LOS SEDIMENTOS**

La excavación constituye un método, que al igual que el dragado, permite la extracción mecánica de los sedimentos que se encuentran acumulados en los embalses, mediante el uso de maquinaria especializada para la extracción de los sedimentos y su posterior transporte a una zona de descarga (Ver Fig 3.17). La selección de este criterio

*Crterios para el manejo de embalses colmatados*

dependerá de los volúmenes de sedimentos que se requieren extraer, los niveles de agua en el embalse, su geometría, su necesidad de la recuperación y por supuesto, si es viable económicamente.



**Fig. 3.17** Excavación de Sedimentos en un embalse, mediante el uso de maquinaria especializada.

**Fuente:** Envirocon C.A

El proceso de excavación resulta uno de los métodos más costosos entre todos los disponibles junto con el dragado, debido a que involucra el movimiento de grandes volúmenes de sedimentos, por lo que muchas veces su viabilidad se ve afectada por los altos costos, además de la necesidad de maquinaria adecuada para la excavación y transporte de estos sedimentos, lo que también puede elevar los costos. Sin embargo, es una de las opciones más viables y usadas para la gestión de los sedimentos cuando el espacio del embalse es suficiente y cuando las demás opciones resultan difíciles de aplicar.

Como se mencionó anteriormente, este proceso se realiza mediante el uso de equipos especializados para la excavación y permite la limpieza de los sedimentos del embalse. Se utiliza para la extracción de sedimentos gruesos que son fáciles de secar. Para la aplicación de este criterio es necesario que el embalse se encuentre vacío, con el fin de que la maquinaria pueda operar de manera cómoda y rápida en el sitio, ya que usualmente

los equipos utilizados suelen ser los mismos empleados en los movimientos de tierra para la ejecución de cualquiera obra de ingeniería.

#### **3.2.4.1 Ventajas**

- Permite el manejo de grandes volúmenes de sedimentos.
- Retira los sedimentos de manera eficiente, ya que permite la limpieza total del embalse.
- Las condiciones del fondo del embalse y el tipo de sedimentos no son determinantes en el uso del método, ya que como se utiliza maquinarias de gran tamaño puede excavar cualquier tipo de sedimentos.

#### **3.2.4.2 Limitantes**

- Altos costos asociados.
- Requiere que el embalse se encuentre vacío.
- Necesita de equipos para el transporte y de la disposición de un sitio de descarga y almacenamiento de los sedimentos luego de su excavación.
- No puede ser usado en embalses pequeños o que tienen espacios limitados, ya que el área debe ser amplia para la correcta operación de los equipos.

#### **3.2.5. Tránsito de Sedimentos**

Esta técnica abarca cualquier método utilizado para manipular la hidráulica y/o geometría de los embalses, con el fin de pasar los sedimentos a través, alrededor del mismo, o depositarlos en áreas previamente determinadas con el fin de minimizar la deposición no controlada de los sedimentos.

La carga de sedimentos en un cuerpo de agua es muy variable tanto a través del tiempo como a través de las distintas secciones que conforman un río. Las técnicas de ruteo

de sedimentos buscan identificar la porción de flujo de sedimentos que acarrea un cuerpo de agua, y manipularlo de tal manera que se logre prevenir, minimizar o concentrar la deposición de sedimentos en zonas deseadas.

Dentro de las técnicas que se utilizan para el tránsito de sedimentos, algunas involucran el vaciado del embalse, sin embargo no se debe confundir con el Método Español o Flushing, ya que se basan en premisas diferentes. El tránsito de sedimentos se concentra específicamente en minimizar o balancear el depósito y la erosión durante los períodos de crecidas, mientras que el método español se enfoca en remover los sedimentos que se han depositados en períodos previos, sin embargo, como se verá en el capítulo respectivo a esta técnica, al aplicar el Flushing también se arrastran los sedimentos que acarrea el flujo durante la crecida que se utiliza para vaciar.

Se puede decir entonces que el ruteo de sedimentos se realiza con la finalidad de preservar el patrón de transporte de sedimentos a lo largo del tiempo, mientras que el fin del método español es modificar este patrón; por lo tanto no se han de confundir estas estrategias, como se demostró, ambas poseen modos operacionales y consecuencias totalmente opuestos.

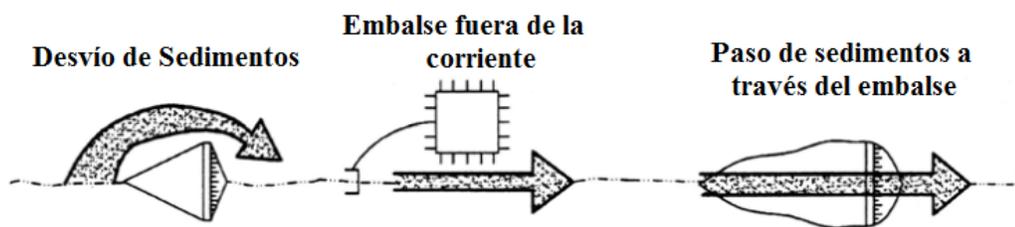
#### **3.2.5.1 Clasificación de Técnicas**

Dependiendo de la condición que posea cada embalse en particular, existirá un área determinada del vaso de almacenamiento que se deseará proteger de la deposición de sedimentos, esta área puede estar ubicada tanto en el canal del afluente principal como fuera de él (Ver Fig. 3.18). Es por ello que resulta necesario clasificar las técnicas de ruta de sedimentos según los siguientes casos:

- Paso de los Sedimentos a través del embalse:
- Vaciado estacional.
- Vaciado parcial.

- Vaciado del embalse mediante crecidas, haciendo uso de predicciones hidrográficas.
- Vaciado del embalse mediante crecidas, haciendo uso de la Curva Gestión.
- Ventilación de corrientes de densidad.
- Paso de los Sedimentos mediante Bypass.
- A través del vaso de almacenamiento.
- Embalse fuera del cauce.
- A través de la subsuperficie del Embalse.

Las técnicas antes mencionadas se explicarán de forma detallada más adelante.



**Fig. 3.18 Representación esquemática de proceso de tránsito de sedimentos**

**Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)**

Este método también puede tener como objetivo la deposición de los sedimentos en áreas previamente seleccionadas del embalse, y de esta manera, minimizar los impactos que significa la presencia no controlada en áreas del embalse donde el manejo de los sedimentos implica una mayor problemática.

Dentro de las cuatro técnicas clasificadas como *Paso de Sedimentos a través del Embalse*, tres de ellas involucran el descenso del nivel de agua en el embalse, para que de esta manera se logre alcanzar una mayor velocidad en el flujo que atraviesa el mismo, y así garantizar la existencia de mayor energía de arrastre, lo cual a su vez asegura que no se

depositarán nuevos sedimentos durante la ejecución del proceso. La característica principal que marca la distinción entre las técnicas antes mencionadas, es el método utilizado como control hidráulico.

La Disminución periódica del nivel de agua del embalse implica disminuciones del nivel de aguas en tiempos prolongados, en algunos casos requiriendo vaciar completamente el embalse por semanas o hasta meses. Por otra parte, las técnicas que hacen uso de las crecidas que ocurren en la época de invierno, solo disminuyen el nivel de aguas del embalse durante los períodos en que ocurren estos eventos, por lo tanto no implica la suspensión del sistema en las épocas en que la demanda realmente lo requiere. (Morris & Fan, 1998)

#### **3.2.5.1.1 Paso de los Sedimentos a través del embalse**

##### **a. Vaciado estacional**

Un embalse operado de manera estacional, implica que el nivel de agua embalsada ha de disminuirse completa o parcialmente durante la temporada de ocurrencia de crecidas. Para la implementación de esta técnica resulta necesario el seguimiento un plan maestro que determine los períodos en que ha de realizarse el vaciado parcial o completo cada año.

Cuando un embalse es vaciado estacionalmente para lograr el tránsito de sedimentos, el efecto que se obtiene es muy similar al método español, ya que el vaciado del embalse ocasiona la erosión del canal del cauce principal. Lo que califica al método de la ruta de sedimentos como tal, es que en esta operación las compuertas de fondo de la presa han de permanecer abiertas durante toda la época de lluvias (crecidas), de esta forma, el método se concentra en conducir los sedimentos del embalse y no en erosionar los sedimentos depositados en épocas anteriores.

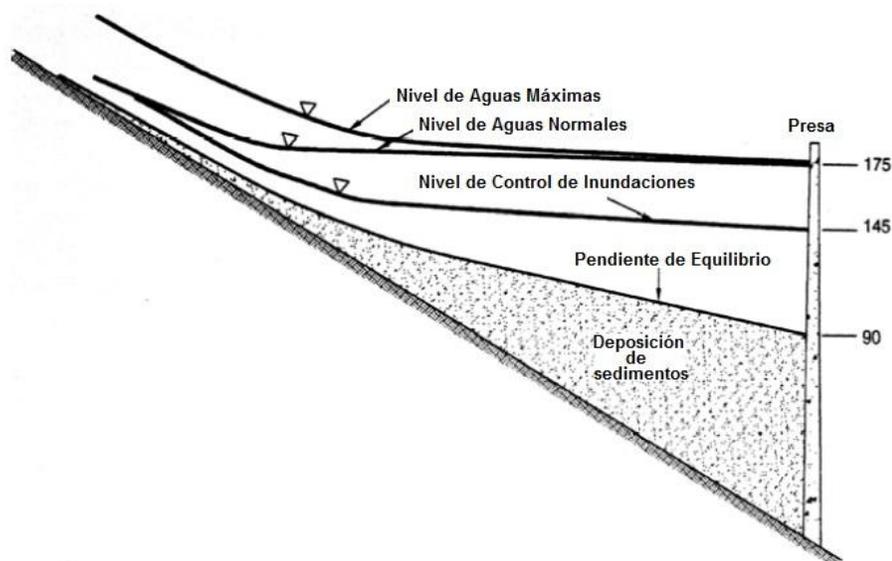
##### **b. Vaciado Parcial**

El embalse se mantiene a un nivel de agua bajo durante los períodos de lluvias, para de este manera incrementar la velocidad del flujo, disminuir el tiempo de concentración y la

retención de sedimentos. Puede resultar necesario un descenso aún mayor del nivel de agua para conducir eventos específicos fuera del embalse, es por ello que se precisa tener al alcance equipos que ayuden a predecir la capacidad de respuesta que ha de tener la cuenca ante ciertos eventos en tiempo real.

La eficiencia de la evacuación de sedimentos se encontrará determinada por la capacidad de arrastre que posea el sistema a lo largo de toda la sección del embalse, incluyendo el área que se localiza en las proximidades del cuerpo de la presa, donde se acumularán los sedimentos hasta que se alcance un perfil de equilibrio. Bajo condiciones apropiadas, este equilibrio se ha de alcanzar mediante la implementación anual ininterrumpida del vaciado parcial del embalse.

El embalse de las Tres Gargantas en China, fue diseñado mediante la premisa que se iba a implementar este método para lograr la sustentabilidad en el sistema. Para ello se han realizado consideraciones adicionales, tales como: La importancia que tiene modificar en la menor forma posible el hidrograma original de la cuenca, de esta forma se puede garantizar que el método se lleve a cabo de manera satisfactoria. Después de un período de tiempo de aproximadamente 100 años, se espera que la carga de sedimentos que ingresa y la que sale del embalse alcancen un equilibrio, al punto que no sólo sea la cantidad de sedimentos la que esté equilibrada, sino también la distribución de los tamaños de ellos. Sin embargo, es evidente que existirá variación anual en los patrones de sedimentación y erosión del sistema. Según simulaciones realizadas por programas de computación, se ha demostrado que las crecidas pueden llegar a depositar sedimentos en las zonas cercanas a la cola del embalse, sin embargo, en los años siguientes estos depósitos serán erosionados y arrastrados hacia zonas cercanas del cuerpo de la presa, hasta que en algún momento descarguen por las compuertas de fondo. (Ver Fig 3.19)



**Fig. 3.19 : Perfil de la ruta de sedimentos del Proyecto del Embalse de las Tres Gargantas en China.**

**Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)**

### **c. Vaciado durante crecidas**

La mayoría de los sedimentos ingresan a los embalses durante las ocurrencias de crecidas. El vaciado durante estos eventos tiene el objetivo de descargar la mayor cantidad posible de sedimentos del embalse, mediante la disminución del nivel de agua y de esta manera aumentar la velocidad del flujo durante cada crecida. Existen dos técnicas de control hidráulico que dictan como ha de ser la operación de las compuertas en este proceso, las cuales son:

#### *c.1 Predicciones hidrográficas*

En embalses que poseen gran capacidad de almacenamiento o una capacidad de descarga limitada, el nivel de agua se puede disminuir o vaciar completamente en anticipación a la llegada de crecidas en los períodos de lluvias, de esta manera se descarga la parte correspondiente al limbo ascendente del hidrograma y luego se vuelve a llenar el

estanque con el limbo descendente del mismo, es decir, se operan las compuertas de tal manera que se evacúe totalmente la crecida. Para que este método se lleve a cabo de manera eficiente, se requieren de instrumentos que permitan la predicción hidrográfica en tiempo real de los eventos hidrológicos que ocurren en la cuenca.

Los sedimentos pueden ser dirigidos a través del embalse mediante la disminución del nivel de agua del mismo antes de la ocurrencia de una crecida, de esta manera, se abren las compuertas previo a la llegada del limbo ascendente del hidrograma de crecida, y una vez que pasa el pico e inicia el limbo descendente del hidrograma, se procede a cerrar las compuertas y de esta manera volver a la modalidad de almacenamiento. Es importante tener en cuenta que durante la recesión del hidrograma existe menor presencia de sedimentos suspendidos y de concentración de sedimentos que durante el limbo ascendente del mismo.

En los períodos intermedios entre eventos de crecidas, la operación del embalse ha de ser de modo convencional. Cuando el nivel de aguas del embalse se encuentra cercano al mínimo de operación, el caudal de descarga por las compuertas de fondo necesita exceder el caudal que ingresa al reservorio. Es por ello que resulta necesaria la disminución temprana del nivel de aguas en embalses donde el nivel no puede ser disminuido durante la época de crecidas, ya sea porque las descargas de fondo no tienen capacidad suficiente o porque se generarían repercusiones intolerables aguas abajo.

Para lograr una mayor eficiencia en el método, resulta necesario llevar el nivel de aguas en el embalse al mínimo antes de la llegada del evento de crecida, a su vez manteniendo todas las compuertas de fondo totalmente abiertas, y en el momento que ocurra el punto de inflexión del hidrograma proceder a cerrar las compuertas y así volver a llenar el embalse. Como es de imaginarse, para poder lograr esta operación de forma sincronizada, se requiere conocer la cantidad de agua que posee el embalse en un momento determinado, así como la cantidad de agua que ha de llegar en el momento en que la crecida haga su tránsito a través del embalse.

El volumen de agua embalsado suele encontrarse monitoreado mediante indicadores de nivel, ubicados en diferentes puntos del embalse, mientras que la cantidad de agua que ha de ingresar durante la recesión del hidrograma puede ser determinada mediante continuas predicciones en tiempo real a partir de los valores obtenidos de los pluviómetros y modelos hidrológicos.

El método de tránsito de sedimentos, mediante el vaciado del embalse haciendo uso de crecidas, se puede dividir en cuatro (4) etapas, las cuales son:

- *Almacenamiento*: En períodos intermedios entre eventos de crecida, el embalse ha de almacenar agua de manera normal. Resulta necesario mantener un monitoreo constante del clima, para así poder anticipar cualquier condición meteorológica que pueda llevar al segundo paso. (Ver Fig. 3.20)
- *Disminución*: Durante la ocurrencia de lluvias potencialmente significativas, se inicia el abrimiento de las compuertas de fondo, llevando el nivel de agua tan bajo como sea posible, sin llegar a permitir que el volumen total de agua almacenado sea menor que el nivel mínimo de operación. Este paso se ejecuta durante el tiempo que dure la tormenta, si ésta cesa durante el proceso de vaciado, las compuertas han de cerrarse y de esta manera se llenará nuevamente el embalse. (Ver Fig.3.21)
- *Vaciado completo*: Tiene lugar cuando se abren completamente todas las compuertas existentes, obteniendo así la disminución completa del nivel de agua, lo que produce la mayor velocidad posible en la descarga. (Ver Fig.3.22)
- *Recarga*: Una vez que la tormenta cesa, y la cantidad de agua tributaria (capacidad del embalse + cantidad que ingresará en el limbo descendente del hidrograma) es menor que la capacidad total del embalse, se procede al cerrado de las compuertas y se llena nuevamente el reservorio.(Ver Fig. 3.23)

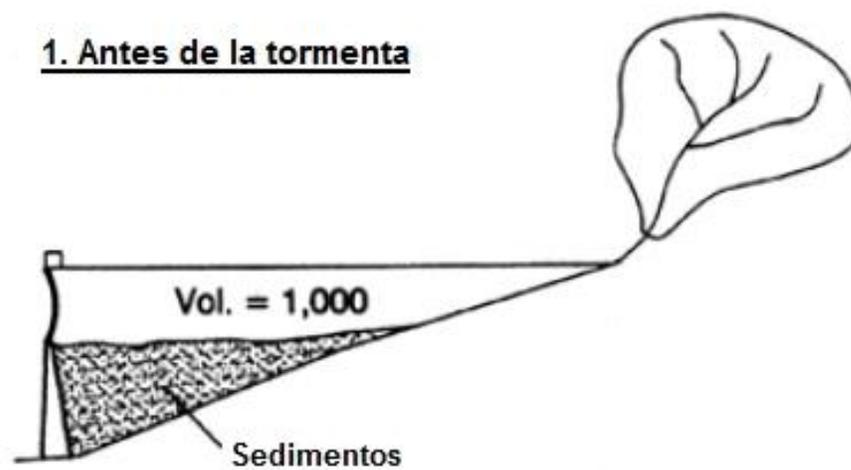


Fig. 3.20. Etapa de almacenamiento

. Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)

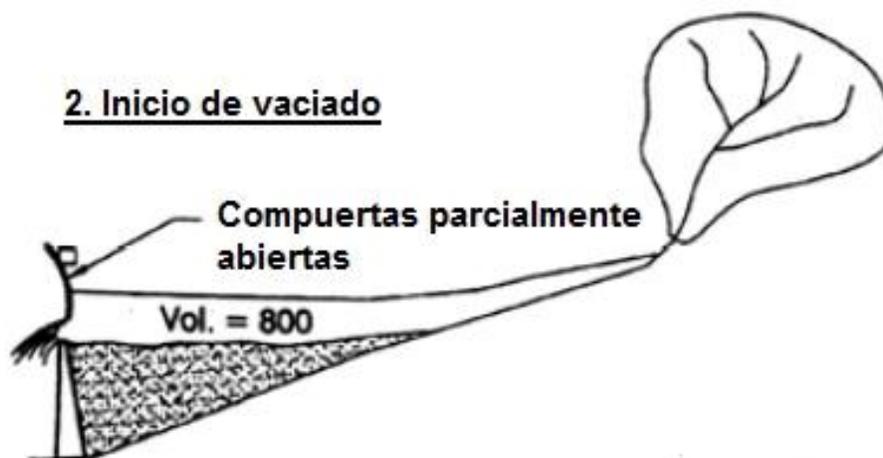


Fig. 3.21 : Etapa de disminución

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)

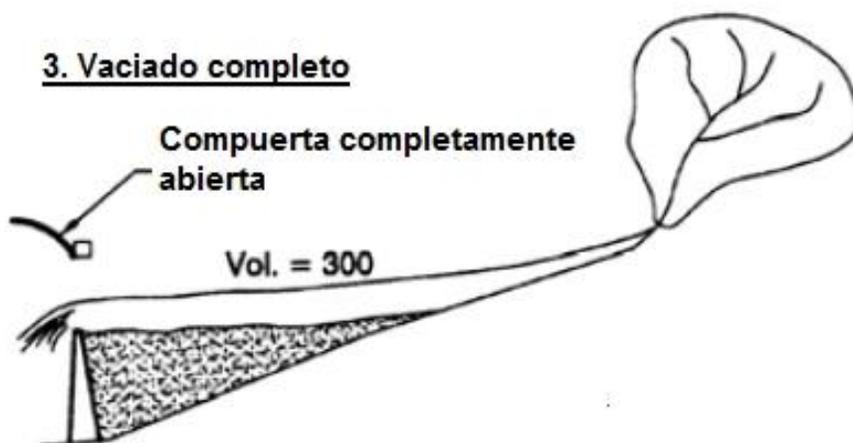


Fig. 3.22 Etapa de vaciado completo

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)

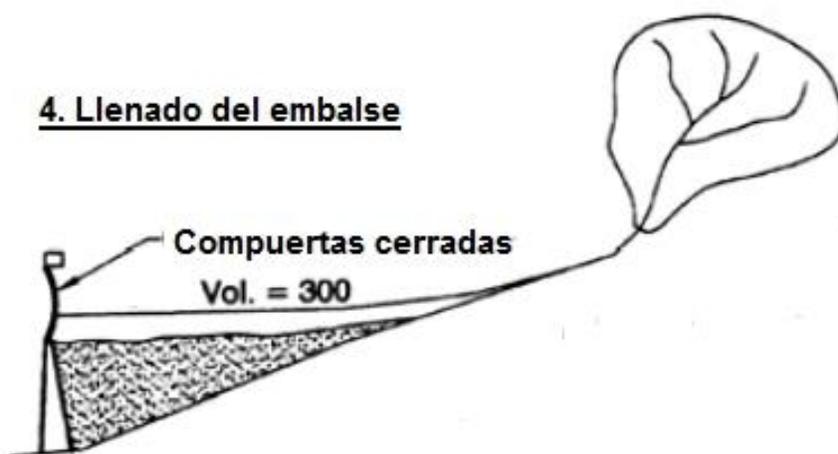


Fig. 3.23 Etapa de recarga

Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)

### *c.2 Curva de Gestión o “Rule Curve”*

La Curva de Gestión de un embalse, es el término que se le adjunta a el programa de operación y regulación sistemático que se concibe con el fin de alcanzar el objetivo que tiene la obra hidráulica, como lo es la construcción de un embalse, a partir de los fines que esta tenga (hidroelectricidad, suministro humano, riego, entre otros). En este caso particular, se implementa la Curva de Gestión de Sedimentos la cual se refiere al desarrollo de un protocolo de actuación de cómo deben ser manejados los sedimentos dependiendo de las condiciones del embalse, el o los ríos que a él tributan y el nivel o volumen de sedimentos que existan en el embalse en determinado momento.

Estas Curvas son desarrolladas para alcanzar fines a largo plazo, por ello es necesario el seguimiento sistemático de ellas. Sin embargo, pueden ser modificadas dependiendo de las características y condiciones que experimente cada sistema en particular, producto de la operación y gestión del mismo.

En embalses que poseen dimensiones hidrológicas pequeñas, la operación de las compuertas es controlada mediante el uso de las Curvas de Gestión y de puntos de aforo ubicados principalmente en el cuerpo de la presa o en algunos casos en estaciones de control ubicados aguas arriba.

A largo plazo se puede lograr alcanzar equilibrio de los sedimentos, esto se consigue cuando se logra balancear la cantidad de sedimentos que ingresan al embalse con los que salen de éste, así como también una distribución uniforme de los tamaños de partículas ingresados y evacuados. Esta segunda parte es lo más difícil de lograr, ya que la porción gruesa de los sedimentos (gravas, peñones) suele ser muy difícil de arrastrar fuera del embalse debido a la necesidad de gran cantidad de energía por parte del flujo para lograr su movimiento. Durante este proceso siguen ingresando al vaso de almacenamiento mayor cantidad de sedimentos, los cuales se acumulan considerablemente. Principalmente la porción gruesa se localiza en la cola del embalse, ya que es en este punto donde suele encontrarse la disminución de la pendiente del cauce, lo que da origen a un delta luego de

acumular cantidades considerables, estos sedimentos suelen moverse cuando su pendiente supera el ángulo de fricción característico del material, ocurriendo así un deslizamiento típico que con ayuda del flujo, promueve la erosión y el posterior arrastre de estas partículas.

Es necesario tener en cuenta, que al momento de implementar cualquier método de manejo de sedimentos, esta operación ha de modificar el patrón de deposición natural. El perfil longitudinal de sedimentación puede cambiar tanto geoméricamente, como en los tamaños de partículas que lo conforman en cada sección. Como se mencionó anteriormente, ante la existencia de depósitos ubicados en la cola del embalse (delta), estos serán arrastrados hacia el cuerpo de la presa, y depositados progresivamente según su tamaño de partícula. Dependiendo de la distribución del tamaño de partículas y de otros factores, la erosión de los depósitos en el delta estará limitada a materiales finos, mientras que la porción de partículas gruesas se quedarán retenidas.

En embalses de pequeña capacidad o presas con descargas de gran capacidad, el nivel de agua puede ser disminuido durante la ocurrencia de crecidas para así pasar los sedimentos. La operación de las compuertas vendrá dada por la Curva de Gestión correspondiente y aforos de descarga en la presa. Al operar las compuertas de tal forma que se consigan niveles mínimos de agua en el embalse, y éstas se dejen abiertas por períodos de tiempos largos, se aumenta la erosión y la capacidad de arrastre de sedimentos del flujo, llegando a incrementar los tamaños de partículas capaces de ser transportados por el mismo. La cantidad y el tamaño de partículas capaz de ser movilizado por el cauce pueden ser controlados mediante este método.

### 3.2.5.1.2 Desvío de Sedimentos

#### *a. A través del Vaso de almacenamiento*

Cuando las condiciones topográficas son favorables, un canal de grandes dimensiones o un túnel pueden ser construidos con la finalidad de hacer un desvío de flujo de sedimentos a través de un cauce interno del embalse.

En algunos casos, el principal objetivo a obtener mediante este método es promover el depósito de sedimentos en ciertas zonas donde la remoción de los mismos se puede realizar de manera sencilla mediante maquinaria.

#### *b. Embalse fuera del cauce principal*

Consiste en la construcción de un embalse ubicado fuera del cauce principal. Su llenado se efectúa mediante la desviación del cauce con poca concentración de sedimentos. Existe una gran cantidad de métodos utilizados para reducir la carga de sedimentos en el flujo, entre ellos se tienen:

- 1) Descarga de flujo de sedimentos mediante crecidas, que pueden ser parcial o completamente excluidas del embalse mediante controles hidráulicos en las obras de toma u operaciones selectivas en las entradas de las obras.
- 2) Las obras de toma se pueden diseñar para que no permitan el paso de material granular.
- 3) La obra de desvío puede ser operada como una obra de retención de sedimentos mientras realiza su función de desviar el flujo líquido de agua. El material retenido en la presa de desvío puede ser evacuado haciendo uso de cualquier método de remoción de sedimentos según sea el caso. (Flushing, Excavación, Dragado, etc.)

Una obra de este tipo, puede estar compuesta de un dique de desvío que conduce las aguas hacia el lugar de presa, la cual se encuentra ubicada en una cuenca de poca área tributaria y con poca producción de sedimentos.

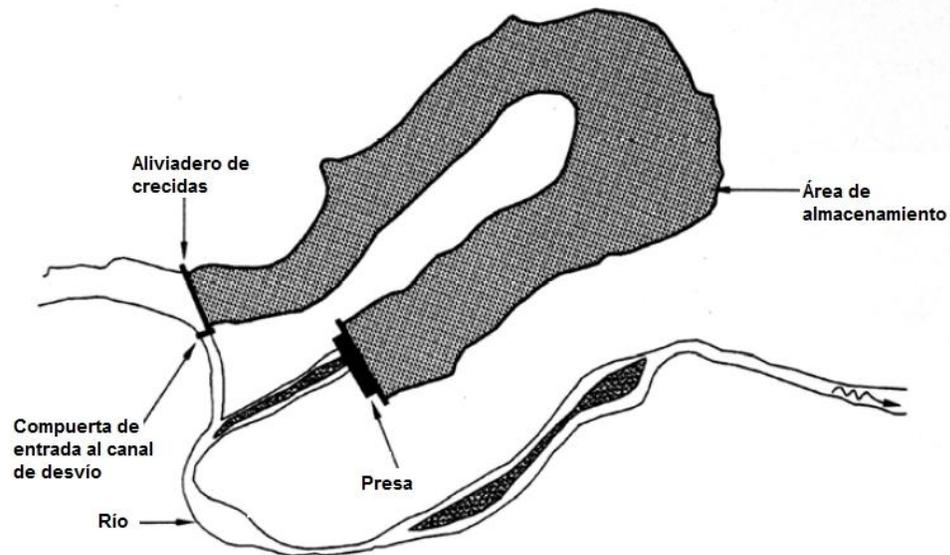


Fig. 3.24 Representación del proceso de desvío de sedimento

. Fuente: Manual de Sedimentación de Embalses, por Morris y Fan.(1998)

La gran ventaja que posee este método es que en la obra de desvío el volumen que ingresa al embalse es controlado, por ende, la obra de alivio de la presa principal no resulta muy costosa. Adicionalmente, la reducción en la carga de sedimentos elimina la necesidad de destinar una cantidad grande al volumen muerto, aumentando la capacidad de almacenamiento útil y lo que a su vez se traduce en reducción de costos de mantenimiento a futuro.

Como el embalse recibe poca cantidad de sedimentos, el agua que se ha de suministrar a los usuarios del sistema es de buena calidad, lo que reduce los costos en tratamientos de potabilización; por otra parte si el agua posee fines de generación hidroeléctrica, se elimina la necesidad de implementar grandes obras para la retención de sedimentos previo al turbinaje.

### **3.2.5.2 Ventajas**

- La ruta de sedimentos se caracteriza por ser el método de manejo de sedimentos más amigable con el ambiente, esto se debe a que preserva parcialmente la forma natural con la que los ríos acarrearán los sedimentos.
- Este método tiene la capacidad de transportar tanto materiales granulares como sedimentos finos, fuera del cuerpo de la presa a través de descargas de fondo.
- Prolonga la vida útil del sistema considerablemente.

### **3.2.5.3 Limitantes**

- La mayor desventaja que posee este método, es que requiere de grandes cantidades de agua para poder garantizar el arrastre de los sedimentos, agua que no se ha de poder almacenar para después ser utilizada por los usuarios. Sin embargo, se puede considerar que estas grandes cantidades de agua “desperdiciadas” son realmente una inversión para el sistema, ya que a pesar de que no van a poder ser aprovechadas por la demanda, van a tener como resultado que la vida útil del embalse se alargue por varios años.
- Requiere de presencia de descargas de fondo en la presa. De no existir éstas, y de ser estructuralmente posible, será necesario realizar una gran inversión por parte del organismo encargado del sistema, para ejecutar modificaciones al cuerpo de la presa e incluir compuertas de fondo.
- Algunas técnicas requieren de tecnología avanzada para poder poseer información hidrológica de la cuenca en tiempo real.
- En algunos casos no se garantiza la remoción de sedimentos previamente depositados en el embalse, o el arrastre de la porción de partículas gruesas fuera del cuerpo de la presa.

- Para lograr que sea eficiente la preservación de la capacidad de almacenamiento del embalse, se debe implementar este método desde el momento en que se termina la construcción de la presa.
- Puede requerir medidas complementarias, por ejemplo: dragados, flushing, implementación de maquinaria pesada, entre otros.

### 3.2.6. Presas de Retención de Sedimentos

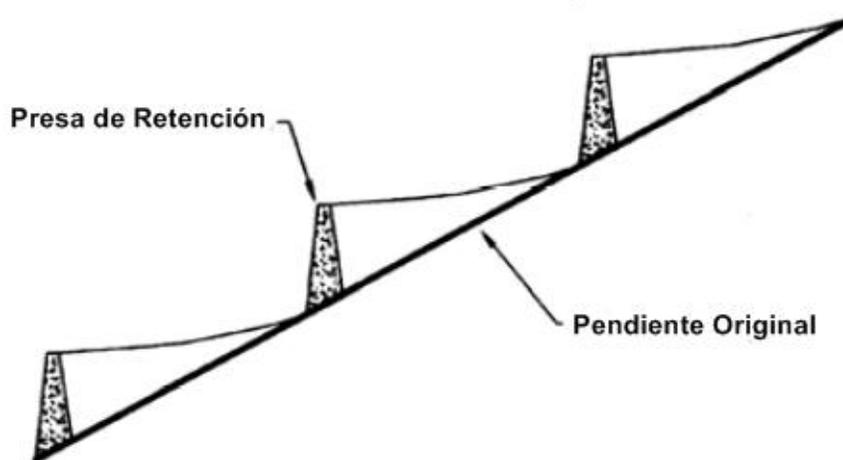
Las presas de retención de sedimentos son estructuras que como su nombre lo indica, son concebidas con la función de retener sedimentos. Sin embargo, su funcionamiento y repercusiones son muy variables y complejos, es por ello que otro nombre común que se les atribuye es la de “Presas de corrección de torrentes”, debido a que otra de sus funciones principales es la reducción de la pendiente de fondo del cauce (gradiente). No obstante, estas dos funciones no se encuentran aisladas, de hecho, se encuentran muy relacionadas y forman parte del mismo objetivo cuando se conciben proyectos de manera correcta.

Al colocar presas de retención en secuencia, como las estructuras significan una interferencia en el cuerpo de agua, la velocidad del flujo disminuye, originando la deposición de las partículas. Una vez que los sedimentos comienzan a depositarse, la pendiente del fondo disminuye (Suárez, 1993). A su vez la deposición de los sedimentos incrementa el ancho del cauce y promueve el crecimiento de vegetación en el mismo, lo que ayuda a estabilizar el fondo del canal, ya que la cobertura vegetal contribuye al control de la erosión, y de igual forma como la pendiente y la velocidad del flujo han disminuido, la corriente posee menor energía para arrastrar sedimentos.

Según Morris y Fan (1998), existen dos grandes desventajas con la implementación de este tipo de obras, la primera es que son muy costosas de construir y la segunda es que de no realizarle el mantenimiento adecuado, eventualmente fallarán.

Otro uso que presenta este tipo de estructuras, es para estimar la producción de sedimentos que posee el cauce tributario de una cuenca, así una vez colmatados, se tiene la información de la cantidad y tipo de sedimentos que fueron producidos por la cuenca en un tiempo determinado

En su uso convencional de modificación de torrentes, Heede (1976) recomienda la implementación de numerosas presas de retención de pequeña altura (menores a medio metro), y que se encuentren espaciadas de tal forma que el pie de una presa coincida con la cabeza de deposición de sedimentos de la siguiente presa aguas abajo (Fig. 3.25). De esta forma, la distancia entre presas viene dada en función de la altura y del gradiente modificado que se quiere obtener, este segundo aspecto vendrá en función de la cantidad y tipo de sedimentos que produce la cuenca.



**Fig. 3.25 Representación de una presa de retención**

. Fuente: propia.

Cuando se colocan presas de retención con distanciamiento entre ellas considerable, la capacidad de retención que tendrá cada una será superior al caso anterior, debido a que existirá mayor altura y por ende mayor volumen de almacenamiento, pero

según las experiencias de campo, suelen producirse marcadas erosiones del lecho y márgenes, producto de la gran distancia existente entre las presas. Este fenómeno tiene su explicación en la relación de Lane, la cual explica que existe una relación directamente proporcional entre la descarga sólida y líquida que ha de poseer un cuerpo de agua.

$$Q_{sd} \propto Q_w S \quad (9)$$

Donde:

- $Q_s$ : Caudal Sólido.
- $S$ : Pendiente de fondo del cauce.
- $d$ : Diámetro de partícula.
- $Q_w$ : Caudal Líquido.

Esta ecuación es la base de la hidráulica fluvial, y se basa en que la función fundamental que poseen los ríos es transportar los sedimentos y sólidos disueltos hacia el océano. Por ello, al hombre interferir de cualquier forma en esta función natural, en su afán de aprovechar los recursos hídricos, los cuerpos de agua van a buscar conservar su equilibrio de cualquier manera. Por ejemplo, al disminuir la pendiente de un cauce natural, el flujo va a depositar las partículas gruesas y ha de seguir con las partículas de menor tamaño, las cuales lograrán el equilibrio de la ecuación de Lane. De igual forma, al colocar una presa de retención de sedimentos y quitar la mayoría de las partículas sólidas presentes en el cuerpo de agua, el agua “hambrienta” que discurre aguas abajo de la estructura va a buscar un nuevo equilibrio causando degradación y erosión de los lechos.

Es por ello que resulta de gran importancia comprender este principio de la hidráulica fluvial, para así poder prevenir las repercusiones que se han de producir al implementar este tipo de estructuras, las cuales modifican los sistemas hidráulicos naturales, de forma que se puedan proyectar medidas preventivas y correctivas a tiempo.

Cuando se implementan presas de pequeña altura dispuestas a distancias más cortas, como lo recomienda Heede, el sistema resulta más eficiente en cuanto a la modificación de la pendiente de fondo del cauce.

Así pues, dependiendo de las características de la cuenca y del tipo de sedimentos, como también del resultado que se quiera obtener, se tienen las dos variantes de implementación del método antes mencionadas.

Por otra parte, el material a utilizar en estas estructuras variará dependiendo de los materiales disponibles en la zona, así como también de los resultados a obtener y los costos involucrados. Se han realizado de manera satisfactoria infinidad de presas de retención de sedimentos con distintos materiales, entre ellos los más comunes son: piedra o peñones, sacos de arenas, concreto, acero, entre otros.



**Fig. 3.26 de retención de sedimentos de concreto abierta**

**Foto cortesía de Ing. Alejandro Liberatore.**



**Fig. 3.27 Presa de retención de sedimentos de concreto abierta.**

**Foto cortesía de Ing. Alejandro Liberatore.**



**Fig. 3.28 Presa de retención de sedimentos de gaviones**

**Foto cortesía de Ing. Alejandro Liberatore.**

**3.2.6.1 Ventajas**

- Son muy útiles para el control de la producción de sedimentos que posee una cuenca, evitando la deposición de los mismos en lugares no deseados. Por ejemplo, al colocar una presa de retención aguas arriba de un embalse, éste no presentará grandes problemas de sedimentación debido a que la mayoría de las partículas sólidas son retenidas en la estructura aguas arriba, y el excedente de sedimentos, que han de ser en su mayoría partículas finas, pueden ser evacuados por las descargas de fondo.
- Disminución de la pendiente de fondo del cauce, reduciendo la energía de arrastre de sedimentos que posee el flujo.
- Al ser colmatadas, los sedimentos pueden ser removidos por métodos sencillos, como por ejemplo, mediante el uso de retroexcavadoras. Todo dependerá de la función con la que se concibe la estructura de retención.
- Poseen gran utilidad para estimar la producción de sedimentos que presenta una cuenca. Tanto el tipo, la cantidad y el tiempo de producción de sedimentos.

**3.2.6.2 Limitantes**

- Poseen altos costos involucrados en su construcción.
- De ser mal diseñadas, al momento de su falla todos los sedimentos que han sido retenidos serán arrastrados aguas abajo. Por ejemplo, si se diseñó la presa con el fin de evitar el ingreso de grandes cantidades de sedimentos a un embalse, al fallar, todos estos sedimentos llegarán de forma abrupta al sistema, alcanzando niveles de concentraciones no tolerables. Por ende, las repercusiones que generarán en este caso crítico, serán peores que las que se hubieran generado si no se hubiera construido la estructura.

- Al retener grandes cantidades de sedimentos, el agua “hambrienta” buscará equilibrar su falta de caudal sólido, ocasionando grandes problemas de erosión aguas abajo de la estructura.

## **4. MANEJO DE EMBALSES COLMATADOS**

### **4.1. Generalidades**

La construcción de presas brinda numerosas ventajas a la sociedad como lo es el almacenamiento de grandes volúmenes de agua para su eventual uso futuro, mejoras en la navegación, control de inundaciones, producción de energía y diferentes usos recreacionales, pero también presenta desventajas como lo es el impacto ambiental que genera la inserción de una presa, su embalse y todas las obras conexas, que afecta el sistema natural del río y modifica un sinnúmero de variables: paso de los peces, régimen de sedimentos, régimen de crecidas, humedad, esfuerzos en los suelos, entre otros.

A lo largo de la vida útil de esta obra, la acumulación progresiva de los sedimentos supera el “Volumen Muerto” originalmente estimado, lo que implica una disminución en la capacidad útil del embalse, iniciándose entonces una merma en la eficiencia del cumplimiento de sus funciones.

La colmatación total de un embalse es principalmente generada por la combinación de una cuenca con una alta tasa de producción de sedimentos y una operación del embalse que descuida el seguimiento y monitoreo constante de esta variable que constituye el parámetro más importante en el mantenimiento del embalse como obra útil a la Comunidad donde se encuentra ubicada.

En Venezuela, la acumulación de sedimentos en los embalses es, quizás, el principal problema en los embalses del país, y difícilmente se encuentran datos de aportes de sedimentos en las cuencas reguladas y apenas se puede hablar de medidas preventivas o correctivas asociadas a este inconveniente, ya sea en la operación diaria del embalse o en la preservación de la cuenca tributaria. (Ver Fig.4.1)



**Fig. 4.1 Vista de la cola del embalse, entrada del río Aracay. Los sedimentos son arenas y gravas limpias formando un delta bastante extenso**

**Foto Cortesía del Ing. José De Jesús Gaspar.**

Vale la pena recalcar que, una vez que el volumen útil del embalse está ocupado por sedimento, las opciones a tomar en cuenta para el manejo o extracción de los mismos son escasas y económicamente poco atractivas, ya que se trata de grandes volúmenes de sedimentos que resultan difíciles de extraer en muchos de los casos. Usualmente cuando un embalse se colmató totalmente la aplicación de ciertas medidas correctivas resultan complicadas, por lo que se decide abandonarlo sin tomar en cuenta los posibles riesgos que esto implica.

*Crterios para el manejo de embalses colmatados*

Muchos de los métodos mencionados en el Capítulo anterior son aplicables para el manejo de embalses colmatados totalmente, pero llevarlos a la práctica no siempre resulta viable debido a que sobre ellos se deben analizar numerosos factores y, por ello, la orientación en la toma de decisiones es de vital importancia cualquiera sea el nivel de los sedimentos en el embalse y, más aún, cuando éstos ya se encuentran colmatados.

Decisiones que involucren mantener o no un embalse inactivo deben estar acompañadas de un análisis de riesgo sobre ¿qué tan peligroso es dejar la presa llena de sedimentos y sin uso?; ¿qué impacto ambiental puede generar? ¿es posible suponer que el río en un vaso de almacenamiento lleno de sedimentos no afecte las estructuras de contención?, ¿cuáles son los costos asociados a cualquier opción planteada?, entre otros aspectos.

#### **4.2. Necesidad del Embalse**

El diseño y construcción de presas se realiza con el fin de regular el flujo hídrico, a manera de satisfacer las demandas de ciertas épocas del año donde el agua es escasa y almacenarlas en otras donde existe abundancia. A su vez, toda presa cumple con el objetivo de controlar crecidas y evitar la inundación de ciertas regiones y con el almacenamiento de grandes volúmenes de agua se pueden satisfacer necesidades de las comunidades para uso doméstico e industrial, de agua para riego o de agua como elemento imprescindible para la generación de energía hidroeléctrica.

Cuando se inicia el proceso de evaluación de un embalse que se encuentra afectado por los sedimentos, es necesario establecer de antemano qué tan importante es hoy esta obra para la Comunidad y su desarrollo futuro. Un embalse en proceso de colmatación ve afectadas todas las funciones por las cuales se promovió y construyó esta obra. La disminución de su volumen útil afecta la capacidad reguladora del río y establece riesgos hidrológicos de incumplimiento de sus funciones y éstas deben ser abastecidas por otra fuente o se interrumpirá parcial o totalmente esta función.

Así, una de las primeras interrogantes que surge cuando un embalse presenta un alto nivel de colmatación es la necesidad del sistema, que comprende uno de los factores más importantes al momento de tomar alguna decisión acerca del futuro de la obra hidráulica y muchas veces resulta un problema mayor, ya que las posibles decisiones a tomar en cuenta dependerán principalmente de las demandas que debe cumplir el embalse para satisfacer la necesidad de la comunidad.

De ser necesaria la obra por carencia de fuentes alternas, entonces se deben buscar opciones para la remoción de sedimentos y su manejo adecuado, con el fin de recuperar en lo posible esta obra. Análisis más precisos de las necesidades reales de la Comunidad atendida, de los volúmenes potenciales a recuperar, de los aportes del río y, en fin, de la operación ajustada de la fuente, deberán desarrollarse para alargar la vida útil del embalse mientras se buscan opciones alternas a la existente.

### **4.3. Existencia de Fuentes Alternas**

Una vez que las necesidades de una presa se ven comprometidas, ya que el embalse se colmató totalmente, se inicia la búsqueda de nuevas fuentes alternas que cubran las demandas de la comunidad que el embalse no puede garantizar a futuro. En donde se deben tomar en cuenta las características y condiciones topográficas de la cuenca alterna, si tiene capacidad suficiente para regular las aguas del embalse o si las bombas o turbinas, son capaces de producir la energía necesaria.

No es un proceso sencillo encontrar fuentes alternas que satisfagan las demandas de un embalse que ya no cumple sus funciones, es necesario que se realice una exploración de las posibles alternativas existentes, a manera de seleccionar la más viable tanto funcional como económicamente. En algunos casos es viable el uso de cuencas vecinas que, conjuntamente con aportes provenientes del trasvase de la cuenca original logre garantizar las demandas requeridas por la comunidad.

El trasvase es, a todas luces un impacto ambiental importante, debido a que consiste en la construcción de un canal de desvío que permita la conducción del agua de un río a su cuenca vecina y, con ello, favorece la migración de especies, las modificaciones del régimen hidráulico del río tanto de la cuenca “donante” como las de la cuenca receptora y el inicio de nuevos procesos de transporte de sedimentos en la búsqueda de un equilibrio dinámico de la cuenca receptora. Su uso debe estar respaldado con estudios de sus causas y consecuencias así como de los costos asociados a su implementación.

En otros casos, el proceso de trasvase resulta complicado ya sea por la necesidad de construir un canal de desvío que permita el paso del agua del río a la cuenca vecina o por razones ambientales, lo que conlleva al estudio de otras alternativas como lo es la explotación de pozos o acuíferos y manantiales.

#### **4.4. Sobre Elevación de Presas**

El tema de la sobreelevación o recrecimiento de presas ha sido discutido por los profesionales a nivel mundial en los últimos 50 años en los distintos congresos de grandes presas (ICOLD, 2010). Esto se debe a que en nuestros días, la demanda de suministro de agua potable, la producción de energía hidroeléctrica, y el requerimiento de obras de protección de crecidas se ha incrementado, originando la necesidad de construcción de nuevas presas y la búsqueda de mejoras para las presas ya existentes, siendo el recrecimiento una de las soluciones más atractivas.

El primer registro que se tiene de recrecimiento de una presa, corresponde a la presa de Almansa en España. La cual fue construida en 1384 con una altura de 14 m, y se recreció 7 m en 1586. Esta presa es de tipo bóveda gruesa y todavía se encuentra en servicio. Además de ésta, es importante mencionar la presa de Pontalto en Italia, la cual fue construida en 1662 con una altura inicial de 5 m, y en el año 1752 se le agregan 13 m, siendo lo más importante de este proyecto la proporción de su recrecimiento (250% ó 2,5H), debido al reto estructural que implica tal hazaña. Posteriormente se reiteró su

recrecimiento, siempre conservando su primitivo tipo estructural de anillo grueso, alcanzando una altura final de 38 m, que corresponde a la altura que posee en la actualidad. (Pelaez, 1958)

Quizás una de las características más atractivas que lleva el efectuar una sobreelevación de presas es que el incremento de pocos metros de altura permite alcanzar un almacenamiento suplementario muy superior si se compara con una nueva presa para la misma configuración topográfica. Vale la pena recalcar que la opción de recrecimiento de una presa es sólo viable si el vaso de almacenamiento lo permite; es decir, el vaso debe estar limitado por terrenos altos que permitan la sobre elevación de las aguas sin que exista “trasvase” del agua hacia otras cuencas. Si estas depresiones son pequeñas en altura y longitud todavía es viable la sobre elevación construyendo tapones o diques secundarios en estos sitios específicos.

Por otra parte, uno de los factores que vuelve interesante esta solución, es que el impacto ambiental generado por la sobreelevación de presas es mucho menor que el que ocasiona la construcción de una nueva presa. El recrecimiento del embalse solo inundará una nueva franja por encima del vaso existente en un medio ya afectado, mientras que la construcción de un nuevo embalse implicaría la inundación de un valle completo con todos los impactos e implicaciones que involucra.

Para lograr el alzamiento de una presa, se presentan complejos desafíos tecnológicos, muy diferentes a los involucrados con la construcción de una nueva presa; entre ellos: la adecuación de las obras de alivio, toma, vaciado rápido y el soporte estructural de la presa propiamente dicha.

Las obras de alivio y toma probablemente deberán ser emplazadas en otros espacios y su funcionamiento, debido a la nueva configuración del vaso, deberán ajustarse y las obras de disipación puede que deban ser reemplazadas por otras debido a su nueva operación.

Un ejemplo típico de la necesidad en la búsqueda de nuevos emplazamientos lo constituyen las Torre-Toma, las cuales usualmente se encuentran diseñadas tomando en consideración el nivel de aguas normales que, en un embalse sujeto a sobre elevación, pudiera modificarse hasta ser el nuevo Nivel de Aguas Muertas y, por ello transformarse en las obras de captación y descarga de fondo teniendo la necesidad de construir nuevas obras de toma.

Dentro de los retos estructurales que se presentan con esta solución, se tiene que el material de fundación, usualmente roca madre, debe poseer capacidad suficiente para soportar la sobrecarga y esfuerzos adicionales a los cuales se va a ver sometida, producto del nuevo cuerpo de la presa con todos sus componentes, así como también de los esfuerzos hidrodinámicos que se van a generar por el agua almacenada. Sin embargo, gracias a las técnicas modernas que se poseen, como inyecciones, mejoramientos, etc., se permiten la habilitación de los suelos y se consiguen las condiciones de fundación requeridas por la presa.

De igual forma, resulta necesario estudiar los esfuerzos de presión de poros adicionales que se generarán a todo lo largo del vaso de almacenamiento, ya que pueden no ser tolerados por el material in situ, ocasionando graves problemas de estabilidad de laderas, lo que generaría a su vez problemas de erosión y sedimentación que conllevaría a una pérdida importante de capacidad de almacenamiento en el nuevo embalse. Todas estas consideraciones requieren de un estudio muy detallado, ya que de no hacerse así, los problemas que se podrían generar, pueden ser peores que los que se presentarían de no implementar esta “solución”.

La sobre elevación de una presa suele ser factible en casi todas las presas de tierra, en cambio, en presas de arco esta solución resulta inviable debido a temas estructurales. En el caso de las presas de gravedad, el recrecimiento es realizable cuando han sido construidas previendo la sobre elevación, es decir, en proyectos que conciben la

construcción por etapas. Como ilustración a este caso, Ver Figuras 4.2, 4.3 y 4.4, correspondientes a un proyecto completado en el 2006 de la presa Shimonohara ubicada en Japón:

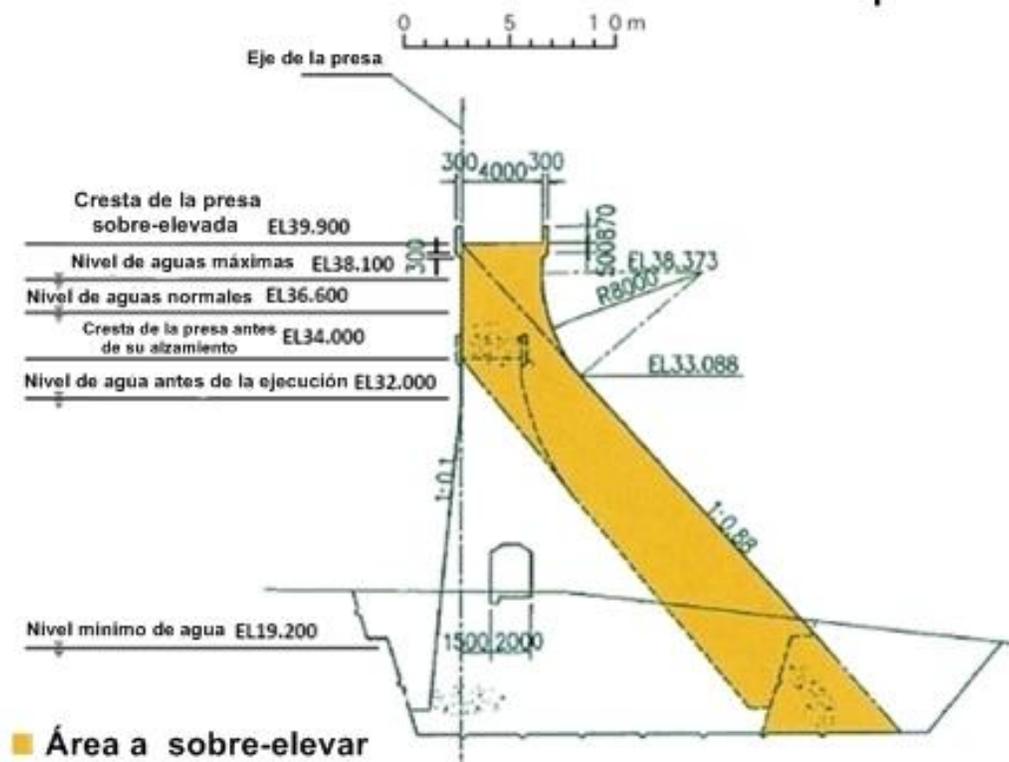


Fig. 4.2 Sección transversal de la presa Shimonohara ubicada en Japón

. Fuente: Japan Dam Engineering Center.



**Fig. 4.3 : Presa Shimonohara antes de su sobre elevación**

**.Fuente: Japan Dam Engineering Center.**



**Fig. 4.4 : Presa Shimonohara después de su sobre elevación**

**Fuente: Japan Dam Engineering Center.**

Las presas zonificadas con núcleo de arcillas, pueden ser sobre elevadas, extendiendo el núcleo central como núcleo inclinado en el caso de núcleos verticales o como una simple extensión en las presas con núcleo inclinado hacia aguas arriba.

Las presas homogéneas requerirán una extensión del drenaje del terraplén, el cual obligatoriamente se extenderá hacia aguas abajo. Pueden presentarse problemas, ya que en la sección sobre elevada se desarrollarán altos gradientes hidráulicos que deben ser cuidadosamente estudiados. (Gaspar, 2003)

#### **4.4.1. Ventajas**

- En los casos de generación hidroeléctrica, se dispone de una mayor energía potencial, la cual se traduce en una mayor capacidad de generación hidroeléctrica.
- Proporcionar mayor poder amortiguador para la ocurrencia de crecidas.
- Resulta menos costoso el recrecimiento de una presa que aplicar el método de dragado de los sedimentos depositados.
- Con sobre elevar unos pocos metros de una presa, se puede obtener una gran cantidad de volumen extra para almacenar. Esto variará según las condiciones topográficas de cada embalse.
- En embalses que no poseen descargas de fondo pero disponen de varios niveles de toma, a partir del recrecimiento, los niveles inferiores de toma pueden pasar a utilizarse como descarga de fondo, permitiendo así la aplicación de técnicas como el Flushing y las corrientes de turbiedad.
- Amigable con el medio ambiente. Los impactos ambientales involucrados con esta solución son mucho menores que los involucrados en otras soluciones.

#### **4.4.2. Limitaciones**

- En los casos en que los embalses se han visto azolvados de forma precoz, debido a la subestimación de producción de sedimentos de la cuenca, resulta necesario hacer modificaciones en la metodología adoptada en el proyecto inicial, de esta forma, se puede conocer si el volumen adicional que se dispondrá con el recrecimiento, poseerá suficiente vida útil como para que el proyecto sea atractivo.
- No es aplicable a presas de gravedad que no fueron previstas para ser construidas por etapas. Esto se debe a que puede ocasionar fallas estructurales por volcamiento o deslizamiento.
- Inviabilidad en presas de tipo arco-bóveda.
- En caso de presas de tierra, pueden existir limitantes de tipo ambiental debido a que los materiales necesarios para la construcción del terraplén tendrán que extraerse de zonas aguas abajo de la presa.
- Requerimientos de datos fiables de evaporación y precipitación de la cuenca para realizar estudios de viabilidad del proyecto. Ya que se pueden alcanzar pérdidas excesivas de aguas por evaporación debido al aumento del espejo del vaso de almacenamiento.

#### **4.5. Desmantelamiento de las Presas**

Una vez que los sedimentos superan el nivel muerto disponible para su almacenamiento, el embalse pierde su capacidad para cumplir con las funciones principales para las cuales se construyó, como lo es la regulación y almacenamiento de grandes volúmenes de agua, la producción de energía, entre otros. Muchas veces este nivel de sedimentos se va incrementando a gran velocidad hasta llegar a colmatar casi todo el volumen disponible del embalse, es para este caso donde se comienza a analizar la

posibilidad de la suspensión de las operaciones del embalse, ya que los métodos para el manejo o eliminación de los sedimentos resultan poco viables económicamente o escasos para su rehabilitación.

Actualmente, la suspensión de los embalses es un tema de poco uso a nivel mundial y sus costos e inversiones no son muy conocidos, debido a la poca información que se tiene acerca del proceso y su aplicación en embalses, especialmente en nuestro país, en donde, existen planteamientos de metodologías a aplicar para el manejo de embalses colmatados, pero nunca se realizan; es por esto que muchas de las veces el embalse se deja en desuso y no se indaga en las posibles opciones que se pueden aplicar para su rehabilitación o suspensión.

La mayor información que se posee acerca de este tema proviene de experiencias de otros países tales como España y Estados Unidos, que conocen cómo es el proceso de toma de decisiones y suspensión de presas, ya que han aplicado esta metodología en muchas de sus estructuras. Los Estados Unidos es uno de los países con mayores presas desmanteladas del mundo, en donde resalta la presa Elwha en Washington que es la presa más grande del mundo eliminada.

La toma de decisiones constituye uno de los procesos más importantes en este caso, ya que dependerá de factores ambientales, sociales y económicos que garantizarán que el desmantelamiento sea la decisión correcta, es por esto que resulta importante el análisis de estos aspectos para conocer cuál será la metodología a aplicar una vez que la decisión de suspensión del embalse ha sido tomada.

En este subcapítulo se describirá cómo es el proceso de desmantelamiento de una presa, los aspectos que se deben tomar en cuenta para su ejecución, los procedimientos utilizados para la eliminación de una presa y cómo es el manejo de los sedimentos una vez que la presa es removida de su sitio.

#### **4.5.1. Aspectos a tomar en cuenta**

##### ***a. Ambientales***

Los aspectos ambientales son quizás, los más importantes a considerar en la decisión sobre la suspensión de presa y su eliminación posterior. El efecto que la presa tiene en el régimen hidráulico del río, en el movimiento migratorio de las especies, en las características de temperatura, velocidad y volumen de sedimentos acarreados por la corriente son muy diferentes con o sin la presencia de un embalse y, por ello, al tomar la decisión de su eliminación se deben tomar en cuenta estos aspectos aún con el convencimiento que su remoción implica la restitución de las condiciones “naturales” del río previo a la construcción de la presa.

Igualmente, el mantenimiento de la presa no operativa en el río tiene su impacto ambiental y su riesgo funcional y es necesario sopesar las consecuencias futuras de ambas acciones y las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

La eliminación de una presa restaura la mayoría de las condiciones originales del río, pero implica grandes impactos ambientales durante el proceso, poniendo en peligro el ecosistema aguas abajo de la presa de manera temporal. Aunque las condiciones del río deberían ser similares a las que existían previamente, la modificación de las condiciones hidrológicas del cauce, favorece el movimiento de los sedimentos pudiendo alterar grandemente las condiciones de turbiedad de las aguas e impactar desfavorablemente el cauce. En forma similar la restitución de las crecidas nuevamente permitirá el desbordamiento periódico de las aguas y la posible afectación a construcciones, sembradíos o cualquier otro aprovechamiento que se fomentase por la certeza en la regulación de las aguas por la presencia del embalse.

Por todo lo antes mencionado, el desmantelamiento de una presa debe ser objeto de un riguroso análisis que evalúe las condiciones actuales del río aguas abajo del embalse y

alrededor de su vaso de almacenamiento y, una vez sustentados todos los argumentos, proceder en consecuencia con la acción que tenga mayores beneficios en aspectos ambientales, sociales y económicos.

***b. Necesidad de la presa***

En muchos de los casos la colmatación total del embalse evita que su funcionamiento sea el adecuado, por lo que comienza a analizarse la necesidad de esta obra hidráulica para el almacenamiento y abastecimiento de agua. Este aspecto debe tomarse en cuenta para el desmantelamiento de una presa y es de gran importancia, ya que su suspensión puede afectar el abastecimiento de las demandas establecidas; de ser necesaria la presa se da inicio a la búsqueda de fuentes alternas que puedan satisfacer las demandas, de no existir fuentes alternas se recurre al análisis de otros aspectos, en donde el manejo de los sedimentos o la construcción de nuevas fuentes constituyen el principal problema.

***c. Económicos***

Constituye un aspecto importante a ser analizado, ya que muchas veces la eliminación de la presa comprende un gasto mucho mayor a la inversión realizada para su construcción, ya que incluyen costos relacionados con la disminución de los daños ambientales, recuperación del hábitat, recuperación del cauce natural del río, entre otros. A su vez, si se decide dejar la presa en sitio sin operación alguna, deben tomarse en cuenta los costos asociados al mantenimiento y supervisión de la estructura, ya que existen casos en los que el desmantelamiento de la presa puede implicar costos inferiores que los antes mencionados a largo plazo.

***d. Seguridad***

La seguridad de la presa es un aspecto de gran relevancia al momento de la toma de decisiones para el desmantelamiento de una presa, en donde deben estudiarse diferentes

contextos que impliquen riesgo y estudiarlos: el dejar la presa colmatada o eliminarla. Para estos dos casos debe tomarse en cuenta los aspectos sociales, ya que si existen comunidades aguas abajo de la presa, puede constituir un peligro y se pueden generar ciertos daños. El escenario de dejar la presa llena de sedimentos en el sitio es muy importante, ya que se deben tomar en cuenta las condiciones estructurales en las que se encuentra la presa para evitar su posible falla, así como también la capacidad para regular crecidas, a manera de evitar posibles inundaciones aguas abajo que afecten a las comunidades.

#### **4.5.2. Opciones para Suspensión de una Presa**

Las tres (3) opciones que existen en la suspensión de una presa se refieren al grado de afectación que se tenga de la presa original, variando desde una suspensión de actividades con el mantenimiento de todas sus estructuras hasta una remoción total de la presa y sus componentes secundarios. Una breve descripción de estas opciones se presenta a continuación:

##### ***a. Suspensión de Operaciones***

Se refiere a la suspensión de las operaciones del embalse como elemento regulador de las aguas para su uso en cualquiera de las funciones para lo cual fue construido. En este caso la presa permanece intacta estructuralmente pero sin operación, es decir se realiza el cierre de todas las estructuras como turbinas, bombas, obras de toma, entre otros y se mantiene en su sitio sin realizarle ninguna modificación.

Es, desde el punto de vista económico a corto plazo, la opción más simple ya que no requiere ninguna acción que implique la remoción o demolición de la presa o algunos de sus componentes, pero al permanecer las obras, no restaura en forma alguna las condiciones originales del río.

Al mantener la estructura de la presa, el proceso de sedimentación no se detendrá, por lo cual, el hecho que se suspendan las operaciones del embalse no implica que no se debe seguir manteniendo el embalse, puesto que muy probablemente sea necesario el manejo de sedimentos, la conformación de cauces dentro del vaso de almacenamiento, la protección de algunas zonas debido a procesos erosivos en las márgenes del embalse, etc. Todas estas acciones buscarán mantener la presa como elemento regulador de crecientes, como obra de almacenamiento de agua para fines recreativos y como obra de aseguramiento de la integridad de las comunidades aguas abajo del embalse en momentos de crecientes significativas.

El manejo de los sedimentos se puede realizar con la metodología desarrollada en el Capítulo 3 y es importante la supervisión constante de la acumulación de los sedimentos en el embalse, ya que si posteriormente se decide remover totalmente la presa puede ser problemática la extracción de los sedimentos si han alcanzado niveles muy altos en la misma.

Una presa que suspende sus actividades debe ser monitoreada en todo momento puesto que un embalse colmatado puede ser riesgoso tanto estructural como hidráulicamente y, por ello, deben observarse continuamente las condiciones del tapón principal, de las obras de alivio y la instrumentación instalada en ellas.

Una presa de este tipo, una vez colmatada, funcionará como presas de retención de sedimentos tal como las mencionadas en Sub Capítulo 3.2.6.

### **Ventajas**

- Gastos de inversión muy bajos, ya que no implica la eliminación de la presa.
- Permite el mantenimiento intacto de la presa.

- No genera impactos ambientales en cuanto a la descarga de grandes cantidades de sedimentos.

#### **Desventajas**

- No permite la restauración de las condiciones naturales del río.
- Requiere de la supervisión y mantenimiento constante a manera de evitar posibles riesgos estructurales de la presa.
- Es necesario la aplicación de metodologías que permitan el manejo de los sedimentos, ya que éstos seguirán acumulándose en la estructura progresivamente.
- La presa sigue siendo un obstáculo para el paso de los peces y las especies acuáticas del río.

#### ***b. Eliminación Parcial De La Presa***

Consiste en la eliminación de la parte de la presa que permite al río alcanzar el nivel original por el cual corría. Esta eliminación ha de desarrollarse en forma progresiva de tal manera que la disminución de las aguas acumuladas en el vaso de almacenamiento sean vertidas en forma controlada para evitar posibles inundaciones aguas abajo.

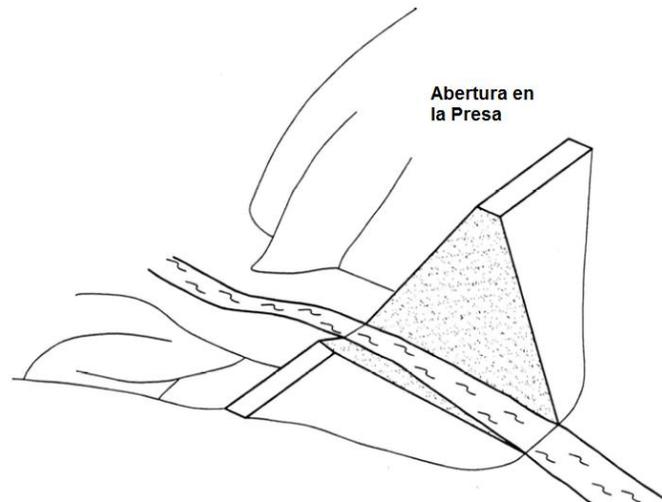
Los procesos de eliminación parcial de la presa son mucho más fáciles de ejecutar en presas de concreto debido a que es viable la demolición progresiva de la estructura generando una abertura por la cual van saliendo las aguas y sedimentos embalsados.

Esta opción es utilizada generalmente cuando los costos relacionados a la eliminación total de la presa son muy altos y no viables, por lo que es mucho más simple y económico eliminar una parte del embalse, así como también cuando se desea recuperar el

paso del agua por su cauce natural, sin destruir la presa ya que es una estructura con significado histórico para la nación.

Una de las grandes ventajas que presenta la eliminación parcial de la presa es que evita la acumulación de grandes cantidades de sedimentos, por lo que resulta mucho más económico el mantenimiento de la estructura, debido a que el paso del río erosiona las partículas que se encuentran depositadas a lo largo del embalse y las saca por medio de la abertura realizada. Los sedimentos que se quedan atrapados detrás del embalse, pueden ser extraídos por medio de los métodos convencionales, es importante acotar que los sedimentos seguirán depositándose en el cuerpo del embalse pero no de igual magnitud a como se acumularían si se deja la estructura del embalse intacta.

Al igual que la opción anterior, es necesaria la constante supervisión y mantenimiento de la estructura de la presa a manera de evitar los posibles riesgos que se puedan generar aguas abajo o las posibles fallas estructurales, aunque en este caso el río disminuye sus niveles de agua es importante el análisis de posibles crecidas que generen inundaciones aguas abajo.



**Fig. 4.5** Se puede observar el caso de eliminación parcial de una presa, en donde se le realizó una abertura a la cresta de la presa, lo que permite el paso del río

Foto cortesía: Morris y Fan (1998) Manual de Sedimentación de Embalses.



**Fig. 4.6** Inicio de la eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma, ubicada en JapónFoto  
Cortesía: Think The Earth, Earth Report.



**Fig. 4.7** Proceso de eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma, ubicada en Japón

**Foto Cortesía: Think The Earth, Earth Report.**



**Fig. 4.8** Resultado final de la eliminación parcial de la cresta de la presa Gunma, ubicada en Japón

**Foto Cortesía: Think The Earth, Earth Report**

**Ventajas**

- Permite la restauración del río a sus condiciones naturales.
- Los impactos ambientales generados no son tan grandes en comparación a los ocasionados si se elimina completamente la presa.
- Evita la acumulación de grandes volúmenes de sedimentos en la presa, ya que podrán ser transportados con el río.
- Permite el paso de los peces y otras especies acuáticas del río.
- Permite mantener la estructura de la presa, lo que muchas veces se desea ya que constituye un valor histórico para el país.
- Conlleva a menores gastos de inversión, ya que sólo se está eliminando una parte del cuerpo de la presa y no toda su estructura.

**Desventajas**

- Requiere del constante mantenimiento y supervisión de la estructura de la presa, con el fin de evitar riesgos que puedan generar la falla de la misma.
- La acumulación de los sedimentos detrás de la presa seguirá en proceso, pero no de igual magnitud a como ocurre en una presa que su estructura está intacta ya que el paso del río permite el arrastre de los sedimentos.
- Pueden descargarse grandes cantidades de sedimentos al ecosistema aguas abajo.

***c. Eliminación Total De La Presa***

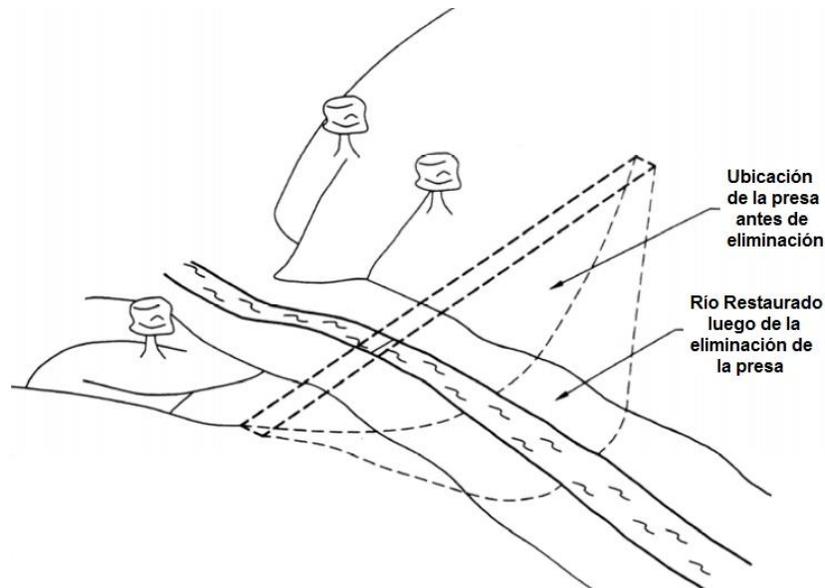
Consiste en la remoción de la toda la estructura de la presa, de esta manera se permite la restauración completa del río, y el paso de las especies acuáticas del mismo, así

como también se recupera la dinámica natural del transporte de los sedimentos en la zona. El proceso de eliminación de una presa puede realizarse en etapas a manera de evitar las grandes descargas de sedimentos al río, disminuyendo los impactos ambientales; el tiempo de duración de este proceso puede ser relativamente corto, pero dependerá de la operación para la destrucción de la presa y de su tamaño.

Esta alternativa constituye una de las opciones más costosas debido a que requiere del uso de maquinaria adecuada para la eliminación, así como también para el movimiento de tierras, es por esto que resulta una de las últimas opciones a tomar en cuenta para el desmantelamiento de una presa.

Los impactos ambientales generados temporalmente por este proceso suelen ser grandes, ya que por lo general, se descargan grandes cantidades de sedimentos que se encontraban depositados al pie de la presa, causando problemas aguas abajo de la estructura. Generalmente, se requieren de años para la recuperación total del río y de sus especies, debido a que las condiciones naturales en las que se encontraba el río antes de la construcción de la presa no se encuentran iguales luego de su construcción.

Es de gran importancia realizar los estudios correspondientes a los posibles impactos ambientales que se pueden generar debido a la eliminación de la presa y buscar mitigarlos, así como también se debe tomar en cuenta las condiciones aguas abajo de la presa, si existen comunidades cercanas que se puedan ver afectadas, etc. De esta manera cuando se procede a la destrucción de la presa, los efectos que puede causar aguas abajo no perjudican también a la sociedad.



**Fig. 4.9 :** En esta imagen se puede observar como es la eliminación de una presa y cómo queda la sección luego de ser removida

**Foto Cortesía:** Morris y Yan, *Manual de Sedimentación en Embalses*, 1998.

Un claro ejemplo de la eliminación de presa se ubica en Estados Unidos llamada “Elwha”, en donde como se mencionó al inicio de este capítulo, era la presa removida más grande de este país. Fue construida en 1910 y se encontraba ubicada en Washington, su principal función era la generación de energía para el estado.

Con el paso de los años y viendo la limitada producción de energía de esta presa, se procedió a analizar los daños que generaba la presa en el ecosistema y, en especial, la afectación que tenía sobre los salmones y truchas que allí hacían vida. Las tribus que se encontraban aguas abajo del río Elwha, comenzaron a debatir sobre la necesidad de mantener la presa y el efecto positivo que la eliminación de dicha obra podría generar en el ambiente si se lograba restaurar las condiciones originales del río.



**Fig. 4.10** Se puede observar el río Elwha ubicado en Washington, Estados Unidos

**Foto cortesía: National Geographic, Elaine Thompson (2013).**

Para el año 2011 se decide finalmente la demolición de la presa, que luego de cien años acumulaba grandes cantidades de sedimentos (27 millones de metros cúbicos aproximadamente). El proceso de demolición de la presa tardó seis (6) meses en realizarse y aunque el río había sido restituido a su cauce original, las características del agua están muy afectadas por la gran cantidad de sedimentos que hoy se mueven y que progresivamente van limpiando el antiguo vaso de almacenamiento.

El efecto de adaptación de las especies autóctonas ha sido más lento de lo esperado debido a la gran cantidad de sedimentos y a la velocidad en que éstos son removidos por la corriente. Para septiembre de 2014, se consideraba que se había culminado el proceso de restauración del río aunque aún falta un proceso natural y progresivo de crecimiento vegetal, configuración de cauces y apropiación de los espacios por las especies animales.

Actualmente, alrededor de 3 mil kilómetros cúbicos de sedimentos, lo equivalente a aproximadamente 300 mil camiones de tierra, han sido liberados, representando únicamente el 16% de lo que se espera dentro de los siguientes 5 años. Aunque el impacto ambiental generado es muy grande, se discute que la decisión fue la mejor opción tomada, ya que permitió que el río tome su cauce natural y que las especies como el salmón sigan su paso por el mismo.



**Fig. 4.11** En esta imagen se puede apreciar la Presa Elwha, ubicada en los Estados Unidos antes de su desmantelamiento y eliminación. Foto Cortesía: Tom Banse, Northwest News Network.



**Fig. 4.12** Sitio donde se encontraba la Presa Elwha luego de su eliminación, en donde se procede a realizar la restauración del río mediante el movimiento de tierras.

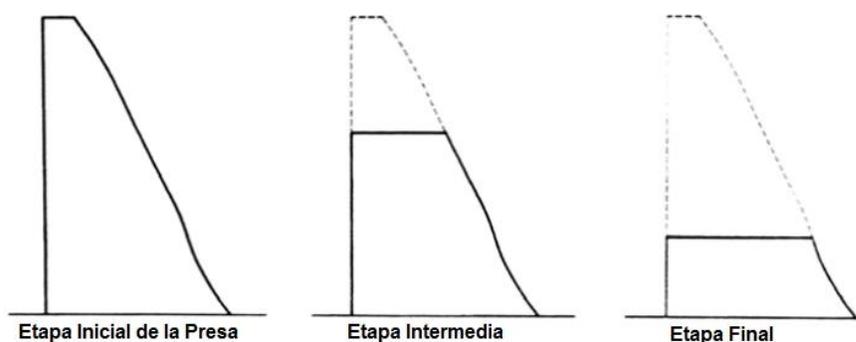
**Foto Cortesía:** Elwha Ecosystem Restoration, ikiwand.



**Fig. 4.13** Fotografía aérea del río Elwha en el año 2013, donde se puede observar la deposición de sedimentos luego de la demolición de la Presa Elwha. Foto Cortesía: Neal y Linda Chism, LightHawk.

Es importante mencionar que muchas veces el proceso de eliminación ya sea parcial o total se puede realizar por etapas, en donde el nivel de la cresta de la presa se va disminuyendo poco a poco hasta alcanzar la altura deseada. El tiempo de cada etapa dependerá principalmente del volumen de sedimentos acumulados detrás de la presa, esto a su vez se ve afectado por la cantidad de sedimentos que puede ser descargada al río sin generar cambios drásticos en la hidrología y en el ambiente aguas abajo, así como también la forma del canal. (Fan y Morris, 1998).

Usualmente la eliminación de una presa por etapas se realiza en presas de concreto, en donde resulta menos riesgoso su aplicación, ya que para la ocurrencia de una crecida, la superficie de la cresta no se verá afectada; en cambio, para presas de tierra no sucede lo mismo, ya que la ocurrencia de una inundación puede generar daños en la cresta de la presa que estará expuesta a la fuerza erosiva del agua pudiendo generar su falla. La eliminación por etapas de una presa de tierra puede ser efectiva y sin riesgos aguas abajo cuando se construye un aliviadero auxiliar que permita retirar los excedentes de agua sin erosionar la superficie de la cresta de la estructura.



**Fig. 4.14** En esta figura se pueden apreciar las etapas de una eliminación de una presa, en donde la primera etapa corresponde a la Presa Original, la segunda es una etapa Intermedia, en donde se disminuyó el nivel de la cresta. Y en la etapa final se puede observar la sección de la presa una vez que se alcanzó la altura deseada. Foto Cortesía: Morris y Fan, 1998.

### **Ventajas**

- Permite la restauración del río a sus condiciones naturales, así como también del ecosistema que fue afectado por la construcción de la obra hidráulica.
- Permite el paso de los peces del río y el transporte de los sedimentos naturalmente.

### **Desventajas**

- Genera grandes impactos ambientales al ecosistema aguas abajo, ya que causa la descarga de grandes cantidades de sedimentos que perjudican la calidad y turbiedad del agua del río.
- Implica grandes gastos de inversión, ya que es necesario el uso de maquinarias especializadas para la ejecución del movimiento de tierra que suele ser de gran magnitud.
- Su ejecución puede durar años, dependiendo del tamaño del embalse.

#### **4.6. Restauración de Ríos**

La existencia de obras hidráulicas como presas, brinda a la Comunidad grandes ventajas, pero sus efectos al medio ambiente son significativos, ya que constituyen un obstáculo para el paso del río, cambiando su ruta de transporte de sedimentos, interrumpiendo el movimiento de peces y de todas las especies contenidas en él, alterando la magnitud y ocurrencia de los caudales del río, su temperatura y calidad, así como también sus características químicas, lo que genera que todo el ecosistema y las características naturales del río como su morfología se vean afectadas de manera permanente, ya que los ríos son sistemas dinámicos cuya variabilidad ecológica y

fisicoquímica permiten sustentar la biodiversidad e integridad del sistema (C. Katopodis a & L.P. Aadland, 2010).

La eliminación de las presas constituye, actualmente, un proceso que se toma en cuenta cada vez más con el paso del tiempo, debido a la existencia de embalses colmatados que evitan que la obra hidráulica funcione eficientemente, generando mayores impactos al ambiente que beneficios a la sociedad. Muchas veces la tendencia es pensar que la eliminación parcial o total del embalse permitirá la restauración total del río y de sus condiciones naturales, lo cual no es cierto, ya que si bien el objetivo de la eliminación de la presa es restablecer el paso del río por su cauce “natural” y por lo tanto el paso de la vida acuática, sin la aplicación de criterios que faciliten el proceso, la restauración de estas condiciones podría tomar, años, décadas o incluso siglos de erosión para completar su rehabilitación. Una vez que el embalse es desmantelado el problema principal es el análisis de cuáles medidas pueden ser aplicadas para restaurar las condiciones naturales del ecosistema que ha sido perjudicado así como, la mitigación de impactos ambientales.

El proceso de restauración de ríos constituye un mecanismo de gestión hidrográfica que se fundamenta en teorías ambientales, donde el objetivo principal es la recuperación de las funciones ecológicas e hidro-geomorfológicas que controlan los ecosistemas fluviales, aproximando el sistema fluvial a sus patrones ambientales iniciales (Meuer, 2010).

Aunque el ecosistema no volverá a ser como antes, ya que se vio afectado durante un largo tiempo por la existencia de la presa, su recuperación a condiciones muy semejantes a las naturales puede ser lograda, mediante la aplicación de técnicas que permitan el manejo de los sedimentos depositados aguas arriba de la presa y eviten el proceso de erosión descontrolada del fondo del cauce aguas abajo. El objetivo principal de las técnicas para el manejo de los sedimentos comprende la restitución del canal original mediante diversos procesos como lo es la erosión natural del cauce, la canalización o inclusive la extracción de todos los sedimentos que serán mencionados posteriormente.

Otras alternativas para la restauración de los ríos son las que permiten el control del proceso de erosión del fondo del cauce garantizando el transporte de los sedimentos, mediante la protección del canal, de esta manera se evita el arrastre excesivo de sedimentos que puedan generar daños o inundaciones aguas abajo, así como también posibles deposiciones que perjudiquen el paso natural del agua por el canal. Entre algunas de estas opciones podemos encontrar:

- Disposición de rocas, canto rodado o estructuras de piedra en el fondo del canal a manera de controlar la erosión del material de fondo y promover su mantenimiento.
- Aplicación de cambios en la corriente con el fin de mejorar el paso de los peces, tanto aguas arriba como aguas abajo de donde se encontraba la presa, como lo es la construcción de escaleras para peces, rampas, canales de desvíos, barreras, entre otros sistemas que permitan el transporte de los especies. Así como también el uso de troncos, maleza o estructuras rocosas que se coloca aguas abajo del río para mejorar el hábitat de estas especies y evita la erosión del suelo.
- Creación de barreras de migración, que comprenden la disposición de obstáculos en lugares estratégicos del río con el fin de evitar que ciertas especies accedan a otras zonas aguas arriba.
- La protección del canal mediante la colocación de árboles a lo largo de los laterales del canal, a manera de evitar la desviación del flujo del cauce y estabilizar sus márgenes.
- La construcción de deflectores de ríos que permiten dirigir y modificar la dirección del flujo, provocando la erosión en ciertas zonas para sedimentar otras.
- Transformación de la condición del flujo recto existente, promoviendo la formación de meandros, los cuales permiten la modificación de la dinámica

hidráulica y los procesos de sedimentación en el canal, estabilizando así el cuerpo de agua y la diversidad del ecosistema.

#### **4.6.1. Manejo de los Sedimentos**

Una vez que la decisión de dismantelar la presa ha sido tomada, es muy importante conocer qué acciones se realizarán para el manejo de los sedimentos que se encuentran acumulados dentro de la presa, de esta manera el proceso de rehabilitación del cauce del río puede iniciarse. Muchas veces no se conoce la existencia de los criterios que permiten tener un control de los sedimentos al momento de suspender la presa, por lo que el estudio de estas metodologías constituye un factor de gran importancia y ayuda, ya que permiten el manejo y disposición adecuada de estos sedimentos, que la mayoría de las veces genera impactos ambientales de gran magnitud en el ecosistema del río de no ser manejados adecuadamente.

En la actualidad, existen diferentes metodologías aplicables para el manejo de los sedimentos en estas presas y su aplicación dependerá de los costos, los impactos generados aguas abajo al ecosistema, las características de sedimentos que se encuentran almacenadas, entre otros. Los criterios más utilizados serán desarrollados a lo largo de este punto.

##### ***a. Erosión Natural del cauce***

Este método para el manejo de los sedimentos, una vez que se decide el dismantelamiento, puede ser aplicado para las presas que han sido parcial o totalmente eliminadas, y permite que el río erosione y transporte los sedimentos que se encuentran acumulados sin intervención de maquinaria. Constituye una alternativa de las más económicas existentes, pero puede resultar un proceso lento que puede tardar años hasta que las condiciones del río se estabilicen. (De Graff y Evans, 2013).

Una de sus grandes desventajas es que no permite la remoción de todo el volumen depositado de sedimentos, ya que transporta pequeñas cantidades de partículas dependiendo de la composición de la presa y de la altura hasta la cual fue removida. Mientras mayor sea la altura de presa removida mayor será la cantidad de sedimentos hacia aguas abajo.

Debe ser realizado de manera controlada, debido a que puede generar diversas consecuencias ambientales aguas abajo, es por esto que muchas veces es utilizado cuando la eliminación de la cresta de la presa se realiza por etapas, ya que permite tener un límite en la cantidad de sedimentos que se erosionarán mediante este proceso. En donde, la duración de las etapas dependerán de la entrada de sedimentos, su capacidad de erosión y características, además de la cantidad de sedimentos que puede tolerar el ecosistema (Fan y Morris, 1998). Como la distribución de los sedimentos no es uniforme a lo largo del embalse, el proceso de erosión no será igual a cualquier elevación a la que se encuentre la cresta de la presa, es por esto que el aprovechamiento de esta técnica permite tener un control de la salida de los sedimentos conociendo sus características.

No es recomendable su aplicación a presas en donde predominan sedimentos que tienen características contaminantes, por lo que debe evitarse el proceso de erosión cuando ocurre esto, mediante la extracción de estos sedimentos de manera mecánica.

#### ***b. Canalización***

La excavación de un canal que permita el manejo de los sedimentos es otra opción utilizada, principalmente para presas que serán completamente eliminadas o parcialmente removidas. El dejar los depósitos de sedimentos sin control puede generar procesos erosivos importantes que afecten las condiciones del río y sus características, esta metodología permite la estabilización del transporte de estos sedimentos mediante la canalización. (Ver Fig.4.15)



**Fig. 4.15 Canalización**

**Foto Cortesía del Ing. Alejandro Liberatore.**

Mediante este método se puede disminuir el proceso erosivo que puede causar el paso del agua por los sedimentos, además contribuye a la recuperación del paso de los peces y del ecosistema. El procedimiento a seguir consiste en el vaciado del embalse, para poder iniciar la excavación del canal en los depósitos de sedimentos existentes aguas arriba de la presa, una vez excavado el canal se comenzarán a erosionar los sedimentos, por lo que muchas veces se utiliza la técnica del dragado para evacuar el canal y de esta manera reducir las grandes descargas de sedimentos al ecosistema. (Fan y Morris, 1998)

El diseño del canal debe ser el adecuado para que el manejo de los sedimentos sea eficiente, por lo que el principal problema de su diseño lo constituyen las dimensiones y el tipo de canal a excavar para que su funcionamiento sea el deseado. En donde se debe tomar en cuenta la pendiente, sinuosidad que tendrá el canal y el tipo, a manera de ajustar las

***Criterios para el manejo de embalses colmatados***

condiciones del río al nuevo canal y al vaso de almacenamiento disponible en el embalse; para este análisis es necesario conocer las características de los sedimentos, como lo es el tamaño de las partículas, así como también la cantidad, de esta manera el ancho del canal puede ser calculado para que cumpla con el manejo estable de los sedimentos. (Ver Fig.4.16)



**Fig. 4.16 Proceso de canalización**

**Foto Cortesía del Ing. Alejandro Liberatore.**

Es importante mencionar, que muchas veces el canal natural del río formado luego de la eliminación total o parcial de la presa no coincide con la canalización realizada para el manejo de los sedimentos, por lo general, cuando la presa ha sido completamente eliminada, el río vuelve a restablecer su canal original y puede implicar grandes movimientos de sedimentos, ya que el flujo pasará en su totalidad arrastrando los

***Criterios para el manejo de embalses colmatados***

sedimentos y erosionando el canal hasta estabilizarlo. En cambio, cuando la presa ha sido eliminada parcialmente, el río pasará por la abertura de la presa, en donde los sedimentos se seguirán acumulando en menor cantidad detrás de la misma; es usual que la canalización se realice de dos maneras: mediante el diseño de un canal o mediante la canalización natural. El diseño del canal se realiza como se mencionó al inicio de este punto, vaciando el embalse parcialmente hasta llegar a las deposiciones de sedimentos, en donde generalmente la abertura de la presa coincide con el canal para el manejo de los sedimentos; la canalización natural que se genera principalmente por la erosión de los sedimentos una vez que el embalse está lleno.

La estabilización de los canales muchas veces se realiza mediante métodos convencionales que dependerán del tipo de sedimentos, la geometría del canal y la naturaleza de los depósitos formados. Usualmente, el método más utilizado es la protección de los taludes mediante el uso de enrocado y de vegetación, en donde de acuerdo a las condiciones de los depósitos se podrá usar cualquiera de las dos opciones. La protección con vegetación suele ser utilizada cuando los sedimentos forman llanuras de inundación a los lados del canal, en donde se plantan árboles o plantas que permitan la estabilización del canal. (Martín Vide, 2002)

En la fig. 4.17 caso (a) se puede observar una presa parcialmente eliminada, en donde la canalización fue realizada mediante un canal recto.

En la figura 4.17 (b) se puede observar una presa parcialmente eliminada, en donde la canalización fue realizada mediante un canal con meandros, en donde se protegió el canal mediante vegetación.

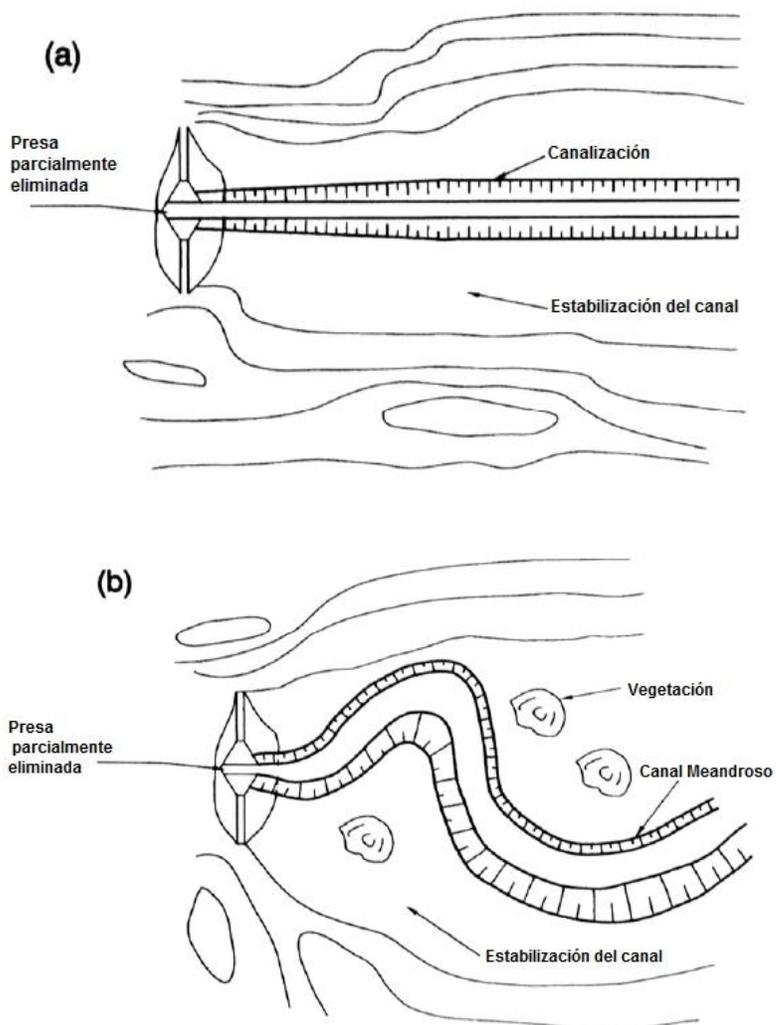


Fig. 4.17 Presa parcialmente eliminada

Foto Cortesía: Fan y Morris, 1998. Manual de Sedimentación en Embalses.

### *c. Extracción Total de los sedimentos*

La extracción total de los sedimentos se suele realizar de manera mecánica como se explicó en el Sub Capítulo 3.2.4 y se debe realizar antes de la eliminación o desmantelamiento de la presa, ya que es necesario el vaciado total del embalse a manera de

poder disponer de los equipos necesarios para la excavación de los sedimentos en el sitio. Este proceso tiene la gran ventaja que permite la excavación de todos los sedimentos que se encontraban depositados, lo que implica que no existirán descargas de sedimentos al ecosistema aguas abajo cuando la presa sea desmantelada. Éste método es usado cuando existen grandes volúmenes de sedimentos que pueden resultar contaminantes al ser descargados aguas abajo de la presa, por lo que resulta viable su extracción mediante equipos especializados como retroexcavadoras, payloaders y camiones de carga que permitan el transporte de los sedimentos excavados hasta el sitio de descarga. La extracción de los sedimentos también se puede realizar mediante el dragado, que resulta adecuado cuando no se quiere vaciar el embalse, en donde el procedimiento se realiza como se desarrolló en el Sub Capítulo 3.2.3

**Tabla 4.1 Tabla comparativa de las opciones para el manejo de los sedimentos**
**Fuente: propia**

<b>Opción para el Manejo de los Sedimentos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<u>Erosión natural del cauce</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajo costo de inversión.</li> <li>✓ Los sedimentos permiten la restauración del canal natural del río.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Riesgos de impactos ambientales imprevistos.</li> <li>✓ Degradación temporal de la calidad del agua aguas abajo.</li> <li>✓ Acumulación de sedimentos aguas abajo del río.</li> </ul>
<u>Canalización y estabilización</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Costos moderados.</li> <li>✓ Es poco probable que se generen depósitos de sedimentos en el canal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mantenimiento a largo plazo del canal, lo que genera otros gastos.</li> <li>✓ Las condiciones naturales en el área del embalse no son restituidas completamente.</li> </ul>
<u>Extracción total de los sedimentos</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No se descargan grandes cantidades de sedimento al río.</li> <li>✓ Bajo impacto en la calidad del agua y en el ecosistema.</li> <li>✓ Es muy poco probable que se generen depósitos de sedimentos aguas abajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alto costo asociado.</li> <li>✓ Se debe disponer de un sitio de descarga para los sedimentos excavados.</li> <li>✓ La presencia de sedimentos contaminados puede generar impactos en el sitio de descarga.</li> <li>✓ Si se trata de excavación mecánica, necesita que el embalse se encuentre vacío.</li> </ul>

## 5. MATRIZ PARA ORIENTACIÓN EN LA TOMA DE DECISIÓN

### 5.1. Descripción

La concepción de la matriz de decisión surge del análisis de las condiciones habituales que presentan los embalses, de manera que sirva al profesional encargado de rehabilitar o inhabilitar un embalse colmatado, como una herramienta fundamental para la toma de decisión en el manejo y operación de dichas obras, así como las acciones que pueden desarrollarse para lograr el restablecimiento del servicio o el disfrute y uso de las áreas afectadas por el conjunto presa-embalse.

Evidentemente esta matriz de toma de decisión se basa en preguntas simples, que no reflejan la gran complejidad de variables incluidas en cada proyecto particular por lo cual debe ser interpretada como una orientación y no sustituye en poca o gran medida el juicio experto del profesional a cargo de la evaluación del proyecto.

Para un estudio detallado como el que implica la toma de decisiones para la operación de un embalse con problemas de sedimentación, es necesario partir de una pregunta que sea lo suficientemente general de manera que englobe todas las condiciones que se puedan presentar según el caso, y considerar preguntas más específicas que permitan llegar al planteamiento de soluciones puntuales. El punto base a partir del cual se desarrolla toda la matriz, corresponde a la necesidad del embalse, que comprende la interrogante fundamental al momento de considerar el futuro del sistema, ya que de ser necesario se da inicio a la búsqueda de posibles soluciones que permitan rehabilitarlo para su posterior operación. De lo contrario, el escenario a estudiar cambia, las medidas aplicables corresponden a la suspensión del embalse y pueden llegar a implicar su eliminación. Es por ello, que este parámetro fue tomado en cuenta como factor inicial a ser analizado para la investigación de soluciones ante la problemática presentada.

En general la matriz de decisión que se presenta en hojas adjuntas responde a los siguientes cuestionamientos:

- a. ¿Es necesario el Embalse o existe una fuente alterna que pueda sustituirlo?
- b. ¿El grado de colmatación está acorde a la rata esperada de llenado de sedimentos o se ha acelerado el proceso recortando su vida útil?
- c. ¿Qué nivel de colmatación tiene el embalse, expresado éste como % de su volumen útil?
- d. ¿Qué condiciones topográficas prevalecen en el área?
- e. ¿Qué características estructurales tiene el embalse?
- f. ¿Cuáles son los impactos ambientales y riesgos asociados a la presa, su mantenimiento o su eliminación?
- g. ¿Qué valor histórico tiene la presa?

La respuesta de cada una de estas preguntas permite distinguir algunas acciones de recuperación y desechar otras, hasta alcanzar el fin de la matriz.

Como se podrá observar en la matriz, no hay una decisión única para este tipo de soluciones puesto que en ella prevalecen además criterios económicos, sociales y particulares en cada estudio que no pueden ser incluidos en una matriz de decisión como la que se presenta en este trabajo.

Como fue mencionado anteriormente la pregunta base solo permite dos posibles soluciones, que de ser afirmativa, desglosa una serie de alternativas basadas en el estado de sedimentación en el que se encuentra el embalse, en función del volumen de sedimentos actual y el volumen útil del mismo, de esta manera se facilita el estudio de los posibles casos existentes.

Los niveles o condiciones del embalse analizados fueron cuatro (4) y corresponden a una medida subjetiva que bien puede ser ajustada en función del juicio experto de

diversos profesionales encargados de la operación del embalse; así, se hace un análisis de los siguientes casos:

#### **5.1.1. Condición Normal ( $V_s < V_m$ )**

Se refiere a la condición donde el Volumen de Sedimentos ( $V_s$ ) es igual o menor que el Volumen Muerto ( $V_m$ ) del embalse. Esta condición se supone es la que debe ocurrir en todo embalse durante su vida útil y sus funciones no se encuentran alteradas por lo cual se debe hablar de acciones que busquen la prevención en la generación de sedimentos.

En este caso, los métodos planteados se enfocan en el manejo sustentable del embalse, en donde, lo ideal es la aplicación de prácticas que permitan la eliminación de los sedimentos que se encuentran depositados en él, con el fin de evitar que su acumulación se incremente en el tiempo pudiendo generar problemas en el funcionamiento del embalse. Entre las alternativas existentes para esta situación, incluyen el Dragado (hidráulico o mecánico), Desvío de Sedimentos, Corrientes de Turbiedad, Flushing y Excavación de los sedimentos. La aplicación de estas metodologías dependerá de las características topográficas que posea el vaso de almacenamiento, la existencia de Obra de Descarga y su factibilidad dependerá de factores tanto económicos como ambientales. En esta fase es fundamental la generación de una Curva de Gestión de Sedimentos para la aplicación de medidas correctivas y preventivas en el manejo de sedimentos en el embalse y en esta etapa las medidas de mejoramiento de las condiciones de los suelos en el área tributaria suelen rendir buenos frutos.

#### **5.1.2. Atarquinamiento Primario ( $V_s \leq 25\% V_{\text{útil}}$ )**

Es la condición inicial del proceso de colmatación de los embalses. En esta fase el volumen de sedimentos ha llenado la totalidad del Volumen muerto originalmente proyectado y se inicia un proceso de sustitución del Volumen útil por volumen de sedimentos sin que éste aún llegue a niveles preocupantes ( $V_s \leq 25\% V_{\text{útil}}$ ).

En este caso, si bien los niveles de sedimentos pueden afectar embalses donde se regula la casi totalidad de las aguas, es posible que pase desapercibido sus efectos en aquellos embalses donde la capacidad de regulación es superior a la demanda actual de agua.

El grado de sedimentación del embalse no representa un problema mayor, pero requiere de la aplicación de prácticas que permitan la recuperación del volumen perdido por la acumulación de los sedimentos, mediante la eliminación de sedimentos por los métodos mencionados en el caso anterior.

En este caso, los métodos planteados se enfocan en el manejo sustentable del embalse, en donde, lo ideal es la aplicación de prácticas que permitan la eliminación de los sedimentos que se encuentran depositados en el sistema, con el fin de evitar que su acumulación se incremente en el tiempo pudiendo generar posibles problemas en el funcionamiento del embalse. Nuevamente se puede decir que contar con una Curva de Gestión de Sedimentos puede significar el alargamiento de la vida útil del embalse y, posiblemente, la disminución de los sedimentos acumulados.

### **5.1.3. Operatividad Reducida ( $25\%V_{\text{útil}} \leq V_s \leq 75\%V_{\text{útil}}$ )**

Situación en la que el volumen de sedimentos se encuentra entre el 25-75% del volumen útil del embalse. En este caso, la problemática asociada a la colmatación del embalse se encuentra presente y se ven afectadas las rutinas normales de operación especialmente en épocas de gastos medios o menores a éste.

Los volúmenes de sedimentos alcanzan niveles importantes en la estructura, lo que va generando pérdidas relevantes en la capacidad de almacenamiento del embalse. Ésta pérdida de volumen útil puede ser corregida mediante la aplicación de prácticas que permitan la eliminación de los sedimentos, así como también, mediante el estudio de las condiciones geológicas y topográficas del embalse e incluso el análisis de las características de las cuencas vecinas al embalse en estudio.

Las prácticas para la eliminación de los sedimentos comprenden los métodos como el Dragado y Excavación, cuando no existe Obra de Descarga; así como también el Método Español, Desvío de Sedimentos y Corrientes de Turbiedad cuando el embalse dispone de una Obra de Descarga operativa.

Otra metodología la comprende la Sobre Elevación de la presa, que implica el estudio de las condiciones topográficas y geológicas de la cuenca, con el fin de elevar el nivel de la presa, incrementando de esta manera la capacidad del embalse.

Finalmente, la última alternativa asociada al manejo de los sedimentos en los embalses que presentan esta problemática, se puede encontrar el Traslase y construcción de una nueva Presa, que permita el almacenamiento de los aportes provenientes de su río como los que se desviarán por medio de la ejecución del trasvase.

#### **5.1.4. Embalse Colmatado ( $V_s > 75\% V_{\text{útil}}$ )**

Caso más crítico existente, en donde el embalse ya está colmatado, ya que el volumen útil ha sido perdido casi en su totalidad por la acumulación de los sedimentos en el embalse.

El análisis de esta situación se basa en el uso de las mismas metodologías aplicadas para el caso anterior, con la variante de que su rehabilitación resulta complicada, debido a que el embalse ha perdido su capacidad para el almacenamiento de agua por los volúmenes tan altos de sedimentos acumulados. Pero a su vez, su rehabilitación constituye un factor importante, por la necesidad del embalse.

#### **5.2. Aclaratorias**

Es necesario mencionar que la aplicación de las prácticas propuestas para cada caso no son excluyentes unas de otras, se recomienda la aplicación de varias metodologías que garanticen la recuperación del vaso de almacenamiento y la operación normal del embalse.

Cuando el embalse no resulta necesario, las alternativas presentadas son diferentes, ya que se centran en el desmantelamiento de la estructura y la restauración de las condiciones naturales del río.

Para el análisis de esta situación en la matriz de decisiones, fue necesario el estudio de diferentes casos de embalses desmantelados en el mundo, así como también de otros que fueron eliminados con el principal objetivo de permitir la restauración del río y el ecosistema que fue afectado por la construcción de la obra hidráulica.

En esta rama, se despliegan dos (2) opciones constituidas por la conservación de la estructura o su eliminación. Cuando la selección resulta la conservación del embalse, el principal problema lo constituye el riesgo que puede representar dejar la presa colmatada en el sitio, por lo que el profesional encargado debe realizar los estudios necesarios para el análisis de los posibles riesgos que pueden generarse aguas abajo. De esta manera, es posible conocer si es necesaria la aplicación de alguna práctica que permita eliminar los sedimentos del embalse, con el fin de evitar los riesgos asociados a la conservación del embalse colmatado.

Cuando la elección resulta la eliminación de la estructura, es necesario que el profesional tome en cuenta los costos relacionados a este proceso, así como también el valor histórico asociado, resultando las alternativas posibles a seleccionar: la eliminación total de la estructura o su eliminación parcial. En donde, para cualquier caso seleccionado es necesaria la aplicación de metodologías que permitan la restauración del río.

A continuación la presenta la matriz de decisión desarrollada en el presente T.E.G:

Para evaluar si la matriz de toma de decisión propuesta es funcional, se estima conveniente aplicar su uso a un embalse conocido en el país por sus altos niveles de atarquinamiento: El Embalse Matícora, ubicado en el Estado Falcón.

### **5.2. Aplicación de la Matriz a un caso particular: Matícora**

El embalse Matícora se encuentra localizado en el Distrito de Mauroa del Estado Falcón, Venezuela sobre la cuenca del río Matícora. Sus afluentes principales son la quebrada Uca y el río Matícora. Su construcción se inició en el año 1976 y fue culminada en 1978, concebido con el propósito de ser utilizado para el control de crecientes y como suplidor de aguas para riego de 10.000 hectáreas. Sin embargo, con el paso del tiempo se ha convertido en una de las fuentes más importantes de agua para el Acueducto Regional Falconiano, lo cual no fue previsto al momento del diseño de esta obra. Constituye un cambio de uso de la fuente, ganando así mayor importancia a la que tendría si fuera un embalse suplidor de agua con fines agrícolas. (ver Fig.5.1)



**Fig. 5.1 Vista Aérea del Embalse Matícora. En donde se puede observar el estado de sedimentación en el que se encuentra el mismo**

**Foto Cortesía del Ing. José De Jesús Gaspar.**

A continuación se presentan los datos característicos del Embalse Matícora, según la información recopilada por el Ing. Gaspar y la Ing. Sánchez. Ver figuras 5.2, 5.3 y 5.4.

### **5.2.1. Embalse Matícora**

#### *Niveles y Volúmenes Característicos*

- Cota del nivel de aguas normal: 120,00 m.s.n.m.
- Cota del nivel de aguas máximas: 122.84 m.s.n.m.
- Cota del fondo del río en el sitio de presa; 78,00 m.s.n.m
- Capacidad a nivel normal: 452,03 Hm<sup>3</sup>
- Área inundada a nivel de aguas normal: 3.560 Has.
- Volumen útil: 200,00 Hm<sup>3</sup>
- Volumen muerto: 252,00 Hm<sup>3</sup>
- Capacidad para el control de crecientes: 2,84 Hm<sup>3</sup>
- Caudal regulado: 9,40 m<sup>3</sup>/s

#### *Características de la Presa:*

- Tipo: Zonificada
- Longitud de la cresta: 600,00 m
- Ancho de la cresta: 8,00 m
- Cota de la cresta: 125,00 m.s.n.m
- Altura de la presa: 48,00 m
- Profundidad del dentellón: Variable

*Crterios para el manejo de embalses colmatados*

- Talud aguas arriba: Pendiente 3:1
- Talud aguas abajo: Pendiente 2,25:1
- Pozo disipador: USBR tipo B
- Caudal de diseño (riego): 26 m<sup>3</sup>/s
- Control de sedimentos: Válvula Howel-Bunger D=48" descarga libre al río.

### Planta Aliviadero

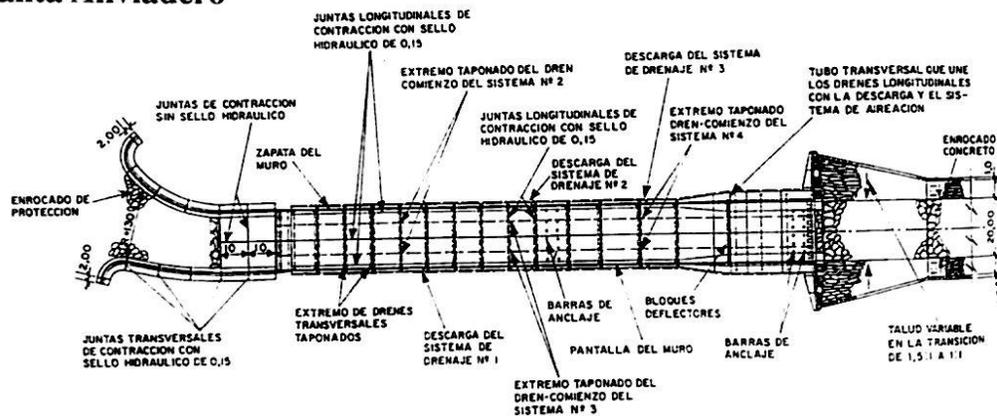
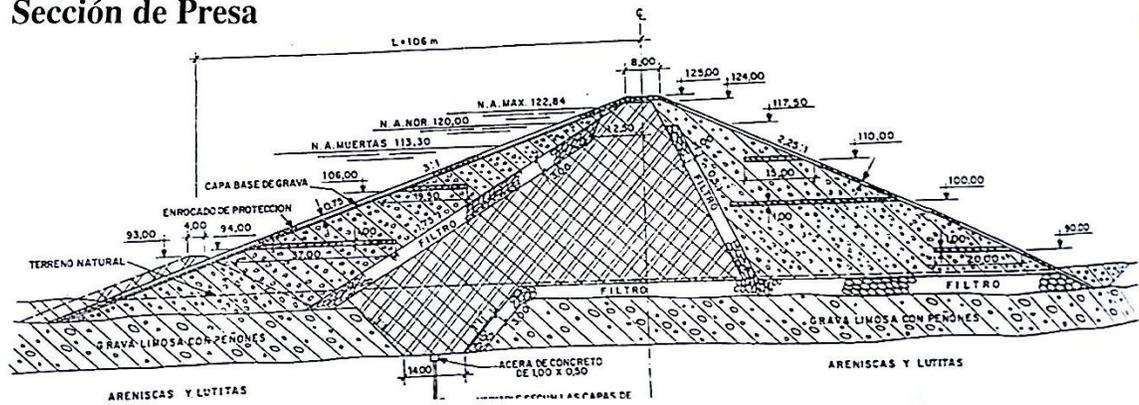


Fig. 5.2 Planta Aliviadero de la Presa Matícora

Fuente: Revista El Agua (1995)

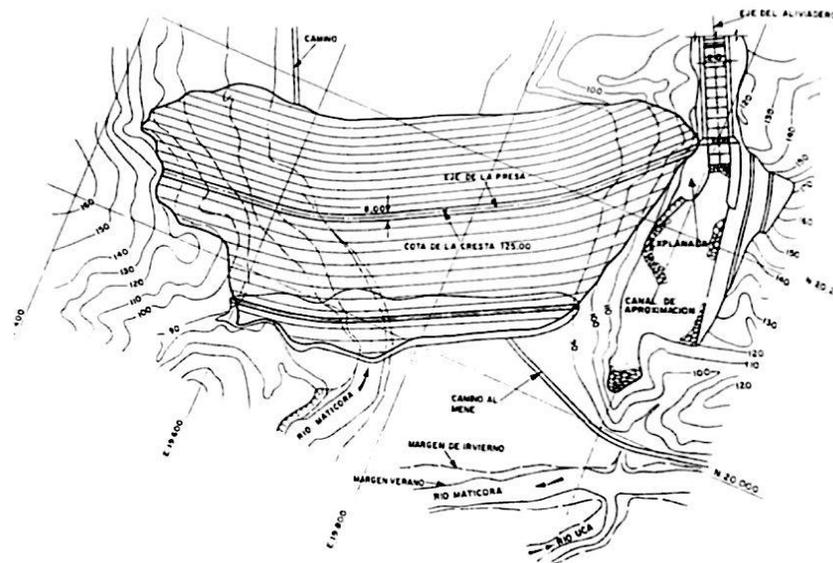
**Sección de Presa**



**Fig. 5.3 : Sección de la Presa Maticora.**

**Fuente: Revista El Agua (1995)**

**Planta**



**Fig. 5.4 : Planta de la Presa Maticora**

**Fuente: Revista El Agua (1995)**

### 5.2.2. Condición de Sedimentación

Constituye uno de los ríos con mayores aportes de sedimentos en el país, como consecuencia de las características de la cuenca, en donde la gran presencia de suelos finos, la escasa protección vegetal, condiciones climatológicas con precipitaciones intensas y las actividades humanas (malas prácticas agrícolas y movimientos de tierra de manera descontrolada), promueven la erosión del suelo dando como resultado el arrastre de grandes cantidades de sedimentos. El río Matícora es el mayor aportador de aguas y sedimentos del embalse y por lo tanto, el principal causante de la sedimentación del mismo, mientras que la contribución de las quebradas Uca y Cachimbo en caudal y sedimentos es prácticamente despreciable.

En la etapa de diseño de este embalse, conociendo la capacidad del río Matícora para transportar sedimentos, fueron considerados valores de sedimentos suspendidos de hasta 100 gr/l, una producción media anual de 6,5 millones de toneladas de sólidos y un rendimiento unitario de 2,6 Ton/Km<sup>2</sup>/año. En donde, los estudios realizados arrojaron presencia de grandes cantidades de sedimentos finos compuestos por limos y arcillas, lo que reduce la vida útil asociada al embalse a 65 años.

La sedimentación del embalse se dio de forma acelerada a través de los años, en donde los sedimentos llegaron a ocupar niveles superiores a la toma más alta, comprometiendo el funcionamiento adecuado de la toma y colmatando totalmente el embalse.

Hasta el momento han sido realizadas tres batimetrías en los años 1993, 2002 y 2010 (Sánchez, 2010), en las cuales es posible apreciar cómo ha disminuido la capacidad del embalse de manera progresiva. Esta pérdida de capacidad del embalse influye en el cumplimiento adecuado de sus funciones, disminuyendo su rendimiento para el control de crecientes, especialmente en la entrada del embalse en donde la acumulación de los sedimentos inició la formación de un delta de gran magnitud.

Según estudios, para el año 2012 los sedimentos ocupaban más del 70% del volumen del embalse (Gaspar, 2014), lo que resulta más crítico en la actualidad, ya que ha perdido la capacidad de almacenamiento, por lo que es imposible proporcionar las aguas demandadas por el Acueducto Regional Falconiano.

### **5.2.3. Aplicación de Matriz de decisiones a caso Embalse Matícora**

Analizando las condiciones del embalse en estudio antes mencionadas, se procede a la aplicación de la matriz de la siguiente manera:

La pregunta de ingreso a la matriz implica el análisis de la necesidad del embalse como fuente, lo que varía según la función para la cual fue diseñada y construida la obra. En este caso, el embalse Matícora fue diseñado en el año 1976 con el propósito de control de crecidas y para la alimentación de agua para riego. Lo que cambió a partir de su puesta en funcionamiento en el año 1978, siendo utilizado también para el abastecimiento de acueductos locales de poca demanda y más recientemente para el abastecimiento del acueducto Falconiano.

En el estado Falcón no existe otra fuente de suministros que sea capaz de satisfacer las demandas de la región, por ende la respuesta a la pregunta de ingreso: “¿Es necesario el embalse?”, es afirmativa.

A continuación se presentan cuatro (4) opciones que relacionan el volumen de sedimentos actual del embalse con los volúmenes característicos del mismo, con el fin de conocer el grado de sedimentación del embalse en estudio.

Según los estudios realizados en el año 2012 en el embalse Matícora (Gaspar, 2014), los sedimentos ocupaban más del 70% del volumen original, en la actualidad, se estima que el volumen de sedimentos sobrepasa el 75% del volumen útil del embalse, por ende esta será la condición a analizar.

La selección de este caso despliega tres (3) alternativas, las cuales consideran las condiciones, características y componentes estructurales del embalse, así como las características de la región, las cuales a su vez se verán afectadas por estudios de factibilidad técnico-económico y de impacto ambiental.

Es importante tener en cuenta, que las alternativas presentadas no son excluyentes una de las otras y no se encuentran organizadas según orden de importancia. Suele ser necesaria la aplicación de más de una opción para lograr resultados eficientes.

Una de las alternativas existentes corresponde a la eliminación del exceso de sedimentos del embalse. Para ingresar a ella, se pregunta previamente si el embalse posee una obra de descarga operativa dentro de sus componentes estructurales. El embalse Matícora, posee una obra de toma de sección cuadrada, la cual dispone de cuatro entradas de aguas, una a cada lado y a diferentes alturas. La toma más profunda está ubicada en el fondo del embalse y se había previsto que permanecería siempre abierta, retirando constantemente aguas del embalse, con caudal regulable en la válvula Howell Bunger ubicada en la salida. Esta toma se atascó en el momento en el que embalse inició su operación, por razones desconocidas.

Debido al estado de azolvamiento en que se encuentra el embalse, los niveles de sedimentos sobrepasan la toma de fondo antes mencionada, por ello requiere de la aplicación de dragado y de excavación con maquinaria, para liberar las entradas de agua y cercanías de la toma, de esta manera es posible la aplicación del método español. Sin embargo, esta opción no puede ser la única a implementar para solucionar el problema que posee el sistema, debido a que los volúmenes de sedimentos presentes en el vaso de almacenamiento son bastante elevados, y de ser posible su extracción, la concentración de sedimentos aguas abajo sería intolerable por el cuerpo receptor debido a los impactos ambientales que ocasionaría.

Dentro de las alternativas existentes para la eliminación de sedimentos que no requieren de una obra de descarga para su ejecución, se tienen el Dragado y la Excavación.

El aporte de sedimentos de la cuenca se encuentra en el orden de los 10 Hm<sup>3</sup> por año, el cual resulta elevado. Aplicar la técnica de dragado en una año constante, suponiendo una densidad de 300gr/L y un caudal de 2 m<sup>3</sup>/s, lograría extraer tan sólo 9,3 Hm<sup>3</sup> de sedimentos, lo cual resulta inferior al aporte que posee la cuenca, por lo que su aplicación sólo lograría eliminar los nuevos aportes que posee la cuenca, mas no los sedimentos antes depositados, los cuales representan la problemática principal.

Además, resulta necesaria la localización de un sitio que sea apto para la disposición de todo el material que se ha de extraer mediante la implementación de esta práctica.

El método de excavación presenta limitantes muy semejantes a las que posee el dragado, además, ambas técnicas resultan costosas de realizar, y como se demostró anteriormente, su aplicación no resulta eficaz en el caso estudiado.

Por otra parte, se analizan las condiciones topográficas y geológicas que posee el embalse, que de ser adecuadas permite el estudio de la sobre elevación de la presa como posible solución a considerar.

En el año 1994, esta solución fue planteada para el embalse Matícora por Caltec C.A. La propuesta consistía en la sobre elevación de la presa en tres (3) metros, incluyendo los tapones de cierre, el aliviadero y la toma. Este recrecimiento implicaría un aporte adicional a la capacidad de almacenamiento de aproximadamente 60 millones de m<sup>3</sup>. Al hacer un análisis posterior, se observa que esta propuesta no solucionaría la problemática del embalse, debido al gran aporte de sedimentos que posee la cuenca, lo cual colmataría el volumen adquirido mediante esta técnica en menos de 6 años.

La última alternativa, corresponde el estudio de las cuencas vecinas al embalse, para así analizar la factibilidad de implementar un trasvase hacia ellas.

Estos estudios comprenden el análisis topográfico, a manera de conocer si se dispone de un vaso de almacenamiento con la capacidad suficiente de almacenar los volúmenes de agua provenientes de la cuenca del Río Matícora, así como también, una

zona que presente un cañón angosto adecuado que permita la implantación de la presa en dicha zona.

De igual forma, es necesario un estudio geológico, que permita determinar si las presiones de poros generadas por los volúmenes de agua a almacenar son permisibles. Igualmente, este estudio es de gran importancia para conocer capacidad de soporte que posee la fundación, para resistir la carga y esfuerzos que implica la construcción de una presa.

Como resultado a los estudios realizados a las cuencas vecinas del embalse Matícora, se determinó que la cuenca Cocuiza presenta condiciones topográficas y geológicas aptas para la construcción de una presa en dicha localidad, y conseguir la regulación de los aportes de su río, así como también los provenientes del embalse de Matícora, lo que permitiría la implementación de un trasvase.

La construcción de una nueva presa sobre la cuenca del Rio Cocuiza y el trasvase de las aguas provenientes de Matícora, comprende una solución factible para el caso estudiado. Permitiría el aprovechamiento del embalse para la retención de los sedimentos acarreados por el río y para la alimentación del sistema de riego de las zonas adyacentes, mediante la rehabilitación de las descargas más profundas del embalse. De esta manera, la construcción de la nueva presa permite el abastecimiento del Acueducto Regional Falconiano, la disminución de los costos asociados al tratamiento de las aguas y alargaría la vida útil de las obras existentes.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las ideas que resultan del análisis final del presente trabajo:

### 6.1 Conclusiones

El siglo pasado, fue la época en la cual la construcción de presas tuvo su mayor auge, y por ende la formación de Embalses. En la actualidad, los esfuerzos ingenieriles se encuentran enfocados hacia el alcance de la sustentabilidad de dichas obras existentes, de manera de alargar su vida útil y no recurrir, salvo en condiciones que lo hagan imprescindible, a la construcción de nuevas presas.

Una vez terminado el proceso de recopilación de información a internacional, de la operación, acciones y consecuencias que poseen los embalses, se puede concluir:

- Cada embalse posee condiciones y características únicas, que requieren de estudios detallados y especializados. Por ende, no es posible desarrollar una solución única aplicable a la totalidad de los embalses.
- La aplicación de medidas correctivas y preventivas para la operación de los embalses, con el fin de mitigar la producción y retención excesiva de sedimentos, resulta necesaria con el fin de alargar y preservar su vida útil.
- Las acciones de concientización de la sociedad con respecto a las prácticas correctas de agricultura y de reforestación, permiten controlar la erosión desmedida de los suelos, de manera de disminuir los aportes de sedimentos hacia los embalses.
- Resulta necesario la creación de leyes y políticas que controlen el asentamiento de poblaciones en las áreas pertenecientes a los embalses, y a las planicies de

inundación. Ya que ante la ocurrencia de eventos extremos se pueden ver afectados gravemente.

- La aplicación de prácticas como el método español implican grandes impactos ambientales aguas abajo, debido a las altas concentraciones de sedimentos descargados.
- Al momento de considerar el desmantelamiento de una presa, se requiere llevar a cabo estudios de impactos ambientales, de manera de contrastar los beneficios e impactos que se han de obtener con dicha práctica, considerando que a través de los años de la existencia del embalse se han desarrollado múltiples ecosistemas en el sistema.
- Al momento de la ejecución de desmantelamiento de presas, resulta necesario hacer estudios detallados de las planicies de inundación existentes aguas abajo, con el fin de evitar poner en riesgo a las comunidades que podrían habitar las zonas aguas abajo.
- Una vez iniciada la operación de un embalse, se deben emplear medidas de control y manejo de sedimentos, sin esperar a que el sistema comience a presentar problemas de sedimentación. El diseño de Curvas de Gestión para cada reservorio debe ser una práctica común en la operación de los sedimentos de los embalses.
- Los errores en la estimación del aporte de sedimentos, conduce a que estos ocupen el volumen destinado para su almacenamiento (Volumen Muerto) en tiempos inferiores a los previstos.
- La descarga no controlada de sedimentos puede afectar las especies animales y vegetales que habitan en el cauce, debido a las altas concentraciones de sedimentos, los cuales alteran el ecosistema temporalmente.
- Gran cantidad de embalses existentes no fueron diseñados con presencia de descargas de fondo, lo que impide la extracción de sedimentos a través de estos

componentes mediante la aplicación de métodos como las corrientes de densidad y el método español.

- Las metodologías aplicadas a la restauración de ríos, en zonas donde existían embalses, implican principalmente el manejo de los sedimentos con el fin de controlar los procesos erosivos aguas abajo y la deposición en áreas no deseadas de los sedimentos, mitigando posibles impactos ambientales en el ecosistema.
- La matriz desarrollada en el presente TEG, es aplicable de manera general a cualquier embalse existente. Sin embargo, no pretende sustituir el criterio del profesional capacitado, ya que cada embalse representa un caso único.
- Resulta necesario la aplicación varias técnicas para el control de sedimentos en embalses de manera simultánea, con el fin de alcanzar resultados eficientes.
- Como resultado de la aplicación de la matriz desarrollada en el presente TEG al embalse Matícora, se obtuvo como solución factible el trasvase de las aguas superficiales desde el Embalse Matícora al embalse a construir sobre el Río Cocuiza.

## 6.2. Recomendaciones

Con el fin de lograr alcanzar la operación sustentable de los embalses, se recomienda:

- Evaluación de las condiciones existentes, con el fin de conocer el estado en que se encuentra cada embalse y poder desarrollar metodologías para lograr una operación eficiente de los mismos.
- Realizar campañas de medición de aportes de sedimentos en las diferentes cuencas existentes en el país.
- Realizar levantamientos batimétricos en los embalses operativos en Venezuela, de tal forma de determinar la condición de los mismos e iniciar un proceso de

jerarquización de la problemática actual de los sedimentos en embalses venezolanos.

- Transmitir y concientizar a las autoridades encargadas, sobre la importancia de la toma sistemática de datos relacionados con el acarreo de sedimentos en los ríos del país, especialmente en aquellos que potencialmente pueden o deben ser regulados para su aprovechamiento o su control.
- Realizar campañas de concientización social, para promover las prácticas adecuadas de agricultura, y minimizar la existencia de las llamadas agriculturas de conucos.
- Legislar sobre las actividades urbanas y cualquier desarrollo antrópico que modifique la respuesta natural de las cuencas, de tal manera que su alteración no trascienda al espacio exclusivo de su desarrollo.

**Con el fin de desarrollar TEG a futuro, se recomiendan:**

- Realizar una matriz de decisión partiendo de embalses en específicos.
- Aplicación de la matriz realizada en el presente TEG, a diferentes embalses en Venezuela.
- Aplicación de la matriz realizada en el presente TEG, a diferentes embalses Internacionales.
- Realizar un estudio enfocado en la eficiencia que poseen las presas de retención de sedimentos en los embalses próximos a ser colmatados.
- Estudios de evaluación de impactos ambientales asociados al desmantelamiento de presas colmatadas.

- Estudio de evolución de riesgos al momento de dejar presas colmatadas sin supervisión/seguimiento.
- Estudio enfocado en los criterios aplicados a la restauración de ríos donde existían embalses.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

Aelbrecht, D. (2006). *Lessons learned from dam removal experiences in France*. Portland: Hydrovision conference.

*Agua Hambrienta*. (s.f.). Recuperado el 3 de agosto de 2015, de [http://ponce.sdsu.edu/cuentos\\_agua\\_hambrienta.html](http://ponce.sdsu.edu/cuentos_agua_hambrienta.html)

Ambiente, C. N. (1994). *Dams and the Environment in Spain*. España: Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Aragón-COAGRET, A. R. (s.f.). *Recrecimiento de presa Yesa*. Recuperado el 16 de agosto de 2015, de <http://www.yesano.com/antecedentes.htm>

Armengol, J., & colaboradores, y. (2014). *Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses*.

Baish, S. K., David, S. D., & Graf, W. L. (2002). *The Complex Decisionmaking Process for removing dams*.

Barboza, E., & Ramirez, C. (2014). *T.E.G. Estado de sedimentación del embalse Tule*. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta.

Bolinaga, J. J. (1999). *Proyectos de Ingeniería Hidráulica*. Caracas: Fundación Polar.

Bolinaga, J. J., & Colaboradores. (1999). *Proyectos de Ingeniería Hidráulica*. Caracas: Fundación Polar.

Brufao Curiel, P. (España). *Demolición de Presas y Otras Obras Hidráulicas: Herramienta Indispensable para la Restauración de Nuestros Ríos y Humedales*. El Tiemblo.

Cadafe. (1975). *Complejo Hidroeléctrico General José Antonio Paez. Sedimentos en el Embalse*. Caracas: G&Y. Estudios y Proyectos S.R.L.

Calow, P. P., & Petts, G. E. (1994). *Rivers Handbook: The Science and Management of River Environments*. Blackwell Science Led Editorial Offices.

Castro García, H. A. (s.f.). *Presas de Retención de Sedimentos*. Recuperado el 3 de agosto de 2015, de [http://ponce.sdsu.edu/cuentos\\_presas\\_de\\_retencion\\_de\\_sedimentos.html](http://ponce.sdsu.edu/cuentos_presas_de_retencion_de_sedimentos.html)

Center, J. D. (s.f.). *Japan Dam Engineering Center*. Recuperado el 15 de agosto de 2015, de [http://www.jdec.or.jp/05english/02project\\_outline/03\\_recent\\_projects/04upgrading4.html](http://www.jdec.or.jp/05english/02project_outline/03_recent_projects/04upgrading4.html)

Center, J. D. (25 de Agosto de 2015). *Japan Dam Engineering Center*. Recuperado el 25 de Agosto de 2015, de Japan Dam Engineering Center: [www.jdec.or.jp/05english/02project\\_outline/03\\_recent\\_projects/04upgrading4.html](http://www.jdec.or.jp/05english/02project_outline/03_recent_projects/04upgrading4.html)

Choqueticlla Tapia, S. (2010). *Colmatación de la presa de Soraga por deposición de sedimentos*. Bolivia.

Cobo, R. (2008). Los Sedimentos de los Embalses Españoles. *Ingeniería del Agua*, 15 (4).

*Dam Removal Science and Decision Making*. (2002). U.S.A: The H. John Heinz III Center for Science, Economics and The Environment.

Dams, I. C. (1988). Dam Monitoring. General Considerations. *ICOLD*, 60.

Dams, I. C. (1987). Dam Safety Guidelines. *ICOLD*, 59.

Dams, I. C. (1999). Dams and Fishes. Review and Recommendations. *ICOLD*, 116.

Dams, I. C. (1999). Dealing with Reservoir Sedimentation. Guidelines and Case Studies. *ICOLD* , 115.

Dams, I. C. (2000). Rehabilitation of Dams and Appurtenant Works. State of Art and Case Studies. *ICOLD* , 119.

Dams, I. C. (1989). Sedimentation Control of Reservoirs. *ICOLD* , 67.

De Cea, C. J. (2012). *Presentación del Comité Técnico: Sedimentación en embalses*. II Jornada Anual de Innovación y tecnología internacional en presas y balsas. SPANCOLG.

De Graff, J. V., & Evans, J. E. (2013). *The Challenges of Dam Removal and River Restoration*. Colorado: The Geological Society of America.

De Oliveira Carvalho, N. (2000). *Reservoir Sedimentation Assessment Guideline*. Brasilia.

Diez-Cascón, J., & colaboradores, y. (2003). Presas y Embalses. *Ingeniería y Territorio* , 62.

Dragatec. (2015). *Combate a la Colmatación en Embalses y Represas*. Valdivia.

Fernández Izquierdo, F. (2014). *Presas y canales en la época de los Austrias*. Departamento de Historia Moderna y Contemporánea Instituto de Historia.

Frenette, M., & Julien, P. (1996). *Physical Processes governing reservoir sedimentation*. International Conference on Reservoir Sedimentation.

Friends of the Earth, A. R. (1999). *Dam Removal Success Stories*. U.S.A.

García, M., & Maza, J. (1985). *Manual de Ingeniería de Ríos*. México D.F.

Gaspar, J. D. (2011). *Condiciones del Embalse Matícora después del desborde producido en la depresión entre las cuencas de las quebradas Cachimbo y la cuenca del Río Cocuiza*. Caracas.

Gaspar, J. D. (2010). *Embalse sobre el Río Matícora, efectos de la creciente del día 28 de septiembre de 2010*. Caracas.

Gaspar, J. D. (2014). *Informe referente a las condiciones actuales del Embalse Matícora y posibles soluciones a corto plazo y a futuro*. Caracas.

Gaspar, J. D. (2014). *Informe referente a las soluciones inmediatas al problema de Dotación de Agua del Acuífero Falconiano desde el Embalse Matícora*. Caracas.

Gaspar, J. d. (2003). *Sedimentación de Embalses, Problemática y Soluciones. Situación de los embalses en Venezuela*. Caracas: Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela.

Gaspar, J. D. (2003). *Sedimentación de Embalses, problemática y soluciones. Situación de los embalses en Venezuela*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Gaspar, J. D. (2011). *Situación actual del Embalse Matícora, Posibles Soluciones a Implementar*. Caracas.

Ghani, A. A., Hin Joo Bong, C., & Liang, T. (2013). *Sediment Flushing using Tipping Flush Gate in an Open Storm Concrete Drain - A Case of Study in Nibong Tebal, Penang, Malaysia*. Proceedings of 2013 IAHR World.

González, C. A., Baeza Sanz, D., Cortázar Rubial, J., De Stefano, L., & Schmidt, G. (2009). *Liberando ríos: Propuestas de WWF para el desmantelamiento de presas en España*. Madrid, España: Artes Gráficas Palermo, S.L.

Gracia Sanchez, J. (2013). *Manual de Ingeniería de Ríos*.

Heydari, M. M., & Mousavi, R. (2011). *Reconstruction of Sheikhabaie Dam of Kashan- Determination of Sediments Filled in Dam Reservoir*. Iran.

Hoffert-Hay, D. (2008). *Small Dam Removal in Oregon: A guide for Project Managers*. Oregon.

ICOLD. (2011). *Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation*.

Jesús, G. J. (2014). *Informe referente a las condiciones actuales del Embalse Matícora y posibles soluciones a corto plazo y a futuro*. Caracas.

Jiang, E., Gao, H., Chen , J., Li, Y., Song, L., & Ren, Y. (S/A). *Preliminary Study on Sediment Dredging in a Reservoir with Pipes Powered by Natural Water Head Difference*. China: Institute of hydraulic research of Yellow River Conservancy Commission.

Knutsson, S., & Colaboradores. (2013). *Sedimentation Process and Useful Life of Mosul Dam Reservoir*. Iraq.

Kondolf, M., & colaboradores, y. (2014). *Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents*. California.

Lejon, A., Malm, B., & Nilsson, C. (s.f.). *Conflicts Associated with Dam Removal in Sweden*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art4/>

Llerena, A., & Sánchez, B. (s.f.). *Obras de Conservación de Suelos (Terrazas de formación sucesivas)*. Recuperado el 20 de Julio de 2015, de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/11/09obras-consvsuelos.pdf>

Llerena, A., & Sánchez, B. (2005). *Obras de Recuperación de Suelos y Recarga de Acuíferos*.

López Bermudez, F., & Gutierrez Escudero, D. (1982). *Estimación de la Erosión y Aterramientos de embalses en la cuenca hidrográfica del río Segura*. España.

López, J. L., Pérez Hernández, D., & Peñaranda, C. V. (s.f.). *Presas para el control de flujos torrenciales en el Estado Vargas, Venezuela*. Recuperado el 27 de julio de 2015, de [http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index\\_archivos/C/3.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index_archivos/C/3.pdf)

Madrid Gonzáles, S. *Los Desagües de Fondo en Presas*. Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Magirl, C. S., & Curran, C. A. (2010). *Sediment Management Strategies Associated With Dam Removal in the State of Washington*. Las Vegas: 2nd Joint Federal Interagency Conference.

Mahmood, K. (1987). *Reservoir Sedimentation. Impact, Extend, and Mitigation*. Washington.

Martín Vide, J. P. (2002). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona: Ediciones UPC.

McCully, P. (1996). *International Rivers*. Recuperado el 24 de agosto de 2015, de Getting Old: Dam Aging and Decommissioning: <http://www.internationalrivers.org/getting-old-dam-aging-and-decommissioning>

Meurer, M. (2010). *A Restauração Fluvial e a busca de Reconciliação da Europa com os seus cursos d'agua: o que o brasil deve aprender com esta experiencia*. Río Grande do Sul.

Michelena, S. E. (1997). *Apuntes sobre los dibujos hidráulicos de Leonardo Da Vinci*. Caracas: HIDROVEN.

Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Palau Ybars, A. (1998). *El vaciado de Embalses: Consideraciones ecológicas y Gestión Medioambiental*. España.

Palau Ybars, A. (S/A). *La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctivas*. Madrid: Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente.

Pelaez, J. T. (1958). Recrecimiento de Presas existentes y Métodos para la Construcción de presas por etapas sucesivas. *Revista de Obras Publicas* , 1-15.

Pereda Hernández, M.-J. (2006). *Obras de Mejora del Pantano de Almansa*. España.

Presas, C. N. (1976). *Grandes Presas. Experiencias Españolas en su Proyecto y Construcción*. Madrid: Ediciones Castilla.

Randle, T. J. (s.f.). *Committee on Dam Decommissioning*. Recuperado el 3 de agosto de 2015, de [http://www.usdams.org/c\\_decom.html](http://www.usdams.org/c_decom.html)

Randle, T. J. (2010). *Guidelines for assessing sediment-related effects of dam Removal*. Las Vegas: 2nd Joint Federal Interagency Conference.

Randle, T. J., & Greimann, B. (2006). *Reclamation Managing Water in the West. Erosion and Sedimentation Manual*. U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation.

renovables, M. d. (1995). *Revista El Agua: Grandes Presas Venezuela. Tomo I*

*Restoration of Physical Structures in a river*. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2015, de [http://www.unep.or.jp/ietc/publications/freshwater/watershed\\_manual/03\\_management-11.pdf](http://www.unep.or.jp/ietc/publications/freshwater/watershed_manual/03_management-11.pdf)

Salete, E. (s.f.). *Recrecimiento de Presas*. Recuperado el 16 de Agosto de 2015, de <https://sites.google.com/site/hidroneperiano/textos-docentes/recrecimiento-de-presas>

Sánchez L, K. (2010). *TEG: Traslase de agua desde el embalse Matícora como posible solución permanente al problema de sedimentación*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Sánchez, K. (2010). *Traslase de Agua desde El Embalse Matícora como posible solución permanente al problema de Sedimentación*. Caracas.

*Sediment Considerations for Potential Dam Removal Projects*. (2009). U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center.

Simons, D. B., & Senturk, F. (1992). *Sediment Transport Technology, Water and Sediment Dynamics*. Colorado: Water Resources Publications.

Strand, R. I., & Pemberton, E. L. (1982). *Reservoir Sedimentation. Technical Guideline for Bureau of Reclamation*. Colorado: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.

Suarez Villar, L. M. (1982). *Ingeniería de Presas. Obra de Toma, Descarga y Desviación*. Caracas: Ediciones Vega.

Suarez Villar, L. M. (1993). *Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos*. Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Renovables.

Torán Pelaez, J. (1959). Recrecimiento de Presas Existentes y Métodos para la construcción de presas por etapas sucesivas. *Revista de Obras Públicas*.

Van Rijn, L. C. (s.f.). *Sedimentation of Sand and Mud in Reservoirs in Rivers*. Recuperado el 26 de Julio de 2015, de <http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Reservoirsiltation2013.pdf>

Yang, C. T., Ahn, J., Boyd, P. M., Pridal, D. B., & Remus, J. I. (2013). *Lewis and Clark Reservoir Sedimentation and Flushing Simulations*. Proceedings of 2013 IAHR World Congress.

## **ANEXO A:**

### **CONCEPTOS FUNDAMENTALES O GLOSARIO**



Para la mejor comprensión de la información se presenta una breve definición de los conceptos fundamentales que se han considerado necesarios para la mejor comprensión de los diversos temas que se describen a lo largo del mismo; son ellos:

**Batimetría:**

Levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, tanto los levantamientos del fondo de mar, como el fondo de cursos de agua, de embalses, etc. Tiene como principal cometido la descripción de las características de la superficie bajo el nivel de las aguas. (Farjas, M. Levantamientos Batimétricos.)

**Cárcava:**

Es una zanja producto de la erosión, que generalmente sigue la pendiente máxima del terreno y constituye un cauce natural en donde se concentra y corre el agua proveniente de las lluvias. (Gaspar, 2003)

**Cauce:**

Zona por donde transcurre el caudal de un río, generado por el proceso erosivo de las aguas sobre el suelo.

**Corrientes De Densidad:**

Es el movimiento de un fluido, inducido por la gravedad, en el cual pasa a través o sobre otro fluido, debido a la diferencia de densidad entre ambos. (Morris y Fan,1998)

**Cuenca:**

Superficie que si fuera completamente impermeable el agua de lluvia drenaría por el sistema de cauces hasta un mismo punto de salida. (Apuntes de Hidrología Aplicada, UCAB)

**Embalse:**

Es una obra hidráulica que tiene como finalidad almacenar las aguas aportadas provenientes de un curso de agua y regularlas a manera de ser utilizadas posteriormente para cubrir las demandas. Los embalses son usados principalmente para regadíos, generación de hidroelectricidad, abastecimiento de agua, control de crecientes, navegación, entre otros usos. Su capacidad física viene dada por la configuración topográfica del sitio, mejor conocido como vaso de almacenamiento, que corresponde el espacio físico que será ocupado por las aguas del embalse. El funcionamiento de esta estructura dependerá de los aportes de sedimentos del río, la influencia de la lluvia, evaporación, entre otros parámetros.

**Erosión:**

Es el proceso mediante el cual un material de tierra o roca es desgastado y eliminado de cualquier superficie de la tierra, implica el desprendimiento y transporte del material degradado de un lugar a otro. (Fan, J; Morris,G.,1998)

**Flushing:**

Comprende el vaciado de un embalse mediante la abertura de compuertas que se encuentran en lugares bajos de la presa, para así establecer temporalmente el curso del río con los niveles de agua alcanzados en el embalse, erosionando un canal a través de los depósitos y vaciando los sedimentos erosionados a través de la obra de toma. (Morris y Fan, 1998)

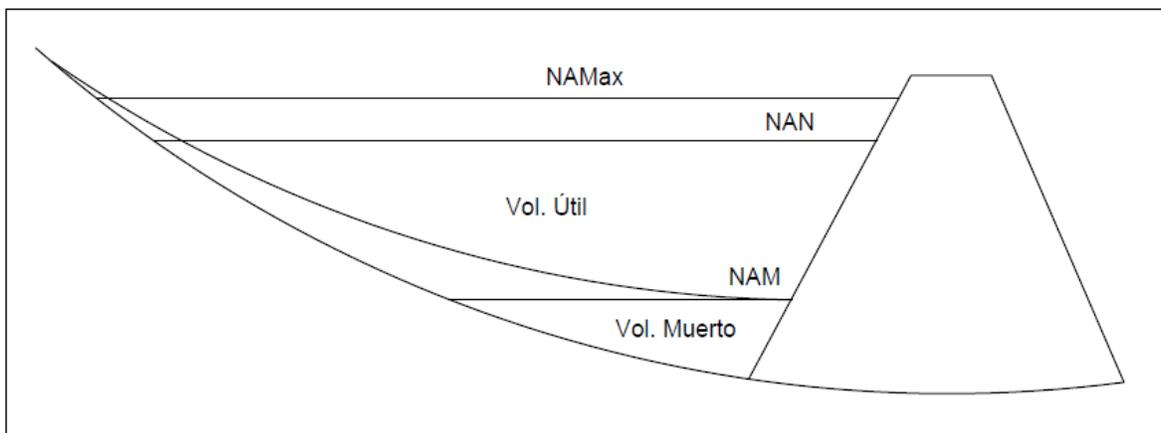
**Limnología:**

Rama de la ciencia que engloba el estudio de los procesos físicos y biológicos en los cuerpos de aguas continentales. (Morris, y Fan 1998)

**Niveles característicos de un embalse:**

- **Nivel de sedimentos**, altura que corresponde a la capacidad para sedimentos, se diseña para el almacenamiento de los sedimentos que puede acarrear el río.

- **Nivel de aguas mínimas**, altura correspondiente a la capacidad muerta y se corresponde con la cota mínima de toma, constituye el nivel mínimo del embalse.
- **Nivel de aguas normales**, altura resultante de la suma de la capacidad normal y la muerta, constituye al nivel tope para la condición normal del embalse.
- **Nivel de aguas máximas**, altura para una capacidad resultante de la suma de la capacidad muerta, capacidad de sedimentos y la capacidad normal.



**Fig. A-1** Niveles Característicos de un embalse

### Obras hidráulicas que componen un embalse:

- **Presas**, son estructuras hidráulicas construidas por piedra, tierra, concreto o materiales sueltos, que actúan como obstáculos en los ríos para retener el agua en el cauce, creando de esta manera un embalse. Su principal función es la retención de grandes cantidades de agua y regular los aportes de los materiales que se encuentran en suspensión y los arrastres sólidos que son transportados por los ríos.

- **Obras de toma**, son aquellas obras hidráulicas que permiten la salida del agua de forma regulada del embalse, a manera de poder satisfacer las demandas o controlar los excesos generados en casos de emergencia, mediante el desagüe del agua del embalse.
- **Descargas de Fondo**, son aquellas obras que tiene como fin evacuar en su totalidad o parcialmente el embalse en casos de emergencia, así como también extraer el mayor volumen de sedimentos depositados en el embalse. Son colocadas en el fondo del embalse (dentro del volumen muerto) y funcionan hidráulicamente como una toma, es importante mencionar que también existen descargas que son colocadas a niveles intermedios del embalse para hacer más fácil el vaciado del mismo.
- **Aliviaderos**, constituyen las estructuras hidráulicas que tienen como fin derivar y transportar todos los excesos de agua del embalse, garantizando la integridad física de la presa y sus demás componentes, así como evitar que se generen daños aguas abajo.
- **Obras de desvío**, tienen como función desviar de manera provisional las aguas del río, para permitir la construcción de otras obras del embalse, esto permite la disposición del sitio de las obras seco. Se puede realizar de dos maneras: desviando el río en su totalidad por un cauce artificial o dejando en seco sólo una parte del cauce, lo que permite el paso del río por el resto de la zona y que se ejecute sucesivamente la obra.

### **Tránsito de Sedimentos:**

Comprende cualquier método para manipular la geometría y/o hidráulica de un embalse, para pasar sedimentos a través o alrededor del embalse o de la cola de este, mientras se minimiza la deposición de los mismos. (Morris y Fan,1998)

### **Sedimentos:**

Son todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua. Según su comportamiento al ser transportado por el



flujo, el sedimento se puede diferenciar en dos grandes grupos: el del Fondo y el del Lavado o suspensión. (García y Maza, 1985)

**Sedimentación:**

Proceso de formación del suelo y ocurre cuando el agua de los ríos arrastra material sólido hasta las lagunas y mares, y estas al secarse dejan expuestos los componentes que a través del tiempo le fueron quitando el suelo en otras partes de su recorrido. (Instituto de Hidrológica Meteorología y Estudios Ambientales, 2004)

**Transporte de sedimentos:**

Transporte de sedimentos al estudio de los procesos de erosión, iniciación del movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas. (García y Maza, 1985)

**Vaso de almacenamiento:**

El vaso de almacenamiento es el espacio físico que va a ser ocupado por las aguas del embalse. (Bolinaga, 1999)

**Vida útil de un embalse:**

Es un período de tiempo representado usualmente en años, en el que el sedimento depositado no afecta la viabilidad económica y la sostenibilidad de la demanda de recursos hídricos del embalse. Generalmente la vida útil de un embalse es el período de tiempo en el que los embalses alcanzan el 50% de su capacidad de almacenamiento o cuando se ha alcanzado la capacidad o volumen muerto. (Issa, 2013)

**Volumen muerto:**

Es aquel volumen situado por debajo del nivel mínimo de operación, es decir, de la cota de toma más baja del embalse. Como su nombre lo indica, no es utilizable y tiene dos componentes: volumen para sedimentos y volumen muerto adicional. (Bolinaga, 1999)

**Volumen útil:**

Es aquel necesario para balancear las disponibilidades brutas y las demandas de usos de aprovechamiento. (Bolinaga, 1999).

**ANEXO B:**  
**IMÁGENES**



**B-1:** Vista de la cola del embalse, entrada del río Aracay. Entrando al embalse una creciente. Hay sedimentos finos en suspensión que terminan depositándose en la totalidad del embalse. Los sedimentos finos son limos, también se mantiene en suspensión arenas muy finas. Fuente: Ing. José De Jesús Gaspar.



**B-2:** Canal erosionado por efectos del método español en el embalse Santo Domingo. Fuente: Ing. José De Jesús Gaspar.



**B-3:** Esta foto muestra la entrada de sedimentos en el embalse Boconó. Todo el tramo del río que muestra playas arenosas, fue vaso de almacenamiento. Fuente: Ing. José De Jesús Gaspar.



**B-4:** Delta formado a la entrada del embalse Masparro. Tiene el mismo tiempo de funcionamiento de Boconó, sin embargo el aporte de sedimentos es bastante menor. Fuente: Ing. José De Jesús Gaspar.