

“ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL SEDIMENTO ACUMULADO EN EL SECTOR DE LA OBRA DE TOMA DEL EMBALSE SAN JACINTO”

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El transporte de sedimentos es un fenómeno natural que inicia con la pérdida del suelo por agentes atmosféricos principalmente como ser: la lluvia, el viento, la erosión y los cambios de temperatura (Tirado Bulnes, 2014).

La acumulación de sedimentos en un embalse es consecuencia de la alteración de las condiciones hidráulicas. Estos cambios alteran a su vez los equilibrios sedimentológicos que actúan sobre los procesos en que se transportan los sedimentos en suspensión y los de arrastre de fondo sedimentos (Lecaros Sánchez, 2011).

Entre las consecuencias directas de los procesos de colmatación en embalses están: pérdida de la capacidad de almacenamiento, taponamiento e inutilización de tomas de agua y desagües, daños en tuberías turbinas además de considerar los efectos del empuje de sedimentos sobre el cuerpo de las presas afectando a la estabilidad estructural de éstas (LHUMSS, 2002).

En el mundo se ha establecido a nivel general que los embalses pierden anualmente el 1% de su volumen de almacenamiento debido a la deposición de sedimentos (Atkinson, 1997).

El embalse San Jacinto objeto del presente estudio, no es ajeno a los problemas de colmatación y sedimentación, debido a que, en la época de diseño y construcción de dicha estructura hidráulica, a diferencia de la actualidad, antes no se disponía con las herramientas con que se dispone ahora, para una estimación que se apegue más a la realidad, respecto a la cantidad de sedimentos que se acumula al interior de un embalse.

Actualmente el embalse no cuenta con mucha información relacionada al fenómeno de ingreso y distribución de sedimentos al interior de su vaso de almacenamiento. debido a

esto, es toda una incertidumbre el grado de deposición de los sedimentos en el sector de la obra de toma.

Desde el inicio de operaciones, se realizaron cinco batimetrías en todo el embalse en los años: 1989, 1995, 2004, 2013, 2016. Ante eso, y formando parte del equipo del laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, en abril del año 2018 e realizó una batimetría a detalle del sector exclusivo de la obra de toma.

Con base en lo anterior, el trabajo de investigación tiene por objetivo la elaboración de un análisis de la distribución espacial y temporal del sedimento acumulado en el área de influencia donde se sitúa la obra de toma del embalse San Jacinto.

El documento se desarrolla a partir de la adecuación, corrección, uniformización de la información de las batimetrías realizadas en el embalse, para luego obtener: una identificación de patrones de deposición utilizando las superficies del relieve del sector de la toma aplicando programas computacionales tipo SIG; una cuantificación de volúmenes existentes y un análisis de variación de niveles de sedimento en el canal que direcciona el agua hacia el túnel de aducción.

El alcance de este documento aplica en un área parcial del embalse, de 77 x 90 m², en el lugar donde actualmente funciona la única toma del embalse, la misma consta de un túnel de conducción a presión de agua para las turbinas de generación eléctrica y una plataforma para el bombeo para el sistema de riego para el valle central de Tarija.

Lo que se pretende mediante el trabajo es generar y aportar información corregida y actualizada de la morfología del relieve actual del sector de la obra de toma y a través ello, analizar el proceso de sedimentación ocurrido en esta zona. Y a partir de esta información, pueda ser complementada en el futuro con otros estudios y análisis que permitan tomar acciones para asegurar el correcto funcionamiento de esta estructura hidráulica.

1.2. Problema de investigación

1.2.1. Planteamiento del problema.

La acumulación de sedimentos, es un factor que condiciona la vida útil de las estructuras hidráulicas, más aún en los embalses, lo que conlleva a la necesidad de conocer el volumen

que ocupan los sedimentos, su distribución y variación tanto espacial como temporal en el fondo de los embalses.

Por el tiempo transcurrido desde la construcción y junto con las acciones de erosión y sedimentación, el proyecto embalse San Jacinto no cuenta con datos hidrográficos y batimétricos actualizados a detalle del sector de la obra de toma del embalse, para conocer el grado de sedimentación en este sector, debido a que es de suma importancia que los sedimentos no pongan en riesgo el funcionamiento y operación del canal de captación de agua para el sistema de riego y central hidroeléctrica.

1.2.2. Formulación del problema.

¿La elaboración de un análisis de la distribución espacial y temporal del sedimento acumulado en el sector donde se emplaza la obra de toma del embalse San Jacinto, permitirá tomar acciones de prevención para asegurar la vida útil proyectada de esta estructura?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Analizar la distribución espacial y temporal del sedimento acumulado en el sector donde opera la obra de toma del embalse san Jacinto.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los que se citan a continuación:

- Analizar los estudios anteriores batimétricos realizados en el embalse
- Realizar el levantamiento batimétrico a detalle en el sector de la obra de toma para contar con información actualizada del relieve de este sector.
- Realizar la cuantificación de volúmenes de sedimento acumulados en el sector de la obra de toma.
- Identificar patrones de deposición de sedimentos en la zona de estudio.
- Analizar la distribución espacial del sedimento en el sector de la obra de toma.
- Generar perfiles transversales y longitudinales para analizar la variación de niveles de sedimentación.

1.4. Justificación

Elaborar un análisis de la distribución y variación tanto espacial como temporal del sedimento acumulado de la obra de toma del embalse San Jacinto, desarrollando información que podría ser útil, para que posteriormente se desarrollen estudios a profundidad de colmatación de sedimentos por parte de expertos, y que los mismos puedan ayudar tomar acciones que eviten problemas de funcionamiento de la obra de toma y al mismo tiempo asegurar el resto de vida útil del embalse.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Introducción

La sedimentación en embalses, es un proceso complejo y en pleno auge de investigaciones para su mejor comprensión del fenómeno, las consecuencias de la sedimentación básicamente vendrían a ser la reducción del volumen útil del vaso de almacenamiento y la consecuente reducción del periodo de servicio de vida útil del embalse.

El estudio de los procesos asociados a la sedimentación en embalses se ha abordado por diversos métodos de origen empírico, estadístico y de modelación numérica.

La sedimentación es originada por la pérdida de suelo que ocurre al interior de las cuencas hidrográficas, la pérdida de suelo es el resultado del complejo proceso de la erosión.



Figura 1. Secuencia del proceso de sedimentación.

En los siguientes párrafos se dará una descripción resumida de los procesos en la misma secuencia que indica la figura 1.

2.2. Erosión.

La erosión ocurre cuando las fuerzas de arrastre y transporte de materiales son superiores a las de resistencia a la remoción. Las fuerzas de desplazamiento operan por medio de agentes climáticos como ser: el viento, la lluvia, y las corrientes de agua. (LHUMSS, 2002)

La resistencia a lo largo del contacto de la corriente de agua con el suelo se le llama fricción hidráulica, la cual forma una zona de turbulencia en la corriente. El espesor y características dinámicas de esta capa dependen de la rugosidad de la línea del suelo y de la velocidad, dirección y tipo de flujo. La turbulencia está caracterizada por un flujo irregular en todas las direcciones. Las fuerzas generadas pueden desprender las partículas de suelo por fenómenos de arrastre, cavitación, etc. (Suárez D, 2001).

2.2.1. Mecanismos de erosión.

Según Suárez (2001, pág. 42). La mecánica de la erosión incluye tres procesos básicos:

- Desprendimiento de las partículas
- Transporte de las partículas desprendidas
- Depósito o sedimentación

2.2.1.1. Desprendimiento.

El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. La velocidad requerida al iniciar el movimiento aumenta, al aumentar el tamaño de las partículas. Para la mayoría de los suelos esta velocidad es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie (Gray & Sotir, 1996).

2.2.1.2. Transporte.

La velocidad requerida para el transporte de las partículas una vez se inició es menos que la requerida para el desprendimiento. La mayor parte de las partículas del suelo se transportan cerca de la superficie de la tierra a una altura no mayor a 1.0 metro. Aproximadamente 62 al 97% del total de las partículas es transportado en esta zona cerca de la superficie. (Gray & Sotir, 1996).

2.2.1.3. Depositación.

Al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad (Gray & Sotir, 1996).

2.2.2. Tipos de Erosión y su Control.

Existen múltiples clasificaciones de erosión según distintos autores, Suárez (2001, pág. 57) propone la siguiente clasificación.

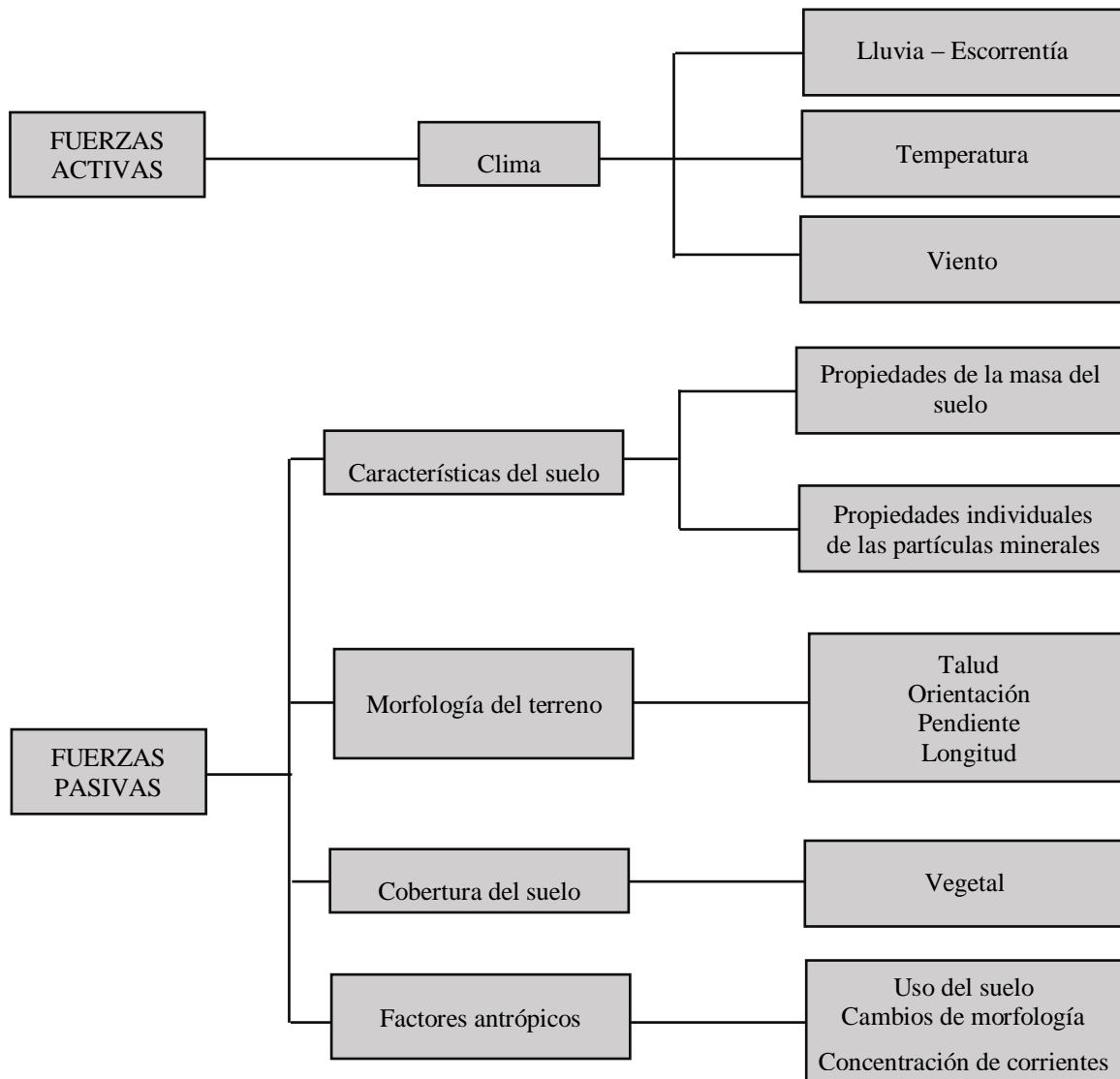


Figura 2. Mecanismo de erosión por acción del viento.

Fuente: (Suárez D, 2001, pág. 59).

A continuación, se hará una breve explicación a algunos de los procesos ilustrados en la figura 2.

2.2.2.1. Erosión por el viento.

La erosión por el viento ocurre cuando los suelos sin vegetación son expuestos a altas velocidades del viento. Cuando la velocidad del viento genera una fuerza tractiva superior

a las fuerzas gravitacionales y cohesivas de las partículas de suelo, el viento desprende las partículas y las transporta en suspensión.

Las partículas de menor tamaño (0.1 a 0.5 mm) son movidas por el viento en una forma de saltos o brinco. Las partículas gruesas se mueven rodando y las finas son transportadas en suspensión. La acción más visible es la suspensión en la cual se pueden observar tormentas de polvo. (Suárez D, 2001).

2.2.2.2. *Erosión por gotas de lluvia.*

La erosión por golpeo de la lluvia ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (Figura 3). Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía (Gray & Sotir, 1996).

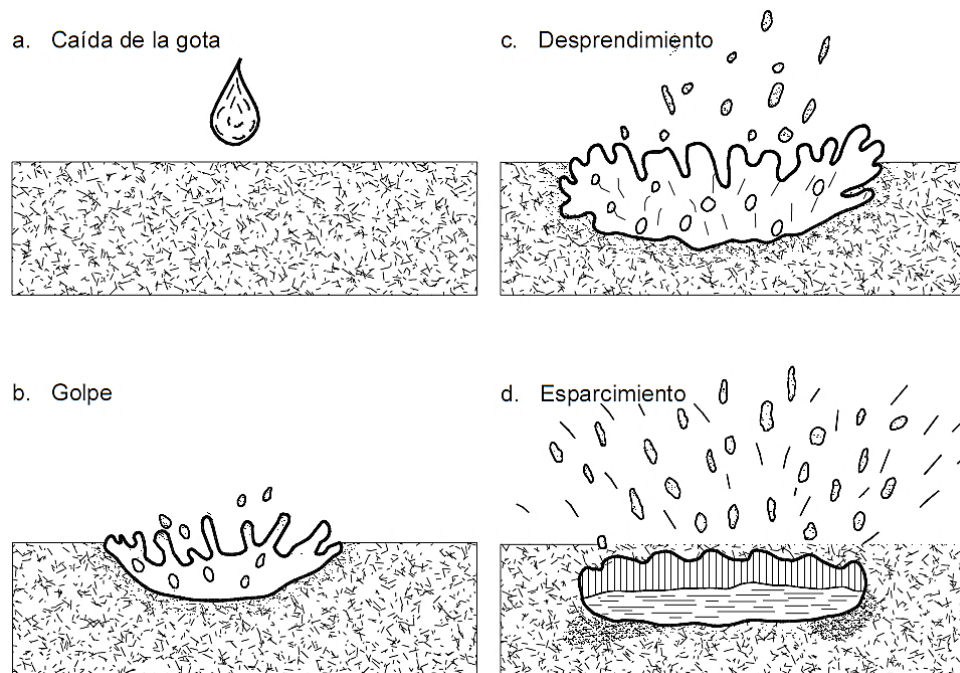


Figura 3. Erosión por golpeo de una gota de lluvia.

Fuente. Modificado de (Suárez D, 2001, pág. 61).

2.2.2.3. Erosión laminar.

La erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa. El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos residuales y en las zonas recientemente deforestadas (Choqueticlla T., 2010).



Figura 4. Erosión Laminar severa, zona de Khasa Pata Loma, Cuenca de Laka Laka.

Fuente. (LHUMSS, 2002, pág. 256).

2.2.2.4. Erosión en Surcos.

Consiste en el arrastre de elementos terrosos al correr el agua por la superficie de suelo ocasionando la formación de surcos o canales orientados más o menos normalmente a las curvas de nivel, debido a las irregularidades y desniveles del terreno. La formación de estos surcos, especialmente en aguaceros intensos, ocurre cuando el agua no escurre uniformemente por toda la superficie, si no que corre concentrada en corrientes de una potencia erosiva capaz de abrir pequeños surcos en el suelo, en forma de V, la cual puede pasar a forma de U (Suárez D, 2001).

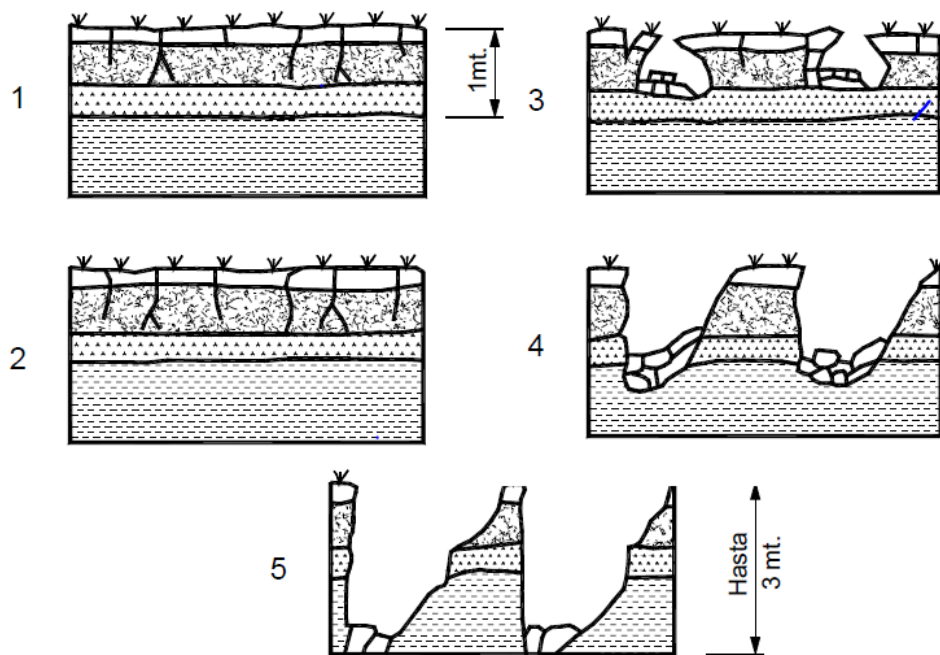


Figura 5. Procesos de formación de surcos.

Fuente. (Suárez D, 2001).



Figura 6. Erosión en surcos.

Fuente. (Suárez D, 2001).

2.2.2.5. Erosión en cárcavas.

Las cárcavas, llamadas también barrancas, son más amplias, más profundas (que los arroyuelos) y generalmente son de carácter permanente. Según Suárez (2001) se consideran cárcavas, a canales de erosión con una sección superior a un pie².

Estas cárcavas ya no pueden ser eliminadas con prácticas agrícolas, estas tienen una mayor capacidad de transporte y son mucho más largas que los surcos, suelen ser una evolución de varias líneas de surcos.

2.2.2.6. Erosión por deslizamientos.

Existe deslizamiento superficial y de fondo. El superficial se origina cuando una capa superficial de suelo, más o menos profunda, retiene gran cantidad de agua, el incremento de peso de la masa terrosa y la pérdida de consistencia puede dar como resultado final un resbalamiento de la capa de suelo hacia partes más bajas. Los de fondo pueden producirse cuando una capa de terreno permeable descansa sobre otra de naturaleza arcillosa; el agua al infiltrarse es muy posible que se detenga en la capa arcillosa y forme un plano lubricado, dando lugar a que los materiales que estén por encima de éste lleguen a deslizar si la componente de las fuerzas en la dirección y sentido del movimiento es superior a la motivada por el rozamiento (Aguilar Á., 2010).

2.2.3. Factores que rigen la erosión.

El fenómeno de erosión se puede estudiar desde el punto de vista de una cuenca, para la cual existen factores que rigen la erosión hídrica. Como tales aparecen el suelo, el relieve, la vegetación, el clima y la intervención humana.

2.2.3.1. Tipo de Suelo.

La erosibilidad de un suelo en particular está en función de variables como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Morgan, 2005). La textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad. Es interesante darse cuenta que son las partículas medianas las que más fácilmente se erosionan. Si bien las partículas más finas son más livianas, estas poseen una mayor superficie de contacto entre ellas y, por lo tanto, una mayor cohesividad, lo que las hace más resistentes a la erosión. Por otro lado,

las partículas más gruesas son más pesadas, lo que también aumenta su resistencia a la erosión. Sin embargo, las partículas medianas (0,1 a 1 mm) no poseen cohesividad ni peso relevante, por lo que son estas las más erosionables. Por esta razón, se dice que la variable decisiva, en términos de la erosión con respecto a la textura del suelo, es el porcentaje de limo, pues dicha clase textural se encuentra entre las clases arcilla y arena, siguiendo el mismo principio antes descrito (UNESCO, 2010, pág. 15).

La estructura y permeabilidad de un suelo también juegan un rol preponderante en la determinación de la erosibilidad, debido a su influencia en la cohesividad de las partículas y la infiltración del agua entre los conglomerados en cuestión. No olvidemos que la capacidad de infiltración de un suelo está en directa relación con la generación de escurrimiento superficial, responsable de la erosión laminar y otros procesos de erosión hídrica. Los suelos sin estructura definida, así como los suelos de estructura granular, por lo general poseen una alta capacidad de infiltración, es decir que son menos susceptibles a la erosión laminar. Por otro lado, los suelos de estructura masiva y plateada son más fáciles de erosionar, pues poseen tasas de infiltración menores (García-Chevesich, 2008).

2.2.3.2. Vegetación.

El papel de la cobertura vegetal u otro tipo reducen la energía de las gotas de lluvia y evita la compactación superficial. Gómez (2002) analiza distintos estados en la cobertura del suelo como lo son barbecho desnudo, praderas con vegetación densa, cultivos y bosque. El barbecho desnudo es una condición donde el suelo se halla en mayor susceptibilidad, pues nada amortigua el golpe de las gotas al caer al suelo. Las praderas con cobertura densa son ideales para combatir la erosión, pues amortigua la energía de las gotas de lluvia, no permite el salpique. En terrenos con cultivo, debido a las prácticas de labranza donde el suelo es disgregado y mientras el cultivo crece, la vulnerabilidad de este uso de suelo es bastante mayor que la anterior. Los bosques son óptimos en lo que se refiere a la protección contra la erosión, pues las copas de los árboles interceptan las lluvias, mientras que la capa orgánica presente debajo de estos ejerce un segundo amortiguamiento a la energía erosiva de las gotas (Aguilar Á., 2010).

La presencia de una cobertura vegetal no solo protege el suelo contra la erosión de impacto, sino que también brinda rugosidad al terreno por el que el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad y, por ende, su poder erosivo. Como regla general, mientras más densa y homogénea sea la cubierta vegetal, mayor es su efectividad en la disminución de la erosión laminar (García-Chevesich, 2008).

En la figura 7 indica que: Las raíces de las plantas ayudan a sostener el suelo en su lugar, siendo las raíces superficiales (A) las más adecuadas para controlar la erosión hídrica y eólica. Por otro lado, las raíces más profundas (B y C) ayudan a prevenir movimientos de masas en pendientes.

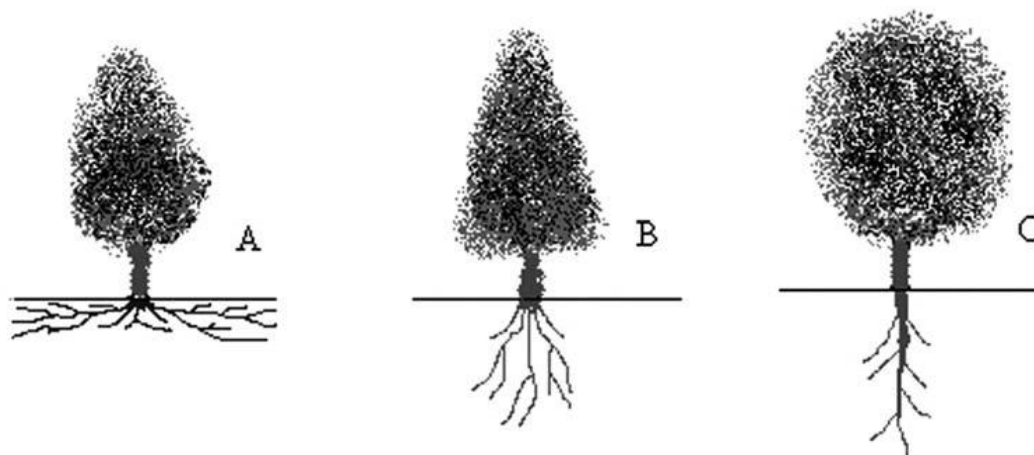


Figura 7. Vulnerabilidad a la erosión según la tipología de raíces.

Fuente. (UNESCO, 2010).

2.2.3.3.El clima.

La variable climática más importante es la lluvia, debido a su fuerte influencia en ciertos procesos de erosión hídrica (erosión de impacto, riles, cárcavas, etc.) (Morgan, 2005). Sin embargo, no todas las tormentas son iguales, por lo que existen algunas más erosivas que otras. Variables como cantidad de agua caída (mm) e intensidad de la tormenta (mm/hr), son las que determinan la erodabilidad del evento. Así, en una tormenta cuya intensidad es relativamente baja, las tasas de infiltración no serán superadas, por lo que no se producirá escurrimiento superficial, soslayando el proceso de erosión laminar, así como la formación de riles y cárcavas. Además, dicha tormenta no producirá erosión de impacto relevante,

pues el tamaño de sus gotas no contará con suficiente energía cinética como para desprender las partículas de suelo superficial desnudo. Por otro lado, una tormenta intensa, no sólo presenta un alto potencial de erosión de impacto, sino que también genera escorrentía superficial, dando lugar a los procesos erosivos anteriormente mencionados (UNESCO, 2010, pág. 10).

La duración de la tormenta, así como la distribución temporal de su intensidad, también son factores preponderantes en las tasas de erosión producidas. Una tormenta de larga duración provocará la contribución hídrica de toda la cuenca, aumentando los caudales en los cursos de agua y generando más escurrimiento superficial. Además, tormentas cuya intensidad máxima ocurre en su etapa final, cuando los suelos se encuentran ya saturados, también producirán una mayor cantidad de escurrimiento superficial. Esto sugiere que las condiciones iniciales de humedad en el suelo, es decir, el tiempo transcurrido desde la última tormenta, también es una variable influyente en las tasas de erosión hídrica para un suelo dado (UNESCO, 2010, pág. 10).

2.2.3.4. Velocidad del flujo.

La velocidad del caudal influye fuertemente en la erosión hídrica. Se sabe que la velocidad mínima para desprender y transportar una partícula de suelo está en función del diámetro de ésta. Sin embargo, una vez que la partícula ha sido desprendida, se necesitará menos energía para que esta siga en movimiento. Así, Hjulstrom (1935) determinó la velocidad mínima requerida para el desprendimiento (erosión), transporte y depositación de partículas de suelo, según su diámetro, relación que se ilustra en la Figura 8. Nótese que se necesitan mayores velocidades para el desprendimiento de una partícula dada. Sin embargo, ésta será transportada en forma de suspensión, sólo si la velocidad del caudal es alta o, en su defecto, si la partícula posee un diámetro reducido. De lo contrario, dicha partícula será depositada en un corto lapso (UNESCO, 2010).

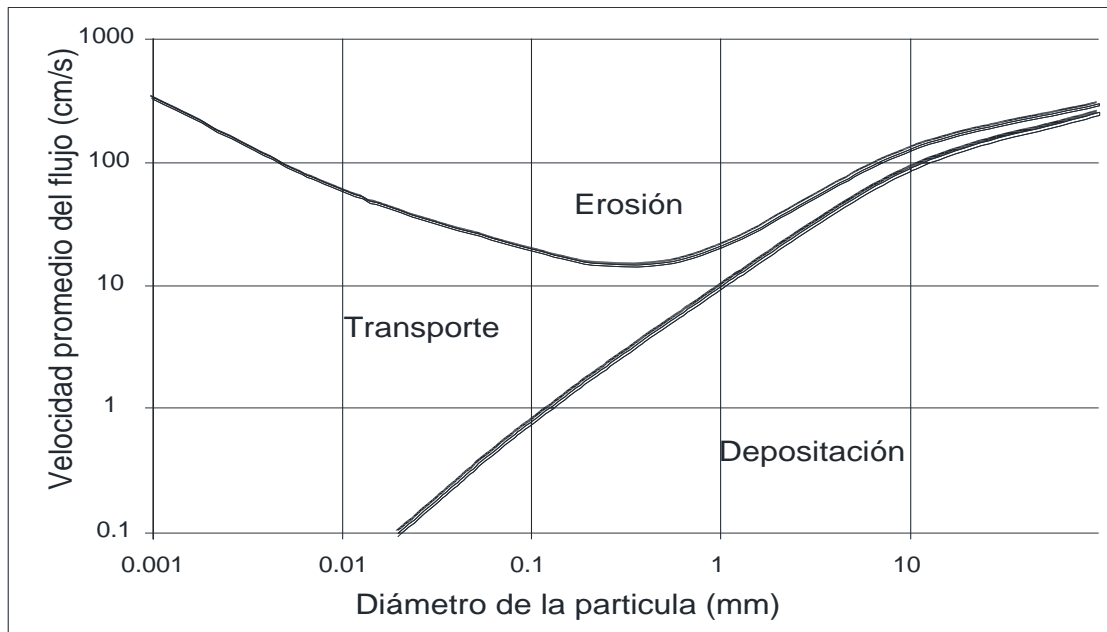


Figura 8. Diagrama de Hjulstrom.

Fuente. (UNESCO, 2010).

Actividades forestales como la tala rasa, raleos y construcción de caminos, entre otras, representan una enorme alteración en el ciclo hidrológico, lo que se traduce en una disminución de la interceptación de copa y la capacidad de infiltración de los suelos, debido al uso de maquinaria pesada. Dichos disturbios generan gran cantidad de erosión y sedimentación.

2.2.3.5. *Relieve.*

El relieve es un factor muy importante al momento de predecir la erosión y sedimentación en un sitio dado. La distancia horizontal en la que viaja una partícula de suelo desprendida por el impacto de una gota de lluvia, está en directa relación con la inclinación de la pendiente.

A medida que aumenta el grado de la pendiente, la velocidad y el volumen del agua de escorrentía aumentan y así su poder erosivo. Conforme aumenta el largo de la pendiente, el volumen de agua de escorrentía crece y por lo tanto su poder erosivo.

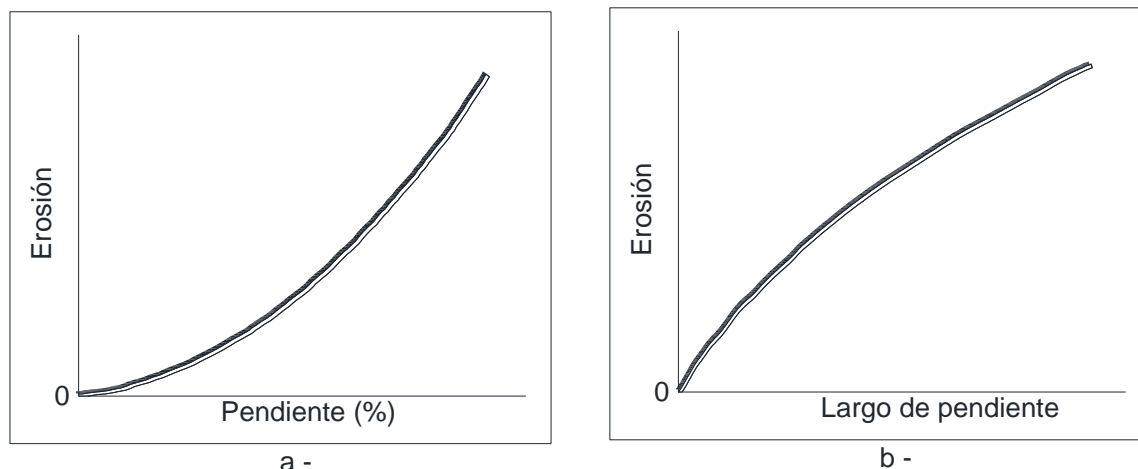


Figura 9. a) Curva Pendiente - Erosión. b) Relación entre largo de Pendiente Erosión.

Fuente. Modificado de: (Cubero F, 1995).

2.2.3.6. *Uso de la Tierra.*

El uso de la tierra es lejos el factor más importante dentro del conjunto de los factores que afectan la erosión y la sedimentación. Durante los últimos años se ha construido y urbanizado más terrenos que la suma de todas las áreas urbanas de los siglos anteriores.

Actividades del rubro agropecuario también provocan un daño permanente a los suelos, lo que se traduce en erosión y sedimentación. El sobrepastoreo no sólo disminuye la cubierta vegetal protectora de los suelos, sino que también compacta el suelo, produciendo más escurrimiento superficial y dando paso a distintos procesos erosivos. Por lo general, las prácticas agrícolas exponen el suelo al impacto de las gotas de lluvia, sumándose la erosión hídrica provocada por los canales de regadío.

2.2.4. **Determinación de la pérdida de suelo.**

Existen varios modelos para determinar áreas con riesgo de erosión y cuantificar las pérdidas de suelo, cada uno de ellos se basa en parámetros similares y en algunos casos en parámetros distintos, y los mismos son una aproximación al comportamiento real, Morgan (1997).

Según Gregory y Walling (1973) citado por Morgan (1977), existen varios tipos de modelos tales como figura 10.

Tipo	Descripción
Físico	Modelos a escala reducida contruidos en laboratorio; necesitan asumir similitudes dinámicas entre el modelo y el mundo real.
Analógico	Utiliza sistemas mecánicos o eléctricos análogos a los investigadores; p.ej. El fluido eléctrico utilizado para simular los flujos de agua.
Digital	Utilizan ordenadores para proceder grandes cantidades de datos.
(a) Con base física	describe los procesos incluidos en el modelo mediante ecuaciones matemáticas teniendo en cuenta las leyes de la conservación de la masa y de la energía.
(b) Estocástico	Se basa en la generación de series sintéticas de datos a partir de las características estadísticas de datos simples existentes; es útil para generar secuencias de entrada para modelos de base física y empírica cuando los datos son disponibles solo para pequeños periodos de observación.
(c) Empírico	basada en la identificación de las relaciones estadísticas significativas entre las variables importantes consideradas cuando se dispone de una base de datos razonable. Se realizan tres tipos de análisis; de caja negra: sólo se estudian las entradas y salidas principales; de caja gris: se conocen algunos detalles de cómo funciona el sistema; de caja blanca: se conocen todos los detalles de cómo opera el sistema.

Figura 10. Tipos de modelo según Morgan (1997).

Fuente. (Choqueticlla T., 2010).

El uso de un modelo puede simplificarse concentrándolo sobre los procesos que tengan mayor influencia en los resultados, ignorando los que tienen muy poco efecto.

Los métodos empíricos se basan en datos recogidos en campo, para obtener datos de los suelos, en registros históricos de precipitación, generan resultados que son específicos del lugar.

2.3. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es uno de los procesos físicos más complejos de la hidráulica a superficie libre debido a la fuerte interacción agua-sedimento, por lo cual no existen leyes teóricas que expliquen este proceso de forma definitiva. Las formulaciones teóricas

existentes son fruto de experimentaciones y observaciones realizadas en laboratorios a nivel mundial, donde los trabajos realizados han sido llevados a cabo durante años. Sin embargo, las diversas teorías expuestas no siempre son adaptables o aplicables a todas las condiciones que puedan presentarse en la naturaleza, por el contrario, esta tiene rangos de aplicación y validez muy específicos.

Se entiende por sedimento a 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. Al estudiar un tramo de río, el primero es el material que forma el fondo del cauce, y el segundo es el que no se encuentra dentro de ese material. Este último está formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión (García F. & Maza Á., 1985).

La diferencia principal en el comportamiento entre el material de fondo y el material de lavado consiste en que el primero depende de las características hidráulicas de la corriente y de sus características propias del material, el material de lavado es independiente de las características del flujo, dependerá del manejo integral que se le dé a la cuenca.

Se dice que alrededor del 90% o más del total del transporte sólido de un río corresponde al sedimento en suspensión, del cual el material del lavado es el causante en gran parte, por otro lado aproximadamente el 10 % restante es el material de arrastre de fondo (García F. & Maza Á., 1985).

2.3.1. Clasificación del Transporte de Sedimentos.

García & Maza (1985) proponen la siguiente clasificación en función a dos criterios: según el método de transporte y según el origen del material.

- Según el método de transporte, éste puede ser en suspensión y de fondo. El material en suspensión está sostenido por la turbulencia del flujo y se traslada con el caudal de agua, haciendo una mezcla. El material de fondo se traslada mediante tres formas: rodando, deslizando y saltando.

- Según el origen del material, éste puede provenir del cauce y de la cuenca. Hay que aclarar que esta clasificación se refiere a un evento de lluvias y crecida fluvial, ya que, como es lógico, a largo plazo todo el material es proveniente de la cuenca. El material del cauce se transporta en suspensión y de fondo. El material de la cuenca es un material fino que también se conoce como material de lavado de cuenca, y el método de transporte es en suspensión. El material en suspensión suma material de los dos orígenes, y el de fondo es sólo del cauce.

Asimismo, García & Maza (1985) señalan como límite para separar entre ambos tipos de transporte, si el sedimento posee un diámetro inferior a 0,0625 mm, de esta manera el transporte en suspensión es el que forma todas las partículas menores a dicho diámetro.

A continuación, se dará una breve explicación de algunos de los siguientes conceptos.

2.3.1.1. Sedimentos en Suspensión.

Los sedimentos en suspensión provienen de tres fuentes de transporte:

- Transporte de Sedimentos del Fondo en Suspensión.
- Transporte de Lavado.
- Transporte en Suspensión propiamente dicho.

Transporte de Sedimentos de Fondo en Suspensión

Este tipo de transporte está formado por el material del fondo del cauce, que es transportado por la corriente en suspensión, es decir, dentro del seno del líquido, arriba de la capa de fondo.

El flujo, debido a su velocidad y turbulencia, levanta las partículas del lecho y las mantiene en suspensión, aunque continuamente se produce un intercambio entre las partículas que están en la capa de fondo y las que se transportan en suspensión propiamente dicha.

La concentración del número de partículas en suspensión disminuye cuando la turbulencia y velocidad de la corriente decrece. Cuando esto ocurre, una cierta cantidad de partículas retorna al fondo. A este arrastre se le designa con el subíndice BS.

Transporte de Lavado

Está formado por el material fino que es transportado en suspensión y que no se encuentra representado en el material del fondo del cauce. Al considerar una sección determinada, todo el material de lavado procede de los tramos de aguas arriba. Su origen se encuentra en el suelo de la cuenca, erosionado por las gotas de lluvia, o proviene, en ocasiones, de la erosión que el mismo río produce en sus márgenes.

El transporte de lavado depende de la cantidad de partículas finas que la cuenca aporta al río bajo la acción de una lluvia. Como no es función de las características hidráulicas de la corriente, sólo se puede evaluar cuando se toma una muestra de agua con partículas en suspensión y se separa la porción que no está representada en la curva granulométrica del material del fondo. (García F. & Maza Á., 1985).

Transporte en Suspensión

Está formado por la totalidad de las partículas que son transportadas en suspensión. Por tanto, el transporte en suspensión es igual a la suma del “de fondo en suspensión” más el “de lavado”. Se designa con el subíndice S. Así, se cumple la relación:

$$g_S = g_{BS} + g_L$$

Cuando se toma una muestra de agua en una corriente natural, siempre se obtiene la concentración relacionada al transporte en suspensión porque en ella puede haber material de lavado y partículas que proceden del fondo. (García F. & Maza Á., 1985).

Una muestra que sólo tenga material de lavado se puede obtener en la zona de un río en el que las velocidades sean muy bajas y el flujo no pueda levantar las partículas del fondo. Una muestra que contenga únicamente material de fondo en suspensión se obtiene en un canal de laboratorio con fondo arenoso y donde se use agua limpia. En la naturaleza, este tipo de muestra se encuentra en algunos afluentes en la zona de montaña.

Para establecer cual muestra es de lavado y cual es de material de fondo es hacer pasar a través de la malla 200. Las partículas retenidas en la malla corresponden al material del fondo, y las que pasan y quedan en la charola, al material de lavado. (García & Maza, 1985).

Transporte de Fondo

El transporte de fondo está formado por el material del fondo transportado por la corriente, tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión. Por tanto, el transporte de fondo es igual a la suma del Arrastre en la Capa de Fondo más el Transporte de Fondo en Suspensión. Se designa con el subíndice BT. Así, se cumple la relación:

$$g_{BT} = g_B + g_{BS}$$

Arrastre en la capa de Fondo

El arrastre en la capa de fondo es el material del cauce arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo. A este arrastre se le designa con el subíndice B. (García & Maza, 1985).

Fórmulas de transporte de fondo

Existen fórmulas empíricas con la finalidad de estimar la cantidad de transporte de sedimentos, las más recomendable según el LHUMSS (2002) son las siguientes:

- Formulas de Transporte de Fondo:
 - Shields
 - Meyer - Peter – Muller
 - Einstein
 - Bed Form Tracking
 - Van Rijn
- Formulas de Transporte en Suspensión:
 - Einstein
 - Van Rijn.

Así mismo (LHUMSS, 2002) señala que la aplicación de las fórmulas de transporte de sedimento empíricas, debe entenderse que son valores que indican la capacidad de transporte que presenta un río, que muchas veces es un valor mayor a los valores de transporte reales que puede presentar realmente un río.

Con el avance de la tecnología, es posible en la actualidad realizar mediciones directas de transporte de sedimentos con instrumentos invasivos de tipo mecánico especializados. Las mediciones directas se realizan con muestreadores portátiles o en instalaciones fijas en el río.

2.4. Sedimentación en embalses, procesos, depósito y manejo.

Cuando se construye una presa, se genera un obstáculo a un río, y origina una retención de sedimento, dicho sedimento transportado por el río a consecuencia de la retención que genera la presa, se comportará según el siguiente mecanismo: al entrar la corriente al embalse, el material grueso se depositará según la disminución de la velocidad del agua por el efecto de ampliación del cauce y el crecimiento del tirante, formando en la cola del vaso una acumulación de sedimento grueso denominado delta. El sedimento más fino continuará hacia adentro del vaso como una corriente de densidad, para posteriormente al detenerse, depositarse en el fondo del mismo (Gracia Sánchez, 1986).

La mayor parte del material depositado en el delta reduce gradualmente la capacidad útil del embalse, en tanto que los depósitos del lecho reducen el volumen muerto. En cuanto el sedimento fino alcanza la represa y pasa a través de ésta, origina problemas de abrasión en las estructura, compuertas, tuberías, turbinas y otros equipos (LHUMSS, 2002).

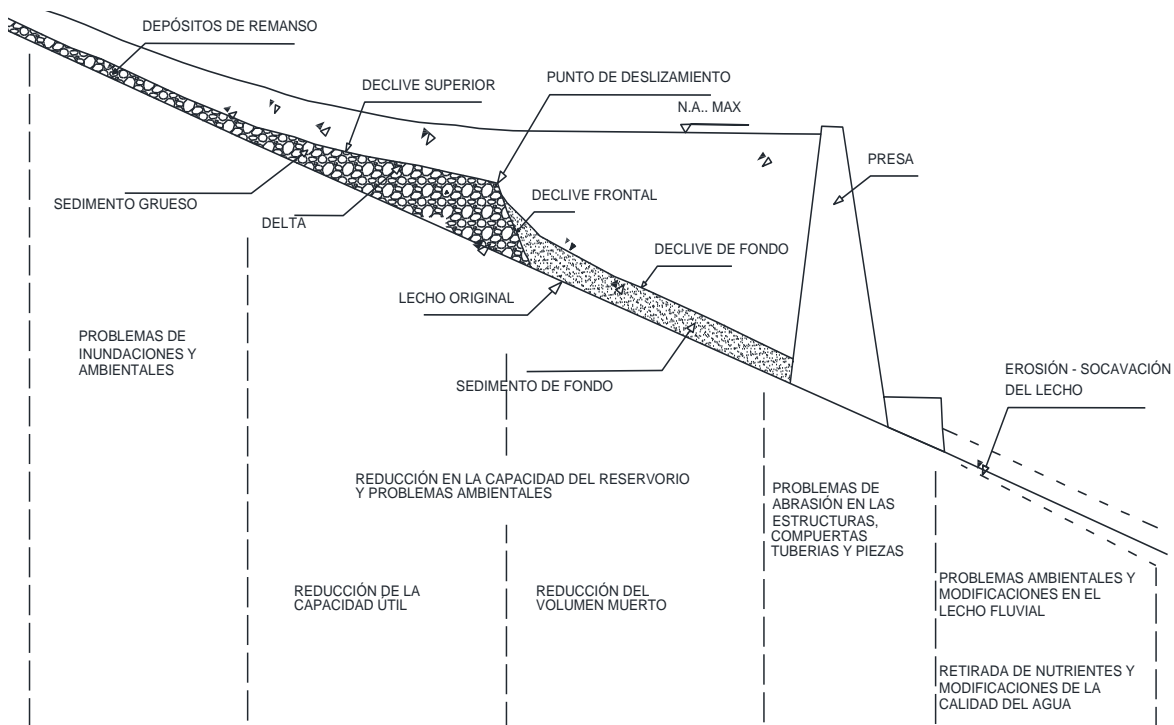


Figura 11. Patrón de deposición típico del sedimento al interior de un embalse.

Fuente. Modificado de: (LHUMSS, 2002).

El mencionado mecanismo de comportamiento del sedimento es, en realidad más complejo según: (García Camacho, 2005) ya que depende de otros factores como ser la estratificación del embalse por efecto de la radiación solar y la profundidad de éste, forma, dimensiones y características especiales del embalse, operación, características fisicoquímicas del sedimento y las características de la avenida de ingreso, entre otros.

El delta se moverá hacia adentro del embalse según las características de las avenidas y la variación de los niveles en el vaso. En los grandes embalses, la importancia de la formación del delta radica en el efecto que causa aguas arriba del río, y por el volumen que ocupa dentro del vaso puede llegar a ser tan acentuada como para poner en peligro las instalaciones en la cortina.

Cuando la presa no es muy grande y sus extracciones o derrames son muy frecuentes, es posible que el delta ocupe gran parte del vaso, y en tal caso el sedimento grueso sí constituye la principal pérdida de capacidad, ya que gran parte del material fino es muy probable que no sea retenido, pues continuará aguas abajo.

El material que se deposita en el fondo del embalse estará sujeto a una compactación al transcurrir el tiempo. Este efecto se verá acentuado al cambiar sensiblemente los niveles en el vaso, haciendo que se produzca un alternado secado y humedecimiento del material sedimentado. Esto induce a dos problemas importantes: uno es el cambio de volumen depositado a través del tiempo, que repercute en la cantidad de agua almacenada. Y el otro es la dificultad de remover sedimento altamente compactado.

Las corrientes de densidad, aunque son un fenómeno que fácilmente se puede generar en un laboratorio, sufren grandes dificultades para ser detectadas en campo. Por esta razón no ha sido posible definir una clara relación entre los trabajos teóricos y el fenómeno real. Esto es particularmente importante, porque el manejo de una corriente de densidad permitiría, en algunos vasos, aliviar el problema de sedimentación. Y es que, al conocer su comportamiento, tal vez podrían extraerse del embalse antes de que el material que transportan se sedimentara. (Gracia Sánchez, 1986).

Cuando la corriente de densidad no llega a formarse y solamente genera turbidez en el embalse, lo que generalmente ocurre con concentraciones bajas de sedimento, el problema principal no radica en la cantidad depositada, sino en la afectación de la calidad del agua. Dicho problema se vuelve fundamental desde el punto de vista ecológico, pues muchas veces se producen alteraciones de la flora y la fauna del almacenamiento en cuestión. Y esto altera la calidad del agua que, en condiciones, se emplea como potable para una población.

2.4.1. Sedimento que ingresa a un embalse.

Según Yang (2003) citado por Perea (2013), el flujo de sedimento que ingresa a un embalse es función de factores como la cantidad de intensidad de la lluvia, el tipo de suelo y formación geológica, la cobertura y uso del suelo, la topografía, la red de drenaje (densidad, forma, tamaño, pendiente, alineamiento), la escorrentía, la mineralogía y granulometría del sedimento y las características hidráulicas de los canales (Yang, 2003).

2.4.2. Cálculo del aporte de sedimentos.

Para determinar la cantidad de aporte de sedimento que entra a un vaso existen diferentes procedimientos: a) la medición directa dentro del embalse, b) el aforo del transporte de sedimento en la corriente de entrada, y c) el empleo de criterios de predicción. Evidentemente, la aplicación de cada uno de ellos dependerá de la información disponible y el grado de precisión en el cálculo.

Determinar la cantidad de material sólido que entra en un vaso es, sin duda, uno de los aspectos más importantes en el estudio del problema de sedimentación de un embalse. Pero también es la parte más difícil de evaluar, y donde se ha logrado menos avances. El principal medio para evitar el problema de pérdida de capacidad de un embalse es disminuir la erosión en las cuencas. Ésta, incluso, es la principal solución recomendada por diferentes autores.

2.4.2.1. Medición directa de sedimento depositado en un embalse.

Generalmente este tipo de mediciones se hacen empleando fotografía aérea y levantamiento topográfico cuando el vaso se vacía.

Actualmente se puede realizar levantamientos batimétricos, estos no requieren que el vaso se encuentre sin agua, al contrario, gracias a su potente ecosonda y el GPS, principales equipos del conjunto, poseen un alto grado de precisión. Esta forma de medición es y será la más utilizada en las mediciones directas de sedimentos.

La frecuencia con que deben hacerse estas mediciones de sedimento depositado depende del tipo de embalse y de la disponibilidad técnico-económica para realizarlas. En Argentina se hacen los levantamientos cada vez que se estima que el embalse ha perdido el 55% de su capacidad. En Kenia se hacen, al menos, una vez al año. En China se realizan los levantamientos antes y después de la época de avenidas (Gracia Sánchez, 1986).

2.4.2.2. Predicción del transporte de sedimento y aforo.

Existe una gran cantidad de métodos para hacer la cuantificación, métodos que ya hemos mencionado antes.

En el caso del material de lavado es más difícil la predicción, por lo cual se recomienda aforo directo. Tal procedimiento consiste en aforar de manera regular el material sólido que transporta una corriente durante cada año, al menos durante la época de avenidas. La bibliografía disponible para realizar tales mediciones es extensa. Sin embargo, en la práctica aún existen serias dificultades para hacer compatibles las mediciones de campo con los criterios existentes para calcular la cantidad de sedimento transportado.

El material que viaja por el fondo es, en especial, difícil de medir, y generalmente hay grandes discrepancias con los criterios de cálculo, como por ejemplo el de Meyer-Peter o el de Einstein-Brown, entre otros.

2.4.3. Criterios de predicción del aporte de sedimento.

De lo mencionado en los incisos anteriores, el apartado 2.4.2.1. es sólo aplicable a embalses ya construidos. Es obvio que se refleja claramente el depósito de sedimento en el embalse. El segundo apartado 2.4.2.2. también es un procedimiento confiable para la cuantificación del sedimento susceptible de depositarse en el embalse. Sin embargo, con ambos procedimientos no es posible determinar cuál sería el depósito si durante la vida del embalse cambian las condiciones de la cuenca de aporte o las características de la corriente.

Visto de otra manera, en los nuevos proyectos (embalses), donde las mediciones de transporte de sedimento no son suficientes o bien no existen, el problema de determinar el aporte de sedimento se vuelve difícil. Por esta razón se han desarrollado diversos métodos para determinar, a partir de las características de la cuenca y del régimen de lluvias, el posible aporte de sedimento. Lamentablemente, estos criterios no han sido suficientemente desarrollados, y los errores que pueden cometerse en el cálculo pueden llegar a ser muy grandes.

El criterio que hasta el momento parece ser el más prometedor es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), propuesta por Wischmeier & Smith. Este criterio, originalmente empleado para determinar el aporte de sedimento en pequeñas extensiones de terreno, ha sido modificado para emplearse en cuencas. (Gracia Sánchez, 1986).

2.4.4. Características de los sedimentos.

Durante el proceso de sedimentación, el tamaño del sedimento juega un rol fundamental. A continuación, se verá una mención a los factores de sedimentación de embalses.

2.4.4.1. Tamaño de las Partículas de Sedimentos.

Debido a que la clasificación del tamaño de las partículas es esencialmente arbitraria, en geología e ingeniería se emplean sistemas de gradación diferentes. En la hidráulica fluvial, normalmente se emplea la escala Udden-Wentworth, adoptada por el Subcommittee on Sediment Terminology de la American Geophysical Union (AGU) citado por Basile (2018, pág. 125), para arenas y sedimentos más gruesos el diámetro d se expresa generalmente en milímetros (mm) y para sedimentos finos ($d < 62.5 \mu\text{m}$) en micrones ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$).

A los efectos de mejorar la visualización gráfica de las distribuciones granulométricas y facilitar el cálculo de los parámetros estadísticos, Krumbein (1934) propuso que los límites de cada intervalo de clase en la escala Udden-Wentworth sean transformados logarítmicamente en valores $\varphi = -\log_2 d$ (con d en mm). De esta manera la escala sedimentológica ϕ (φ) luego de realizar un artificio matemático queda definida como:

$$\varphi = -\log_2 d = \frac{\log_{10} d}{\log_{10} 2} = -3.322 \log_{10} d \quad \text{Ecu.1}$$

Con d en mm. En la escala ϕ , los rangos de d en (mm), para cada intervalo de clase en la escala de Udden-Wentworth, se convierten en números enteros constantes e iguales a una unidad ϕ (ver Tabla 1).

Tabla 1.
Escala sedimentológica de Udden-Wentworth

Denominación	d (mm)	ϕ	d (μm)
Cantos rodados muy grandes	4096 – 2048	-12 a -11	
Cantos rodados grandes	2048 – 1024	-11 a -10	
Cantos rodados medianos	1024 – 512	-10 a -9	
Cantos rodados pequeños	512 – 256	-9 a -8	
Guijarros grandes	256 – 128	-8 a -7	
Guijarros pequeños	128 – 64	-7 a -6	
Grava muy gruesa	64 – 32	-6 a -5	
Grava gruesa	32 – 16	-5 a -4	
Grava mediana	16 – 8	-4 a -3	
Grava fina	8 – 4	-3 a -2	
Grava muy fina	4 – 2	-2 a -1	
Arena muy gruesa	2 – 1	-1 a 0	
Arena gruesa	1 – 1/2	0 a 1	
Arena mediana	1/2 – 1/4	1 a 2	
Arena fina	1/4 – 1/8	2 a 3	
Arena muy fina	1/8 – 1/16	3 a 4	125 – 62.5
Limo grueso	1/16 – 1/32	4 a 5	62.5 – 31.3
Limo mediano	1/32 – 1/64	5 a 6	31.3 – 15.6
Limo fino	1/64 – 1/128	6 a 7	15.6 – 7.80
Limo muy fino	1/128 – 1/256	7 a 8	7.8 – 3.90
Arcilla gruesa	1/256 – 1/512	8 a 9	3.9 – 1.95
Arcilla mediana	1/512 – 1/1024	9 a 10	1.95 – 0.98
Arcilla fina	1/1024 – 1/2048	10 a 11	0.98 – 0.49
Arcilla muy fina	1/2048 – 1/4096	11 a 12	0.49 – 0.24

Fuente: Modificado de Basile (2018).

2.4.4.2. Densidad y Peso Específico de los Depósitos de Sedimentos.

La densidad seca global in situ de sedimentos depositados, ρ_b , está vinculada a la porosidad p . A partir de la ecuación 1 se puede demostrar que:

$$\rho_b = (1 - p) \cdot \rho_s \quad \text{Ecu.2}$$

A partir de (2), el peso específico seco global de sedimentos se obtiene como:

$$\gamma_b = g \cdot \rho_b \quad \text{Ecu. 3}$$

La densidad seca global in situ juega un rol importante en la determinación de la vida útil de un embalse que será gradualmente colmatado por los sedimentos que allí se depositan.

Las densidades iniciales más bajas de los depósitos se observan cerca de la presa, donde se depositan los sedimentos finos (arcilla, limo). Los depósitos preponderantemente arcillosos, experimentan una marcada variación temporal de la densidad global.

En efecto, inicialmente la porosidad del depósito de estos sedimentos finos es muy elevada (baja densidad global) y gradualmente esta disminuye con el transcurso del tiempo, aumentando consecuentemente su densidad global. Una relación empírica para estimar la densidad seca global final al cabo de t años, de sedimentos depositados en embalses, fue propuesta por Lane y Koelzer (1953):

$$\rho_b(t) = \rho_{bl} + K \cdot \log t \quad \text{Ecu. 4}$$

donde t : tiempo en años, ρ_{bl} : densidad seca global in situ inicial después de un año de consolidación (kg/m^3) y K : coeficiente de consolidación. En la Tabla 2 se presentan los valores de ρ_{bl} y de K .

Tabla 2.

Valores de ρ_{bl} y de K , Lane y Koelzer (1953). Lane y Koelzer, (1953).

Operación del embalse	Arena		Limo		Arcilla	
	ρ_{bl}	K	ρ_{bl}	K	ρ_{bl}	K
Sedimento siempre sumergido	1550	0	1040	90	480	250
Normalmente moderados descensos de nivel	1550	0	1185	45	735	170
Normalmente grandes descensos de nivel	1550	0	1265	15	960	100
Normalmente vacío	1550	0	1310	0	1250	0

Fuente: Modificado de Basile (2018).

Miller (1953) desarrolló una ecuación que representa la densidad seca global promedio del depósito total de sedimentos en el reservorio:

$$\rho_b(t) = \rho_{bl} + K \cdot \left[\frac{t \cdot \log t}{(t-1)} - 0.434 \right] \quad \text{Ecu. 5}$$

El valor que se obtiene con la ecuación (4) es siempre menor que el que se determina con la ecuación (5).

Basile (2018) al mismo tiempo hace mención a la tabla 3 generada por Lara y Pemberton (1963), quienes analizaron 1316 muestras y obtuvieron valores ligeramente diferentes de densidad global inicial (ver Tabla 3). Lara y Pemberton utilizaron la siguiente clasificación: arcilla: $d < 4 \mu\text{m}$, limo: $4 \mu\text{m} < d < 62.5 \mu\text{m}$ y arena: $d > 62.5 \mu\text{m}$.

Tabla 3.

Valores de densidad seca global inicial, Lara y Pemberton (1963).

Tipo	Operación del embalse	ρ_{b1} (kg/m ³)		
		Arcilla	Limo	Arena
I	Sedimento siempre sumergido	415	1120	1550
II	Moderados a grandes descensos de nivel	560	1135	1550
III	Normalmente vacío	640	1150	1550
IV	Lecho del río	960	1170	1550

Fuente: Modificado de Basile (2018).

2.4.5. Métodos para aumentar la vida del embalse

Iniciada la construcción de la presa, específicamente al empezarse la ataguía, comienza la sedimentación. Esta es inevitable y avanza inexorablemente con el tiempo la cuestión es ¿cómo alargar la vida del embalse? Intentemos hacer una lista de los medios que se emplean, según las características y peculiaridades de cada embalse:

- Control de la erosión en la cuenca, mediante acciones de preservación.
- Disponer de un volumen muy grande reservado para el depósito de los sólidos.
- Incorporar a la presa sistemas de purga.
- Construir aguas arriba presas para la retención de los sedimentos.
- Remoción mecánica de los sedimentos.

Naturalmente el método más efectivo y seguro es el de atacar el problema desde su origen. Las cuencas que producen grandes cantidades de sedimentos presentan por lo general otros tipos de problemas que deben de tratarse en conjunto. Pero que básicamente responden al gran problema de la deforestación.

3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

3.1. Ubicación política y geográfica del área de estudio

El embalse San Jacinto, objeto del presente estudio se encuentra ubicado en la parte sur de Bolivia, departamento de Tarija, provincia Cercado, entre las serranías Sama y Cerrillos, sobre el río Tolomosa. Las coordenadas del sitio son las siguientes:

Latitud Sur: 21° 35' 45''

Longitud Oeste: 64° 43' 30''.

Vías de Acceso.

Vías de Acceso son primarias, la distancia hacia el embalse de San Jacinto, desde la ciudad de Tarija es de 5 Kilómetros.

Descripción del área de estudio

Clima

El clima en el sector es templado y seco típico de los valles de Tarija, cuyos datos registrados son:

Temperatura Promedio: 18 °C

Temperatura Máxima: 29 °C

Temperatura Mínima: 0 °C

Altitud

La zona de estudio se ubica en el valle de Tarija entre las serranías de Sama y Cerrillos, el Lago San Jacinto tiene una altura alrededor de 1.885 msnm.

Relieve topográfico

El área es típica y característica de la zona de los valles de Tarija y las montañas que circundan en la cual se notan la morfología es accidentada con protuberancia notada y depresiones considerables.



Figura 12. Ubicación geográfica de la presa San Jacinto.



Figura 13. Imagen satelital del embalse San Jacinto.



Figura 14. Ubicación de la estructura de la Obra de Toma.

3.2. Delimitación de la zona de estudio

En el marco del orden de compra (véase Anexo I.1) por parte de la empresa eléctrica ENDE Guaracachi S.A. para la realización del servicio del levantamiento batimétrico a detalle en el sector de la obra de Toma del embalse San Jacinto hacia el laboratorio de hidráulica e hidrología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho; la empresa en dicho convenio, más específico, en los términos de referencia establecidos por la institución (ENDE), definen que el área de medición no debe ser menor a una superficie de 3750 m².

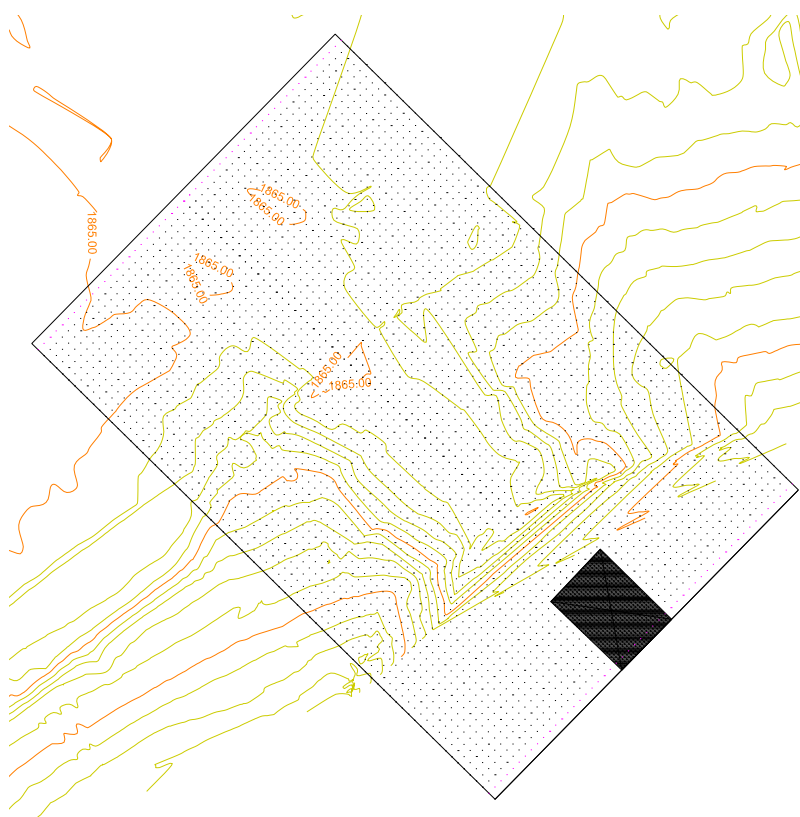


Figura 15. Área sugerida para la realización del servicio batimétrico.

Fuente. TDR servicio de batimetría sector obra de toma del proyecto múltiple San Jacinto.

Siendo así el área exigida por la entidad contratante. El laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho realiza el servicio batimétrico a detalle en el área de influencia de la estructura de obra de toma del embalse.

Los vértices del perímetro del levantamiento batimétrico son los siguientes:

Tabla 4.

Coordenadas de los vértices del área para levantamiento batimétrico 2018.

Punto	Este	Norte
V ₁	321333.03 m	7610390.97 m
V ₂	321387.98 m	7610444.92 m
V ₃	321324.93 m	7610509.14 m
V ₄	321269.98 m	7610455.20 m

Ante esos antecedentes mencionados, se define que, el área de estudio para el presente trabajo será la misma área definida para el levantamiento batimétrico por el laboratorio de hidráulica, al mismo tiempo las coordenadas de los vértices del sector de estudio son los mismos mencionados en la tabla 4 e ilustrados en la figura 16.



Figura 16. Área delimitada para el estudio.

3.3. Recopilación de información

La selección de los casos considerados se realizó básicamente por la disponibilidad de la información requerida para realizar los análisis que este Trabajo Final plantea.

La empresa consultora CARYGLOBAL S.R.L. fue la encargada de realizar la digitalización de la información que se encontraba en los planos físicos elaborados por el SNHN, y que dicha información digital obtenida para el desarrollo de este documento, consta del plano de las curvas de nivel (curvas cada 1 m), los perfiles transversales, y secciones de sus afluentes, todo lo anterior fue producto de un total de aproximado de 234700 puntos procesados según indica la información digital. En el Anexo I.2 indica los equipos utilizados para esta batimetría.

3.5.2. Batimetría 1995.

La batimetría del año 1995 fue realizada también por el SNHN. De este levantamiento batimétrico no se pudo obtener el informe técnico final que indique los instrumentos utilizados y otros detalles menores.

De esta batimetría se obtuvo los archivos digitales de la planimetría, secciones transversales y secciones de los afluentes del embalse. Este servicio fue elaborado utilizando el Datum de referencia PSAD 56.

La empresa consultora CARYGLOBAL S.R.L. fue la encargada de realizar la digitalización de la información que se encontraba en los planos físicos elaborados por el SNHN, y que dicha información digital obtenida para el desarrollo de este documento, consta del plano de las curvas de nivel (curvas cada 1 m), los perfiles transversales, y secciones de sus afluentes, todo lo anterior fue producto de un total de aproximado de 169000 puntos procesados según indica planos digitales.

3.5.3. Batimetría 2004.

Se sabe que la batimetría del año 2004 se fue realizada por la empresa consultora CARYGLOBAL S.R.L. al igual que en el anterior caso, no se pudo obtener el informe técnico final, pero sí consiguió los archivos digitales de la planimetría (curvas de nivel a cada 1 m), secciones transversales y secciones de los afluentes del embalse. Este servicio fue realizado utilizando el Datum de referencia PSAD 56.

3.5.4. Batimetría 2013.

La batimetría del año 2013 como en su mayoría, fue realizada por el servicio nacional de hidrografía naval, en el informe técnico final que se cuenta, indica que se empleó el sistema UTM en el Datum de referencia WGS84, para este fin, en la batimetría se empleó GPS Diferencial en modo estático y en modo dinámico, y cuyas líneas de medición batimétricas se realizaron cada 40 metros, obteniéndose un punto (este, norte, cota) por cada 5 segundos.

Para la medición de profundidades se empleó la Ecosonda South SDE 28D, es un ecosonda moderna digital, del tipo monohaz que permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y cuyo margen de error es de ± 0.04 m. En el Anexo I.2 indica los equipos utilizados para esta batimetría.

De esta batimetría se obtuvo información de las coordenadas de los puntos levantados, los planos en digital de las curvas de nivel (curvas cada 1 m) y los perfiles levantados.

3.5.5. Batimetría 2016.

Nuevamente este servicio fue ejecutado por el servicio nacional de Hidrografía Naval, de la misma manera que en la batimetría 2013, se utilizó el sistema UTM en el elipsoide de referencia WGS84.

En el informe técnico final de este servicio batimétrico indica que se empleó el sistema compuesto por una embarcación, ecosonda digital (profundidades), DGPS (planimetría). Las líneas batimétricas fueron trazadas cada 25 metros, obteniéndose un punto (este, norte, cota) por cada 1 segundo, lo que convierte a esta batimetría la de mayor densificación de puntos obtenidos. Se trazaron líneas de verificación de sondaje cada 200 metros en forma perpendicular a las líneas de sondaje principales.

Para la medición de profundidades se empleó la Ecosonda South SDE 28D, es un ecosonda moderna digital, del tipo monohaz que permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y cuyo margen de error es de ± 0.04 m. En el Anexo I.2 indica los equipos utilizados para esta batimetría.

De esta batimetría se obtuvo información solo de los planos en digital de las curvas de nivel (curvas cada 1 m) y los perfiles levantados.

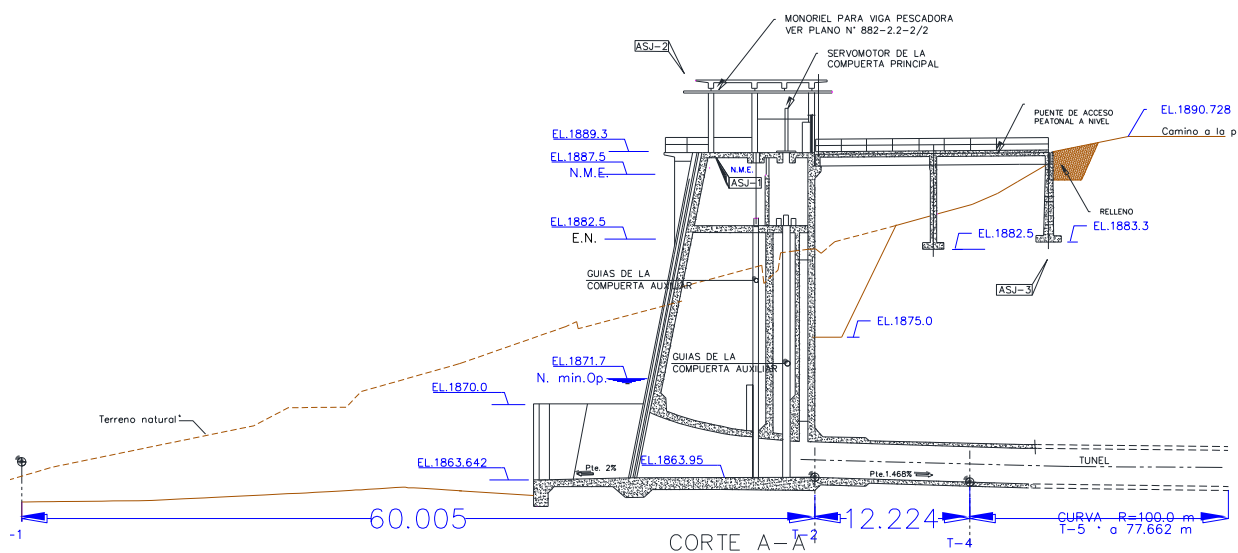


Figura 22. Plano escaneado de la estructura de la toma.

De la figura 22, se obtiene la información de los niveles característicos que son de interés para este estudio y se muestran a continuación:

Niveles característicos del embalse		
Nivel mínimo de operación	1871.7	m.s.n.m.
Nivel de solera de vertedero	1882.5	m.s.n.m.
Nivel de vertedero con presa inflable	1884	m.s.n.m.
Nivel de aguas normales embalsadas	1884	m.s.n.m.
Nivel máximo extraordinario	1887.5	m.s.n.m.
Cota de solera de bocatoma	1863.7	m.s.n.m.
Altura de la bocatoma de captación	5.0	m
Cota de solera del ingreso al túnel de aducción	1865	m.s.n.m.
Altura del túnel de aducción	2.6	m

La topografía del plano que muestra la figura 17. No se pudo evidenciar en su totalidad, pero se presume que fue realizada con base al Datum de referencia PSAD 56 (Provisional South American Datum). Esto claramente generaría problemas y no existiría superposición entre superficies (véase figura 23), debido a que las últimas batimetrías realizadas en el embalse (2013, 2016) utilizaron el elipsoide de referencia WGS 84. Siendo así, se procedió a la conversión de Datum de PSAD 56 a WGS 84 utilizando softwares de tipo SIG.

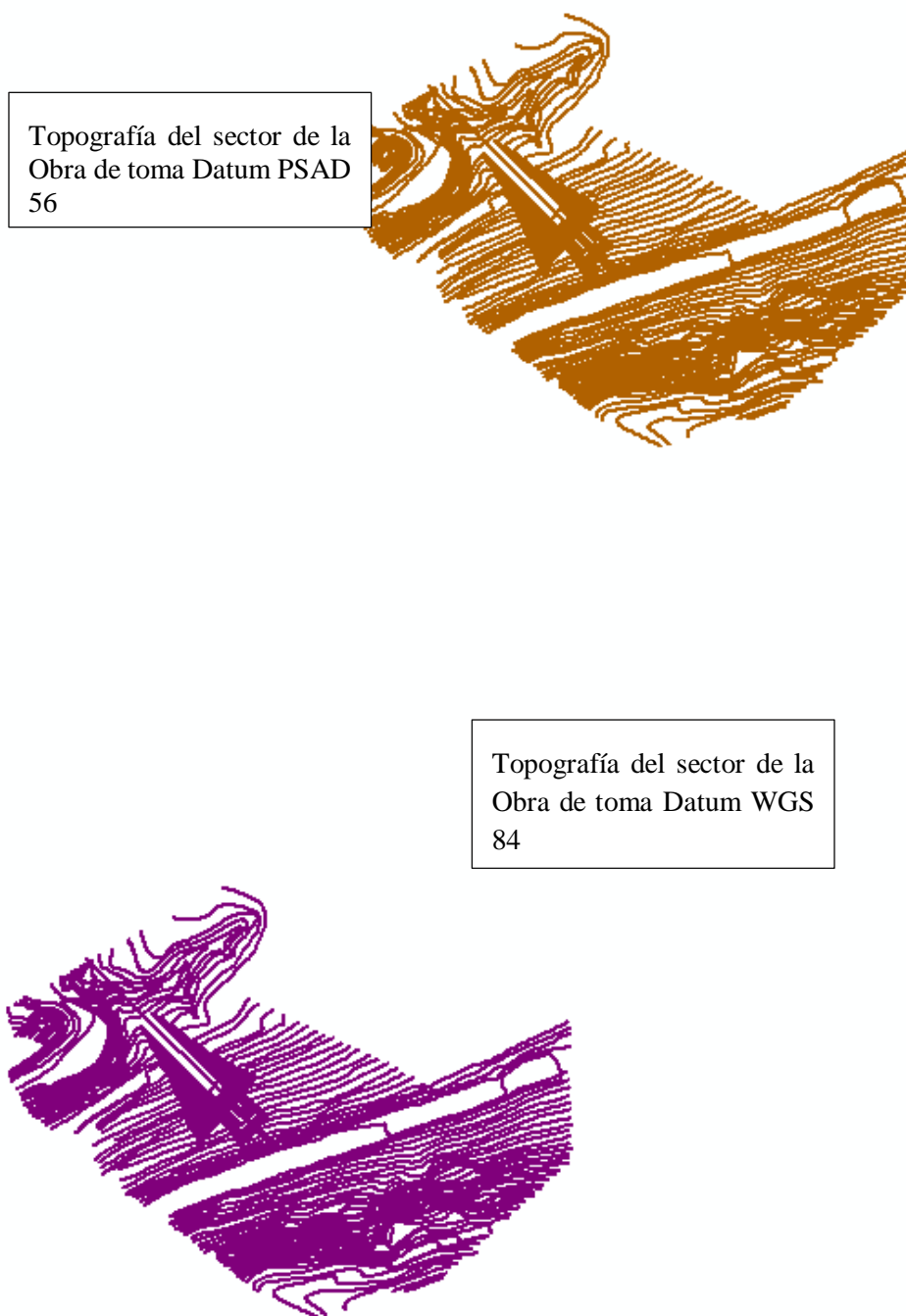


Figura 23. Desfase existente entre Datum WGS 84 y Datum PSAD 56.

Al igual que lo anterior, mediante ArcGis, se realizó la conversión de datums de PSAD 56 a WGS 84 las batimetrías de los años 1989,1995,2004 y la topografía de año 1984.

Se realizó una comprobación para ver si existe una correcta transformación de datums, (ver Anexo I.3 y I.4) se observa que existe una superposición correcta en Datum WGS 84.

Luego de tener la información en un mismo sistema de referencia, se generó un modelo de terreno digital (MTD), que se muestra en las figuras 24 y 25,

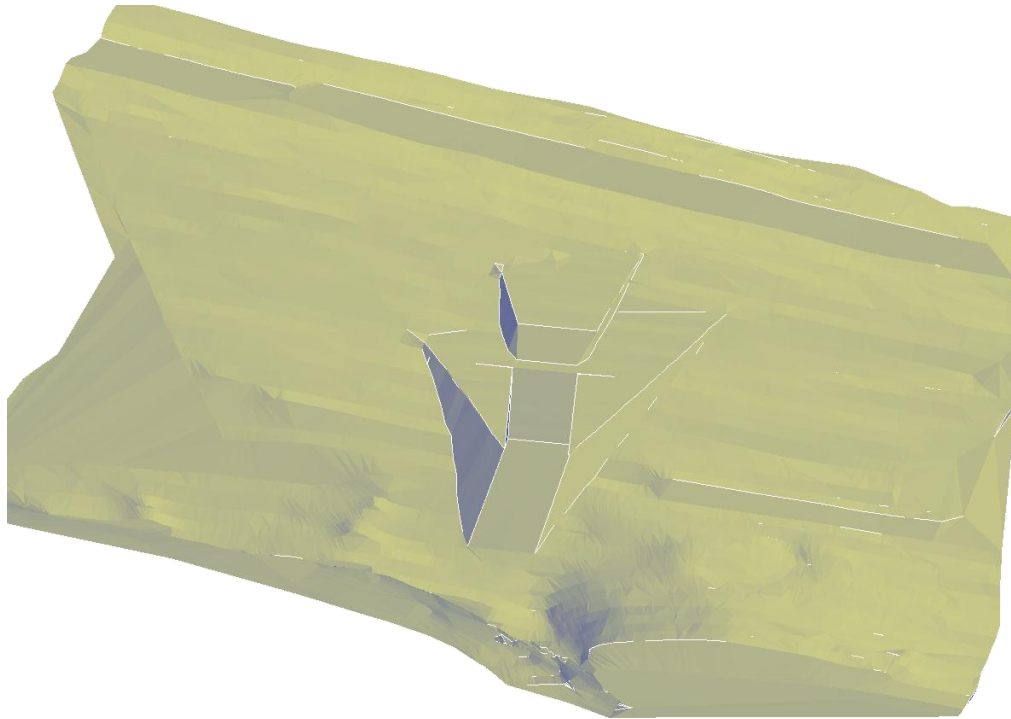


Figura 24. Morfología del relieve del sector de la obra de toma del embalse.

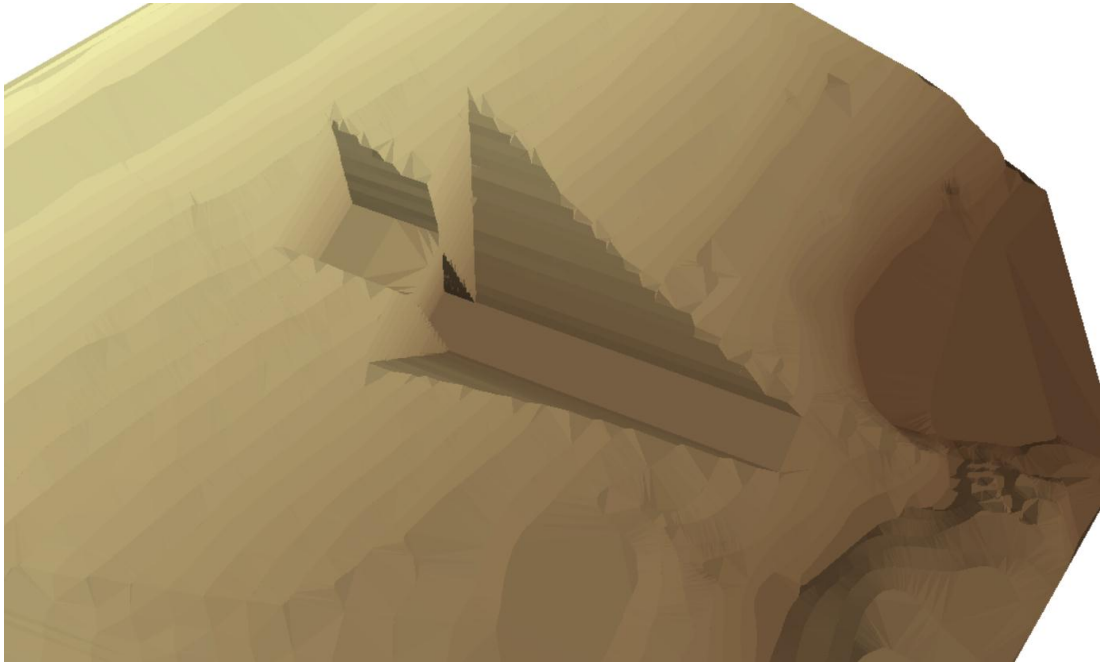


Figura 25. Morfología del relieve del sector de la obra de toma desde otra perspectiva.

4. CAMPAÑA DE TERRENO

4.1. Antecedentes

Debido a que, en ninguna de las anteriores batimetrías realizadas se hicieron mediciones a detalle para poder determinar el cambio que ha ocurrido en el área donde se sitúa la obra de toma del embalse San Jacinto. Ante esa situación, el proyecto múltiple San Jacinto, institución dependiente de la Gobernación del departamento de Tarija firma un convenio de cooperación mutua con la facultad de ciencias y tecnología de la universidad Juan Misael Saracho, y posteriormente la empresa eléctrica ENDE Guaracachi S.A., que es la encargada de la operación, mantenimiento y administración del embalse San Jacinto, mediante una orden de compra hacia el laboratorio de hidráulica e hidrología, requiere el levantamiento batimétrico a detalle en el sector de la obra de toma del embalse.

4.2. Objetivo

El objetivo principal de la campaña de terreno correspondió a complementar los antecedentes batimétricos disponibles, para obtener una mejor caracterización del relieve del lecho del sector de la obra de toma y contar con información actualizada respecto al grado de sedimentación que se ha ocurrido durante el período de operación transcurrido en el embalse.

Esta nueva batimetría dio origen a una superficie la cual fue utilizada para ser comparada con la superficie topográfica de 1984 y además de ello permitió evaluar el grado de utilización de las anteriores batimetrías para el análisis específico del área en estudio.

La realización de este levantamiento batimétrico a detalle es y será de vital importancia, no solo para la elaboración de este estudio, sino que también será útil para futuros estudios en este sector. ya que, los análisis, conclusiones y recomendaciones estarán ligados a la morfología del relieve que entregue el levantamiento batimétrico.

4.3. Descripción de las actividades

Los días 5 y 13 de abril del 2018 se llevó a cabo la campaña de terreno en el sector de la obra de toma del embalse al mando del ingeniero Moisés Perales, docente investigador y jefe a cargo del laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la universidad autónoma Juan

Misael Saracho. Además de esas fechas, posteriormente se retornó al lugar a realizar una complementación de datos el día 4 de julio del 2018.



Figura 26. Componentes del equipo para medición batimétrica Z-BOAT 1800.

En la Figura 26 se muestra el equipamiento utilizado en la campaña de terreno en el embalse San Jacinto. En esta se puede ver la ecosonda, identificada con el número 1 e instalada dentro del equipo del sistema de flotación. La ecosonda monohaz de doble frecuencia Ecotrac CV 100 que proporciona la posibilidad de obtener los datos de forma completamente digital, la precisión de este equipo es, según la configuración en el canal en que se encuentre es: 200kHz-0.01 m +/- 0.1% profundidad; 33kHz-0.10 m +/- 0.1%. y cuyo rango de profundidades es de 30 cm hasta 600 m (ver Anexo I.5). Con este modelo, se elimina la impresión en papel en favor de la grabación de datos en el PC que actúa como sistema de adquisición. La antena GPS (2) es la que proporciona la ubicación en tiempo real de la embarcación. El sistema de flotación (3) mediante el Z-BOAT1800. Este equipo tiene la ventaja de que, en vez de movilizar un barco tripulado o de poner a gente en el agua en una localización peligrosa, se pone en marcha esta embarcación de manejo a control

remoto. La ecosonda del Z-Boat y el GPS se integran con un sistema de transmisión de radio módem permitiendo que el operador vea la pista del barco en tiempo real en el ordenador portátil desde la orilla (ver figura 29).

Este levantamiento batimétrico, a requerimiento del contratante se hizo las líneas de sondeaje tanto perpendiculares como longitudinales al eje del túnel de aducción, a 1 metro de distancia entre líneas como se observa en la figura 27.

Para la batimetría del 2018 se empleó el sistema de unidades UTM y en el sistema de referencia WGS84.



Figura 27. Líneas de sondeo longitudinales y transversales.



Figura 28. Equipo Z-Boat realizando el levantamiento batimétrico.



Figura 29. Manejo del Z-BOAT a través de imagen en tiempo real.

4.4. Procesamiento de datos obtenidos

Mediante el software Hypack 16.a. programa de licencia no libre y código cerrado, al cual, el laboratorio de hidráulica e hidrología de la universidad tiene acceso gracias a que cuenta con la llave o código que le fue otorgado por la adquisición del equipo para la realización de levantamientos batimétricos.

El Hypack es el software que está involucrado en todo el proceso de un levantamiento batimétrico, tanto desde la etapa de diseño y planificación, seguido del levantamiento batimétrico mismo, y finalmente el procesamiento de los datos obtenidos.

Se realizó el análisis de la información de los perfiles de las profundidades medidas, donde fueron corregidos y depurados los datos incoherentes e incorrectos para finalmente obtener como producto el relieve subacuático a detalle del sector donde se encuentra la obra de toma del embalse San Jacinto.

Resultado de la campaña de terreno se generó una superficie actualizada producto de una alta densidad de puntos, alrededor de 16000 puntos levantados que permitieron describir de manera precisa el relieve morfológico del sector de la obra de toma.

4.5. Dificultades suscitadas

Durante la realización del levantamiento batimétrico surgieron inconvenientes, que de algún u otro modo dificultaron el desarrollo del levantamiento batimétrico, llegando incluso a afectar la precisión del mismo en algunos sectores del área de medición.

En el anexo II.1 se muestra fotografías de la plataforma flotante para que alberga las bombas hidráulicas. Dicha plataforma no permitió que el equipo realizará mediciones en el lugar, el cual, justamente es el ingreso al túnel de captación por gravedad.

Otro de las dificultades fue la densa formación de plantas acuáticas características del embalse “Jacintos” (véase Anexos II.2. y II.3.), esta excesiva acumulación de plantas, cuyas raíces se encontraba completamente entrelazadas entre sí, a pesar de que se hizo el intento de limpiar el sector, no se pudo en su totalidad.

A consecuencia también de los “Jacintos”, estos ocasionaron que las hélices del bote de medición Z-Boat quedaran atascadas por las raíces de estas plantas (véase Anexo II.4), y por ello no se pudo continuar con las mediciones debido a la dificultad en la navegabilidad por estos sectores.

Otra de los inconvenientes fue, que no se pudo navegar con el equipo por las orillas, por el hecho de ser aguas poco profundas y se debió resguardar la integridad del equipo de medición.

5. ANÁLISIS

5.1. Análisis de volúmenes de agua

Determinar la cantidad de volúmenes de agua es esencial para el seguimiento y control en los embalses, tal es así que a continuación se dará a conocer el volumen de que ocupa el agua en el sector donde se ubica la obra de toma del embalse.

Se determinó la cuantificación de volúmenes de agua en el sector con tres diferentes formas. La primera manera de forma más antigua, utilizando el método de áreas entre curvas de nivel. Para ello se procedió a planimetrar las áreas abarcadas entre cada una de las curvas de nivel. Luego, si se calcula la semisuma de las áreas entre curvas y se multiplican por el intervalo entre las mismas, se obtiene el volumen almacenado entre curvas o volumen parcial. Si se acumulan luego los volúmenes parciales, se obtienen el volumen almacenado por cada cota o altura sobre el fondo.

Otro de los métodos fue utilizando Civil 3D, en donde se hizo una diferencia entre la superficie de una batimetría y la superficie plana del espejo de agua a la cota 1884 msnm.

Además de Civil 3D, se utilizó el paquete computacional ArcGIS, para ello se requirió de la creación de un DEM (Digital Earth Model) por sus siglas en inglés, modelo de terreno digital (MTD) en castellano.

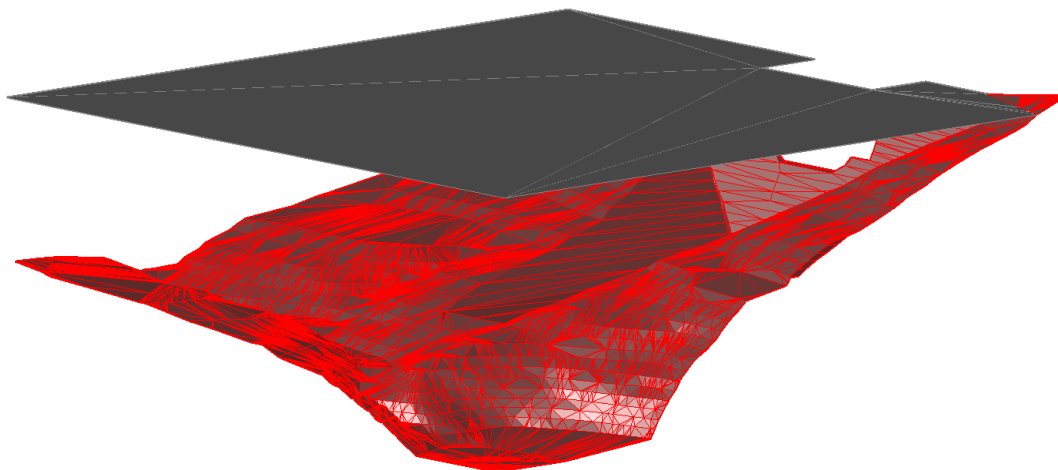


Figura 30. Superficie de la topografía del año 1984 (Civil 3D).

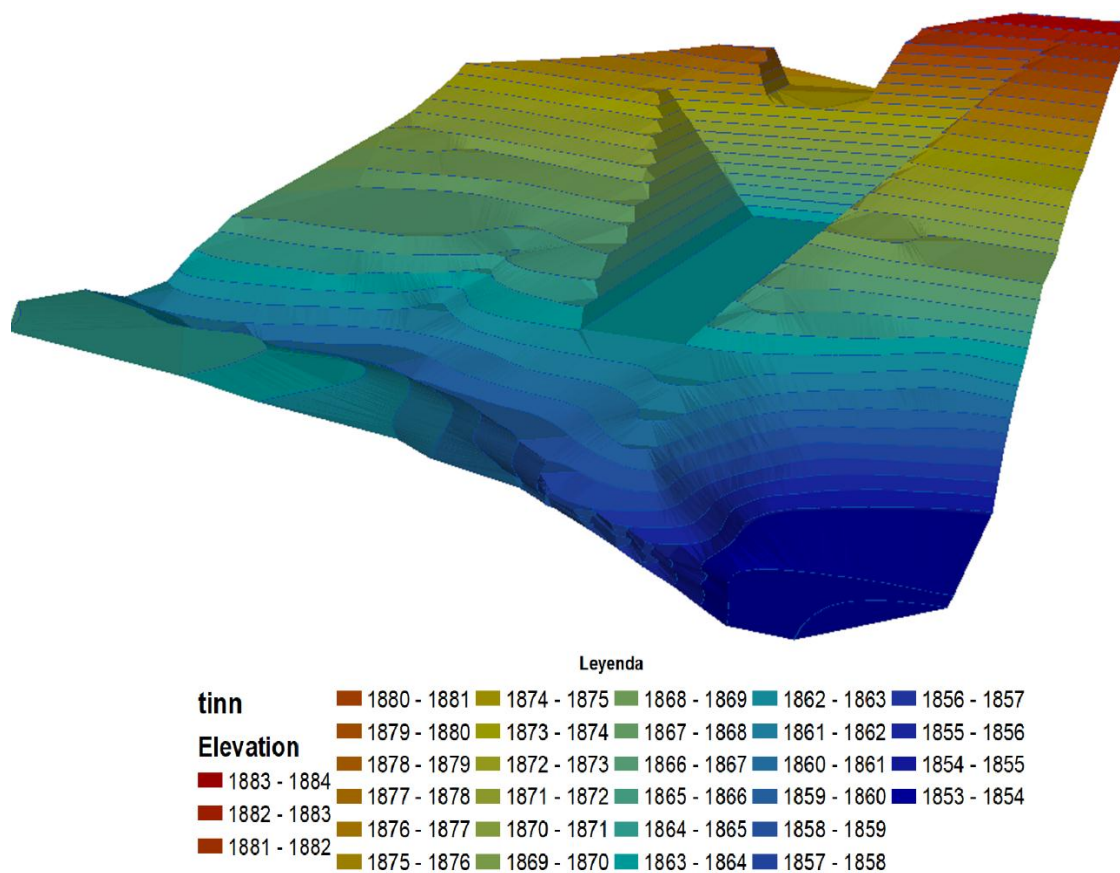


Figura 31. Modelo de terreno Digital topografía 1984 (ArcGIS).

En tabla 6 y figura 32, se muestra la curva característica para la topografía del año 1984.

Tabla 6.

Curva Cota – Volumen para la Topografía del año 1984.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ³]
1853	0	0		0	0
1854	337.07	337.07	168.54	168.54	168.54
1855	40.34	377.41	357.24	357.24	525.78
1856	34.94	412.35	394.88	394.88	920.66
1857	40.75	453.1	432.73	432.73	1353.38
1858	59.08	512.18	482.64	482.64	1836.02
1859	123.35	635.53	573.86	573.86	2409.88
1860	175.4	810.93	723.23	723.23	3133.11
1861	303.12	1114.05	962.49	962.49	4095.60
1862	337.9	1451.95	1283.00	1283.00	5378.60

1863	792.9	2244.85	1848.40	1848.40	7227.00
1864	420.94	2665.79	2455.32	2455.32	9682.32
1865	614.64	3280.43	2973.11	2973.11	12655.43
1866	347.8	3628.23	3454.33	3454.33	16109.76
1867	546.06	4174.29	3901.26	3901.26	20011.02
1868	257.62	4431.91	4303.10	4303.10	24314.12
1869	416.92	4848.83	4640.37	4640.37	28954.49
1870	246.73	5095.56	4972.20	4972.20	33926.68
1871	222.8	5318.36	5206.96	5206.96	39133.64
1872	204.9	5523.26	5420.81	5420.81	44554.45
1873	207	5730.26	5626.76	5626.76	50181.21
1874	195.05	5925.31	5827.79	5827.79	56009.00
1875	165.3	6090.61	6007.96	6007.96	62016.96
1876	145.6	6236.21	6163.41	6163.41	68180.37
1877	111.5	6347.71	6291.96	6291.96	74472.33
1878	84.83	6432.54	6390.13	6390.13	80862.45
1879	77.32	6509.86	6471.20	6471.20	87333.65
1880	52.2	6562.06	6535.96	6535.96	93869.61
1881	41.64	6603.7	6582.88	6582.88	100452.49
1882	66.8	6670.5	6637.10	6637.10	107089.59
1883	52.85	6723.35	6696.93	6696.93	113786.52
1884	28.9	6752.25	6737.80	6737.80	120524.32

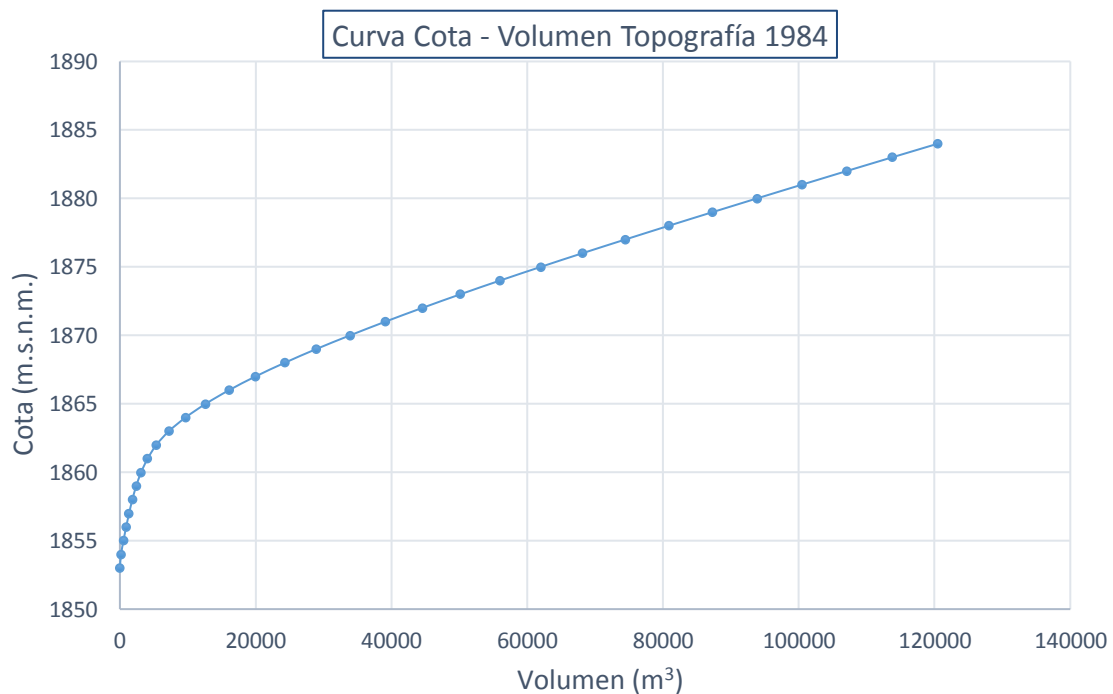


Figura 32. Curva cota – Volumen para topografía 1984.

La tabla 7 ilustra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, cota de cresta del vertedero.

Tabla 7.

Volumen de Agua para topografía 1984 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m ³)
Curva Cota - Volumen	120524.3
Civil 3D	120241.0
ArcGIS	120430.1

En tabla 8 y figura 33, se muestra la curva característica para la topografía del año 1989.

Tabla 8.

Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 1989.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ³]
1862	0	0		0	0
1863	969.55	969.55	484.78	484.78	484.78
1864	1330.8	2300.35	1634.95	1634.95	2119.73
1865	841.5	3141.85	2721.10	2721.10	4840.83
1866	392.4	3534.25	3338.05	3338.05	8178.88
1867	333.025	3867.275	3700.76	3700.76	11879.64
1868	381.9	4249.175	4058.23	4058.23	15937.86
1869	798.5	5047.675	4648.43	4648.43	20586.29
1870	190.98	5238.655	5143.17	5143.17	25729.45
1871	260.4	5499.055	5368.86	5368.86	31098.31
1872	144.44	5643.495	5571.28	5571.28	36669.58
1873	145.8	5789.295	5716.40	5716.40	42385.98
1874	115.82	5905.115	5847.21	5847.21	48233.18
1875	104.84	6009.955	5957.54	5957.54	54190.72
1876	209.04	6218.995	6114.48	6114.48	60305.19
1877	124.3	6343.295	6281.15	6281.15	66586.34
1878	108.6	6451.895	6397.60	6397.60	72983.93
1879	61.06	6512.955	6482.43	6482.43	79466.36
1880	39.07	6552.025	6532.49	6532.49	85998.85
1881	34.33	6586.355	6569.19	6569.19	92568.04
1882	23.3	6609.655	6598.01	6598.01	99166.04
1883	23.06	6632.715	6621.19	6621.19	105787.23
1884	146.7	6779.415	6706.07	6706.07	112493.29

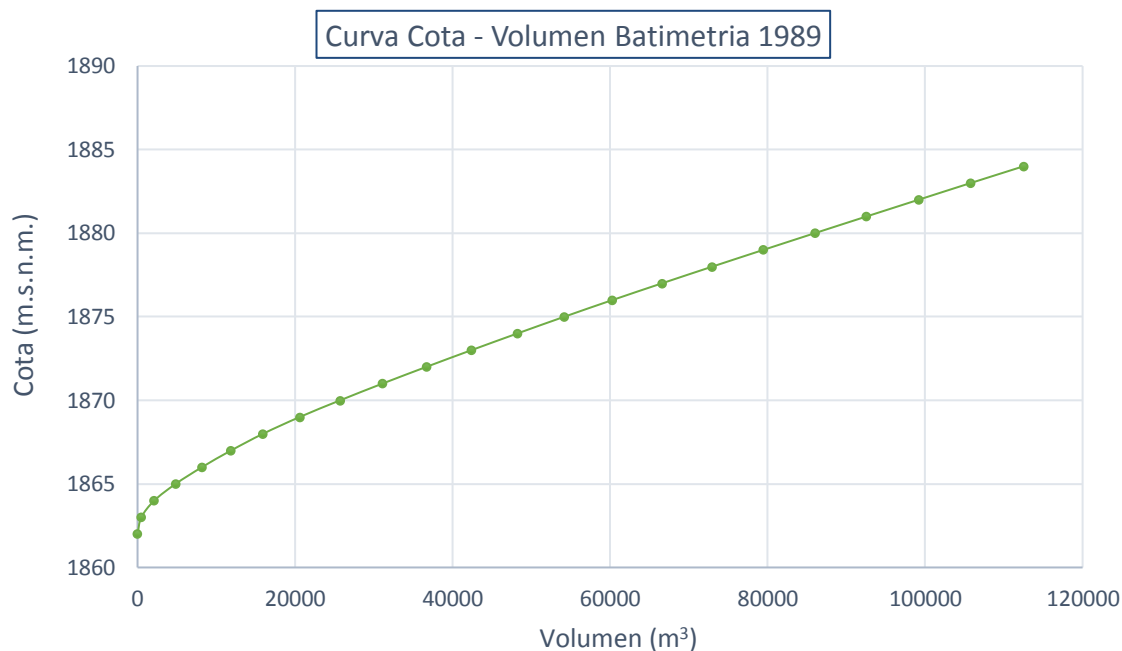


Figura 33. Curva cota – Volumen para la batimetría de 1989.

La tabla 9 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 1989.

Tabla 9.

Volúmenes de Agua para la batimetría de 1989 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m ³)
Curva Cota - Volumen	112493.3
Civil 3D	112652.4
ArcGIS	111867.0

En tabla 10 y figura 34, se muestra la curva característica para la batimetría del año 1995.

Tabla 10.

Curva Cota – Volumen para la batimetría 1995.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ³]
1863	0	0		0	0
1864	1192.94	1192.94	596.47	596.47	596.47
1865	697.3	1890.24	1541.59	1541.59	2138.06
1866	678.72	2568.96	2229.60	2229.60	4367.66
1867	337.4	2906.36	2737.66	2737.66	7105.32

1868	440.2	3346.56	3126.46	3126.46	10231.78
1869	761.95	4108.51	3727.54	3727.54	13959.32
1870	676.55	4785.06	4446.79	4446.79	18406.10
1871	256.2	5041.26	4913.16	4913.16	23319.26
1872	236.42	5277.68	5159.47	5159.47	28478.73
1873	178.85	5456.53	5367.11	5367.11	33845.84
1874	230.1	5686.63	5571.58	5571.58	39417.42
1875	374.17	6060.8	5873.72	5873.72	45291.13
1876	198.2	6259	6159.90	6159.90	51451.03
1877	118.3	6377.3	6318.15	6318.15	57769.18
1878	66.73	6444.03	6410.67	6410.67	64179.85
1879	60.32	6504.35	6474.19	6474.19	70654.04
1880	57.46	6561.81	6533.08	6533.08	77187.12
1881	30.63	6592.44	6577.13	6577.13	83764.24
1882	64.9	6657.34	6624.89	6624.89	90389.13
1883	50.15	6707.49	6682.42	6682.42	97071.55
1884	45.1	6752.59	6730.04	6730.04	103801.59

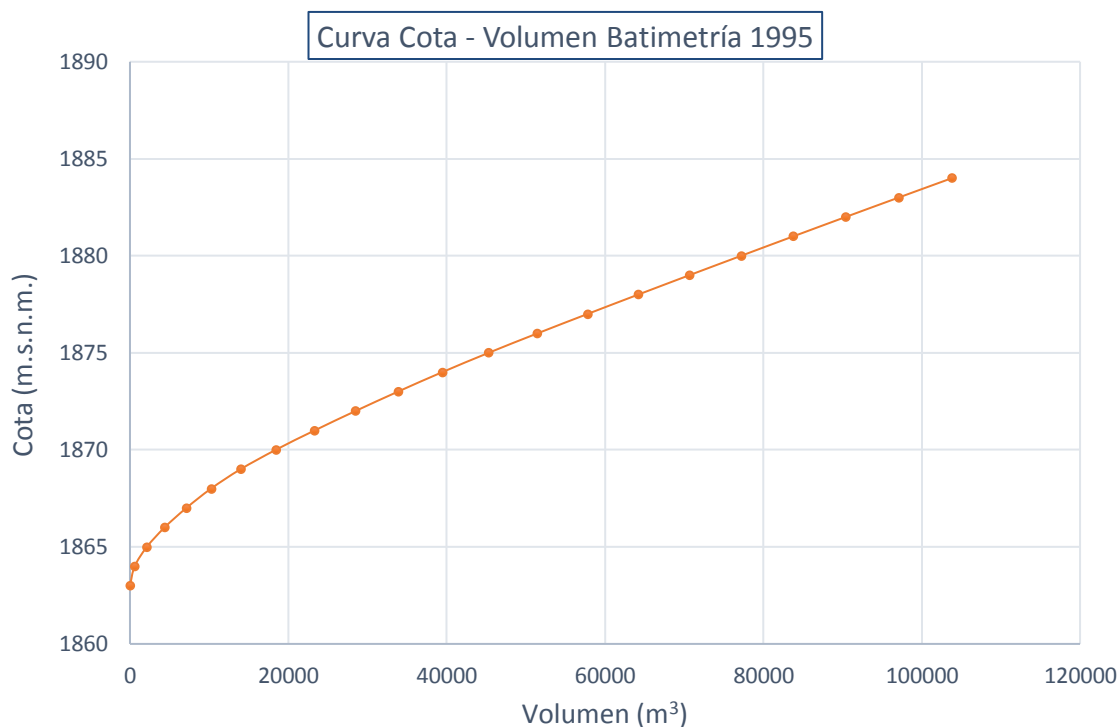


Figura 34. Curva cota – Volumen para batimetría 1995.

La tabla 11 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 1995.

Tabla 11.

Volúmenes de Agua para batimetría 1995 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m ³)
Curva Cota - Volumen	103801.6
Civil 3D	103904.7
ArcGIS	103740.3

En tabla 12 y figura 35, se muestra la curva característica para la batimetría del año 2004.

Tabla 12.

Curva Cota – Volumen correspondiente a batimetría 2004.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ³]
1863	0	0		0	0
1864	63.4	63.4	31.70	31.70	31.70
1865	255.99	319.39	191.40	191.40	223.10
1866	1077.07	1396.46	857.93	857.93	1081.02
1867	483.4	1879.86	1638.16	1638.16	2719.18
1868	456.3	2336.16	2108.01	2108.01	4827.19
1869	427.7	2763.86	2550.01	2550.01	7377.20
1870	393.9	3157.76	2960.81	2960.81	10338.01
1871	362.5	3520.26	3339.01	3339.01	13677.02
1872	329.15	3849.41	3684.84	3684.84	17361.86
1873	293.9	4143.31	3996.36	3996.36	21358.22
1874	260.5	4403.81	4273.56	4273.56	25631.78
1875	248.8	4652.61	4528.21	4528.21	30159.99
1876	307.55	4960.16	4806.39	4806.39	34966.37
1877	368.06	5328.22	5144.19	5144.19	40110.56
1878	287.99	5616.21	5472.22	5472.22	45582.78
1879	244.77	5860.98	5738.60	5738.60	51321.37
1880	188.8	6049.78	5955.38	5955.38	57276.75
1881	171.36	6221.14	6135.46	6135.46	63412.21
1882	183.52	6404.66	6312.90	6312.90	69725.11
1883	142.95	6547.61	6476.14	6476.14	76201.25
1884	134.06	6681.67	6614.64	6614.64	82815.89

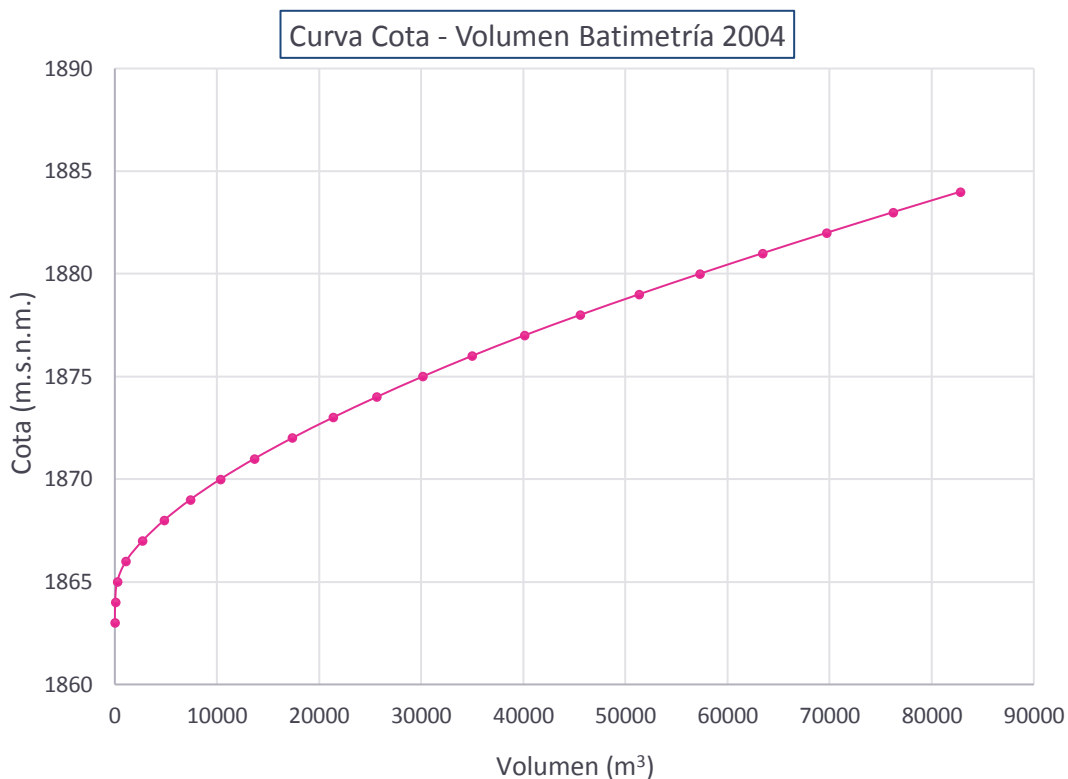


Figura 35. Curva cota – Volumen correspondiente a batimetría 2004.

La tabla 13 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 2004.

Tabla 13.

Volúmenes de Agua para la batimetría 2004 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m³)
Curva Cota - Volumen	82815.9
Civil 3D	82759.5
ArcGIS	82752.6

En tabla 14 y figura 36, se muestra la curva característica para la batimetría del año 2013.

Tabla 14.

Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 2013.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m³]
1864	0	0		0	0
1865	626.35	626.35	313.18	313.18	313.18
1866	2255.4	2881.75	1754.05	1754.05	2067.23

1867	776.3	3658.05	3269.90	3269.90	5337.13
1868	461.45	4119.5	3888.78	3888.78	9225.90
1869	395.6	4515.1	4317.30	4317.30	13543.20
1870	320.73	4835.83	4675.47	4675.47	18218.67
1871	262.5	5098.33	4967.08	4967.08	23185.75
1872	254.47	5352.8	5225.57	5225.57	28411.31
1873	248.7	5601.5	5477.15	5477.15	33888.46
1874	223.2	5824.7	5713.10	5713.10	39601.56
1875	188.93	6013.63	5919.17	5919.17	45520.73
1876	180.34	6193.97	6103.80	6103.80	51624.53
1877	171.9	6365.87	6279.92	6279.92	57904.45
1878	138.33	6504.2	6435.04	6435.04	64339.48
1879	117.89	6622.09	6563.15	6563.15	70902.63
1880	59.65	6681.74	6651.92	6651.92	77554.54
1881	46.9	6728.64	6705.19	6705.19	84259.73
1882	22.1	6750.74	6739.69	6739.69	90999.42
1883	15.4	6766.14	6758.44	6758.44	97757.86
1884	9.7	6775.84	6770.99	6770.99	104528.85

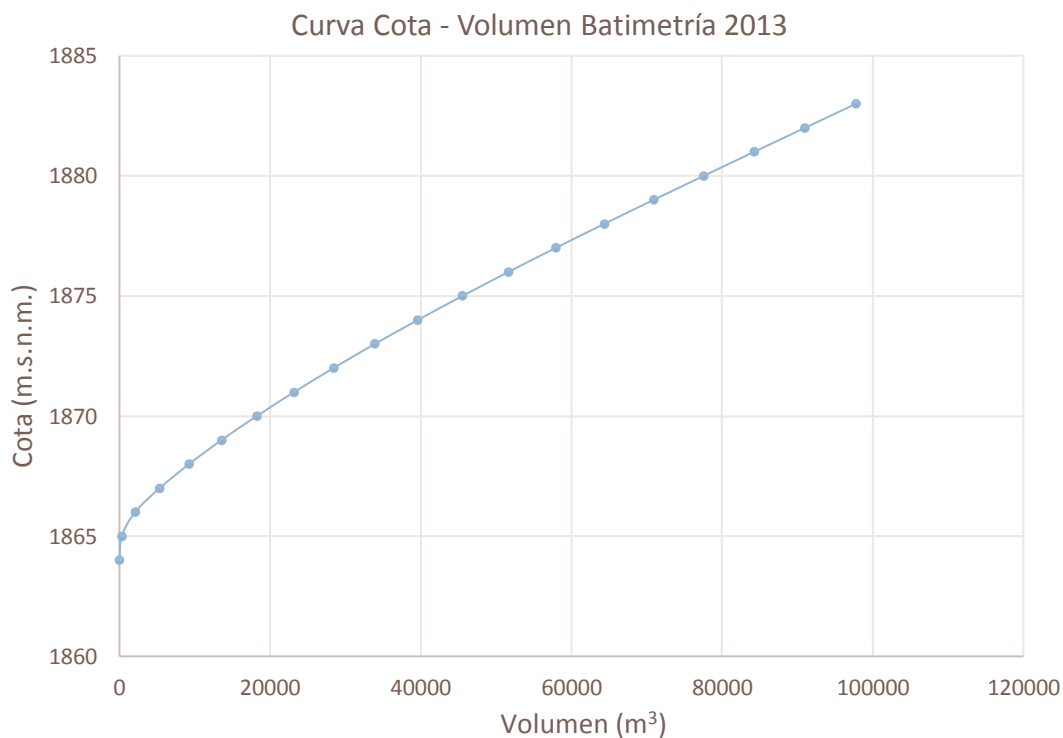


Figura 36. Curva cota – Volumen perteneciente a batimetría 2013.

La tabla 15 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 2013.

Tabla 15.

Volúmenes de Agua para batimetría 2013 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m ³)
Curva Cota - Volumen	104528.9
Civil 3D	104017.0
ArcGIS	103781.5

En tabla 16 y figura 37, se muestra la curva característica para la batimetría del año 2016.

Tabla 16.

Curva Cota – Volumen correspondiente a la batimetría 2016.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ³]
1865	0	0		0	0
1866	2272.8	2272.8	1136.40	1136.40	1136.40
1867	1456.3	3729.1	3000.95	3000.95	4137.35
1868	528	4257.1	3993.10	3993.10	8130.45
1869	332.9	4590	4423.55	4423.55	12554.00
1870	299.7	4889.7	4739.85	4739.85	17293.85
1871	275.4	5165.1	5027.40	5027.40	22321.25
1872	240.5	5405.6	5285.35	5285.35	27606.60
1873	233.8	5639.4	5522.50	5522.50	33129.10
1874	258.7	5898.1	5768.75	5768.75	38897.85
1875	196	6094.1	5996.10	5996.10	44893.95
1876	174.7	6268.8	6181.45	6181.45	51075.40
1877	144.99	6413.79	6341.30	6341.30	57416.70
1878	115.4	6529.19	6471.49	6471.49	63888.19
1879	68.7	6597.89	6563.54	6563.54	70451.73
1880	64.33	6662.22	6630.06	6630.06	77081.78
1881	34.9	6697.12	6679.67	6679.67	83761.45
1882	22.3	6719.42	6708.27	6708.27	90469.72
1883	19.02	6738.44	6728.93	6728.93	97198.65
1884	15.8	6754.24	6746.34	6746.34	103944.99

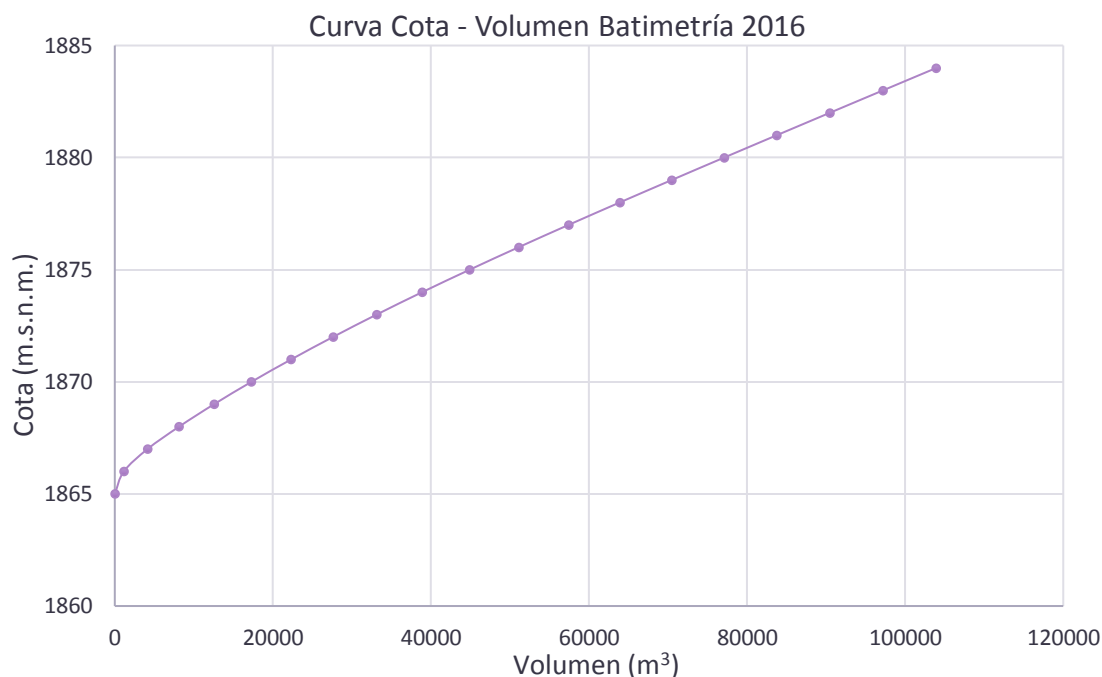


Figura 37. Curva Cota – Volumen perteneciente a la batimetría 2016.

La tabla 17 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 2016.

Tabla 17.

Volúmenes de Agua para la batimetría 2016 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m³)
Curva Cota - Volumen	103944.9
Civil 3D	104077.7
ArcGis	103775.8

En tabla 18 y figura 38, se muestra la curva característica para la batimetría del año 2018.

Tabla 18.

Curva Cota – Volumen correspondiente a batimetría 2018.

Cota	Área	Área Acumulada	Área Promedio	Volumen parcial	Volumen acumulado
[m.s.n.m.]	[m²]	[m²]	[m²]	[m³]	[m³]
1865	0	0	0	0.00	0.00
1866	2189.3	2189.3	1094.65	1094.65	1094.65
1867	1425.4	3614.7	2902.00	2902.00	3996.65
1868	567.54	4182.24	3898.47	3898.47	7895.12
1869	319.7	4501.94	4342.09	4342.09	12237.21
1870	288.5	4790.44	4646.19	4646.19	16883.40

1871	329.9	5120.34	4955.39	4955.39	21838.79
1872	275.7	5396.04	5258.19	5258.19	27096.98
1873	243.6	5639.64	5517.84	5517.84	32614.82
1874	247.9	5887.54	5763.59	5763.59	38378.41
1875	203.8	6091.34	5989.44	5989.44	44367.85
1876	169.22	6260.56	6175.95	6175.95	50543.80
1877	142.9	6403.46	6332.01	6332.01	56875.81
1878	122.8	6526.26	6464.86	6464.86	63340.67
1879	68.9	6595.16	6560.71	6560.71	69901.38
1880	53.64	6648.8	6621.98	6621.98	76523.36
1881	37.6	6686.4	6667.60	6667.60	83190.96
1882	29.7	6716.1	6701.25	6701.25	89892.21
1883	21.5	6737.6	6726.85	6726.85	96619.06
1884	22.6	6760.2	6748.90	6748.90	103367.96

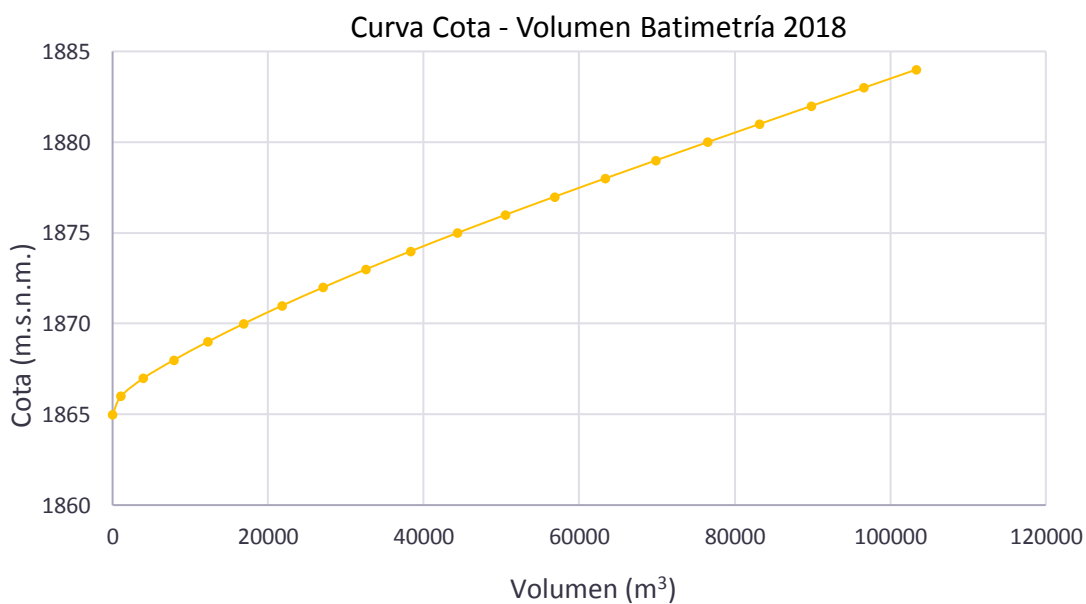


Figura 38. Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 2018.

La tabla 19 muestra los volúmenes de agua a la cota 1884 msnm, para la batimetría de 2018.

Tabla 19.

Volúmenes de Agua perteneciente batimetría 2018 a la cota 1884 msnm.

Método	Volumen (m³)
Curva Cota - Volumen	103367.9
Civil 3D	103340.6
ArcGIS	103332.5

5.1.1. Discusión de resultados.

Como se puede evidenciar, existe una ligera variación entre resultados obtenidos por los distintos métodos, la variación entre métodos es insignificante, los valores son prácticamente los mismos.

Ahora observando la figura 39, muestra las curvas cota almacenamiento de todas las batimetrías realizadas en el sector donde se encuentra la obra de toma.

Para un mejor entendimiento la figura 40, muestra los volúmenes a la cota de nivel del vertedero 1884 (con presa inflable) msnm de dichas curvas, altura volumen.

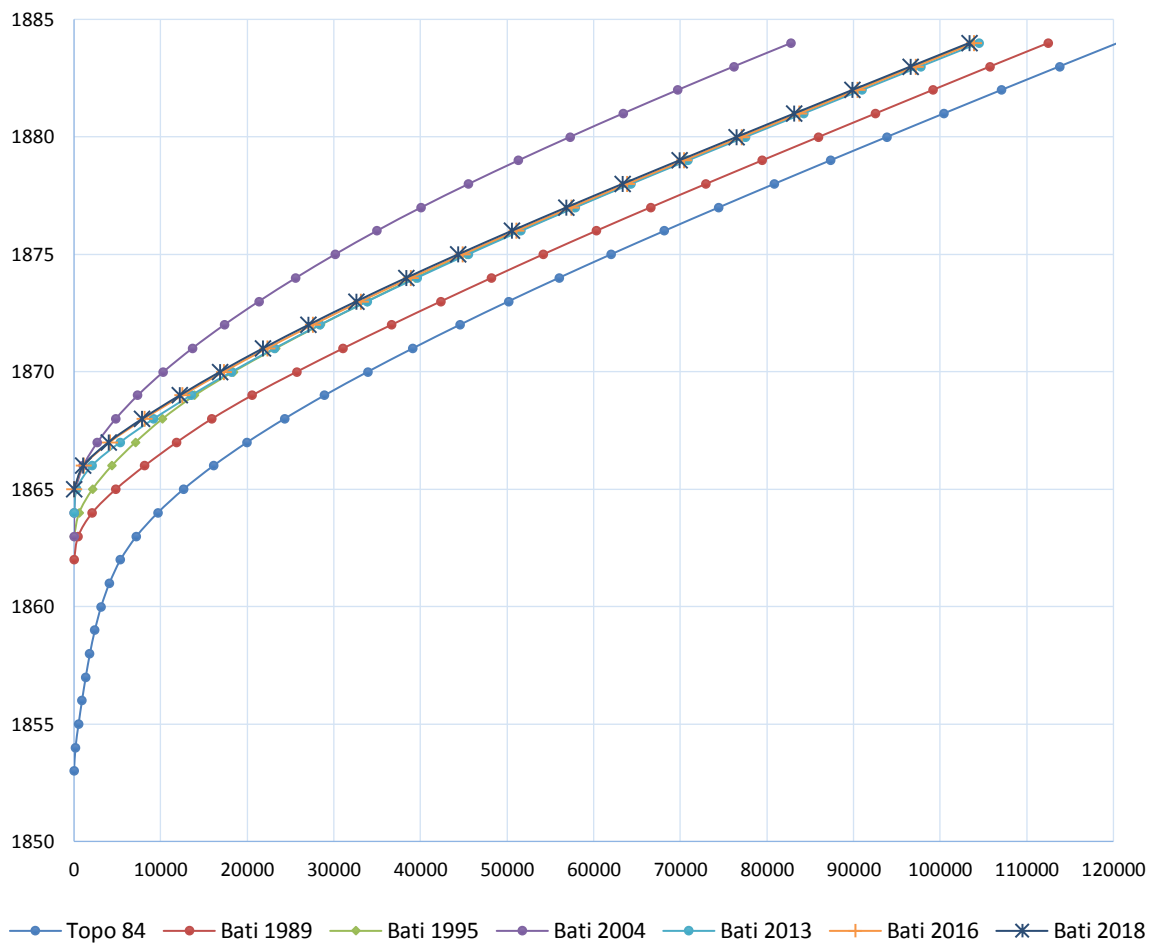


Figura 39. Curvas cota – Volumen correspondientes al sector de la obra de toma.

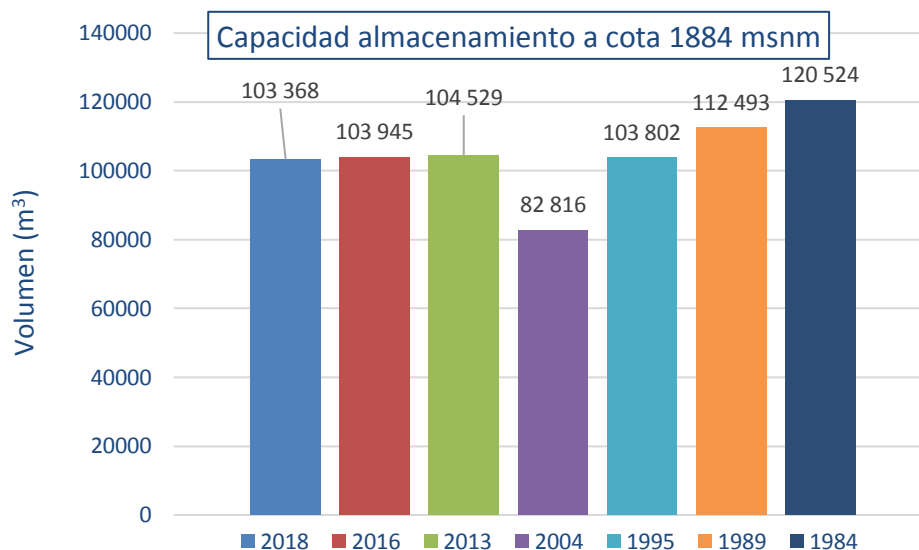


Figura 40. Variación de volúmenes de agua en el sector de la obra de toma.

Analizando los volúmenes, se observa el patrón típico de pérdida de capacidad de almacenamiento de las superficies entre los años 1984 – 2004. Sin embargo, del año 2004 a 2013, muestra que hubo un aparente aumento en su capacidad. Aunque el gráfico evidentemente muestre lo mencionado. No se debe dejarse engañar, ya que, a ciencia cierta, la capacidad de almacenamiento en embalses, su tendencia es siempre a decrecer, por lo general inversamente proporcional conforme al aumento de sedimentos. Este falso incremento en su capacidad del volumen de agua en el sector de influencia de la obra de toma del embalse San Jacinto, no tiene otra explicación que, las mediciones batimétricas realizadas en este sector, fueron generadas con muy poca precisión, y existió una interpolación de curvas de nivel a gran escala y con muy poco detalle.

Lo deducido en el párrafo anterior puede ser justificado observando en los anexos III.3 hasta el anexo III.6, las cuales muestran las curvas de nivel del sector de la toma de las batimetrías 1995 y 2004, como también los modelos de terreno digital generados. Ambas superficies muestran que no existe detalle del relieve topográfico, que teóricamente debería ser ocupado por la estructura de la toma, lo que se concluye que no se levantaron perfiles de medición en dicho sector, por lo cual, las curvas de nivel se generaron sin tomar en cuenta el cañón o la depresión de terreno creada artificialmente para albergar a la estructura de la obra de toma del embalse.

Además de lo explicado en el párrafo anterior, otro de los motivos que ayuda a concluir que las curvas de nivel del área donde se ubica la obra de toma de las batimetrías 1995 y 2004, fueron mal elaboradas, es haciendo una comparación con las tablas 20 y 21.

Tabla 20.

Variación de volúmenes de agua en todo el embalse San Jacinto.

Batimetría	Capacidad (m ³)	Reducción parcial (m ³)	Reducción acum. (m ³)	Reducción parcial (%)	Reducción acum. (%)
1989	58 485 807	0.00	-	-	-
1995	54 127 612	4 358 195.3	4 358 195.3	6.72	6.72
2004	49 985 894	4 141 718.1	8 499 913.3	6.39	13.11

Fuente: Adaptado de (Jáuregui R., 2011).

Tabla 21.

Variación de volúmenes de agua ocurrido sólo para el sector de la toma.

batimetría	Capacidad (m ³)	Reducción parcial (m ³)	Reducción acum. (m ³)	Reducción parcial (%)	Reducción acum. (%)
1989	112 652	0.00	-	-	-
1995	103 905	8 747.70	8 747.70	7.77	7.77
2004	82 760	21 145.20	29 892.90	18.77	26.5

De la tabla 20, donde se observa que del periodo 1989-1995 muestra que, según Jáuregui (Análisis de la Operación del Embalse San Jacinto bajo la influencia de la Sedimentación (Tesis de grado), 2011) la pérdida de capacidad de almacenamiento en todo el embalse San Jacinto es del 6.72 %. Ahora, comparando dicho porcentaje con el valor del mismo periodo para el caso solo del sector de influencia de la obra de toma cuyo valor es 7.77 %, casi el 1 % de diferencia. Pero ahora comparando para el periodo entre 1995-2004, 6.39 % para todo el embalse y 18.77 % solo para el sector de la toma, muestra un sobre exceso anómalo, de casi el doble de diferencia. Si bien, comparar el incremento de sedimento para todo el embalse con el incremento en el sector de la toma no necesariamente deben ser similares, pero al menos debe existir una cierta relación entre ambas.

Lo explicado párrafos más arriba hace concluir, que las superficies de las batimetrías 1995 y 2004 se hallan mal elaboradas y no tienen relación con las características del relieve del lecho específicamente del sector en estudio y no serán utilizadas para elaborar conclusiones

finales, pero ante la carencia de información seguirán siendo utilizadas para comparaciones de apoyo y otros análisis menores.

Las curvas de nivel de las batimetrías de los años 2013 y 2016, (véase los Anexos III.7 al III.10.), en estos se evidencia algunos detalles característicos en el lugar donde se emplaza la estructura de la obra de toma, los anexos III.9 y III.10 pertenecientes a la superficie batimétrica del año 2016, observando el modelo de terreno digital creado, muestra un parentesco más similar a la topografía del sector del año 1984.

Finalmente, para concluir este análisis de la capacidad de almacenamiento de agua en el sector de influencia de la obra de toma del embalse San Jacinto fueron utilizados las superficies de los años 1984, 1995, 2016, 2018.

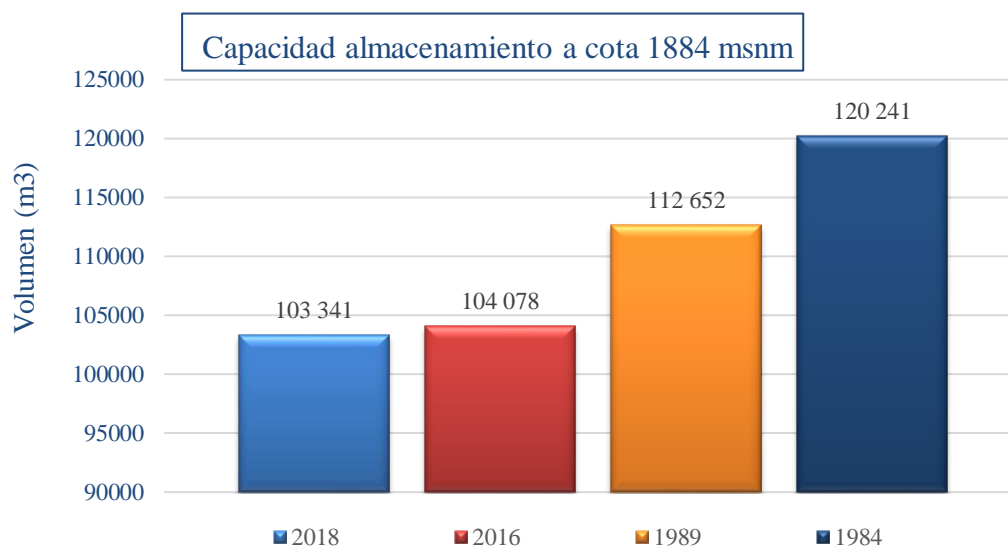


Figura 41. Disminución de capacidad de almacenamiento en el sector de la toma.

Tabla 22.

Disminución de la capacidad de almacenamiento en el sector de la toma.

batimetría	Capacidad (m³)	Reducción parcial (m³)	Reducción acum. (m³)	Reducción parcial (%)	Reducción acum (%)
1984	120 241	0.00	0	0	0
1989	112 652	7 588.60	7 588.60	6.31	6.31
2016	104 078	8 574.70	16 163.30	7.13	13.44
2018	103 341	737.10	16 900.40	0.61	14.06

En la tabla 22, indica la reducción o la pérdida de capacidad de almacenamiento expresada en porcentaje, donde indica que aproximadamente en 31 años de funcionamiento del embalse, exclusivamente para el sector de la toma, se ha reducido alrededor del 14 % de su capacidad inicial. Analizando este valor y con el tiempo transcurrido, pareciera ser una magnitud normal, razonable, poco trascendente y justificable entendiendo el hecho de que, en los embalses, inevitablemente están sometidos al fenómeno de colmatación y que este 14 % no debe ser motivo de alerta de colmatación de la zona donde tiene influencia el túnel de aducción de agua hacia las turbinas de la hidroeléctrica y el sistema de riego. Sin embargo, más adelante en el análisis de variación niveles de sedimento mediante secciones tanto transversales como longitudinales en la zona de estudio de este documento, los mismos indican resultados son más que preocupantes.

5.2. Volumen de los sedimentos depositados y análisis de su variación temporal

A partir de las superficies de cada batimetría mostradas en el Anexo III, se generó en Civil 3D una superficie de diferencia entre periodos de mediciones. Esta superficie diferencia será la encargada de indicar los volúmenes de los procesos ocurridos, ya sea sedimentación, y si fuera el caso desgaste o erosión.

5.2.1. Periodo 1984 -1989.

Superponiendo las superficies de la topografía de 1984 y la superficie de la batimetría del año 1995 (figura 42.) donde la superficie de color rojizo es la de la topografía de 1984, la superficie gris es la generada a partir de la batimetría de 1989.

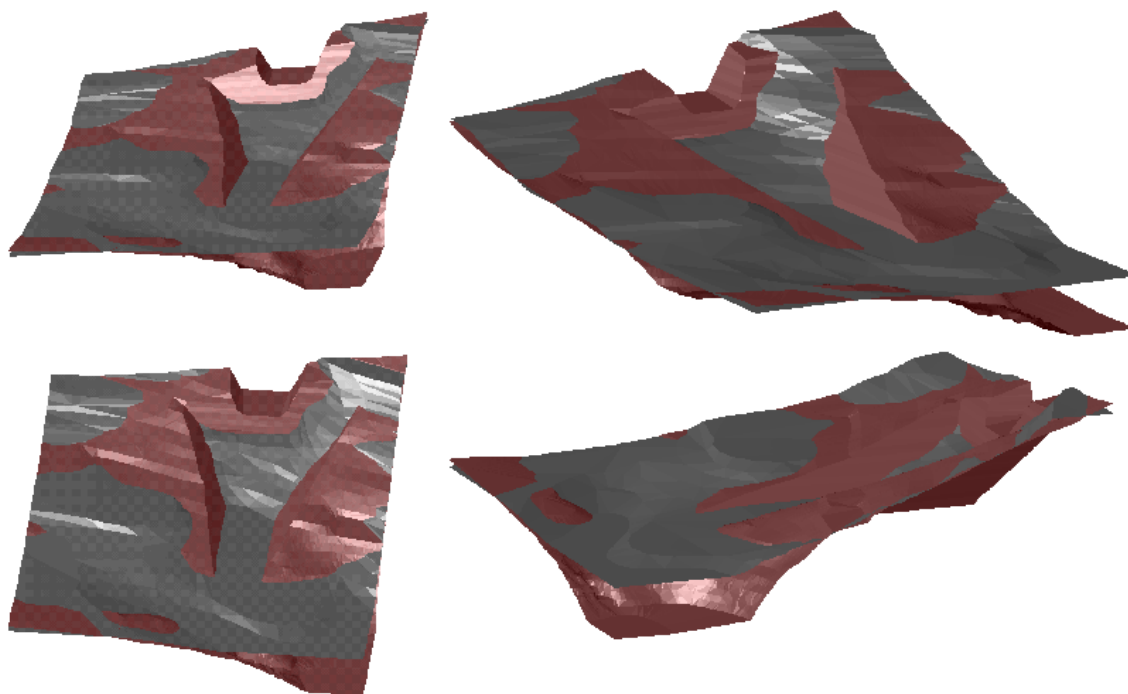


Figura 42. Diferentes perspectivas de la superposición de superficies de 1984 y 1989.

La tabla 23 muestra los volúmenes de los procesos ocurridos entre este periodo.

Tabla 23.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1984-1989.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	3123.6
Sedimentación	10707.9

Ahora analizando el valor de erosión, 3123.6 m³ es un valor sobrestimado, se le puede atribuir esta magnitud a que, la batimetría del año 1989, al ser levantamiento general de todo el embalse, no se realizó a precisión ni a detalle en el sector donde se ubica la toma. lo mismo podría decirse de la cantidad de sedimentos 10708 m³ es un valor exagerado para tan solo 2 años, si se considera que el embalse fue llenado en el año 1987.

5.2.2. Periodo 1989 -1995.

A pesar que los datos de la batimetría del año 1995, se los ha considerado imprecisos y cuya justificación se explicó anteriormente, aun así, la tabla 24 muestra el valor de la sedimentación ocurrido durante este periodo.

Tabla 24.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1989-1995.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	1469.26
Sedimentación	10409.9

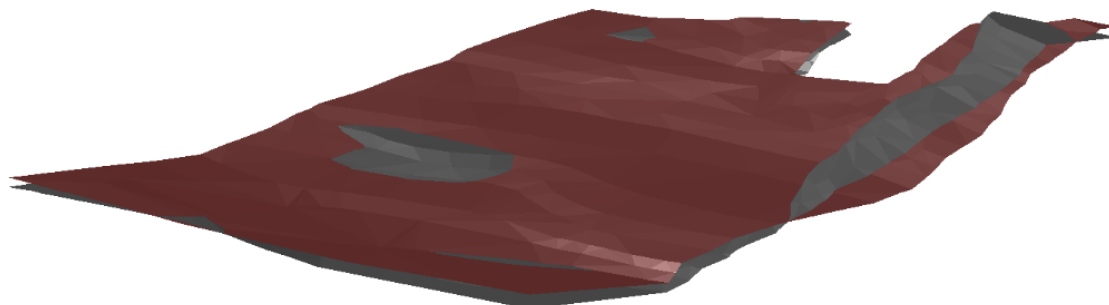


Figura 43. Superposición de batimetrías de los años 1989-1995.

En la figura 43 la superficie de color rojo corresponde a la batimetría de 1995 y se encuentra por encima casi en su totalidad a la superficie inferior (batimetría 1989), las partes de coloradas indican sedimentación y por el contrario las grises erosión.

Para comprender de mejor manera lo explicado anteriormente, la figura 44. la cual indica con colores más vivos el proceso existente. Los tonos verduscos representan a que existió sedimentación y, por el contrario, los tonos de color rojizo representan a el desgaste o erosión del terreno.

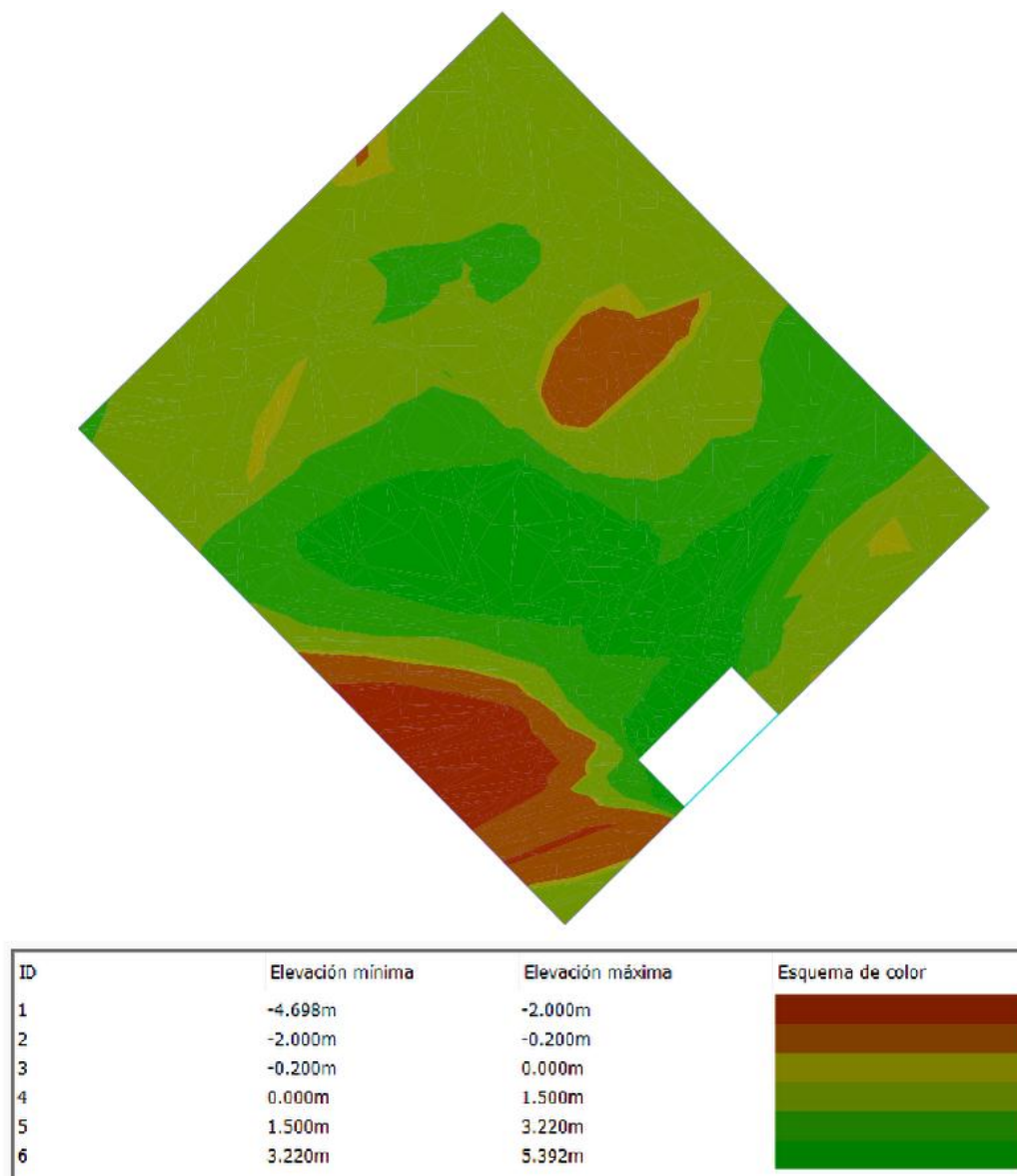


Figura 44. Sedimentación – Erosión ocurrida entre el periodo 1989-1995.

Interpretando los valores que expone la tabla 24, se concluye que estos valores no son fiables, están condicionados lamentablemente por la poca precisión de medición de este sector en estudio, y por ello estos resultados tanto de erosión como sedimentación son magnitudes sobrevaloradas.

5.2.3. Periodo 1995 -2004.

Ya se habló páginas atrás sobre la calidad de la información de la superficie batimétrica del año 2004 específicamente para el sector donde se sitúa la obra de toma del embalse San

Jacinto, a pesar de ello se presenta la tabla 25, tan solo para confirmar que, esta aparente extraordinaria sedimentación, en realidad es, tan solo resultado de una mala calidad en la generación de las curvas de nivel que arrojó la batimetría 2004 para el sector de la obra de toma.

Tabla 25.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1995-2004.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	0.09
Sedimentación	21232.4

5.2.4. Periodo 2004 -2013.

Tabla 26.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2004 -2013.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	21739.9
Sedimentación	379.6

Cabe aclarar que, los valores de la tabla 26, no es que se encuentran inversos o cruzados, es sencillamente que los resultados que arrojó el cálculo del programa Civil 3D, y no se debe a que el paquete esté equivocado, es a causa de, a pesar de ser redundante, pero es trascendente ser reiterativo en esta cuestión, de la escasa similitud de la superficie batimétrica de año 2004 a lo que debería ser en realidad.

5.2.5. Periodo 2013 -2016.

Los resultados de las mediciones batimetrías que se realizaron desde el 2013 en adelante, muestran una aparente estabilización en el ingreso de sedimentos en el sector de influencia donde se sitúa la obra de toma.

Tabla 27.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2013 -2016.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	1614.5
Sedimentación	1594.5

Ante los resultados que se muestran en la tabla 27. Se considera el valor de erosión de 1614.5, como sobrestimado, muy por encima de lo que debería ser en realidad, considerando los tres años de diferencia entre ambas mediciones, y por ello no es fiable esta supuesta erosión. Ahora analizando los 1594.5 m³ de sedimentación, esta cantidad resulta ser más creíble si se considera que con este volumen la tasa de sedimentación anual sería de alrededor de 530 m³/año.

También se puede notar que hubo mayor erosión que sedimentación, esto hace concluir que la diferencia de precisión entre ambas mediciones es causante de originar valores incoherentes, sobre todo se le atribuye esto a la calidad de las curvas de nivel de la zona donde opera la obra de toma de la batimetría 2013.

Cabe indicar también que en el caso de la batimetría 2016, solo presentaba curvas de nivel hasta la cota 1880 msnm, y como en este análisis se consistió en estimaciones de sedimentos hasta el nivel de la solera del vertedero 1884 msnm (con presa inflable), y que se tuvo que generar las curvas faltantes que pudieron condicionar los resultados obtenidos.

5.2.6. Periodo 2016 -2018.

En el anexo IV.5 muestra vistas tridimensionales desde varias perspectivas de la superposición de estas batimetrías. La batimetría del año 2016 es una de las pocas o la única que se recopilaron datos mediante un perfil de medición de profundidades paralelo al eje del canal que dirige agua hacia la bocatoma del túnel de aducción (véase Anexo V.1 y V.2).

Tabla 28.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2016 - 2018.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	974.9
Sedimentación	1677.6

Es difícil creer que el valor de desgaste del suelo (974.9 m³) que hubo entre el periodo 2016-2018 pueda ser coherente, sobre todo si se toma en cuenta que las curvas de nivel correspondientes a la batimetría 2016 se generan bajo un solo perfil de medición en

inmediaciones de la zona en estudio, 974.9 metros cúbicos de desgaste o erosionados en tan solo dos años, responden a una diferencia de escalas y a una baja densidad de puntos de medición entre superficies batimétricas, pues la batimetría 2018 se realizó a detalle en la zona. Los 1677.6 m³ de sedimentación y 839 m³/año son cantidades sobre valoradas, puede deberse a la diferencia de precisiones entre ambas mediciones.

5.2.7. Comparación entre superficies 1984 y 2018

Para elaborar conclusiones más certeras, se realiza una comparación entre las superficies que presenta mejor grado de precisión (véase figura 45). la superficie de color gris es la batimetría de 2018 y por el contrario la superficie colorada representa a la topografía de 1984.

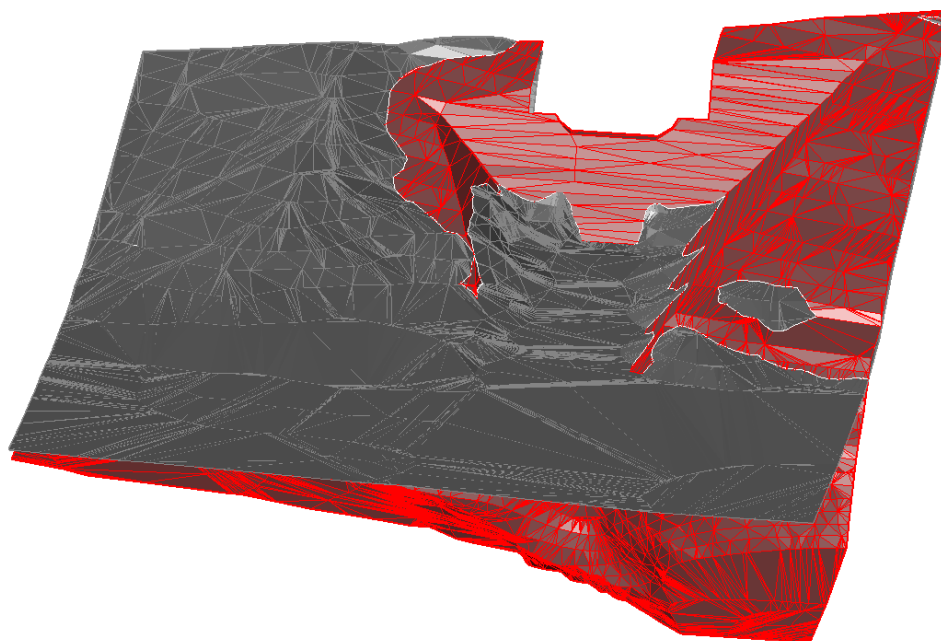


Figura 45. Superposición de superficies de 1984 y 2018.

Estas dos superficies generadas, son las únicas que permiten establecer y validar los resultados representados en la tabla 29 como los reales y certeros en este estudio. ya que estos relieves, que presentan una alta tasa de densidad de puntos, los cuales permiten una generación de curvas de nivel más precisas que caracterizan de mejor manera la forma del relieve de la superficie subacuática del sector de influencia en donde se ubica la estructura

de la obra de toma y su canal creado artificialmente para direccionar el agua hacia la bocatoma.

Tabla 29.

Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1984 - 2018.

Proceso	Volumen (m ³)
Erosión	1647.7
Sedimentación	18694.1

Desde el llenado del embalse en el año 1987 hasta la actualidad, transcurrieron alrededor de 31 años, los 18694.1 m³ parecen ser un valor razonable conforme al tiempo de funcionamiento del embalse.

Observando la figura 46, las zonas de tonos rojizo-naranja corresponden al desgaste sucedido, sobre todo en los taludes laterales que fueron resultado de la construcción del sendero o canal que direcciona agua hacia el túnel y este a la hidroeléctrica.

Analizando el valor de erosión 1647.7 m³ se considera que es un valor incierto y está condicionado por aspectos como ser:

- La aglomeración de plantas acuáticas “jacintos” impidieron que realizaran mediciones alrededor de la estructura de concreto que contiene a la toma (ver Anexo II.2).
- la plataforma flotante que sostienen a las bombas hidráulicas (véase Anexo II.1), que se encuentra justo por encima de la bocatoma - compuerta que regulara el ingreso de agua hacia el túnel. Esta plataforma de unos 4 x5 m, no permitió recolectar mediciones de este importante sector (ver Anexo V.4).

Las zonas de tonos verdes de la indican que en esas zonas hubo sedimentación, con zonas de hasta inclusive 12 metros de deposición del sedimento.

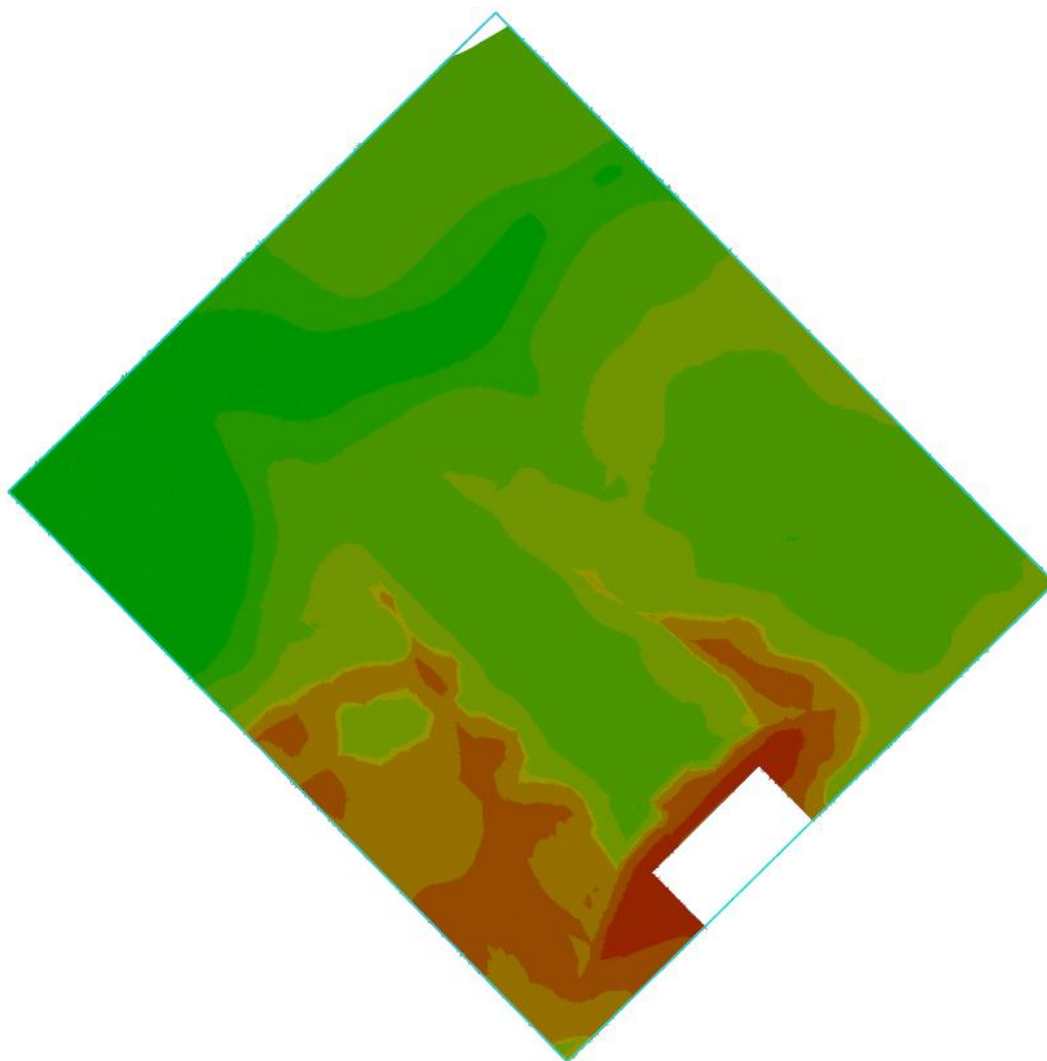


Figura 46. Superficie de diferencia entre topografía 1984 y batimetría 2018.

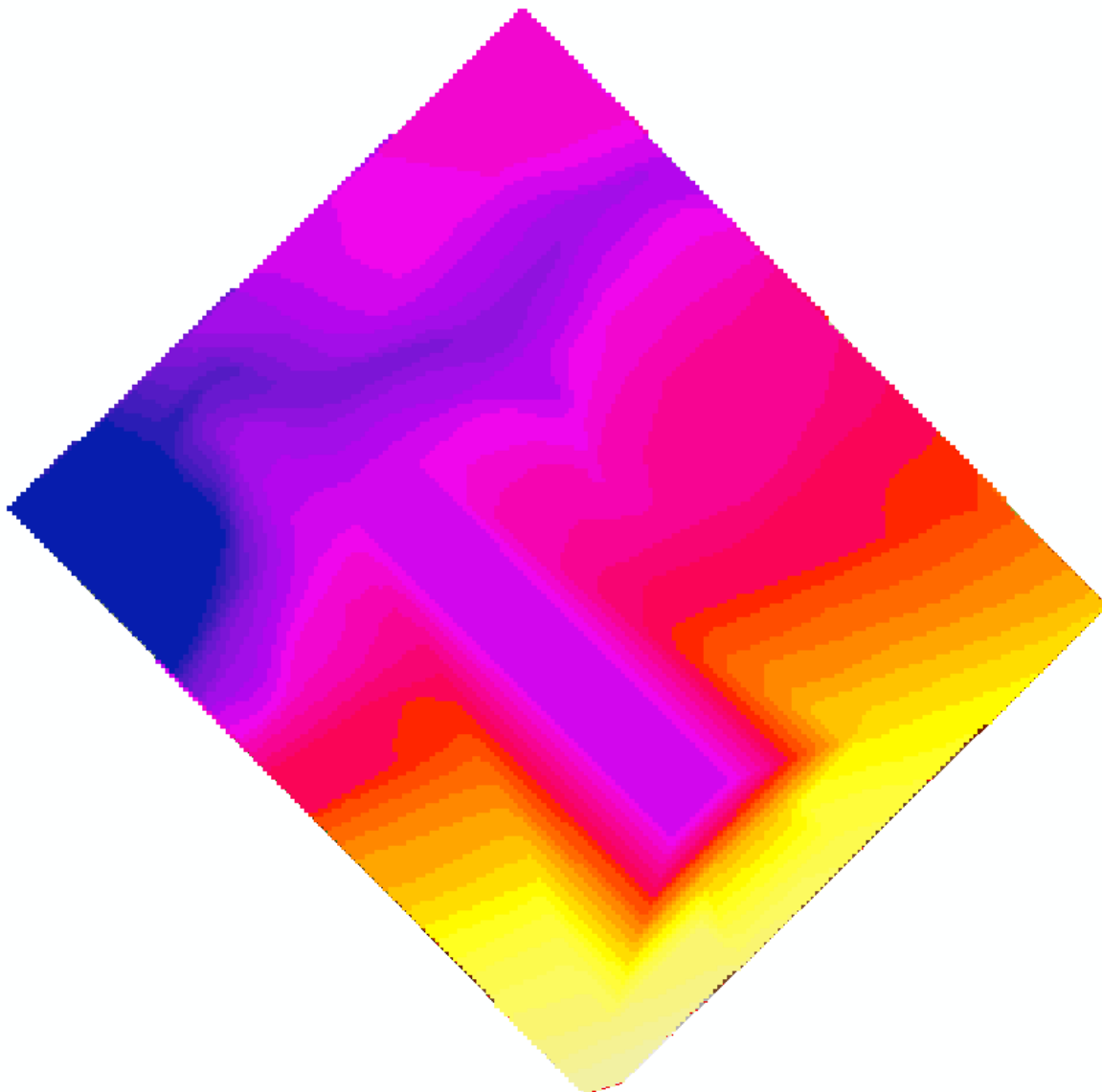
5.3. Distribución espacial del sedimento acumulado en la obra de toma.

La información elegida para realizar este análisis es, la superficie correspondiente a topografía anterior al llenado del embalse (1984) y la superficie resultante de la batimetría de 2018. Se utilizó esta última batimetría, por ser la única con alta densidad de puntos que le permiten un mejor grado de detalle en la generación de las curvas de nivel de esta área en estudio, y por el hecho de que esta última batimetría fue realizada precisamente para ser comparada con la superficie correspondiente a la topografía del año 1984.

5.3.1. Modelo Digital del Terreno.

Utilizando los datos del modelo digital de terreno (DEM) que fueron creados y utilizados para el análisis de volúmenes agua del sector en estudio del embalse San Jacinto. A partir de los DEM's se generó en ArcGIS una superficie rasterizada de cuadrícula 0.5 x0.5 m² tanto para la superficie del año 1984 y 2018 ver denominadas, "Raster1984" y "raster2018" respectivamente (véase figura 47 y 48).

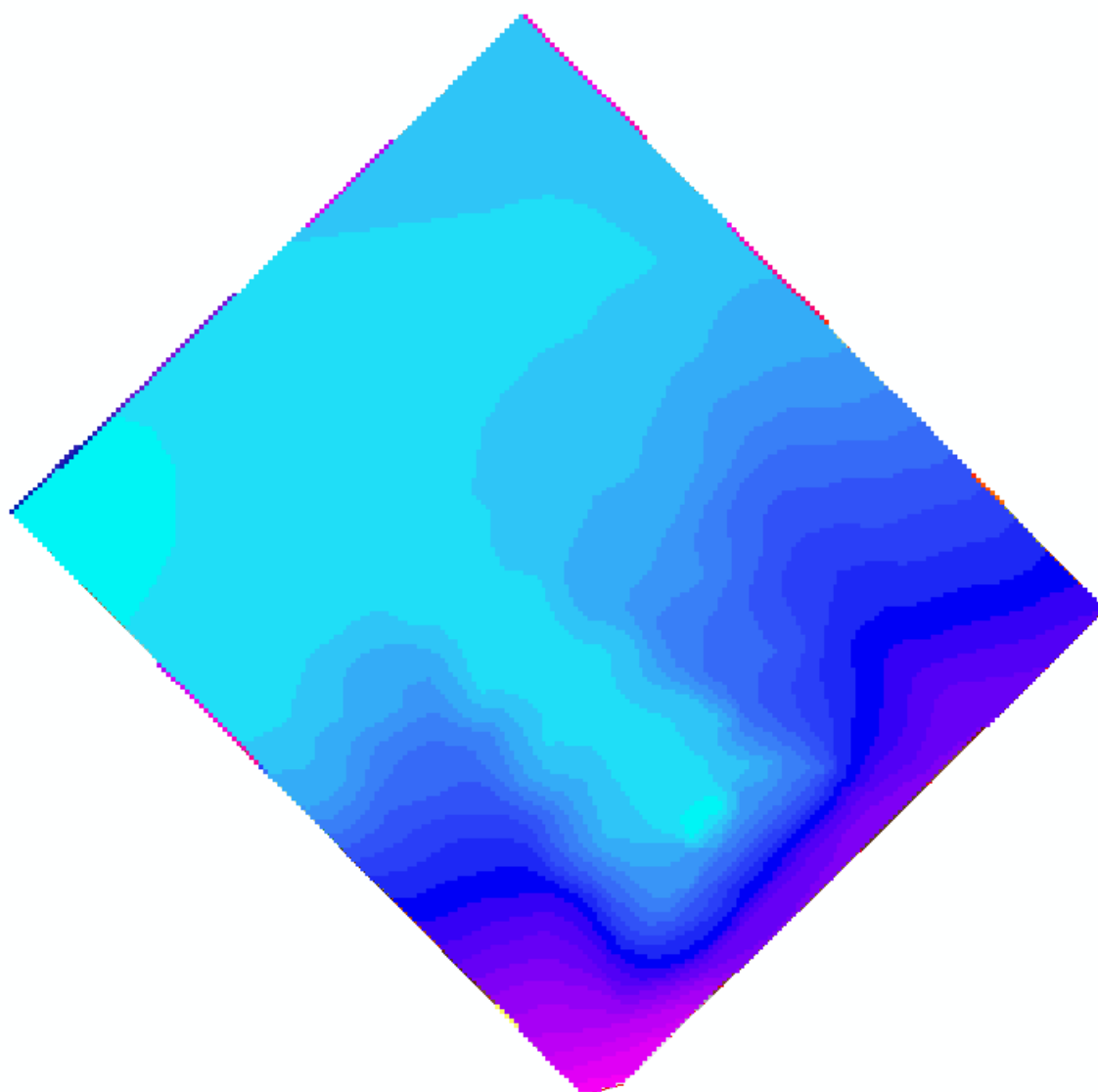
Luego, también en ArcGIS, mediante la herramienta Raster Calculator, se generó una superficie (véase figura 49) resultado de una diferencia entre los "Raster1984" y "raster2018". Este producto es una nueva superficie cuyas magnitudes ya no se encuentran con referencia al nivel del mar (msnm), dichas magnitudes ahora, según cada cuadrícula de 0.25 m², presenta valores de altura de sedimentación, si corresponde, o altura de terreno erosionado.



Leyenda

Raster1984			
<VALUE>			
1853 - 1854	1859.1 - 1860	1868.1 - 1869	1877.1 - 1878
1854.1 - 1855	1860.1 - 1861	1869.1 - 1870	1878.1 - 1879
1855.1 - 1856	1861.1 - 1862	1870.1 - 1871	1879.1 - 1880
1856.1 - 1857	1862.1 - 1863	1871.1 - 1872	1880.1 - 1881
1857.1 - 1858	1863.1 - 1864	1872.1 - 1873	1881.1 - 1882
1858.1 - 1859	1864.1 - 1865	1873.1 - 1874	1882.1 - 1883
	1865.1 - 1866	1874.1 - 1875	1883.1 - 1884
	1866.1 - 1867	1875.1 - 1876	1884.1 - 1885
	1867.1 - 1868	1876.1 - 1877	

Figura 47. Superficie Raster topografía 1984.



Leyenda

raster2018	<VALUE>		
1864.9 - 1865	1868.1 - 1869	1874.1 - 1875	1880.1 - 1881
1865.1 - 1866	1869.1 - 1870	1875.1 - 1876	1881.1 - 1882
1866.1 - 1867	1870.1 - 1871	1876.1 - 1877	1882.1 - 1883
1867.1 - 1868	1871.1 - 1872	1877.1 - 1878	1883.1 - 1884
	1872.1 - 1873	1878.1 - 1879	1884.1 - 1885
	1873.1 - 1874	1879.1 - 1880	

Figura 48. Superficie Raster batimetría 2018.

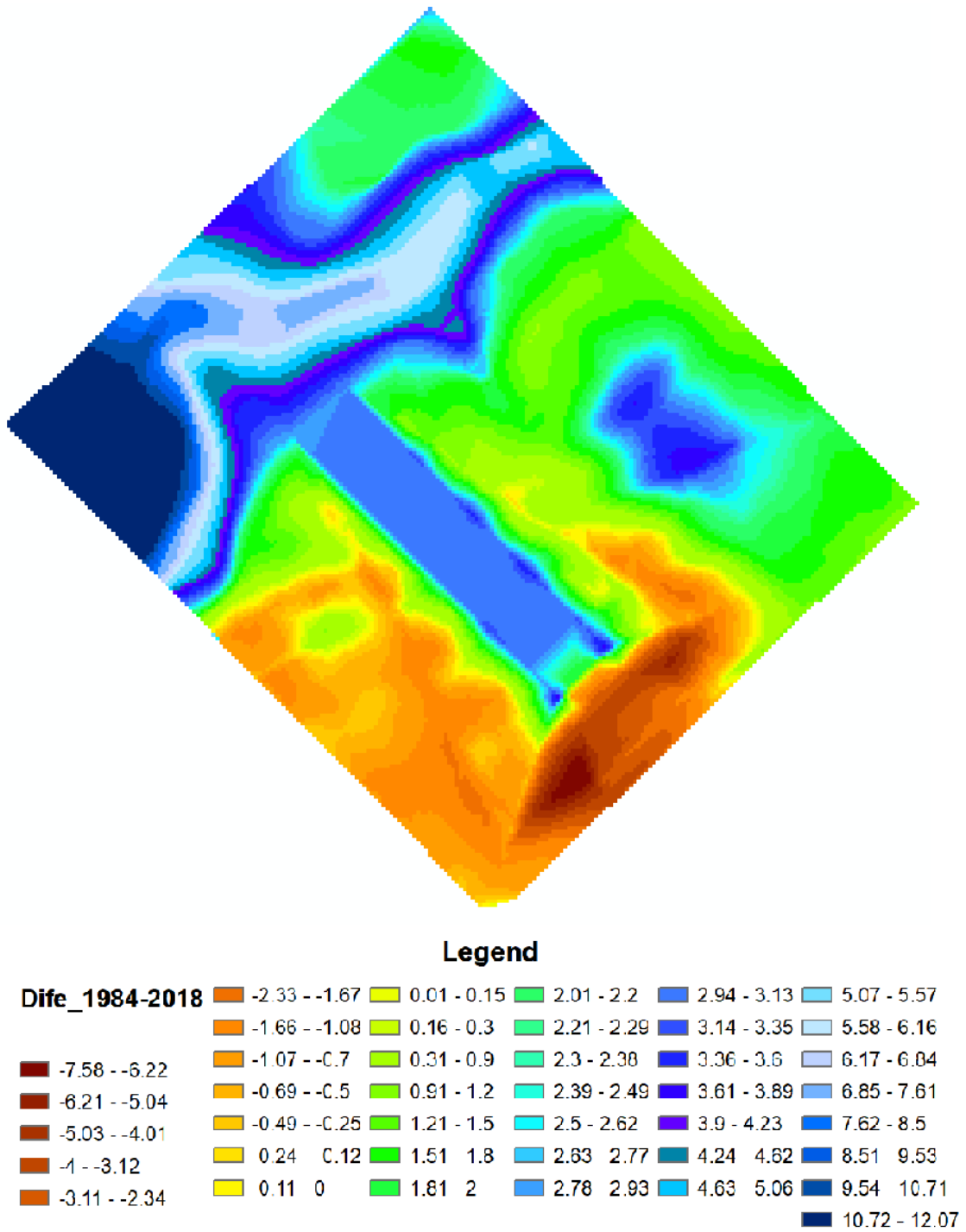


Figura 49. Raster diferencia de la superposición del “raster1984” y “raster2018”.

En la figura 49 se muestra la superficie raster denominada “Dife_1984-2018”, la cual, está integrada por 41 bandas, el intervalo entre cada una de estas bandas no es un valor único, es variable según sectores, para ofrecer una mejor visibilidad.

Para lograr una interpretación más detallada acerca de los procesos ocurridos en el lugar de influencia de la obra de toma del embalse San Jacinto, a continuación, se analizó a esta superficie zonificando sectores que presenten en común el mismo fenómeno ocurrido (erosión/sedimentación).

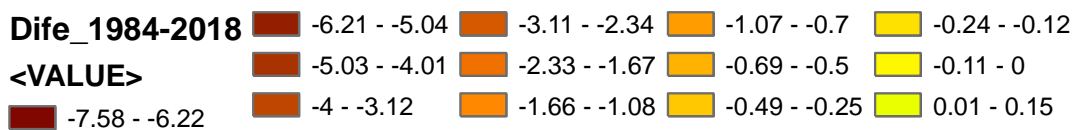
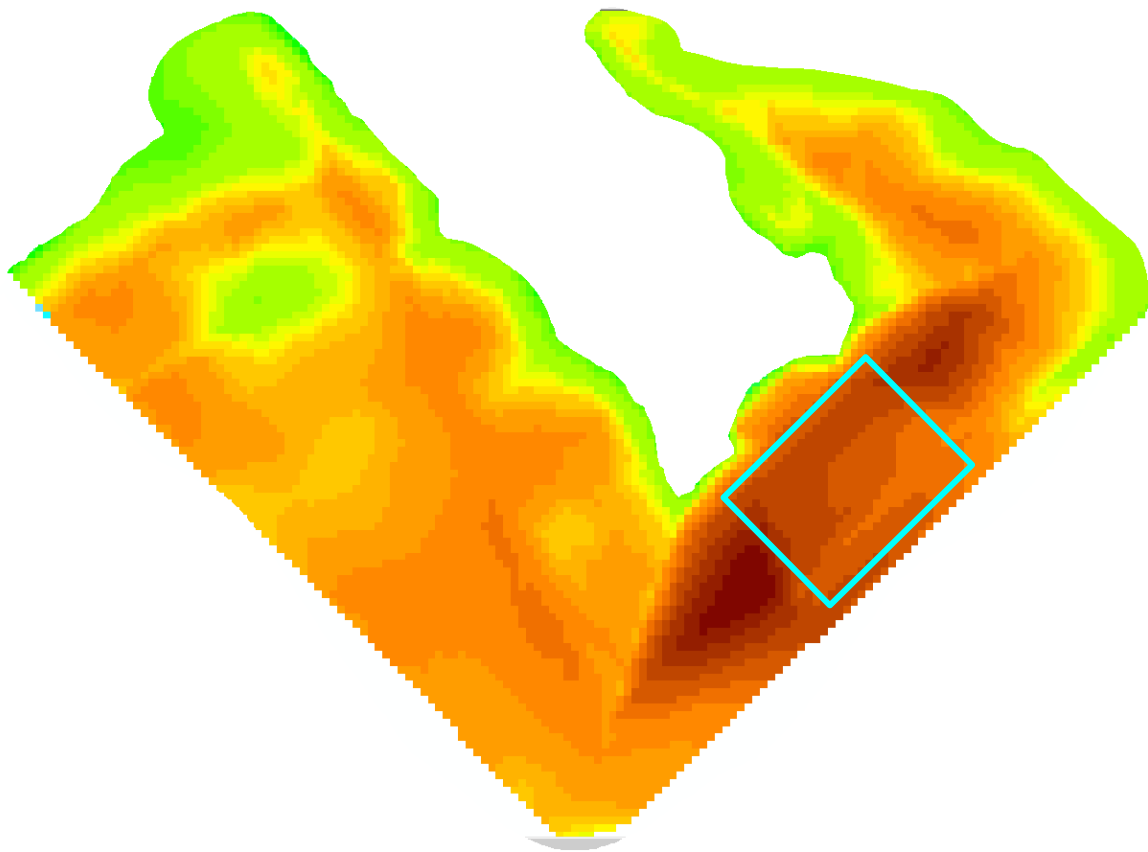


Figura 50. Sector de erosión en la zona de la toma del embalse San Jacinto.

La figura 50, muestra las zonas de erosión que corresponden, sobre todo a las laderas y los taludes que fueron construidos para albergar a la estructura de obra de toma. El talud izquierdo presenta serios problemas de desgaste y erosión que quizás se deba a la pronunciada pendiente con la cual fueron construidos dichos taludes, otro factor es la gran altura, el talud izquierdo de alrededor de 20 metros de altura, y de 15 metros el derecho.

Merece un párrafo aparte hablar del sector que se encuentra dentro del rectángulo que se aprecia en la figura 50. Este sector corresponde al lugar donde se sitúa la estructura de hormigón que alberga la toma de agua para la hidroeléctrica y la plataforma flotante para bombeo, motivo por el cual, no se pudo recopilar datos de este espacio ocupado ni tampoco en sus alrededores, el cual, como ya se había hablado en el capítulo III, se encontraba saturado de los “Jacintos” (ver Anexo II.2) que no permitieron navegabilidad del equipo Z-Boat.

Lo explicado en el párrafo anterior pudo ser el causante de los elevados valores de altura de erosión que indica la leyenda de la figura 50, los mismos son considerados exagerados, resultado de no haber podido realizar mediciones y que esto conllevó a que el software Hypack, interpoló puntos aplicando su racionamiento propio, no considerando el vacío que ocupa la estructura de la toma.

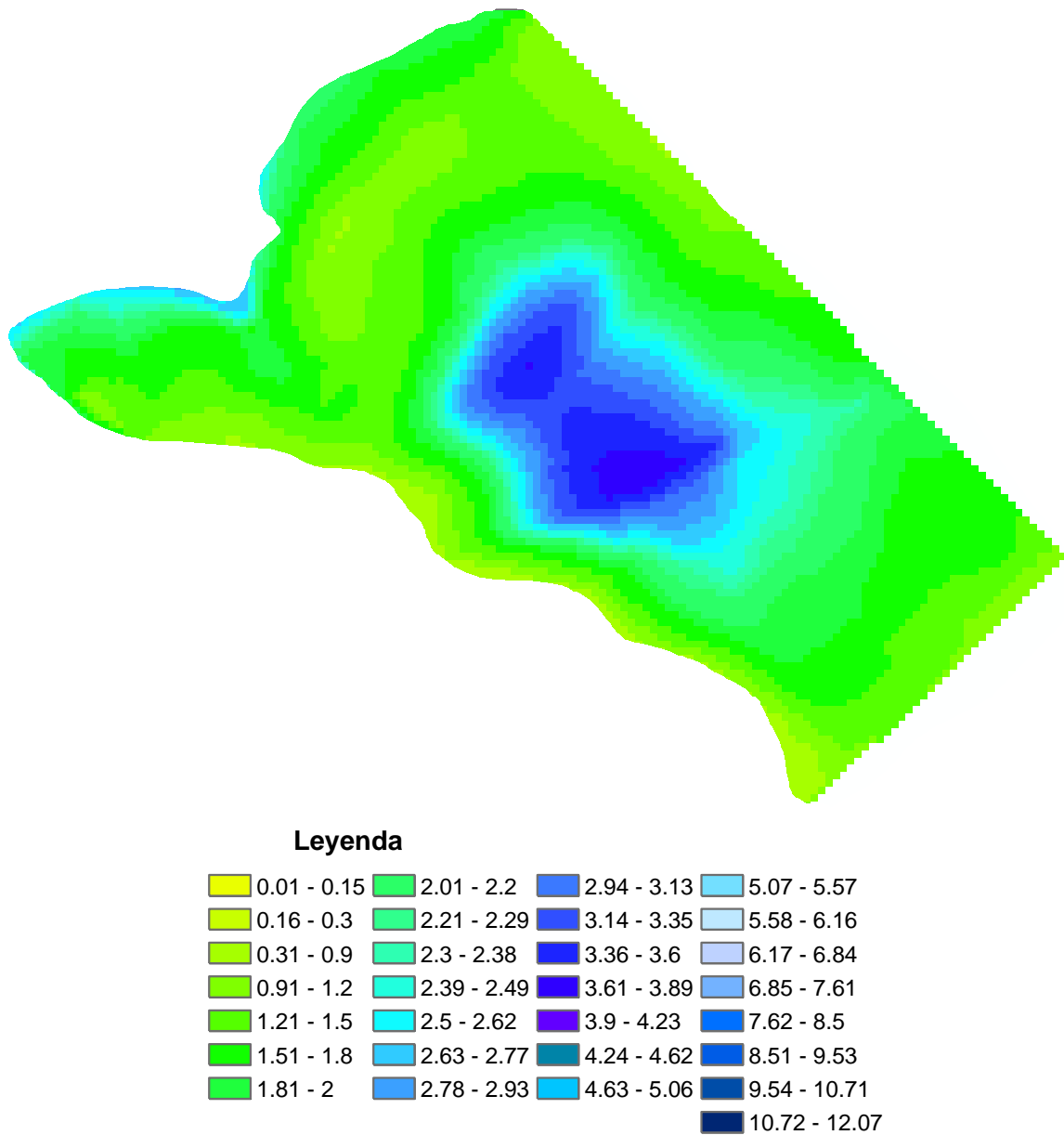


Figura 51. Zona de sedimentación ladera derecha en el sector de la toma del embalse.

Interpretando al sector que se muestra en la figura 51, en este caso, se presentó exclusivamente sedimentación, desde 0,1m hasta sorprendentes valores de hasta 4 metros.

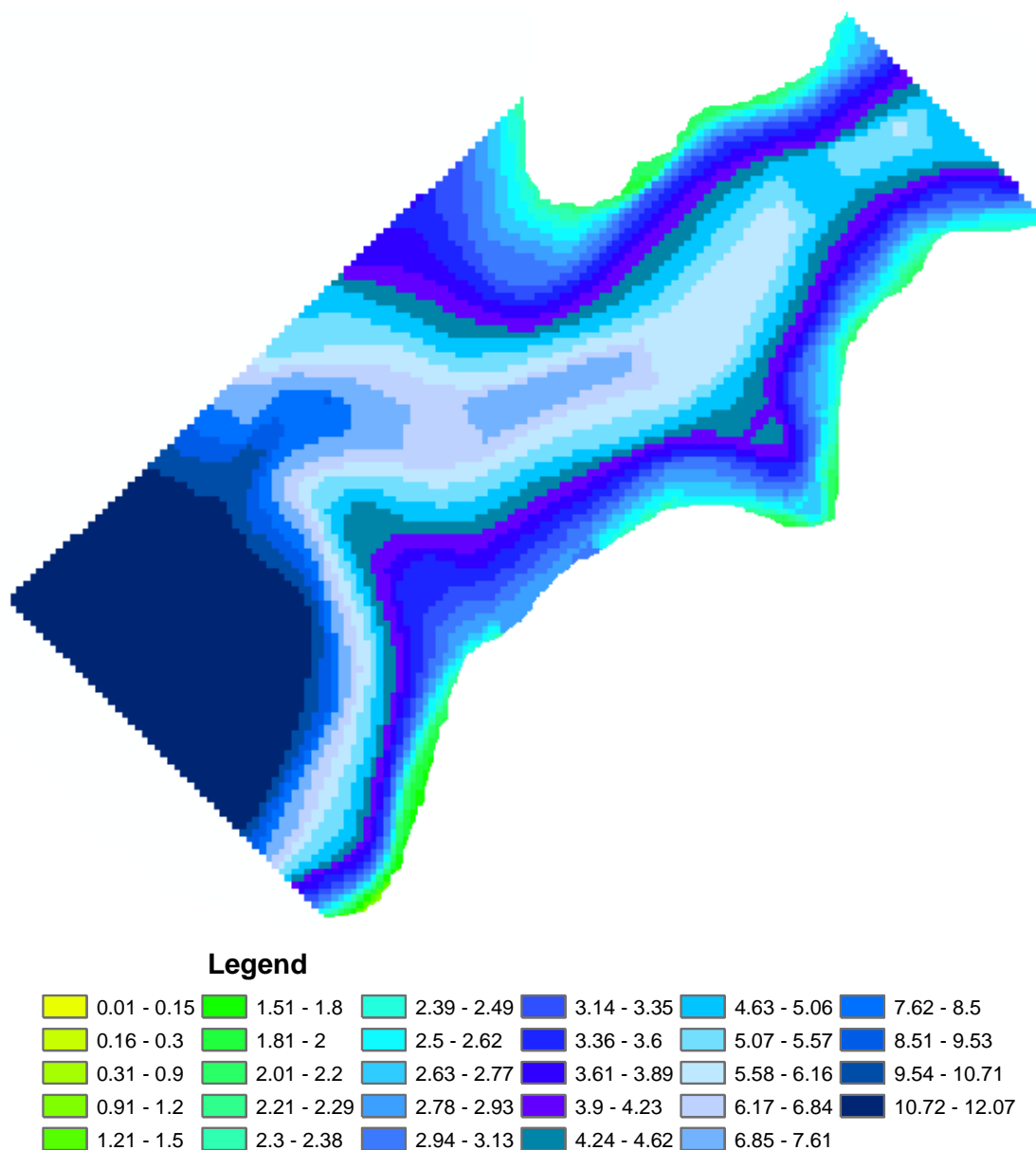


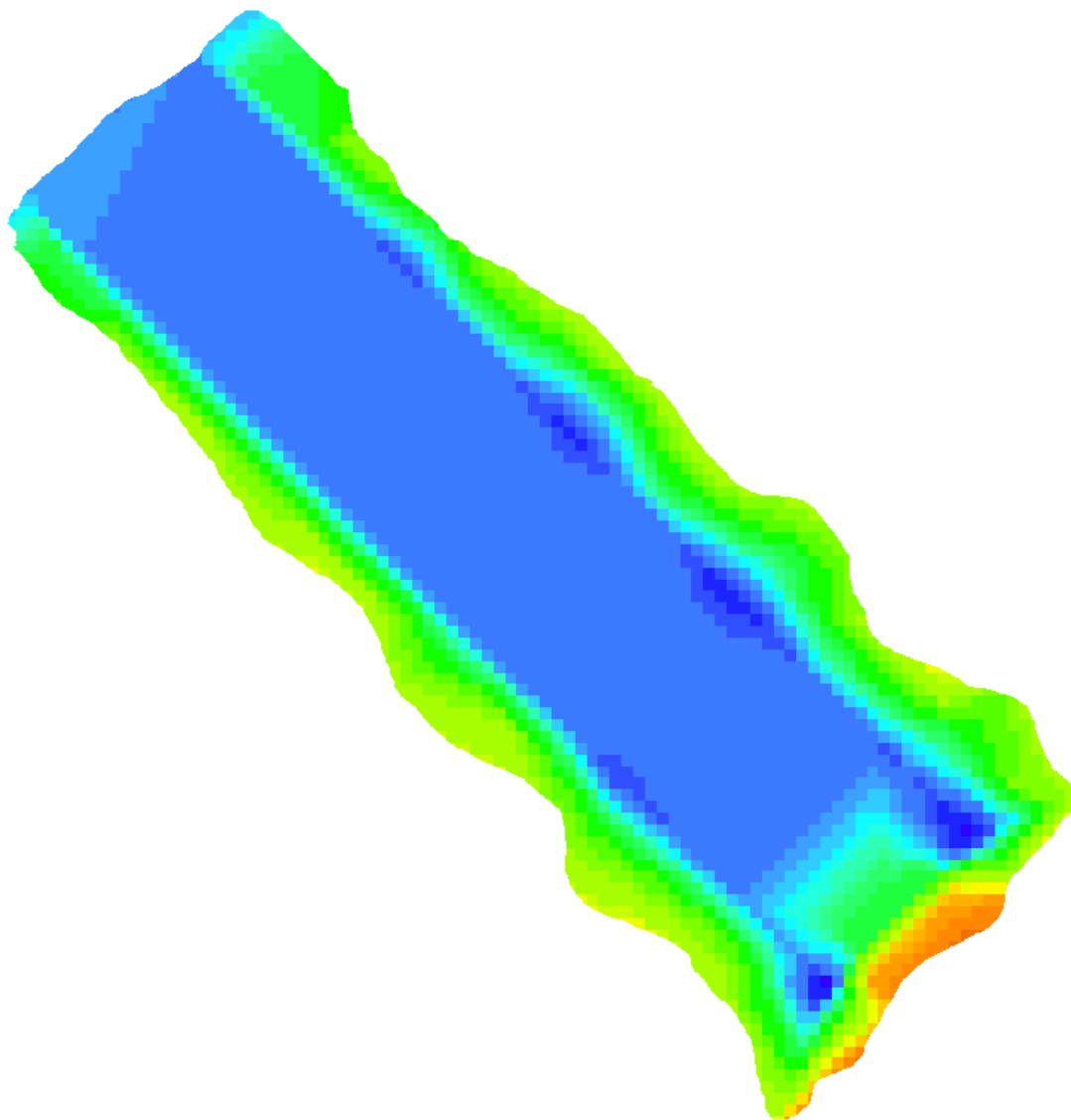
Figura 52. Zona de sedimentación severa en el sector “Quebrada seca”.

La figura 52 muestra uno de los sectores donde hubo severa sedimentación. Este sector, según indica la topografía anterior a la construcción del embalse, consistía en una quebrada profunda denominada “Quebrada Seca” y que actualmente esta zona según el análisis temporal y estudio de secciones, fue el primer sector en ir sufriendo la deposición del sedimento.

Las alturas de sedimentación en este sector varían desde 3 hasta 6 metros, sobre todo en el comienzo de la quebrada. En las zonas más profundas, fueron completamente rellenas de sedimento, con alturas de 10 hasta inclusive de casi 13 metros.

Según la batimetría a detalle realizada, actualmente esta zona, se encuentra completamente relleno, el sedimento dio origen a una planicie cuasi perfectamente nivelada con una cota promedio de 1866 msnm, borrando por completo a que a la “Quebrada Seca”.

Por último, el sector que quizás sea el más importante de este análisis, pues en esta zona, de color azul en la figura 53, de aspecto similar a un desfiladero, construido con el objetivo de ser el ingreso o el sendero que direcciona agua hacia la entrada del túnel para posteriormente ser conducida hacia las turbinas. En este sector, se evidencia una preocupante altura de sedimentos desde 2 hasta casi 3 metros y hasta 1 metros de altura de sedimento al pie de la bocatoma de ingreso.



Legend

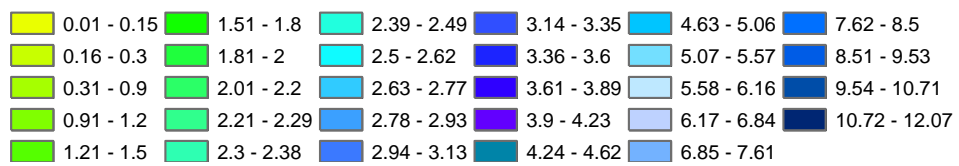


Figura 53. Sedimentación en el canal de conducción de agua hacia la toma.

5.4. Variación de niveles del sedimento

En los anteriores análisis que componen este capítulo, se estudió el proceso de deposición del sedimento en el sector donde se sitúa la obra de toma, con enfoque general, visto desde una perspectiva global y superior.

En los siguientes párrafos se estudió la evolución de niveles del sedimento acumulado, mediante secciones longitudinales y transversales al eje del túnel de captación de agua.

5.4.1. Superficies 2016 – 2018.

Es posible hacer una comparación de perfiles entre las batimetrías 2016 y 2018, debido a que, en el levantamiento batimétrico del año 2016, se hizo un perfil de medición de profundidades, justo en el lugar de la obra de toma (ver Anexo V.1 y V.2.), este perfil contiene información que no puede ser desaprovechada.

Analizando el perfil longitudinal (ver figura 54) de ambas superficies, se observa una leve diferencia de sedimentación ocurrido casi en dos años, el valor máximo altura de sedimentación entre ambos perfiles fue alrededor de 0.5 m.

Se ha podido evidenciar en los últimos años existe una tendencia de disminución en el ingreso de sedimento en el sector de la toma. A pesar de contar con poca información fiable específicamente para esta zona en estudio, podría decirse que existe una disminución en la tasa anual de sedimentación en el sector de la obra de toma, y según análisis de secciones entre las superficies 2013, 2016, 2018 (ver Anexo VII), el sedimento en estos últimos años se asienta de forma cuasi laminar y uniforme.

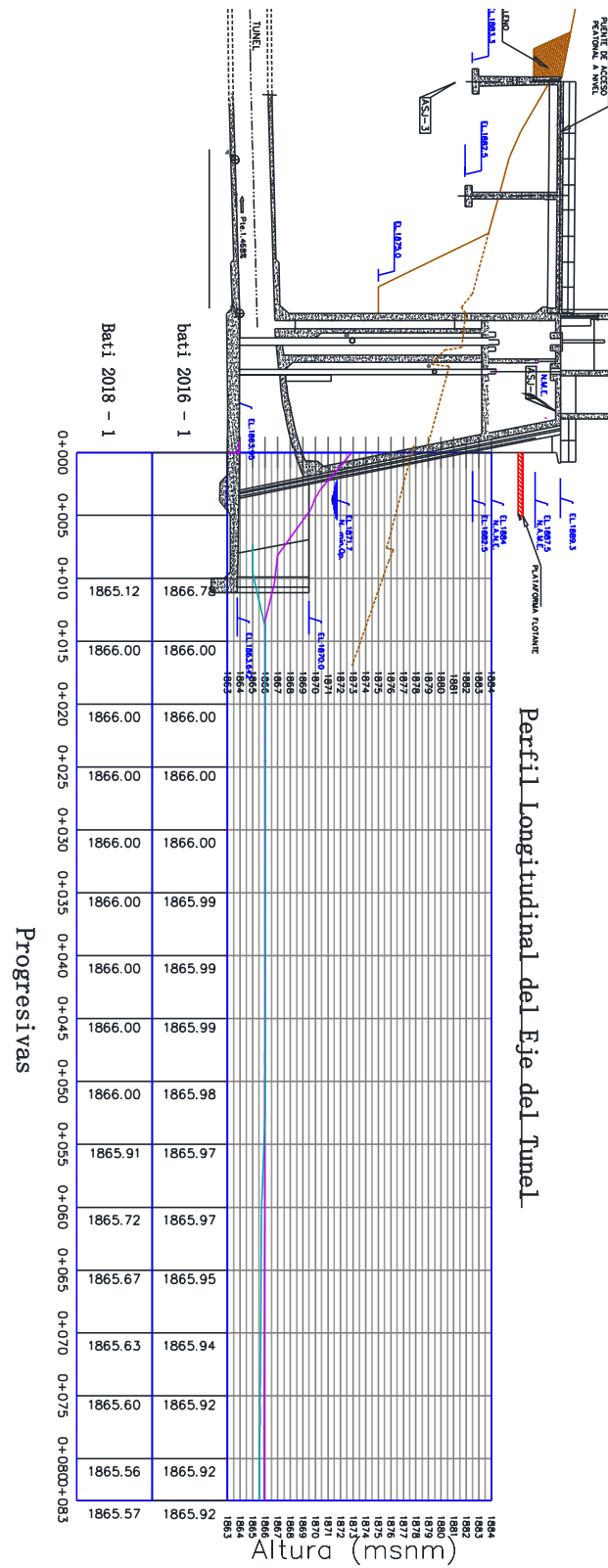


Figura 54. Perfil longitudinal de las superficies 2016 y 2018.

5.4.2. Superficies 1984 – 2018.

Es de carácter imprescindible realizar un análisis entre la topografía anterior al llenado del embalse y la batimetría a detalle del sector de la obra de toma. Esta última, fue realizada precisamente con el fin de ser comparada con la superficie inicial (1984) y determinar la variación de niveles de sedimento ocurrido durante el tiempo transcurrido.

En el Anexo VI.1 se muestra que las líneas de muestreo creadas para obtener las secciones tanto longitudinales como transversales. Se decidió que el punto de inicio fuese justo al pie del comienzo del túnel de captación.

En la figura 55 muestra los perfiles longitudinales al eje del túnel entre las superficies de 1984-2018. En este perfil desde progresiva 0+000 hasta casi la 0+005 no se muestra datos del perfil de la batimetría 2018, por los motivos ya explicados en el capítulo III.

En los Anexos VI.2 hasta el VI.11 se ilustran las secciones transversales generadas para estas dos superficies en cuestión.

Tabla 30.

Valores de sedimentación entre secciones transversales.

Sección	Área de Erosión (m ²)	Volumen de Erosión (m ³)	Área sedimentada (m ²)	Volumen Sedimentado (m ³)	Volumen de Erosión acum. (m ³)	Volumen Sedimentado acum. (m ³)
A1-A'1	134.49	0	0	0	0	0
A2-A'2	19.1	767.96	40.95	204.77	767.96	204.77
A3-A'3	11.71	154.05	49.53	452.43	922.01	657.2
A4-A'4	7.88	97.93	47.92	487.24	1019.94	1144.44
A5-A'5	6.26	70.65	54.98	514.5	1090.59	1658.94
A6-A'6	0	31.28	97.76	763.73	1121.87	2422.67
A7-A'7	0	0	238.44	1681	1121.87	4103.67
A8-A'8	0	0	319.82	2791.3	1121.87	6894.97
A9-A'9	0	0	324.79	3223.04	1121.87	10118
A10-A'10	0	0	308.25	1060.84	1121.87	11178.84

La tabla 30 indica los volúmenes de erosión/sedimentación ocurrido entre cada sección y de los cuales se observa que hasta la sección A6-A'6 ha existido un deterioro y desgaste de los taludes construidos para albergar a la estructura de la toma en una cantidad de 1000 m³ en aproximadamente 31 años de funcionamiento del embalse

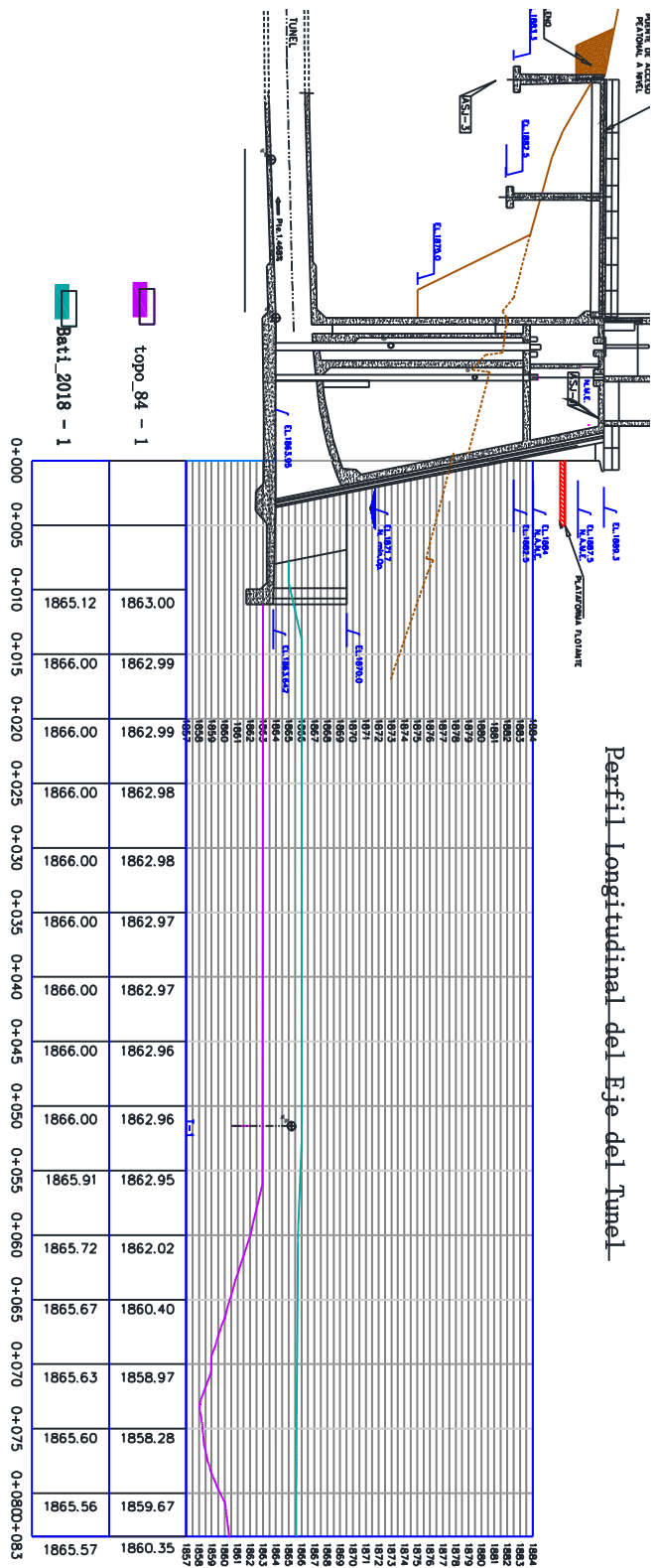


Figura 55. Perfil longitudinal de las superficies 1984 y 2018.

Asimismo, se observa que desde la sección A5-A'5 hacia adelante hubo una fuerte tendencia de incremento del volumen de sedimentos.

En las ultimas secciones, se evidencia una colmatación completa del sedimento, como ya se mencionó anteriormente este sector, era una quebrada muy pronunciada, cuya cota menor de 1853 msnm, y que con el paso de tiempo fue relleno de sedimento dejando a este lugar casi perfectamente nivelado de cota aproximada de 1866 msnm.

En la figura 56 se observa el nivel anterior de terreno y el nivel actual del sedimento acumulado según la batimetría de precisión realizada como parte de este documento. En esta se muestra que el nivel del sedimento se encuentra muy próximo al ingreso de túnel de captación

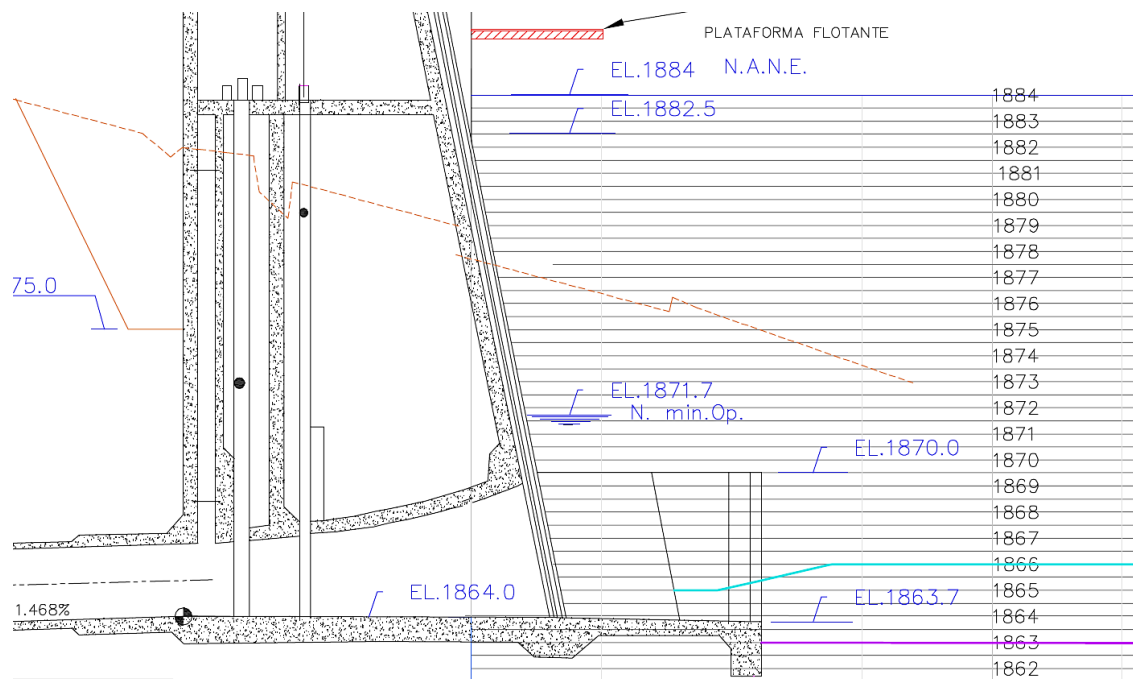


Figura 56. Nivel anterior y nivel actual del sedimento.

Cabe mencionar que existe un tramo donde el perfil del sedimento para la batimetría 2018 (color verde) se corta y no continúa. Esto ocurrió debido a que por encima de este sector se encuentra la plataforma flotante que alberga las bombas hidráulicas. Esta estructura impidió que el equipo Z-Boat pueda navegar por este sector y recopilar mediciones de las profundidades (véase Anexo V.4).

5.5. Reducción del volumen útil en el vaso de almacenamiento

Para esta estimación, se utilizó el método área reducción, el cual es de carácter empírico e incluye muchos supuestos. Para la aplicación de este método se requiere un valor de estimado de la tasa de sedimentación anual de todo el embalse. El valor utilizado que se tomó fue de 384 000 m³/año. Esta cantidad fue la determinada por el Servicio de Hidrografía Naval en su informe técnico final “Servicio de Batimetría del embalse de la presa de San Jacinto” (SNHN, 2016).

Se realizó una proyección para el año 2025 utilizando la curva cota – capacidad procedente de la última batimetría realizada en todo el embalse (2016). Para el año 2025 se estima que existirá un incremento de sedimento para un periodo de 6 años de 2,304 Hm³. Este incremento incidió a que se origine cambios en los volúmenes a cada cota del vaso de almacenamiento. La tabla 31 muestra los supuestos volúmenes a cada nivel que ocurriría para el año 2025.

Tabla 31.

Volumen de almacenamiento estimado para el año 2025.

Cota (m.s.n.m.)	Área (m ²)	Volumen de sedimentos (m ³)	Volumen de almacenamiento disponible (m ³)
1857	0,00	8,81	0,00
1858	0,00	71,95	0,00
1859	0,00	239,14	0,00
1860	0,00	494,78	0,00
1861	0,00	866,87	0,00
1862	0,00	1 378,29	0,00
1863	0,00	2 046,52	0,00
1864	0,00	2 996,81	0,00
1865	0,00	22 027,37	0,00
1866	277 875,23	146 803,72	28 613,06
1867	449 795,78	266 647,96	349 468,43
1868	632 573,96	386 492,20	844 958,75
1869	886 134,11	506 336,44	1 540 922,75
1870	1 190 709,70	626 180,67	2 503 200,75
1871	1 351 165,52	746 024,91	3 734 024,41
1872	1 488 828,36	865 869,15	5 119 605,64
1873	1 641 477,30	985 713,39	6 646 596,23
1874	1 788 674,56	1 105 557,62	8 324 872,85
1875	1 952 474,13	1 225 401,86	10 154 497,31

1876	2 151 061,05	1 345 246,10	12 206 264,90
1877	2 478 967,94	1 465 090,34	14 521 279,39
1878	3 089 050,74	1 584 934,57	17 305 288,72
1879	3 540 215,48	1 704 778,81	20 619 921,83
1881	4 280 037,11	1 944 467,29	29 104 514,54
1882	4 643 554,60	2 064 311,53	33 566 310,39
1883	5 053 368,81	2 184 155,76	38 408 746,60
1884	5 419 156,84	2 304 000,00	43 645 009,42

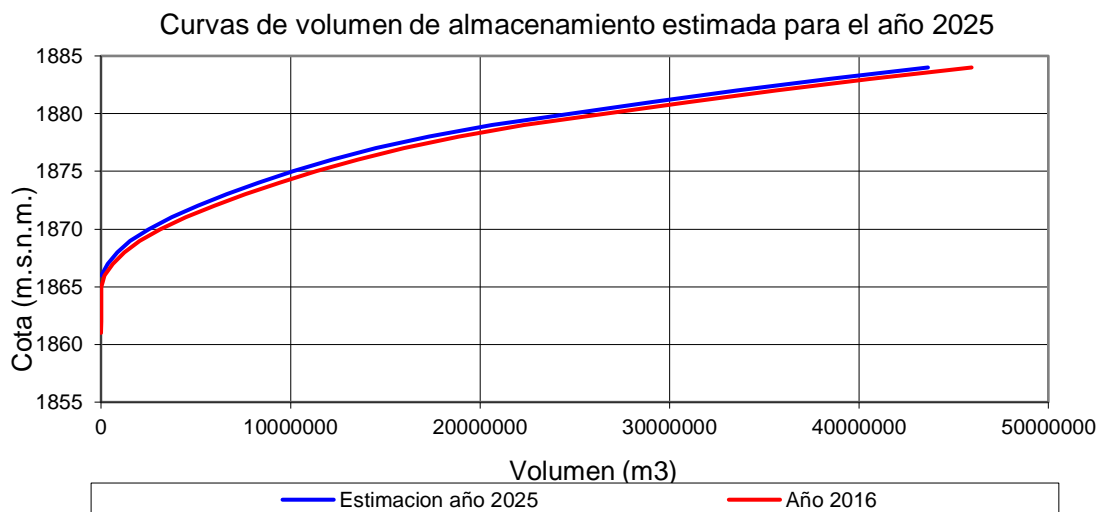


Figura 57. Curva cota almacenamiento año 2025.

Observando tanto la figura 57 como la tabla 31 se observa que según esta estimación la capacidad del vaso de almacenamiento de todo el embalse San Jacinto se reduciría en un 0.88 % para una tasa de sedimentación de $0.384 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Para el año 2025 se estima que se reduciría alrededor de un 5,3 % siempre y cuando se mantengan las condiciones que rigen en la producción como en el transporte de sedimentos en las cuencas de los ríos que aportan al embalse San Jacinto.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El espíritu del presente trabajo es ofrecer un enfoque en varios frentes acerca de la sedimentación en la zona donde se ubica la obra de toma del embalse San Jacinto. Debido a la complejidad del problema existen muchos supuestos utilizados que impiden obtener resultados precisos, especialmente en lo que respecta al cálculo del volumen de depósito en el embalse. Sin embargo, es posible obtener algunos resultados que son de utilidad para su utilización en trabajos futuros en el embalse.

6.1. Conclusiones

De la información recopilada y estudios precedentes

De todas las mediciones batimétricas realizadas en el embalse San Jacinto, muy poca de esta información presentaba detalles que muestren las características del relieve del sector en el lugar donde opera la obra de toma.

La batimetría realizada en el año 2016, cuenta con buena precisión y detalles en sus curvas de nivel. En este levantamiento se realizó un perfil de medición de profundidades justo en el eje del túnel.

Las batimetrías de los años 2013 y 1989, aunque en menor grado que la del 2016, también contaban con detalles y cuya información fue útil en algunos de los análisis de este documento.

El caso de las batimetrías 1995 y 2004, específicamente en el sector de la obra toma, se llegó a la conclusión de que no tienen el detalle ni la precisión requerida para ser utilizadas. Se atribuye lo anterior por el hecho de que, en estas mediciones no se realizaron perfiles de medición de profundidades en el sector de la obra de toma. Y como la densidad de puntos medidos en la zona de la toma fue baja, las curvas de nivel generadas para este sector no tienen relación con las características del terreno, ignorando detalles que caracterizan el relieve de la zona de influencia de la toma de agua del embalse San Jacinto.

De la batimetría a detalle ejecutada en el sector de la obra de toma del embalse San Jacinto

Se realizó el levantamiento batimétrico a detalle en el sector donde se sitúa la obra de toma, utilizando equipos de alta precisión, que generaron una superficie a detalle producto de una alta densidad de puntos obtenidos mediante perfiles longitudinales como transversales al eje del canal de captación de la obra de toma, separados a un metro de distancia entre dichos perfiles. Esto permitió caracterizar adecuadamente la morfología del relieve, con el objetivo de comparar con las superficies de anteriores mediciones.

De la reducción de la capacidad de almacenamiento en el área de la obra de toma del embalse San Jacinto.

Realizando la cuantificación de volúmenes de almacenamiento, utilizando la información considerada más confiable, (1984, 1989, 2016 y 2018) se concluye que, en el embalse, específicamente en la zona de influencia de operación de la toma de agua, se redujo la capacidad de almacenamiento para el periodo comprendido entre 1984-1989, disminuyendo un 6.3 % de la capacidad en este periodo. Para los periodos comprendidos entre los años 1989-2016 y 2016-2018, se determinó que la disminución de su capacidad de almacenamiento fue de 7.13 % y 0.62 % respectivamente. Finalmente se estableció que, específicamente para el sector donde opera la obra de toma del embalse San Jacinto se redujo la capacidad de almacenamiento de agua en una cantidad de 14.06 % desde el inicio de funcionamiento del embalse hasta la fecha.

De la situación actual de depósito de sedimentos en el área de la obra de toma del embalse San Jacinto.

Considerando la topografía anterior al llenado del embalse del año 1984 y la última superficie batimétrica del año 2018, se determinó que el valor aproximado sedimento acumulado en este sector es de 18 694 m³, y una cantidad de 1 648 m³ de erosión, aunque esta última magnitud es considerada sobrevalorada, condicionada debido al impedimento de recopilar datos en algunos sectores de la obra de toma y cuyos motivos fueron explicados en el capítulo III.

Además de ello se estimó que la tasa anual de sedimentos que ingresa a este sector es de 644.62 m³.

De la distribución espacial del sedimento acumulado en el área de la obra de toma.

Se ha identificado diferentes zonas según la intensidad del proceso erosión/sedimentación, estableciendo 4 sectores: el sector erosionado (ver figura 50) corresponde a los taludes que fueron ejecutados en la construcción de la infraestructura de la obra de toma: el canal que conduce el agua hacia la bocatoma y la estructura de hormigón que alberga la bocatoma y sus compuertas. La erosión en estos taludes está dentro del rango de 0.5 m hasta 2 m.

En ladera izquierda se encontró valores de erosión entre 0 y 0.5 m de altura. Contrariamente, en la parte de la ladera derecha, en una pequeña zona se presentó erosión, el resto de este sector fue afectado por sedimentación (ver figura 51) con variación de alturas desde 0.31 hasta casi alcanzar 3 m.

El sector de la denominada “Quebrada seca”, fue la zona más afectada, esta quebrada resultó completamente rellena de sedimento, con alturas desde 2 m hasta inclusive 12 m en su sector más profundo.

Para concluir cabe indicar que el sedimento ha colmatado la quebrada y toda el área medida, generando una planicie con cota 1866 msnm aproximadamente, identificando un patrón de deposición del sedimento fino casi uniforme en este sector.

De la situación actual del nivel del sedimento en el sector de la obra de toma

Haciendo la comparación de perfiles longitudinales al eje del canal y túnel de aducción entre la topografía 1984 y la batimetría 2018, se ha determinado que desde distancia 0+010 hasta la 0+055 el incremento de nivel de sedimento ha sido alrededor de 3 metros.

En toda la longitud del canal de tierra de aproximación a la bocatoma se tiene un nivel de sedimento de 1866 msnm, 3 metros por encima del nivel de construcción que era de 1863 msnm.

En proximidades del ingreso hacia bocatoma, el nivel se encuentra peligrosamente cerca del ingreso al túnel de aducción, actualmente se encuentra a un 1m por encima de la solera

del canal de hormigón construido, cuyo nivel de este en sus inicios era de 1864 mns. Cabe aclarar que no se pudo obtener detalle de los niveles de sedimentos que se encuentran justo por debajo de la plataforma flotante que aloja las bombas hidráulicas por la imposibilidad de realizar las mediciones en este sector como se detalla de manera gráfica en el anexo II.1 Zona de impedimento de datos de profundidad y V.4. Plataforma flotante.

Se encontró también, mediante análisis de secciones transversales y longitudinales al eje del túnel, de las batimetrías 2013, 2016 y 2018, el sedimento en estos últimos años se incrementa de manera uniforme y laminar.

6.2. Recomendaciones

Resultado de la ejecución del presente trabajo se recomienda:

Realizar un análisis y caracterización física y granulométrica de los sedimentos en el sector de la obra de toma que permita conocer el grado de consolidación para poder estudiar la dinámica geomorfológica y de deposición que se genera no solo en el sector sino también en el embalse.

Realizar mediciones batimétricas del sector de manera anual como así mismo sería de mucha utilidad que cuando se realicen los futuros levantamientos batimétricos de todo el embalse, se realicen al menos un par de perfiles de medición de profundidades en inmediaciones de la obra de toma y fundamentalmente sobre el eje del canal.

Para entender el comportamiento de sedimento en el embalse será necesario generar información batimétrica de manera anual en todo el embalse y afrontar el problema de los sedimentos, como así de la vida útil del embalse de manera integral, considerando no solo los niveles de sedimentos sino también el comportamiento de la cuenca y la dinámica del embalse.

Para obtener una mayor precisión en los resultados de los procesos ocurridos (sedimentación/erosión) es importante que al momento de las mediciones se realice una limpieza de las plantas acuáticas del sector.

Además de lo anterior, para una próxima batimetría de la obra de toma es necesario retirar la plataforma flotante al momento de hacer mediciones en este sector, ya que actualmente

es una incertidumbre si el nivel de sedimento ya ha alcanzado al ingreso de la compuerta del túnel de captación de agua.

Si bien, realizar la extracción y limpieza de sedimentos acumulado al interior del vaso de almacenamiento de los embalses resulta en un elevado costo económico, y hasta en algunos casos inviable según el grado de producción de sedimentos de la cuenca hidrográfica que aporta al vaso del embalse. Se recomienda estudiar a profundidad la posibilidad de realizar una extracción del material sedimentado en el área de influencia donde opera la obra de toma, pero sobre todo en el canal de aproximación que direcciona el agua hacia la bocatoma, y luego hacia el túnel.