

## **“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ATAGUÍA EN LA DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DEPOSITADOS AGUAS ARRIBA DEL CUERPO DE LA PRESA SAN JACINTO”**

### **1. INTRODUCCIÓN**

El presente documento que expone y formula a continuación “Análisis de la influencia de la ataguía en la distribución de sedimentos depositados agua arriba del cuerpo de la presa San Jacinto”, se encuentra enmarcado dentro de los trabajos de investigación que está realizando la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, que dispone de todos los equipos necesarios para levantamientos batimétricos, a través del Centro de Investigación del Agua.

El mencionado trabajo de investigación, se desarrolla por intermedio del Acuerdo de Trabajo suscrito entre la universidad Autónoma Juan Misael Saracho por intermedio del Centro de Investigación del Agua CIAGUA y el proyecto múltiple San Jacinto.

Como producto de este acuerdo firmado por ambas instituciones se genera el siguiente trabajo de prestación de servicios:

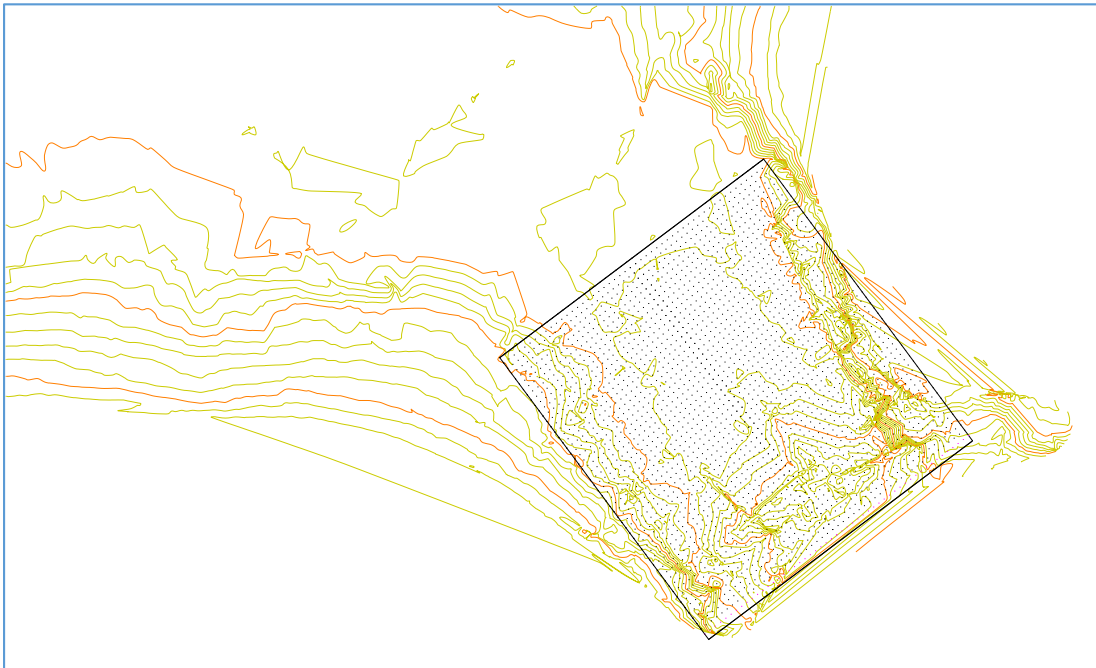
- ✚ Orden de compra de la empresa eléctrica ENDE Guaracachi S.A. para la realización de la batimetría del sector de la obra de toma y de la presa del embalse San Jacinto al Centro de Investigación del Agua de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (vea anexo 1).

El embalse San Jacinto, no cuenta con información batimétrica a detalle y actualizada del sector de la presa San Jacinto, la importancia radica en conocer el grado de sedimentación a manera de tomar en cuenta la vida útil de las diferentes obras, a fin de tomar decisiones correspondientes para contrarrestar este fenómeno de sedimentación.

El siguiente estudio se orienta a la realización de un levantamiento batimétrico a detalle mediante una grilla de puntos que permitan identificar la ubicación del ataguía construido para el desvío del río durante la etapa de construcción de la presa y la influencia de la operación de las compuertas de fondo en la disposición de sedimentos

en el fondo subacuático y el grado de deposición sedimentaria en el área aguas arriba de la presa.

La grilla de puntos debe ser longitud de espaciamiento de 1 m en dirección X y 1 metro dirección Y, como indica en la especificación técnica del trabajo.



*Figura 1.1.* Área de levantamiento sector presa San Jacinto.

**Fuente:** Términos de referencia del Servicio de batimetría de la obra de toma. ENDE HUARACACHI. (2019)

### **1.1. Antecedentes**

Desde el momento de su puesta en operación, uno de los problemas principales del embalse de San Jacinto, fue la cantidad de sedimentos que se depositaba en el vaso de almacenamiento a medida que transcurría los años, motivo por el cual es necesario determinar de manera aproximada la vida útil de esta obra, a través de ciertos parámetros de referencia que orientan acerca del proceso evolutivo de los sedimentos. Se ha determinado a nivel mundial, que de forma anual los diversos embalses pierden un 1% de su capacidad de almacenamiento y disminuyendo la vida útil del embalse,

trayendo consigo el fenómeno de colmatación que tiene un efecto adverso a las diferentes funciones que cumple, además de perjuicios de los usuarios de los distintos beneficios que brinda este tipo de estructura.

Uno de los principales problemas que a menudo afectan a los embalses, es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. Independientemente de que como parte del diseño está el disponer de un volumen para almacenar dichos azolves, muchas veces es rápidamente rebasado con la consecuente pérdida de volumen útil en el embalse y en casos extremos, el embalse puede ser inutilizado totalmente. En algunas presas, el volumen reservado para azolves no ha sido sobrepasado, pero, la velocidad con que se pierde, hace prever que el embalse perderá capacidad de almacenamiento antes de lo previsto, con la consiguiente disminución de disponibilidad de agua. Una forma de eliminar la cantidad de sedimento que llega al embalse es evitar la erosión en la cuenca y la que está alojada extraerla por medio de dragado, se considera que los costos para evitar la erosión de las cuencas son elevados y con resultados a largo plazo y que también lo son los costos de extracción del material depositado, entonces se entenderá porqué en muchas ocasiones es mejor construir un nuevo embalse que rehabilitar el azolvado, lo anterior no siempre es posible, pues además de las altas inversiones económicas, cada vez escasean más los sitios donde es posible construir una nueva cortina (García Camacho, 2005).

Tales son los motivos que orientan a realizar un análisis de la variación en la distribución de sedimentos en un área específica del embalse donde se encuentra un ataguía emplazado de manera perpendicular al margen izquierdo y en el paramentos aguas arriba del cuerpo de la presa San Jacinto, que cumplió la función de desviar las aguas del río hacia un túnel durante el lapso de tiempo que llevo la construcción del embalse y que al momento de su culminación no se hizo su respectiva extracción, y es ahí donde se genera la incertidumbre para llevar adelante éste trabajo de investigación con el fin de brindar conclusiones de una posible influencia del ataguía en la distribución de sedimentos.

Para éste análisis se cuenta con la información de 5 estudios batimétricos ejecutados a la fecha, el primero se realizó en noviembre de 1989 por el Servicio de Hidrografía Naval, posteriormente el año 1995, el tercero el 2004 por la Consultora Caryglobal, el cuarto en el año 2013 y el último y más reciente fue realizado en el año 2016 estos dos últimos también por el Servicio de Hidrografía Naval (Informe técnico San Jacinto, 2016)

Cabe hacer notar que estas batimetrías fueron realizadas en la totalidad del embalse, que abarca alrededor de 600 hectáreas, además que los levantamientos son de muy baja precisión debido a la distancia de separación entre los perfiles levantados y que a diferencia del presente estudio realizado, que realiza el levantamiento de un área de aproximada mente 0.4 hectáreas, generando mejor precisión, la misma que es necesaria para llevar adelante diversos análisis que involucran al ataguía y su posible influencia en la deposición de sedimentos.

## **1.2. Problema**

El fenómeno de acumulación de sedimentos en presas es un factor que influye de manera directa al periodo de vida útil en un embalse, además de condicionar la operatividad de las diferentes obras complementarias emplazadas en este tipo de estructuras que en conjunto contribuyen al cumplimiento de los objetivos propuestos.

A medida que el embalse transcurre su vida útil de operación, las constantes acciones de erosión en la cuenca que lo constituye y la sedimentación en el vaso de almacenamiento se ven expresados en la principal problemática con la que atraviesa el embalse en la actualidad, por tales motivos nos orientamos a realizar un análisis minucioso del comportamiento sedimentario, tanto temporal como espacial cuyos indicadores nos ayude a comprender el proceso de sedimentación en una zona particular próximas a un ataguía emplazado aguas arriba de la presa San Jacinto a manera da brindar una conclusión del estado actual de operación y la eficiencia de operación de los desfogues de fondo en la evacuación de sedimentos debido a una

posible la influencia del ataguía en el arrastre del material sedimentario hacia el dissipador.

La eficiencia de operación de las compuertas de fondo, la distribución de sedimentos en zonas próximas presa de San Jacinto, ¿depende directamente de la ubicación en la que fue emplazada la ataguía?

### **1.2.1. Planteamiento del problema**

Con las batimetrías realizadas anteriormente en el embalse de San Jacinto, se observó la magnitud de los sedimentos que han ido depositándose a medida que transcurre el tiempo, siendo un problema que afecta de manera directa al embalse provocando la disminución de la vida útil y llevando a la colmatación total de la presa, es necesario conocer la disposición de los sedimentos mediante un levantamiento batimétrico en las proximidades del ataguía para analizar la influencia de éstos al funcionamiento eficiente de los descargadores de fondo que se emplazó en la presa y verificar si la ubicación del ataguía influye en la eficiencia de desfogue de estas estructuras hidráulicas.

Debido a la poca importancia que se le dio a este sector tan importante de la presa de San Jacinto, no se cuenta con información detallada y actualizada de la disposición de sedimentos en el área de estudio que brinden pautas e indicativos acerca del grado de la influencia de la ataguía en la remoción de sedimentos cuando se realiza la apertura de compuertas de fondo del embalse de San Jacinto.

### **1.2.2. Formulación del problema**

¿Cuál es la influencia de la ataguía en la eficiencia de funcionamiento del desfogue de fondo de la presa San Jacinto?

### **1.2.3. Hipótesis**

El análisis detallado de la superficie subacuática en el paramento aguas arriba de la presa San Jacinto, específicamente en zonas próximas al ataguía, permitirá conocer la distribución del sedimento en esta área de estudio y determinar las acciones y/o recomendaciones a ejecutar para asegurar la vida útil del embalse.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

- ✚ Analizar la influencia de la ataguía en la distribución de sedimentos depositados aguas arriba del cuerpo de la presa San Jacinto para determinar el grado de operatividad de las compuertas de fondo, mediante el análisis de la información batimétrica con la que se cuenta de la zona de estudio.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✚ Recopilar información de la topografía del sector del estudio, paramento aguas arriba del cuerpo de la presa San Jacinto, antes del llenado del embalse, digitalizar la información obtenida.
- ✚ Recopilar y procesar la información de las anteriores batimetrías realizadas en la presa San Jacinto.
- ✚ Realizar el levantamiento batimétrico a detalle en el sector de estudio (paramento aguas arriba de la presa), específicamente en zona próxima a la ataguía.
- ✚ Analizar el estado actual del sedimento y su variación temporal de la distribución de sedimentos en el sector de estudio correspondiente al paramento aguas arriba de la presa San Jacinto.
- ✚ Analizar la variación espacial de la distribución de sedimentos en el sector de estudio paramento aguas arriba de la presa San Jacinto.
- ✚ Analizar la influencia de la ataguía en la eficiencia de las compuertas de fondo.

- ✚ Proponer recomendaciones para asegurar la operación de los desfogues de fondo y así asegurar la vida útil del embalse.

## **1.4. Justificación del proyecto**

### **1.4.1. Justificación académica**

Aplicar los conocimientos adquiridos en asignaturas anteriores como ser: topografía, hidrología, hidráulica, geodesia y obras hidráulicas para aplicarlos a este trabajo de análisis, mediante la ejecución de un nuevo método de levantamiento batimétrico utilizando el equipamiento del CIAGUA (Z-Boat 1800) en la zona donde se encuentra emplaza la ataguía de la presa de San Jacinto, de tal manera este trabajo sea el punto de partida de futuros análisis a realizar.

### **1.4.2. Justificación técnica**

Determinar si la ataguía emplazada durante la construcción de la presa, tiene alguna influencia respecto al funcionamiento de los desfogues de fondo en la evacuación de sedimentos cuando éstos entran en funcionamiento, realizando comparaciones con otras batimetrías y observar el continuo proceso de sedimentación.

### **1.4.3. Justificación social**

Mediante el análisis de la influencia de la ataguía y la disposición de sedimentos en el lugar de estudio y en zonas próximas al desfogue de fondo, se estudiará la dinámica del embalse San Jacinto, fenómeno que afecta de forma directa la operatividad de esta importante infraestructura y por ende a sus objetivos estipulados previos a su construcción.

### **1.4.4. Justificación económica**

Brindar recomendaciones que orienten para la optimización del funcionamiento de los descargadores de fondo, ya que estos son de vital importancia, porque aseguran la operatividad y el cumplimiento de la vida útil de la presa de San Jacinto.

#### **1.4.5. Justificación institucional**

El propósito del presente trabajo es aportar información, mediante un análisis de la influencia de la ataguía ubicado aguas arriba del cuerpo de la presa, en favor a fomentar a la realización de futuros estudios relacionados a sedimentación y vida útil de la presa San Jacinto.

Además, que el equipamiento utilizado (móvil Z-Boat, GPS Vector 320 de Hemisphere, un ecosonda monohaz de doble frecuencia y por otro lado el Software Hypack) en el levantamiento batimétrico, generará experiencia para afrontar trabajos posteriores de levantamientos batimétricos.



## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Introducción

El objetivo de construir embalses es del aprovechamiento de los recursos del agua a través de la regulación de caudales de un determinado río mediante el emplazamiento de una presa o dique que actúa como un lago artificial que almacena agua en cantidades requeridas según las demandas del proyecto, estas obras pueden ubicarse en el curso de un río o en zonas laterales. (Rocha, 1998).

Al construir una presa ocurre la retención de un parte de material sólido el cual es un fenómeno inevitable en este tipo de obras, produciendo la disminución de volumen de almacenamiento y por consiguiente reducción de vida útil. Este fenómeno es debido a la disminución de las corrientes de velocidad dentro del embalse por un considerable aumento de la sección transversal.

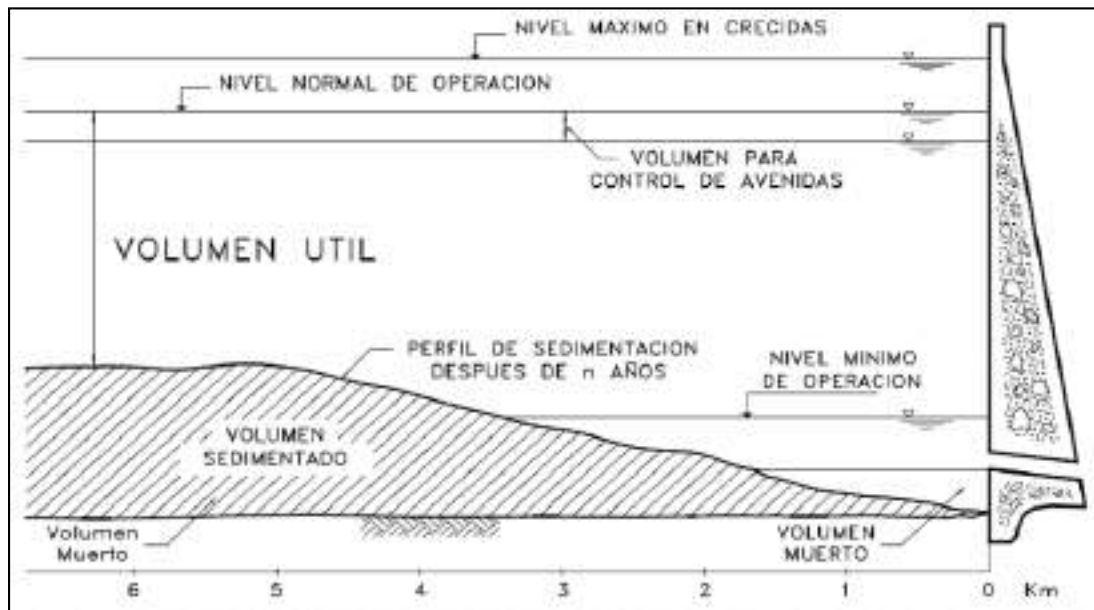


Figura 2.1. Embalse en proceso de sedimentación.

**Fuente:** Rocha, (1998)

En la Figura 2.1 se observa un esquema de definición de algunos elementos característicos de un embalse. Corresponde a la terminología oficial adoptada por la

Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD (International Commission on Large Dams). (Rocha, 1998).

*Volumen muerto (Dead storage, Tranche morte, Totraum)*. Es el volumen ubicado por debajo del punto más bajo de descarga que exista en el embalse.

*Volumen de control de avenidas (Food storage, Tranche de crue, Hochwasserrückhalt)*. Es la parte del volumen útil usada especialmente para este fin.

*Volumen de sobreelevación en crecidas (Flood surcharge, Surremplissage de crue, Ueberstau)*. Volumen comprendido entre el nivel normal de operación y el nivel máximo de crecidas. Este volumen sólo es ocupado durante las avenidas y luego debe descargar libremente por el aliviadero.

Nivel volumen de laminación está comprendido entre el volumen nivel máximo de crecidas y el volumen nivel normal de operación.

Las presas, reservorios o embalses que se encuentran ubicados en el curso de un río natural, están sujetos a la entrada de material sedimentario desde el momento que entra en operación. La pérdida de su capacidad de almacenamiento del recurso hídrico debido a la acumulación de sedimento en su interior, es el principal problema entre los muchos que afectan a estos tipos de obras hidráulicas.

Al interponer un obstáculo a un río, como es el caso de una presa, se origina un estancamiento, por el cual el sedimento transportado 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. Existen embalses en los que tal corriente no llega a formarse, y se produce en el vaso o en gran parte del mismo, una turbidez generalizada que evolucionará, según la dinámica particular del almacenamiento (Gracia, 1997).

El proceso sedimentario anteriormente mencionado, es mucho más complejo por sus distintos fenómenos que ocurren dentro del embalse y que a su vez depende de otros factores como las magnitudes de las crecidas entre otros.

La formación del delta de sedimento grueso anteriormente mencionado, se desplazará hacia el interior del embalse en función a la magnitud de las crecidas o debido a la variación de niveles dentro del vaso, por otro lado, el sedimento fino que se deposita en el fondo del embalse, atravesará un proceso de compactación a medida que transcurre el tiempo, llevando consigo el problema de la reducción de la capacidad de almacenamiento, por ende la disminución del volumen útil almacenado, como así también la dificultad de remover el sedimento fuertemente consolidado, otro fenómeno que es importante mencionar es la formación de las corrientes de densidad, que en algunos vasos es de vital importancia ya que alivia el problema de la sedimentación debido al su comportamiento permitiría la extracción del embalse antes que el material transportado decante dentro del vaso de almacenamiento.

## **2.2. Origen y propiedades de los sedimentos**

El nombre de sedimentos se da a las partículas procedentes de las rocas o suelos, que son acarreadas por las aguas que escurren y por los vientos. Todos estos materiales, después de cierto acarreo, finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, lagunas, en el mar y las partes bajas de la cuenca, principalmente en la planicie, lo que da origen a la formación de ésta y a su levantamiento. El sedimento que se deposita en un gran cuerpo de agua recibe de ésta su estructura y carácter finales (García & Maza, 1998).

Los sedimentos no son otra cosa que las partículas que provienen directamente de las rocas o de los suelos, éstos son arrastrados por el agua, producto de las precipitaciones, de los escurrimientos, y también, pero en menor proporción por los vientos propios de cada región. Estos materiales, después de un cierto tiempo de transporte o de arrastre y por acción propia de la gravedad, así como de la velocidad, son depositados a lo largo de sus propios cauces en los lagos, lagunas, o el mar; se

sitúan en las partes más bajas de la cuenca en estudio, principalmente en sitios de planicie muy extensas lo que hace que ésta se levante. (Sánchez, 2014, p.39)

### **2.2.1. Origen de los sedimentos**

No es posible indicar con precisión todas las fuentes que producen los sedimentos que llegan a un río y son acarreados por su corriente. Sin embargo, de acuerdo con la definición anterior, la fuente principal la constituyen los suelos y rocas que se encuentran en su cuenca, y el agua y el viento son, en nuestro medio, los principales agentes de erosión y de transporte. Por otro lado, dada la actividad del hombre en el medio que lo rodea, las fuentes del sedimento pueden clasificarse en naturales y artificiales (García & Maza, 1998).

#### **2.2.1.1. Fuentes naturales**

- ◆ Erosión de la superficie del terreno
- ◆ Erosión del cauce principal y sus tributarios
- ◆ Movimientos naturales del terreno

El proceso erosivo se produce en todo tipo de suelo, unos con mayor magnitud que otros, que consiste en el desprendimiento de las partículas, dicho fenómeno es producido por agentes externos como la lluvia que genera un escurrimiento sobre la superficie de la cuenca.

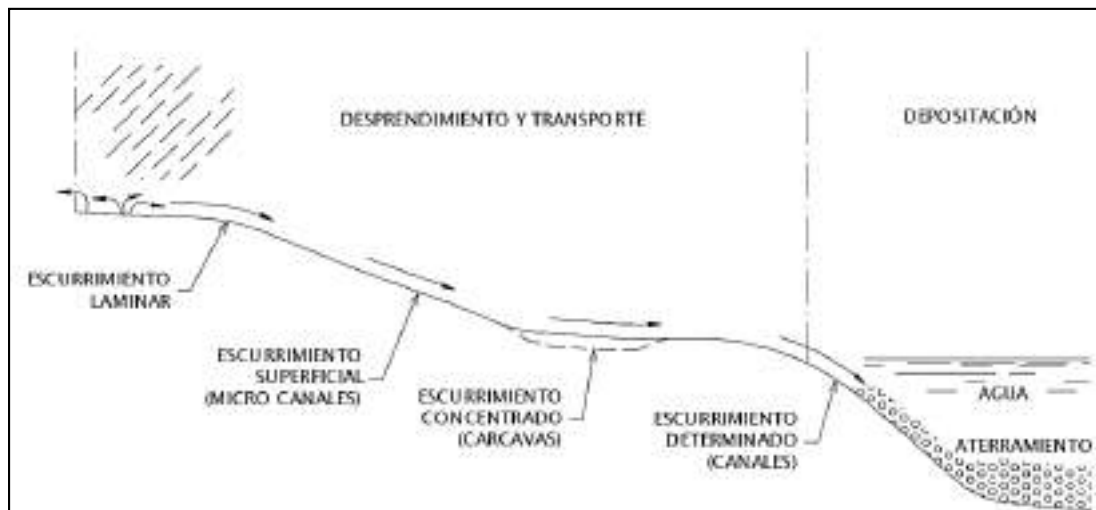


Figura 2.2. Proceso erosivo de una cuenca.

Fuente: Sánchez , (2014)

#### 2.2.1.2. Fuentes artificiales

- ◆ Destrucción de la vegetación
- ◆ Obras de ingeniería
- ◆ Explotación de minas y canteras
- ◆ Desechos urbanos e industriales

En la ingeniería, el origen de los sedimentos también puede dividirse en:

- ◆ Sedimentos que se originan en la superficie de la cuenca.
- ◆ Sedimento proveniente del fondo y orilla de los ríos.
- ◆ Sedimentos provenientes de desechos industriales y urbanos.

#### 2.2.2. Propiedades de los sedimentos

Las características y particularidades de los sedimentos son los que reflejan los diferentes procesos por los que éste material atraviesa, como es la erosión, transporte y el depósito del material erosionado de la cuenca en el interior del vaso de almacenamiento del embalse.

La forma, el tamaño, la densidad de las partículas de sedimento son las de mayor influencia en el proceso de transporte del material aguas abajo, aspecto por el cual es de vital interés en la realización de las obras hidráulicas, como es en este caso la importancia que conlleva poder estimar volúmenes de material arrastrado de sedimento erosionado de la cuenca hacia el embalse.

Según Maza (1998) desde el punto de vista de la resistencia que oponen a ser arrastrados y de su comportamiento al ser transportados, se distinguen tres clases de materiales:

- ◆ No cohesivo o granular o friccionante.
- ◆ Cohesivo.
- ◆ Rocoso.

Las propiedades individuales de las partículas que constituyen un suelo granular son las siguientes:

- ◆ Peso específico.
- ◆ Forma.
- ◆ Tamaño.
- ◆ Velocidad de caída.

Propiedades de un conjunto de partículas que definen la dinámica del sedimento:

- ◆ Distribución granulométrica.
- ◆ Peso volumétrico.

Propiedades de las partículas finas en suspensión:

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

### 2.3. Transporte de sedimento

El transporte de los sedimentos se lleva adelante por medio de diferentes formas a través del flujo de una corriente debido a que el esfuerzo cortante promedio sobre el fondo del cauce es mayor que el esfuerzo crítico tractivo del material del fondo del cauce, éste transporte puede ser por deslizamiento, rodamiento, exaltación dentro del flujo, en suspensión, o también puede darse de forma combinada.

Las arenas, gravas y rocas de tamaño considerable, que por lo general son sedimentos que generalmente ruedan, se deslizan o avanzan a saltos valiéndose como elemento de apoyo el fondo, éstos a su vez conforman lo que se denomina carga de fondo o carga de lecho. Así también, las partículas de material existente en el fondo, que viajan suspendidas por la corriente es denominada carga de fondo en suspensión, que, en adición con el material fino menor a 0.062 mm, tales como limos y arcillas son arrastradas por el escurrimiento pluvial al cauce en forma de material o carga de lavado, conformando la carga en suspensión (Sánchez Blum, 2014).

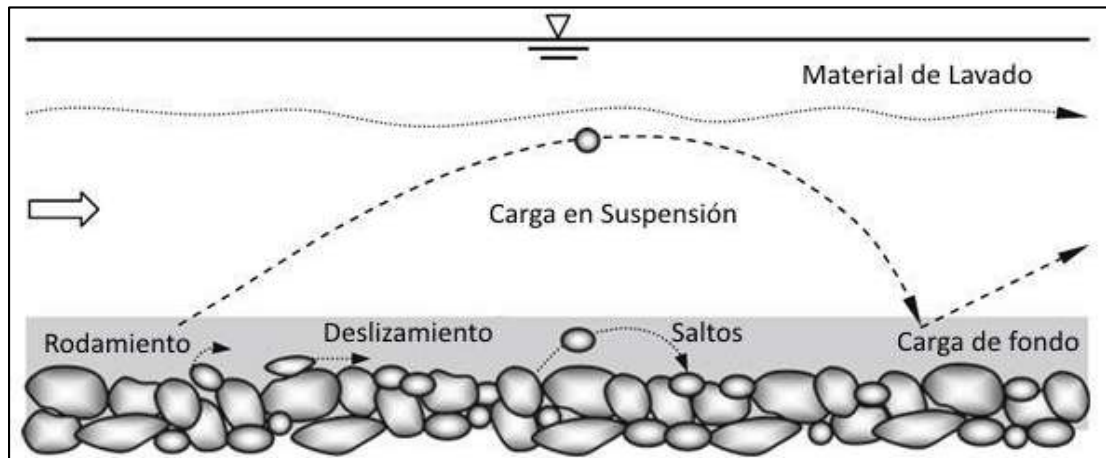


Figura 2.3. Modos de transporte de sedimento.

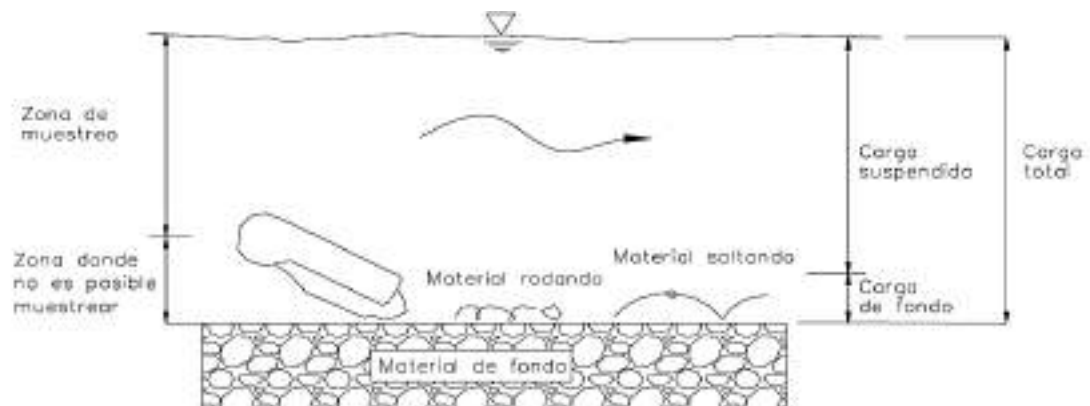
**Fuente:** Fluvial hydrodynamics, Subhasis Dey, (2004)

### 2.3.1. Clasificación del transporte de sedimentos

El material sedimentario como son las arenas, gravas, piedras, rocas que conforman los sedimentos gruesos, su forma de movimiento es a través del deslizamiento, rodadura o saltos sobre el fondo, los mismos que son denominados como carga de fondo o carga del lecho. Así también las partículas que se transportan de manera suspendida por las corrientes conjuntamente con los limos, arcillas que resultan del lavado del escurrimiento superficial, son denominadas cargas de fondo en suspensión.

- ◆ **Transporte en la capa de fondo.** - Material del fondo del cauce que rueda, salta o es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo.
- ◆ **Transporte de fondo en suspensión.** - Material del fondo del cauce que es transportado en suspensión por acción de la velocidad y turbulencia de la corriente.
- ◆ **Transporte total de fondo.** - Material de fondo transportado por la corriente tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión.
- ◆ **Transporte de lavado.** – Por lo general es material fino (limo y arcillas) transportado en suspensión, el cual es originado por el escurrimiento de la lluvia.
- ◆ **Transporte en suspensión.** – Conformado por el material de fondo, así como por material de lavado arrastrado de la cuenca por el escurrimiento superficial, los cuales son transportados en suspensión debido a la turbulencia de la corriente y por su bajo peso.
- ◆ **Transporte total.** – Es la suma total del material que se transporta por el río, considera las diferentes fuentes u origen del material y sus diferentes formas de transporte.



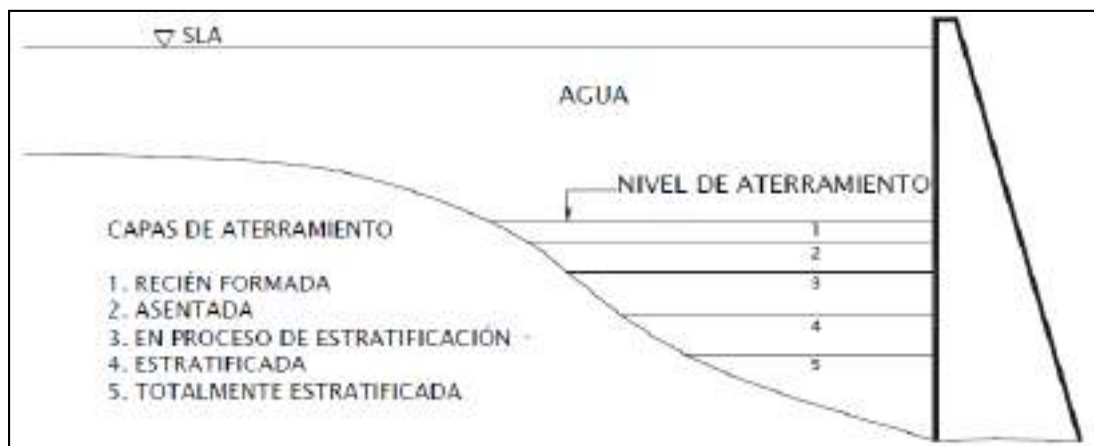


*Figura 2.4.* Clasificación del transporte de sedimento.

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)

#### **2.4. Deposición de sedimento en un embalse**

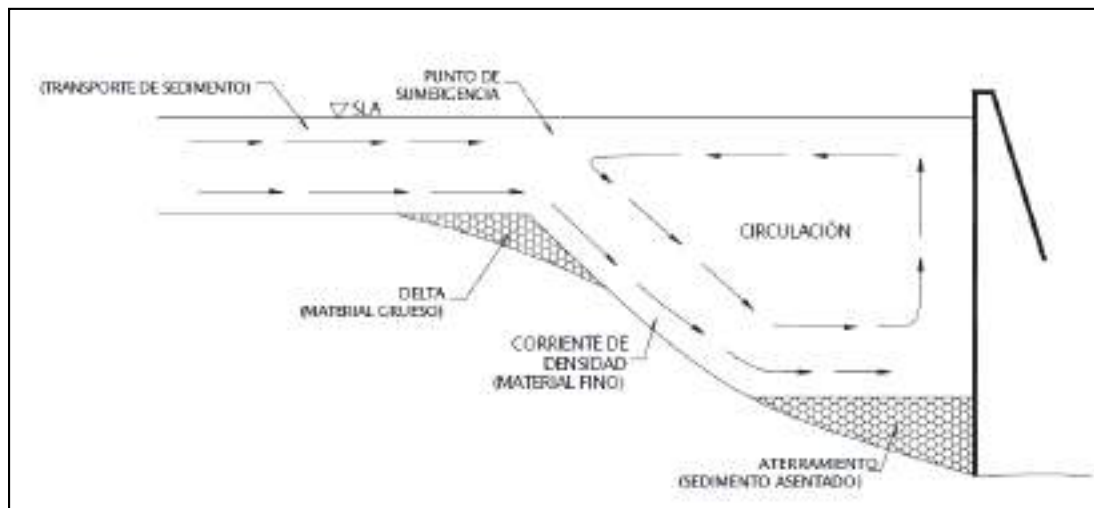
Cuando se construye una presa, obstaculizamos el curso del agua a manera de generar un embalse artificial, lo que produce el decrecimiento de la velocidad del fluido, dicho evento ocasiona la decantación de sedimentos tanto gruesos como finos formando depósitos de materiales bien diferenciados que dependen según su la velocidad de sedimentación por efecto de su granulometría que presentan las partículas que ingresan al embalse, es decir, que los materiales más gruesos decantan más rápido a diferencia de los más finos, por lo general se encuentran formando un delta progresivo desde la entrada del río al embalse, y por otro lado los sedimentos finos que requieren velocidades mínimas para decantar, se ubica al final del mismo, cuyo recorrido es a través de las corrientes de densidades. Cada embalse presente un esquema de depósito diferente debido a diferentes aspectos y particularidades que presenta cada uno, ya sea por la geometría del embalse, tamaño y tipo de partículas entre otros (Moreno Avalos, 2012).



*Figura 2.5.* Proceso de deposición de sedimentos en un embalse artificial.

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)

Una vez decantado el sedimento en el lecho del embalse, su incremento de volumen está en función a la precipitación, debido a que en avenidas es donde más sedimento ingresa, lo cual es un fenómeno cíclico que ocurren todos los años provocando incrementos paulatinos de materiales en formas de capas a medida que ocurren las crecidas, lo que se conoce como el nombre de estratificación al proceso en el que se consolida capas tras capa de sedimento debido al peso de la nueva capa recientemente depositada y además de la presión que el fluido ejerce sobre el anterior nivel de aterramiento.



*Figura 1.6.* Proceso de consolidación del aterramiento en el lecho del embalse.

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)

#### **2.4.1. Patrones de deposición de sedimentos en embalses**

El análisis y estudio de la forma en el que se deposita el sedimento dentro de un embalse es de vital importancia a efecto de identificar problemas y posibles soluciones que demanda su finalidad por el cual se emplaza una estructura de esta índole, cada reservorio presenta su propia particularidad sedimentaria debido a características propias que presenta cada embalse.

Por lo general, un embalse presenta un esquema de sedimentación muy similar a otro, tomando en cuenta que el reservorio presenta uno o más cargas de alimentación, a medida que recorre las partículas aguas abajo, surge el proceso de decantación en función a su peso y a la velocidad a media que se adentra en el embalse, este proceso genera un esquema de zonas de depósito de materiales de distinto tamaño y características.

Estos esquemas de deposición de material sedimentario, suele ser afectados por factores externos, como es la operación del embalse en épocas donde el nivel de agua es relativamente bajo, o en ocasiones donde ocurra algún evento extraordinario donde ocurra gran cantidad de movimiento de sedimento.



*Figura 1.7.* Patrón de sedimentación del embalse Peñol-Colombia.

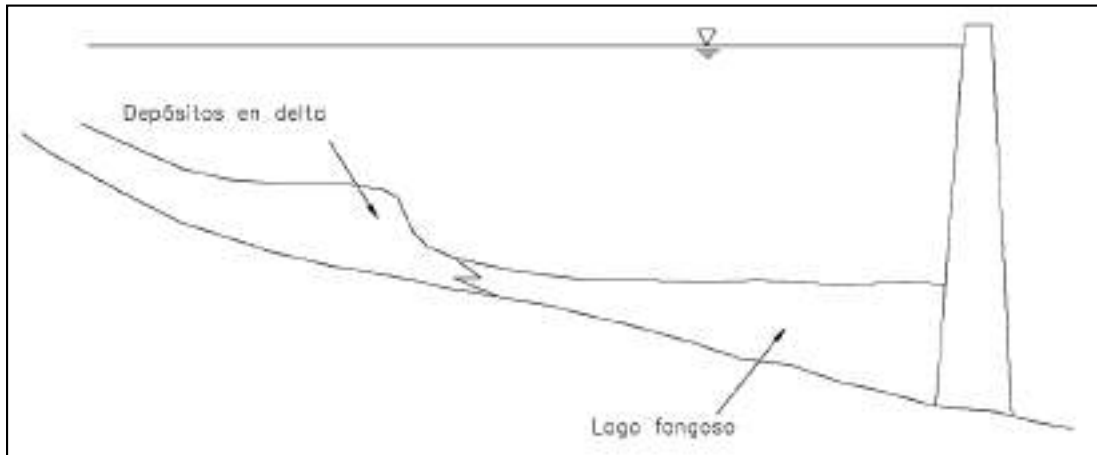
**Fuente:** Morris, (2015)

#### **2.4.2. Zonas de depósito de sedimentos en embalses**

Por lo general, un embalse presenta un esquema de depósito longitudinal bien característico debido a que el proceso sedimentario ocurre desde el punto de entrada al embalse hacia aguas abajo dirigiéndose al punto de salida o cuerpo de la presa, se observa tres zonas donde cada una presenta distinto tipo de sedimento.

La primera zona es la más alta, donde se genera un delta de material grueso que, debido a una serie de propiedades, el sedimento logra decantar de manera fácil y sin requerir demasiado tiempo, la segunda zona está comprendida entre un extremo o parte final del delta anteriormente formado, cuya característica es que posee mayor pendiente respecto al fondo del embalse, además los tamaños de las partículas son menores respecto a la zona anterior, y por último la zona de depósitos finos que está

formado por las corrientes de densidad o flujo no estratificado, por lo general son fondos fangosos con gran cantidad de sedimento en suspensión.



*Figura 1.8.* Esquema general de la zona de depósito en un embalse.

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)

### 2.4.3. Esquema de depósito lateral de sedimentos

Cada embalse presenta distintas formas en su geometría lateral de sedimentación, ya que cada individualmente presentan diferentes propiedades que lo caracterizan a cada uno, tales como la forma del baso, tamaño de partículas, tipo de sedimento, operación, mantenimiento, caudal entre otras. Cada forma geométrica o algún detalle que presenta alguna sección, se debe a factores que influyen de manera directa al baso de almacenamiento, a la vida útil que se proyecta al momento de emplazar una presa, además, es de gran importancia poder analizar de manera minuciosa estos esquemas de depósitos a manera de determinar principales causas o efectos el cual se origina uno de estos esquemas de depósito sedimentario.

La acumulación de sedimento en la parte baja de un embalse, se debe principalmente a los siguientes factores:

- ✚ El proceso de transporte y decantación de sedimento al entorno de un cauce, es producido por la erosión aguas arriba.

- ✚ El perfil vertical de una sección, puede concentrar sedimentos en suspensión en las partes bajas.
- ✚ La distribución uniforme de sedimentos en suspensión y su proceso de decantación, es directamente proporcional a su tirante de agua.

#### **2.4.4. Geometría de las zonas de depósito longitudinal**

Como ya se mencionó anteriormente, la distribución de sedimentos varía drásticamente en un embalse respecto a otro, ya sea por sus características peculiares, la forma de operación o algún efecto exterior a la misma, cabe hacer notar que todo este proceso de formación que atraviesa el fondo subacuático es llevado adelante mediante corrientes de densidad el cual el sedimento se transporta hacia el interior formando depósitos sedimentarios que se nombra a continuación:

##### **a. Depósito en delta**

Por lo general se compone de material grueso o pesados como se compone de gravas, piedras, arenas y en ocasiones por limos, se ubica en la entrada de flujo al embalse avanzando paulatinamente hacia el interior del embalse a medida que el material es depositado.

##### **b. Depósito en cuña**

Esta forma de deposición se produce en embalses pequeños con gran capacidad de retención de sedimento, o en embalses donde no se tiene buena operación, este material es transportado por corrientes de densidad hasta zonas cercanas del cuerpo de la presa o cortina de retención del embalse, prolongándose aguas arriba.

##### **c. Depósitos adelgazados**

Es en esquema muy particular en embalses que operan a nivel alto, cuya forma de deposición va adelgazando en sentido del flujo debido al contante movimiento del agua a través de obras complementarias ya sea los desfuegos de fondo u obras de toma.

#### d. Depósito uniforme

Es una forma de depósito propia de embalses en forma alargada o encañonados con variación de niveles de operación del mismo.

La importancia que implica conocer la forma en que el sedimento se encuentra acumulado en el interior de un embalse, radica en que nos brinda pautas de futuros problemas que podría estar ocurriendo, de manera posterior poder brindar pautas de posibles soluciones o alternativas que se podría brindar en casos donde se presentes antecedentes similares a lo descrito anteriormente.

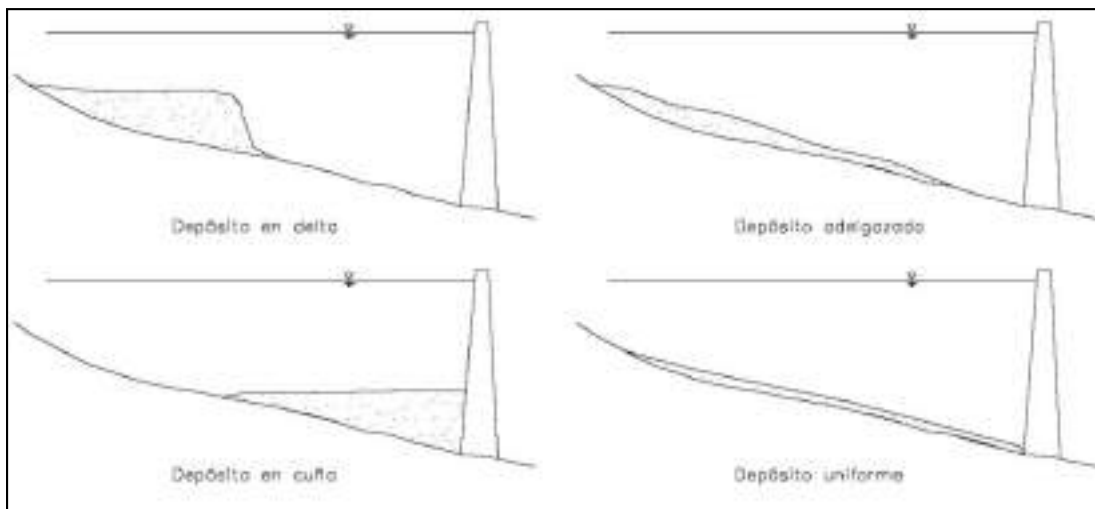


Figura 2.9. Esquema básico del depósito de sedimentos.

Fuente: Moreno Avalos, (2012)

## 2.5. Problemas en un embalse por sedimentación

### 2.5.1. Inversión para el proyecto

Cuando se realiza un estudio para el emplazamiento de un embalse, se debe tener en conocimiento la tasa de circulación de sedimento por el cauce, realizar simulaciones, realizar estudios sedimentológicos que permitan que la obra satisfaga la vida útil que es el factor más determinante a la hora de emplazar las obras ya que se debe asegurar que cumpla sus fines u objetivos previstos, al ser una inversión del estado se trata de

evitar a que aparezcan problemas antes de lo previsto y se tenga de seguir utilizando fondos del estado para dar soluciones.

### **2.5.2. Estructura del embalse**

Como en todo embalse se sabe que el proceso de colmatación es continuo, unos embalses más que otros, la estructura corre riesgo de posibles desbordes en algún fenómeno eventual a través del vertedero de excedencias, otro problema es la estabilidad de la estructura debido a esfuerzos adicionales que genera el material sedimentario.

### **2.5.3. Producción de energía**

Cuando se reduce la capacidad de almacenamiento de un embalse, disminuye el recurso hídrico, por ende, reducen la capacidad de producción de energía eléctrica, por otro lado, cuando la colmatación llega a nivel de las obras de toma, el material sedimentario comienza a deteriorar los equipos de las centrales hidroeléctricas, que mantenimiento, reparación, reduce la eficiencia de producción hasta incluso dejar sin funcionamiento.

### **2.5.4. Agua para riego**

La colmatación de las obras de toma significa un impacto directo a la economía de los usuarios, la producción se ve afectada por falta de agua, además de que se ocasionaría un desequilibrio en el calendario de cultivos, reduciendo la capacidad de producción.

### **2.5.5. Abastecimiento de agua potable**

Además de ocasionar escases del agua, dejaría poblaciones sin abastecimiento afectando la vida cotidiana de las personas beneficiarias de la obra, el problema radica aún más en caso de que una vez colmatado la obra de toma, no abastecería el caudal de demanda, e incluso se requiere mayor inversión en el tratamiento del líquido elemento.



## **2.6. Alternativas de prevención y limpieza de sedimentos en embalses**

### **2.6.1. Sistemas para el control de sedimentos**

La sedimentación en embalses es un problema que difícilmente se puede evitar, pero que, sí se puede controlar, hasta incluso se puede hacer una limpieza de los materiales sedimentarios. Existe una serie de alternativas, el cual se debe optar más de una según el problema que atraviese un determinado embalse, por lo general se trata de dar soluciones en parte donde se localiza la producción del sedimento, es decir en la cuenca, lugar donde se debe minimizar tanto en producción como el transporte de sedimento hacia el vaso de almacenamiento, por otro lado se debe maximizar el control de paso del sedimento a través de la operación rigurosa de las obras hidráulicas involucradas en salida de sedimento. La prevención que se aplica es a largo plazo donde el resultado no se puede observar en un tiempo inmediato ya que esta problemática es de carácter probabilístico y se necesita muchos años para poder observar resultados.

### **2.6.2. Métodos indirectos**

#### **2.6.2.1. Prevención de la erosión**

La mejor forma de evitar la sedimentación, es prevenir los diferentes tipos de erosión a través de diferentes técnicas de conservación de suelo, este trabajo en ocasiones no se encuentra justificado cuando se trata de cuencas de embalses pequeños ya que ésta alternativa conlleva a un costo y tiempo inicial en su realización.



*Figura 2.10.* Muros para formación de terrazas.

**Fuente:** Morris, (2015)

#### **2.6.2.2. Ubicación del embalse en sitios adecuados**

La ubicación donde será emplazada la presa resulta ser uno de los factores más importantes en lo que se refiere a la vida útil del embalse, por lo que se debe ubicar el lugar donde no haya demasiado ingreso de sedimento, además que resulte ser económico y que tenga la mayor capacidad de almacenamiento.

#### **2.6.2.3. Determinación adecuada de la capacidad reservada de azolves**

Gran parte de los trabajos que se realiza sobre los problemas de sedimentación en embalses, tiene como finalidad calcular con el mayor grado de exactitud, la probable ubicación del sedimento dentro del embalse, por lo tanto, se debe especificar la cantidad de volumen de sedimento destinado a esta problemática, para posteriormente tomar decisiones acerca de posibles soluciones optar.

#### 2.6.2.4. Reducción de la capacidad de retención en embalses

Lo que se pretende es que el sedimento ingresado al embalse no tenga el tiempo necesario para decantar dentro del mismo, para ello se enfoca al estudio de las corrientes de densidad que se forma al interior del embalse, cuyo fenómeno para que cumpla los objetivos de desalojo de sedimento, debería cumplir con algunas condiciones fundamentales:

- a) La corriente de densidad que se forma completamente dentro del embalse debe llegar hasta la cortina o cuerpo de la presa.
- b) Que los descargadores de fondo tengan la capacidad de descargar una gran parte de la corriente de densidad.
- c) Que la concentración o volumen dentro de la corriente de densidad, sea lo suficientemente alta como para justificar la evacuación de sedimentos.



*Figura 2.11.* Corriente de densidad.

**Fuente:** Morris,( 2015)

### 2.6.2.5. Intercepción del sedimento entes del embalse

Para evitar que el sedimento llegue al embalse, es posible diseñar obras de contención o captación de sedimento grueso en zonas aguas arriba, permitiendo que el sedimento no llegue al embalse, reduciendo en porcentajes altos el grado de colmatación en embalses donde se presenta material grueso.



*Figura 2.12.* Pequeñas obras de control Rio Erque Cochabamba-Bolivia.

**Fuente:** Morris, (2015)

Entre las obras más comunes se encuentran las pequeñas presas, trampas atrapa sedimentos, azudes, ataguías, diques que son obras rústicas que funcionan como presas de consolidación, aunque no son tan efectivas a largo plazo debido a su colmatación.

### **2.6.3. Soluciones directas**

La problemática de la deposición de sedimentos en un embalse, se inicia desde el momento que se inicia la construcción y sigue su curso a medida que transcurre el periodo de vida útil, llegando a un punto donde el sedimento empieza a manifestarse entre las principales obras, afectando la operatividad ya sea de compuertas de fondo y obras de toma, lo que nos direcciona a la toma de alternativas a fin de alargar la vida útil del embalse en sí y sus diferentes obras que las compone.

Cuando el sedimento ya se encuentra depositado dentro del vaso de almacenamiento, tendríamos que hablar de alternativas de como mitigar el sedimento, a través de las distintas técnicas que se podría aplicar en un embalse que estarían en función a características peculiares indistintas unas de otras, ya que si el volumen de material sedimentario a colmatado gran parte del embalse, sólo queda aplicar de manera obligatoria algún acontecimiento puntual o técnicas de mitigación de sedimentos que se propone a continuación:

- ◆ Técnicas de dragado
- ◆ Remoción hidráulica
- ◆ Remoción por medio de sifón a flujo crítico

#### **2.6.3.1. Dragado de sedimentos**

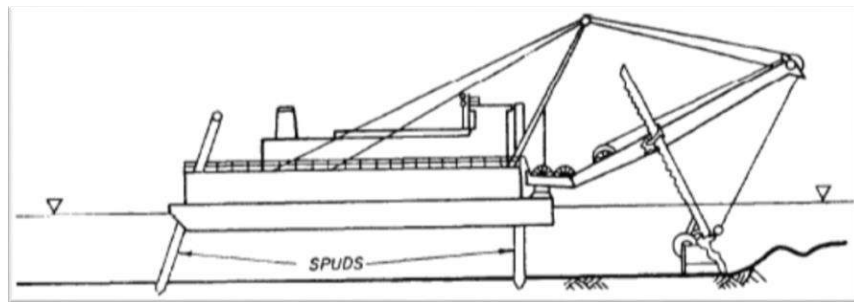
El proceso de dragado de sedimento en embalses, tiene como objeto la evacuación de sedimento de manera directa mediante el uso de equipos de excavación o extracción de material manualmente, donde inicialmente se usaba maquinaria de excavaciones de tierra firme, llámese palas, cucharas, retroexcavadoras a lo que posteriormente aparecen las dragas hidráulicas y como así mismo un tiempo después las dragas hidráulicas.

##### **2.6.3.1.1 Dragas mecánicas**

Son equipos de dragado que operan sobre el terreno de manera totalmente mecánica en la extracción de sedimento, es una maquinaria que posee muchas desventajas

debido a su forma de aplicación, sus principales limitantes están en la profundidad de dragado, en la turbiedad y el retorno del material que genera al momento de la operación, además de llevar a grandes costos la realización de este trabajo, existen varios tipos de dragas mecánicas que se menciona a continuación:

- ◆ Draga de pala
- ◆ Draga de cuchara
- ◆ Draga de Rosario o Cangilones
- ◆ Draga de Dragalinas.



*Figura 2.13.* Dragado mecánico de cucharón (USACE,1983).

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)

### 2.6.3.1.2 Dragas hidráulicas

Este tipo de draga está basada en la acción de una bomba centrífuga que, a través de un tubo de succión o aspiración, el material es arrastrado e impulsado hacia depósitos o al exterior del embalse, esta forma de dragado es eficiente para material suelto no cohesivos (arenas, limos, arcillas) debido a que son materiales más livianos y pueden fluir con el agua durante el proceso de remoción.



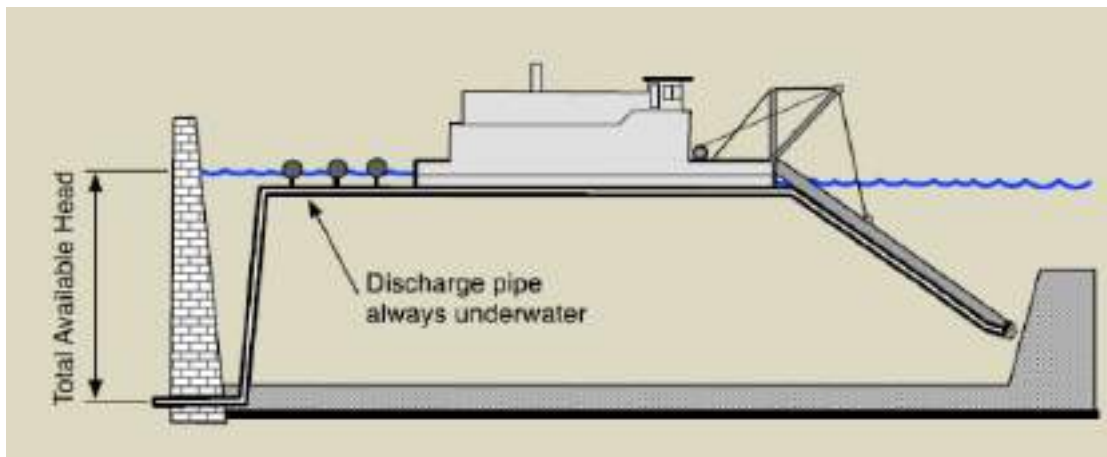


Figura 2.14. Draga tipo sifón.

Fuente: Morris, (2015)

Profundidades de dragado por diferentes métodos:

**Tabla 2.1**

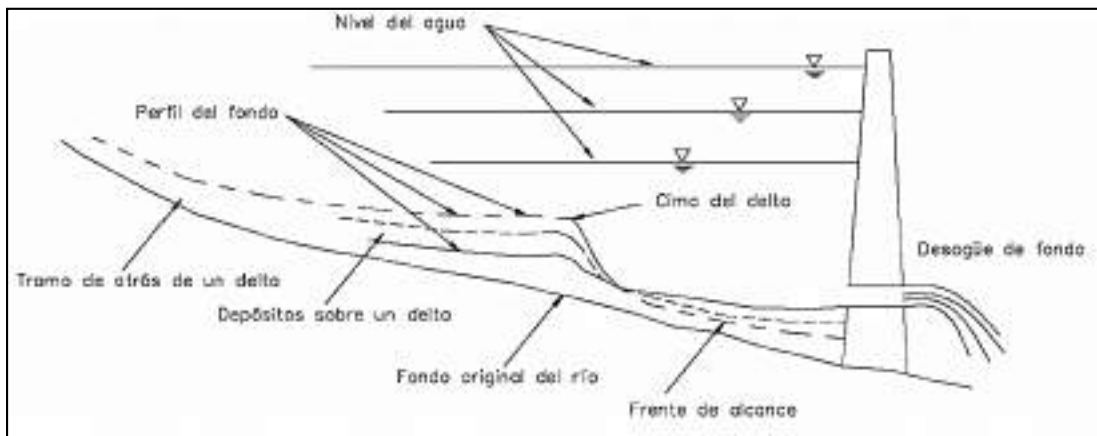
*Comparación de profundidades de dragado para diferentes métodos.*

MÉTODO	PROFUNDIDAD DE DRAGADO
	(m)
Dragado por succión	30
Dragado por succión de corte	30
Dragado por succión con bomba sumergible	85
Dragado por escudaron	20
Dragado por escalera	30
Dragado con sistemas de gravas	150
Remoción por aire	80
Bombas sumergibles	150

Fuente: Adaptada de Roovers, (1989)

### 2.6.3.2. Remoción hidráulica

La remoción hidráulica de sedimentos se produce en el interior del embalse debido a la fuerza erosiva que tiene el agua para producir la socavación de material sedimentario acumulado, dicho fenómeno suele evacuar el material conjuntamente con el agua al momento que abre las compuertas de fondo durante la operación, por lo general, el punto de partida de este acontecimiento se da en zonas próximas al cuerpo de la presa, más propiamente en zonas adyacentes al desfogue de fondo donde se generan grandes velocidades de salida, además de formarse una especie de cono de erosión en forma de cráter que posteriormente da lugar a una erosión retrogresiva agua arriba del vaso de almacenamiento formando un canal principal por donde en agua se aproxima a los desfogues.



*Figura 2.15.* Proceso remoción hidráulica de sedimentos durante extracción.

**Fuente:** Moreno Avalos, (2012)



### **3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES**

#### **3.1. Ubicación de la zona de estudio**

El embalse San Jacinto fue construido entre los años 1983 y 1986 por la asociación San Jacinto que en ese entonces estaba conformada por la Empresa Nacional de electricidad (ENDE), el Ministerio de Asuntos Campesinos y Agricultura, además de la Corporación de Desarrollo de Tarija. El propósito de la obra es de uso múltiple como la generación de energía, riego, atractivo turístico, donde se practican deportes acuáticos.

Esta obra hidráulica se encuentra ubicado a 7 kilómetros de la ciudad de Tarija – Provincia Cercado, consta de una presa en arco de doble curvatura de aproximadamente 100 metros de coronamiento, y una altura de 75 metros cuyo vaso de almacenamiento se encuentra alimentado por tres afluentes como es el río Tolomosa, río El Molino y la quebrada de tablada. Desde el momento en que entra en funcionamiento en embalse se identifica el problema de la gran cantidad de sedimento que ingresa y es a causa de esto que se lleva adelante levantamientos batimétricos en todo el embalse.

#### ***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.

El presente estudio de análisis se realizó en el departamento de Tarija-Provincia Cercado, específicamente en un área aguas arriba de la presa San Jacinto.

Área de Trabajo	Coordenadas Geográficas	Coordenadas UTM
Presa	21°36'1.19"S 64°43'32.70"O	321351.91 m E 7610419.13 m S Zona 20 K

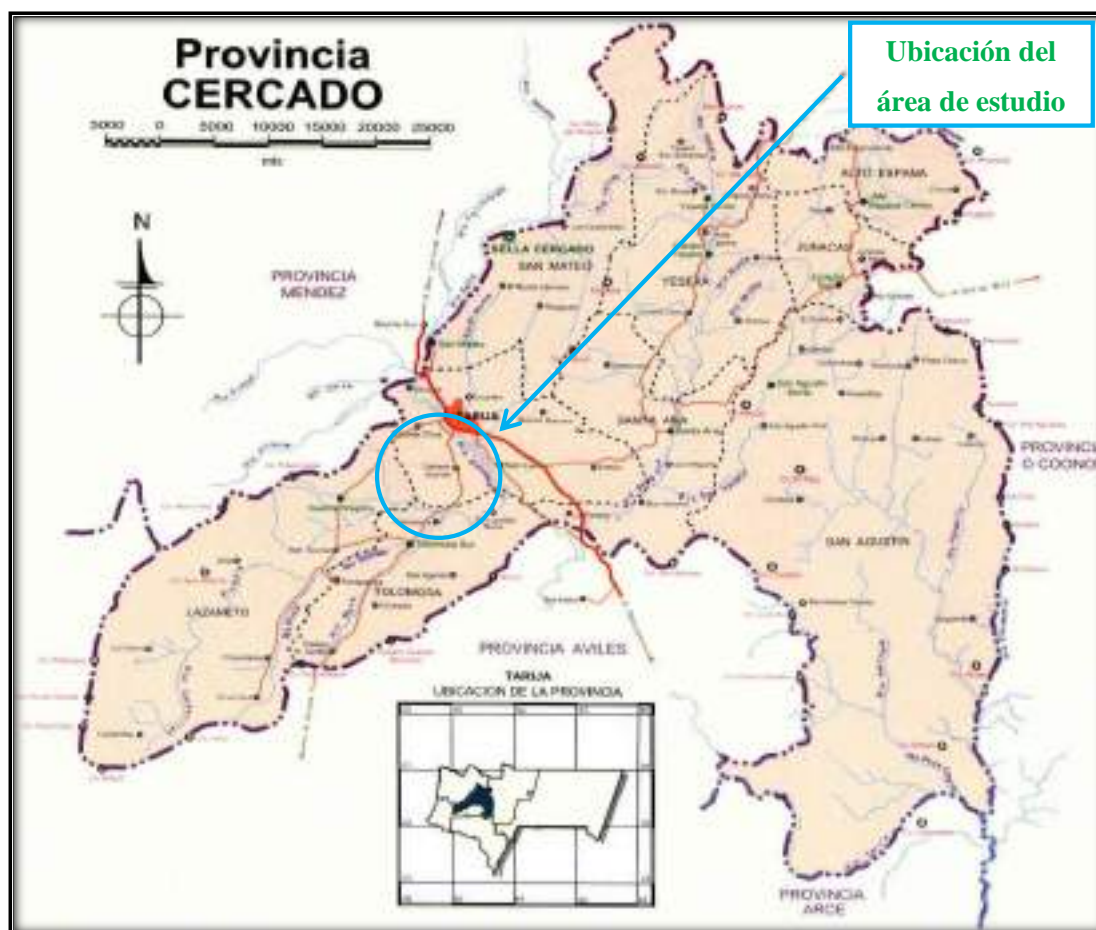


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la Presa San Jacinto.



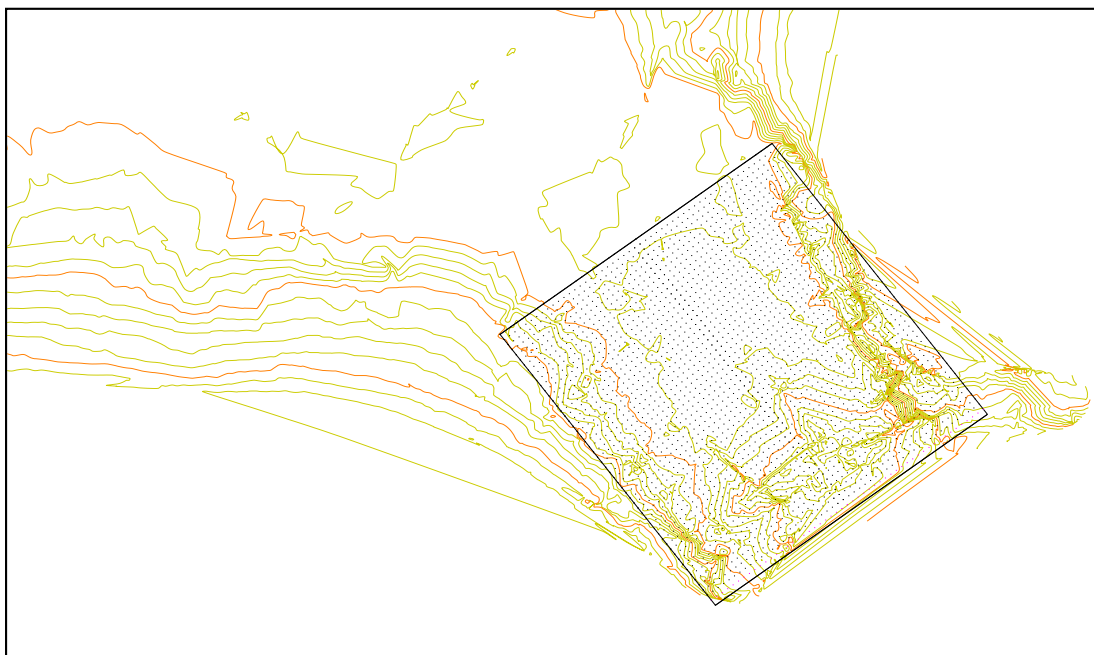
*Figura 3.2.* Imagen satelital de la zona de estudio.

**Fuente:** Google Earth Pro

### 3.2. Delimitación de la zona de estudio

La delimitación del área de análisis del presente estudio, se encuentra especificado en los términos de referencia del “Servicio de batimetría de la obra de toma del proyecto múltiple San Jacinto” bajo el marco de la orden de compra (véase anexo 1) dirigido al laboratorio de hidráulica e hidrología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, que en uno de sus objetivos indica:

- Realizar levantamiento batimétrico de acuerdo a la grilla de puntos solicitados en el plano adjunto que permitan dibujar la ubicación de la ataguía y compuertas de fondo de la presa. La grilla de puntos debe ser longitud de espaciamiento de 1 m en dirección X y 1 metro dirección Y, con respectos a coordenada del sector de la presa.



*Figura 3.3.* Área de levantamiento batimétrico propuesta en los TDR.

**Fuente:** TDR levantamiento batimétrico a detalle del sector de la obra de toma del proyecto múltiple San Jacinto.

Tomando en cuenta lo que se exige en los términos de referencia, en el presente estudio se optó por realizar el levantamiento batimétrico a detalle, que consta de una sección cuadrática de 50 x 50 es decir 2500 m<sup>2</sup> donde se trazó una grilla de líneas horizontales y verticales, esta área está formada por cuatro vértices orientados a cubrir la superficie subacuática en zonas próximas a la ataguía, es decir aguas arriba y aguas abajo de dicha estructura.



Figura 3.4. Área delimitada para el levantamiento batimétrico.

Fuente: Adaptado de Google Earth.

**Tabla 3.1**

*Coordenadas de los vértices del área de levantamiento batimétrico.*

Vértices	Este	Norte
V1	321243.00 m E	7610312.00 m S
V2	321202.00 m E	7610281.00 m S
V3	321235.00 m E	7610244.00 m S
V4	321274.00 m E	7610274.00 m S



### 3.3. Recopilación de la información existente de la zona de estudio

#### 3.3.1. Información topográfica

Se tiene la información topográfica inicial de un sector del embalse del año 1984, en la cual se encuentra las curvas de nivel del área que abarca el objeto del presente estudio, donde se encuentra emplazada la ataguía (Figura 3.5).

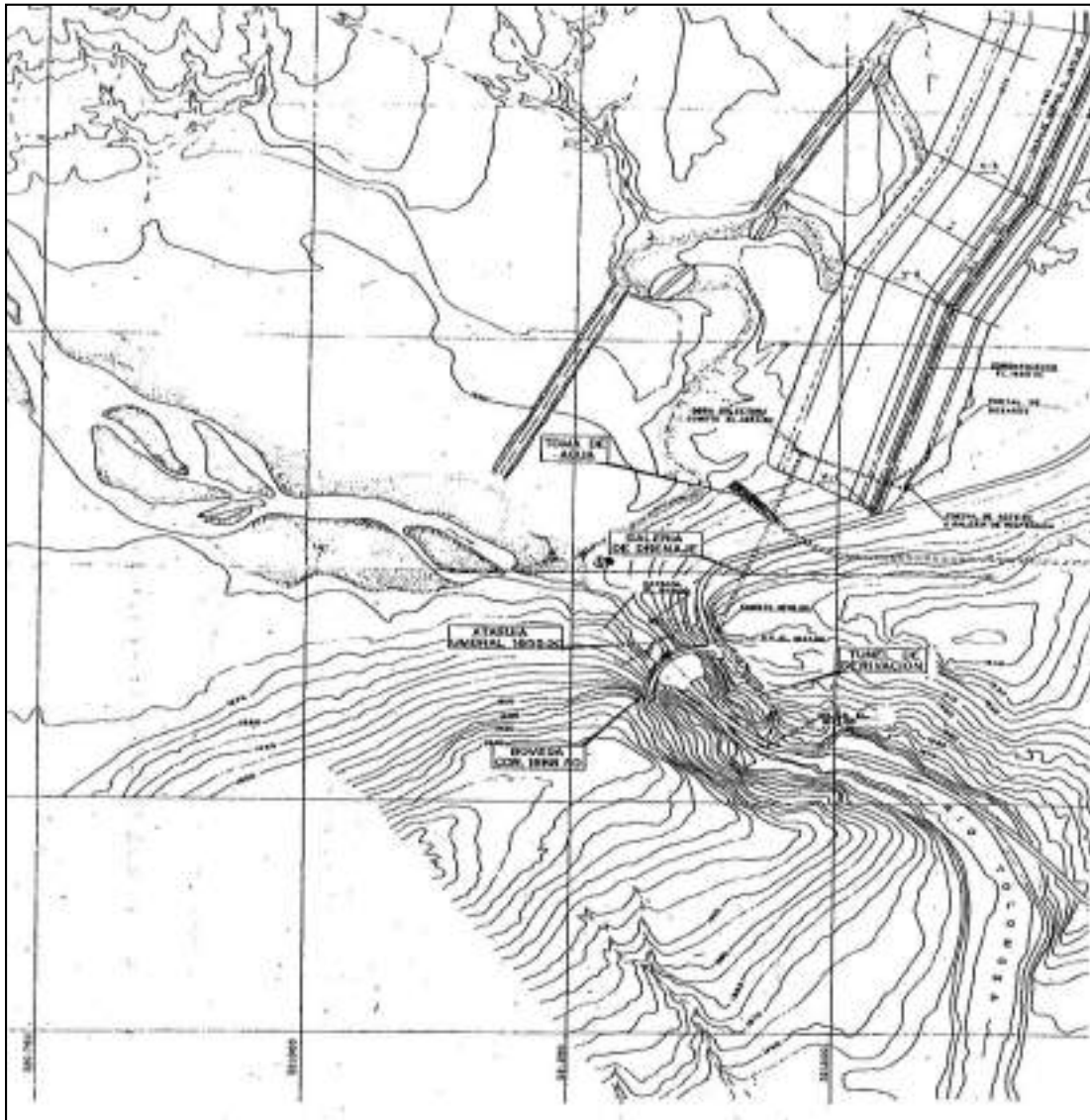
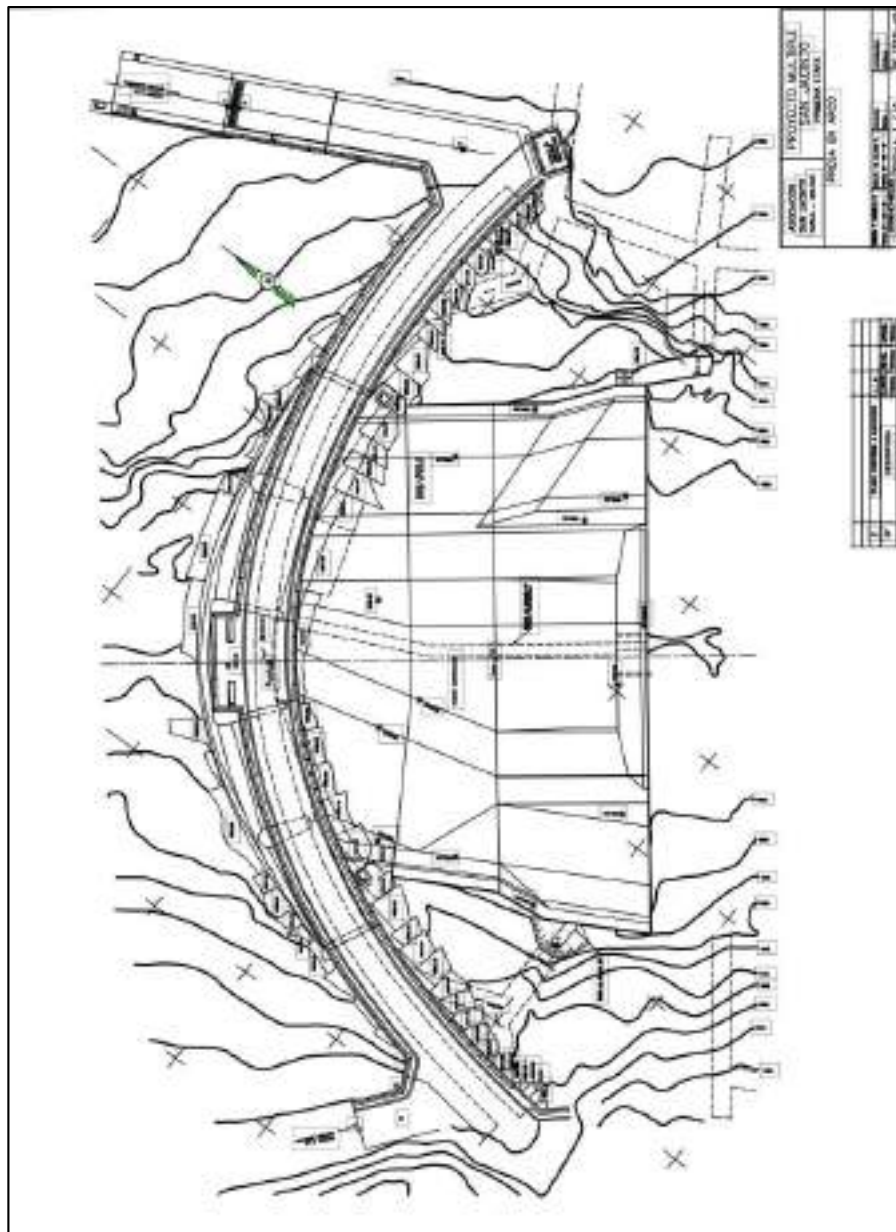


Figura 3.5. Topografía inicial año 1984 del sector de la presa.

Se consiguió el plano a detalle del cuerpo de la presa en arco del proyecto múltiple San Jacinto, donde se observa las curvas de nivel antes del primer llenado del embalse, y el detalle las zonas donde se pretende analizar la disposición sedimentaria.



*Figura 3.6.* Plano a detalle del cuerpo de la presa en arco San Jacinto.

**Fuente:** Archivos del Proyecto Múltiple San Jacinto.

Además, se cuenta con un plano a detalle de las cotas a diferentes niveles del cuerpo de la presa, esta información fue proporcionada en oficinas del Proyecto Múltiple San Jacinto.

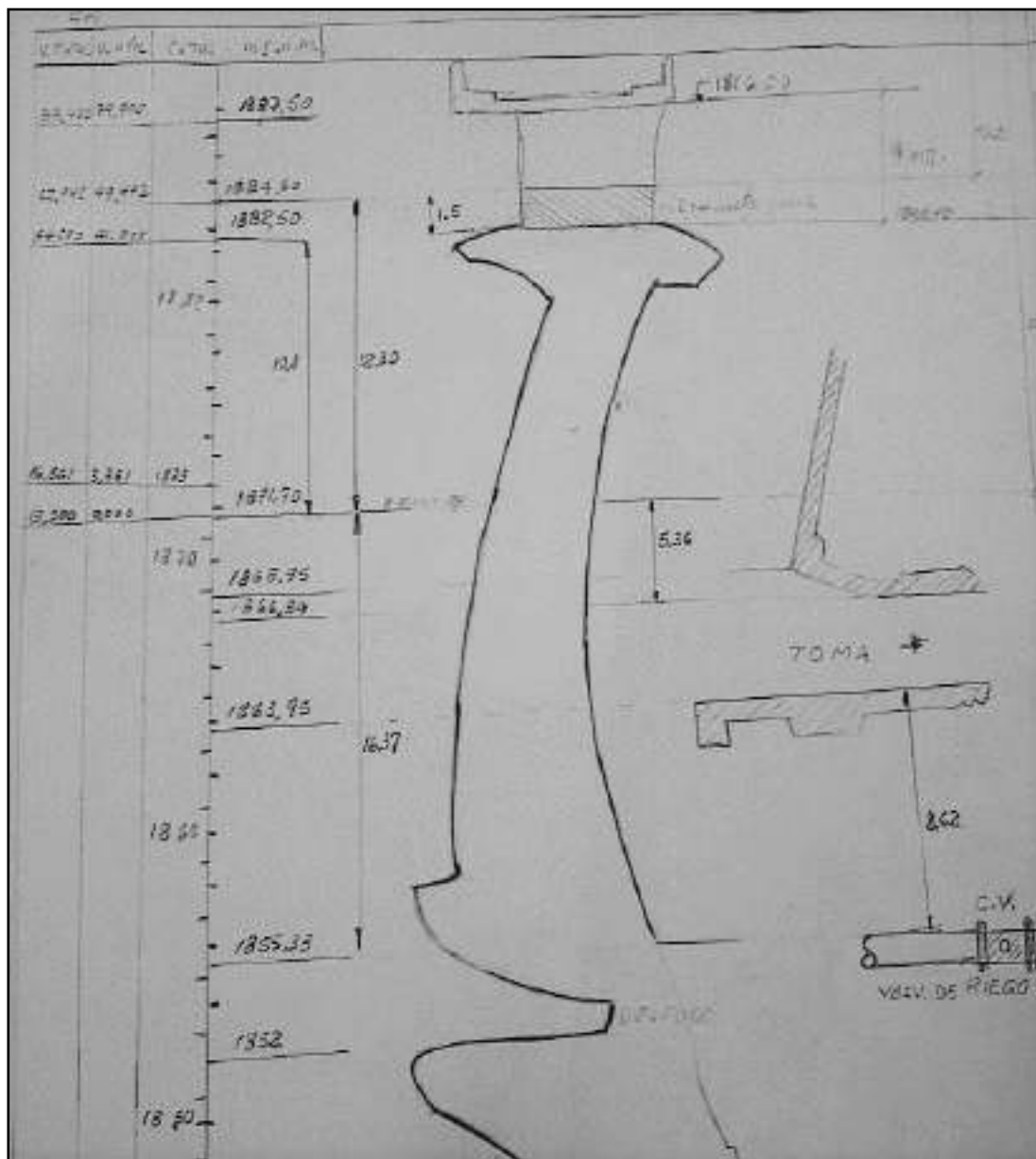
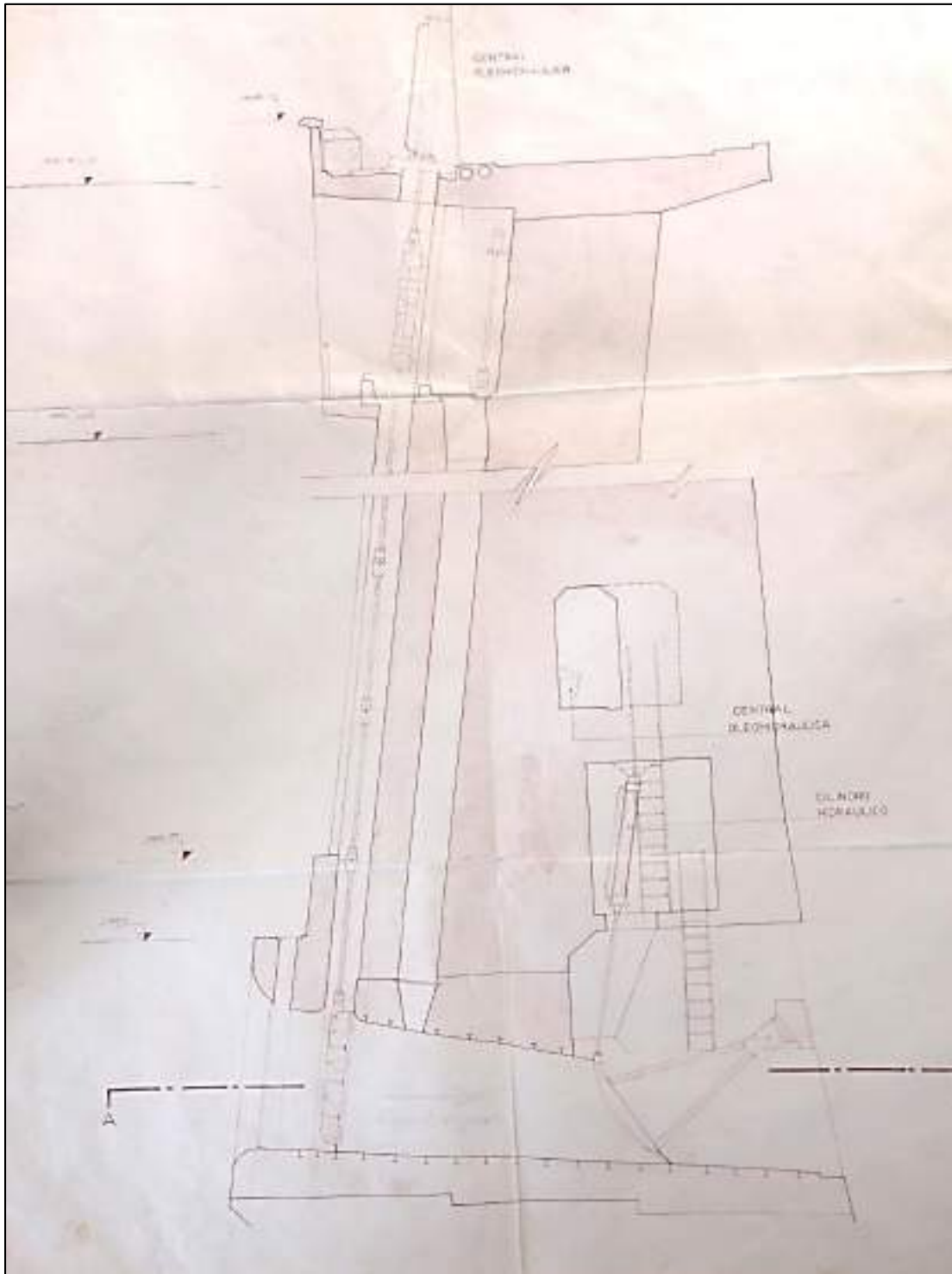


Figura 3.7. Plano a detalle de los niveles en el cuerpo de la presa.

**Fuente:** Archivos del Proyecto Múltiple San Jacinto





*Figura 3.8.* Plano a detalle del cuerpo de la presa San Jacinto.

**Fuente:** Archivos del Proyecto Múltiple San Jacinto.

### 3.3.2. Información batimétrica

Desde el inicio del llenado del embalse San Jacinto en el año 1986, por el contante ingreso de sedimentos, se procedió a realizar cinco levantamientos batimétricos en todo el vaso de almacenamiento, en periodos diferentes y con entidades diferentes, se realiza el detalle a continuación:

**Tabla 3.2**

*Levantamientos batimétricos realizados en el embalse San Jacinto.*

PERIODO	ENTIDAD EJECUTORA	ELIPSOIDE
1989	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)	PSAD 56
1995	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)	PSAD 56
2004	Empresa Consultora CARYGLOBAL S.R.L.	PSAD 56
2013	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)	WGS 84
2016	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)	WGS 84

**Fuente:** “Informe técnico análisis batimétrico de Lago San Jacinto 2013”. SNHN

#### 3.3.2.1. Batimetría año 1989

Cuando entra en funcionamiento el embalse de San Jacinto, en su primer llenado el Servicio de Hidrografía Naval en el año 1989 ejecuta la primera batimetría con la finalidad de disponer curvas de volumen almacenamiento actualizadas, dicho informe técnico corrobora que fue realizado en el elipsoide de referencia PSAD 56, esta información que se encontraba en formato físico, posteriormente en el año 2004 los planos fueron digitalizado por la empresa consultora CARYGLOBAL S.R.L en formato CAD con curvas de nivel cada 1 metro.

#### 3.3.2.2. Batimetría año 1995

En el año 1995 se realiza una segunda batimetría con el propósito de conocer el volumen sedimentado en el embalse tras nueve años de operación del embalse San Jacinto, el procesamiento de cada isobata obtenida en la topobatimetría fue procesada

mediante el ArcGis lo cual conllevó a obtener un volumen sedimentado de 4,358,195.26 m<sup>3</sup> que representa una tasa de sedimentación de 726,365.88 m<sup>3</sup>/año.

Este trabajo también fue realizado por el Servicio de Hidrografía Naval, el mismo que se encuentra en el elipsoide de referencia PSAD-56, lo que posteriormente en el año 2004, la empresa consultora CARYGLOBAL, digitalizo la información llevándola a formato CAD para facilitar la manipulación de esta información

### **3.3.2.3. Batimetría año 2004**

La tercera batimetría fue ejecutada después de seis años de operación de la Represa de San Jacinto y el trabajo fue ejecutado por la Empresa Consultora CARYGLOBAL S.R.L, los datos proporcionados fueron procesados mediante el ArcGis conllevando a obtener un volumen sedimentado de 4,141,718.08 m<sup>3</sup> que representa una tasa de sedimentación de 460,190.90 m<sup>3</sup>/año.

Esta cantidad debe estar sujeta a un decremento porque en este periodo se aplicó la implementación de Medidas de Conservación en la Cuenca del Río Mena y Quebrada La Tablada, para preservar la vida útil del embalse, que consistía en ejecutar obras y medidas de inmediata realización, que en su primera fase consistía en el desarrollo de un Estudio de Factibilidad del Proyecto “Control de Sedimentos en la Cuenca del Río Tolomosa”-Corporación de Desarrollo de Tarija (CODETAR) 1995 que comprendía 3 sub-proyectos: Control de transporte de sedimentos mediante la construcción de diques en el embalse, río Tolomosa, quebrada Tablada, río Pinos, quebrada Seca, río Molino y río Mena que contemplaban la retención de un total de 2,843,325.70 m<sup>3</sup> de sedimento mediante la construcción de 91 diques para la retención de sedimentos; 3.415 hectáreas con cerramientos con el objeto de proteger e inducir la regeneración de la vegetación natural y 2.419 hectáreas bajo manejo y conservación de suelos. Este estudio se llevó a cabo en el sistema de referencia PSAD-56.

Pero, en el año 1997 mediante el Programa de Acción Estratégica Para la cuenca del Río Bermejo se formula el Diseño Final Plan Piloto en la quebrada “La Tablada” y

“Río Mena (sub-cuencas Churquis y Pampa Redonda)” y se prioriza la ejecución de estructuras de control de sedimentos comprendidas entre:

- a) Diques para la retención de sedimentos conforme se establece en el cuadro que se presenta a continuación:

**Tabla 3.3**

*Diques construidos para la contención de sedimentos*

Cuenca: QUEBRADA TABLADA				
Dique N°	Cuenca	Altura de Dique	Volumen	Costo total
	(km <sup>2</sup> )	(m)	(m <sup>3</sup> )	(\$us)
TD1	0.74	5	22,000.00	15,335.61
TD3	2.11	5.8	34,870.00	22,297.95
TD3a	0.65	6.5	21,130.00	12,582.32
TD3b	0.9	8	26,000.00	11,931.97
TD5	1.68	6	26,000.00	16,723.74
TD5a	1.28	7	38,000.00	16,723.74
TD12	0.28		21,000.00	11,630.61
T	3.36	8	70,000.00	10,721.31
MI	0.08	4	11,700.00	10,483.78
TD7	0.07	4.5	4,000.00	7,086.50
TD8	0.05	3.5	2,400.00	5,205.15

**Fuente:** Oficina técnica nacional de los ríos Bermejo y Pilcomayo.

- b) Construcción de 31 diques de gaviones para la retención de 16,192.00 m<sup>3</sup> de sedimentos con un costo total de 46,758.58 \$us en” Quebrada La Tablada”.

- c) Construcción de 54 diques de troncos para la retención de 3,357.20 m<sup>3</sup> de sedimentos con un costo total de 13,933.09 \$us. en “Quebrada La Tablada”.
- d) Manejo y conservación de suelos en la cuenca del Río Mena, mediante la implementación de protección de suelos con barreras vivas y producción agrícola.
- e) Manejo de áreas degradadas en la cuenca del río Mena, mediante la construcción de bordos y contorno, plantaciones forestales y frutales, cerramientos, y protección con grava.
- f) A continuación, se muestra la tabla con las obras de protección después del año 2010, con una inversión hasta el momento de 2.100.00,00 Bs.

**Tabla 3.4**

*Diques construidos para la contención de sedimentos*

Dique N°	Localidad	Altura dique (m)	Periodo	Costo Total
DT 3.6	Tolomosa	--	ene-18	2000000 Bs.
DT 3.5	Tolomosita centro	--	ene-18	2000000 Bs.
Dique de tierra		En construcción		---

**Fuente:** Oficina técnica nacional de los ríos Bermejo y Pilcomayo.

#### **3.3.2.4. Batimetría año 2013**

La cuarta batimetría se realizó en el año 2013 por el Servicio Nacional de Hidrología Naval (S.N.H.N), el elipsoide utilizado fue el WGS 84. El informe está en formato digital y contemplan planos con curvas de detalle cada 1 metro.

### 3.3.2.5. Batimetría año 2016

La batimetría realizada en el año 2016 al igual que en el año 2013 el S.N.H.N. se encarga de llevar adelante el trabajo, el informe que se tiene es en formato digital y referenciado en el elipsoide WGS 84.

### 3.3.2.6. Resumen de batimetrías

**Tabla 3.5**

*Tabla Resumen de batimetrías 1989 - 2016*

Año	Volumen de Agua (m3)	Volumen de sedimentación (m3)	Sedimento acumulado (m3)	Fuente	Observaciones
1989	53.452.343,250		0,000	Informe Levantamiento Hidrográfico 1989 SNHN.	Cálculo por diferencia de volumen.
		7.632.081,820			
1995	48.545.667,690		7632081,820	Informe Levantamiento Hidrográfico 1995 SNHN.	Cálculo por diferencia de volumen.
		5.431.882,890			
2004	43.113.784,800		13063964,710	Informe Levantamiento Hidrográfico 2004 CARYGLOBAL	Cálculo por diferencia de volumen.
		1.254.708,535			
2013	41.859.076,265		14318673,245	Informe Levantamiento Hidrográfico 2013 SNHN	Cálculo por diferencia de volumen.
		1,151,924.75			
2016	22,324,700.64		15470598,00	Informe Levantamiento Hidrográfico 2013 SNHN	Cálculo por diferencia de volumen.
<b>SEDIMENTACIÓN TOTAL</b>		<b>15470598,00</b>			

**Fuente:** Informe técnico proyecto múltiple San Jacinto año 2013.

### 3.3.2.7. Equipos utilizados para las batimetrías en embalse San Jacinto.

<p><b>BATIMETRÍA DEL AÑO 1989</b></p>	<p><b>Teodolito WILD T-2</b></p> <p>El Teodolito universal Wild T-2 construido para ejecutar trabajos geodésicos de segundo orden, con lecturas al segundo, de imagen directa, con índice vertical automático, para observación de ángulos verticales y con tornillo reiterador para observación en serie.</p> <p><b>Teodolito WILD T-1</b></p> <p>El teodolito Wild T-1 está diseñado para realizar mediciones de levantamientos topográficos de detalle, sus círculos horizontal y vertical poseen cifras que facilitan su lectura, con intervalos de graduación al grado (1°), con lectura directa del micrómetro de seis segundos (6'') y una apreciación de tres segundos (3''). También tiene el índice del círculo vertical automático.</p> <p><b>Nivel WILD N-2</b></p> <p>El nivel automático Universal Wild N-2 está destinado para la medición altimétrica en geodesia, ingeniería civil y también en la industria. En su campo visual posee un trazo cuneiforme que permite una mayor precisión en la lectura, su error medio para un kilómetro de doble nivelación es de +/- 2mm.</p> <p><b>Distomat WILD DI-38</b></p> <p>Es un distanciómetro que utiliza como onda portadora la radiación infrarroja. Contando los impulsos de un oscilador de cuarzo se mide digitalmente el desfase entre la onda emitida y la onda reflectada. Mide la distancia métricamente y posee además un conmutador para obtener resultados en pies. Tiene un alcance de 1000 metros con un prisma y 2000 metros con seis (6) o más prismas, en condiciones atmosféricas medias.</p>
---	--

	<p>El equipo es alimentado por batería de 12 voltios DC, reduce automáticamente la distancia horizontal y la diferencia de nivel con una precisión de +/- 5mm, hasta unos 300 metros, a mayores distancias las reducciones se hacen por medio de cálculos.</p> <p><b>Distomat WILD DI-5</b></p> <p>El principio de funcionamiento del distanciómetro DI-5 es el mismo al DI-38, diferenciándose en que el primero tiene un alcance de medición de 3.5 km con un prisma y de 7 km con 11 prismas, en condiciones de buena visibilidad. El equipo es alimentado por una pequeña batería de 12 voltios, con capacidad de carga suficiente para efectuar 100 mediciones.</p> <p><b>Ecosonda RAYTHEON 719-B</b></p> <p>El ecosonda Raytheon 719-B es de registro continuo con cuatro escalas de trabajo, de 0-15 m, 15-30 m, 30-45 m y 45-60 m, con 4 velocidades de avance de papel, graduación manual de la superficie de referencia (cero) y posibilidad de calibración de la velocidad de propagación del sonido por cambio de salinidad y temperatura del agua.</p> <p><u>La precisión de este equipo en el registro de profundidad es del orden de los decímetros.</u></p>
	<p><b>Teodolito WILD T-2</b></p> <p>Construido para ejecutar trabajos geodésicos de 2do orden y 3er orden, con lecturas al segundo (1") de imagen directa, con limbos de lectura de ángulos horizontales y verticales y tornillo reiterador que le permite observaciones en serie.</p> <p><b>Teodolito WILD T-1</b></p> <p>Está diseñado para realizar mediciones en levantamiento topográficos de detalle; sus círculos horizontales y verticales</p>



<p><b>BATIMETRÍA DEL AÑO 1995</b></p>	<p>poseen cifras que facilitan su lectura con intervalos de graduación en sus círculos al grado, con lectura directa del micrómetro de veinte segundos (20'') y una estimación de Diez (10''). También se tiene el índice del círculo vertical automático.</p> <p><b>Teodolito Electrodistanciómetro Pentax PX-06D</b></p> <p>El teodolito distanciómetro combina en una sola unidad compacta, un teodolito analógico digital de 6 segundos con un electrodistanciómetro. Esta unidad mide ángulos y distancias inclinadas para luego calcular distancias horizontales y verticales. Posee una alta performance, seguridad y facilidad de operación.</p> <p><b>Ecosonda RAYTHEON 719-B</b></p> <p>Es un instrumento de registro continuo con cuatro escalas de trabajo, de 0-15 m, 15-30 m, 30-45 m y 45-60 m, también cuenta con 4 velocidades de avance de papel, las cuales van cambiando de acuerdo a la velocidad de movimiento del bote hidrográfico.</p> <p>Igualmente permite cambiar la velocidad de propagación de la onda ecoica de acuerdo al grado de salinidad y temperatura del agua.</p> <p><u>Su probabilidad de error es del 0.5% de la profundidad registrada, dependiendo del tipo de fondo acuático.</u></p>
	<p><b>Ecosonda FURUNO FE-6300</b></p> <p>El ecosonda utilizado en las mediciones tiene las siguientes características: marca Furuno FE - 6300 de fabricación alemana con rango de medición hasta 300 m de profundidad y equipado con un emisor de 50 KHZ y 200 Khz. Con referencia a la calibración del ecosonda, el presente equipo no necesita</p>

<p><b>BATIMETRÍA DEL AÑO 2004</b></p>	<p>una calibración especial porque ya está construida para mediciones de profundidad excepto la calibración rutinaria a una profundidad conocida.</p> <p>Como Control de la calibración se ha realizado al inicio y fin de cada día de trabajo batimétrico un control por plancha a profundidades de 1 y 2 m del nivel.</p> <p>Se utilizó en las mediciones el emisor de 200 KHz por permitir el detalle geológico con mayor resolución y sensibilidad además de omitir los ruidos del vehículo</p> <p>Es importante conocer que como regla general el eco del nivel de fondo que se manifiesta en la línea de base nos indica la densidad del fondo: de manera que si el fondo es blando compuesto por vegetación acuática o arenisca la línea de fondo es muy delgada. Si por el contrario el fondo es de material duro, roca la línea de base es más gruesa. Si la línea presenta rugosidades o es irregular se debe a que el fondo está muy agitado, puede ser interferencias por burbujas o la agitación de las aguas por el viento o temperatura variable</p> <p>El control de la calibración del Ecosonda y transceptor se efectuó por plancha o sondaleta a profundidades de 1 m y 2 m del nivel, este procedimiento se ha realizado al inicio y final de cada día de trabajo batimétrico.</p> <p><u>En el caso del ecosonda la precisión está dentro 0.30m en profundidades hasta los 30m</u></p>
	<p><b>DGPS South S-66/S-68.</b></p> <p>El GPS SOUTH S66/S-68 de simple frecuencia, es un equipo inteligente e integrador. Todos los componentes están integrados en el chasis pequeño, incluyendo los cables, baterías, antena de recepción.</p>

<p><b>BATIMETRÍA DEL AÑO 2013</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrarrojos, mando a distancia, la distancia de 5m de trabajo, conveniente para introducir letras y números.</li> <li>• Pantalla a todo color.</li> <li>• Dos baterías integradas.</li> <li>• Compatibilidad, puede trabajar con los receptores de otras marcas de doble frecuencia única y hacer control de agrimensura.</li> </ul> <p>Equipo que permite la navegación y medición de precisión, incluye dos o más receptores, antena GPS y todos los componentes auxiliares necesarios para ejecutar y producir datos de calidad, en un mínimo de tiempo.</p> <p>El receptor colecta la transmisión de señales de los satélites GPS y almacena esta información en su memoria interna.</p> <p><b>Ecosonda South SDE28D.</b></p> <p>La Ecosonda South SDE 28D, es un ecosonda moderno digital, con display a colores para visualización del ecograma, teclado, ratón y software adecuados, transductor electroacústica del tipo monohaz que permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y resultados precisos. Las herramientas de software de gran alcance para incorporar PowerNav y procesar los datos, y la importación directa en formato DXF. Se puede utilizar para diseñar estructuras diferentes, tales como puertos y canales de navegación fluvial, etc. También proporciona recursos suficientes para las tareas de supervisión, tales como el dragado, relleno o el mantenimiento de los ríos y presas.</p> <p><u>Permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y cuyo margen de error es de <math>\pm 0.04</math> m.</u></p> <p><b>Estación Total Leica TC/805/605/L.</b></p>
---	---

	<p>Estación Total TC/805/605/L resulta idónea en tareas de levantamientos y replanteos. Estos equipos ofrecen además opciones de codificación que resultan rápidas y sencillas de utilizar, los datos obtenidos pueden grabarse en la memoria interna o transferirse a una terminal de datos externa a través del puerto serial.</p> <p>Este equipo se emplea para trabajos de Ingeniería Civil en levantamientos topográficos y determinación de volúmenes, mediante la medición de ángulos y distancias con un mínimo error de cierre.</p>
<p><b>BATIMETRÍA DEL AÑO 2016</b></p>	<p><b>DGPS South S-66/S-68.</b></p> <p>El GPS SOUTH S66/S-68 de simple frecuencia, es un equipo inteligente e integrador. Todos los componentes están integrados en el chasis pequeño, incluyendo los cables, baterías, antena de recepción.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrarrojos, mando a distancia, la distancia de 5m de trabajo, conveniente para introducir letras y números.</li> <li>• Pantalla a todo color.</li> <li>• Dos baterías integradas.</li> <li>• Compatibilidad, puede trabajar con los receptores de otras marcas de doble frecuencia única y hacer control de agrimensura.</li> </ul> <p>Equipo que permite la navegación y medición de precisión, incluye dos o más receptores, antena GPS y todos los componentes auxiliares necesarios para ejecutar y producir datos de calidad, en un mínimo de tiempo.</p> <p>El receptor colecta la transmisión de señales de los satélites GPS y almacena esta información en su memoria interna.</p> <p><b>Ecosonda South SDE28D.</b></p>

	<p>La Ecosonda South SDE 28D, es un ecosonda moderno digital, con display a colores para visualización del ecograma, teclado, ratón y software adecuados, transductor electroacústica del tipo monohaz que permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y resultados precisos. Las herramientas de software de gran alcance para incorporar PowerNav y procesar los datos, y la importación directa en formato DXF. Se puede utilizar para diseñar estructuras diferentes, tales como puertos y canales de navegación fluvial, etc. También proporciona recursos suficientes para las tareas de supervisión, tales como el dragado, relleno o el mantenimiento de los ríos y presas.</p> <p><u>Permite trabajar hasta 300 metros de profundidad con facilidad y cuyo margen de error es de <math>\pm 0.04</math> m.</u></p> <p><b>Estación Total Leica TC/805/605/L.</b></p> <p>Estación Total TC/805/605/L resulta idónea en tareas de levantamientos y replanteos. Estos equipos ofrecen además opciones de codificación que resultan rápidas y sencillas de utilizar, los datos obtenidos pueden grabarse en la memoria interna o transferirse a una terminal de datos externa a través del puerto serial.</p> <p>Este equipo se emplea para trabajos de Ingeniería Civil en levantamientos topográficos y determinación de volúmenes, mediante la medición de ángulos y distancias con un mínimo error de cierre.</p>
--	---

**Fuente:** Adaptado de informes San Jacinto 1989-2016.

### 3.3.3. Operación de las Compuertas

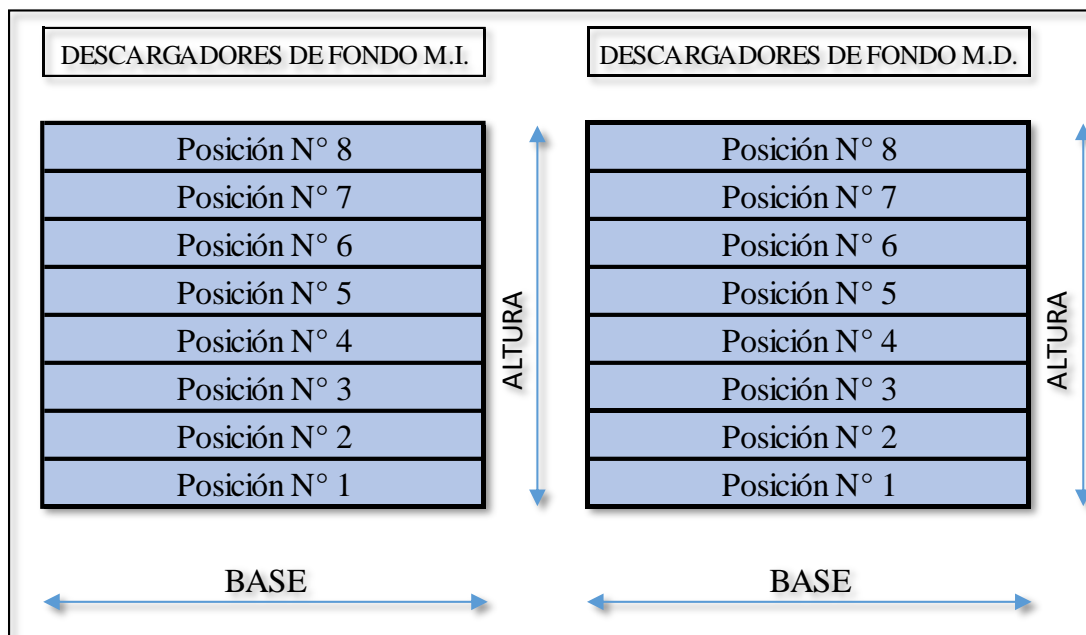


Figura 3.9. Características de los descargadores de fondo.

**Fuente:** Elaboración Propia

Se obtuvo la información de la operación de las compuertas de fondo del proyecto múltiple San Jacinto que, desde su inicio de llenado en el año 1988, se procede a la anotación de esta información en forma física es decir en cuadernos debidamente ordenados por parte de los operadores.

**Tabla 3.6**

*Registro de apertura de compuertas embalse San Jacinto (1988-2018)*

FECHA	Hra.	COTA	OBSERVACIONES
18/08/1988	10:30	1852.7	Inicio del llenado del embalse.
29/09/1988	09:40	1852.5	Inicio del embalse hrs 11:00 am
21/10/1988	08:30	1862.8	Apertura de compuerta 17:00 pm
22/10/1988	08:30	1862.8	Compuerta abierta.
23/10/1988	08:30	1862.6	Compuerta abierta.
24/10/1988	08:30	1862.5	Compuerta abierta.

5/12/1988	15:40	1868.6	Apertura de compuerta ( Posición N°4 Hrs 23:00 )
6/12/1988	06:00	1870.8	Apertura de compuerta ( Posición N°3 Hrs 16.30 )
7/12/1988	01:00	1870.6	Apertura de compuerta ( Posición N°2 Hrs 11:00 )
19/12/1988	02:00	1872.8	Compuerta abierta ( 03-20:00 )
21/12/1988	08:00	1873.6	Apertura de compuerta ( M.D. posición N°1 )
4/2/1989	08:35	1882.5	DESCARGA POR EL VERTEDERO (Cota Max 1882.56 Hrs 16:00 )
11/2/1989	08:15	1882.7	Compuerta Abierta ( Hrs 10:00 )
15/2/1989	08:35	1882.2	Apertura de compuerta ( M.D. posición N°8 ,M.I. posición N°4 Hrs 14:00 )
17/2/1989	08:25	1881.2	Cierre de compuerta ( Hrs 08:00 )
25/2/1989	08:25	1882.6	Apertura de compuerta ( M.D.Pos N° 6, M.I. Posición N°4 Hrs 11:30 )
11/5/1989	08:35	1883.4	Cota máxima del año ( Q = 63.8 m3/s )
14/3/1989	08:25	1882.9	Apertura de compuerta ( M.D. posición N°6 ,M.I. posición N°4 Hrs 09:00 )
15/3/1989	08:30	1882.5	Caudal que circula por los descargadores ( Q=29 m3/s)
16/3/1989	08:30	1882.1	Caudal que circula por los descargadores ( Q=29 m3/s)
17/3/1989	08:20	1881.8	Caudal que circula por los descargadores ( Q=29 m3/s)
18/3/1989	08:30	1881.5	Caudal que circula por los descargadores ( Q=29 m3/s)
19/3/1989	08:30	1881.1	Compuerta Abierta ( M.D. y M.I. Posición N° 2 ) ( Q=10.11 m3/s )
20/3/1989	08:30	1881.1	Cierre de compuerta ( Hrs 08:00 )
7/12/1989	08:00	1877.6	Apertura de compuerta ( M.D. Posición N°3 ) ( Hrs 15:00-17:00 )
10/1/1990	08:00	1879.7	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°1 ) (Hrs 12:00 )
11/1/1990	08:00	1879.7	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
12/1/1990	08:00	1879.8	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
13/1/1990	08:00		Apertura de compuerta ( M.D. Posición N°1 )
14/1/1990	08:00		Compuerta abierta ( M.D. y M.I. Posición N° 1)
15/1/1990	08:00	1880.1	Compuerta abierta ( M.D. y M.I. Posición N° 1)
16/1/1990	08:00	1880.1	Compuerta abierta ( M.D. y M.I. Posición N° 1)
17/1/1990	08:00	1880.1	Cierre de compuerta ( Hrs 19:00 )
23/1/1990	08:00	1880.5	Apertura de compuerta ( M.D. Posición N°1 )
24/1/1990	08:00	1880.5	Compuerta cerrada ( Hrs 18:00 )
9/2/1990	08:00	1882.7	Apertura de compuerta ( M.D. y M.i. Posición N° 1)
12/2/1990	08:00	1882.6	Cierre de compuerta ( Hrs 10:00 )
21/2/1990	08:00	1883.1	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I Posición N°1 ) ( Hrs 08:40-15:00 )
6/3/1990	08:00	1883.1	Compuerta abierta ( M.D. y M.i. Posición N° 2)
6/3/1990	08:00	1883.4	Cota máxima del año

7/3/1990	08:00	1882.9	Cierre de compuerta ( Hrs 08:00 )
14/3/1991	09:30	1883.5	Compuerta abierta ( M.D. y M.i. Posición N° 3)
14/3/1991	11:45	1883.6	Cota máxima del año
13/11/1994	08:20	1875	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I) ( Hrs 08:20-0.8:25 )
7/11/1996	08:00	1875.3	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I) ( Hrs 14:00-14:30 )
14/11/1996	08:00	1876.4	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°3 ) ( Hrs 11:00-15:20 )
6/12/1996	08:00	1875.6	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I Posición N°4 ) ( Hrs 11:20-14:10 )
18/12/1996	08:00	1874.8	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°1 ) (Hrs 12:00 )
19/12/1996	08:00	1874.8	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
20/12/1996	08:00	1874.7	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
21/12/1996	08:00	1874.7	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
22/12/1996	08:00	1874.8	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
23/12/1996	08:00	1875.1	Abierta ( M.I. posición N°1 )
24/12/1996	08:00	1875	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
25/12/1996	08:00	1875.9	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
26/12/1996	08:00	1876.2	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
27/12/1996	08:00	1876.9	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
28/12/1996	08:00	1876.9	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
29/12/1996	08:00	1876.9	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
30/12/1996	08:00	1877.1	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
31/12/1996	08:00	1877.5	Abierta ( M.I. Posición N°1 )
27/2/1997	08:00	1883.3	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I Posición N°3) ( Hrs 11:25 )
28/2/1997	08:00	1883.2	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
1/3/1997	08:00	1883.1	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
2/3/1997	08:00	1882.9	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
3/3/1997	08:00	1882.8	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
4/3/1997	08:00	1883	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
5/3/1997	08:00	1883	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
6/3/1997	08:00	1882.8	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
7/3/1997	08:00	1882.9	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
8/3/1997	08:00	1882.8	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
9/3/1997	08:00	1882.7	Abierta ( M.I. Posición N°3 )
10/3/1997	08:00	1882.8	Cierre de compuerta ( Hrs 08:40 )
11/3/1997	08:00	1883	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°3) ( Hrs 13:40 )
6/4/1998	08:00	1883.4	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I Posición N°3) ( Hrs 08:00-08:10 )



25/1/2000	08:00	1884.5	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°4) ( Hrs 20:30 )
25/1/2000	12:00	1885.2	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°6)
28/1/2000	08:00	1883.4	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°3) ( Hrs 11:45 )
29/1/2000	08:00	1883.1	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2) ( Hrs 19:20 )
2/2/2000	08:00	1883.1	Cierre de compuerta ( Hrs 11:15 )
2/2/2000	21:40	1884	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I posición N°3) ( Hrs 21:40)
5/2/2000	08:00	1884.1	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I posición N°4) (Hrs 17:45 )
8/2/2000	08:00	1883.8	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2) ( Hrs 10:45 )
9/2/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
10/2/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
11/2/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
12/2/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
13/2/2000	08:00	1883.9	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
14/2/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
15/2/2000	08:00	1883.9	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
16/2/2000	08:00	1883.9	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
17/2/2000	08:00	1883.8	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
18/2/2000	08:00	1883.8	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
19/2/2000	08:00	1883.8	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
20/2/2000	08:00	1883.9	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
21/2/2000	08:00	1884.1	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
22/2/2000	08:00	1884.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
23/2/2000	08:00	1884.1	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
24/2/2000	08:00	1884	Cierre de compuerta ( Hrs 12:00 )
28/2/2000	08:00	1885	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°4) ( Hrs 03:30)
29/2/2000	08:00	1883.5	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2) ( Hrs 10:45 )
1/3/2000	08:00	1883.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
2/3/2000	08:00	1883.5	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
3/3/2000	08:00	188357	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
4/3/2000	08:00	1883.6	Cierre de compuerta ( Hrs 10:45 )
5/3/2000	08:00	1883.8	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2) ( Hrs 15:30 )
6/3/2000	08:00	1884.2	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°4)
7/3/2000	08:00	1884.1	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
8/3/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
9/3/2000	08:00	1884.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
10/3/2000	08:00	1884.5	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )

11/3/2000	08:00	1884.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
12/3/2000	08:00	1884	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
13/3/2000	08:00	1883.9	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
14/3/2000	08:00	1883.8	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
15/3/2000	08:00	1883.7	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°4 )
16/3/2000	08:00	1883.5	Cierre de compuerta ( Hrs 08:30 )
22/3/2000	07:00	1884.4	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2)
24/3/2000	07:00	1884.2	Cierre de compuerta ( Hrs 10:30 )
4/2/2002	08:00	1883.2	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I ) ( Hrs 08:00-08:10)
7/2/2002	08:00	1884.4	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I Posición N° 2 ) ( Hrs 17.40)
8/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
9/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
10/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
11/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
12/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
13/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
14/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
15/2/2002	08:00	1884.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
16/2/2002	08:00	1884.3	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
17/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
18/2/2002	08:00	1884.1	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
19/2/2002	08:00	1884.3	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
20/2/2002	08:00	1884.4	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
21/2/2002	08:00	1884.3	Compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°3 ) (Hrs 20:00 )
22/2/2002	08:00	1884.3	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°3 )
23/2/2002	08:00	1884.2	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°3 )
24/2/2002	08:00	1884.1	compuerta abierta ( M.D.y M.I. Posición N°1 ) (Hrs 08:00 )
26/2/2002	08:00	1884.2	Cierre de compuerta ( Hrs 11:00 )
1/3/2002	08:00	1884.4	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N° 3 ) ( Hrs 08:00)
2/3/2002	08:00	1884.2	compuerta Abierta ( M.D.y M.I. Posición N°2 ) (Hrs 08:00 )
3/3/2002	08:00	1884.1	Abierta ( M.I. y M.D. Posición N°2 )
4/3/2002	08:00	1884.1	Cierre de compuerta ( Hrs 08:00 )
17/1/2012	07:00	1884.1	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°4 ) ( Hrs 11:30-12:00)
27/1/2012	07:00	1884.2	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°4 ) ( Hrs 10:00-10:30)
17/12/2012	07:00	1874.4	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°1 ) ( Hrs 10:00-11:00)

19/12/2012	07:00	1874.6	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°2) ( Hrs 10:00-11:00)
21/12/2012	07:00	1874.9	Apertura de compuerta ( M.I. Posición N°2) ( Hrs 12:00-13:00)
20/3/2014	07:00	1883.7	Apertura de compuerta ( M.D.y M.I. Posición N°4) ( Hrs 10:30-11:00)
29/02/2015			Apertura compuerta sector (Posición N°4) (Hrs 11:00-11:15)
10/3/2016			Apertura compuerta sector (Posición N°2) (Hrs 11:00-11:10)
20/9/2016			Apertura de compuerta ( M.D. Posición N°2) ( Hrs 12:15-12:30)
9/11/2016			Limpieza de sedimento ( M.D. Posición N°2) ( Hrs 13:30-13:40)
18/11/2016			Apertura de compuerta ( M.D. Posición N°2) ( Hrs 14:50-15:00)
8/12/2016			Apertura de compuerta ( Posición N°2) ( Hrs 12:00-12:30)
11/1/2017			Apertura de compuerta ( Posición N°2) ( Hrs 15:00-15:45)
20/1/2017			Apertura compuerta sector (Posición N°2) (Hrs 13:30-13:45)
24/1/2017			Apertura compuerta sector (Posición N°2) (Hrs 11:00-11:10)
4/9/2017			Apertura compuerta sector (Posición N°1)
28/12/2017			Apertura compuerta sector (Posición N°1)
29/1/2018			Apertura compuerta sector (Posición N°1 y N° 2) (Hrs 09:30-09:45)
6/2/2018			Limpieza de sedimento (Posición N°1y N°2) (Hrs 10:15-11:00)
23/3/2018			Limpieza de sedimento (Posición N°1) (Hrs 10:15-10:30)
29/3/2018			Regulación compuerta sector (Posición N°1) (Hrs 11:30-11:45)
12/11/2018			Apertura compuerta sector (Posición N°1)
26/11/2018			Apertura compuerta sector (Posición N°1) (Hrs 10:00-10:30)
3/12/2018			Apertura compuerta sector (Posición N°1) (Hrs 12:10-12:40)
7/1/2019			Apertura compuerta sector (Posición N°1) (Hrs 10:45-11:15)
22/2/2019			Limpieza de sedimento 1 compuerta (Hrs 10:50-11:00)
26/2/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (Posición N°1) (Hrs 10:25-10:45)
1/4/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (M.D Y M.I Posición N°4) (periodo 20 min)
7/10/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO una compuerta ( Hrs 9:15-9:30)
17/10/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO una compuerta sector ( Hrs 14:05-14:25)

**Fuente:** Adaptado de libro de registros de operación de compuertas. Proyecto Múltiple San Jacinto.

**Tabla 3.7**

*Eventos relevantes ocurrido en el embalse San Jacinto desde su inicio.*

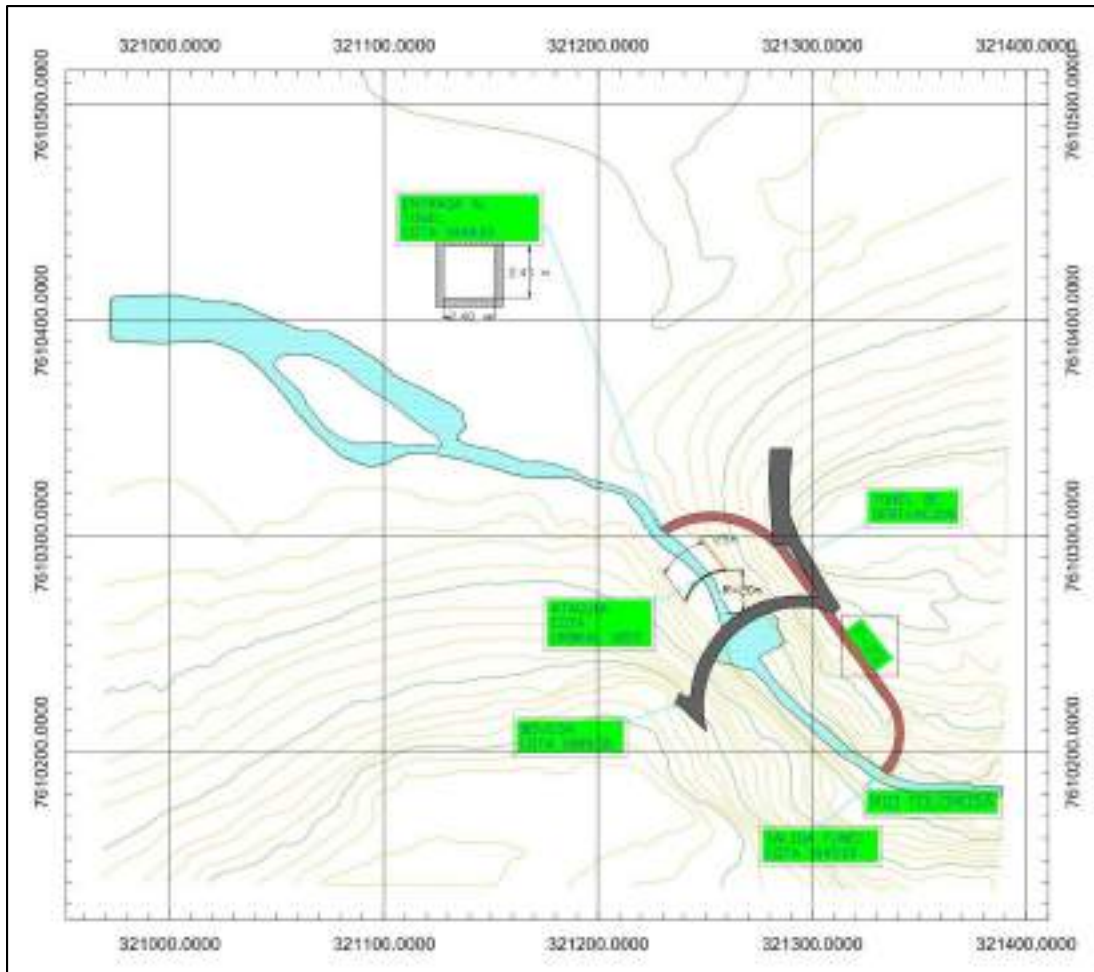
FECHA	HORA	COTA	OBSERVACIONES
18/8/1988	10:30	1852.7	Inicio del llenado del embalse.
29/9/1988	09:40	1852.5	Inicio del embalse Hrs 11:00 am
4/2/1989	08:35	1882.5	1° DESCARGA POR EL VERTEDERO (Cota Max 1882.56 Hrs 16:00 )
25/1/2000	12:00	1885.2	MÁXIMA CRECIDA, compuerta Abierta ( M.D.y M.I posición N°6)
20/3/2014	07:00	1883.7	LIMPIEZA DE SEDIMENTOS ( M.D.y M.I posición N°4) ( Hrs 10:30-11:00)
9/11/2016			LIMPIEZA DE SEDIMENTOS ( M.D Posición N°2) ( Hrs 13:30-13:40)
6/2/2018			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (Posición N°1y N°2) (Hrs 10:15-11:00)
23/3/2018			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (Posición N°1) (Hrs 10:15-10:30)
22/2/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO 1 compuerta (Hrs 10:50-11:00)
26/2/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (Posición N°1) (Hrs 10:25-10:45)
1/4/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO (M.D y M.I Posición N°4) (20 min)
7/10/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO una compuerta ( Hrs 9:15-9:30)
17/10/2019			LIMPIEZA DE SEDIMENTO compuerta sector ( Hrs 14:05-14:25)

**Fuente:** Adaptado de libro de registros de operación de compuertas. Proyecto Múltiple San Jacinto.

### 3.4. Procesamiento de la Información

#### 3.4.1. Digitalización de la información topográfica inicial del año 1986

La información de la topografía inicial de la zona de estudio, sector de la presa San Jacinto, se encontraba únicamente en planos, se procedió a la digitalización en formato CAD.



*Figura 3.10.* Curvas topográficas de la zona de estudio año 1986.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.4.2. Digitalización del plano a detalle del cuerpo de la presa San Jacinto

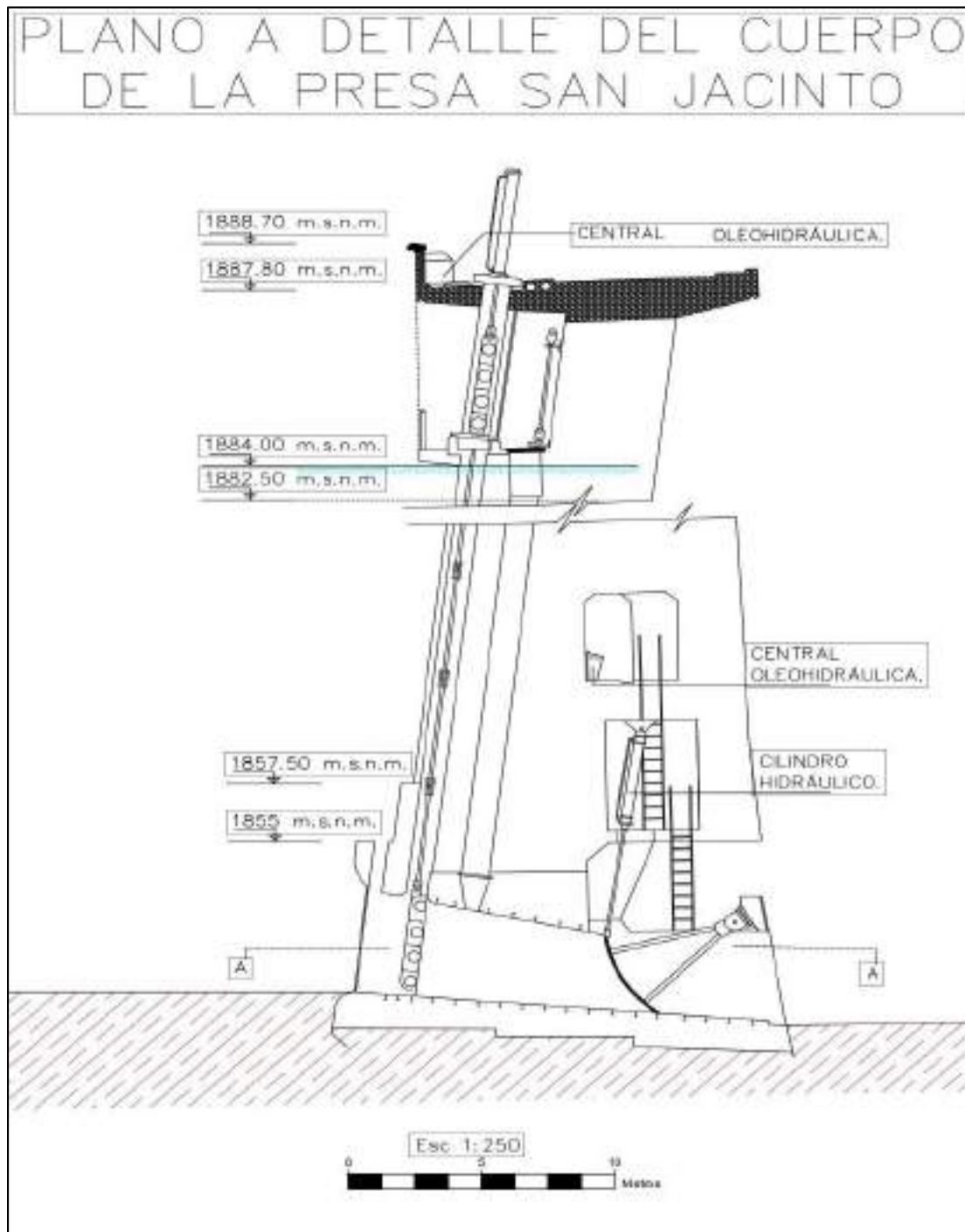


Figura 3.11. Plano a detalle 1 de elevaciones del cuerpo de la presa San Jacinto

Fuente: Elaboración Propia.

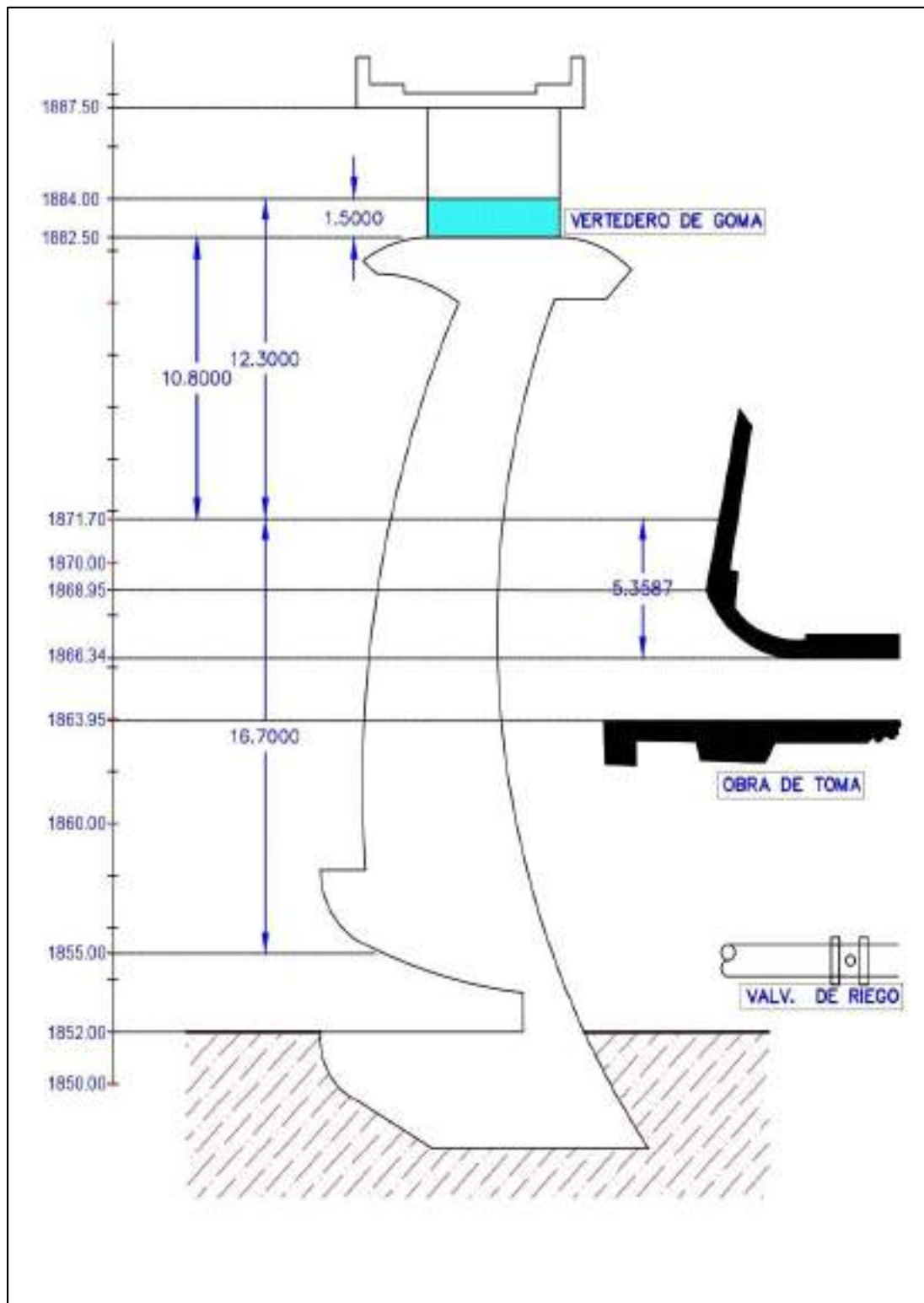


Figura 3.12. Plano a detalle 2 de elevaciones del cuerpo de la presa San Jacinto.

Fuente: Elaboración Propia.

### **3.4.3. Ajustes de la información topográfica y batimétrica**

La información recopilada para la elaboración del presente estudio, es decir las curvas de nivel de la topografía de 1986, la batimetría de 1995 y 2004, se encuentran desfasadas respecto a los trabajos realizados en los años 2013 y 2016 que se utilizó el elipsoide WGS, por lo que es un inconveniente al momento de sobreponer las superficies, provocando un desfase que impide llevar a cabo los diferentes análisis propuestos, para resolver este inconveniente se procedió a la georreferenciación de la información mediante el uso de paquetes computacionales GIS y CAD para la conversión de elipsoide PSAD56 a WGS8.

Referente a la información batimétrica del año 1989, en el año 2018 se llevó adelante el ajuste correspondiente de las curvas topográficas, por la estudiante “Iracema Mariel Paniagua Ramírez” en el trabajo de grado “AJUSTE DE LA BATIMETRÍA DE 1989 Y CUANTIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE SAN JACINTO PREVISTO PARA EL PERÍODO 2013 Y 2016”, cuyo resultado se obtiene las curvas altimétricas referenciadas en el espacio de trabajo adecuado, (ver Anexo 3 y Anexo 4), para realizar los análisis anteriormente propuestos.

Al momento de revisión de la información topográfica del año 1986, información batimétrica del año 1995 y 2004, se observa el desfase del datum respecto al resto de la información debido a que no se encuentra en un mismo elipsoide (PSAD 56 – WGS 84) respectivamente (véase Figura 3.13) cuya información perteneciente a las curvas topográficas del año 1986, se observa el desfase correspondiente debido al elipsoide de trabajo utilizado, lo que posteriormente se procedió al ajuste o georreferenciación en el software tipo SIG, de igual manera se procedió a realizar el reajuste con la demás información.



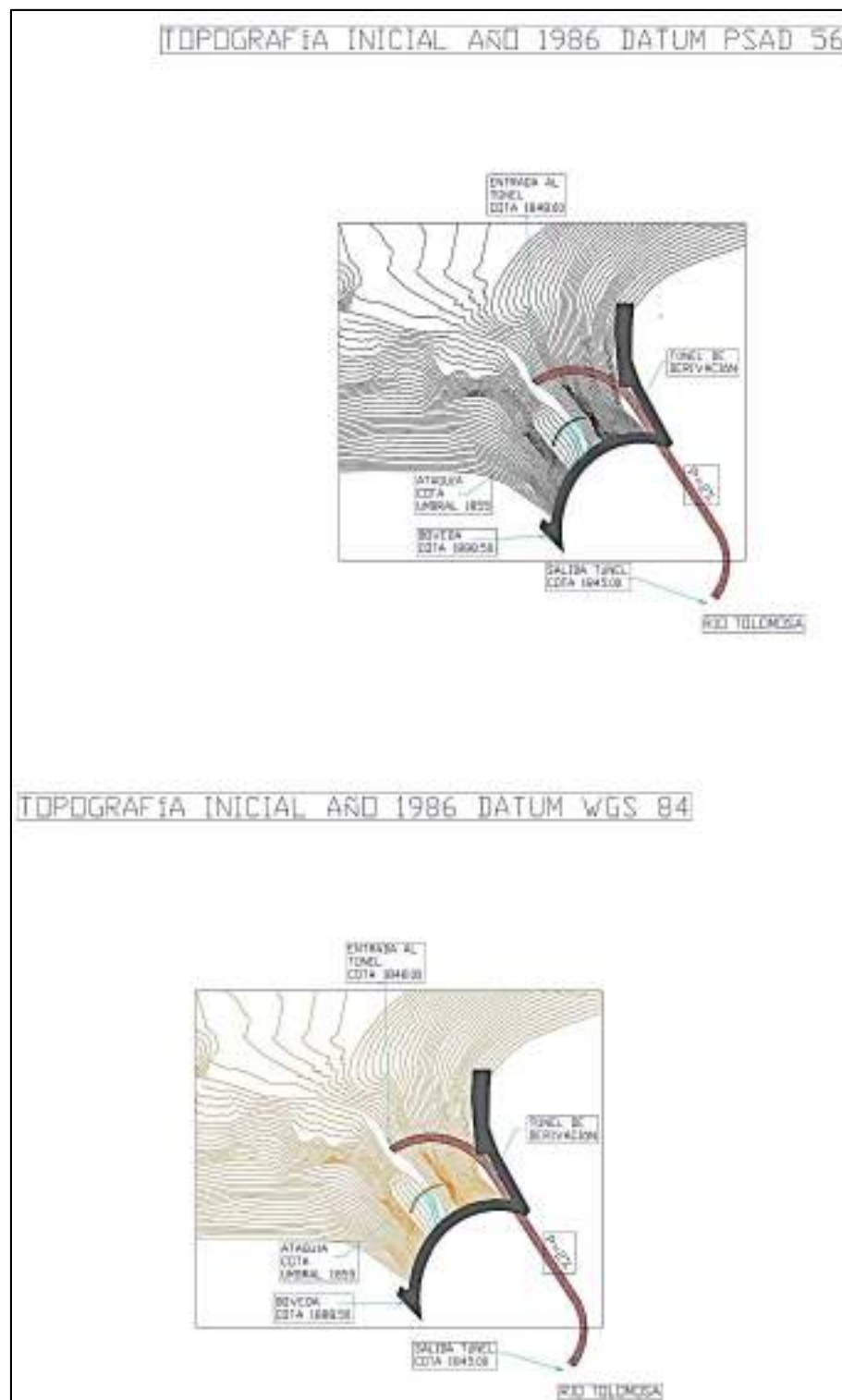


Figura 3.13. Desfase existente debido al elipsoide de trabajo topografía año 1986.

Fuente: Elaboración propia.

## **4. CAMPAÑAS DE CAMPO**

### **4.1. Batimetría año 2018**

#### **4.1.1. Antecedentes**

Como el objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de la distribución del material sedimentario en zonas próximas a la ataguía, se requiere tener disponible la información a detalle de la superficie subacuática de la zona de estudio, por lo que a raíz de este requerimiento surge el convenio interinstitucional entre la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y el proyecto múltiple San Jacinto a través de la empresa ENDE Guaracachi S.A., que solicita mediante la orden de compra (véase en anexo 1) el levantamiento batimétrico en el sector del cuerpo de la presa, es decir en la zona de influencia donde se encuentra emplazada la ataguía.

#### **4.1.2. Objetivo**

El principal objetivo del levantamiento batimétrico es obtener las características de la superficie subacuática a detalle de la zona de estudio, para posteriormente llevar adelante una serie de análisis respecto a la distribución de sedimentos y el funcionamiento de los desfogues de fondo, además, éste trabajo servirá como información batimétrica actualizada del embalse San Jacinto para futuros estudios.

#### **4.1.3. Equipo utilizado**

Ante los avances de la tecnología en el ámbito de la batimetría, el CIAGUA (Centro de Investigación del Agua) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho tiene a disposición el siguiente equipamiento para la realización de levantamientos batimétricos:

##### **a) Móvil Z-BOAT**

Los Z-Boat ofrecen muchas facilidades para los levantamientos batimétricos. 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 y se examina el sitio de trabajo. 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 de la orilla. Teledyne Oceanscience (2015) brinda las características del Z- Boat 1800 (véase anexo 2).



*Fotografía 4.1. Móvil Z-Boat 1800.*

**Fuente:** Archivo personal.

#### **b) Ecosonda monohaz de doble frecuencia**

Se cuenta con el Echotrac CV100 de doble frecuencia que proporciona la opción de obtener los datos de forma completamente digital. 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.



*Fotografía 4.2.* Echotrac CV100DF

**Fuente:** Teledyne OceanScience, 2015

### c) **GPS Hemisphere V320**

Se cuenta con el Vector V320, es denominado así porque cuenta con dos antenas dentro de una cápsula, diseñado para la navegación marina, puede entregar rumbo con una posición de  $0,17^\circ$  y además cabeceo y balanceo con una precisión de  $1^\circ$ . También puede recibir correcciones de Atlas que es el sistema de correcciones diferenciales banda L, con ello puede alcanzar una posición de 8cm RMS.



*Fotografía 4.3.* GPS Hemisphere V320.

**Fuente:** Fuente Propia.

#### **d) Perfilador de velocidad Mini SVP**

Este instrumento tiene un sensor de presión para medir la profundidad, un transductor y un reflector a cierta distancia de separación, **d**. El perfilador cuenta con otro instrumento electrónico llamado CTD con sensores para la conductividad, temperatura, y presión, registra la salinidad por la medición directa de la conductividad eléctrica del agua de mar.

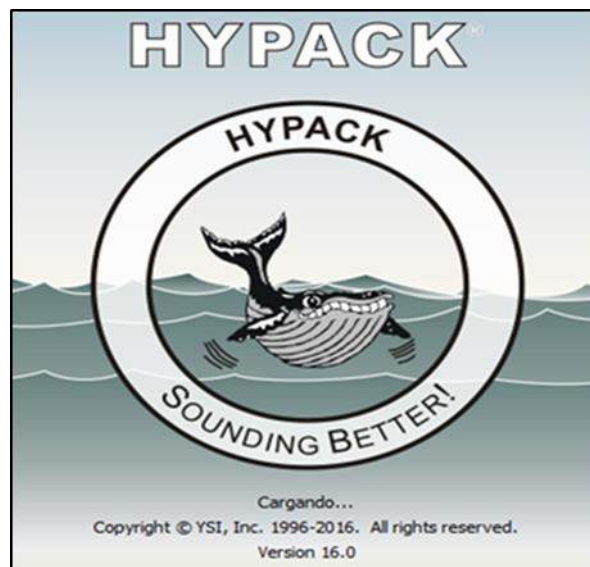


*Fotografía 4.4.* Perfilador de velocidad Mini SVP.

**Fuente:** Archivo personal.

#### **e) Software hidrométrico Hypack**

Proporciona todas las herramientas necesarias para cada una de las etapas del trabajo ya sea para un levantamiento monohaz, multihaz o para dragado. En el trabajo a realizar hará uso del software enfocado en un levantamiento batimétrico con sondeo monohaz, ésta ventana es utilizada de principio a fin durante el proyecto tanto en la planificación, levantamiento, edición y productos finales de la información.



*Figura 4.1.* Ventana principal de Hypack.

**Fuente:** Teledyne Oceansciencie 2016.

#### **4.1.4. Etapas contempladas en el levantamiento batimétrico**

El primer trabajo de campo realizado en el sector del cuerpo de la presa, propiamente en la zona de estudio, se lleva adelante en fecha 19 de abril del año 2018 que en coordinación con el ingeniero Moisés Perales en función de encargado del proyecto del servicio del levantamiento batimétrico del sector de la presa y la obra de toma en la presa San Jacinto, se procede a la realización de las siguientes etapas mencionadas a continuación:

##### **4.1.4.1. Etapa 1. Pre proceso y planificación**

Ésta es la etapa que da inicio a lo que es el levantamiento batimétrico en sí, una vez ubicados en la zona de estudio, armado de equipo y los elementos de apoyo, se procede a realizar una serie de actividades previas a la puesta en marcha del equipo recolector de información, a continuación, se indica los pasos que se debe realizar dentro de la ventana HYPACK, para llevar adelante el levantamiento batimétrico:

- ✚ **Cargado de la imagen de la zona de estudio.** - Con la ayuda de otro software de manejo de imágenes satelitales que permite obtener la imagen de la zona de estudio, se procedió a introducir dentro de la ventana HYPACK, cuyo archivo debe estar referenciado y en calidad superior para el buen desenvolvimiento del equipo.
- ✚ **Delimitar el área de estudio.** - Es el lugar definido y delimitado a través de la creación de un borde dentro del software HYPACK, donde se ejecuta las líneas de sondeo.
- ✚ **Referenciación de los parámetros del lugar de estudio.** - Para un proyecto en el departamento de Tarija los parámetros geodésicos que Hypack le permite seleccionar son los siguientes:
  - ✓ Cuadrícula: UTM Sur
  - ✓ Zona: 20(66W-60W)
  - ✓ Unidad: Metros
  - ✓ Elipsoide: WGS-84
- ✚ **Líneas de traqueo y verificación.** - Se trazan líneas de traqueo y líneas secundarias en los dos sentidos o direcciones perpendiculares entre si y distanciadas a 1 metro, como se indica los términos de referencia elaborados por la parte contratante del levantamiento batimétrico a detalle del sector de la presa San Jacinto.





*Figura 4.2.* Trazado de líneas de traqueo dentro de la ventana HYPACK.

**Fuente:** Elaboración Propia.

#### **4.1.4.2. Etapa 2. Trabajo de campo**

Una vez terminado el pre-proceso se procede a realizar el levantamiento batimétrico, a través del mando de control de dirección y puesta en marcha de la embarcación, se procede a realizar el recorrido línea por línea planeada, a manera de poder cubrir toda el área prevista para el levantamiento, y de esta forma poder obtener perfiles transversales de cada línea de traqueo planeada y posterior a esto, realizar los diferentes análisis de manera detallada de la distribución de sedimentos en la zona del cuerpo de la presa, el trabajo q se realizo tuvo lugar el día 19 de abril de 2018, que estuvo a cargo de todo el equipo de trabajo del laboratorio de hidráulica de hidrología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho en un periodo de duración de 6 horas de trabajo continuo.





*Fotografía 4.5.* Inicio del levantamiento batimétrico.

**Fuente:** Archivo personal.



*Fotografía 4.6.* Desplazamiento del Z-Boat en la zona de estudio.

**Fuente:** Archivo CIAGUA.

#### 4.1.4.3. Etapa 3. Procesamiento de datos obtenidos en campo

Posteriormente al trabajo que se realiza en campo, se procede a la edición de los datos brutos mediante el software hidrométrico Hypack, la información que se obtiene, se debe editar y procesar de manera minuciosa y a detalle debido a la sensibilidad con la que se realiza la recolección de datos, suele haber registrado una serie de información no coherente que tiene que ser despreciada.

En esta etapa se obtiene el producto final del trabajo de levantamiento batimétrico, donde la información que se expone se encuentra en formatos de trabajos conocidos (EXCEL, CAD, GIS) de mayor confiabilidad, manejo, seleccionada y calificada que ya puede entrar a la siguiente fase de análisis (véase anexo 6).

La precisión con la que se realizó la toma de datos es aproximadamente 104196 puntos en toda la zona de estudio.

En la figura que se expone a continuación, se muestra el proceso de corrección de datos que han sido tomados de manera errónea, realizando la corrección por eliminación de la información que no es confiable.



Figura 4.3. Aplicación de comando borrar en información de puntos erróneos.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## **4.2. Batimetría año 2019**

### **4.2.1. Antecedentes**

El levantamiento batimétrico realizado en abril de 2019 se encuentra enmarcado dentro de los trabajos que realiza el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, que suscribe un convenio con el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), para la ejecución del proyecto de investigación aplicada “Protocolo de medición Batimétrica para el Monitoreo de Embalses y Lagunas del Departamento de Tarija y Chuquisaca”.

### **4.2.2. Objetivo**

El levantamiento batimétrico a detalle del sector de la presa San Jacinto, tiene como objetivo principal la recolección de información a gran precisión para realizar comparaciones con las anteriores batimetrías del área de estudio, además de contribuir con información actualizada de la zona.

### **4.2.3. Importancia**

La importancia de la batimetría ejecutada en la gestión 2019 radica en que se podrá generar 2 levantamientos batimétricos de la zona de estudio con la misma precisión y con el mismo equipo, que permitirá identificar la dinámica sedimentaria con mayor detalle.

#### 4.2.4. Descripción de las actividades

El trabajo de campo correspondiente al levantamiento batimétrico del sector del cuerpo de la presa, se dio en fecha 25 de abril del correspondiente año, mencionado acontecimiento forma parte del levantamiento batimétrico del todo el embalse de San Jacinto, el cual tuvo mayor énfasis en lo que se refiere a la precisión que se requiere ésta zona respecto a todo el embalse en sí, es decir que el proceso de recolección de información fue mucho más minucioso con una mayor densificación de líneas planeadas, vale decir que, se trazó una grilla de líneas tanto horizontales y verticales cada 5 metros, que en comparación con las líneas planeadas respecto a todo el embalse son de cada 75 metros de separación, esto se debe a que el tamaño de las áreas de estudio es de mayor magnitud una respecto de otra.



*Fotografía 4.7.* Levantamiento batimétrico del sector del cuerpo de la presa.

**Fuente:** Archivo CIAGUA.





*Fotografía 4.8.* Recorrido del equipo Z-Boat a través de las líneas planeadas.

**Fuente:** Archivo personal.

#### **4.2.5. Procesamiento de la información obtenida de campo**

El procesamiento de los datos brutos, se realiza dentro de la ventana de edición de datos Hypack, es decir dentro de la unidad del editor monohaz, al igual que en la batimetría del año 2018, se llevó adelante el mismo proceso de edición de la información a manera de obtener información clasificada y confiable para los posibles estudios a realizar en la zona de estudio, el procesamiento se realizó de manera minuciosa y detallada de los perfiles levantados, cuya precisión es alrededor de 30517 puntos en la zona de estudio, resultado de esta edición es la obtención de valores corregidos en formatos de trabajos más familiares (civil 3D, archivos XYZ, CAD) (véase Anexo 7).

#### 4.2.6. Principales inconvenientes

Uno de los principales inconvenientes que se suscitó tanto en el levantamiento batimétrico del año 2018 y 2019, es la vegetación que existe en el lugar, las plantas acuáticas que se encuentran alojadas en los alrededores de la zona de estudio, impiden la recolección de información precisa de toda el área, además, la vegetación en suspensión (Jacintos) cambia de ubicación o que se desplaza todo el tiempo, lo cual de un tiempo a otro, pospone la toma de datos, hasta incluso provocando la suspensión de las actividades programadas previas a un levantamiento batimétrico, en la (Fotografía 4.9) se muestra la principal dificultad con la que se constató durante los trabajos de campo.



*Fotografía 4.9.* Estado del área de estudio (Batimetría año 2018).

**Fuente:** Archivo CIAGUA.

## **5. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN SEDIMENTARIA**

### **5.1. Análisis de la capacidad de almacenamiento**

La dinámica sedimentaria con la que atraviesa este tipo de estructuras, da lugar a la realización de un análisis minucioso de la capacidad de almacenamiento con la que cuenta a lo largo del tiempo en el que se realizó los diferentes trabajos de topobatimetría precisamente en la zona de estudio.

A continuación, se expone la cuantificación de volumen de agua o capacidad de almacenamiento en la zona aguas arriba de la presa del embalse de San Jacinto, dentro de un área, el cálculo de volúmenes se realizó hasta el nivel de aguas normales que se encuentra en la cota 1884 m.s.n.m., por lo que es necesario resaltar que, se tuvo que realizar la proyección para algunas curvas batimétricas que no se encuentran a esa cota (1884 m.s.n.m.) el nivel de aguas normales cuando se realizó el levantamiento batimétrico.

El cálculo de la capacidad de almacenamiento en la zona de estudio, se realizó mediante la aplicación de 4 softwares computacionales AutoCAD Civil 3D 2018 con el método área final media o aproximación cónica, ArcGIS 10.3 y Surfer 15 que realizan el cálculo volumétrico a través del método TIN (Red de Triángulos Irregulares) y por último la aplicación del método Área Media Entre Curvas.

Las curvas topobatimétricas que se utilizó para la determinación del volumen de almacenamiento, se encuentran denotadas cada 1 metro de desnivel tanto en las curvas topográficas del año 1986 y la curva topobatimétrica de 1989, 1995, 2004, 2013, 2016, 2018 y 2019 (véase anexo 8).

### 5.1.1. Curvas de la topografía inicial año 1986

**Tabla 5.1**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topografía 1986.*

Cotas (msnm.)		Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0	0	0	0
1850	-	1851	3181.8	3181.8	1590.900	1590.900
1851	-	1852	1555.91	4737.71	3959.755	5550.655
1852	-	1853	1396.16	6133.87	5435.790	10986.445
1853	-	1854	1315.170	7449.040	6791.455	17777.900
1854	-	1855	1430.550	8879.590	8164.315	25942.215
1855	-	1856	563.370	9442.960	9161.275	35103.490
1856	-	1857	534.600	9977.560	9710.260	44813.750
1857	-	1858	512.450	10490.010	10233.785	55047.535
1858	-	1859	490.480	10980.490	10735.250	65782.785
1859	-	1860	470.660	11451.150	11215.820	76998.605
1860	-	1861	490.480	11941.630	11696.390	88694.995
1861	-	1862	473.610	12415.240	12178.435	100873.430
1862	-	1863	455.880	12871.120	12643.180	113516.610
1863	-	1864	443.030	13314.150	13092.635	126609.245
1864	-	1865	425.160	13739.310	13526.730	140135.975
1865	-	1866	499.690	14239.000	13989.155	154125.130
1866	-	1867	492.030	14731.030	14485.015	168610.145
1867	-	1868	492.510	15223.540	14977.285	183587.430
1868	-	1869	485.160	15708.700	15466.120	199053.550
1869	-	1870	477.420	16186.120	15947.410	215000.960
1870	-	1871	468.110	16654.230	16420.175	231421.135
1871	-	1872	464.800	17119.030	16886.630	248307.765
1872	-	1873	465.150	17584.180	17351.605	265659.370
1873	-	1874	465.420	18049.600	17816.890	283476.260
1874	-	1875	468.080	18517.680	18283.640	301759.900
1875	-	1876	480.270	18997.950	18757.815	320517.715
1876	-	1877	490.770	19488.720	19243.335	339761.050
1877	-	1878	500.320	19989.040	19738.880	359499.930
1878	-	1879	509.710	20498.750	20243.895	379743.825
1879	-	1880	509.660	21008.410	20753.580	400497.405



1880	-	1881	511.110	21519.520	21263.965	21263.965	421761.370
1881	-	1882	496.660	22016.180	21767.850	21767.850	443529.220
1882	-	1883	486.250	22502.430	22259.305	22259.305	465788.525
1883	-	1884	491.870	22994.300	22748.365	22748.365	488536.890

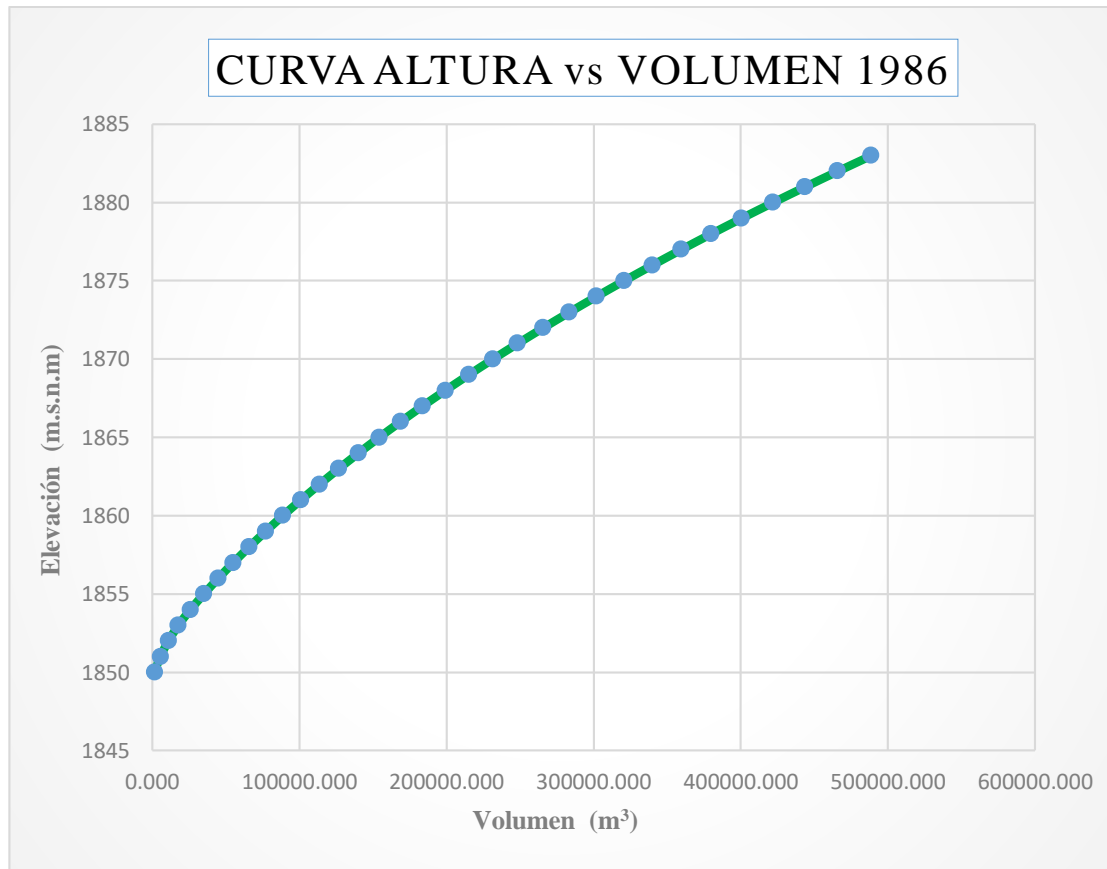


Figura 5.1. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topografía 1986.

**Tabla 5.2**

*Volúmenes de agua topografía 1986 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	454453.87
ArcGIS 10.3	441567.95
Surfer 15	442630.55
Curva Cota- Volumen (Excel 1986)	488536.89

### 5.1.2. Curvas topobatimétricas año 1989

**Tabla 5.3**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 1989.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0	0	0	0	0
1850	-	1851	0	0	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0	0	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0	0	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	632.330	632.330	316.165	316.165	316.165
1854	-	1855	444.090	1076.420	854.375	854.375	1170.540
1855	-	1856	2158.100	3234.520	2155.470	2155.470	3326.010
1856	-	1857	1056.250	4290.770	3762.645	3762.645	7088.655
1857	-	1858	712.070	5002.840	4646.805	4646.805	11735.460
1858	-	1859	1585.930	6588.770	5795.805	5795.805	17531.265
1859	-	1860	771.650	7360.420	6974.595	6974.595	24505.860
1860	-	1861	561.040	7921.460	7640.940	7640.940	32146.800
1861	-	1862	644.210	8565.670	8243.565	8243.565	40390.365
1862	-	1863	1018.820	9584.490	9075.080	9075.080	49465.445
1863	-	1864	739.770	10324.260	9954.375	9954.375	59419.820
1864	-	1865	960.850	11285.110	10804.685	10804.685	70224.505
1865	-	1866	779.440	12064.550	11674.830	11674.830	81899.335
1866	-	1867	516.660	12581.210	12322.880	12322.880	94222.215
1867	-	1868	601.020	13182.230	12881.720	12881.720	107103.935
1868	-	1869	535.110	13717.340	13449.785	13449.785	120553.720
1869	-	1870	867.710	14585.050	14151.195	14151.195	134704.915
1870	-	1871	614.640	15199.690	14892.370	14892.370	149597.285
1871	-	1872	430.330	15630.020	15414.855	15414.855	165012.140
1872	-	1873	505.270	16135.290	15882.655	15882.655	180894.795
1873	-	1874	308.650	16443.940	16289.615	16289.615	197184.410
1874	-	1875	254.940	16698.880	16571.410	16571.410	213755.820
1875	-	1876	283.640	16982.520	16840.700	16840.700	230596.520
1876	-	1877	321.790	17304.310	17143.415	17143.415	247739.935
1877	-	1878	324.980	17629.290	17466.800	17466.800	265206.735
1878	-	1879	299.990	17929.280	17779.285	17779.285	282986.020
1879	-	1880	360.630	18289.910	18109.595	18109.595	301095.615
1880	-	1881	325.620	18615.530	18452.720	18452.720	319548.335

1881	-	1882	439.130	19054.660	18835.095	18835.095	338383.430
1882	-	1883	231.230	19285.890	19170.275	19170.275	357553.705
1883	-	1884	373.680	19659.570	19472.730	19472.730	377026.435

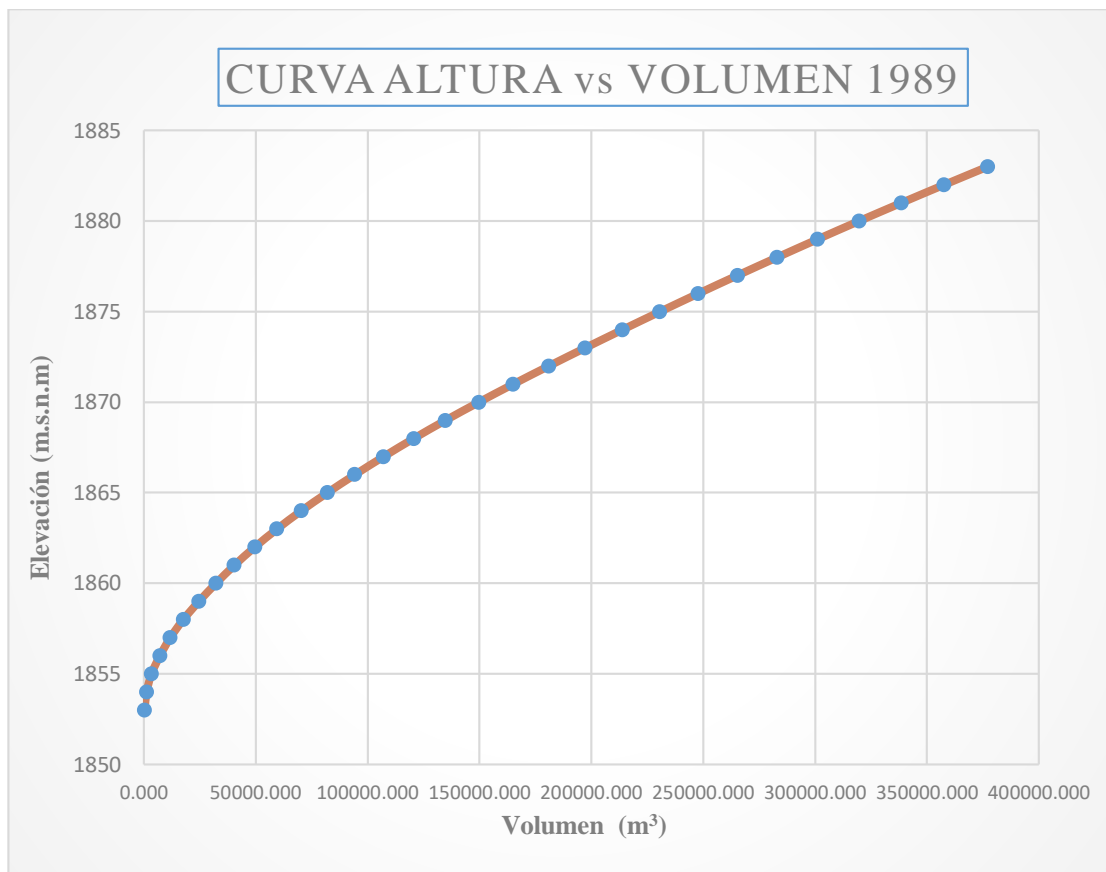


Figura 5.2. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 1989.

**Tabla 5.4**

*Volúmenes de agua topobatimetría 1989 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	370638.96
ArcGIS 10.3	368556.53
Surfer 15	369450.33
Curva Cota- Volumen (Excel 1989)	377026.44

### 5.1.3. Curvas Topobatimétricas año 1995

**Tabla 5.5**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 1995.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	157.980	157.980	78.990	78.990	78.990
1857	-	1858	85.780	243.760	200.870	200.870	279.860
1858	-	1859	327.350	571.110	407.435	407.435	687.295
1859	-	1860	508.150	1079.260	825.185	825.185	1512.480
1860	-	1861	6935.090	8014.350	4546.805	4546.805	6059.285
1861	-	1862	699.940	8714.290	8364.320	8364.320	14423.605
1862	-	1863	634.510	9348.800	9031.545	9031.545	23455.150
1863	-	1864	574.320	9923.120	9635.960	9635.960	33091.110
1864	-	1865	569.500	10492.620	10207.870	10207.870	43298.980
1865	-	1866	447.400	10940.020	10716.320	10716.320	54015.300
1866	-	1867	478.630	11418.650	11179.335	11179.335	65194.635
1867	-	1868	423.180	11841.830	11630.240	11630.240	76824.875
1868	-	1869	391.550	12233.380	12037.605	12037.605	88862.480
1869	-	1870	449.780	12683.160	12458.270	12458.270	101320.750
1870	-	1871	587.180	13270.340	12976.750	12976.750	114297.500
1871	-	1872	520.950	13791.290	13530.815	13530.815	127828.315
1872	-	1873	492.060	14283.350	14037.320	14037.320	141865.635
1873	-	1874	524.610	14807.960	14545.655	14545.655	156411.290
1874	-	1875	521.060	15329.020	15068.490	15068.490	171479.780
1875	-	1876	445.820	15774.840	15551.930	15551.930	187031.710
1876	-	1877	472.720	16247.560	16011.200	16011.200	203042.910
1877	-	1878	579.070	16826.630	16537.095	16537.095	219580.005
1878	-	1879	687.48	17514.11	17170.370	17170.3700	236750.375
1879	-	1880	551.38	18065.49	17789.800	17789.8000	254540.175

1880	-	1881	764.62	18830.11	18447.800	18447.8000	272987.975
1881	-	1882	499.12	19329.23	19079.670	19079.6700	292067.645
1882	-	1883	497.6	19826.83	19578.030	19578.0300	311645.675
1883	-	1884	479.12	20305.95	20066.390	20066.3900	331712.065

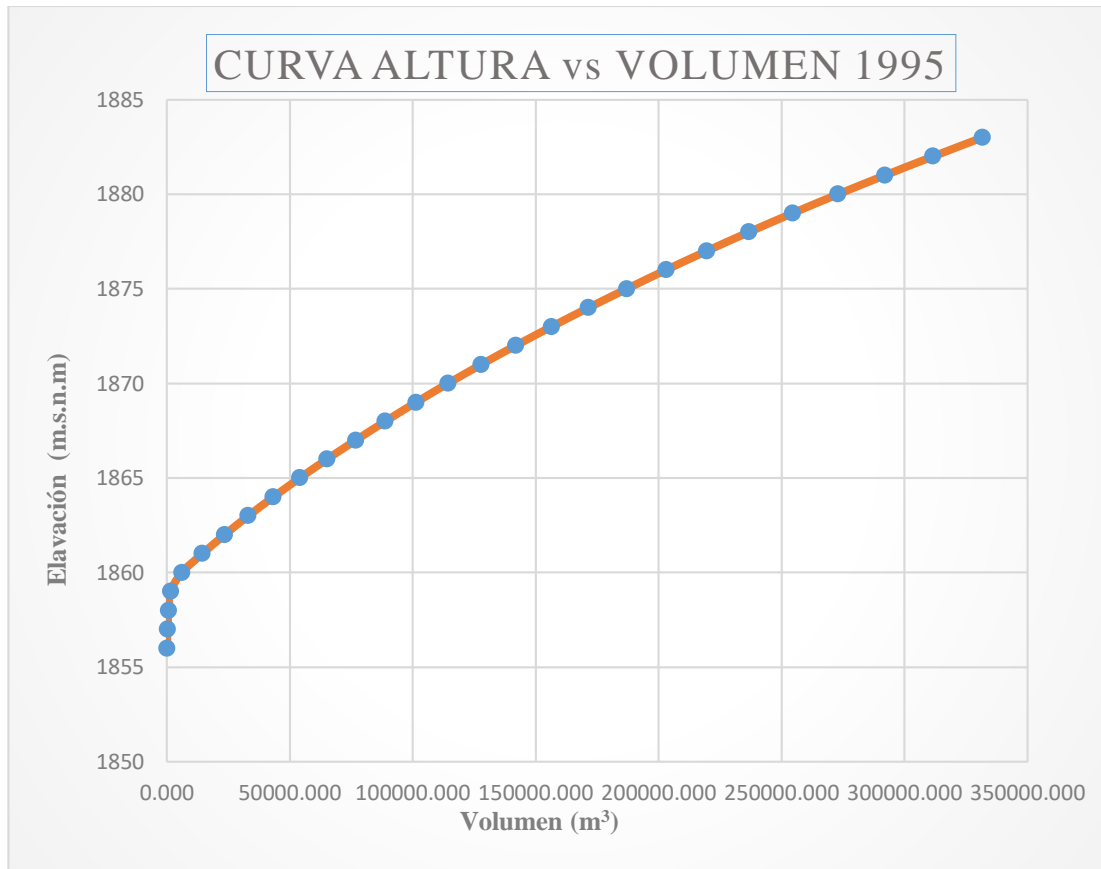


Figura 5.3. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 1995.

### Tabla 5.6

*Volúmenes de agua topobatimetría 1995 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	319699.800
ArcGIS 10.3	316880.074
Surfer 15	320543.056
Curva Cota- Volumen (Excel 1995)	331712.065

#### 5.1.4. Curvas topobatimétricas año 2004

**Tabla 5.7**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2004.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	216.620	216.620	108.310	108.310	108.310
1857	-	1858	171.970	388.590	302.605	302.605	410.915
1858	-	1859	214.990	603.580	496.085	496.085	907.000
1859	-	1860	258.480	862.060	732.820	732.820	1639.820
1860	-	1861	712.040	1574.100	1218.080	1218.080	2857.900
1861	-	1862	1109.700	2683.800	2128.950	2128.950	4986.850
1862	-	1863	5754.930	8438.730	5561.265	5561.265	10548.115
1863	-	1864	674.510	9113.240	8775.985	8775.985	19324.100
1864	-	1865	587.780	9701.020	9407.130	9407.130	28731.230
1865	-	1866	552.680	10253.700	9977.360	9977.360	38708.590
1866	-	1867	552.320	10806.020	10529.860	10529.860	49238.450
1867	-	1868	551.980	11358.000	11082.010	11082.010	60320.460
1868	-	1869	548.140	11906.140	11632.070	11632.070	71952.530
1869	-	1870	542.040	12448.180	12177.160	12177.160	84129.690
1870	-	1871	512.570	12960.750	12704.465	12704.465	96834.155
1871	-	1872	504.090	13464.840	13212.795	13212.795	110046.950
1872	-	1873	491.940	13956.780	13710.810	13710.810	123757.760
1873	-	1874	530.140	14486.920	14221.850	14221.850	137979.610
1874	-	1875	549.860	15036.780	14761.850	14761.850	152741.460
1875	-	1876	568.630	15605.410	15321.095	15321.095	168062.555
1876	-	1877	615.160	16220.570	15912.990	15912.990	183975.545
1877	-	1878	626.470	16847.040	16533.805	16533.805	200509.350
1878	-	1879	616.55	17463.59	17155.315	17155.315	217664.665
1879	-	1880	588	18051.59	17757.590	17757.590	235422.255

1880	-	1881	507.17	18558.76	18305.175	18305.1750	253727.43
1881	-	1882	501.02	19059.78	18809.270	18809.2700	272536.7
1882	-	1883	531.33	19591.11	19325.445	19325.4450	291862.145
1883	-	1884	451.67	20042.78	19816.945	19816.9450	311679.09

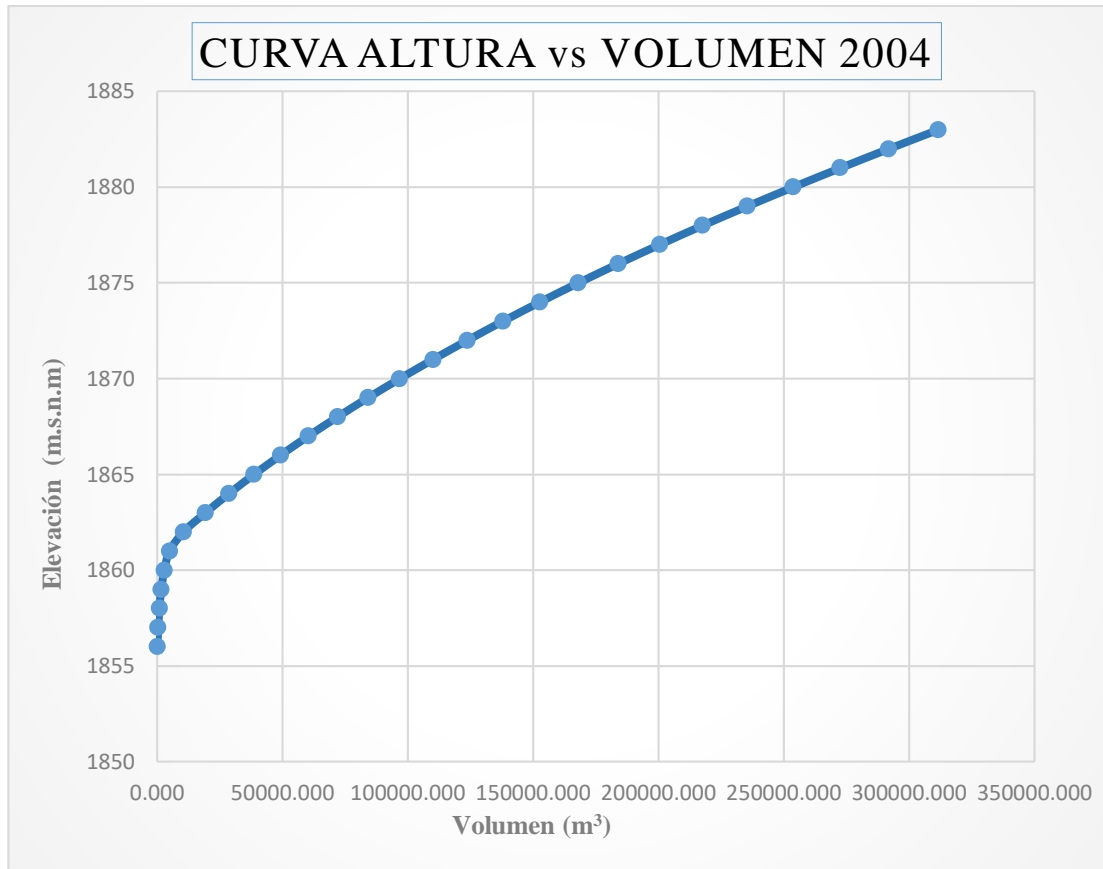


Figura 5.4. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2004.

**Tabla 5.8**

*Volúmenes de agua para la topobatimetría 2004 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	305922.160
ArcGIS 10.3	302357.074
Surfer 15	304581.021
Curva Cota- Volumen (Excel 2004)	311679.090

### 5.1.5. Curvas topobatómétricas año 2013

**Tabla 5.9**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatómetría 2013.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	52.900	52.900	26.450	26.450	26.450
1857	-	1858	44.740	97.640	75.270	75.270	101.720
1858	-	1859	53.530	151.170	124.405	124.405	226.125
1859	-	1860	89.000	240.170	195.670	195.670	421.795
1860	-	1861	139.010	379.180	309.675	309.675	731.470
1861	-	1862	177.070	556.250	467.715	467.715	1199.185
1862	-	1863	213.870	770.120	663.185	663.185	1862.370
1863	-	1864	941.440	1711.560	1240.840	1240.840	3103.210
1864	-	1865	7447.860	9159.420	5435.490	5435.490	8538.700
1865	-	1866	1132.440	10291.860	9725.640	9725.640	18264.340
1866	-	1867	1023.260	11315.120	10803.490	10803.490	29067.830
1867	-	1868	953.630	12268.750	11791.935	11791.935	40859.765
1868	-	1869	706.910	12975.660	12622.205	12622.205	53481.970
1869	-	1870	652.530	13628.190	13301.925	13301.925	66783.895
1870	-	1871	580.470	14208.660	13918.425	13918.425	80702.320
1871	-	1872	554.090	14762.750	14485.705	14485.705	95188.025
1872	-	1873	547.700	15310.450	15036.600	15036.600	110224.625
1873	-	1874	469.430	15779.880	15545.165	15545.165	125769.790
1874	-	1875	447.410	16227.290	16003.585	16003.585	141773.375
1875	-	1876	421.130	16648.420	16437.855	16437.855	158211.230
1876	-	1877	402.270	17050.690	16849.555	16849.555	175060.785
1877	-	1878	377.320	17428.010	17239.350	17239.350	192300.135



1878	-	1879	438.21	17866.22	17647.115	17647.1150	209947.25
1879	-	1880	502.72	18368.94	18117.580	18117.5800	228064.83
1880	-	1881	520.35	18889.29	18629.115	18629.1150	246693.945
1881	-	1882	545.57	19434.86	19162.075	19162.0750	265856.02
1882	-	1883	461.38	19896.24	19665.550	19665.5500	285521.57
1883	-	1884	454.56	20350.8	20123.520	20123.5200	305645.09

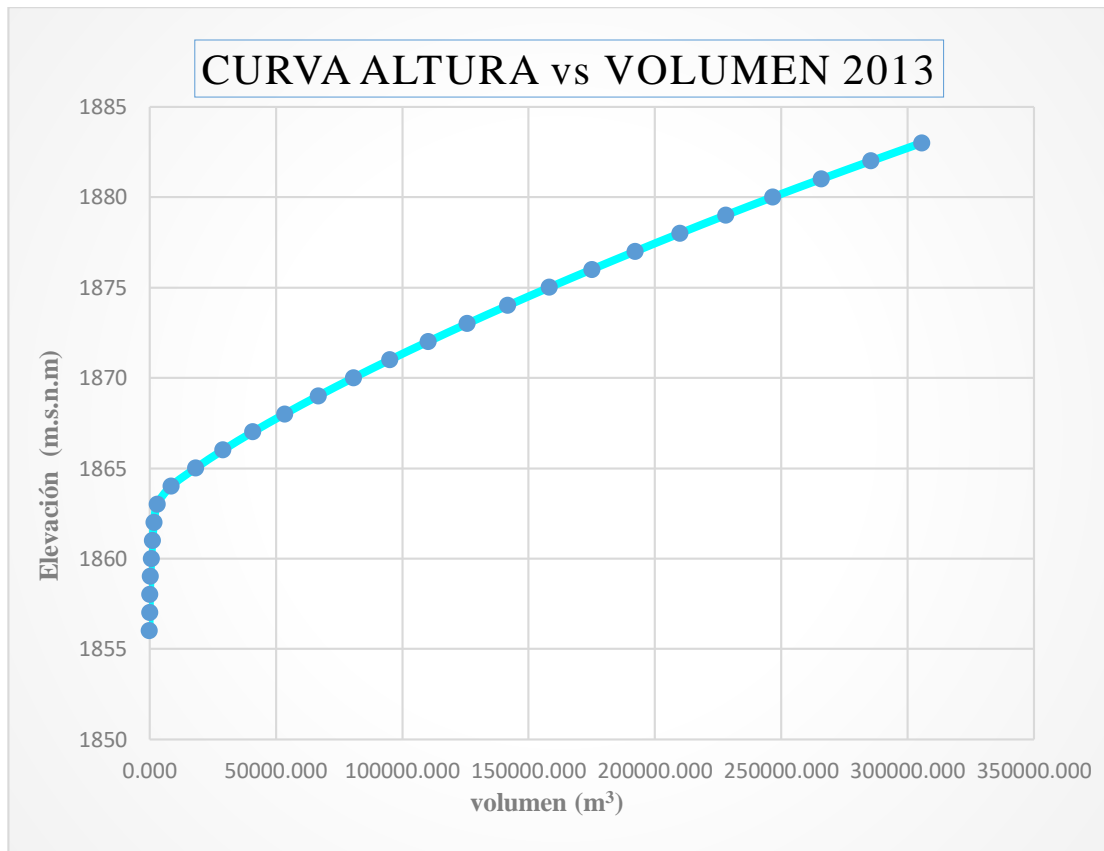


Figura 5.5. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2013.

**Tabla 5.10**

*Volúmenes de agua para la topobatimetría 2013 cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	293168.520
ArcGIS 10.3	290402.336
Surfer 15	292633.255
Curva Cota- Volumen (Excel 2013)	305645.090

### 5.1.6. Curvas topobatómétricas año 2016

**Tabla 5.11**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatómetría 2016.*

Cotas (msnm.)		Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	51.140	51.140	25.570	25.570
1857	-	1858	82.590	133.730	92.435	118.005
1858	-	1859	60.870	194.600	164.165	282.170
1859	-	1860	77.990	272.590	233.595	515.765
1860	-	1861	104.290	376.880	324.735	840.500
1861	-	1862	103.200	480.080	428.480	1268.980
1862	-	1863	156.990	637.070	558.575	1827.555
1863	-	1864	634.930	1272.000	954.535	2782.090
1864	-	1865	7711.770	8983.770	5127.885	7909.975
1865	-	1866	1365.930	10349.700	9666.735	17576.710
1866	-	1867	1114.140	11463.840	10906.770	28483.480
1867	-	1868	635.390	12099.230	11781.535	40265.015
1868	-	1869	561.000	12660.230	12379.730	52644.745
1869	-	1870	513.310	13173.540	12916.885	65561.630
1870	-	1871	516.330	13689.870	13431.705	78993.335
1871	-	1872	500.530	14190.400	13940.135	92933.470
1872	-	1873	468.910	14659.310	14424.855	107358.325
1873	-	1874	478.530	15137.840	14898.575	122256.900
1874	-	1875	481.580	15619.420	15378.630	137635.530
1875	-	1876	442.650	16062.070	15840.745	153476.275
1876	-	1877	429.490	16491.560	16276.815	169753.090
1877	-	1878	704.030	17195.590	16843.575	186596.665
1878	-	1879	381.73	17577.32	17386.455	203983.12
1879	-	1880	423.93	18001.25	17789.285	221772.405

1880	-	1881	514.43	18515.68	18258.465	18258.4650	240030.87
1881	-	1882	462.72	18978.4	18747.040	18747.0400	258777.91
1882	-	1883	514.43	19492.83	19235.615	19235.6150	278013.525
1883	-	1884	462.72	19955.55	19724.190	19724.1900	297737.715

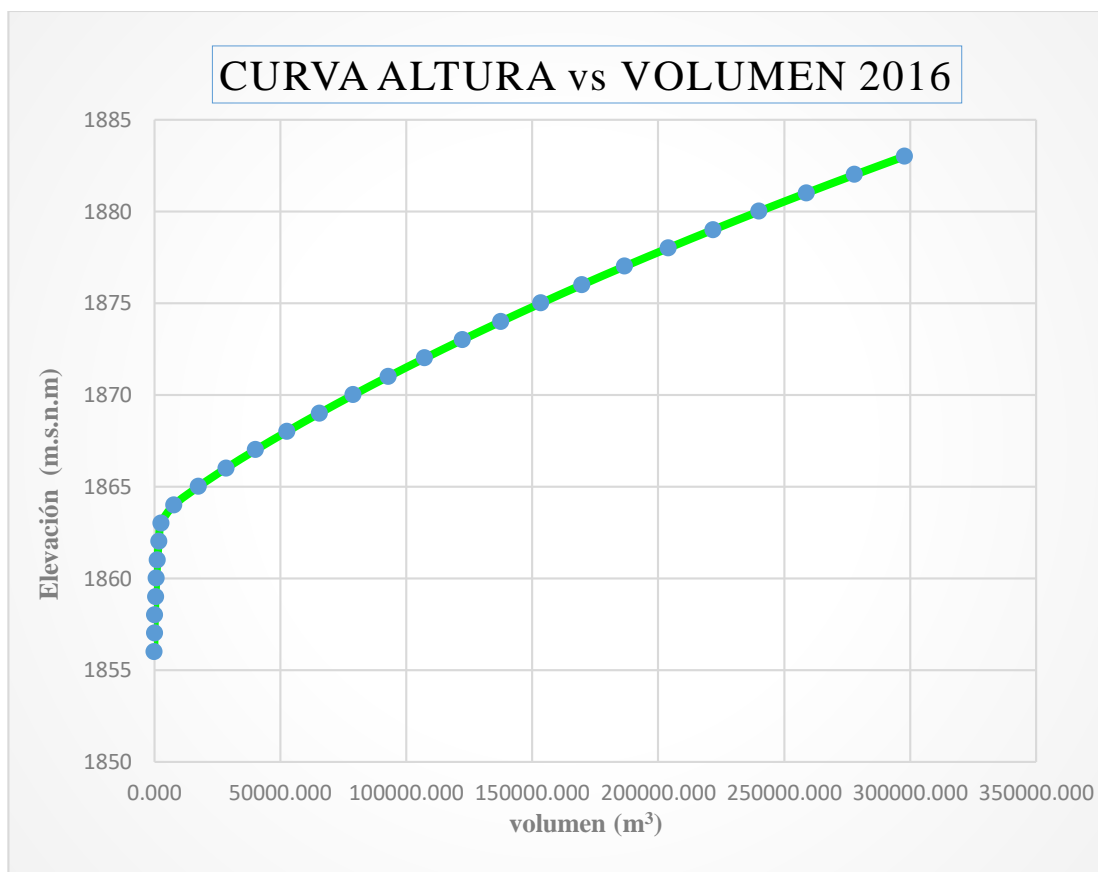


Figura 5.6. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2016.

**Tabla 5.12**

*Volúmenes de agua topobatimetría 2016 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	294979.55
ArcGIS 10.3	292917.736
Surfer 15	293121.018
Curva Cota- Volumen (Excel 2016)	297737.715

### 5.1.7. Curvas topobatimétricas año 2018

**Tabla 5.13**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2018.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	82.230	82.230	41.115	41.115	41.115
1857	-	1858	50.930	133.160	107.695	107.695	148.810
1858	-	1859	59.970	193.130	163.145	163.145	311.955
1859	-	1860	95.550	288.680	240.905	240.905	552.860
1860	-	1861	84.750	373.430	331.055	331.055	883.915
1861	-	1862	84.470	457.900	415.665	415.665	1299.580
1862	-	1863	100.750	558.650	508.275	508.275	1807.855
1863	-	1864	477.980	1036.630	797.640	797.640	2605.495
1864	-	1865	7294.750	8331.380	4684.005	4684.005	7289.500
1865	-	1866	2050.520	10381.900	9356.640	9356.640	16646.140
1866	-	1867	1265.650	11647.550	11014.725	11014.725	27660.865
1867	-	1868	504.740	12152.290	11899.920	11899.920	39560.785
1868	-	1869	411.910	12564.200	12358.245	12358.245	51919.030
1869	-	1870	440.380	13004.580	12784.390	12784.390	64703.420
1870	-	1871	528.130	13532.710	13268.645	13268.645	77972.065
1871	-	1872	548.200	14080.910	13806.810	13806.810	91778.875
1872	-	1873	597.380	14678.290	14379.600	14379.600	106158.475
1873	-	1874	556.200	15234.490	14956.390	14956.390	121114.865
1874	-	1875	477.990	15712.480	15473.485	15473.485	136588.350
1875	-	1876	419.140	16131.620	15922.050	15922.050	152510.400
1876	-	1877	380.030	16511.650	16321.635	16321.635	168832.035
1877	-	1878	240.350	16752.000	16631.825	16631.825	185463.860
1878	-	1879	215.2	16967.2	16859.600	16859.6000	202323.46
1879	-	1880	239.4	17206.6	17086.900	17086.9000	219410.36

1880	-	1881	114.64	17321.24	17263.920	17263.9200	236674.28
1881	-	1882	113.21	17434.45	17377.845	17377.8450	254052.125
1882	-	1883	514.43	17948.88	17691.665	17691.665	271743.79
1883	-	1884	462.72	18411.6	18180.240	18180.240	289924.03

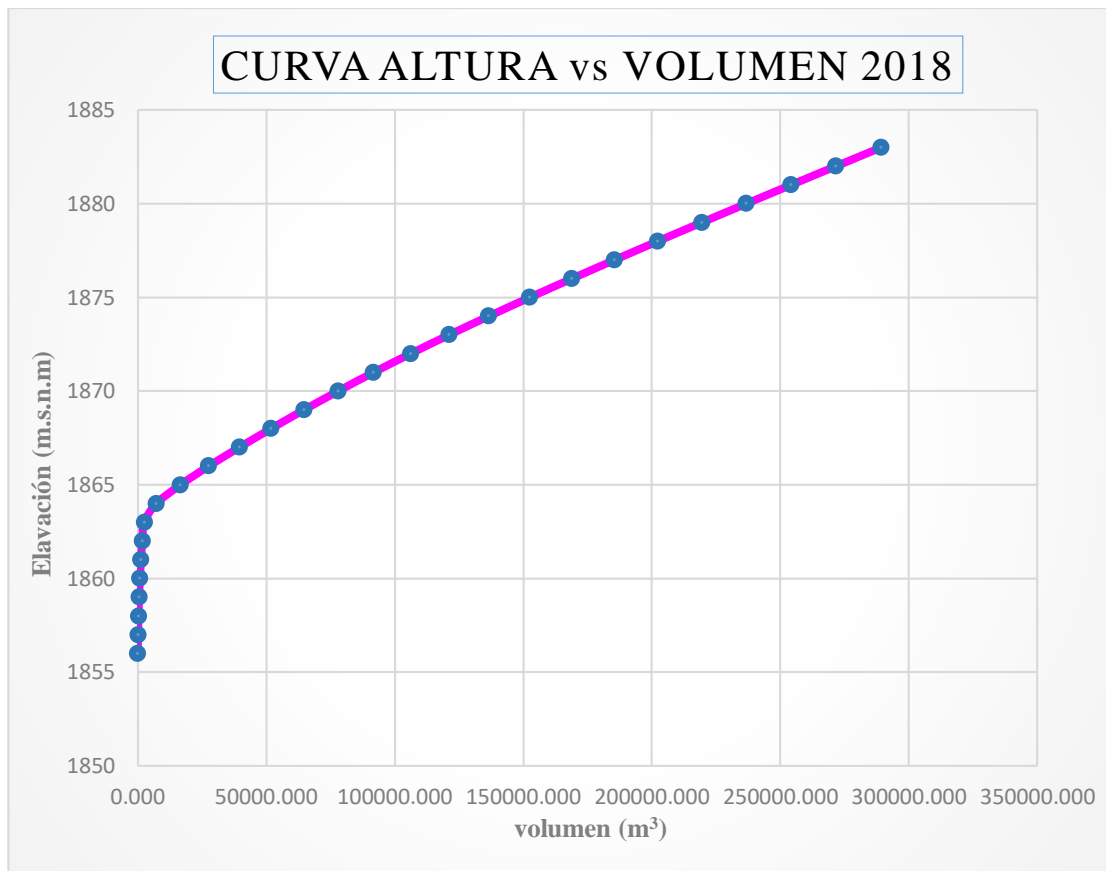


Figura 5.7. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2018.

**Tabla 5.14**

*Volúmenes de agua topobatimetría 2018 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	285987.650
ArcGIS 10.3	291937.229
Surfer 15	287032.145
Curva Cota- Volumen (Excel 2018)	289924.030

### 5.1.8. Curvas topobatimétricas año 2019

**Tabla 5.15**

*Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2019.*

Cotas (msnm.)			Área Entre Cotas (m <sup>2</sup> )	Área de Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área media Acumulada (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
1850	-	1850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1850	-	1851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1851	-	1852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1852	-	1853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1853	-	1854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1854	-	1855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1855	-	1856	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1856	-	1857	53.640	53.640	26.820	26.820	26.820
1857	-	1858	82.230	135.870	94.755	94.755	121.575
1858	-	1859	68.290	204.160	170.015	170.015	291.590
1859	-	1860	120.540	324.700	264.430	264.430	556.020
1860	-	1861	131.570	456.270	390.485	390.485	946.505
1861	-	1862	87.800	544.070	500.170	500.170	1446.675
1862	-	1863	103.930	648.000	596.035	596.035	2042.710
1863	-	1864	426.960	1074.960	861.480	861.480	2904.190
1864	-	1865	6889.190	7964.150	4519.555	4519.555	7423.745
1865	-	1866	1765.440	9729.590	8846.870	8846.870	16270.615
1866	-	1867	1199.270	10928.860	10329.225	10329.225	26599.840
1867	-	1868	884.800	11813.660	11371.260	11371.260	37971.100
1868	-	1869	577.790	12391.450	12102.555	12102.555	50073.655
1869	-	1870	519.980	12911.430	12651.440	12651.440	62725.095
1870	-	1871	504.270	13415.700	13163.565	13163.565	75888.660
1871	-	1872	509.950	13925.650	13670.675	13670.675	89559.335
1872	-	1873	546.770	14472.420	14199.035	14199.035	103758.370
1873	-	1874	441.880	14914.300	14693.360	14693.360	118451.730
1874	-	1875	465.460	15379.760	15147.030	15147.030	133598.760
1875	-	1876	474.860	15854.620	15617.190	15617.190	149215.950
1876	-	1877	477.030	16331.650	16093.135	16093.135	165309.085
1877	-	1878	476.110	16807.760	16569.705	16569.705	181878.790
1878	-	1879	902.09	17709.85	17258.805	17258.8050	199137.595
1879	-	1880	228.62	17938.47	17824.160	17824.1600	216961.755

1880	-	1881	224.03	18162.5	18050.485	18050.4850	235012.24
1881	-	1882	408.16	18570.66	18366.580	18366.5800	253378.82
1882	-	1883	514.43	19085.09	18827.875	18827.8750	272206.695
1883	-	1884	462.72	19547.81	19316.450	19316.4500	291523.145

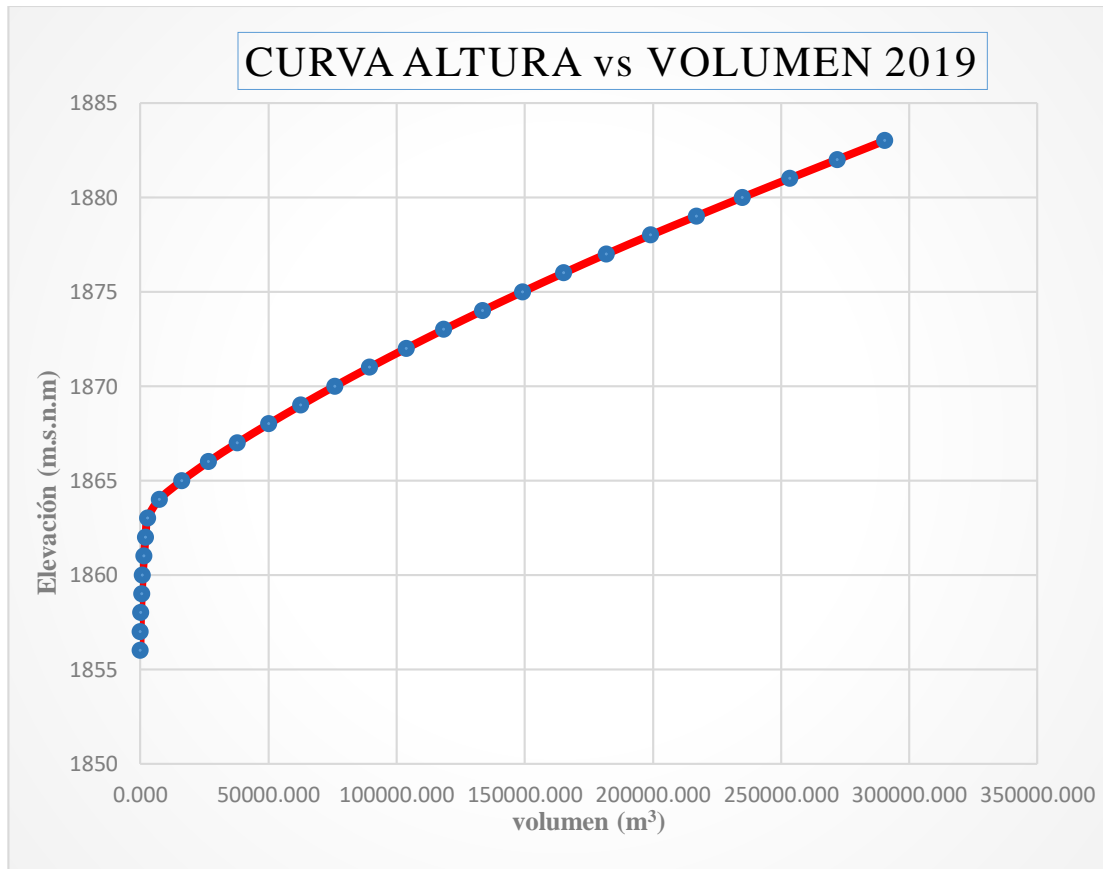


Figura 5.8. Curva Cota – Volumen correspondiente a la topobatimetría 2019.

**Tabla 5.16**

*Volúmenes de agua topobatimetría 2019 a la cota 1884 msnm.*

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
AutoCAD Civil 3D 2018	287644.290
ArcGIS 10.3	287575.353
Surfer 15	287032.145
Curva Cota- Volumen (Excel 2019)	291523.145

### 5.1.9. Discusión de resultados

El análisis de la capacidad de embalse en la zona de estudio, se llevó adelante con la información de 7 levantamientos batimétricos y la información de las curvas topográficas del año 1986 (véase Figura 5.9), los diferentes trabajos topobatimétricos no fueron realizados en una misma cota de pelo de agua, por lo que se procedió a realizar la proyección de las curvas de nivel hasta la cota 1884 msnm a manera de homogeneizar la información en el cálculo de volúmenes.

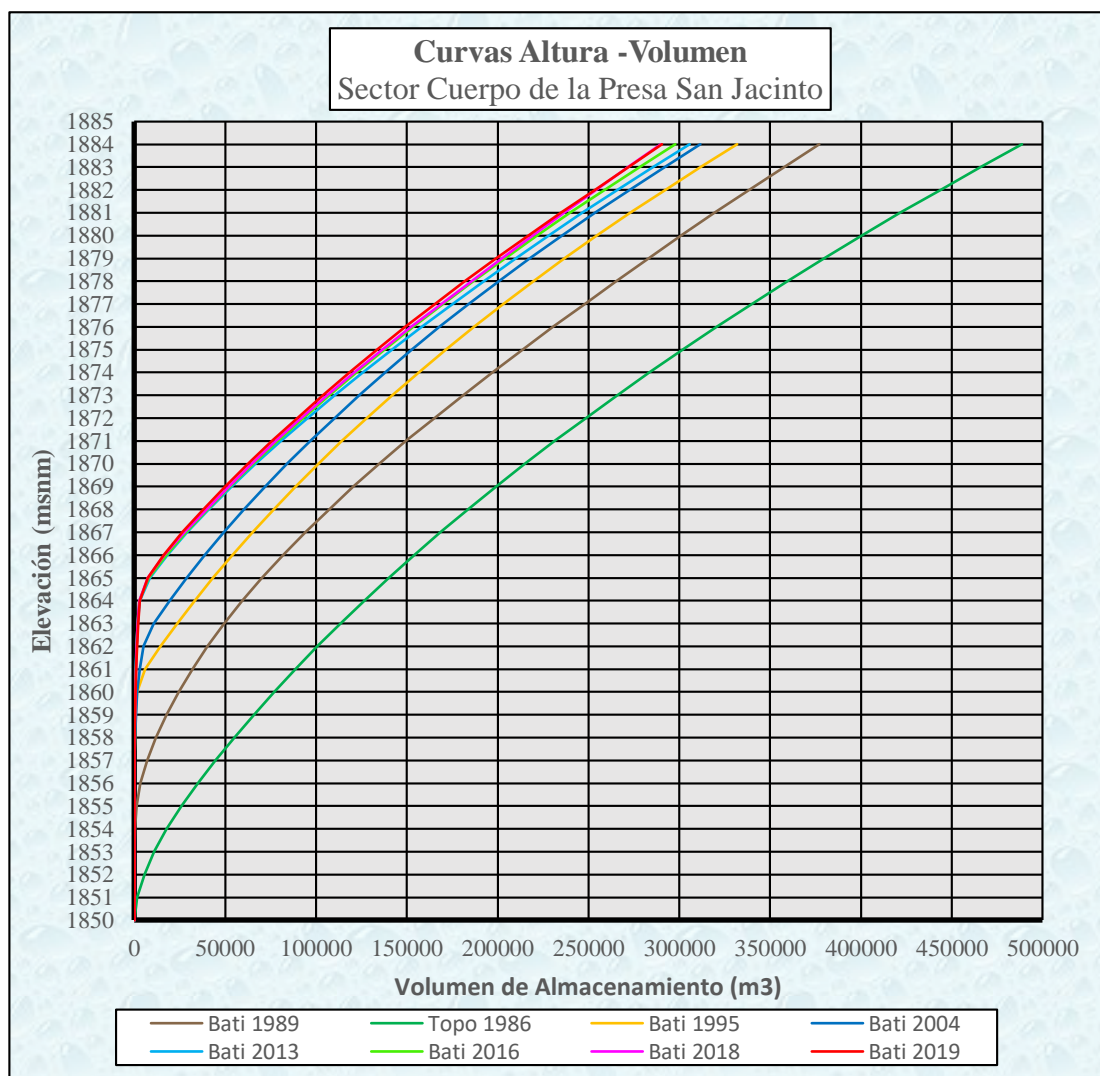


Figura 5.9. Curvas Altura -Volumen sector cuerpo de la presa (1986-2019)



Al momento de realizar el análisis de la capacidad de almacenamiento en el sector de estudio, paramento aguas arriba del embalse de San Jacinto, se observa el típico patrón de pérdida de la capacidad de almacenamiento debido al fenómeno de la colmatación de este tipo de obras hidráulicas (véase Figura 5.10) entre el periodo 1986-2018.

En el periodo 2018-2019 donde se tiene información de batimetrías recientemente recopilada. Aparentemente se observa una discordancia entre los valores que se tiene debido a que la capacidad de almacenamiento año 2019 es levemente superior respecto a la capacidad de almacenamiento del año 2018 lo que produce incertidumbres que contradicen a lo que se afirmó anteriormente que la capacidad de almacenamiento va en sentido descendente a medida que transcurre el tiempo.

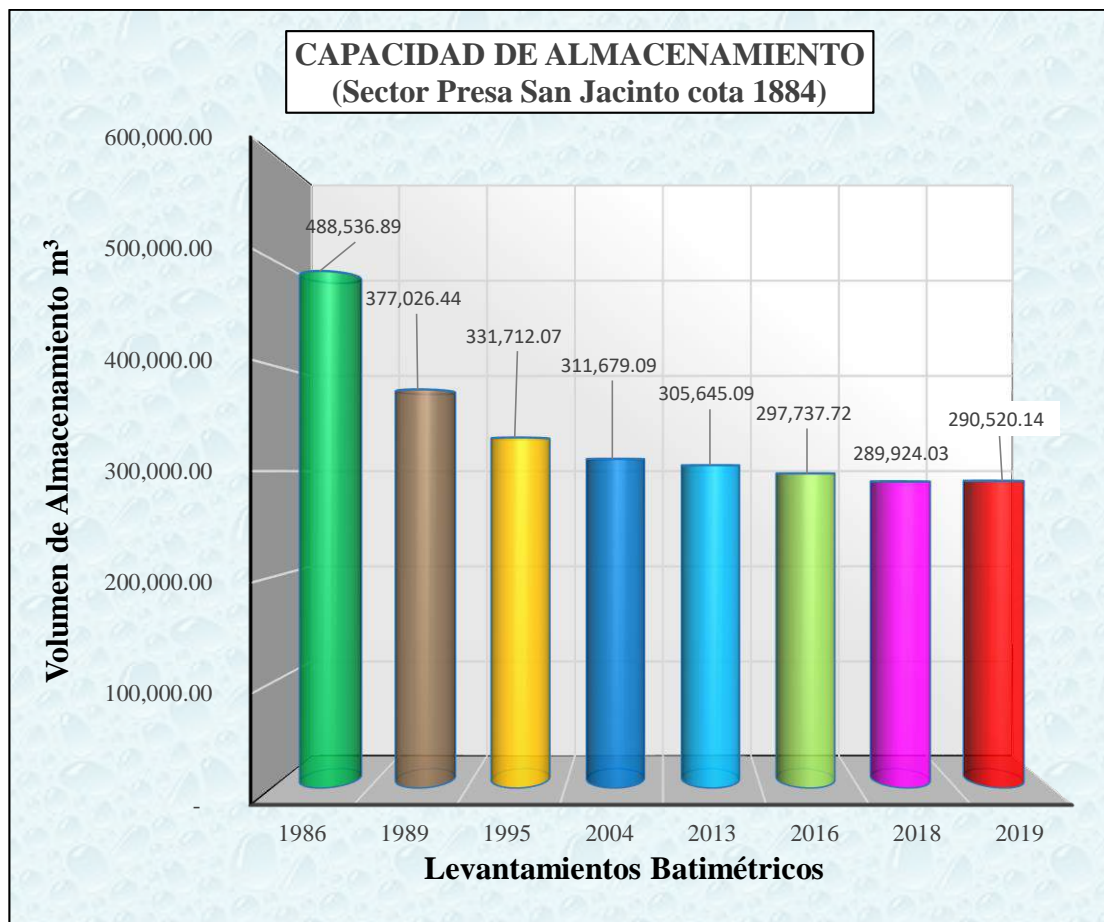


Figura 5.10. Capacidad de almacenamiento periodo 1986-2019.

Los resultados de las batimetrías del año 2018 y 2019, fueron analizados de manera minuciosa debido a que la capacidad de almacenamiento no tiende a reducirse, sino al contrario tiende a aumentar, es decir, que cuando se supone que la capacidad de almacenamiento tiende a reducir a medida que pasa los años, en esta ocasión se produjo un incremento de  $596.11 \text{ m}^3$ , esta información puede ser validada mediante la información con la que se cuenta (véase tabla 3.6) del registro de apertura de compuertas para la limpieza de sedimentos realizada en el periodo intermedio (2018-2019).

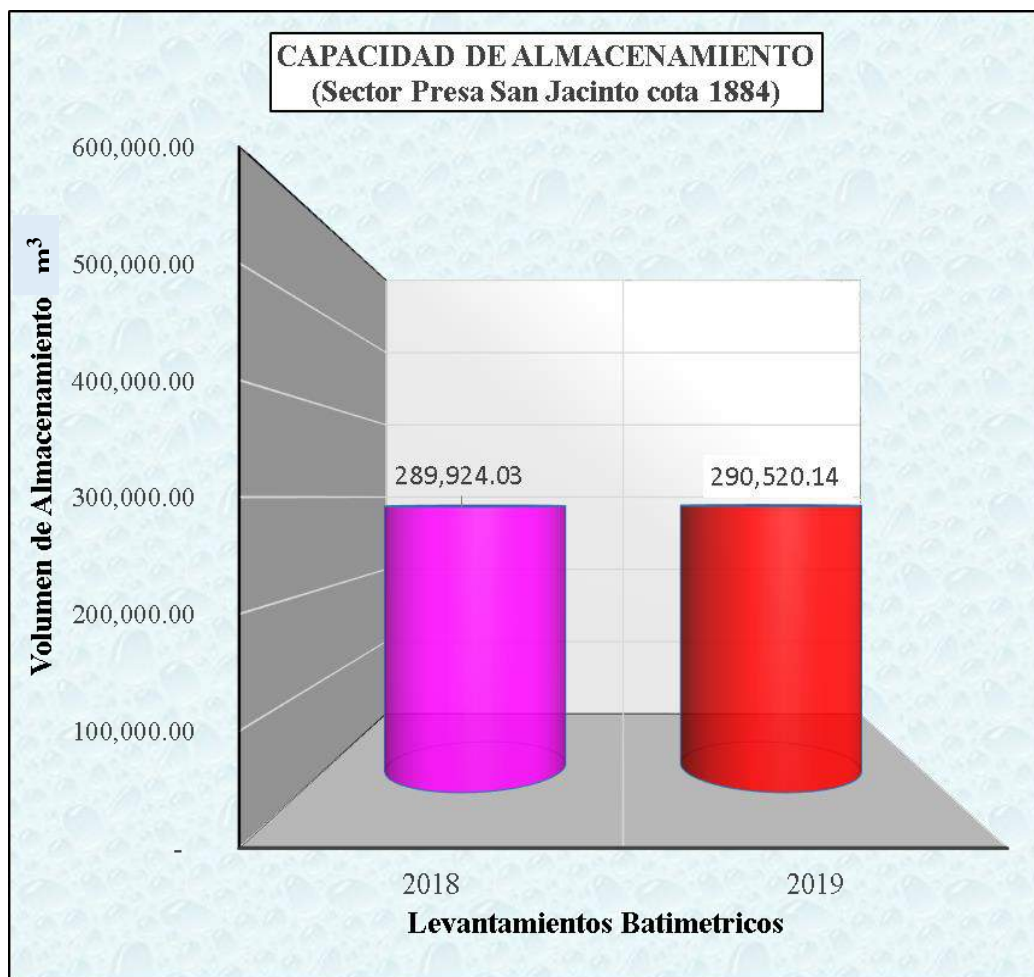


Figura 5.11. Capacidad de almacenamiento periodo 2018-2019.

A continuación (véase Figura 5.12) se expone el estado actual de la deposición de sedimentos en la zona de estudio, donde se evidencia que el proceso sedimentario evolucionó a una escala considerable de colmatación durante el periodo de operación que hasta la actualidad son 33 años que el embalse se ha visto expuesto frente a esta problemática y que en particular en la zona de análisis se registra alrededor de  $86,506.30 \text{ m}^3$  de material sedimentario lo que corresponde a una tasa de sedimentación del 17.71% según información más actualizada del trabajo de levantamiento topobatimétrico realizada en mayo del 2019.

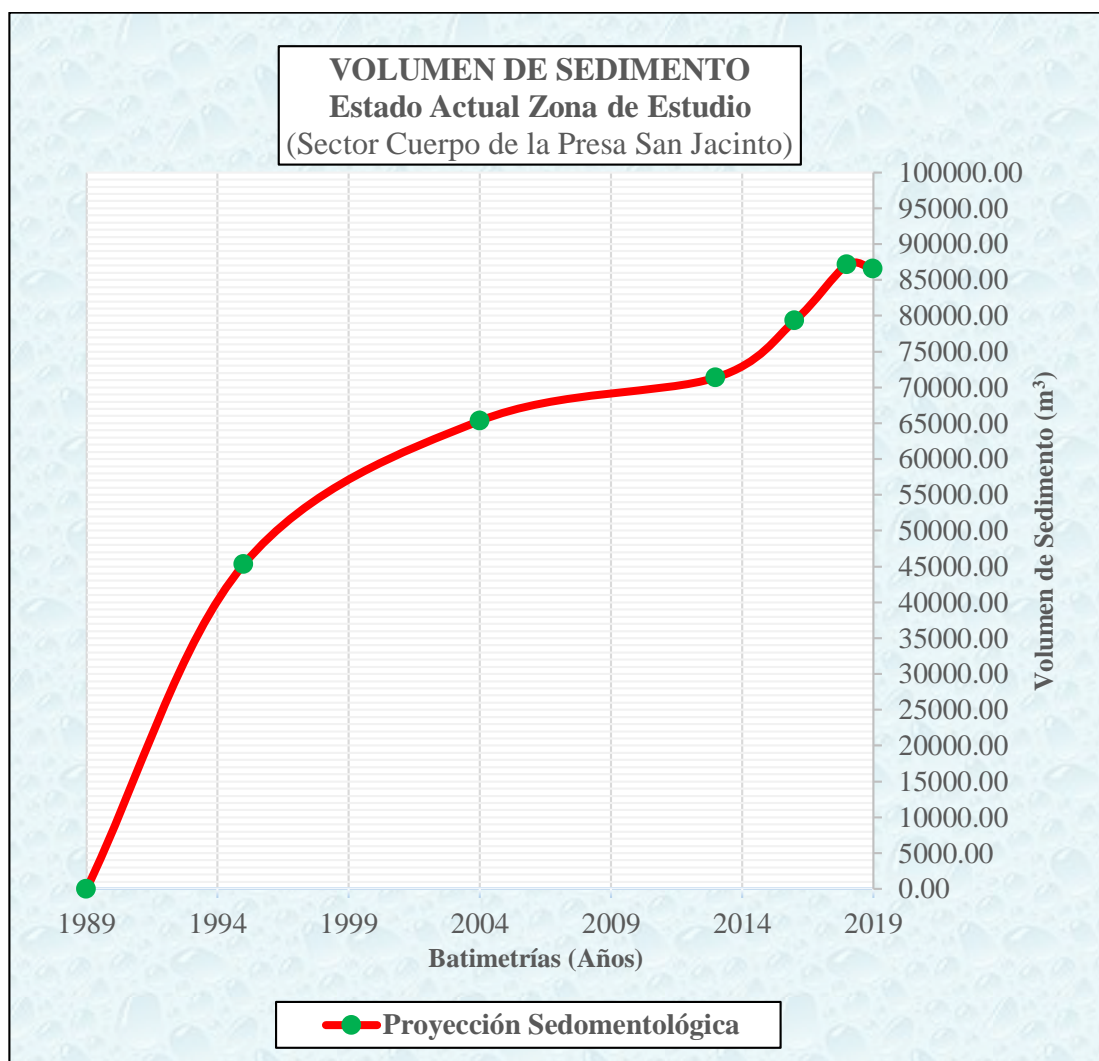


Figura 5.12. Volúmenes de sedimentos según batimetrías realizadas.

Realizando un análisis comparativo de la pérdida de capacidad de almacenamiento entre el área total del embalse y el área del sector específico de estudio, se puede evidenciar que embalse en sí, sigue una línea de sedimentación mucho mayor respecto a la zona estudiada (véase tablas 5.17), tomando en cuenta como valores confiables a la información de las batimetrías de los años 2013, 2016 y 2019 donde se tiene datos de las superficies subacuáticas con mayor detalle de la zona de análisis.

Esta particularidad podría ser debido a que los embalses presentan diferentes particularidades de deposición de sedimentos (véase Figura 2.9) donde se observa que los patrones de deposición varían drásticamente dentro de un embalse.

Por otro lado, haciendo un análisis del esquema general de la deposición característica de sedimentos en un embalse (véase Figura 2.8), el área de análisis se encuentra ubicada en una zona donde el material sedimentario es prácticamente fino proveniente de las corrientes de densidad, que por características propias depende de manera directa de la velocidad de movimiento del agua y el proceso de decantación de las partículas de sedimento, es decir, a menor velocidad, mayor sedimentación. La zona de estudio al estar ubicada en zonas próximas a los descargadores de fondo, existe un movimiento del flujo de agua debido al caudal ecológico o a la operación de compuertas que se realiza en algún determinado tiempo o acontecimiento, lo que daría paso a que, en zonas próximas, la velocidad de movimiento del agua sea mayor respecto a otras zonas dentro del embalse de tal manera que el proceso de sedimentación en el área de estudio tiende a ser menor en comparación con el resto del embalse debido a la expulsión de sedimento vía desfuegos de fondo.

**Tabla 5.17**

*Cuadro comparativo de la pérdida de capacidad de almacenamiento del área de estudio.*

<b>Batimetría</b>	<b>Reducción de Volumen Embalse San Jacinto (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Reducción de Volumen Área de Estudio (m<sup>3</sup>)</b>
2013	23.04%	14.61%
2016	24.47%	16.23%
2019	26.66%	17.71%

## 5.2. Análisis de la variación temporal, espacial y patrones de sedimentación

El siguiente análisis que se desarrolla, se encuentra enmarcado dentro de los límites de la zona de estudio, donde se cuenta con la información de ocho superficies levantadas (7 batimetrías y 1 topografía) que se detalla en Anexo 8 debidamente procesadas y adecuadas con superficies sobrepuestas para posteriores análisis que se desarrollarán a continuación.

### 5.2.1. Análisis periodo 1986-1989

A continuación, en la figura 5.13, se expone la superposición de las superficies de topografía de 1986 (color gris) y topobatimétrica de 1989 (color rojizo), donde se evidencia el importante proceso de sedimentación en las zonas más bajas y erosión en los taludes.

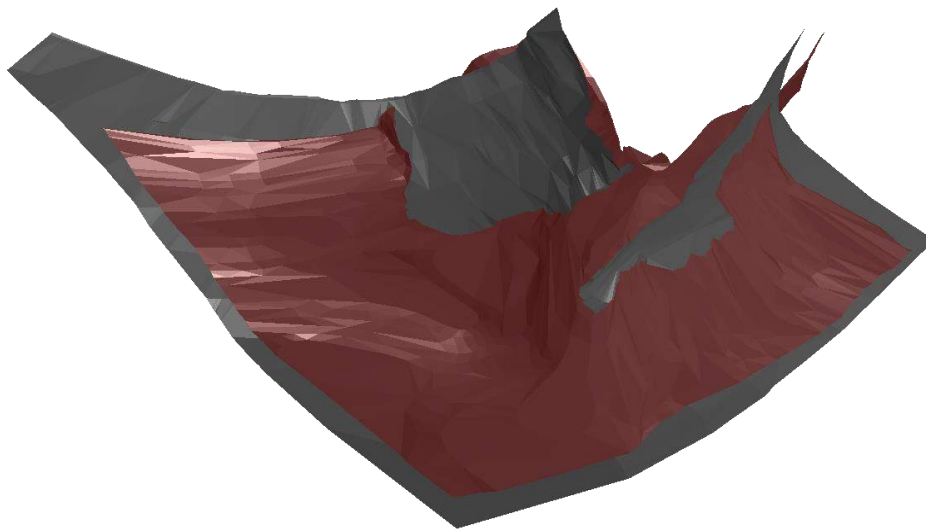


Figura 5.13. Superposición de superficies 1986-1989

**Tabla 5.18**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 1986-1989.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	9017.17
Sedimentación	84950.42

Los valores que se obtiene como resultado de la superposición de las superficies y el cálculo de volúmenes dentro de la herramienta de trabajo civil 3D, son valores poco confiables debido a que la información es de muy baja precisión, ya que, no se le dio énfasis o la importancia necesaria a la hora de la recolección de datos, es decir que las curvas de nivel que de la zona de estudio no están a detalle. No se puede dar como válido o valores confiables al proceso de sedimentación de  $84950.42 \text{ m}^3$  y menos aún al proceso de erosión  $9017.17 \text{ m}^3$  ya que el periodo de operación es alrededor de un año, teniendo en cuenta que la presa fue llenada en agosto de 1988.

Realizando un análisis a mayor profundidad de la información (véase Figura 5.14), mediante la aplicación de la herramienta computacional Arcgis (calculadora raster), se expone un mapa indicativo raster de la diferencia altitudinal de ambas superficies que indica cómo se encuentra distribuido el material sedimentario, denotando zonas de erosión con colores azulados, zonas de colmatación con colores rojizos y las zonas de nivel cero representadas con el color amarillo.

Como se puede evidenciar la figura anteriormente mencionada, los resultados que ofrece también genera incertidumbre al momento de poder dar un veredicto de que la información recopilada en el área estudiada haya sido tomada con precisión ya que es poco coherente, debido a que presenta alturas sedimentación en algunas zonas hasta de 12.35 m, y alturas de erosión hasta de 10.83 m.

La tasa de colmatación anual para el periodo se realiza mediante la división de la diferencia de volúmenes determinados en trabajos de relevamiento comprendidos entre un intervalo de tiempo, es decir:

$$Tasa \ de \ Colmatación \ Anual = \frac{\text{Volumen de 1986} - \text{Volumen 1989}}{\text{Periodo de tiempo (1989 - 1986)}}$$

$$TCA \ (Periodo \ 1986 - 1989) = \frac{488536.89 \text{ m}^3 - 377026.44 \text{ m}^3}{1 \text{ año}}$$

$$TCA \ (Periodo \ 1986 - 1989) = 111510.46 \text{ m}^3/\text{año}$$

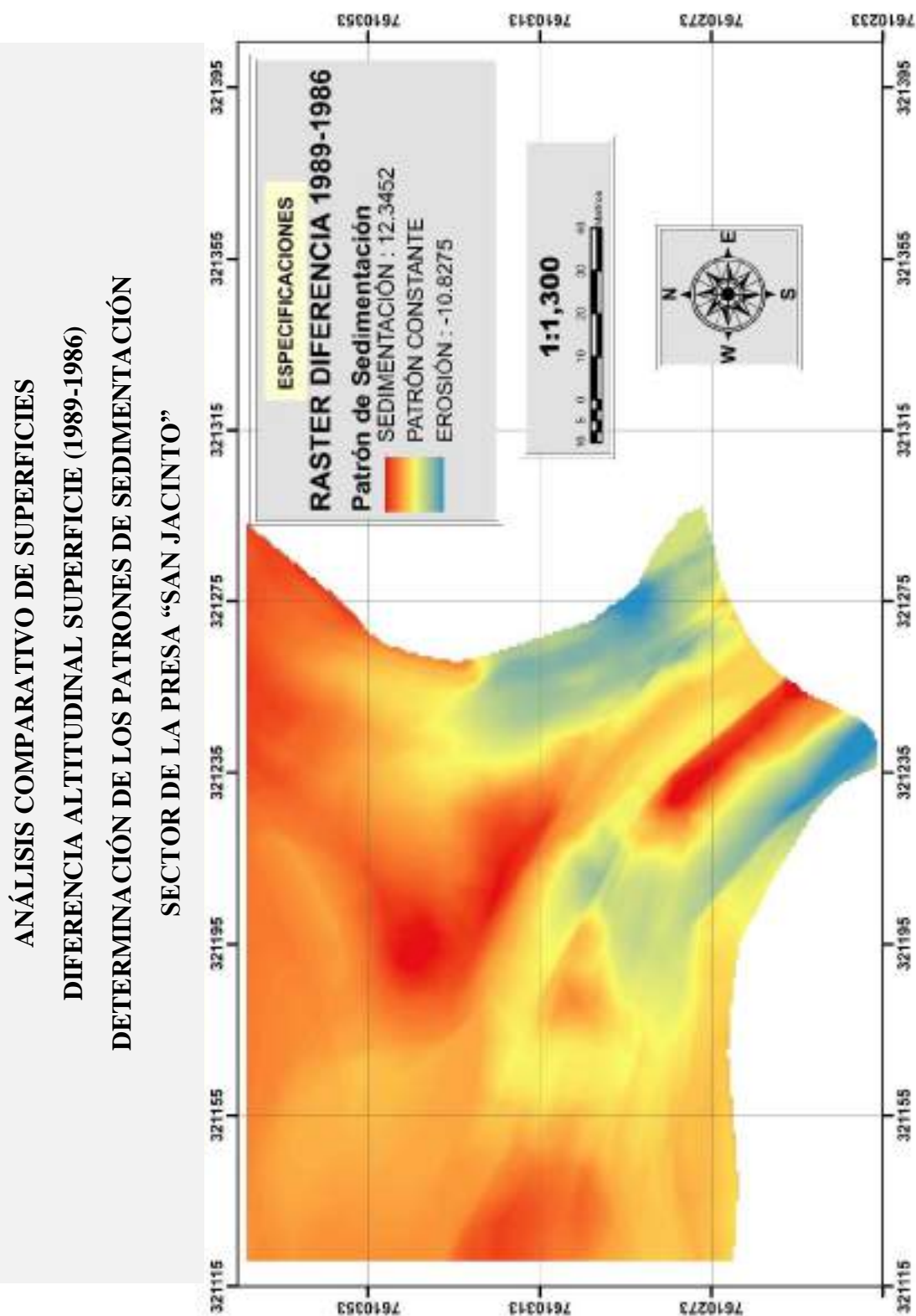


Figura 5.14. Mapa de distribución de sedimentos periodo 1989-1986.



### 5.2.2. Análisis periodo 1989-1995

Mediante la superposición de batimetrías del año 1995 (color rojizo) y 1989 (color gris) como indica la Figura 5.15, de la zona de estudio, donde se evidencia el proceso sedimentario de  $59917.63 \text{ m}^3$  en zonas más bajas y erosión  $7857.22 \text{ m}^3$  en los taludes próximos al cuerpo de la presa, por otro lado, haciendo un análisis de la variación de la morfología subacuática, la muestra la figura 5.16 expone la distribución de sedimentos dentro de los entornos del área de estudio, donde se observa alturas de sedimentación hasta de 11.51 metros y erosión en los taludes de 14.53 metros.

Partiendo de la información de capacidad de almacenamiento, tasa de colmatación anual durante este periodo es a razón de  $7552.40 \text{ m}^3/\text{año}$ .

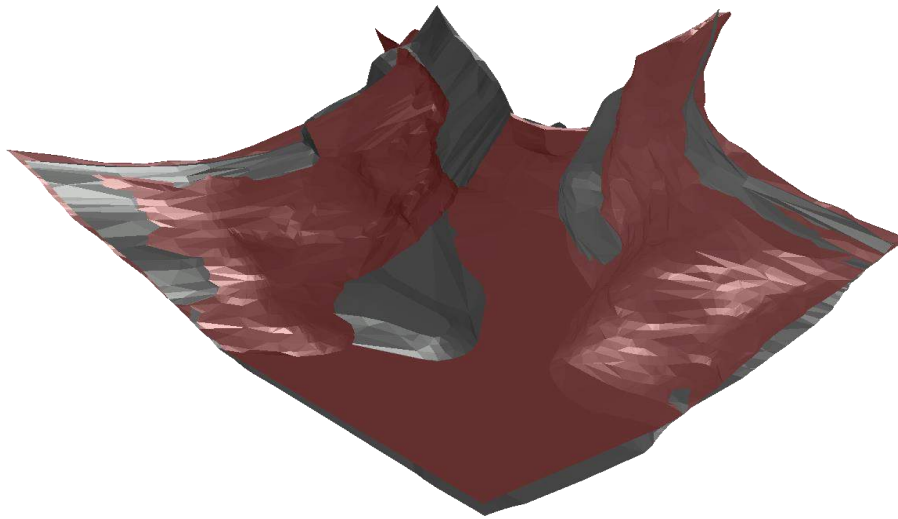


Figura 5.15. Superposición de superficies 1995-1989.

**Tabla 5.19**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 1989-1995.*

Proceso	Volumen ( $\text{m}^3$ )
Erosión	7857.22
Sedimentación	59917.63



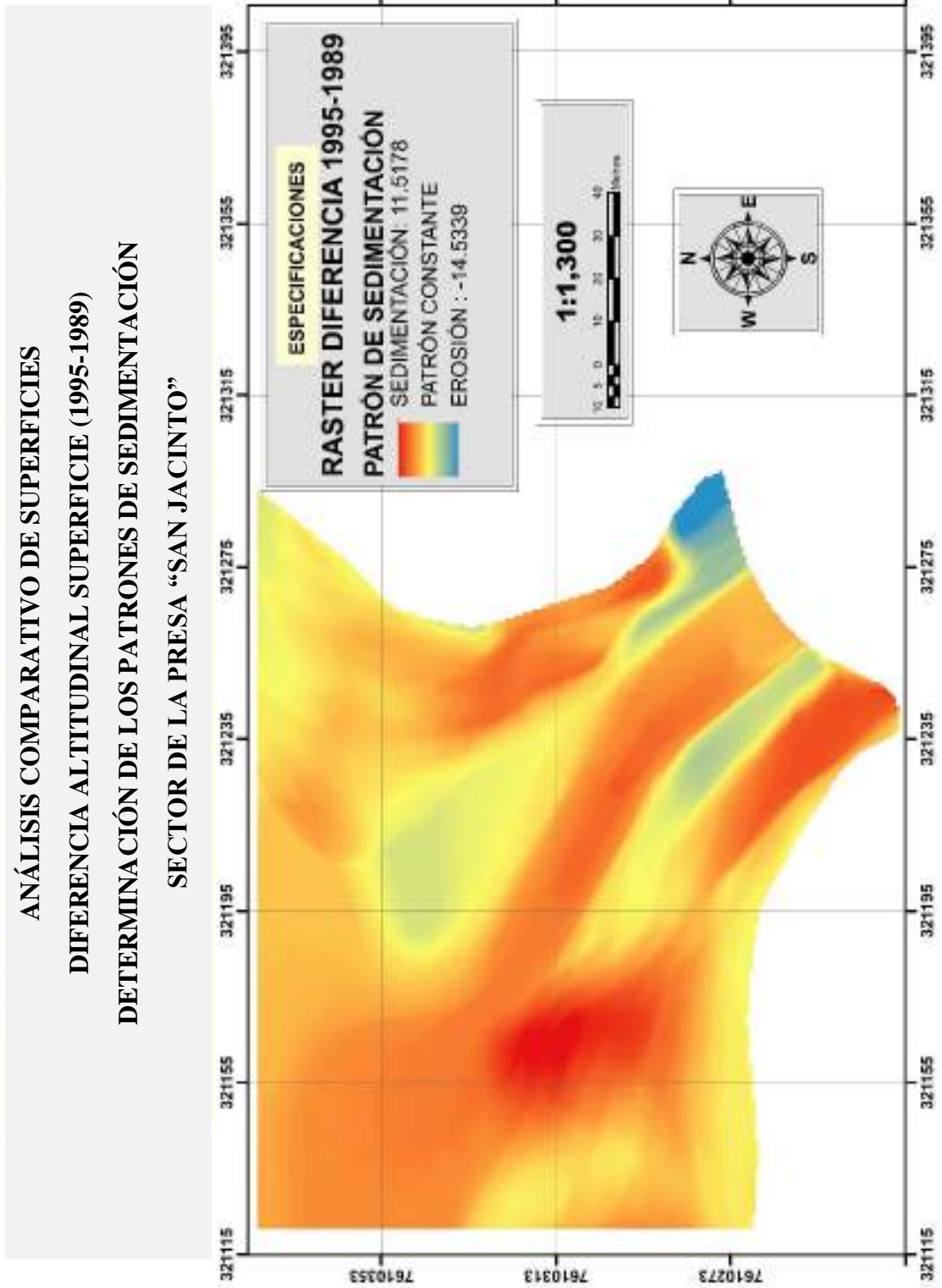


Figura 5.16. Mapa de distribución de sedimentos periodo 1995-1989.

### 5.2.3. Análisis periodo 1995-2004

Del análisis de las batimetrías del año 1995 (color gris) y 2004 (color rojizo) en la Figura 5.17, se evidencia el proceso de sedimentación en zonas bajas que comprende el canal de aproximación hacia los desfogues de fondo, pero no ocurre lo mismo en zonas próxima a la ataguía, donde se evidencia que la superficie subacuática del año 2004 se encuentra en un nivel inferior a la del año 1995, lo que se interpreta que hubo movimiento de material sedimentario en las zonas aledañas donde se encuentra emplazada el ataguía, éste fenómeno se puede corroborar mediante la tabla 3.6 del registro de apertura de compuertas del embalse San Jacinto, donde indica que este periodo se tuvo mayor cantidad de aperturas de compuertas (100 aperturas) donde se incluye la crecida más extraordinaria que llevó consigo la mayor altura de laminación sobre el umbral del vertedero de excedencias (cota 1885.2 m.s.n.m.) y por ende, la mayor apertura de compuertas a nivel 6 que se tienen como registro en las oficinas del proyecto múltiple San Jacinto.

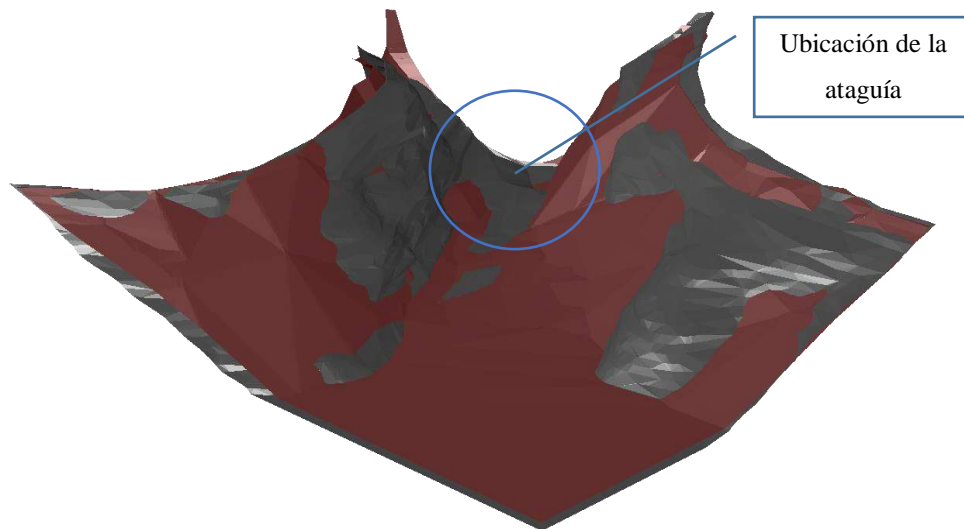


Figura 5.17. Superposición de superficies 1995-2004.

A consecuencia de la superposición de ambas superficies, en la Tabla 5.20 se expone los valores de ambos fenómenos que ocurre en la zona de estudio:

**Tabla 5.20**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 1995-2004.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	11038.28
Sedimentación	25398.17

Del análisis de la distribución de sedimentos, expuesto en la figura 5.18, a través del esquema de colores que indica sedimentación con colores rojos y erosión con color azul, cuyos resultados genera incertidumbre al momento de poder dar un veredicto de que la información recopilada en el área estudiada haya sido tomada con precisión ya que es poco coherente, debido a que presenta alturas sedimentación en algunas zonas hasta de 18.08 m, y alturas de erosión hasta de 13.95 m.

La tasa de colmatación anual para el periodo 1995-2004 será:

$$Tasa\ de\ Colmatación\ Anual = \frac{Volumen\ de\ 2004 - Volumen\ 1995}{Periodo\ de\ tiempo\ (2004 - 1995)}$$

$$TCA\ (Periodo\ 1995 - 2004) = \frac{331712.07\ m^3 - 311679.09m^3}{9\ año}$$

$$TCA\ (Periodo\ 1995 - 2004) = 2225.89\ m^3/año$$

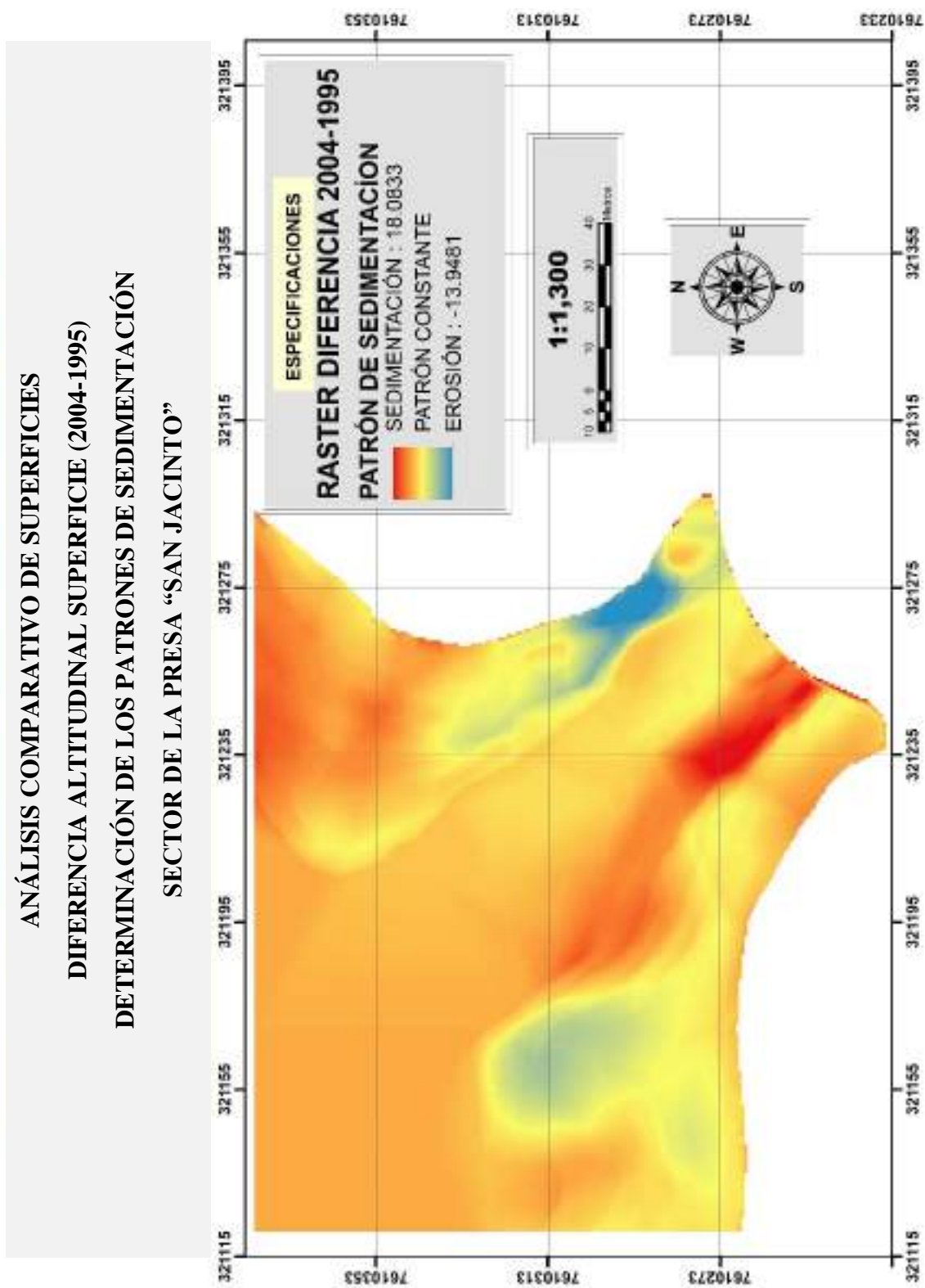


Figura 5.18. Mapa de distribución de sedimentos periodo 2004-1995.

#### 5.2.4. Análisis periodo 2004-2013

Mediante la superposición de batimetrías del año 2013 (color rojizo) y 2004 (color gris) como indica la Figura 5.19, de la zona de estudio, donde se evidencia el proceso sedimentario de 31018.12 m<sup>3</sup> en zonas más bajas y margen izquierdo, erosión 18329.10 m<sup>3</sup> en el talud derecho próximo al cuerpo de la presa, por otro lado, haciendo un análisis de la variación de la morfología subacuática, la muestra la figura 5.20 expone la distribución de sedimentos dentro de los entornos del área de estudio, donde se observa alturas de sedimentación hasta de 16.3 metros y erosión en los taludes de 17.36 metros.

Partiendo de la información de capacidad de almacenamiento, tasa de colmatación anual durante éste periodo es a razón de 670.44 m<sup>3</sup>/año.

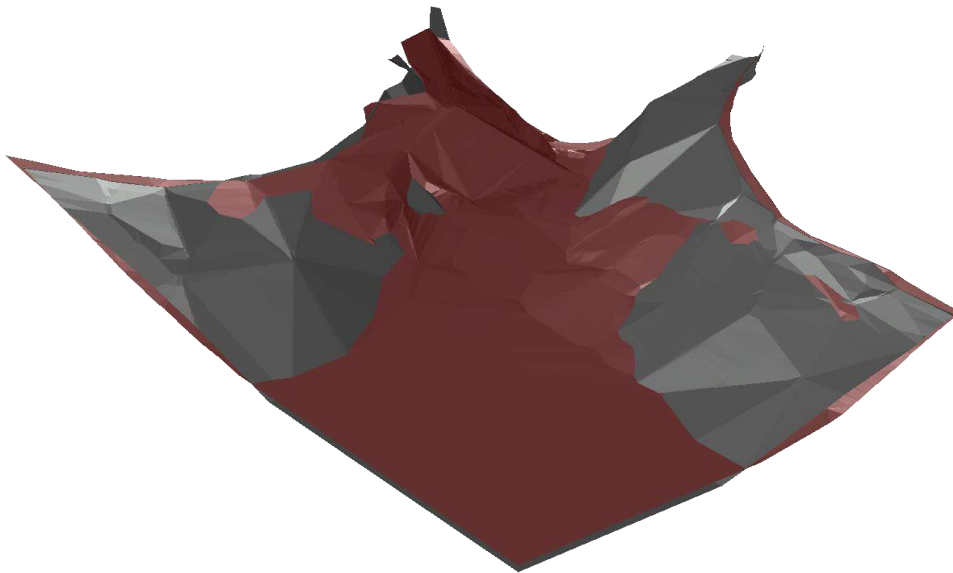


Figura 5.19. Superposición de superficies 2004-2013.

**Tabla 5.21**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 2004-2013.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	18329.10
Sedimentación	31018.12

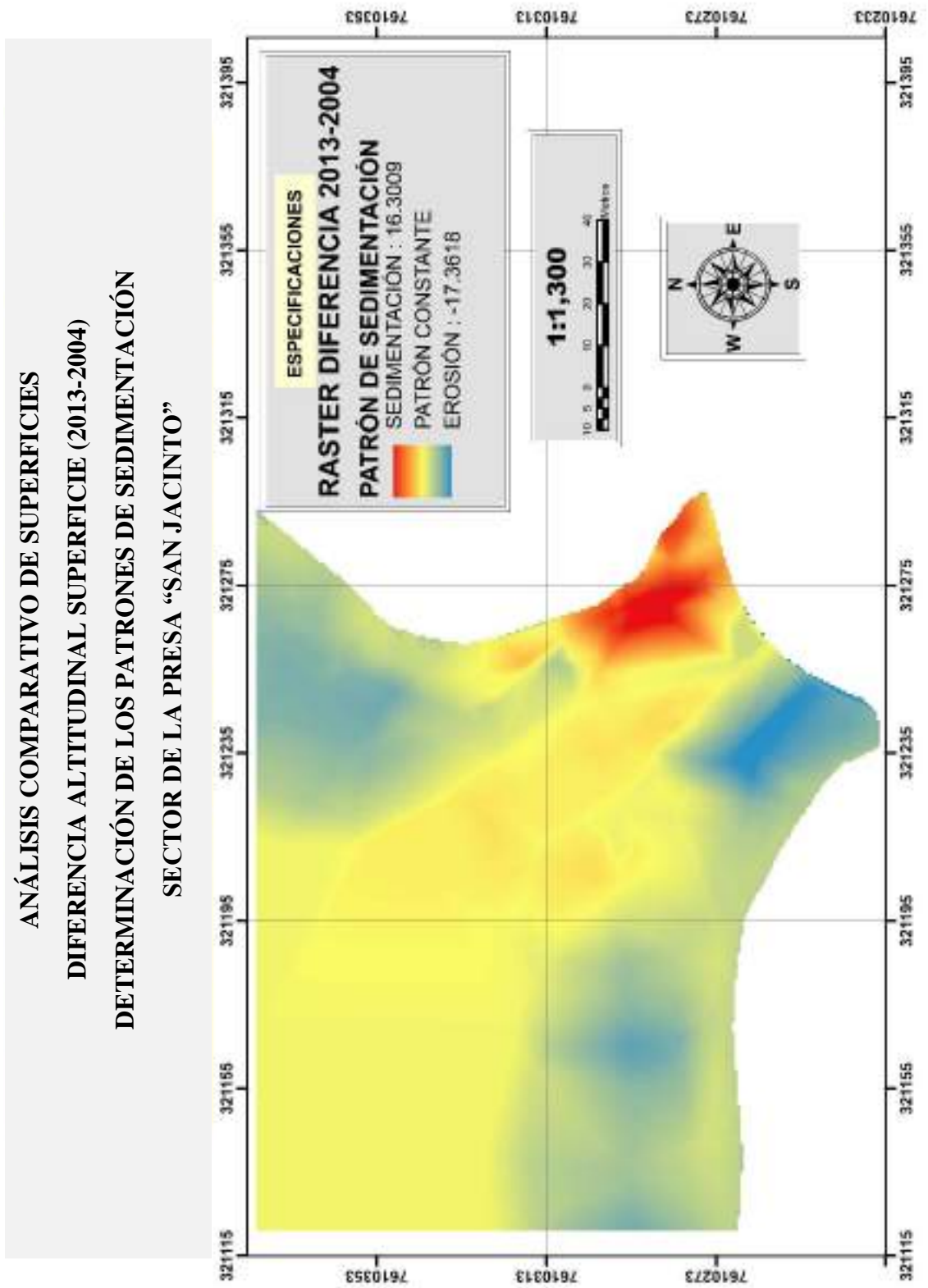


Figura 5.20. Mapa de distribución de sedimentos periodo 2013-2004.

### 5.2.5. Análisis periodo 2013-2016

Como muestra la Figura 5.21, la batimetrías del año 2016 (color rojizo) y 2013 (color gris), el proceso sedimentario en el área de estudio es de  $4942.25 \text{ m}^3$  en zonas más bajas como así también en el talud del margen derecho y en proximidades de las compuertas de fondo, por otro lado, presenta erosión de  $7306.34 \text{ m}^3$  en zonas cercanas al talud izquierdo de la presa, como se indicó anteriormente, los análisis que se desarrollaron en éste periodo son de mayor confiabilidad porque se cuenta con información más detallada en la zona estudiada, es decir, con curvas de nivel proveniente de la toma de puntos topobatimétricos a detalle.

Haciendo un análisis de la variación de la morfología subacuática, como se muestra en la figura 5.22 donde se detalla la distribución de sedimentos dentro del área de estudio, se observa alturas de sedimentación máximas de 6.01 metros y erosión en los taludes de 9.42 metros, por lo que es necesario hacer una nueva verificación del comportamiento de los taludes cercanos a la presa.

Si se hace un análisis de la zona más baja en el canal de aproximación a las compuertas de fondo, específicamente en donde se encuentra emplazada la ataguía, se puede apreciar que el proceso sedimentológico es de menor magnitud en zonas aguas arriba, pero en la zona aguas abajo de la estructura anteriormente mencionada se puede apreciar que sedimentó en mayor proporción, esto puede ser a causa de que en éste periodo no se haya tenido importantes aperturas de compuertas para la limpieza de sedimentos.

Si se observa el talud del margen derecho, sufre una colmatación constante aguas arriba, debido a las sobrepoblaciones de edificaciones que se encuentran emplazadas en zonas cercanas, hasta incluso en algunos casos dentro de los márgenes del embalse.

La tasa de colmatación anual para el periodo 2016-2013 será:

$$Tasa\ de\ Colmatación\ Anual = \frac{Volumen\ de\ 2016 - Volumen\ 2013}{Periodo\ de\ tiempo\ (2016 - 2013)}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = \frac{305645.09\ m^3 - 297737.72m^3}{3\ año}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = 2635.84\ m^3/año$$

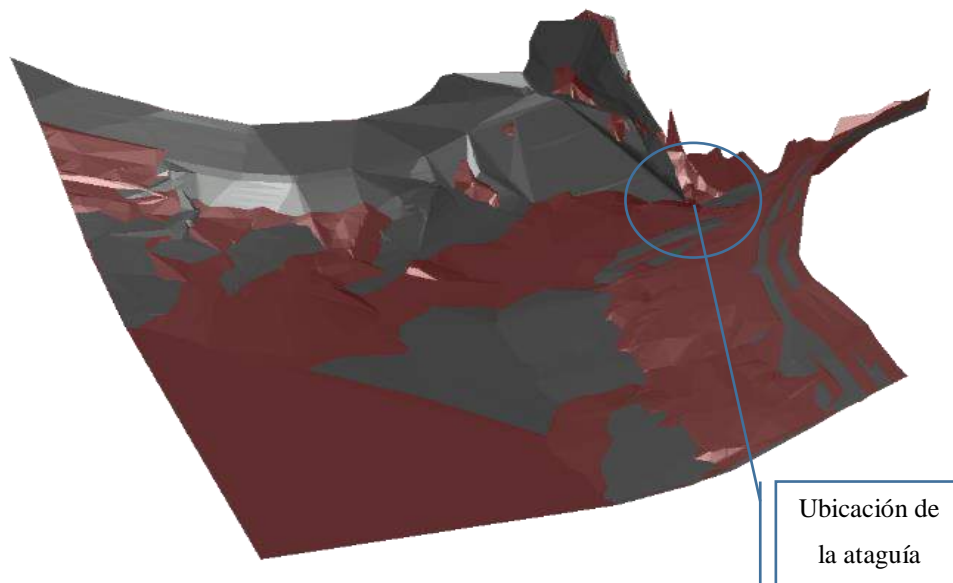


Figura 5.21. Superposición de superficies 2013-2016.

**Tabla 5.22**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 2013-2016.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	7306.34
Sedimentación	4942.25



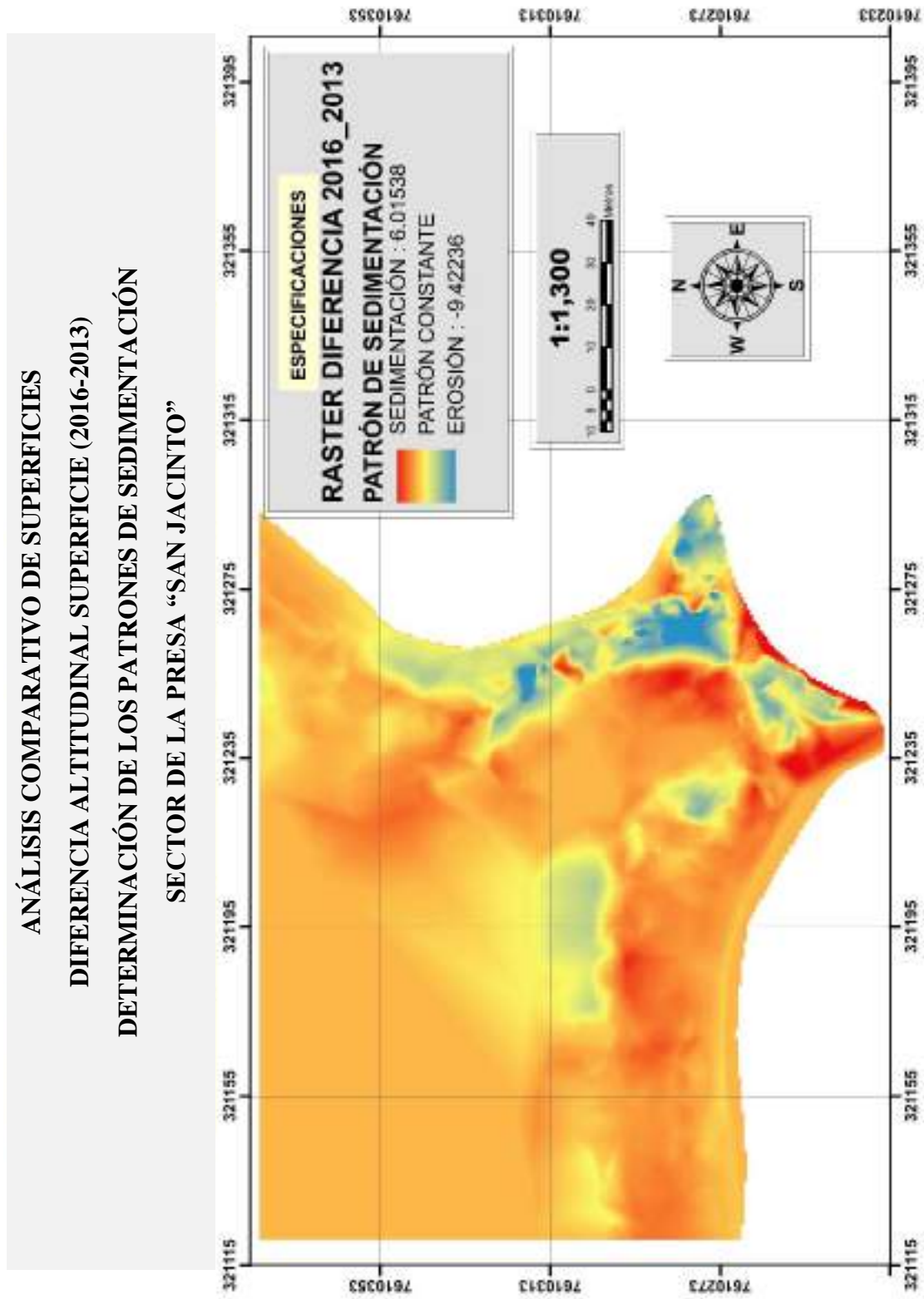


Figura 5.22. Mapa de distribución de sedimentos periodo 2016-2013.

### 5.2.6. Análisis periodo 2016-2018

En el análisis que se realiza en la Figura 5.23, la superposición de las batimetrías 2016 (gris) y 2018 (rojizo), se observa que en las zonas más bajas de la zona de estudio tiende a colmatarse de manera continua a lo largo del tiempo, que a diferencia de los taludes y zonas próximas al cuerpo de la presa no ocurre tal fenómeno, ya que, el comportamiento de la deposición de sedimentos varía paulatinamente por ser una zona de constante movimiento del flujo debido a las compuertas de fondo.

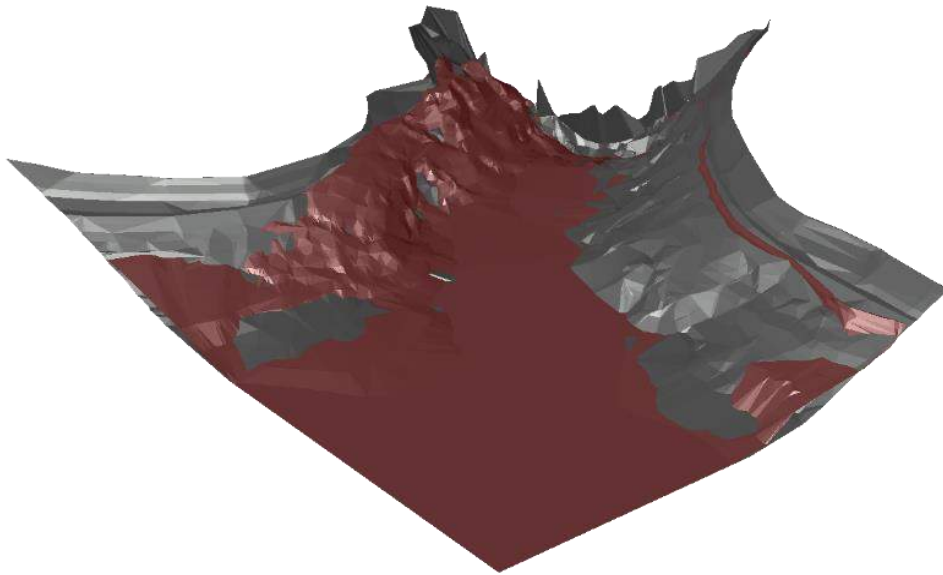
En la Figura 5.24, se observa que los únicos cambios de consideración en la superficie subacuática son en los taludes y en cercanías al cuerpo de la presa, en zonas bajas, la sedimentación y erosión principalmente en zonas próximas donde se encuentran emplazada la ataguía ronda con valores próximos a cero según indicativo en la escala de colores.

La tasa de colmatación anual para el periodo 2018-2016 será:

$$Tasa\ de\ Colmatación\ Anual = \frac{Volumen\ de\ 2018 - Volumen\ 2016}{Periodo\ de\ tiempo\ (2018 - 2016)}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = \frac{297737.72\ m^3 - 289924.03m^3}{2\ año}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = 3906.84\ m^3/año$$



*Figura 5.23.* Superposición de superficies 2016-2018.

**Tabla 5.23**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 2016-2018.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	5095.607
Sedimentación	7778.408

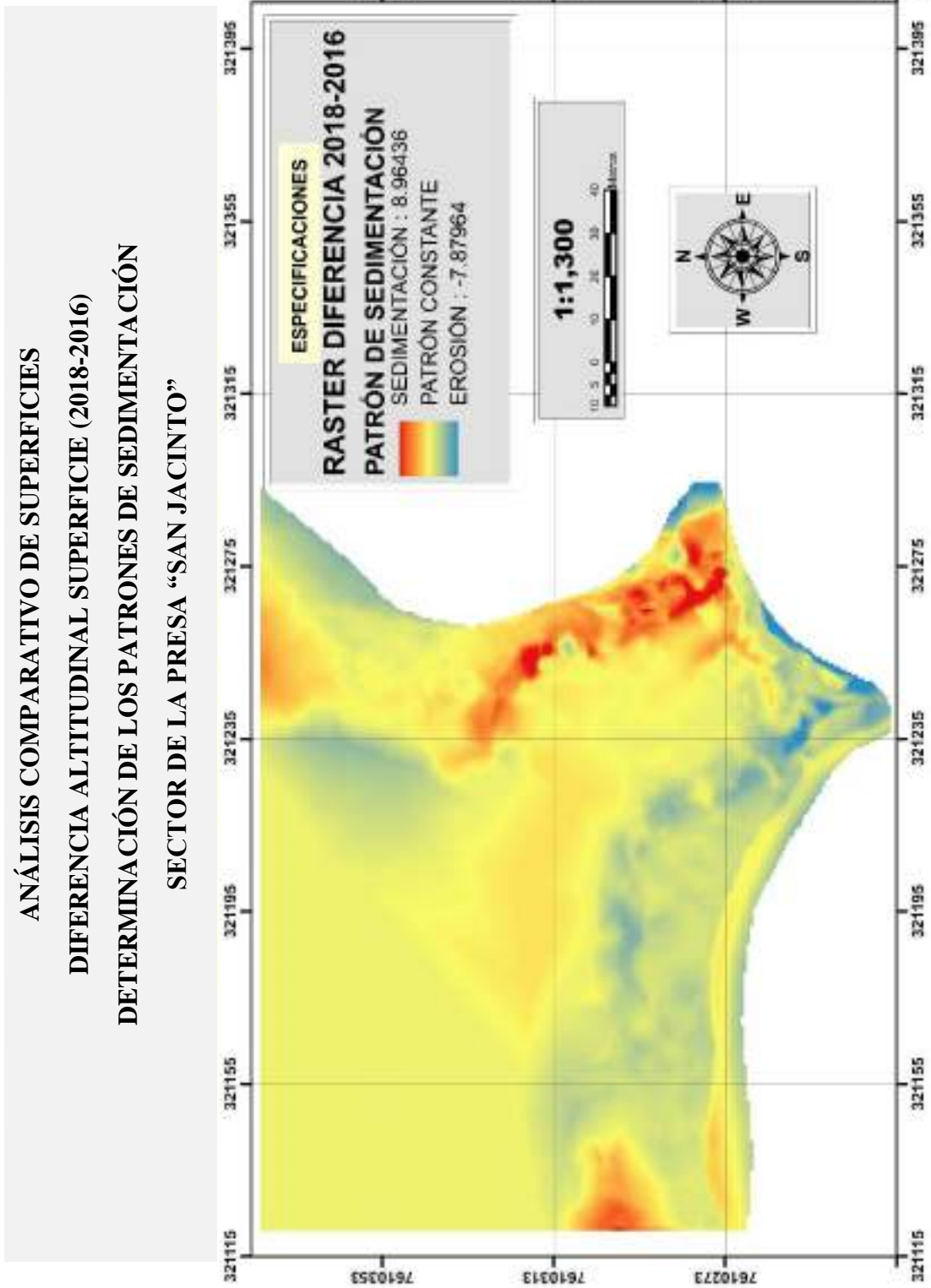


Figura 5.24. Mapa de distribución de sedimentos periodo 2018-2016.

### 5.2.7. Análisis periodo 2018-2019

La Figura 5.25 de la superposición de superficies batimétricas del año 2018(color rojizo) y 2019 (color gris), el fenómeno de sedimentación en el área de estudio se manifiesta principalmente en zonas de los taludes debido a que flujo de agua que se aproxima a los desfuegos de fondo en esas zonas es prácticamente nulo facilitando la deposición de sedimentos que se encuentran en suspensión, por otro lado, el fenómeno de la erosión se presenta en las partes más bajas del área de estudio y más evidente aún en zonas radiales a las compuertas de fondo.

Los análisis que se desarrollan en éste periodo es de mayor confiabilidad porque se cuenta con información más detallada en la zona estudiada, ya que son trabajos recientemente realizados con equipos de alta precisión (Z-Boat) con líneas de planeamiento cada metro de separación.

Haciendo un análisis de la variación de la morfología subacuática, la muestra la figura 5.26 expone la distribución de sedimentos dentro de los entornos del área de estudio, principalmente en zonas donde se encuentra emplazado la ataguía, se puede apreciar mediante el esquema de colores alturas de sedimentación y erosión muy moderas y cercanas a cero aguas arriba de la ataguía, pero aguas abajo se presenta alturas de erosión de consideración debido a la salida de sedimentos vía compuertas de fondo a través de diferentes aperturas que se realizó durante éste periodo.

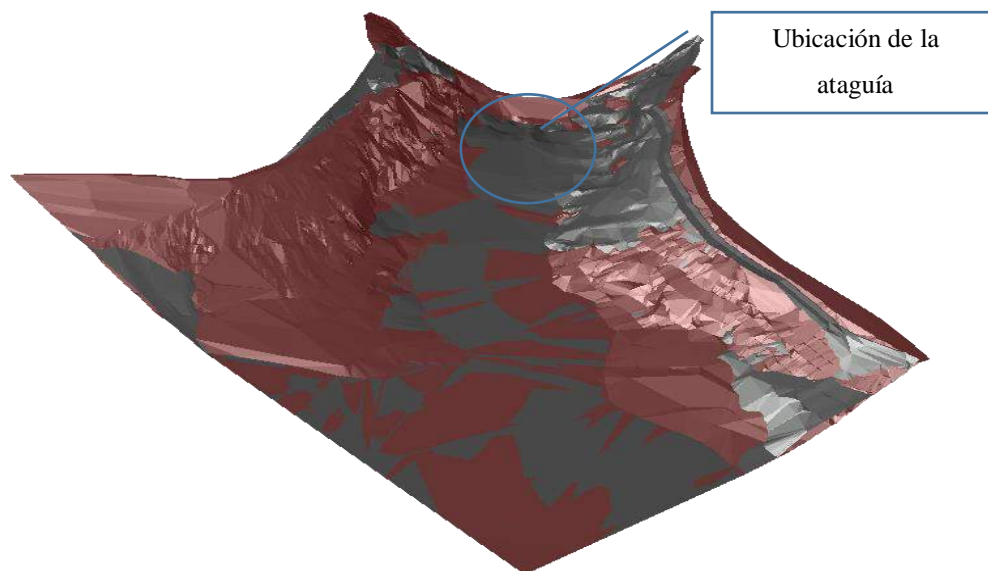
La tasa de colmatación anual para el periodo 2019-2018 será:

$$Tasa\ de\ Colmatación\ Anual = \frac{Volumen\ de\ 2019 - Volumen\ 2018}{Periodo\ de\ tiempo\ (2019 - 2018)}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = \frac{289924.03\ m^3 - 290520.14m^3}{1año}$$

$$TCA\ (Periodo\ 2016 - 2013) = -596.11\ m^3/año$$

Del análisis de la tasa sedimentaria del periodo 2018-2019, el valor calculado aparentemente pareciera no ser coherente, a pesar de que como se mencionó anteriormente los trabajos de batimetrías de éste periodo fueron realizados con mayor detalle y con equipo de mejor precisión, por consiguiente se deduce que en el año 2019 existe menor cantidad de sedimento respectos al 2018, por tratarse de una zona de constante movimiento del flujo de agua que se dirigen hacia las compuertas de fondo, esto se puede corroborar mediante la Tabla 3.6 del registro de aperturas de compuertas de la presa de San Jacinto, donde se evidencia que hubo numerosas aperturas con fines de evacuación de material sedimentario.



*Figura 5.25.* Superposición de superficies 2018-2019.

**Tabla 5.24**

*Volumen de erosión-Sedimentación periodo 2018-2019.*

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )
Erosión	4003.07
Sedimentación	8062.55

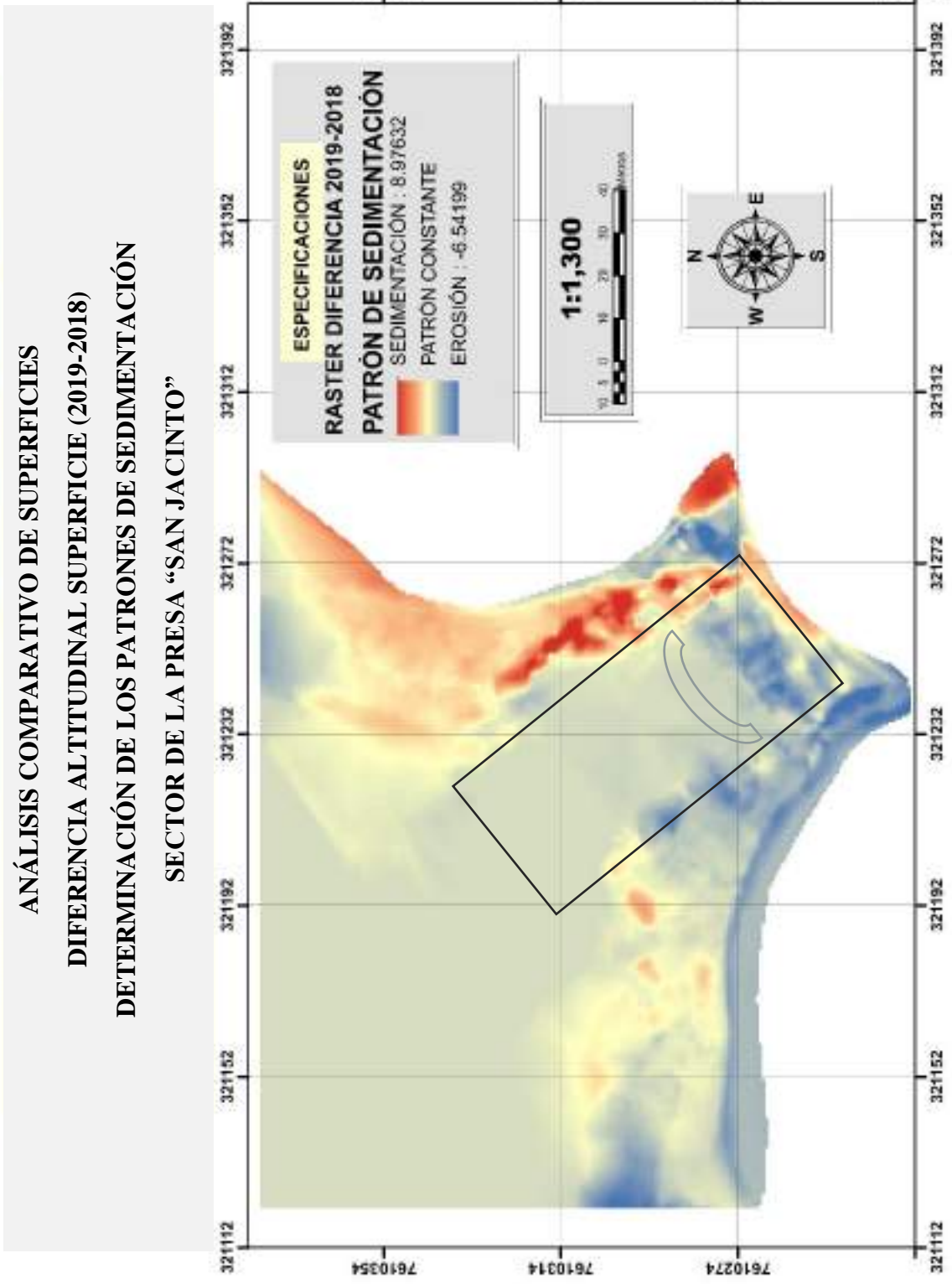


Figura 5.26. Mapa de distribución de sedimentos periodo 2019-2018.

### **5.3. Análisis de niveles de sedimento**

A continuación, se analiza la evolución de los niveles de sedimento en la zona de estudio mediante comparación de secciones longitudinales y transversales de las superficies sub acuáticas pertenecientes a las batimetrías del año 2016, 2018 y 2019.

#### **5.3.1. Superficies 2016-2018**

Con el propósito de analizar la evolución de niveles de sedimento en zonas próximas a la ataguía y de los desfogues de fondo, mediante el trazo de un perfil longitudinal perpendicular al cuerpo de la presa de San Jacinto, se observa que la estructura utilizada como obstáculo para el desvío del río( ataguía), juega un rol importante en la morfología sub acuática del canal de aproximación hacia los desfogues de fondo, denotando que paramento aguas arriba del embalse la pendiente del fondo es mínima, donde el fenómeno de la sedimentación sigue una tendencia laminar.

En el caso del análisis del paramento aguas abajo de la ataguía, se presenta una pendiente más fuerte, por lo que se evidencia, que es una zona de constante movimiento de sedimento debido al cono de influencia que genera las compuertas de fondo mediante las diferentes aperturas que se realizaron, que por lo consiguiente en esta zona no se presenta la tendencia de sedimentación debido a que el material está expuesto a removerse, por otro lado se puede apreciar que el movimiento de sedimento más importante o el cambio más evidente de la morfología sub acuática se realiza solo hasta la distancia donde se encuentra emplazado el cuerpo de la ataguía como indica la Figura 5.27.

El cambio brusco de pendiente justo en la progresiva donde se encuentra la ataguía (0+0.20), claramente es debido a la influencia que genera esta estructura en la obstrucción de las líneas de flujo al momento de apertura de compuertas, no permitiendo la remoción sedimentaria de zonas más distantes al cuerpo de la presa por los 20 metros que separa a las compuertas de fondo y al ataguía.



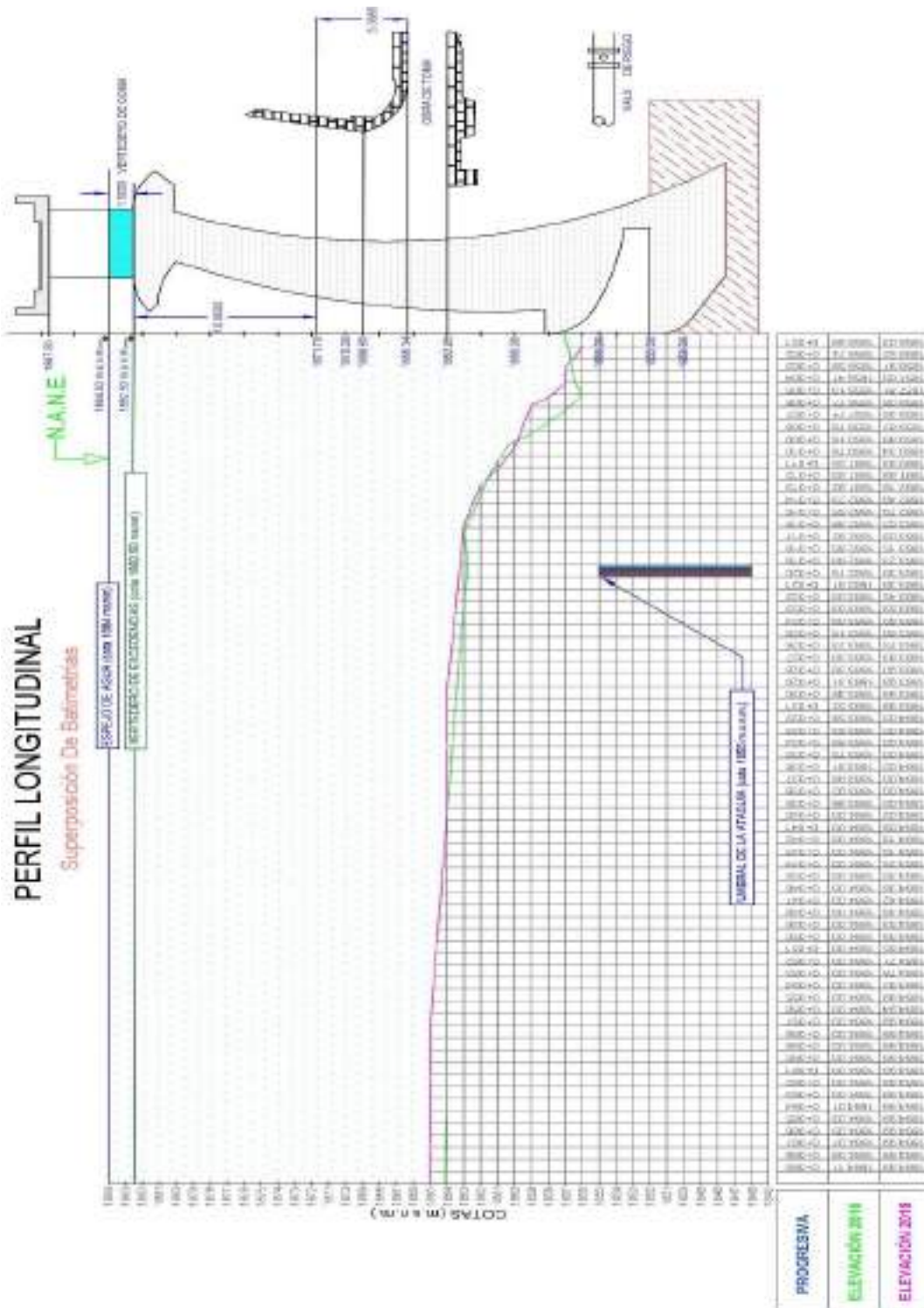


Figura 5.27. Perfil longitudinal superficies 2016-2018.

### 5.3.2. Superficies 2018-2019

El análisis comparativo de perfil longitudinal en el sector de estudio como indica en la Figura 5.28, es el que más importancia tiene por la información a detalle y de gran confiabilidad con la que se cuenta para el estudio, teniendo en cuenta que los datos de campo fueron extraídos con equipos de última tecnología en levantamientos batimétricos, además, se implementó un planeamiento de manera detallada que abarque toda el área de estudio para la obtención de las morfologías sub acuáticas con el mayor grado de precisión.

Tomando en cuenta la disposición del material sedimentario, se evidencia que el nivel de sedimento de la batimetría del año 2019 es mucho menor que a los niveles del año 2018, ratificando que existe una disminución de sedimento en el área de estudio y por ende el incremento de la capacidad de almacenamiento como fruto de la remoción sedimentaria debido a las numerosas aperturas de compuertas de fondo durante éste periodo como se puede evidencia en la Tabla 3.6 del registro de aperturas de compuertas en la presa de San Jacinto.

En el detalle del perfil longitudinal, se evidencia que la ataguía es un punto el cual ocurren eventos diferentes tanto aguas arriba como aguas, los niveles del sedimento varían drásticamente con alturas que rondan desde los 0-0.2 metros aguas arriba y de 1-2 metros aguas abajo de la ataguía.

Se puede afirmar que aguas arriba de la ataguía ocurre el típico patrón sedimentario que todo embalse atraviesa, es decir la colmatación laminar a medida que transcurre los años, debido a que la estructura actúa como obstáculo para el movimiento libre de partículas sedimentarias al momento de la operación de compuertas de fondo, y aguas abajo es una zona de movimiento contante de sedimento el cual no se define ningún tipo de patrón de sedimentación.



### 5.3.3. Superficies 1989-2019

Es importante el análisis de la variación de sedimentos a manera de comparar la topografía de la superficie sub acuáticas desde su puesta en operación respecto a la batimetría actual a detalle, en Anexo 9 se observa que en las secciones transversales desde la progresiva 0+00 hasta la progresiva 0+20 los niveles de sedimentos varían constantemente con alturas hasta los 4 metros, lo que no ocurre de ahí en adelante donde la dinámica sedimentaria tiende a ser algo más estable y es que justo ahí es donde se encuentra emplazada la ataguía.

Haciendo una comparación del perfil longitudinal de ambas batimetrías, también se corrobora que aguas arriba de la ataguía se dio el mayor porcentaje de colmatación, la morfología del fondo del embalse fue evolucionando hasta convertirse en casi plana siguiendo la típica línea de sedimentación en forma de lámina con niveles que fueron en progreso a medida que transcurrió el tiempo hasta llegar los 10 metros de sedimento ya consolidado en la actualidad.

En zonas aguas abajo de la ataguía, a través de análisis tanto de secciones transversales y del perfil longitudinal, se evidencia mayores aturas de sedimentación y de erosión entre batimetrías, la dinámica sedimentaria no tiende a tener un patrón típico por la constante salida de sedimento debido a la operación que se realiza en las compuertas de fondo lo que ocasiona que se forme un cono de influencia de remoción en zonas radiales a éste, que en función a la distancia de arrastre o succión que genera la presión de salida, el cono de influencia solo se hace evidente hasta una distancia de 20 aguas arriba de la presa donde se encuentra emplazada la ataguía.

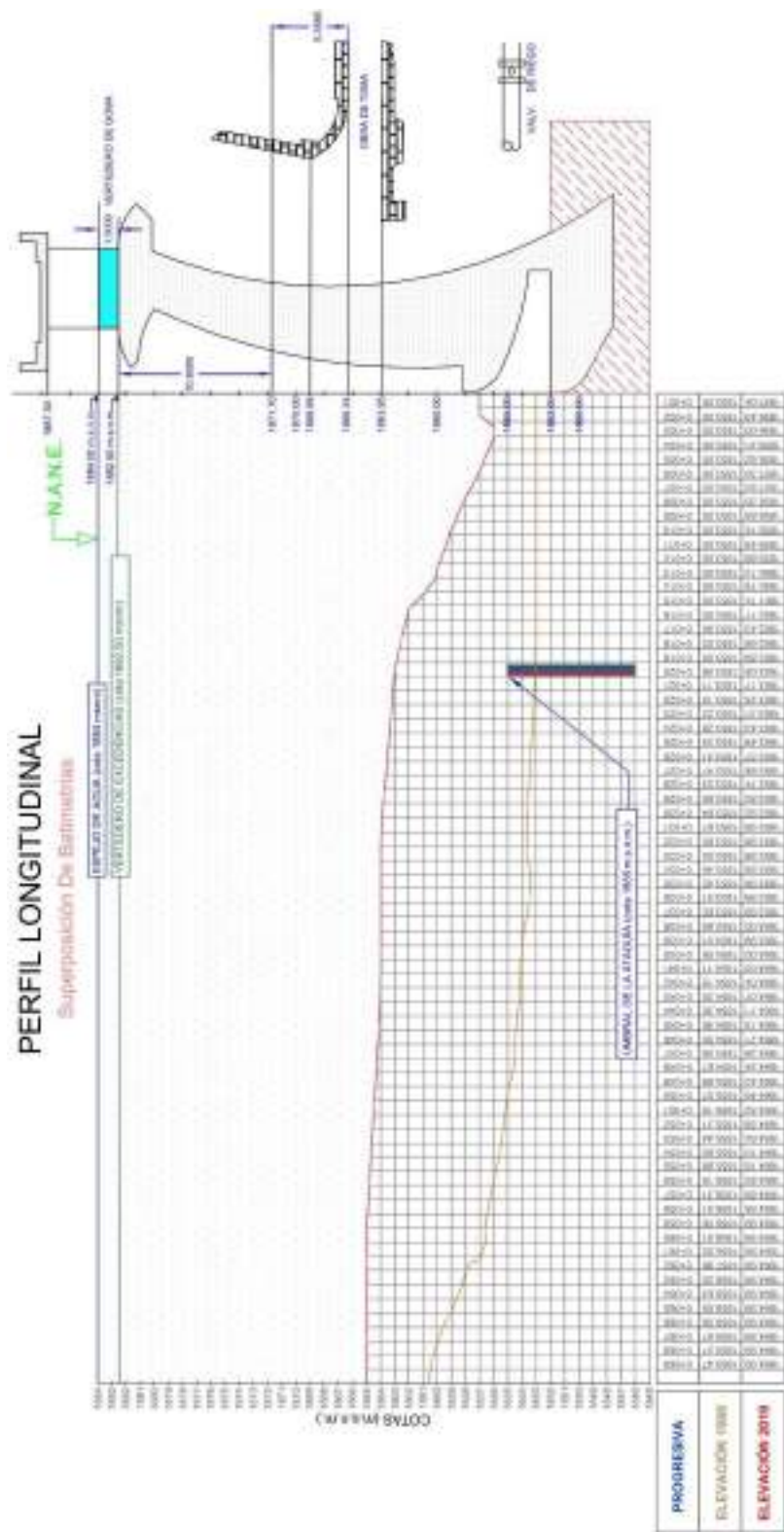


Figura 5.29. Perfil longitudinal superficies 1989-2019.

## **5.4. Análisis de la influencia de la ataguía en las compuertas de fondo**

### **5.4.1. Funcionamiento de las compuertas de fondo**

Para el análisis de funcionamiento de las compuertas de fondo, se tomó en cuenta el periodo en el cual se cuenta con el mayor número de aperturas, ya sea para fines de regulación, riego o limpieza de sedimentos donde según registros de la Tabla 3.6, el periodo 2016-2019 cuenta con la mayor cantidad información, otro aspecto que se consideró en este análisis, es la información de levantamientos batimétricos de mayor detalle y precisión, por lo que se opta por realizar el análisis de la información de curvas batimétricas de los años 2016, 2018 y 2019.

Se procedió a llevar adelante un análisis minucioso de la variación de la morfología de las superficies sub acuáticas en zonas muy próximas a las compuertas de fondo, que partiendo de la información de secciones transversales del Anexo 9 y puntualmente se observa que en las secciones 0+005 y 0+010 de las Figuras 5.30, el mayor cambio de la morfología del terreno se da justo en la compuerta N°1 del margen derecho del sector de la presa de San Jacinto, lo que significa que tuvo mayor funcionamiento, esta afirmación es corroborada en la Tabla 3.6 del registro de aperturas de compuertas en la presa de San Jacinto donde en la mayoría de los eventos se enfatiza la apertura solo de la compuerta anteriormente mencionada.

En la zona crítica de ambas secciones transversales, se evidencia que la remoción sedimentaria por efecto producido por las compuertas de fondo es independiente una respecto a otra, dado que durante el último periodo 2018-2019 se cuenta con la mayoría de aperturas sólo en el margen derecho llevando consigo la remoción hidráulica de sedimentos de gran consideración solo en ese sector con alturas que varían entre los 0 a 3 metros. En el margen izquierdo, por la escasa operación que presenta, la erosión es a consecuencia de la compuerta del margen derecho que sigue un patrón de erosión laminar según distancia del cono de influencia que genera al momento de la operación.



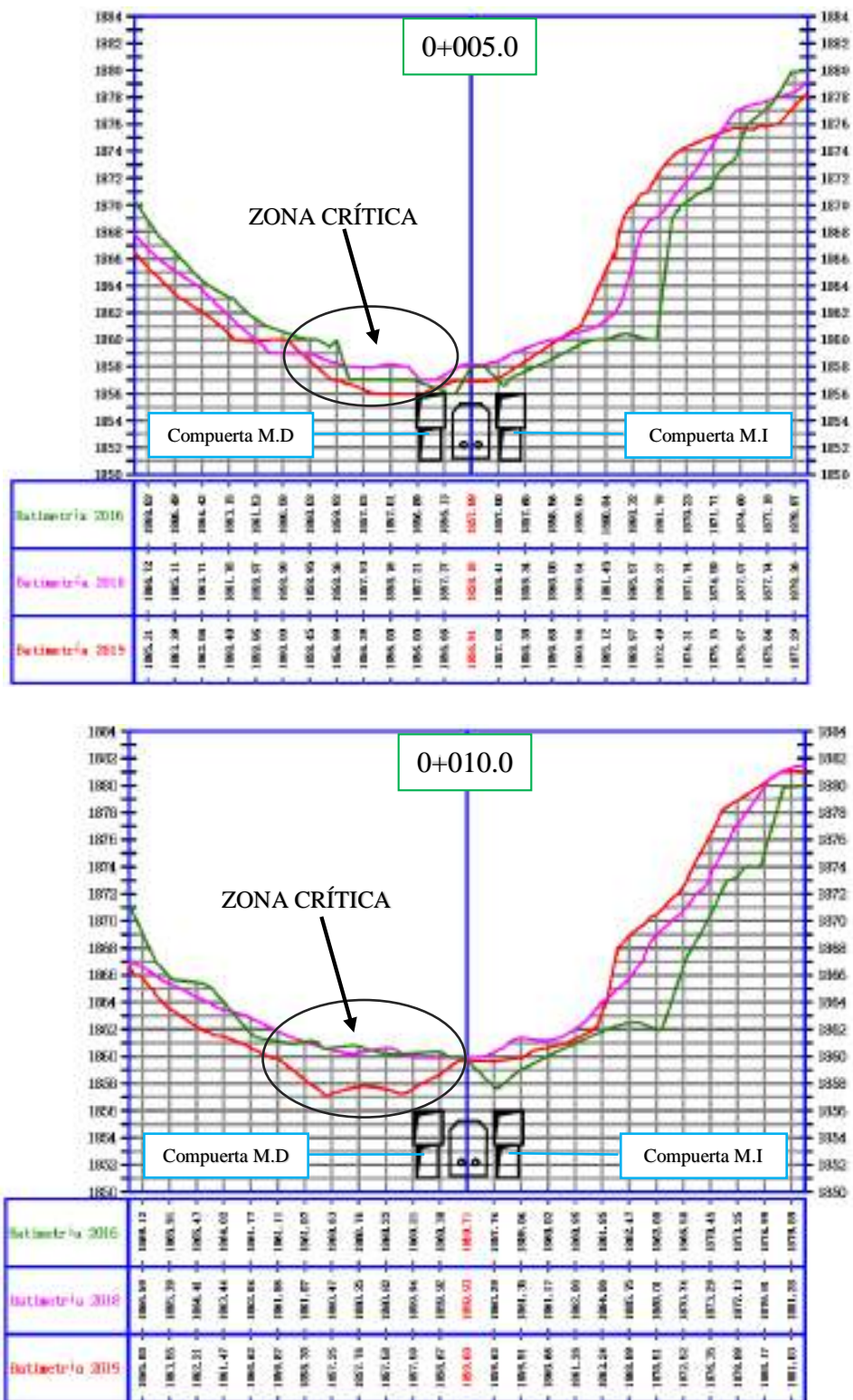


Figura 5.30. Perfiles transversales sector presa San Jacinto.

### 5.4.2. Operatividad de las compuertas de fondo

Para el análisis del grado de operatividad de las compuertas de fondo de la presa de San Jacinto, se realizó la comparación de los niveles de sedimento versus el nivel de la solera de los desfogues de fondo, se adoptó la información más reciente de curvas batimétricas realizada en el año 2019 por su precisión y confiabilidad, para conocer el grado de colmatación cercano a esta estructura.

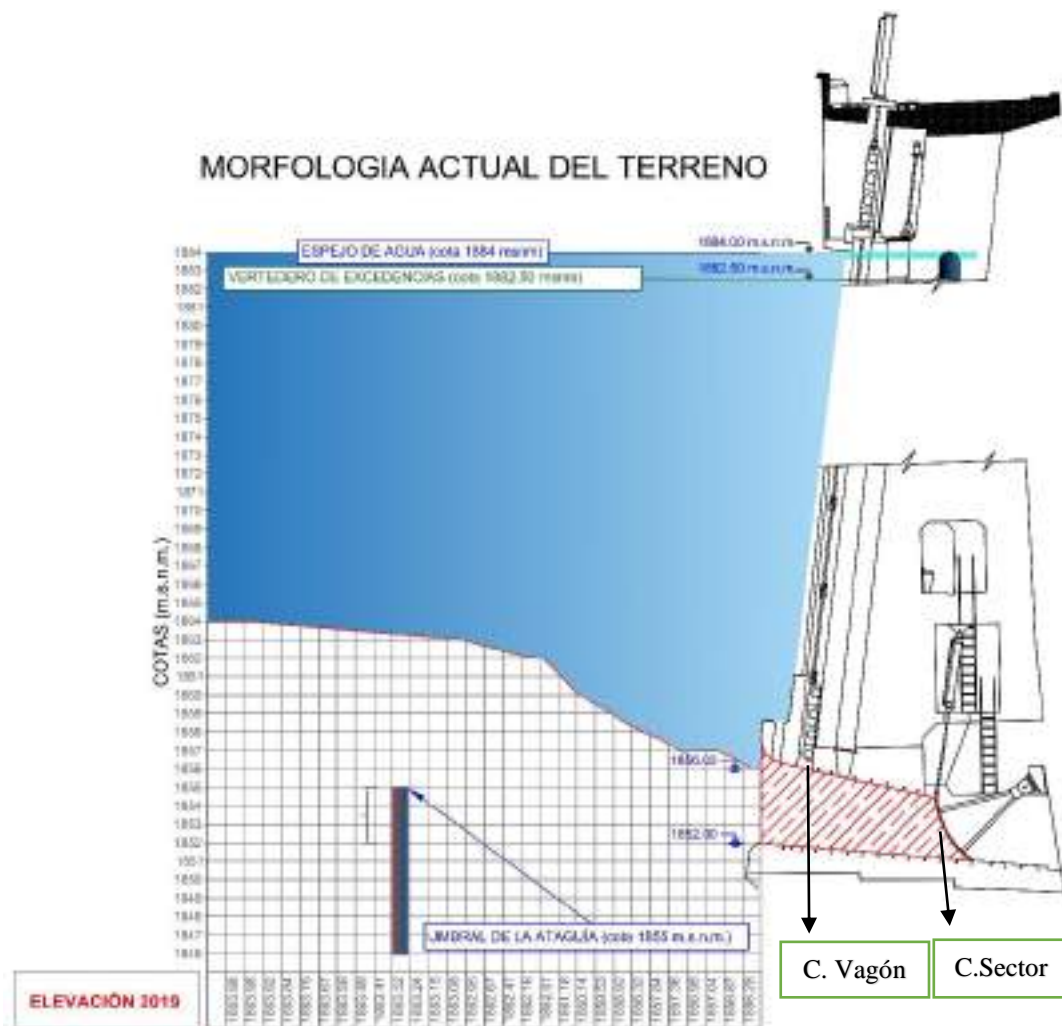


Figura 5.31. Morfología actual del área de estudio.



De la información de los antecedentes de la presa de San Jacinto, se tiene que la cota de la solera de las compuertas de fondo es de 1852 m.s.n.m., si se analiza el nivel actual del sedimento mediante un perfil longitudinal perpendicular a la presa como se expone en la Figura 5.31, se tiene que la zona más profunda es en la entrada a la compuerta de fondo con profundidad mínima de 1856 m.s.n.m., es decir, que el nivel de sedimento se encuentra aproximadamente 4 metros por encima de la solera.

Este perfil longitudinal fue trazado a partir de la entrada de la compuerta del margen derecho, sabiendo que es la compuerta con mayor operación a diferentes aperturas, por lo tanto, en esta zona es donde se presenta el mayor volumen de remoción de sedimentos.

El túnel que atraviesa el cuerpo de la presa del desfogue de fondo cuenta con dos compuertas, la primera es una compuerta tipo vagón que se ubicada al inicio del túnel, posteriormente al final del túnel se ubica una compuerta sector tipo semicircular con 8 niveles de apertura que es la que con mayor frecuencia se realiza la operación de apertura.

#### **5.4.3. Cono de influencia de remoción de sedimentos**

El patrón de socavación generado por la purga de sedimentos a presión, genera una especie de cono de influencia o semicírculo cuyo centro se encuentra en la entrada de los desfogues de fondo en el embalse, para entender este fenómeno, en la figura 5.32, se expone las características físicas de la sección de formación, donde la pendiente del cono, está en función al caudal de salida y el tipo de suelo.

La forma en la que se distribuye el material sólido dentro del embalse, en proximidades del desfogue de fondo, depende del tipo de material, características del vaso, operación y según las avenidas que se tenga en éste tipo de estructuras, por tanto, se puede deducir que es casi imposible obtener una relación de caudal-longitud.

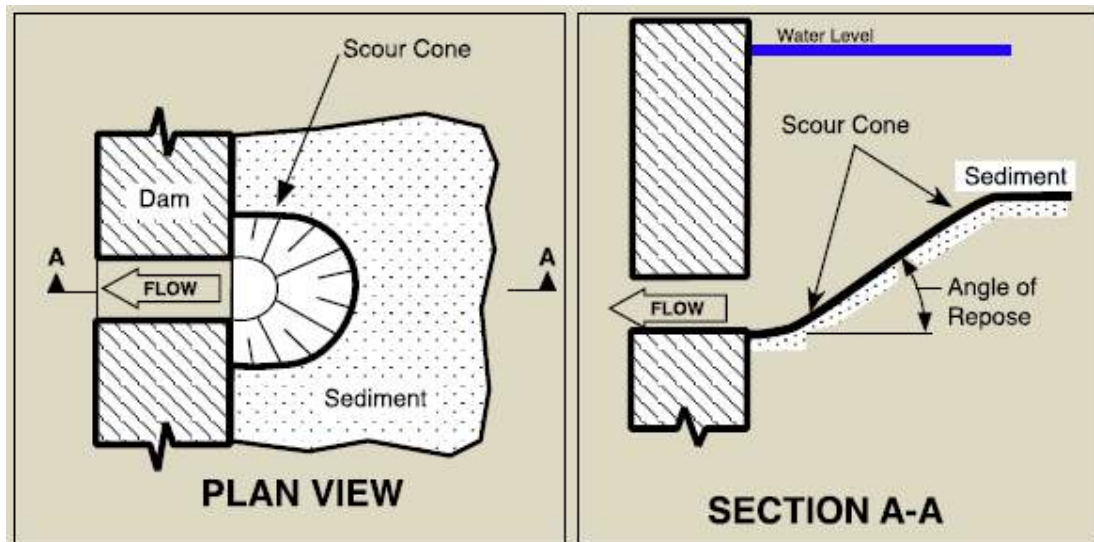


Figura 5.32. Características del cono de influencia.

**Fuente:** Morris, (2015)

El análisis de la formación del cono de remoción formado en el pie del cuerpo de la presa de San Jacinto donde se ubica los desfogues de fondo, se realiza a partir de las curvas batimétricas generadas de la zona de estudio, debido a la poca densidad de las líneas de sondeo y la baja precisión de anteriores levantamientos, sólo se utilizó los datos de las batimetrías del año 2016, 2018 y 2019.

Haciendo un análisis de las elevaciones de los límites extremos que conforman el cono de influencia, se tiene que la cota de niveles de formación se encuentra en un rango comprendido entre 1856-1863 m.s.n.m., además, se tiene que la distancia de formación del semicírculo desde la entrada al desfogue de fondo proyectándose aguas arriba está en un rango entre los 20-29 metros como expone la Figura 5.32 y 5.33.

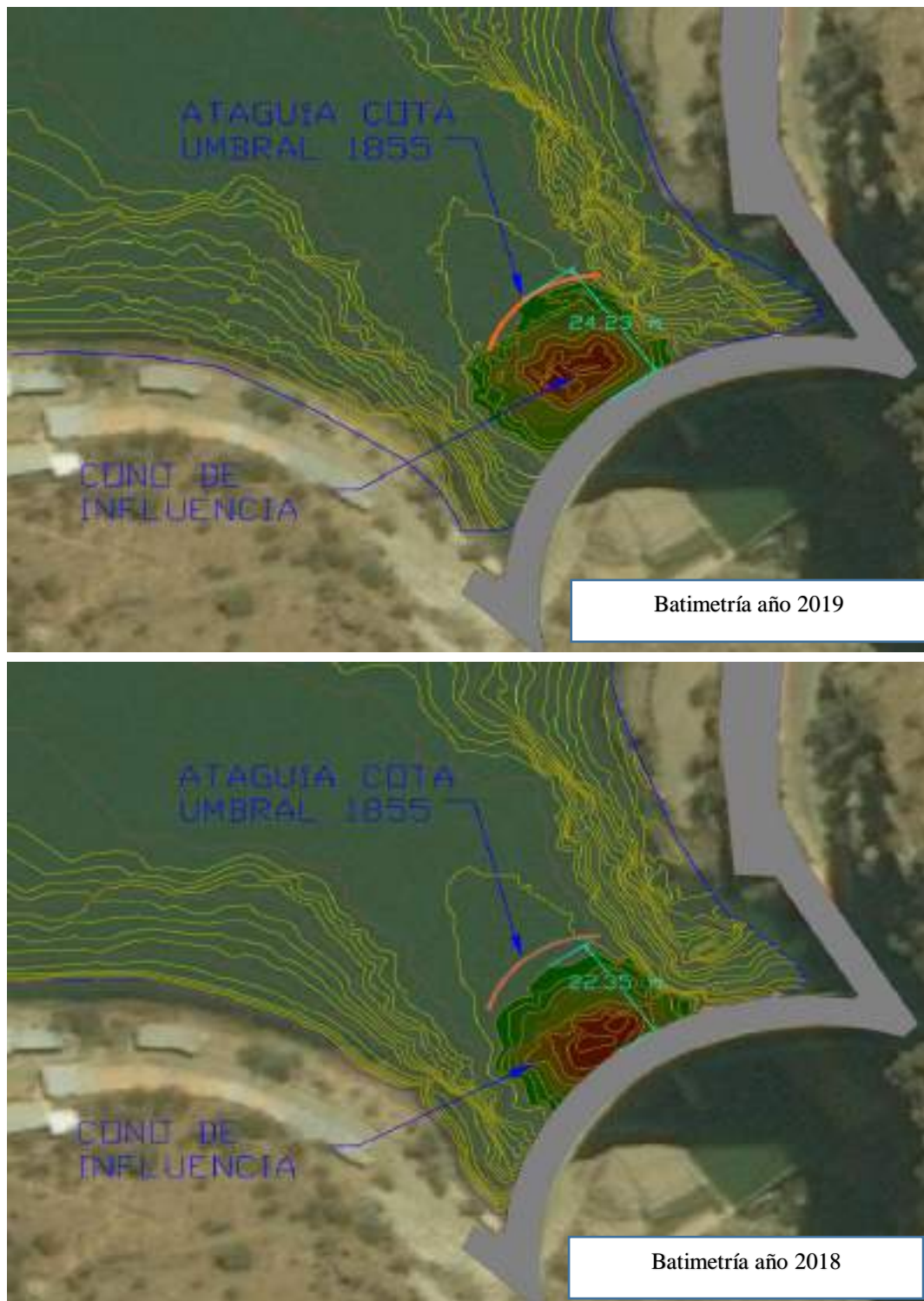


Figura 5.33. Cono de influencia generado según batimetría 2018 y 2019.



Figura 5.34. Cono de influencia generado según batimetría 2016.

A continuación, se expone las características de formación del cono de influencia generado en el área de estudio:

$$\text{Ángulo de reposo} = \frac{(\text{Cota Superior} - \text{Cota Inferior}) * 100}{\text{Distancia de remoción}}$$

**Tabla 5.25**

*Características del cono de remoción.*

Periodo	Longitud de influencia desde el cuerpo de la presa	Cota máxima del cono de influencia	Cota mínima del cono de influencia	Ángulo de reposo ( %) del cono de influencia
Batimetría 2016	28.92	1863	1856	24.20
Batimetría 2018	22.35	1863	1856	31.32
Batimetría 2019	24.23	1863	1856	28.89

## 5.5. Análisis de la vida útil y la colmatación del embalse San Jacinto

El análisis que se describe a continuación se direcciona al estudio de la vida útil a manera de estimar el tiempo aproximado en el que el embalse ya no permita abastecer las demandas por los cuales fue destinado.

El embalse de San Jacinto se diseñó para una vida útil de 50 años, teóricamente esto significa que, transcurrido ese periodo, el volumen útil empezaría a disminuir a consecuencia de la presencia del volumen muerto acumulado.

### 5.5.1. Información antecedente

**Tabla 5.26**

*Sedimentos acumulados en el embalse San Jacinto (1989- 2019).*

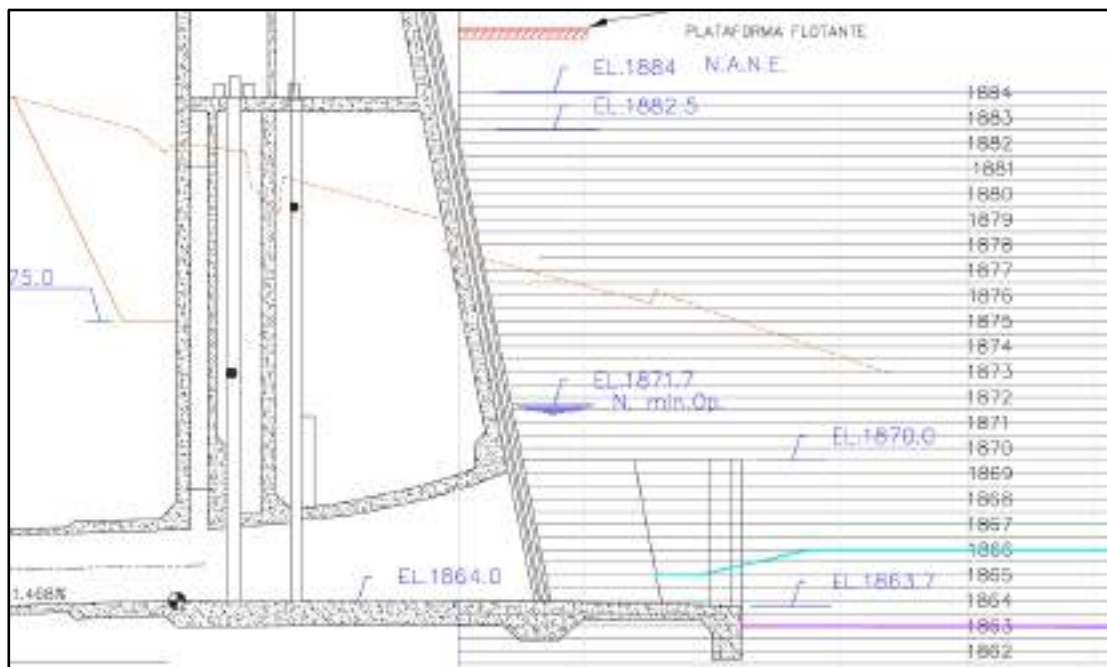
Nº	BATIMETRÍA [año]	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO [m <sup>3</sup> ]	SEDIMENTACIÓN (PERIODOS) [m <sup>3</sup> ]	SEDIMENTO ACUMULADO [m <sup>3</sup> ]	REDUCCIÓN DEL VOLUMEN [%]	TASA DE SEDIMENTACIÓN	
						(PERIODOS) [m <sup>3</sup> /año]	PROMEDIO ANUAL [m <sup>3</sup> /año]
1	1989	61,436,786.39	-	-	0.00%	-	<b>545,938.7</b>
2	1995	54,336,393.19	7,100,393.20	7,100,393.20	11.56%	1183398.87	
3	2004	50,250,659.23	4,085,733.96	11,186,127.16	18.21%	453970.44	
4	2013	47,283,863.46	2,966,795.77	14,152,922.93	23.04%	329643.97	
5	2016	46,401,325.03	882,538.43	15,035,461.36	24.47%	294179.48	
6	2019	45,058,626.36	1,342,698.67	16,378,160.03	26.66%	447566.22	

**Tabla 5.27**

*Resumen de información del embalse San Jacinto año 1996*

<b>DATOS ANTECEDENTES</b>		
Periodo vida útil (Diseño) T =	50	años
Área de la cuenca =	436.52	km <sup>2</sup>
Tasa de Sedimentación (Diseño) =	268,700	[m <sup>3</sup> /año]
Tasa anual de sedimentos =	618	[ton/km <sup>2</sup> /año]
Volumen muerto Proyectado	13.12	Hm <sup>3</sup>
Nivel Mínimo de operación	1871.7	m.s.n.m.
Volumen total (1882.5 m.s.n.m)	53.45	Hm <sup>3</sup>
Volumen útil (1882.5 m.s.n.m)	40.33	Hm <sup>3</sup>
Volumen total (1884 m.s.n.m)	61.85	Hm <sup>3</sup>
Volumen útil (1884 m.s.n.m)	48.73	Hm <sup>3</sup>

**Fuente:** Control de sedimentos en la cuenca del Río Tolomosa, 1995



*Figura 5.35.* Estado actual de la obra de toma según batimetría 2018.

### 5.5.2. Proyección sedimentaria con información topobatimétrica

En el análisis desarrollado a continuación (vea tabla 5.28), se realizó la calibración de los datos de sedimento acumulado (1989-2019) a una ecuación de mayor representatividad a manera de hacer una proyección a un tiempo (t) en años como en indica la Figura 5.36.

Como resultado se tiene volúmenes de sedimentos expresados en porcentajes respecto al total, cabe hacer notar que, se considera como volumen inicial al valor obtenido en la batimetría del año 1989.

El periodo de vida útil para  $T = 50$  años con el que fue calculado la disminución del volumen por sedimentación a través de la proyección, nos da un valor de  $21.95 \text{ Hm}^3$  que corresponden al 35.72 % del volumen total al cabo del año 2039.

**Tabla 5.28**

*Proyección de la pérdida de vida útil del embalse de San Jacinto.*

OPERACIÓN [años]	BATIMETRÍAS [año]	SEDIMENTO ACUMULADO [m3]	PROYECCIÓN (m <sup>3</sup> ) [Para el año "X"]	REDUCCIÓN DEL VOLUMEN [%]
0	1989	0	0	0
6	1995	7,100,393.20	7,463,916.90	11.56%
15	2004	11,186,127.16	11,895,943.10	18.21%
24	2013	14,152,922.93	15,108,964.94	23.04%
27	2016	15,035,461.36	16,041,907.27	24.47%
30	2019	16,378,160.03	16,925,162.11	26.66%
40	2029		19,592,469.18	31.89%
50	2039		21,947,613.11	35.72%
60	2049		24,080,571.84	39.20%
70	2059		26,044,896.01	42.39%
97	2086		30,746,241.63	50.05%
244	2233		49,157,123.25	80.01%



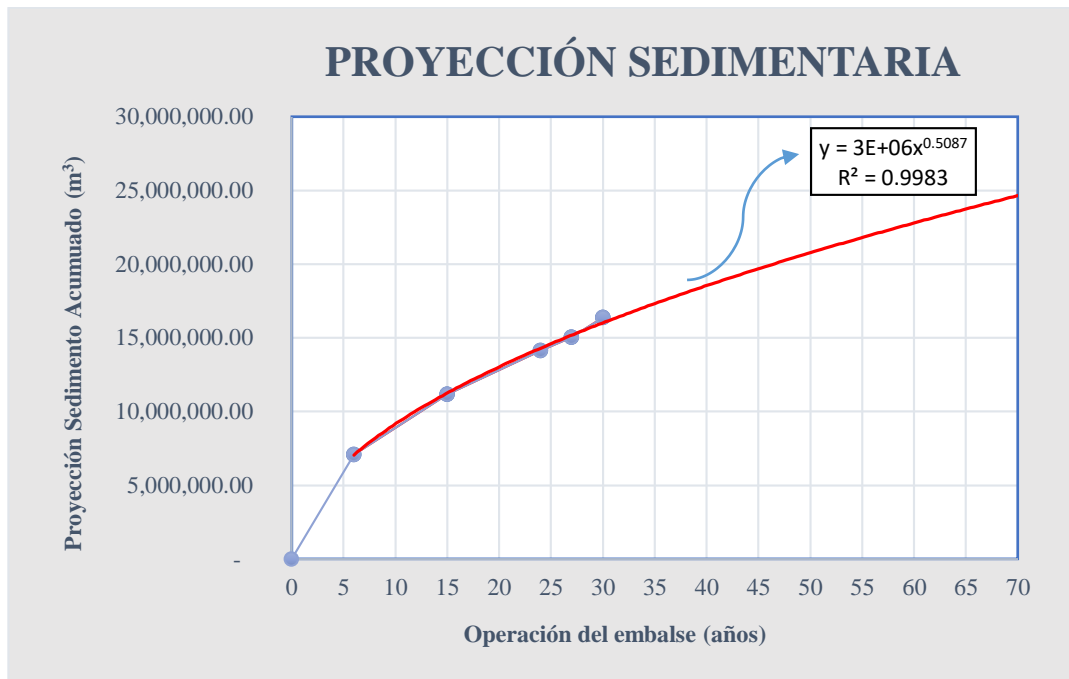


Figura 5.36. Calibración de curva proyección sedimentaria.

### 5.5.3. Análisis del estado actual volumen muerto

Como indica (Rocha, 1998) la vida útil del embalse llega a su fin cuando el volumen muerto calculado para en diseño del embalse para un periodo de vida útil (t) en años se ve superado.

El embalse de San Jacinto fue diseñado para una vida útil de 50 años, cuyo volumen muerto proyectado fue de 13.12 hm<sup>3</sup>, se hizo ese análisis para determinar en qué tiempo se superaría ese valor (véase Tabla 5.29) donde se indica que en el año 2011 el embalse almacenó el volumen correspondiente al volumen muerto.

En la actualidad existe alrededor de 16.39 hm<sup>3</sup> de sedimento y si lo proyectamos ese valor mediante la ecuación calibrada, tendremos 21.95 hm<sup>3</sup> para el año 2039



**Tabla 5.29***Pérdida de vida útil de la obra de toma embalse San Jacinto.*

[años]	TIEMPO DE VIDA [año]	TASA DE COLMATACIÓN [m <sup>3</sup> / año]	SEDIMENTO ACUMULADO [m <sup>3</sup> ]	OBSERVACIONES
1989	0	0	0.00	Inicio de operación del embalse
1990	1	1183398.867	1183398.87	
1991	2	1183398.867	2366797.73	
1992	3	1183398.867	3550196.60	
1993	4	1183398.867	4733595.47	
1994	5	1183398.867	5916994.34	
1995	6	1183398.867	7100393.20	
1996	7	453970.4396	7554363.64	
1997	8	453970.4396	8008334.08	
1998	9	453970.4396	8462304.52	
1999	10	453970.4396	8916274.96	
2000	11	453970.4396	9370245.40	
2001	12	453970.4396	9824215.84	
2002	13	453970.4396	10278186.28	
2003	14	453970.4396	10732156.72	
2004	15	453970.4396	11186127.16	
2005	16	329643.9741	11515771.14	
2006	17	329643.9741	11845415.11	
2007	18	329643.9741	12175059.08	
2008	19	329643.9741	12504703.06	
2009	20	329643.9741	12834347.03	
2010	21	329643.9741	13163991.01	
2011	22	329643.9741	13493634.98	Final prematuro de la vida útil
2012	23	329643.9741	13823278.95	
2013	24	329643.9741	14152922.93	
2014	25	294179.4773	14447102.41	
2015	26	294179.4773	14741281.88	
2016	27	294179.4773	15035461.36	
2017	28	447566.2236	15483027.58	
2018	29	447566.2236	15930593.81	
2019	30	447566.2236	16378160.03	
2020	31		17209844.6	
2021	32		17490049.9	
2022	33		17765985.2	
2023	34		18037842.1	
2024	35		18305798.1	
2025	36		18570018.5	
2026	37		18830657.0	
2027	38		19087856.9	
2028	39		19341752.4	
2029	40		19592469.2	
2030	41		19840124.9	
2031	42		20084830.4	
2032	43		20326689.7	
2033	44		20565801.1	
2034	45		20802257.1	
2035	46		21036145.4	
2036	47		21267548.7	
2037	48		21496545.4	
2038	49		21723210.0	
2039	50		21947613.1	Final de la vida útil proyectada

#### 5.5.4. Análisis de la tasa de sedimentación anual

El problema de la colmatación en embalse y la reducción acelerada de la vida útil se ve afectado de manera directa por la tasa anual de sedimentación dentro del embalse, este análisis fue realizado con el único fin de verificar, comparar y analizar ese valor calculado para el diseño de esta obra, evidentemente el valor de la tasa de sedimentación calculado es muy ajena a la realidad, esta afirmación se va reflejado en la acelerada pérdida de capacidad de almacenamiento por la que atraviesa el embalse de San Jacinto.

Existen diversos métodos o fórmulas empíricas en el cálculo predictivo de sedimentos, para el análisis que se desarrolla a continuación se utilizó el modelo de Djorovic.

El modelo de Djorovic está definido por la siguiente ecuación:

$$W = T F H \pi Z^{1,5}$$

Donde:

W: Caudal sólido ( $m^3/año$ ), como medida de la degradación específica de una cuenca.

T: Factor en función a la temperatura media anual.

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 1} \quad t_0 \text{ es la temperatura media anual de la cuenca en } ^\circ\text{C}.$$

F: Área de la cuenca en  $Km^2$ .

H: Precipitación media anual en mm.

$\pi$ : 3.14159

Z: Coeficiente de erosión que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo de una cuenca y valoriza la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve.

**Tabla 5.30**

*Valores para el coeficiente de erosión (Z).*

CATEGORÍAS	RANGOS	Z ponderado
I: erosión excesiva	1.01 - 1.50	0.543
II: erosión intensiva	0.71 - 1.00	
III: erosión media	0.31 - 0.70	
IV: erosión moderada	0.20 - 0.30	
V: erosión baja	0.001 - 0.19	

**Tabla 5.31**

*Datos utilizados en el modelo.*

<b>F=</b>	436.52 Km <sup>2</sup>
<b>H=</b>	929.55 mm
<b>t<sub>0</sub>=</b>	18 °C
<b>T=</b>	1.673
<b>Z=</b>	0.543

Como resultado se tiene que:

$$W = 854450.9 \text{ m}^3/\text{año}$$

Para el cálculo de la eficiencia retención del sedimento en embalses (véase Figura 5.36), se utilizó el criterio de G.M. BRUNE que está en función de la Capacidad de almacenamiento y el volumen anual de agua escurrido hacia el embalse. ( $R = C/V$ ).

Los valores que se utilizaron se describe a continuación:

$$C = 41436786.39 \text{ m}^3$$

$$V = 203532862.85 \text{ m}^3$$

$$\text{Coeficiente de atrape: } 90 \%$$

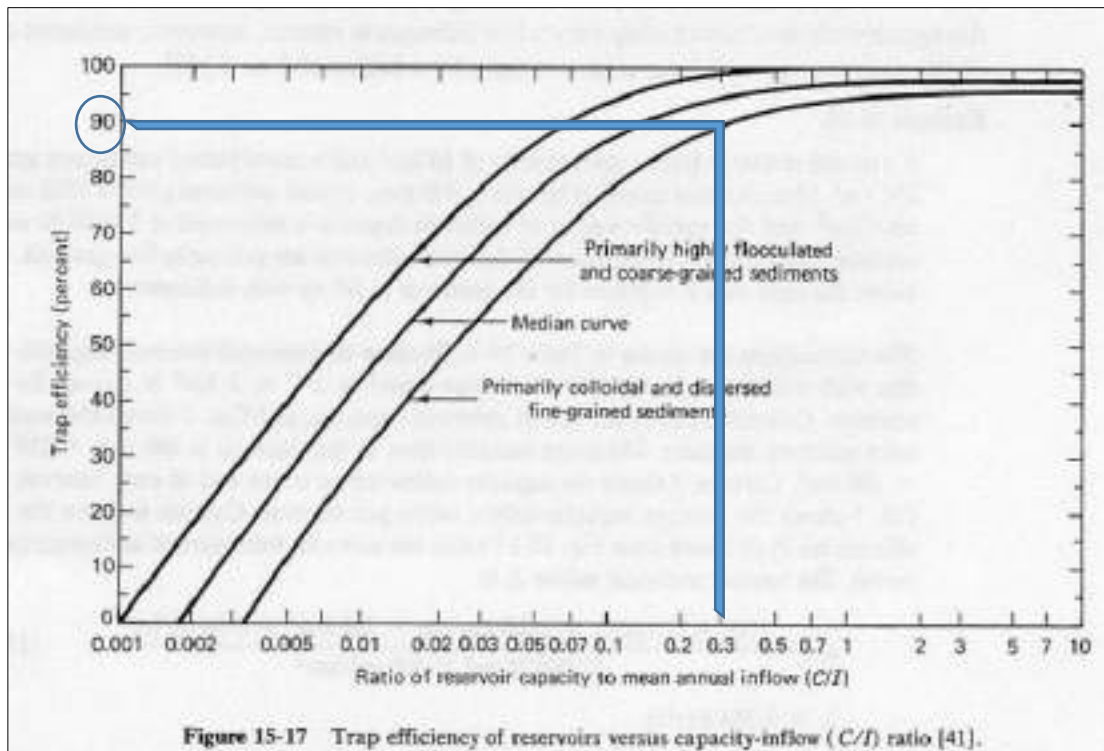


Figura 5.37. Trap efficiency of reservoirs capacity-inflow (C/I) ratio.

A continuación, se realizó el cálculo de la carga total de sedimentos para el periodo de vida útil de diseño con los datos siguientes datos de entrada:

Vida útil del embalse  $T = 50$  años

Peso específico del sedimento sumergido:  $1200 \text{ Kg/m}^3$  (Tabla 5.33)

Donde se obtiene los siguientes resultados:

### Tabla 5.32

Tabla resultados de la tasa anual y volumen de sedimentos.

Volumen de sedimentos (T:50 años)	$38.450 \text{ Hm}^3$
Tasa anual de sedimentos	$2114 \text{ ( tn/km}^2\text{/año)}$
	$922806.969 \text{ kg/año}$
	$706,005.81 \text{ m}^3\text{/año}$
Volumen de sedimentos (año 2019)	$23.070 \text{ Hm}^3$

Si se observa en la Tabla 5.33, los valores de la tasa de sedimentación no se asemejan entre sí, es decir que, el valor recalculado es 2.86 veces mayor, como así mismo el valor obtenido mediante batimetrías dobléga al valor de la tasa calculada en perfectibilidad.

**Tabla 5.33**

*Tasa de sedimentación y el volumen proyectado año 2019.*

CUADRO COMPARATIVO DE LA TASA DE SEDIMENTACIÓN Y VOLUMENES PROYECTADOS 1989-2019		
Instancia	Tasa de sedimentación m <sup>3</sup> /año	Volumen proyectado para 30 años
Pre factibilidad	268700	8061000
Recalculado	769005.81	23070174.22
Batimetrías	545938.7	16378160.03

Para mayor credibilidad de los cálculos anteriores realizados, se explica de manera detallada la elección del peso específico propuesto en los cálculos.

Los siguientes valores son los utilizados por el U.S. Soil Conservation Service de los Estados Unidos, como una guía cuando no existen mediciones en campo.

**Tabla 5.34**

*Pesos específicos de los sedimentos aireados y sumergido US SCS.*

PESO ESPECÍFICO DE SEDIMENTOS DEPOSITADOS EN EMBALSES (t/m <sup>3</sup> )		
Tamaño	Permanente Sumergido	Aireado
Arcilla	0.64 - 0.96	0.96 - 1.28
Limo	0.88 - 1.20	1.20 - 1.36
Limo y Arcilla 50%	0.64 - 1.04	1.04 - 1.36
Arena y Limo 50%	1.20 - 1.52	1.52 - 1.76
Arcilla/Limo/Arena 33%	0.8 - 1.28	1.28 - 1.60
Arena	1.36 - 1.60	1.36 - 1.60
Grava	1.36 - 2.00	1.36 - 2.00
Arena y Grava	1.52 - 2.08	1.52 - 2.08

La parte del sedimento que llega al embalse y es depositado en un ambiente de completa sumersión es llamado SUMERGIDO. En cambio, los depósitos arriba del nivel del vertedor están sujetos a un alternado secado y mojado, denominándose AIREADOS. Los términos sumergido y aireado corresponden a embalses con fines de riego o de abastecimiento de agua potable y a estructuras o vasos de control de avenidas, respectivamente. La distinción entre sedimentos sumergidos y aireados es importante pues cada uno ocupa volúmenes diferentes.

Debido a las características de los sedimentos en la cuenca y los que se pueden observar en las zonas de entradas de los afluentes al embalse se puede definir que son del tipo grava, arena, limo y arcilla, por esta razón se definió como peso específico un valor conservador promedio para sedimento aireado y sumergido de **1200 kg/m<sup>3</sup>**.

#### **5.5.5. Vida útil del embalse**

Para el cálculo de la vida útil del embalse que se expone a continuación, la precisión del análisis está en función de los valores característicos del embalse como son: área de la cuenca, capacidad total de almacenamiento, el coeficiente de atrape, tasa de sedimentación, y el valor de peso específico que es el factor que depende la vida útil del embalse. (véase Tabla 5.35)

El cálculo para determinar los años de vida útil, se basará en la afirmación que la presa finaliza su ciclo de servicio cuando más del 80% de su capacidad ha sido colmatada (Gómez Navarro, 1958)

Tomando en cuenta lo mencionado con anterioridad, se tiene que la vida útil del embalse llegaría a los 77 años desde su puesta en operación es decir en el año 2066 cuando el sedimento habría llegado al 80% de colmatación.

**Tabla 5.35***Vida útil del embalse de San Jacinto.*

Pérdida de Capacidad	Capacidad del embalse (Hm3)	Sedimento acumulado (Hm3)	Relación C/V	Media (C/V)	Coef. de Atrape de Brune	tiempo (años)	Fin de la Vida Útil (años)
0%	61.44	0.00	0.302	-	-	-	0
10%	55.29	6.14	0.272	0.287	88%	9	9
20%	49.15	12.29	0.241	0.257	87%	9	18
30%	43.01	18.43	0.211	0.226	87%	9	27
40%	36.86	24.57	0.181	0.196	85%	9	37
50%	30.72	30.72	0.151	0.166	83%	10	46
60%	24.57	36.86	0.121	0.136	80%	10	56
70%	18.43	43.01	0.091	0.106	78%	10	67
80%	12.29	49.15	0.060	0.075	74%	11	77
90%	6.14	55.29	0.030	0.045	68%	12	89
100%	0.00	61.44	0.000	0.015	45%	18	107

**5.5.6. Caracterización del embalse desde el punto de vista sedimentario**

Se realizó la caracterización del problema de la sedimentación en el embalse de San Jacinto mediante la aplicación de un indicador que propuso (Handbook for Assessing and Managing Reservoir Sedimentation, 2019) que no es nada más que una relación del sedimento acumulado expresado en porcentaje entre los años de operación, donde:

ASL = Pérdida de almacenamiento total en% / Años totales de operación

$\Delta$  sed % = Pérdida de almacenamiento total en porcentaje

N° = Años totales de operación

$$ASL = \frac{\Delta \text{ Perd sed } \%}{N^{\circ} \text{ años Op}}$$

$\Delta$  sed % = 26.66 %

N° Años Operación = 30 años

$$ASL = 0.89$$

**Tabla 5.36***Categorization of sediment-induced problems.*

	CATEGORIA
$ASL \leq 0.2 \%$	<b>BAJO</b>
$0.2 \% \leq ASL \leq 0.5 \%$	<b>MEDIO</b>
$0.5 \% \leq ASL \leq 2.0 \%$	<b>ALTO</b>
$ASL \geq 2.0 \%$	<b>EXTREMO</b>

**Fuente:** Handbook for Assessing and Managing Reservoir Sedimentation, 2019

Por lo que se concluye que el valor de la relación corresponde al intervalo de caracterización de riesgo alto por sedimentación.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo tiene como enfoque principal el análisis de la distribución sedimentaria en el sector aguas arriba de la presa de San Jacinto, donde se encuentra emplazado una estructura de hormigón (ataguía). Debido a la complejidad que representa este tipo de problema, por la información limitada y por la incertidumbre de la precisión de la información generada a la fecha, se plantearon algunos supuestos que nos sirvieron para comprender el fenómeno estudiado como así analizar la dinamicidad del área estudiada. Dando como resultado información muy importante que coadyuvará a futuros trabajos de similar índole.

### 6.1. Conclusiones

#### **De la recopilación de información topográfica del sector del estudio, paramento aguas arriba del cuerpo de la presa San Jacinto, antes del llenado del embalse**

- ✓ La información disponible de la topografía subacuática del sector próximo al cuerpo de la presa de San Jacinto, como ser la batimetría del 1989, 1995 y 2004 están únicamente en formato físico, la precisión de las curvas de nivel no es la adecuada para poder realizar un análisis con un grado de precisión óptimo puesto que el intervalo altitudinal es de 5 metros, no obstante, fue de vital importancia a efecto de tener la ubicación de la ataguía, sus dimensiones y las cotas de sus diferentes niveles.
- ✓ La información de la topografía original previo al llenado, por su baja precisión genera incertidumbres y poca confiabilidad, por consiguiente, no fue utilizada en los diferentes análisis realizados.

### **De la digitalización de la información obtenida**

- ✓ Se realizó la digitalización del plano de curvas de nivel de la planimetría de la zona próxima al cuerpo de la presa donde se detalla la ubicación exacta de la ataguía, túnel de conducción, y los diferentes niveles de elevación de la estructura, también se digitalizó los planos de detalle del cuerpo de la presa de San Jacinto.
- ✓ Estos planos sirvieron para tener el detalle de los diferentes niveles de las obras complementarias, como ser las compuertas de fondo y vertedero de excedencias.
- ✓ Esta información fue la base para la realización del análisis de la dinámica sedimentaria de la zona estudiada, además de ser de gran utilidad para futuros estudios.

### **De la recopilación la información de las anteriores batimetrías realizadas en la presa San Jacinto**

- ✓ El embalse de San Jacinto cuenta con la información de 5 mediciones topobatimétricas del embalse, desde su puesta en operación en 1988 hasta el año 2016, estos levantamientos fueron ejecutados con diferentes precisiones y no se realizó estudios complementarios de las zonas críticas del embalse como ser el sector de la obra de toma o el área próxima al cuerpo de la presa
- ✓ Al momento del procesado de la información previo a la realización de los diferentes análisis, se constató que la información de las batimetrías de los años 1989, 1995 y 2004 no se encontraban en un el mismo elipsoide de trabajo con respecto a la información de las batimetrías de los años 2013 y 2016, por lo que se procedió a realizar la georreferenciación o conversión de elipsoide del PSAD-56 al WGS-84 mediante el software ArcGis a través del flujograma de trabajo (*ArcToolbox>Data Managements Tools>Projections and Transformations>Define Projection*) para la uniformización de la información en una misma área de trabajo.

- ✓ Se evidencia que, en la información de las mediciones de los años 1989, 1995, 2004, 2013 y la topografía original del año 1986 no se cuenta con información detallada del sector del área de estudio, limitando de esta manera el análisis, ya que se requiere una mayor cantidad de información de la superficie para poder realizar una comparación entre superficies.
- ✓ En la batimetría ejecutada el año 2016 se realizó el levantamiento de secciones transversales y longitudinales en el sector aguas arriba al cuerpo de la presa. Obteniéndose el detalle de la topografía de la zona de estudio. Esta superficie es la que se utilizó como primera superficie de comparación para determinar e identificar los movimientos de la masa sedimentaria en el fondo del sector próximo a la presa.

**Del levantamiento batimétrico a detalle en el sector de estudio (paramento aguas arriba de la presa), específicamente en zonas próximas a la ataguía**

- ✓ En el área de estudio, se realizó el levantamiento batimétrico a detalle en el mes de abril del año 2018 y 2019, esta información es la de mayor importancia y es la que da credibilidad a todos los análisis realizados, ya que tienen la particularidad que los trabajos fueron realizados en un corto periodo es decir casi un año, las líneas de sondeo están trazadas a un metro de separación que genera una superficie con el detalle necesario para la realización del análisis de la dinámica sedimentaria de la zona, además el empleo de equipos de precisión de última tecnología en levantamientos batimétricos, convirtiendo así como fuente confiable de comparación.

**Del estado actual del sedimento en el área de estudio**

- ✓ Se realizó la estimación de la capacidad de almacenamiento en el área de estudio partiendo de la información de levantamientos batimétricos de los años 1989, 1995, 2004, 2013, 2016, 2018 y 2019, se evidencia que en el área de análisis se presenta el típico patrón ascendente de pérdida de capacidad de almacenamiento.

- ✓ Entre el periodo 1989-2018, el porcentaje es del 17.83 % de reducción del volumen de almacenamiento, lo que significa que desde su puesta en operación hasta el año 2018, se tiene alrededor de 87,102.40 m<sup>3</sup> de sedimento acumulado y un volumen útil almacenable de 289,924.03 m<sup>3</sup>.
- ✓ Durante el periodo 2018-2019 el típico patrón ascendente de sedimentación en embalses cambia de sentido drásticamente, aumenta la capacidad de almacenamiento a 290,520.14 m<sup>3</sup>, el volumen de sedimento disminuye a 86,506.295 m<sup>3</sup> y el porcentaje de reducción de pérdida de capacidad del almacenamiento es 17.71 %, esto se justifica debido a que en este periodo se realizaron 3 aperturas de compuertas para limpieza de sedimentos, generándose una disminución del volumen de sedimentos en la zona de 596.11 m<sup>3</sup> producto de la remoción hidráulica.
- ✓ Al ser una zona de constante movimiento del flujo ya sea por corrientes de densidad, o algún otro fenómeno externo como son las aperturas de compuertas de fondo, esta área está propensa a tener cambios en su morfología principalmente por erosión a causa de la remoción hidráulica que ocurre en zonas próximas a los desfuegos de fondo, fenómeno que solo ocurre en este sector y no así en el resto del embalse y es así que se determinó y se comparó el porcentaje de pérdida de volumen de almacenamiento del embalse en su totalidad versus el área de estudio con la información correspondiente a los años 2013, 2016 y 2019, evidenciando la diferencia de tal proceso en los dos espacios analizados (23.04% - 14.61%), (24.47% - 16.2%) y (26.66% - 17.71%) respectivamente, lo que se afirma que el embalse tiende a colmatarse mucho más rápido en comparación al área de estudio, es decir, que cuando el delta de sedimento llega al cuerpo de la presa, se podrá afirmar que el embalse concluye con la vida útil.

### **Del análisis de la variación temporal y espacial de la distribución de sedimentos en el sector de estudio paramento aguas arriba de la presa San Jacinto**

- ✓ Desde la puesta en operación el embalse de San Jacinto, la variación temporal en los análisis anteriormente realizados, se evidencia 3 fenómenos en diferentes lugares dentro del área de estudio donde el comportamiento sedimentario es diferente por la influencia de la ubicación de la ataguía.
- ✓ Si se analiza los taludes del área de estudio, éstos tienden a variar constantemente ya sea por erosión o sedimentación, en zonas aguas arriba de la ataguía, la variación del sedimento es de manera progresiva, es decir, se produce sedimentación en forma laminar excepto en el periodo 2018-2019 donde se produjo erosión, lo que no ocurre aguas abajo es que la morfología sub acuática tiende a variar todo el tiempo, no se establece un patrón de variación ya que es una zona propensa a remoción sedimentaria.

### **Del análisis de la variación de niveles de sedimentos en el sector de la presa San Jacinto**

- ✓ En este apartado, se hizo un análisis de la variación de niveles de sedimento a partir del trazo de un perfil longitudinal perpendicular al eje del cuerpo de la presa, por el grado de precisión, confiabilidad y con fines de comparación, se utilizó la información de mediciones batimétricas de los años 1989, 2016, 2018 y 2019.
- ✓ En el periodo 2016-2018, como se muestra en la Figura 5.27, se identifica dos fenómenos bien diferenciados por efecto de la ataguía, es decir, que el proceso sedimentario aguas arriba del ataguía sigue el típico patrón de colmatación con alturas que varían entre 0-1 metros, por otro lado, se observa que la pendiente del terreno es mínima con tendencia a ser casi plana, lo que no ocurre aguas abajo de la estructura, se evidencia que la pendiente del terreno es mucho mayor, con variación de los niveles de sedimento generándose

zonas de erosión dentro del cono de remoción hasta de 2 metros en zona próxima a la compuerta de fondo.

- ✓ En periodo 2018-2019 como muestra en la Figura 5.28, el perfil longitudinal muestra que el nivel de sedimento de la medición batimétrica del año 2019 es inferior a la medición del año 2018 a razón de 0-0.2 metros aguas arriba y alturas desde 1-2 metros aguas abajo en la entrada principal de las compuertas de fondo, lo que indica que hubo un fenómeno de erosión dentro del área de estudio, la pendiente del fondo del terreno tiende a ser de características similares al periodo anteriormente descrito.
- ✓ El periodo 1989-2019 cuando embalse atraviesa los 30 años de su vida útil, se presenta el proceso evolución en niveles de sedimento desde su puesta en operación hasta la actualidad, en la Figura 5.29 se evidencia zonas donde se tiene alturas de sedimentos que rondan desde los 4.5-10 metros, además, una pendiente del terreno de 4% aguas arriba de la ataguía y alturas entre 10-3 metros que corresponden a una pendiente del 35% en el sector comprendido entre la ataguía y las compuertas de fondo.

### **Del análisis de la influencia de la ataguía en el funcionamiento de las compuertas de fondo**

- ✓ Mediante el análisis comparativo de secciones transversales 0+005 y 0+010 de la información de mediciones batimétricas a detalle de los años 2016, 2018 y 2019, se ha identificado una zona con mayor intensidad de procesos de erosión/sedimentación hasta de 4 metros en elevación debido a remoción hidráulica en la denominada zona crítica del margen derecho de la presa de San Jacinto, este fenómeno no sucede en la compuerta del margen izquierdo donde el cambio de la morfología no se da con la misma intensidad por la falta de operatividad , confirmando que la compuerta de mayor funcionalidad es la del margen derecho, y esto se corrobora mediante la

Tabla 3.6 del registro de apertura de compuertas de fondo en la presa de San Jacinto.

- ✓ La ubicación de la ataguía no influye en el funcionamiento de las compuertas de fondo, el fenómeno de la distancia succión y/o remoción está en función al cono de influencia que se genera, cuyas características depende del tipo de sedimento y el caudal de salida para diferentes aperturas, este fenómeno se observa en las diferentes secciones de corte, los niveles correspondientes a las curvas de nivel de las últimas dos batimetrías están por encima de la cota de la cresta de la ataguía.

#### **Del análisis de la influencia de la ataguía en la operación de las compuertas de fondo**

- ✓ En proximidades al ingreso de los desfogues de fondo como indica la vista lateral del sector de estudio en la Figura 5.31, el nivel de sedimentos en la entrada al túnel se encuentra a 1856 m.s.n.m. según información batimétrica actual de abril del 2019, que, en comparación con el nivel de la solera del túnel del desfogue de fondo ubicada a 1852 m.s.n.m., 4 metros de altura de sedimento se encontraría impidiendo la libre operación de las compuertas de fondo (compuerta vagón y compuerta sector) en caso que no se realizaría aperturas.
- ✓ El área de color rojo de la Figura 5.31, se carece de información al momento de poder dar un resultado de la presencia de material sedimentario que obstruya la libre operatividad de la compuerta sector.
- ✓ En cuanto a la compuerta vagón, su uso se encuentra limitado sólo a ocasiones eventuales, al mantenerse izada o abierta, el sedimento que llega hasta el pie del cuerpo de la presa ingresa al túnel del desfogue y se dirige aguas abajo hasta chocar con la compuerta sector.
- ✓ Las operatividades de las compuertas de fondo se encuentran en riesgo por el alto grado de colmatación por la que atraviesa el sector de estudio, y no así por una posible influencia de la ataguía, sino más al contrario, sirvió como

una trampa atrapa sedimento el cual impidió la llegada de sedimento a las compuertas de fondo los primeros años desde su puesta en operación, en la actualidad, la evolución de los niveles de sedimentación, en el lugar donde se ubica esta estructura, se formó un punto de quiebre en la pendiente del fondo, lo que originó la formación de una pendiente elevada que facilita el movimiento de las partículas sedimentarias hacia los desfogues de fondo, evitando la colmatación y por ende manteniendo un constante flujo en el túnel de conducción.

### **Del análisis de la influencia de la ataguía en el cono de influencia de las compuertas de fondo**

- ✓ La remoción sedimentaria que se presenta en las zonas próximas a la ataguía, depende de la operación de las compuertas, que, mediante el análisis de la información de las batimetrías del año 2016, 2018 y 2019, se dedujo que la distancia de remoción o influencia se encuentra en un rango comprendido entre los 20-29 metros, además de una altura de desnivel cónica de 7 metros y el ángulo de reposo frontal de aproximación se encuentra entre los 24% y 32% tratándose de suelo fino no consolidado.

### **Del análisis de la vida útil y la colmatación del embalse de San Jacinto**

El concepto de vida útil no es preciso, en este caso específico de estudio en el embalse de San Jacinto, se analizará la vida útil bajo el concepto que se describe a continuación:

El concepto generalizado dice, que la vida útil del embalse se termina cuando la cantidad ocupada por el sedimento es suficiente para evitar que este sirva al propósito que se le destina. En éste sentido, se podría calcular la vida útil del embalse de San Jacinto, hasta el momento en que haya una cantidad de sedimentos que el volumen disponible, ya no permita generar energía eléctrica en un mes de la época crítica.



El cálculo para determinar los años de vida útil, se basará en la afirmación que la presa finaliza su ciclo de servicio cuando más del 80% de su capacidad ha sido colmatada (Gómez Navarro, 1958).

- a) El estado actual del sedimento según información de batimetrías.
  - Los sedimentos acumulados en el embalse de San Jacinto en el periodo de operación de 1989-2019, transcurridos 30 de los 50 años de vida útil, se depositaron aproximadamente  $16,378,160.03 \text{ m}^3$  de sedimento los mismos que representan una pérdida de capacidad de almacenamiento del 26.66%.
- b) Proyección sedimentaria con información topobatimétrica
  - Con la información de las batimetrías realizadas en el periodo 1989-2019 (curva altura vs volumen) se calibró una ecuación con el fin de proyectar el proceso de colmatación a partir de información medida, donde se tiene como resultado que en el año 2039 año en que se da como fin de la vida útil, el embalse se encuentra colmatado al 35.72% del volumen total.
- c) Análisis de la acumulación del volumen muerto
  - La vida útil del embalse llegó a su fin aproximadamente en el año 2011 cuando el volumen muerto de diseño  $13.44 \text{ Hm}^3$  se vio superado, en la actualidad hay  $8,317,160.03 \text{ m}^3$  más que lo previsto.
  - Si bien la vida útil del embalse llegó a su fin en el año 2011 donde se supone que el sedimento llegaría al nivel mínimo de operación (cota 1871.7 m.s.n.m.), en la actualidad, la presencia de sedimento en la obra de toma de San Jacinto ronda los 1866 m.s.n.m. es decir a 2 metros sobre la solera de ingreso a la bocatoma y a 5.70 metros del nivel mínimo de operación.
  - Teóricamente la obra de toma debería encontrarse colmatada ya desde el año 2011, sin embargo, no es así debido a que la deposición sedimentaria en un embalse no es de forma plana, sino en forma de deltas progresivos en las entradas de los ríos al embalse y dada la circunstancia la obra de toma se encuentra al final del embalse.

d) Análisis de la tasa de sedimentación anual

- Considerando la escasa cantidad y calidad de la información, el método utilizado para la predicción de sedimento, la tasa anual de sedimentación calculada en pre factibilidad (268,700 m<sup>3</sup>/año), no se aproxima ni en absoluto a la realidad.
- Partiendo de la información de Tasa media anual de sedimentación según información de batimetrías se obtuvo un valor promedio de 545,938.668 m<sup>3</sup>/año.
- En la actualidad se realizó un recálculo con fines comparativos de la tasa de sedimentación anual utilizando el modelo de Djorovic donde se tiene 769005.81 m<sup>3</sup>/año.
- La vida útil de un embalse depende de manera directa de la precisión de esta variable, el reflejo del problema que atraviesa San Jacinto puede ser producto de estos valores, como se observa anteriormente la tasa de sedimentación con la que se diseñó este embalse no se parece nada a la realidad, siendo un número demasiado subestimado.
- La tasa de sedimentación recalculada a pesar de que está sobreestimada con respecto a la tasa media obtenida por mediciones en campo (batimetrías) tiene más coherencia e incluso es un valor cauteloso si se lo ve por el lado de la seguridad nos prolongaría la vida del embalse.

e) Análisis de la vida útil del embalse

- Si se analiza la tabla de cálculo de la vida útil, el embalse de San Jacinto en 77 años de operación se verá colmatado al 80% de su volumen total.

f) Caracterización del embalse desde el punto de vista sedimentario

- La presa de San Jacinto según el porcentaje de pérdida de almacenamiento registrado en el periodo 1989-2019, se caracteriza como una de las presas de ALTO nivel de sedimentación.

## **6.2. Recomendaciones**

Implementar políticas de operación continua a manera de reducir el proceso de colmatación por la que atraviesa el sector de la presa y el embalse en su conjunto.

Realizar un dragado en la zona próximas al desfogue de fondo y el canal de aproximación, para prolongar la distancia del cono de influencia con el fin de aumentar la efectividad de remoción de sedimentos.

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

Realizar mediciones batimétricas del sector de manera anual como así en los futuros levantamientos batimétricos de todo el embalse, se realicen perfiles de medición de profundidades en inmediaciones del cuerpo de la presa como medidas de control del estado de colmatación de las compuertas de fondo para garantizar el funcionamiento y operatividad.

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 sólo los niveles de sedimentos sino también el comportamiento de la cuenca y la dinámica del embalse.

Implementar estaciones de monitoreo de sedimentos al embalse de san Jacinto para tener información verídica de datos medidos con visión a orientar a alertas tempranas respecto al fenómeno de la colmatación para la toma de previsiones ante problemas a futuro, como es el caso de la colmatación prematura de la obra de toma.