

CASO PRÁCTICO

Aplicación de una metodología simplificada para estimar las curvas de capacidad de embalses

Santiago A. Ochoa-García^{a,b*}

^aUnidad Académica de Ingeniería Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca, Av. de las Américas y Humboldt, Cuenca, Ecuador.

^bUrban and Earth Data Science Research Group.

Resumen: En la gestión de los volúmenes de regulación del recurso hídrico proyectados para una variedad de beneficios (aprovechamientos hidroeléctricos, riego, agua potable, entre otros), es imprescindible calcular las variables morfométricas de los embalses para anticipar cambios en su morfología y predecir cómo estos cambios podrían afectar el aprovechamiento proyectado. En este documento, tomando en consideración los conceptos fundamentales del Cálculo Integral, se presenta el desarrollo de una metodología innovadora para obtener las curvas Cota-Volumen y Cota-Área en embalses; la metodología fue formulada en lenguaje de programación R con la ayuda de herramientas de información geográfica. Se ha logrado una optimización computacional para el procesamiento de las variables de nivel, área y volumen de un cuerpo de regulación con respecto a la utilización de metodologías tradicionales. Para validar la herramienta desarrollada se obtuvieron las curvas de capacidad del volumen de regulación del embalse Minas - San Francisco ubicado al sur de la república del Ecuador. Este embalse fue diseñado para desalojar sus sedimentos con procesos de lavado. Este hecho ha motivado el monitoreo continuo de las condiciones morfológicas del embalse para planificar los procesos de mantenimiento por la pérdida del volumen asociado a los depósitos de partículas provenientes de sus tributarios. Además, se aplicó un análisis basado en curvas wavelets a los modelos digitales de elevación obtenidos con técnicas LiDAR y ecosonda batimétrica, para evidenciar los procesos de sedimentación que ocurren en este cuerpo de regulación.

Palabras clave: cota, volumen, área, sedimentación.

Application of a simplified methodology to estimate reservoir capacity curves

Abstract: In the management of the regulation volumes of the water resource projected for a variety of benefits (hydroelectric uses, irrigation, drinking water, among others), it is essential to calculate the morphometric variables of the reservoirs to anticipate changes in their morphology and predict how these changes could affect projected achievement. In this document, taking into consideration the fundamental concepts of Integral Calculus, the development of an innovative methodology is presented to obtain the Cota-Volume and Cota-Area curves in reservoirs; the methodology was formulated in R programming language with the help of geographic information tools. A computational optimization was achieved for the processing of the variables of level, area and volume of a regulation body respect to the use of traditional methodologies. To validate the developed tool, the capacity curves of regulation volume of the Minas - San Francisco reservoir located in the south of the Republic of Ecuador were obtained. This reservoir was designed to dislodge its sediments with washing processes. This fact has motivated the continuous monitoring of the morphological conditions of the reservoir to plan maintenance processes due to

To cite this article: Ochoa-García, S.A. 2021. Application of a simplified methodology to estimate reservoir capacity curves. *Revista de Teledetección*, 58, 105-118. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15303>

* Corresponding author: santiago.ochoa@ucacue.edu.ec

the loss of volume and to the deposit of particles from its tributaries. In addition, an analysis based on wavelets curves was applied to the digital elevation models obtained from LiDAR techniques and bathymetric echo sounder to demonstrate the sedimentation processes that occur in this body of regulation.

Key words: height, volume, area, sedimentation.

1. Introducción

En el proceso de administrar los volúmenes de regulación y almacenamiento de los recursos hídricos para una variedad de beneficios (aprovechamientos hidroeléctricos, riego, agua potable, entre otros), es imprescindible estimar las variables morfométricas de los embalses para anticipar cambios en su morfología y predecir cómo estos cambios en el tiempo podrían afectar el aprovechamiento del recurso; esta información presentada de manera oportuna, aumenta las posibilidades de mitigar cualquier impacto indeseable, en base a la planificación de los proyectos que pueden ser llevados a cabo con una variedad de técnicas de gestión que dependerán de la naturaleza del aprovechamiento (Hakanson, 1981).

Las partículas de sedimento, producto de la erosión en una cuenca hídrica, se transportan a lo largo del río con el flujo de agua. La construcción de una presa para regulación provoca la obstrucción del flujo y, por lo tanto, una reducción considerable de la velocidad en el embalse que causa sedimentación y genera una reducción de la capacidad de almacenamiento que afecta la vida útil del cuerpo de regulación. La cuantificación de los depósitos de sedimentos en un embalse es necesaria para una gestión eficaz de los embalses y de las cuencas aportantes (Patil y Shetkar, 2016).

Con la información batimétrica disponible, es necesario construir las curvas Cota-Volumen y Cota-Área para estimar la capacidad del embalse, de manera que se pueden planificar posibles medidas para controlar los fenómenos de sedimentación como lo son el dragado mecánico o el lavado de un embalse que ha sido planificado para estos propósitos. En este contexto, existe una gran variedad de herramientas computacionales para estimar el volumen y el área de un embalse en base a su batimetría y dada una cota de nivel determinada: las herramientas de diseño asistido

tipo CAD (Yakubu et al., 2015), los sistemas de información geográfica (Venkatesan et al., 2012; Wernly et al., 2016) y de ciencia de datos (Fuska et al., 2017; Hollister y Stachelek, 2017).

Sin embargo, se destaca la importancia de la aplicación de metodologías computacionales en códigos abiertos que podrán ser mejoradas por los usuarios de acuerdo a las particularidades y resultados que se desean obtener. Estas metodologías permitirán optimizar los esfuerzos computacionales requeridos por los métodos tradicionales para procesar los modelos digitales de elevación y obtener las curvas de capacidad correspondientes.

En este documento se presenta una metodología simplificada, pero con precisión adecuada, para estimar las curvas Cota-Volumen y Cota-Área de cuerpos de regulación. Por otra parte, en base a un análisis de frecuencias dominantes de las formas de fondo del embalse Minas-San Francisco, se evalúan las áreas en las que se presentan mayor sedimentación en este cuerpo regulador. En este sentido, se han utilizado las librerías del lenguaje R denominadas “*sp*”, “*raster*” y “*fields*” para desarrollar las metodologías de cálculo para estimar las curvas de capacidad y el paquete “*Bedforms-ATM*” (Gutierrez et al., 2018) para el análisis de frecuencias de formas de fondo.

El objetivo principal de esta investigación es presentar el desarrollo de una metodología para estimar las variables morfométricas de volumen y área de cuerpos de almacenamiento y regulación del recurso hídrico.

Adicionalmente, los objetivos secundarios de la aplicación presentada en este documento serán: construir las curvas Cota-Volumen y Cota-Área que representan la capacidad de regulación del embalse Minas - San Francisco en base a la información de teledetección geomorfológica

disponible; estimar la tasa de sedimentación analizando las curvas de capacidad resultantes; establecer zonas de acumulación de sedimentos en base a una caracterización de las formas de fondo dominantes, evaluando la morfología del embalse con técnicas de análisis espectral basado en curvas *Wavelets*.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la zona de estudio

El embalse Minas–San Francisco se proyectó como el volumen regulador del aprovechamiento hidroeléctrico que lleva el mismo nombre y es administrado por la Unidad de Negocio CELEC SUR de la Corporación Eléctrica del Ecuador. Tiene como tributarios a los ríos Jubones y San Francisco. El proyecto está ubicado en el sur del Ecuador, entre las provincias del Azuay y El Oro (CELEC E.P., 2021).

El embalse está constituido por una presa de gravedad en hormigón compactada con rodillo y una central subterránea ubicada aproximadamente a 14 km de la presa, que está equipada con 3 unidades de generación tipo Pelton de eje vertical de 90 MW cada una (CELEC E.P., 2021). En la Figura 1, se presenta una fotografía del embalse Minas–San Francisco.

El cierre generado por la presa se ubica en la confluencia del río San Francisco con el río Jubones. El embalse formado permite operar la central con un volumen útil aproximado de 6 hm³ que está comprendido, aproximadamente, entre las cotas 790 y 780 m s.n.m. (CELEC E.P., 2021).

Las obras de la presa del embalse Minas San–Francisco han sido diseñadas para llevar a cabo mantenimientos periódicos por la metodología de lavado o *flushing*, y de esta manera evitar el azolvamiento progresivo a causa de la sedimentación. En este sentido, se destaca el desarrollo de metodologías para el procesamiento de la información morfológica obtenida con diferentes técnicas experimentales, con miras a una actualización continua de las curvas de capacidad para la regulación. Estos resultados son útiles para la toma de decisiones sobre la necesidad y periodicidad aproximada del mantenimiento para la evacuación de los sedimentos depositados.

2.2. Metodologías experimentales

El monitoreo batimétrico del embalse Minas–San Francisco se realizó tomando datos puntuales de la profundidad por medio de un ecosonda multi frecuencia Hydrotrac que ofrece la posibilidad de seleccionar una de las siguientes cuatro frecuencias mediante el cambio de tarjetas y



Figura 1. Presa y embalse del aprovechamiento Minas–San Francisco (CELEC E.P., 2021).

transductor: 33 kHz, 40 kHz, 200 kHz y 210 kHz (se monitoreó con la frecuencia estándar de 210 kHz); la georreferenciaron de los puntos se realizó con un sistema de posicionamiento global (GPS) DGPS Hemisphere que permitió una precisión de $\pm 0,01$ metros.

La metodología para el levantamiento se realizó de acuerdo a las guías de monitoreo documentadas por Wilson y Richards (2006), levantando los puntos con ayuda de un bote dirigido por transectos separados cada 20 metros. El levantamiento con esta técnica se puede observar en la Figura 2.

La técnica de monitoreo batimétrico con ecosonda aplicada para obtener los puntos detallados en la Figura 2, se basa en la medición de la profundidad del agua y el intervalo de tiempo requerido para que las ondas ultrasónicas viajen, a una velocidad conocida, desde un punto conocido a una superficie reflectante (Wernly et al., 2016).

Otra técnica utilizada para obtener un modelo digital del terreno previo a la inundación de la presa fue utilizando datos LiDAR de un sistema aéreo, con lo que se puede cartografiar rápidamente la

morfología del terreno. En la Figura 3 se presentan los resultados de las curvas de nivel obtenidas con el sistema LiDAR utilizado.

El equipo utilizado para obtener los datos LiDAR es el LiteMapper 5600, configurado con una frecuencia de escaneo de 50 kHz con lo que se ha obtenido una densidad aproximada de 1,35 puntos por metro cuadrado, desde una altura promedio de 500 metros desde el nivel del suelo.

2.3. Metodología de cálculo

Se describirá el procedimiento propuesto para estimar el volumen y área de un embalse dado un nivel o cota de referencia Z sobre el lecho del cuerpo de regulación. Para aplicar la metodología planteada es necesario calcular un Modelo Digital de Elevación (MDE) de los niveles del lecho del embalse y exportar estos resultados en formato de Código Americano Estándar para el Intercambio de Información o ASCII por sus siglas en inglés (*American Standard Code for Information Interchange*).

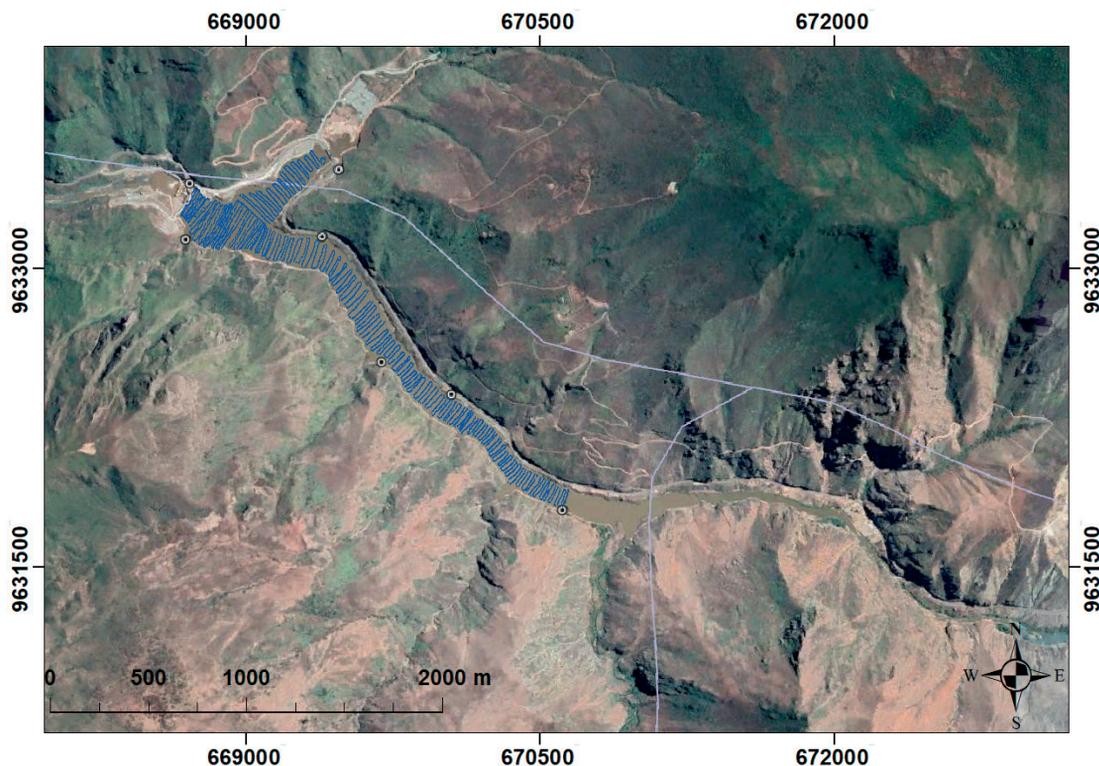


Figura 2. Monitoreo batimétrico con ecosonda en el embalse Minas-San Francisco año 2019.

Se aplicará el concepto de la suma de los volúmenes de los hexaedros formados por un nivel de referencia de la superficie libre Z y el fondo del embalse. Este cálculo se aproxima con mayor precisión al volumen real conforme la resolución de los elementos sea mayor (o de tamaño más pequeño) (Leithold, 1994). Por lo tanto, la expresión matemática para aplicar la aproximación del volumen del cuerpo de agua con un nivel o cota de referencia Z es:

$$V = \sum_{i=1}^n [(Z - z_i) \times (a \times a)] \xrightarrow{\text{Solo sí}} (Z - z_i) > 0 \quad (1)$$

Donde en la Ecuación (1), n es el número de elementos cuadrados de acuerdo al tamaño de discretización $a \times a$ y del dominio de estudio, z_i el nivel o cota media del terreno o fondo del embalse en cada uno de los elementos del MDE generado en formato ASCII. De manera similar, se puede aproximar el área del embalse tomando en cuenta un nivel o cota de referencia Z como:

$$A = \sum_{i=1}^n (a \times a) \xrightarrow{\text{Solo sí}} (Z - z_i) > 0 \quad (2)$$

Como se ha planteado en las Ecuaciones (1) y (2), sumatorios de los volúmenes y elementos de área solo se realizan si $(Z - z_i) > 0$ (se evita considerar los elementos que están fuera del rango propuesto por el nivel de referencia Z).

2.4. Análisis de formas de fondo mediante wavelets

Se plantea llevar a cabo una descripción detallada de la evolución espacial de la geometría de las formas de fondo del embalse estudiado, examinando las dimensiones dominantes de la geometría de fondo mediante un análisis espectral de frecuencias. Al analizar la cuantificación de la variabilidad de las formas de fondo de un flujo con superficie libre, la transformada discreta de Fourier podría evidenciar limitaciones al considerar señales con desviaciones significativas y con varias frecuencias dominantes que corresponden a procesos no lineales (Gutierrez et al., 2013). Para las señales que presentan múltiples escalas de variabilidad y frecuencia en el espacio o tiempo, puede ser de utilidad un análisis localizado de transformaciones con curvas tipo *wavelets* para discriminar las geometrías dominantes de las

variables analizadas (Singh et al., 2011). La transformación discreta con curvas tipo *wavelet* se define como la convolución del producto de la transformada inversa de Fourier (Catano-Lopera et al., 2009):

$$WT_{n(a,n)} = \sum_{k=0}^{N=1} \hat{x}_k \hat{\theta}^* (a\omega_k) e^{i\omega_k n \Delta x} \quad (3)$$

Donde en la Ecuación (3), $WT_{n(a,n)}$ es la transformada discreta con curvas tipo wavelets; con una escala con valor a , n es un índice de la localización espacial, \hat{x}_k la amplitud de la transformada discreta de Fourier de una secuencia x_n , ω_k es la frecuencia angular y $\hat{\theta}^*$ es una versión proyectada-escalada de la función *wavelet* base. El circunflejo y el asterisco de la función *wavelet* base $\hat{\theta}^*$ representan la parte real y compleja de la transformada discreta de Fourier de esta función (Torrence y Compo, 1998). La función de la familia de *wavelets* $\theta_{(a,n)}$ se define como:

$$\theta_{(a,n)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \theta \left(\frac{(n'-n)\Delta x}{a} \right) \quad (4)$$

En la Ecuación (4), n' es el valor del índice de localización proyectado de la señal analizada. La función de la familia de *wavelets* $\theta_{(a,n)}$ es un valor complejo y representa la familia de *wavelets* generada por traslaciones y dilataciones continuas de la función *wavelet* base (Torrence y Compo, 1998). En estudios realizados por Gutierrez et al. (2013), se presentó la discretización de las formas de fondo del río Paraná con la familia de *wavelets* tipo Morlet. El río Paraná presenta dimensiones de gran escala de la geometría del flujo similares a las que se pueden encontrar en el fondo en volúmenes de regulación y almacenamiento, a continuación, se presenta la función base Morlet para el análisis con *wavelets*:

$$\theta_{(\eta)} = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2} \quad (5)$$

En la Ecuación (5), η es el índice de localización adimensional y ω_0 es la frecuencia adimensional. La función *wavelet* tipo Morlet consiste en un plano de onda modulado por una función Gaussiana (Torrence y Compo, 1998). Con la familia de *wavelets* definida, el espectro espacial de energía del análisis con curvas *wavelets* se define como:

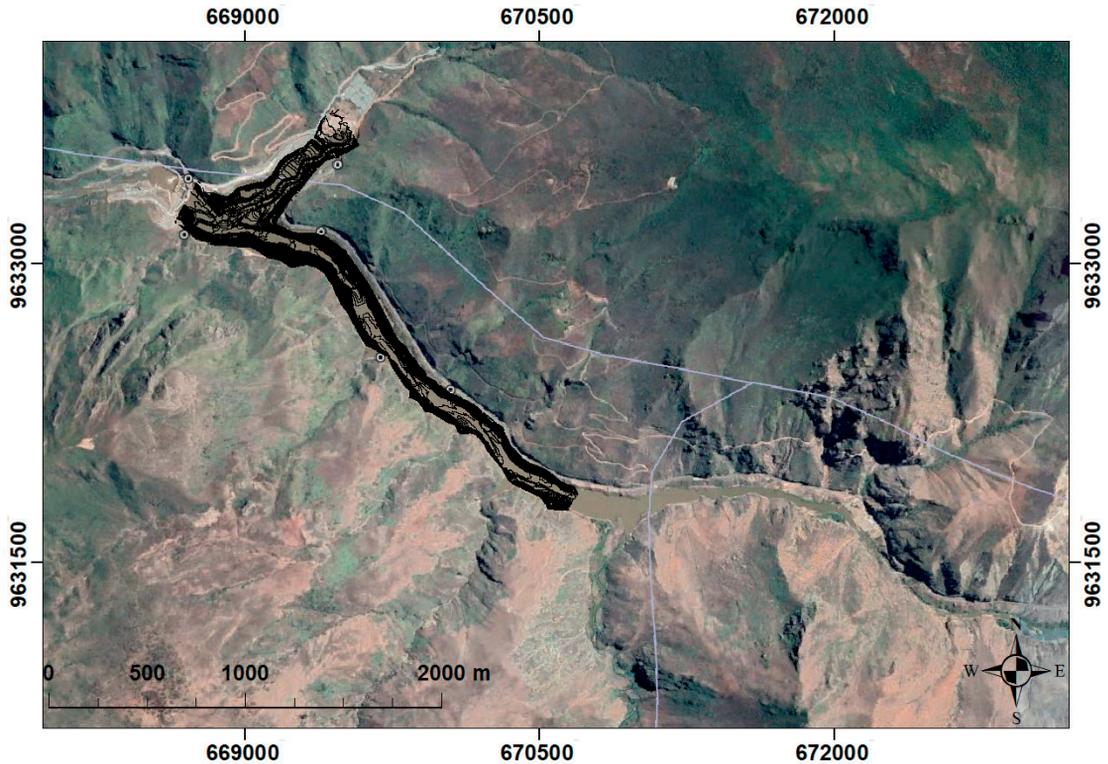


Figura 3. Monitoreo topográfico con sistema LiDAR en el embalse Minas-San Francisco año 2017.

$$|WT_{n(a)}|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} WT_{n(a)} WT_{n(a)} \quad (6)$$

Para la discretización de las dimensiones dominantes de las formas de fondo de un embalse, se aplica la metodología basada en la filtración por la correlación de bandas de frecuencias. Basado en esto, se ha desarrollado un algoritmo para rastrear las dimensiones dominantes a partir del análisis de las escalas de frecuencias que descompone la señal en bandas que representan las escalas dominantes de la señal original (Xu et al., 1994). El algoritmo usa la correlación espacial directa de la transformación *wavelet* alrededor de varias escalas para localizar jerarquías de las dimensiones dominantes:

$$Corr_{l(a',n)} = \prod_{i=0}^{l-1} WT_{n(a'+i,n)} \quad (7)$$

En la Ecuación (7), l es el número de escalas analizado en la correlación y a' se relaciona con el total de escalas de la transformada *wavelet* original con la siguiente expresión (Xu et al., 1994):

$$a' \leq a - l + 1 \quad (8)$$

En la discretización de frecuencias dominantes en base a curvas *wavelets* de señales de morfología fluvial, se ha evidenciado que la función Morlet ha presentado eficiencia y resultados uniformes al discretizar señales con periodicidades bajas; como lo son las formas de fondo tipo rizados, dunas y barras presentados en flujos con superficie libre (Gutiérrez et al., 2013).

Para estimar las alturas dentro de los espectros dominantes e identificar el tipo de las formas de fondo, se consideró la formulación desarrollada por Jerolmack y Mohrig (2005). Estos autores se basaron en estudios realizados por Flemming (2000) para obtener una relación entre la altura y la longitud de formas de fondo en flujos con superficie libre:

$$\Delta = 0,0677 \lambda^{0,81} \quad (9)$$

La Ecuación (9) se basó en 1491 observaciones de la geometría de fondo de flujos con superficie libre, que están en el rango de pequeños rizados hasta dunas

de grandes magnitudes, también denominadas barras. En la Figura 4, se presenta el esquema de las observaciones de formas de fondo construida.

3. Resultados y Discusión

Al finalizar la construcción de la presa del proyecto Minas–San Francisco, antes del primer llenado del embalse a finales del año 2017, se realizó un vuelo con un sistema LiDAR aerotransportado en toda el área del embalse. Posteriormente, semanas antes del primer vaciado del embalse para control de sedimentos, en mayo de 2019, se efectuó la primera batimetría con embalse lleno con una ecosonda multi frecuencia transportada en un bote. En la Figura 5, se presentan los MDE representados en coordenada relativas de los levantamientos del embalse realizados en el 2017 y 2019.

Los MDE presentados en la Figura 5 fueron construidos utilizando el método de interpolación determinístico ANUDEM que garantiza una buena calidad de MDE de tipo hidrológicos

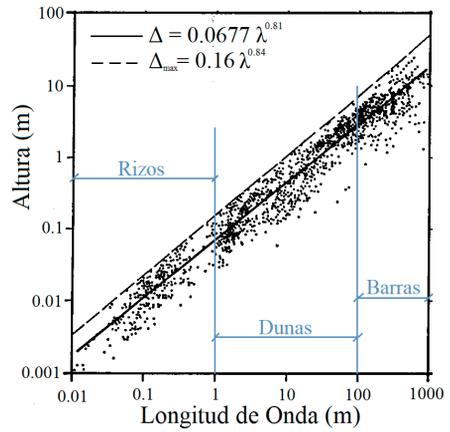


Figura 4. Relación entre la altura y longitud de formas de fondo en flujos con superficie libre (Flemming, 2000).

(Paredes et al., 2013) con una resolución de 1×1 metros. La longitud del eje de las ordenadas es de 1835 metros y del eje de las abscisas 2019 metros, el borde inferior izquierdo de los MDE presentados

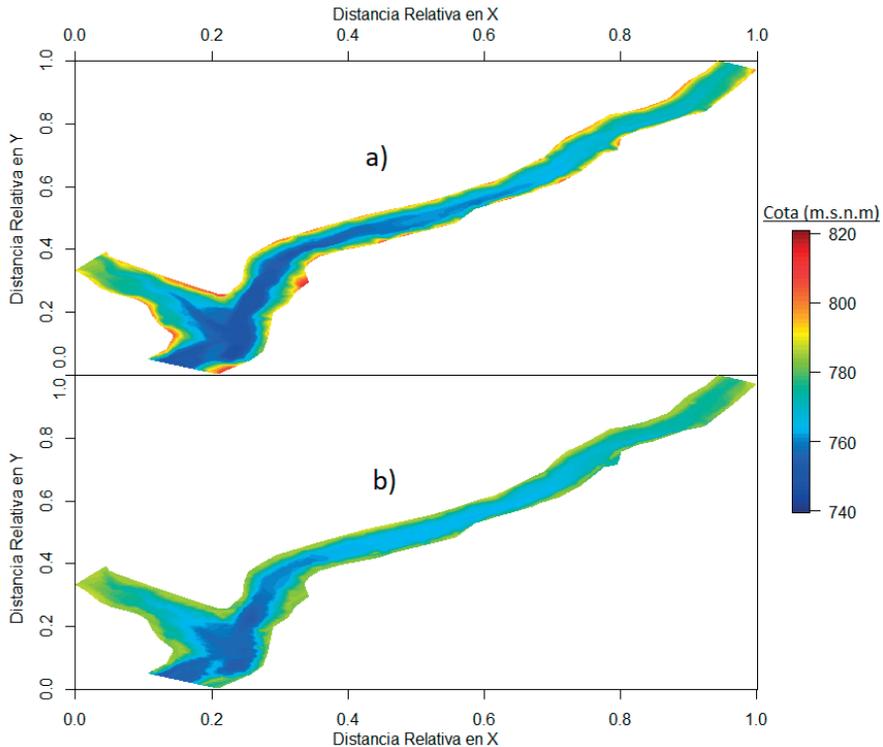


Figura 5. Modelo Digital de Elevación del Embalse Minas–San Francisco. a) Levantamiento LiDAR año 2017 b) Levantamiento con ecosonda año 2019.

está ubicado en las coordenadas $X=668645.34$; $Y=9631777.76$ metros (proyección WGS84 17S). La precisión del monitoreo al utilizar las dos metodologías mencionadas es diferente, siendo más denso el barrido de puntos con el sistema LiDAR respecto a la ecosonda; sin embargo, se considera que estas diferencias no serán importantes teniendo en cuenta que serán de menor orden de magnitud al compararlas con los errores propios de estimar grandes volúmenes de regulación con una técnica de fragmentación y suma de hexaedros de base. En la Figura 6 se presentan los diagramas de caja de las cotas de nivel de los modelos presentados en la Figura 5.

Como se puede observar en la Figura 6 los valores medios del diagrama de cajas de los MDE para los años 2017 y 2019 son similares. Sin embargo, existen diferencias considerables en los valores extremos: por un lado, la diferencia en los mínimos que estaría asociado con procesos de sedimentación después del llenado del embalse.

Por otro lado, la diferencia en los máximos estaría asociado con la interpolación en los bordes de los modelos debido a que con el sistema LiDAR se obtienen puntos de las laderas mientras que con la ecosonda se obtienen puntos batimétricos siempre bajo el nivel del espejo de agua.

En base a los MDE presentados se procedió a calcular el volumen y área de almacenamiento del embalse en función de las cotas de nivel correspondientes (Figura 7) con las curvas de capacidad del embalse en base a la topografía medida en el año 2017 y batimetría medida en el año 2019.

Las curvas Cota-Volumen presentadas en la Figura 7 han sido obtenidas con una regresión polinómica de segundo grado debido al buen ajuste del coeficiente de determinación ($R^2 \approx 1$). En estas expresiones la cota tiene unidades de m s.n.m. y el volumen de hm^3 . Se ha seleccionado esta regresión por ser la más simple que se ajusta

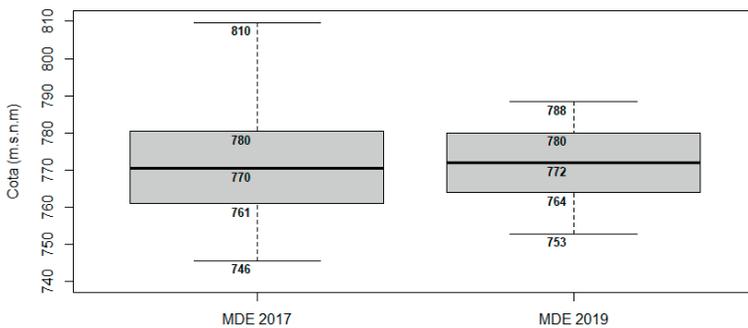


Figura 6. Diagramas de caja de los MDE de 2017 y 2019.

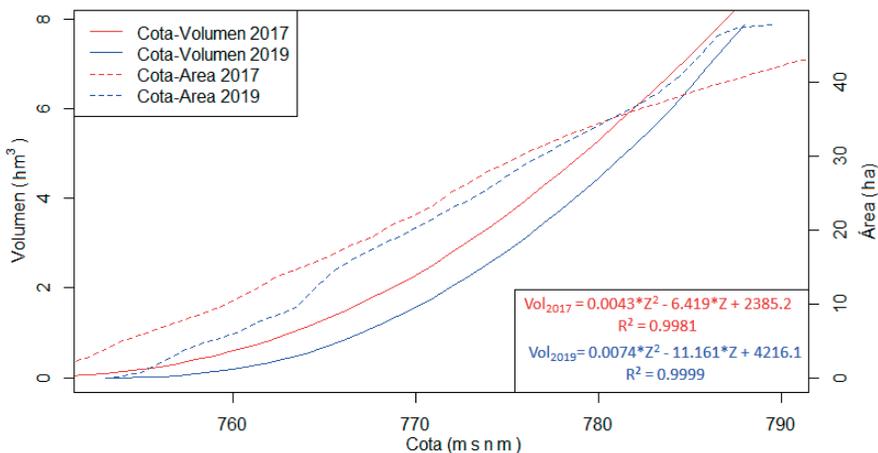


Figura 7. Curvas de capacidad obtenidas con los MDE correspondientes a los años 2017 y 2019 del embalse Minas–San Francisco.

a los valores de Cota-Volumen calculados. En embalses con más irregularidades se puede dar el caso de la necesidad de utilizar regresiones polinómicas de orden superior o inclusive dividir la curva con diferentes curvas para obtener ajustes de R^2 cercanos a 1. Como se puede verificar en la Figura 7, existe menor capacidad del embalse con la batimetría obtenida en 2019 respecto a la del 2017; concretamente en la cota 788 m s.n.m. se presenta una disminución aproximada del 8% del volumen total del almacenamiento, que corresponde a una tasa de sedimentación aproximada de $0,25 \text{ hm}^3/\text{año}$ en los primeros años de operación del embalse.

También, se puede observar en la Figura 7 que en los niveles superiores a la cota 780 m s.n.m. existe un aumento del área de la superficie libre de almacenamiento en 2019 respecto al 2017. Esta cuestión estaría relacionada con los movimientos de tierra o deslizamientos en los bordes, que son resultado de planos de deslizamiento producidos por el llenado del embalse y saturación de estas masas de suelo.

Los deslizamientos se vinculan al cambio de humedad del suelo que aumenta la presión de

poros y el peso del material. Esto ocasiona que la resistencia cortante se vea afectada disminuyendo la resistencia a deslizamientos y favoreciendo la inestabilidad al disminuir los esfuerzos efectivos del suelo causados por la saturación, provocando aceleración en los procesos de sedimentación del embalse.

Para identificar y cuantificar el nivel de sedimentación del fondo del embalse mediante un análisis espectral de las señales longitudinales basado en curvas *wavelets*, el objetivo es evaluar patrones dominantes en las dimensiones de las formas de fondo observadas. Para esto se extrajeron señales de la morfología del fondo, con resolución de un punto cada metro y se consideraron 20 ejes longitudinales separados cada 5 metros (Figura 8).

Los ejes longitudinales presentados en la Figura 8 tienen una longitud aproximada de 2500 metros, se inician aproximadamente a una distancia de 2 metros aguas arriba de la presa y están separados a una distancia de 5 metros entre sí. Las señales unidimensionales determinan las dimensiones del fondo del embalse de los MDE generados de acuerdo a los puntos levantados en 2017 y 2019. Con estas señales unidimensionales se ha

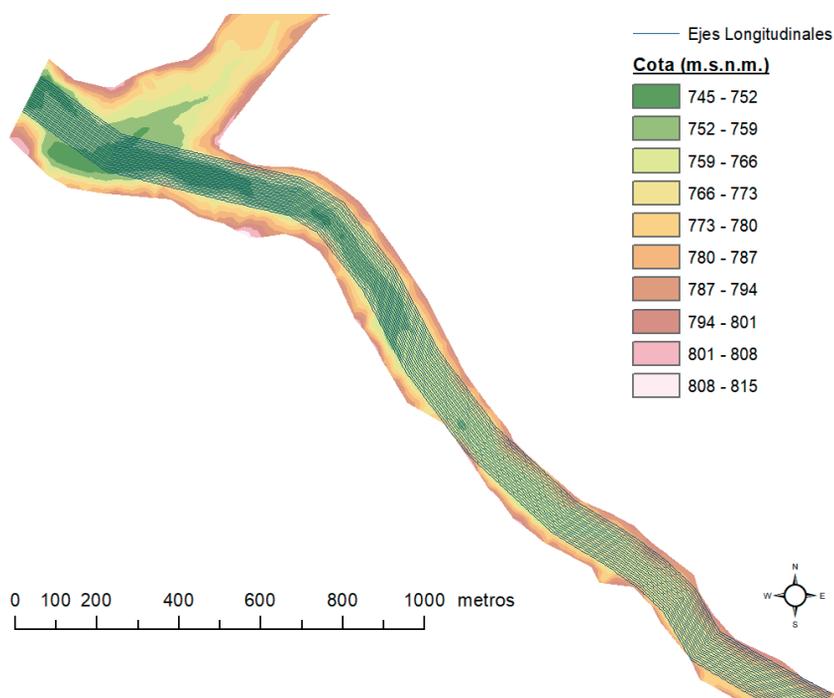


Figura 8. Ejes longitudinales de las señales de morfología de fondo para el análisis de frecuencias.

realizado un análisis de frecuencias considerando curvas *wavelets* tipo Morlet. Los resultados se presentan en la Figura 9 y Figura 10 para los MDE de 2017 y 2019, respectivamente.

Los espectros presentados en la Figura 9 y Figura 10 corresponden a una señal en el centro del dominio del embalse. Sus características son similares en todas las señales de acuerdo al año analizado. Contrastando la parte c) de la Figura 9 y Figura 10, se observa que para la topografía de 2017 tiene formas de fondo con longitudes dominantes dentro del espectro $\lambda=100$ metros hasta $\lambda=1000$ metros; mientras que, el espectro de longitudes dominantes aumenta si se analizan las señales de la batimetría del año 2019, donde se presentan formas con longitudes en el orden de $\lambda=10$ metros hasta $\lambda=1000$ metros. La identificación de formas de fondo de menor magnitud está relacionada con la acumulación de partículas pequeñas. Esta conclusión se obtiene al tomar en cuenta los estudios de factibilidad del proyecto Minas–San Francisco (PROMAS, 2013), donde se estimó que el mayor porcentaje de sedimentos transportados en el tramo del proyecto del río Jubones son partículas que se componen

de arenas y limos, con diámetros medios de entre 0.0056 a 0.19 milímetros.

También, analizando los resultados de los espectros de frecuencias presentados en la parte b) de la Figura 9 y Figura 10, se observa que las áreas de los primeros 1000 metros desde la presa del proyecto es en donde se presenta mayor variabilidad de las longitudes dominantes de las formas de fondo y, por lo tanto, en estas zonas se presentará también una mayor sedimentación. Este resultado podría estar relacionado con las bajas velocidades por el estancamiento del flujo en esta zona del cuerpo de regulación, que permiten la generación de depósitos de partículas con diámetros de pequeña magnitud. Esta cuestión debe ser evaluada en el monitoreo de los procesos de mantenimiento por lavado que se realizarán periódicamente en el embalse.

Una cuestión importante al implementar una nueva metodología de cálculo es validar su precisión con respecto a metodologías tradicionales. En este sentido, se ha realizado un contraste de los resultados de capacidad volumétrica del embalse Minas–San Francisco del 2019, obtenidos considerando resoluciones espaciales

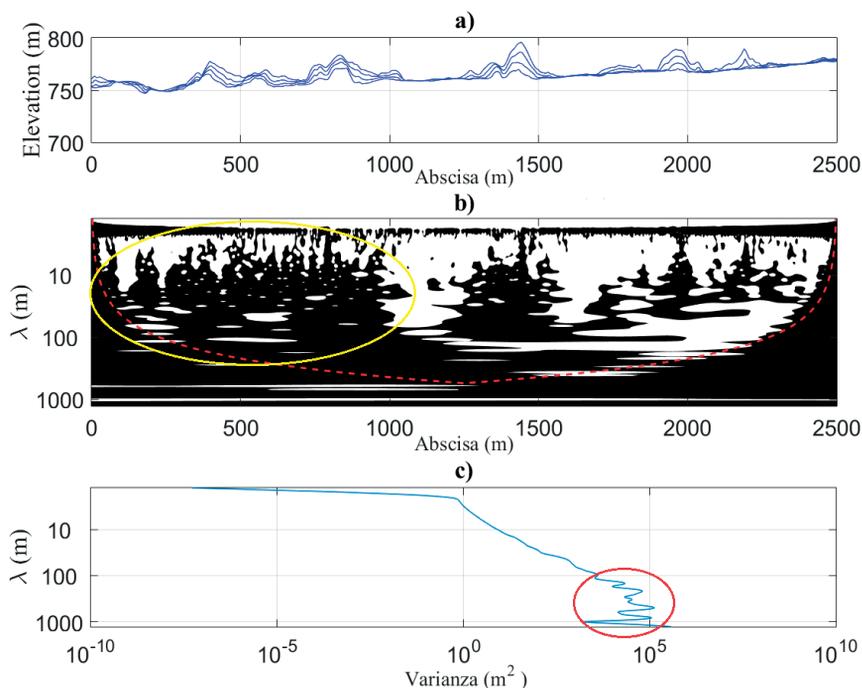


Figura 9. Análisis de frecuencia del MDE de 2017: a) Señales longitudinales del embalse, b) Espectro unitario de energía con una curva *wavelet* tipo Morlet y c) Espectro global de energía con una curva *wavelet* tipo Morlet.

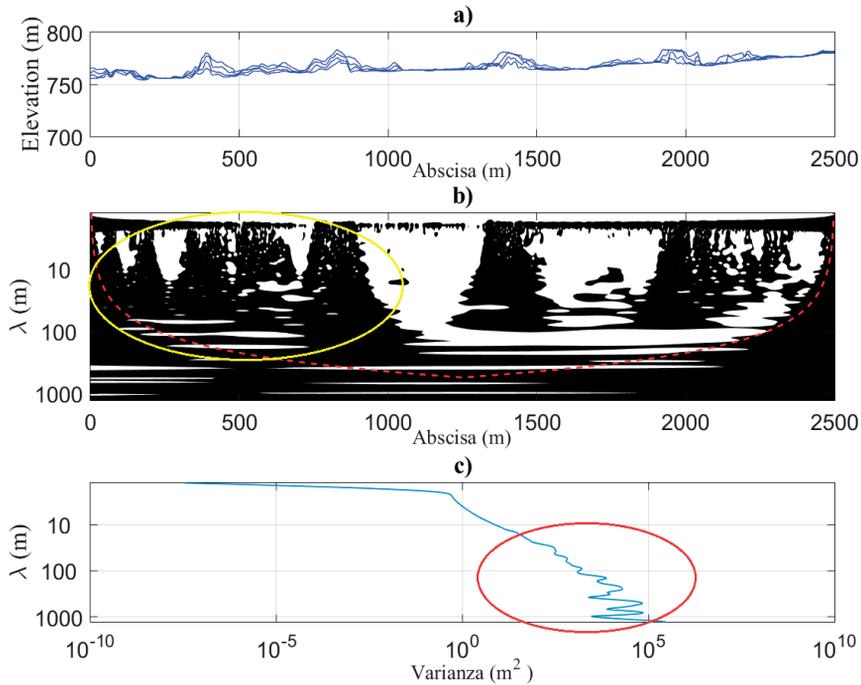


Figura 10. Análisis de Frecuencia del MDE de 2019: a) Señales longitudinales del embalse, b) Espectro unitario de energía con una curva *wavelet* tipo Morlet y c) Espectro global de energía con una curva *wavelet* tipo Morlet.

de 20×20 metros, 10×10 metros y 1×1 metros; y también se ha considerado el volumen estimado con la herramienta de diseño asistido Civil CAD mediante la evaluación de los volúmenes sólidos cortados con las superficies de elevación planteadas (Figura 11).

Como se puede verificar en la Figura 11, los volúmenes calculados con la metodología propuesta con resoluciones de igual o menor magnitud que 20×20 metros se encuentran

en el mismo orden de aproximación que con resoluciones mayores y con valores similares de Curvas de capacidad Cota-Volumen que se observaron utilizando otras herramientas como Civil CAD, con diferencias menores al 5%. Estos resultados validarían los resultados obtenidos en la metodología propuesta en este trabajo.

Dentro del análisis espectral de frecuencias de las formas de fondo, en base a los resultados presentados en la Figura 9 y Figura 10, se identificaron los

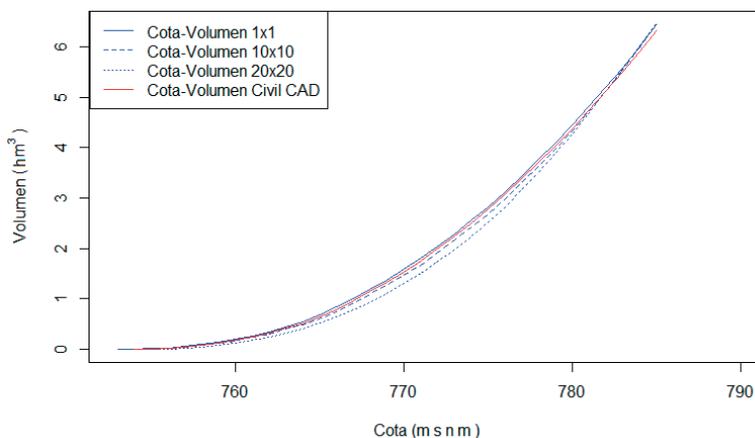


Figura 11. Curvas de capacidad Cota-Volumen considerando el MDE de 2019 calculadas con diferentes metodologías y resoluciones espaciales.

espectros de las longitudes dominantes del lecho del embalse. Sin embargo, es necesario estimar las alturas dentro de los espectros dominantes para identificar el tipo de las formas de fondo que se han observado en el embalse Minas–San Francisco.

De acuerdo con la Ecuación (9), teniendo en cuenta los resultados de la Figura 4 y los resultados del análisis espectral presentado en la Figura 9 y Figura 10, se estima que la topografía de 2017 presenta formas de fondo con un espectro de alturas dominantes de entre $\Delta=2$ metros hasta $\Delta=18$ metros. El espectro de alturas dominantes que presenta la batimetría del año 2019 está entre $\Delta=0.4$ metros hasta $\Delta=18$ metros. Es decir, que las formas de fondo dominantes según la topografía de 2017 son de tipo barras y para la batimetría de 2019 el espectro de formas de fondo dominantes aumenta, observándose formas de fondo tipo dunas hasta barras. Sin embargo, para el análisis realizado se debe tomar en cuenta que los MDE con resolución espacial de 1×1 metros dificultan la localización de formas de fondo de menor magnitud como son los rizos que tienen dimensiones dominantes en el orden de

centímetros o milímetros. Esto se puede observar con la discretización de las escalas dominantes de las formas de fondo de las señales analizadas que se presentan en la Figura 12 y Figura 13.

Como se puede verificar en la Figura 12 y Figura 13, la discretización de señales con magnitud de rizos para los MDE analizados arrojan elevaciones en el orden o menores a 1 centímetro, cuestión que debe asociarse a la posible omisión de las formas de fondo de magnitudes pequeñas debido a la resolución espacial de los MDE construidos (1×1 metros). Para una correcta discriminación de estas formas de fondo de orden inferior, se recomienda un estudio con un dominio a menor escala y con alta resolución de puntos batimétricos para construir MDE con el detalle suficiente que permita discretizar las posibles formas de fondo tipo rizos formadas en el lecho del cuerpo de regulación.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología para estimar las variables morfométricas del volumen y

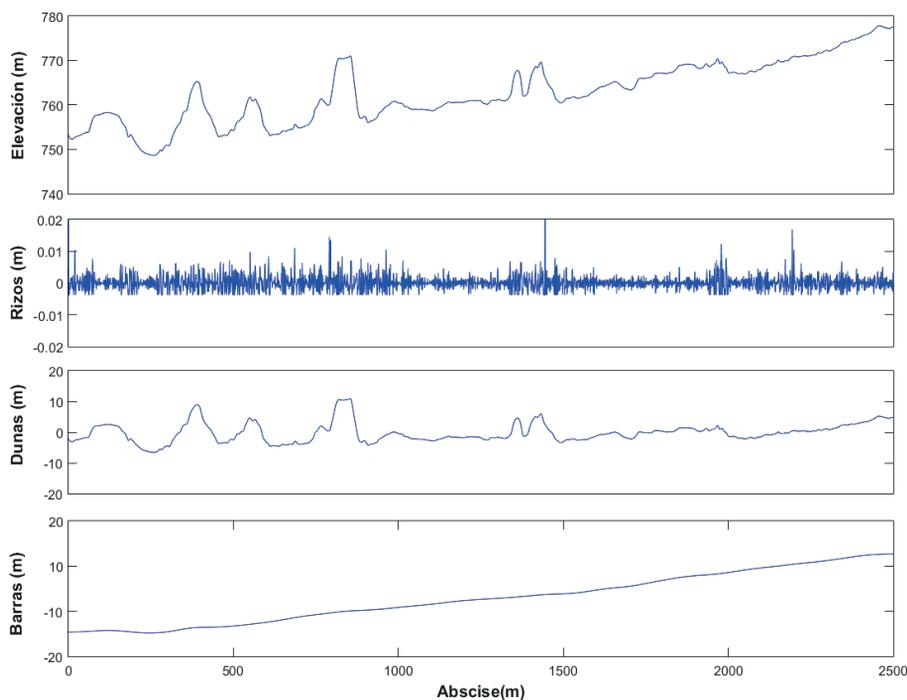


Figura 12. Discretización de las formas de fondo tipo rizos, barras y dunas considerando el MDE de 2017.

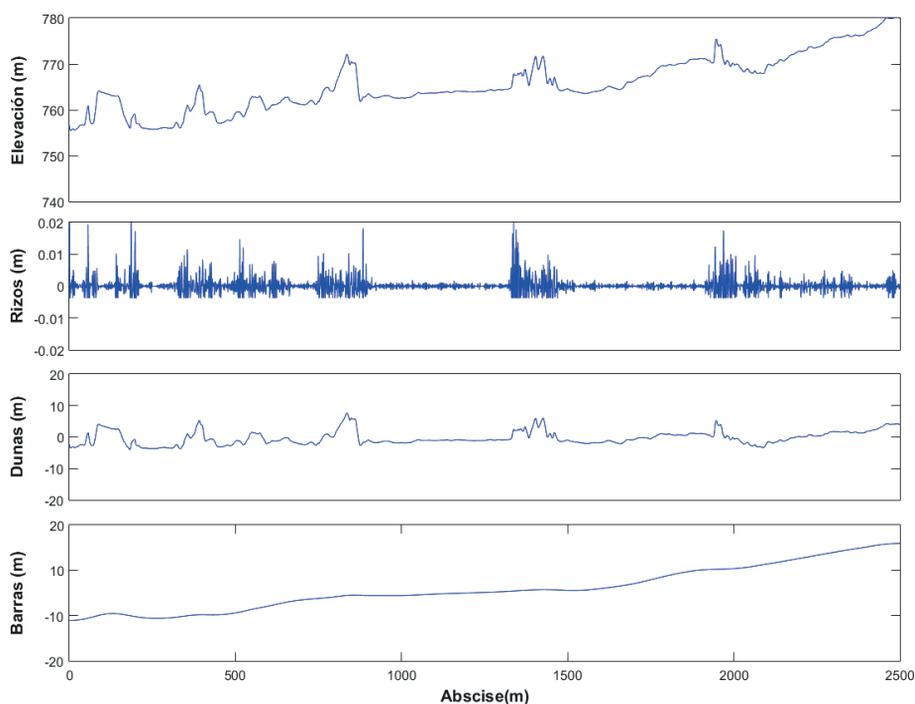


Figura 13. Discretización de las formas de fondo tipo rizos, barras y dunas considerando el MDE de 2019.

área superficial de cuerpos de regulación. La metodología aplicada en este trabajo está basada en el concepto de que la suma de los volúmenes de los hexaedros formados por un nivel de referencia de la superficie libre y el nivel dado por un Modelo Digital de Elevación (MDE) se ajusta a valores reales y con mayor precisión conforme la mayor resolución espacial de los MDE considerados. Se destaca la importancia del desarrollo de una metodología sencilla para estimar las curvas Cota-Volumen y Cota-Área de un cuerpo de regulación, resultados que permitirán evaluar los procesos de sedimentación que puedan ocurrir en el embalse a lo largo del tiempo.

Se construyeron las curvas de capacidad Cota-Volumen y Cota-Área del embalse Minas-San Francisco, en base al monitoreo realizado en 2017 y 2019. Se evidenciaron procesos de sedimentación en el volumen de regulación y fenómenos de deslizamiento de los taludes de los márgenes del embalse para el periodo analizado.

Mediante un análisis espectral de las de formas de fondo con curvas *wavelets*, se identificaron las dimensiones dominantes del lecho del embalse en el orden de barras y dunas con formas de

fondo de menor magnitud al analizar el MDE de 2019 con respecto al de 2017. En este sentido, la principal limitación encontrada en este análisis es la resolución del monitoreo levantado con la ecosonda. Es probable que se puedan identificar formas de fondo de menor magnitud, si con la misma metodología se analizan modelos digitales de terreno levantados con un LiDAR batimétrico de alta densidad de muestreo.

Se estimó que la mayor cantidad de la sedimentación en el embalse Minas-San Francisco ocurre en los primeros 1000 metros desde la presa del proyecto, en su mayoría con partículas que se componen de arenas y limos con una tasa anual de sedimentación aproximada de 0,25 hm³/año en los primeros dos años de operación del embalse.

Agradecimientos

Se agradece a los funcionarios de la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC E.P.) por la información brindada para llevar adelante este proyecto de investigación.

Referencias

- Catano-Lopera, Y., Abad, J.D., Garcia, M.H. 2009. Characterization of Bedform Morphology Generated under Combined Flows and Currents Using Wavelet Analysis. *Ocean Engineering*, 36, 617–632. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.01.014>
- CELEC E.P. 2021. *Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador, Unidad de Negocio CELECSUR*. <https://www.celec.gob.ec/celecсур/>
- Flemming, B.W. 2000. *The Role of Grain Size, Water Depth and Flow Velocity as Scaling Factors Controlling the Size of Subaqueous Dunes*. Marine Sandwave Dynamics. Lille, France.
- Fuska, J., Kubinský, D., Weis, K., Lackóová, L., Pokrývková, J., Leitmanová, M., Panagopoulos, T. 2017. Area-Storage Capacity Curve of Historic Artificial Water Reservoir Ottergrund, Slovakia – Assessment of the Historical Data with the Use of Gis Tools. *Journal of Ecological Engineering*, 18(1), 48–56. <https://doi.org/10.12911/22998993/66237>
- Gutierrez, R.R., Abad, J.D., Parsons, D.R., Best, J.L. 2013. Discrimination of Bed Form Scales Using Robust Spline Filters and Wavelet Transforms: Methods and Application to Synthetic Signals and Bed Forms of the Rio Parana, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1400–1418. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20102>
- Gutierrez, R.R., Mallma, J.A., Nuñez-Gonzalez, F., Link, O.; Abad, J.D. 2018. Bedforms-ATM, an open source software to analyze the scale-based hierarchies and dimensionality of natural bed forms. *SoftwareX*, 7, 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2018.06.001>
- Hakanson, L. 1981. *A Manual of Lake Morphometry*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81563-8>
- Hollister, J., Stachelek, J. 2017. Lakemorpho: Calculating lake morphometry metrics in R. *F1000Research*, 6, 1718. <https://doi.org/10.12688/f1000research.12512.1>
- Jerolmack, D., Mohrig, D. 2005. Interactions Between Bed Forms: Topography, Turbulence and Transport. *Journal of Geophysical Research*, 110, F02014. <https://doi.org/10.1029/2004JF000126>
- Leithold, L. 1994. *The Calculus 7*. Interests International, Inc. ISBN 0-673-46913-1.
- Patil, R., Shetkar, R. 2016. *Prediction of Sediment Deposition in Reservoir Using Analytical Method*. *American Journal of Civil Engineering*, 4(6), 290–297. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20160406.14>
- Paredes, C.U., Salinas, E.E., Martínez, X., Jiménez, S.B. 2013. Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 82, 118–130. <https://doi.org/10.14350/rig.35906>
- PROMAS. 2013. *Estudio en modelo físico para el proyecto hidroeléctrico Minas - San Francisco. Informe Definitivo, Construcción y Calibración*. Universidad de Cuenca y Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador, Unidad de Negocio ENERJUBONES.
- Singh, A., Lanzoni, S., Wilcock, P.R., Foufoula-Georgiou, E. 2011. Multiscale Statistical Characterization of Migrating Bed Forms in Gravel and Sand Bed Rivers. *Water Resources Research*, 47, W12526. <https://doi.org/10.1029/2010WR010122>
- Torrence, C., Compo, G.P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *American Meteorological Society*, 79(1), 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2)
- Venkatesan, V., Balamurugan, R., Krishnaveni, M. 2012. Establishing Water Surface Area-Storage Capacity Relationship of Small Tanks Using SRTM and GPS. *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. Energy Procedia* 16, 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.186>
- Wernly, J.F., Zajd, H.J., Coon, W.F. 2016. *Bathymetric survey and estimation of storage capacity of lower Sixmile Creek reservoir, Ithaca, New York*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1157. <https://doi.org/10.3133/ofr20161157>
- Wilson, G.L., Richards, J.M. 2006. *Procedural Documentation and Accuracy Assessment of Bathymetric Maps and Area/Capacity Tables for Small Reservoirs*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5208. <https://doi.org/10.3133/sir20065208>
- Xu, Y., Weaver, J.B., Healy, D.M., Lu, J. 1994. Wavelet Transform Domain Filters: A Spatially Selective Noise Filtration Technique. *IEEE Transactions on Image Processing*, 3(6), 747–758. <https://doi.org/10.1109/83.336245>
- Yakubu, M.L., Abdurrahman, U.T., Ahmed, M.T, Aliyu, A.S., Zango, M.U., Maihula, A. S. 2015. The Progressive response of Sahelian Dams to Sediment Intrusion: Case of Kano State Between 1976 and 2009. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1301–1306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1301>