

Estimación del volumen de agua en la represa La Esperanza (Manabí, Ecuador), utilizando batimetría y sistemas de información geográfica

Estimation of water volume in La Esperanza dam (Manabí, Ecuador), using bathymetry and geographic information systems

Francisco Javier Velásquez Intriago¹, Francisco Alejandro Alcántara Boza², Eric Cabrera Estupiñán³, Leonardo Sebastián Bazurto Meza⁴

¹⁻⁴ *Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Calceta, Ecuador.*

² *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.*

³ *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador.*

Recibido 10 de febrero 2023, recibido en forma revisada 10 de Mayo 2023, aceptado 13 de Mayo 2023, en línea 04 de junio 2023.

Resumen

El presente estudio consistió en la determinación del volumen de explotación en el embalse La Esperanza mediante el método batimétrico de posicionamiento 3D, utilizando ecosonda Garmin echoMAP™ en conjunto con la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG). Se acopló un modelo digital de elevación "DEM" de resolución 12,5 m x 12,5 m, descargado del satélite ALOS PALSAR para obtener el área y relieve topográfico digital de la cuenca. Además, se estimaron dos ecuaciones polinómicas en función del nivel, volumen y área del embalse, mediante un análisis de regresión por el que se obtuvo un volumen máximo de explotación de 428,64 Hm³ (cota 66 m.s.n.m.), con una extensión del espejo de agua de 2.348,55 ha. En conclusión, la determinación del volumen con dispositivos tecnológicos y software de construcción cartográfica es una parte clave del diagnóstico en la gestión del agua e imprescindible en el análisis para la correcta gestión del volumen embalsado en la represa La Esperanza.

Palabras clave: Embalse, Batimetría, gestión hídrica.

Abstract

This study consisted of determining the operating volume in La Esperanza reservoir through the bathymetric method of 3D positioning, using Garmin echoMAP™ echo sounder in conjunction with the application of geographic information systems (GIS). A digital elevation model "DEM" of resolution 12.5 m x 12.5 m, downloaded from the ALOS PALSAR satellite was coupled to obtain the area and digital topographic relief of the basin. In addition, two polynomial equations as a function of level, volume and area of the reservoir were estimated through a regression analysis by which a maximum operating volume of 428.64 Hm³ was obtained (elevation 66 m.a.s.l.), with a water mirror extension of 2,348.55 ha. In conclusion, the determination of the volume with technological devices and cartographic construction software is a key part of the diagnosis in water management and essential in the analysis for the correct management of reservoir volume in La Esperanza dam.

Keywords: Reservoir, bathymetry, water management.

Introducción

Los embalses ofrecen una variedad de servicios para el ecosistema, además de la prevención de inundaciones, preservación de la biodiversidad, regulación del flujo de los ríos, generación de energía hidroeléctrica entre otros; sin embargo, su adecuada gestión requiere de la evaluación de su morfometría (Ochoa, 2021; Ho y

Goethals, 2019). Proporcionar información de estos estudios, aumenta las posibilidades de éxito para la toma de decisiones en la planificación de proyectos, dependiendo de la naturaleza de la actividad (Liu et al., 2020).

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de nuevos dispositivos de posicionamiento,

* Correspondencia del autor:

E-mail: francisco.velasquezin@espam.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

especialmente el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), para la toma de datos batimétricos georreferenciados, que han sustituido los métodos tradicionales como la poligonización y la nivelación. Estos han sido reemplazados por datos espaciales debido a su precisión, exactitud, simplicidad en su operación y rapidez (Escalante, 2021; Giambastiani et al., 2020).

En la actualidad, los estudios se han centrado en la caracterización de variables como el cambio del nivel del agua, áreas de inundación y almacenamiento, mediante métodos batimétricos (GPS), estos métodos permiten crear mapas de un embalse, que muestran la distribución de profundidades en diferentes áreas, y son útiles para diversos propósitos (Ryan et al., 2020; Lin et al., 2020).

La información batimétrica permite a los gestores del agua e investigadores, monitorear y comprender los cambios en el ecosistema acuático por diferencias de nivel, además de analizar volúmenes, identificar áreas de erosión y azolvamiento para la gestión del recurso hídrico en la regulación, distribución y uso del agua (Muñoz et al., 2020; Zhu et al., 2019).

Una forma de determinar el volumen de un embalse es mediante la batimetría utilizando ecosonda y sistemas de información geográfica que permiten obtener ecuaciones polinómicas que describen la relación entre los niveles con respecto al volumen y/o área. La precisión dependerá de los dispositivos tecnológicos, calidad de datos y ajuste en el análisis de regresión (Hameed et al., 2022; Liu et al., 2020). Las ecuaciones polinómicas son útiles para esta aplicación porque moldean con cercana precisión la relación entre la profundidad del embalse con respecto a su volumen y/o área en un rango de valores, permitiendo establecer el volumen de almacenamiento o extensión del espejo del embalse en los diferentes niveles o cotas, constituyéndose en una herramienta valiosa para la gestión y planificación de los embalses (Hossen et al., 2022; Ochoa, 2021; Schwatke et al., 2020).

Materiales y método

La presente investigación se desarrolló en el embalse La Esperanza, enmarcada territorialmente en el cantón Bolívar, provincia de Manabí, en la costa de Ecuador. Se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica a través de un modelo de elevación digital para establecer cartográficamente el área y relieve digital de la cuenca aportante al embalse.

En la determinación del volumen del embalse, se usó el método batimétrico de posicionamiento 3D descrito por İlçi et al. (2019), cuyas coordenadas del fondo del embalse fueron recopiladas a través de una ecosonda de marca Garmin echoMAP™ CHIRP 72 CV, montada sobre una lancha a motor, a velocidad promedio de 10 km/h, mediante un plan de navegación con diferentes intervalos de longitud, cuyos datos cartográficos fueron procesados y acoplados a un modelo de

elevación digital "DEM" del área en estudio con resolución (12,5 m x 12,5 m) descargada del satélite ALOS PALSAR (<https://www.asf.alaska.edu/>), de acuerdo a Ngula y Chen (2019).

Los procesos descritos se efectuaron con el objetivo de obtener una nube de puntos (coordenadas), identificar el contorno de almacenamiento y delimitar la cuenca aportante del embalse. En el módulo ArcMap del software ArcGIS 10.4.1 se fusionó la nube de puntos extraídos del método batimétrico y los puntos del perímetro circundante del embalse, mediante procesamiento de coordenadas de nube puntos a redes irregulares de triángulos "TIN", desarrollando la actividad mediante la herramienta volumen de polígono en la opción terreno y TIN de superficie ubicado en la caja de herramientas de análisis 3D. Los insumos utilizados fueron el polígono y el archivo TIN de la cuenca en estudio (fig. 1 y 2) para el cálculo de volúmenes a diferentes niveles del embalse.

Finalmente, se utilizó el software Excel versión 2016, para obtener ecuaciones polinómicas del volumen y área del embalse en función de la cota, mediante un análisis de regresión. Esto se logró a partir de las áreas del embalse obtenidas en cada metro de profundidad, previamente determinadas mediante los procesos cartográficos aplicados.

Resultados y discusión

Las microcuencas de Membrillo, Carrizal, Bejuco, Cañas y La Esperanza son las áreas que tributan agua de precipitación por escurrimiento e infiltración al embalse La Esperanza (fig. 1).

El TIN obtenido a partir del DEM y coordenadas de la batimetría (fig. 2), representa las elevaciones del área en estudio, caracterizada topográficamente por tener elevaciones que van desde los 25 hasta 559 m.s.n.m. Las cuencas hidrográficas con cotas máximas de 600 metros pueden ser encontradas en varias zonas, debido a que esta es una elevación relativamente baja en comparación con otras zonas montañosas, aun así, el relieve de la cuenca y el clima pueden afectar significativamente a la disponibilidad de agua (Pizarro et al., 2019).

Adicional a esto, Leiva (2021) describe que las cuencas con elevaciones más bajas suelen tener una mayor disponibilidad de agua debido a la mayor cantidad de precipitación y menor evaporación. Sin embargo, también pueden ser más vulnerables a la contaminación debido a la mayor actividad humana y al menor escurrimiento en la cuenca; estas son más vulnerables a los desastres naturales como inundaciones y sequías, debido a las precipitaciones y relieve.

La cota 66 m.s.n.m. es el nivel máximo de operación del embalse La Esperanza, determinando a este nivel un volumen de 428,64 Hm³. Con referencia a Iradukunda y Bwambale (2021), las curvas de nivel

Tabla 1. Volumen y superficie del embalse La Esperanza año 2018.

| COTA | ÁREA | VOLUMEN | COTA | ÁREA | VOLUMEN |
|----------|---------|------------------------------------|----------|---------|------------------------------------|
| m.s.n.m. | ha | hm ³ (Mm ³) | m.s.n.m. | ha | hm ³ (Mm ³) |
| 67,5 | 2400,09 | 461,39 | 47 | 1057,41 | 104,31 |
| 67 | 2383,01 | 450,41 | 46 | 1010,06 | 94,26 |
| 66 | 2348,55 | 428,64 | 45 | 962,17 | 84,66 |
| 65 | 2317,87 | 407,08 | 44 | 915,43 | 75,50 |
| 64 | 2286,78 | 385,70 | 43 | 871,91 | 66,77 |
| 63 | 2255,34 | 364,51 | 42 | 826,75 | 58,46 |
| 62 | 2223,67 | 343,51 | 41 | 773,17 | 50,60 |
| 61 | 2191,77 | 322,70 | 40 | 722,30 | 43,24 |
| 60 | 2151,86 | 302,08 | 39 | 671,21 | 36,39 |
| 59 | 2105,50 | 281,81 | 38 | 614,79 | 30,05 |
| 58 | 2058,25 | 261,87 | 37 | 558,29 | 24,26 |
| 57 | 2004,66 | 242,32 | 36 | 500,98 | 19,01 |
| 56 | 1863,04 | 223,24 | 35 | 435,99 | 14,36 |
| 55 | 1671,50 | 205,92 | 34 | 367,52 | 10,34 |
| 54 | 1534,17 | 190,27 | 33 | 295,56 | 6,99 |
| 53 | 1432,15 | 175,83 | 32 | 228,35 | 4,35 |
| 52 | 1353,85 | 162,33 | 31 | 167,34 | 2,35 |
| 51 | 1282,32 | 149,57 | 30 | 95,36 | 0,96 |
| 50 | 1221,84 | 137,45 | 29 | 32,32 | 0,29 |
| 49 | 1163,53 | 125,89 | 28 | 11,76 | 0,08 |
| 48 | 1108,31 | 114,85 | 27 | 0,07 | 0,00 |

Fuente: Velásquez (2020).

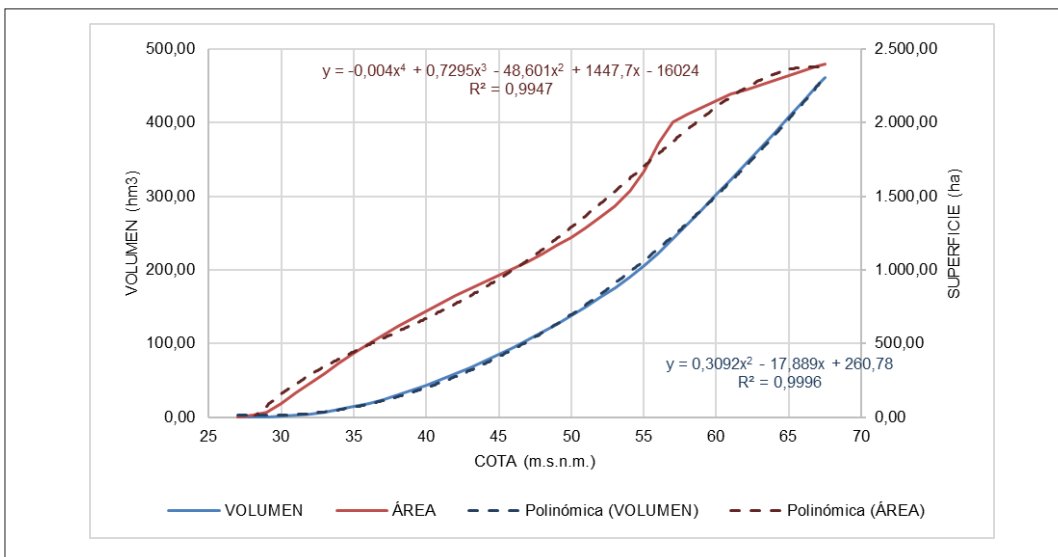


Figura 3. Volumen y Superficie del Embalse La Esperanza.

Fuente: Velásquez (2020).

y las distribuciones de profundidad se usan para representar los resultados a manera informativa, estas curvas se crean a partir de los datos obtenidos durante el análisis de la batimetría del fondo del embalse, y muestran las relaciones entre la profundidad, el área de contorno y la capacidad del mismo.

Los volúmenes obtenidos a distintas cotas (tab. 1) reflejaron en su construcción batimétrica el relieve del vaso del embalse La Esperanza, que acorde a Hassan et al. (2017); Sang et al. (2017); Iradukunda et al. (2020) determinaron que la ilustración de la distribución espacial en la interpretación de los cambios en la profundidad y volumen del embalse en estudio, muestran características de relieve, mediante el uso de datos topográficos XYZ, que ilustran la distribución espacial y las variaciones del agua, siendo útil para el análisis de sedimentación y capacidad de almacenamiento, como parte de la gestión del suministro de agua, la recreación y el monitoreo de cambios morfológicos a largo del tiempo que permiten una adecuada toma de decisiones.

Para proyectar el volumen en función de su cota (fig. 3) se utilizó los niveles y volumen del embalse a cada metro de altitud en la columna de agua, obteniéndose la siguiente ecuación de segundo grado:

$$V = 0,3092c^2 - 17,889c + 260,78$$

Donde:

V = Volumen del embalse (hm³)
c = Cota del embalse (m.s.n.m.)

Para proyectar la superficie en función de su cota (fig. 3) se utilizó los niveles y áreas del embalse a cada metro de altitud en la columna de agua, obteniéndose la siguiente ecuación de cuarto grado:

$$S = -0,004c^4 + 0,7295c^3 - 48,601c^2 + 1447,7c - 16024$$

Donde:

S = Superficie de espejo del embalse (ha)
c = Cota del embalse (m.s.n.m.)

Según Maina et al. (2018) el aumento en el volumen y el área del nivel del agua es proporcional al aumento en la profundidad del agua, la relación entre la profundidad, el volumen y el área del embalse presentan la información obtenida de forma significativa e informativa que es útil para el análisis avanzado en la operación de represas y la estimación del azolvamiento por variación de capacidades de almacenamiento de agua.

Conclusiones

La cuenca aportante al embalse La Esperanza se encuentra constituida por las microcuencas: Membrillo, Carrizal, Bejuco, Cañas y La Esperanza, mostrando elevaciones que van desde los 25 hasta 559 m.s.n.m.

El volumen de capacidad máxima operacional del embalse La Esperanza es de 428,64 hm³ a la cota 66 m.s.n.m. con corte batimétrico al año 2018; que, en comparación con el inicio de operatividad, presenta una disminución de 26,36 hm³ por motivo de azolvamiento en 22 años de operación (1997-2018).

La ecuación polinómica en la operatividad actual para manejo del embalse La Esperanza se reduce a la siguiente ecuación: $V = 0,3092c^2 + 17,889c + 260,78$; donde "V" representa el volumen y "c" la cota o nivel del embalse.

Los dispositivos tecnológicos y sistemas de información geográficas actualmente permiten un diagnóstico rápido y económico en la gestión hídrica, esencial en el análisis para la correcta administración de los volúmenes, determinando que el uso de técnicas econométricas mediante ultrasonido y softwares cartográficos proporcionan resultados fiables.

Recomendaciones

Realizar batimetrías cada decenio (20 años) en el embalse con el fin de llevar un registro de volumen útil, que disminuye gradualmente por el azolvamiento del mismo, con el fin de actualizar la ecuación polinómica en la operatividad de la represa La Esperanza.

Cuantificar la erosión en las microcuencas aportantes al embalse y contrastar con la cantidad de sedimentos acumulados, llevando a cabo análisis comparativos que permitan predecir el comportamiento del azolvamiento.

Desarrollar en la cuenca aportante al embalse La Esperanza investigaciones sobre cambios multitemporales de cobertura vegetal y precipitaciones, con la finalidad de establecer su incidencia en la disminución de capacidad del embalse.

Referencias bibliográficas

- Escalante, E. (2021). "Geodesia Aplicada "Applied Geodesy for the Integration of Bathymetric Data for Sedimentation Control in Four Reservoirs in the Department of Tarija." *Ciencia Sur*, 6(7).
- Giambastiani B.M., Macciocca V.R., Molducci M. y Antonellini M. (2020) Factors affecting water drainage long-time series in the salinized low-lying coastal area of ravenna (Italy). *Water* 12:256. <https://doi.org/10.3390/w12010256>
- Hameed, F., Muhammad, R. y Khalil, Z. (2022). Establishing Level-Area-Volume Relationships of Darawat Reservoir Using Time Series Remote- Sensing Images. *Researchsquare*, 1-13.
- Hassan, R., Al-Ansari, N., Ali, AA., Ali, SS. y Knutsson, S. (2017). Batimetría y tasa de sedimentación para el embalse de Dokan, Irak. *Lagos y embalses: investigación y gestión*, 22(2), 179 - 189. <https://doi.org/10.1111/lre.12173>

- Ho, L. T. y Goethals, P. L. M. (2019). Opportunities and challenges for the sustainability of lakes and reservoirs in relation to the Sustainable Development Goals (SDGs). In *Water (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 7, p. 1462). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/w11071462>
- Hossen, H., Khairy, M., Ghaly, S., Scozzari, A., Negm, A. y Elshahabi, M. (2022). Bathymetric and Capacity Relationships Based on Sentinel-3 Mission Data for Aswan High Dam Lake, Egypt. *Water (Switzerland)*, 14(5), 711. <https://doi.org/10.3390/w14050711>
- İlçi, V., ozulu, İ. M., Alkan, R. M., Erol, S., uysal, M., Kalkan, y., ... Bilgi, S. (2019). Determination of reservoir sedimentation with bathymetric survey: a case study of Obruk Dam Lake. *Fresenius environmental bulletin*, vol.28, no.3, 2305-2313.
- Iradukunda, P. y Bwambale, E. (2021). Reservoir sedimentation and its effect on storage capacity-A case study of Murewa reservoir, Kenya. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1917329>
- Iradukunda, P., Sang, JK, Nyadawa, MO y Maina, CW (2020). Efecto de la sedimentación sobre la capacidad de almacenamiento en el lago Nakuru, Kenia. *Revista De Investigación Sostenible En Ingeniería*, 51, 149 - 158.
- Leiva-Lozano, J. (2021). Cartografía y correlación de terrazas fluviales de los ríos Guardal y Barbata (Cuenca hidrográfica del Guadiana Menor). [Tesis de Grado, Universidad San Jaén]. <https://hdl.handle.net/10953.1/15347>
- Liu, K., Song, C., Wang, J., Ke, L., Zhu, Y., Zhu, J., Ma, R. y Luo, Z. (2020). Remote Sensing-Based Modeling of the Bathymetry and Water Storage for Channel-Type Reservoirs Worldwide. *Water Resources Research*, 56(11). <https://doi.org/10.1029/2020WR027147>
- Maina, C. W., Sang, J. K., Mutua, B. M. y Raude, J. M. (2018). Bathymetric survey of Lake Naivasha and its satellite Lake Oloiden in Kenya; using acoustic profiling system. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 23(4), 324-332. <https://doi.org/10.1111/LRE.12247>
- Muñoz, D. F., Moftakhari, H. y Moradkhani, H. (2020). Compound Effects of Flood Drivers and Wetland Elevation Correction on Coastal Flood Hazard Assessment. *Water Resources Research*, 56 (7). <https://doi.org/10.1029/2020WR027544>
- Ngula, N y Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Ilishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- Ochoa-García, S. A. (2021). Aplicación de una metodología simplificada para estimar las curvas de capacidad de embalses. *Revista de Teledetección*, 58, 105. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15303>
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J., Berríos, A., Ibáñez, A., Castillo, B., Bernal, A., García, P., Arumi, J., Iroumé, A. y Valdés, R. (2019). Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile. UNESCO. Uruguay. 38 pp.
- Ryan, J. C., Smith, L. C., Cooley, S. W., Pitcher, L. H. y Pavelsky, T. M. (2020). Global Characterization of Inland Water Reservoirs Using ICESat-2 Altimetry and Climate Reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 47(17), e2020GL088543. <https://doi.org/10.1029/2020GL088543>
- Sang, J.K., Raude, J.M., Mati, B.M., Mutwiwa, U.N. y Ochieng F. (2017). Dual Echo Sounder Bathymetric Survey for Enhanced Management of Ruiru Reservoir, Kenya. *Journal of Sustainable Research in Engineering* Vol. 3 (4) 2017, 113-118
- Schwatke, C., Dettmering, D. y Seitz, F. (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs12101606>
- Velásquez, F. (2020). Modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, Manabí - Ecuador. Tesis para optar grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Zhu, S., Liu, B., Wan, W., Xie, H., Fang, Y., Chen, X., Li, H., Fang, W., Zhang, G., Tao, M. y Hong, Y. (2019). A new digital lake bathymetry model using the step-wise water recession method to generate 3D lake bathymetric maps based on DEMs. *Water (Switzerland)*, 11(6), 1151. <https://doi.org/10.3390/w11061151>