

Características superficiales y azolvamiento en la cuenca aportante al embalse La Esperanza, Manabí, Ecuador

Surface characteristics and clogging of the contributing basin of La Esperanza reservoir, Manabí, Ecuador

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 objetivo de esta investigación fue determinar la característica superficial actual que ha influido mayormente en el azolvamiento del embalse La Esperanza, en la provincia de Manabí, costa de Ecuador. Para lo cual se delimitó y caracterizó fisiográficamente la cuenca en estudio, mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través de un modelo de elevación digital (DEM) descargado del satélite ALOS PALSAR (<https://www.asf.alaska.edu/>), complementándola con el Sistema Nacional de Información (www.sni.gob.ec). Se determinó una mayor geomorfología de vertientes regulares (32,13%) y mesas muy disectadas (32,42%) con una geología de tipo sedimentaria entre areniscas tobáceas, lutitas y limolitas propensas a la erosión hídrica. En conclusión, las microcuencas de Membrillo y Bejuco en su parte alta presentan gargantas de valles encañonados con pendientes que alcanzan los 30 grados, que unida a la precipitación se convierte en la principal característica superficial que actualmente ha influido con mayor azolvamiento en dos de los ramales del embalse.

Palabras clave: embalse, azolvamiento, geomorfología, secciones transversales.

Abstract

The aim of this research was to determine the current surface characteristic that has a major influence on the clogging of La Esperanza reservoir, in the province of Manabí, coastal Ecuador. The basin under study was delimited and physiographically characterized, through the use of Geographic Information Systems (GIS), through a digital elevation model (DEM) downloaded from the ALOS PALSAR satellite (<https://www.asf.alaska.edu/>), and complemented with the National Information System (www.sni.gob.ec). A greater geomorphology of regular slopes (32.13%) and highly dissected mesas (32.42%) with a sedimentary-type geology between tuffaceous sandstones, shales and siltstones prone to water erosion was determined. In conclusion, the Membrillo and Bejuco micro-basins in their upper part present gorges of canyoned valleys with slopes that reach 30 degrees, which together with precipitation becomes the main surface characteristic that has currently influenced greater clogging two of the branches of the reservoir.

Keywords: reservoir, clogging, geomorphology, cross sections.

Introducción

El azolvamiento es uno de los factores que amenaza la sostenibilidad de los embalses, debido a que reduce su capacidad de almacenamiento; este se ha convertido en una problemática ambiental y administrativa. La relación entre el agua y suelo es muy estrecha debido a que cualquier cambio en el uso del suelo

o su inadecuado afectarían directamente de manera adversa al recurso agua (Iradukunda et al., 2021).

En países donde la presión demográfica aumenta continuamente, los recursos de tierra y agua son explotados y su utilización es imprescindible constituyendo a las cuencas hidrográficas en unidades primordiales de estudio (Rai et al., 2015).

* Correspondencia del autor:

E-mail: francisco.velasquezin@espm.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.

En este contexto, el análisis morfométrico es esencial debido a que proporciona una información valiosa para la toma de decisiones y planificación de cuencas, este incluye el conocimiento de las características del área de estudio como la pendiente, la topografía, el estado del suelo, las características de escorrentía y el potencial hídrico entre otros (Guevara et al., 2019).

El surgimiento de los modelos de elevación digital (DEM) y el progreso en la informática ha llevado al desarrollo de varios métodos para definir áreas, derivar redes de corrientes, analizar pendientes, simular inundaciones y obtener diferentes parámetros morfológicos de las cuencas hidrográficas (Jarrin, 2020) and by Geographical Information System (GIS).

El análisis morfométrico de una cuenca es de gran ayuda para comprender la influencia del drenaje sobre accidentes geográficos de superficie y sus características (Mangun et al., 2019).

Una de las ventajas de la evaluación cuantitativa es que, en muchas cuencas, los parámetros derivados se expresan en forma de razones y números adimensionales, lo que facilita la comparación independientemente de la escala. La definición de las cuencas hidrográficas y la estimación de sus áreas son esenciales para muchos estudios, incluyendo los relacionados con el clima, la agricultura, la gestión de sedimentos, la gestión de recursos hídricos, la geomorfología y la hidrología (Aparna et al., 2015; Hussainzada y Lee, 2021; Varis et al., 2019; Resmi et al., 2019)

Materiales y Métodos

La cuenca aportante al embalse La Esperanza se encuentra ubicada en el cantón Bolívar, provincia de Manabí, en la costa de Ecuador. Está localizada entre el límite de las zonas secas y húmedas de la provincia, con una alta variabilidad pluviométrica debido a su ubicación geográfica y al cambio estacional.

La delimitación y caracterización fisiográfica de la cuenca aportante al embalse La Esperanza se elaboró mediante la integración de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos para analizar las características morfométricas de la cuenca, a través de un modelo de elevación digital (DEM) descargado del satélite ALOS PALSAR e información vectorial del Sistema Nacional de Información (SIN).

El proceso consistió en la elaboración y análisis de mapas temáticos del área en estudio donde se contemplaron los siguientes parámetros de acuerdo a Shekar y Aneesh (2022):

Área de la cuenca (A)
Perímetro de la cuenca (P)
Longitud de cuenca (L)

Coefficiente de Compacidad (Kc)

Es la correspondencia adimensional geométrica de la cuenca adaptada a un círculo de equivalente área, donde los valores cercanos a 1 indicarán una rápida respuesta hídrica, que se representa en la ecuación expresada por Gravelius (1914):

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca (Km).

A: Área de la cuenca (Km²)

Factor de forma (Kf)

Se conceptualiza como el cociente entre el ancho medio de la cuenca y la longitud de la misma que indica su forma con relación al tiempo de concentración hidrológica, que se representa en la ecuación esquematizada por Horton (1932):

$$Kf = \frac{B}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

B: Ancho medio de la cuenca (Km).

L: Longitud de la cuenca (Km).

A: Área de la cuenca (Km²).

Mediante el programa ArcGIS 10.4.1 se procesaron una serie de información vectorial en formato de extensión shapefile, imágenes satelitales y modelos de elevación digital en formato ráster de alta resolución y de uso libre en la delimitación de la cuenca aportante y sus microcuencas, además de su geomorfología, geología, precipitación, representación gráfica de la estadística de elevaciones, pendientes y secciones transversales. La textura del suelo en el área de estudio fue tomada de la bibliografía especializada, para complementar el análisis de las características superficiales con respecto al azolvamiento.

Para la evaluación de las pendientes se realizó un análisis de las secciones transversales de la microcuenca Membrillo y Bejuco, obtenidas a través del modelo digital de elevación, las cuales están compuestas por pares ordenados de cotas en el eje "Y" y abscisas en el eje "X", con distancias determinadas entre cada uno. Las secciones transversales se establecieron a través del software Global Mapper v 18.0, que consiste en trazar una franja topográfica y mediante la herramienta Path profile, que toma como referencia una línea recta en paralelo al cauce, determinando las secciones características como la distancia, elevación y pendientes de cada sección trazada.

Resultados y discusión

En la tabla 1 se presenta el condensado de la geometría superficial de las microcuencas Carrizal, Membrillo, Bejuco y Cañas (fig. 1), estableciéndose

un área de 428,50 Km² para la cuenca aportante al embalse La Esperanza, encuadrándose como una cuenca intermedia - pequeña según la clasificación de Campos Aranda, de forma oval oblonga con tendencia entre media y baja a las crecidas con una precipitación anual histórica promedio de 1742 mm (fig. 2). La cantidad de precipitación en una cuenca hidrográfica tiene un impacto directo en la disponibilidad de agua y la cuenca aportante al embalse La Esperanza no es ajena a este detalle.

Las cuencas con precipitaciones entre 1700 a 2000 mm se consideran adecuadas para el desarrollo de la vegetación y la agricultura y es probable que sus ríos tengan un flujo constante de agua (Chiles, 2020).

La precipitación con más de 1000 mm anuales, aportan cifras significativas de sedimentos, debido a que el agua de lluvia que fluye a través de la cuenca hidrográfica transporta sedimentos y los deposita en las partes bajas contribuyendo al azolvamiento de los cursos de ríos, lagos y embalses (Mora, 2021), sin embargo, la sedimentación fluvial está determinada por factores naturales, siendo uno de los más relevantes la erosión hídrica debido a que provee la energía necesaria para mover los sedimentos, además las formas y características de relieves acompañados de las altas pendientes influyen en el azolvamiento de las cuencas hídricas.

En la tabla 2 se puede observar que la cuenca aportante al embalse La Esperanza está conformada por 7 tipos

de geoformas desde terrazas aluviales, pasando por colinas medianas y altas, mesas disectadas y muy disectadas, vertientes regulares hasta gargantas de valles encañonados (fig. 3). De estas geomorfologías, las vertientes regulares con 137,67 Km² (32,13%) y las mesas muy disectadas con 138,94 Km² (32,42%) representan la mayor extensión de la cuenca.

La geología de la cuenca aportante (fig. 4) data del periodo Neógeno, comprendido entre el Mioceno y Plioceno en la parte media y baja de la cuenca con formación Onzole constituidas de lutitas y limolitas, mientras que la parte alta de la misma corresponde a la época del Plioceno con formación Borbón, compuesta litológicamente de areniscas tobáceas.

De acuerdo con Chacón (2018), la distribución de las capas geológicas cambia a medida que se va desplazando desde el norte hacia el sur, ciertas formaciones desaparecen y otras disminuyen en su grosor, sin embargo, los suelos de esta región por lo general contienen una combinación de lutitas, limolitas y areniscas tobáceas.

La presencia de lutitas y limolitas favorecen la infiltración del agua en el subsuelo, teniendo una mayor capacidad para retener el agua, lo que ayuda a mantener los niveles de agua subterráneos y a reducir la escorrentía superficial, en contraste con los suelos compuestos principalmente de areniscas tobáceas son más propensos a la erosión debido a su baja cohesión,

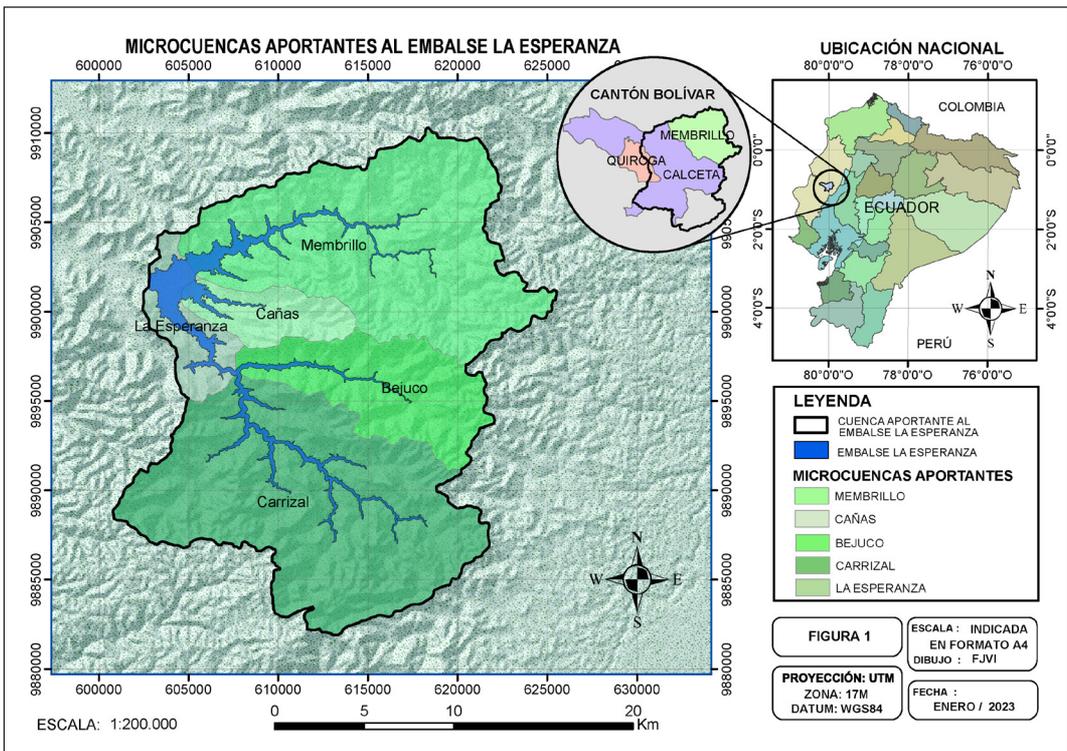


Figura 1. Mapa de microcuencas aportantes al embalse La Esperanza.

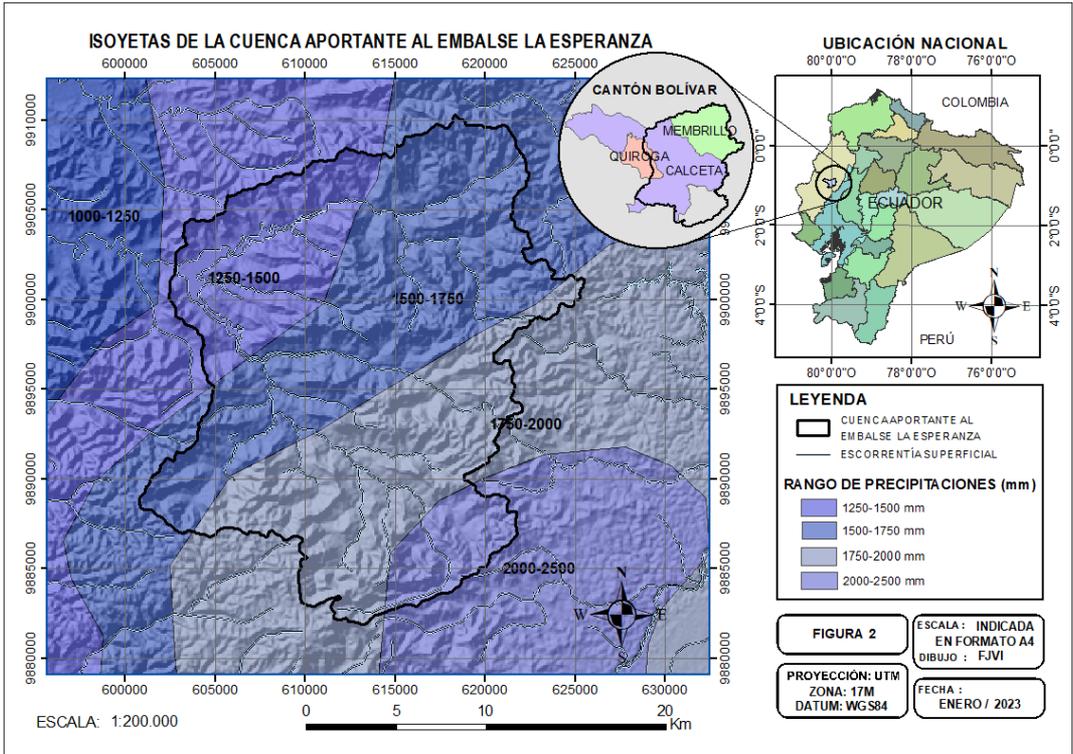


Figura 2. Mapa de isoyetas de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

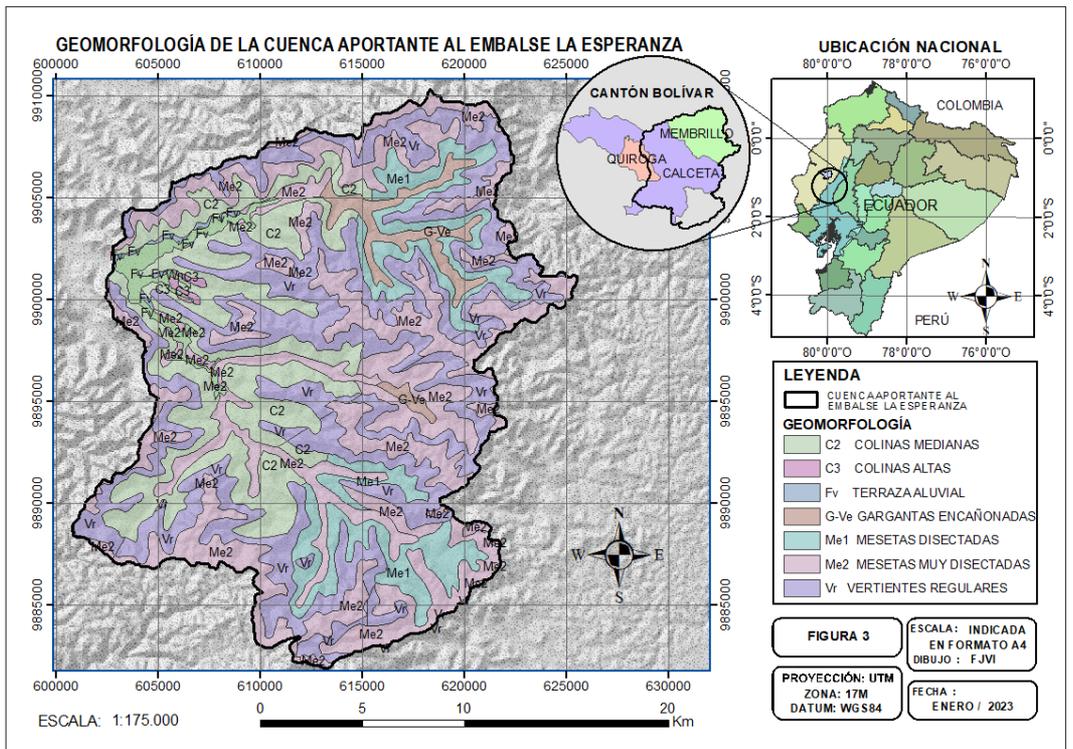


Figura 3. Mapa geomorfológico de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

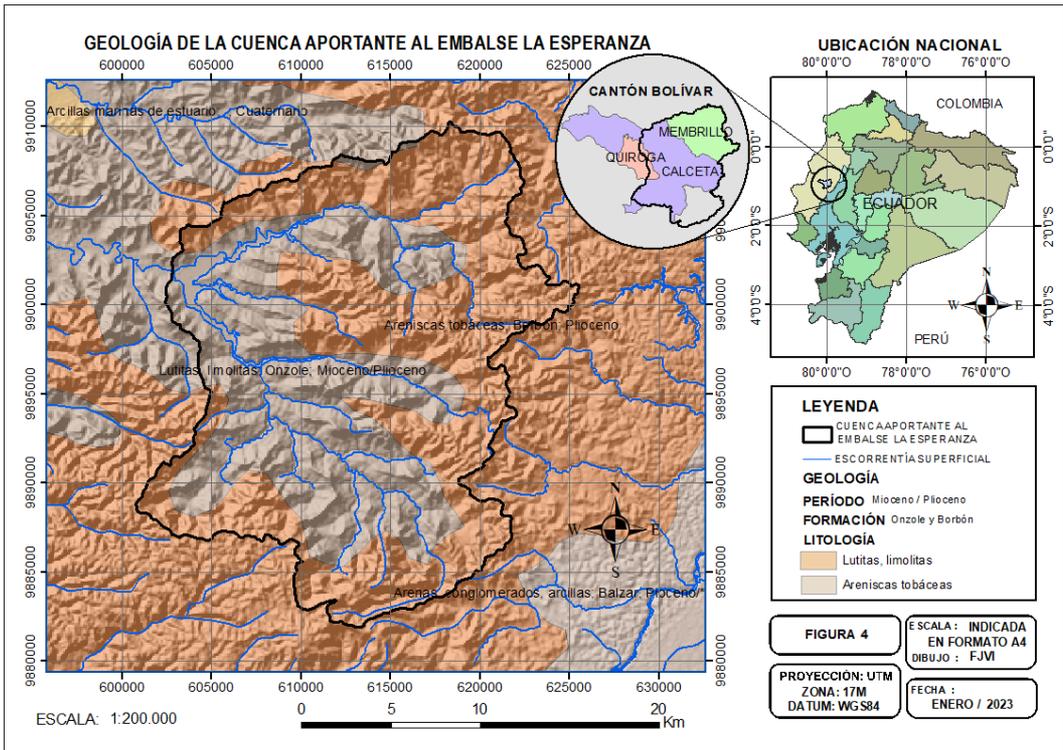


Figura 4. Mapa geológico de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

Tabla 1. Geometría superficial de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

Microcuencas aportantes al embalse La Esperanza						
Descripción	Área (A) Km ²	Tamaño	Perímetro (P) Km	Longitud (Lc) Km	Coefficiente de compacidad (Kc)	Coefficiente de forma (Kf)
Carrizal	171,84	Pequeña	69,09	16,09	1,49	0,66
Membrillo	150,25	Pequeña	64,77	17,43	1,49	0,49
Bejuco	58,2	Pequeña	43,68	14,19	1,62	0,29
Cañas	23,93	Muy pequeña	24,02	9,82	1,39	0,25
C u e n c a aportante	428,50	Intermedia Pequeña	111,72	25,04	1,52	0,76

Fuente: Velásquez (2020).

Tabla 2. Datos de geomorfológicos del área de estudio.

Estadística de Clasificación de Elevaciones en la cuenca aportante al embalse La Esperanza	
Conteo:	5956 puntos
Mínimo:	25 m.s.n.m.
Máximo:	559 m.s.n.m.
Media:	218 m.s.n.m.
Desviación Típica:	106,82

Fuente: Velásquez (2020).

Tabla 3. Datos de elevaciones del área de estudio.

Código	Descripción	Área	
		Km ²	%
Fv	Terraza aluvial	1,53	0,36
C2	Colinas medianas	79,86	18,64
Me1	Mesas disectadas	46,90	10,95
Vr	Vertientes regulares	137,67	32,13
Me2	Mesas muy disectadas	138,94	32,42
G-Ve	Gargantas de valles encañonados	13,51	3,15
C3	Colinas altas	1,17	0,27
Wn	Cuerpos de agua (cota 43-44 m.s.n.m)	8,92	2,08
Total		428,50	100

Fuente: Velásquez (2020).

Tabla 4. Propiedades físicas del suelo en la cuenca aportante del embalse La Esperanza.

Parámetros	Unidad	Suelo de uso forestal (franco)			Suelo de uso ganadero (franco)		
		Arena	Limo	Arcilla	Arena	Limo	Arcilla
Textura	%	40	36	25	38	42	21
Densidad aparente	g/cm ³	0,91			1,29		
Densidad real	g/cm ³	2,47			2,27		
Porosidad	%	62,93			43,03		
Humedad	%	19,10			15,50		
Conductividad hidráulica	m/s	0,0000371			0,0000220		
Velocidad de infiltración	cm/h	10,05			0,51		

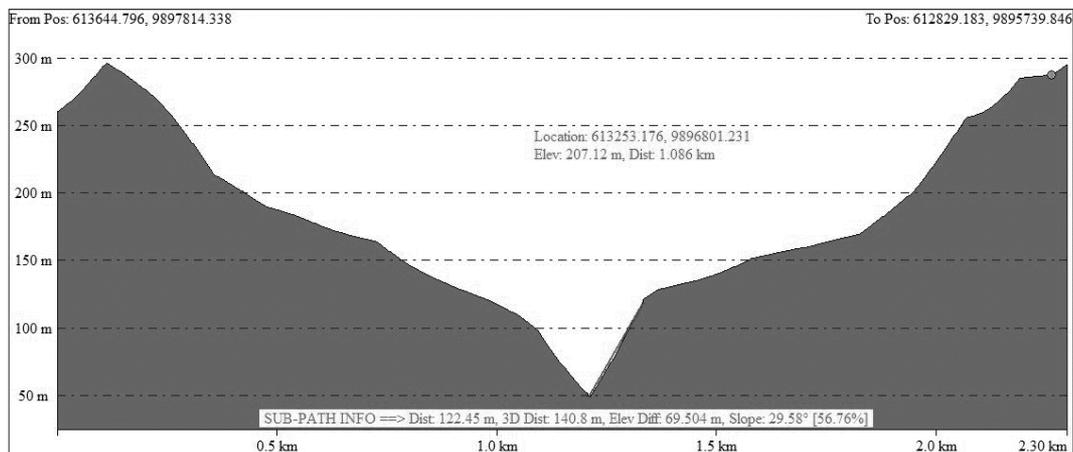


Figura 5. Sección transversal del ramal parte alta de la microcuenca de Membrillo.

Fuente: Velásquez (2020).

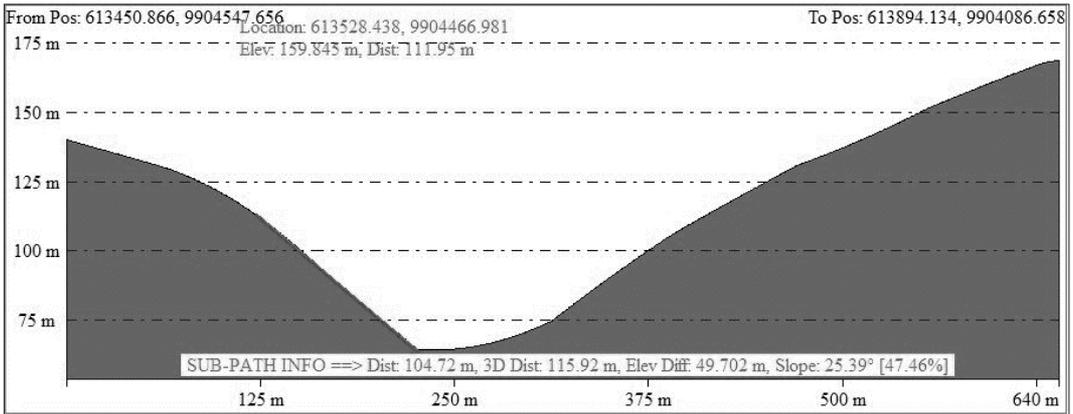


Figura 6. Sección transversal del ramal parte alta de la microcuenca de Bejuco.

Fuente: Montañó y Solórzano (2015).

la falta de arcilla y carbonato de calcio, sin embargo es importante mencionar que todo esto depende mucho de la distribución, textura, profundidad y relación de estas litologías en una cuenca hidrográfica (Morales et al., 2020; Barbecho y Calle, 2012; Idrovo et al., 2021).

La cuenca en estudio presenta una elevación media de 218 m.s.n.m (tabla 3) con geomorfología de gargantas de valles encañonados (fig. 3) en la parte alta y media de la microcuenca de Membrillo, y en la parte alta de la microcuenca de Bejuco. La formación geológica superficial es tipo sedimentaria entre areniscas tobáceas, lutitas y limolitas (fig. 4), con usos de suelos forestales, ganaderos y agrícolas en su mayoría, con textura de suelos francos (tabla 4). De acuerdo al cuadro de texturas, el suelo de la zona de estudio es franco con suelos de usos forestales que contienen 36% de limo, 25% de arcilla, 40 % de arena y una densidad aparente de 1,29 g/cm³, mientras que los suelos de usos ganaderos contienen 42% de limo, 21% de arcilla, 38% de arena y una densidad aparente de 0,91 g/cm³ con variabilidad de 19,9% de su porosidad.

Las pendientes pronunciadas de la cuenca aportante al embalse La Esperanza comprenden pendientes mayores entre los 25° y 30° de inclinación, de acuerdo a Almeida et al. (2019) el origen de las características de relieve es determinado por los procesos físicos, químicos, litológicos del suelo.

El cambio en las redes de drenaje puede resultar en accidentes geográficos que producen azolvamientos, los procesos de erosión más comunes resultan en deslizamiento de suelo las cuales requieren de pendientes con grados de inclinación mayor a 25° donde el suelo se vuelve inestable propenso a deslizamientos (Xiao et al., 2019), contrastando con lo descrito la cuenca aportante al embalse La Esperanza en la parte alta y media de la microcuenca de Membrillo y alta de Bejuco mediante el análisis

de secciones transversales en el modelo de elevación digital se determinó pendientes de 25,39 y 29,58 grados de inclinación (figs. 5 y 6), contrastando con el azolvamiento en sitio, se deduce que la principal característica superficial que actualmente ha influido en dos de los ramales del embalse La Esperanza en mayor grado son las pendientes muy pronunciadas que unido a la deforestación y la litología del sector la hacen más susceptibles a la erosión hídrica.

Conclusiones

La cuenca aportante al embalse La Esperanza contempla un área de 428,50 Km² encuadrándose como una cuenca intermedia - pequeña según la clasificación de Campos Aranda, con forma oval oblonga con tendencia entre media y baja a las crecidas con una precipitación promedio de 1742 mm anuales, contando con una geomorfología con vertientes regulares (32,13%) y mesas muy disectadas (32,42%) en mayor proporción.

La formación geológica superficial es tipo sedimentaria entre areniscas tobáceas, lutitas y limolitas; con usos de suelos forestales, ganaderos y agrícolas en su mayoría, con textura de suelos francos.

Las microcuencas de Membrillo y Bejuco como parte de la cuenca aportante al embalse, presentan gargantas de valles encañonados con pendientes que alcanzan hasta los 29,58 grados de inclinación (56,76 %).

La principal característica superficial que actualmente ha influido con mayor azolvamiento en dos de los ramales del embalse son las pendientes pronunciadas mayores a 25 grados de inclinación (46,63%).

En 22 años de operación del embalse La Esperanza (1997-2018), se estima un volumen de azolvamiento de 26,36 hm³ equivalente al 5,8%, resultado calculado mediante la diferencia de los volúmenes: 455 hm³ (inicio de operatividad de la represa) y 428,64 hm³

(corte de estudio batimétrico) en el nivel máximo de operación (cota 66 m.s.n.m.) entre los años en mención.

Recomendaciones

Realizar monitoreos periódicos de azolvamiento y deforestación, específicamente en las partes donde la cuenca presenta pendientes pronunciadas por parte de los entes encargados de la administración del territorio a través de sus técnicos con el objetivo de establecer estrategias para minimizar los impactos negativos que fomenten la sostenibilidad hídrica del embalse.

Impulsar otras investigaciones relacionadas a los procesos geológicos y meteorológicos en la cuenca aportante al embalse La Esperanza por parte de la academia con el fin de complementar los resultados de esta investigación que ayuden a tener una perspectiva amplia de los procesos del entorno que permitan tomar mejores decisiones.

Referencias bibliográficas

- Almeida, M., Araujo, J., Ribeiro, M. y Souza, V. (2019). Relief Position and Soil Properties under Continuous Banana Cropping in Subhumid Climate in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 43. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180207>
- Aparna, P., Nigee, K., Shimna, P. y Drissia, T. K. (2015). Quantitative Analysis of Geomorphology and Flow Pattern Analysis of Muvattupuzha River Basin Using Geographic Information System. *Aquatic Procedia*, 4, 609-616. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.079>
- Barbecho, J. y Calle, J. (2012). Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui. Tesis de grado para la obtención de título de Ingeniero Civil. Universidad De Cuenca.
- Chacón (2018). Geología del cuaternario de la ciudad de Portoviejo y su zona de influencia (escala 1:20000). Tesis de grado para la obtención de título de Ingeniero en Geología. Universidad Central Del Ecuador, UCE.
- Chiles, G. (2020). Caracterización de la variabilidad climática de la cuenca hidrográfica del río Mira en el periodo 1981-2010, con base en la información hidrometeorológica disponible. Tesis de Maestría en Cambio Climático y Negociación Ambiental. Universidad Andina Simón Bolívar.
- Gravelius, H. (1914) *Grundrifi der gesamten Gewisserskunde. Band I: Flufkunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German)*. Goschen, Berlin.
- Guevara, R., Olguín, J., Mancilla, O. y Barreto O. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (24), 141-158. <https://doi.org/10.21138/GF.622>
- Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Trans. Amer. Geophys. Union* 13, 350-361.
- Hussainzada, W. y Lee, H. (2021). Hydrological Modelling for Water Resource Management in a Semi-Arid Mountainous Region Using the Soil and Water Assessment Tool: A Case Study in Northern Afghanistan. *Hydrology*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010016>
- Idrovo, B., González, I. y Guerrero, O. (2021). Efecto del cambio del uso del suelo en la producción y retención de sedimentos: caso de una cuenca hidrográfica de montaña. *Revista Geoespacial*, 18(1), 49-61. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v18i1.2213>
- Iradukunda, P., Bwambale, E. y Ahsan, A. (2021). Reservoir sedimentation and its effect on storage capacity - A case study of Murera reservoir, Kenya. *Cogent Eng*, 8: 1917329
- Jarrín, A. (2020). Análisis de modelos digitales de terreno para la obtención de un mapa de densidad de drenaje mediante softwares fotogramétricos y sistemas de información geográfica para imágenes obtenidas con UAV, resultados aplicados a estudios morfométricos en laderas. Tesis de grado para la obtención de título de Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional.
- Mangan, P., Haq, M. y Baral, P. (2019). Morphometric analysis of watershed using remote sensing and GIS—a case study of Nanganji River Basin in Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(6), 202. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4382-4>
- Montaño, D. y Solórzano, J. (2015). Variabilidad entre los suelos de uso forestal y ganadero del sitio Zapote, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Tesis de grado para la obtención de título de Ingeniería en Medio Ambiente. EC. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.
- Mora, D. (2021). Evaluación del Balance sedimentario de las Cuenas Hidrográficas de Zapotal y Jipijapa hacia la zona litoral. Tesis de pregrado. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Morales, R., Borja, A. y Mares, R. (2020). Estudio Hidrogeológico de Zonas de Recarga Acuífera para el Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México. México. Moro Ingeniería S.C. The Nature Conservancy.
- Rai, P., Chandel, R., Mishra, V. y Singh, P. (2018). Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *Applied Water Science*, 8(1), 15-15. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0660-7>
- Resmi, M., Babeesh, C. y Hema A (2019) Quantitative analysis of the drainage and morphometric characteristics of the Palar River basin, Southern Peninsular India; using BAd calculator (bearing azimuth and drainage) and GIS, *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(4), 295-307, DOI: 10.1080/24749508.2018.1563750
- Shekar, P. y Aneesh, M. (2022). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds of Murredu River basin, Telangana State, India, using a geographical information system. *J. Eng. Appl. Sci.* 69, 44. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00094-4>
- Varis, O., Taka, M. y Kumm, M. (2019). The Planet's Stressed River Basins: Too Much Pressure or Too Little Adaptive Capacity? *Earth's Future*, 7(10), 1118-1135. <https://doi.org/10.1029/2019ef001239>
- 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.

Xiao, H., Liu, G., Liu, P., Zheng, F., Zhang, J. y Hu, F. (2017). Sediment transport capacity of concentrated flows on steep loessial slope with erodible beds. *Scientific Reports*, 7(1), 2350 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02565-8>