



El estado de la sedimentación en los embalses del Valle Central de Tarija

Sedimentation status in the reservoirs of the Central Valley of Tarija

Presentación: 03/02/2023

Aprobación: 28/04/2023

Moisés Perales Avilés  <https://orcid.org/0000-0001-8067-0773>

Centro de Investigación del Agua, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho - Bolivia
moisesperales@uajms.edu.bo

Mario Gamarra Mendoza  <https://orcid.org/0000-0003-4486-4815>

Centro de Investigación del Agua, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho - Bolivia
mariogamarra@uajms.edu.bo

Resumen

El estudio generó datos de mediciones topobatimétricas en todos los embalses del Valle Central de Tarija con volúmenes de almacenamiento mayores a un millón de metros cúbicos y que tienen más de 5 años de operación. Se aplicaron ecuaciones empíricas para determinar la capacidad de retención del embalse, la densidad aparente de los sedimentos, la degradación de la cuenca, la vida útil y se determinó un indicador de colmatación para caracterizar la dinámica sedimentaria en embalses con escasas mediciones.

Los resultados obtenidos permitieron correlacionar la tasa de sedimentación promedio anual con el tamaño de la cuenca mediante una ecuación que permite establecer una referencia regional de la producción de sedimentos en cuencas similares.

Palabras claves: Embalse, sedimentos, topobatimetría, vida útil.

Abstract

The study generated data from topo-bathymetric measurements in all reservoirs in the Central Valley of Tarija with storage volumes greater than one million cubic meters and with more than 5 years of operation. Empirical equations were applied to determine reservoir retention capacity, sediment bulk density, basin degradation, useful life, and a clogging indicator was determined to characterize sediment dynamics in reservoirs with scarce measurements.

The results obtained allowed correlating the average annual sedimentation rate with the size of the basin by means of an equation that allows establishing a regional reference of sediment production in similar basins.

Keywords: reservoir, sediments, topo-bathymetry, useful life.

Introducción

La capacidad que tiene un país de adaptarse al cambio climático es directamente proporcional a su capacidad de almacenamiento. Los embalses representan una herramienta para obtener una fuente confiable de agua. La atención de demandas a través de las presas o embalses es diversa, como el abastecimiento de agua a poblaciones e industrias, la agricultura de riego, la generación de energía eléctrica y el control de inundaciones, por mencionar algunos ejemplos (Flores J., 2001).

Como lo señala Jiménez y Farías (2005) el mayor problema que enfrentan las presas es el acortamiento de la vida útil, fenómeno común a la mayoría de presas del mundo, ocasionada por la acelerada erosión de las cuencas de captación, con lo cual los embalses tienden a colmatarse rápidamente por la acumulación acelerada de sedimentos a tasas muy superiores a las previstas en los diseños.

Por ello, la sedimentación de embalses es un tema de mucho interés por constituir un grave problema, y más aún en países con mayor incidencia de fenómenos hidrológicos extremos (Spalleti P. y Brea J., 1998).

Los estudios demuestran que los planificadores, operadores y técnicos a cargo del diseño y revisión de proyectos, subestiman la amenaza de la sedimentación, mientras que sobreestiman sus propias capacidades, es decir, que la gestión de la sedimentación de los embalses adolece de un sesgo de optimismo (Annandale, 2013; Flyvbjerg, 2016; Landwehr et al., 2020; Schleiss et al., 2016). Por lo tanto, no es de extrañar que la aplicación y el análisis de estrategias de gestión adecuadas sigan siendo un reto (Kantoush & Sumi, 2016; Yang, 2013) a pesar de la disponibilidad de múltiples enfoques de predicción y simulación (Ghimire & DeVantier, 2016; Hao et al., 2017; Omer et al., 2015; Zeleke et al., 2013).

La sedimentación en embalses es un problema científico, ambiental, económico y social de gran importancia, pues los embalses se comportan como grandes trampas de sedimento que retienen la mayor parte de los materiales transportados por el río. La ejecución de trabajos de batimetrías permite estimar el volumen total de sedimentos depositados en el vaso del embalse e incluso mediante un análisis se puede proyectar su evolución para estimar la vida útil.

En Bolivia se realizaron algunos avances en el estudio de los sedimentos, pero más enfocados en la evaluación de los sedimentos en suspensión en ríos amazónicos, como por ejemplo en el río Beni (Villazón & Efrain, 2018), en la Chiquitanía (Maillard et al., 2019), y en el río Suches, frontera Perú - Bolivia (Ponce, 2021).

A nivel regional se elaboraron también algunos estudios apoyados en el uso de sensores remotos en la región Andina en Cochabamba, (Saavedra & Mannaerts, 2003) con un enfoque de manejo integral de cuencas. Con este mismo enfoque se elaboraron distintos estudios en cuencas priorizadas como por ejemplo: la cuenca del río Arque (Becerra, 2021), en la subcuenca Orinoca en Oruro (Vallejos et al., 2021) en la cuenca del río Pilcomayo (Ureña et al., 2020; Kazimierski et al., 2012; Iriondo et al., 2000), en la cuenca Laka-Laka (Mercado, 2019)

Se realizaron pocos estudios referidos a los sedimentos y su influencia en los embalses, como por ejemplo el embalse Tapera, en Aiquile-Cochabamba (Villegas, 2017), embalse San Jacinto en Tarija (Benítez, 2007), y en los embalses Laka Laka en Cochabamba y Yotalilla en Chuquisaca (CAT PRONAR, 2006), por mencionar algunos.

En Bolivia no existe una normativa que establezca los requerimientos mínimos de monitoreo de los sedimentos en los embalses. Por iniciativa y requerimiento de los operadores o administradores de la infraestructura se ejecutan estudios batimétricos, pero la periodicidad

de los mismos está en función de la disponibilidad de recursos económicos para contratar a una institución pública o privada que ejecute este tipo de servicios.

En el departamento de Tarija, los embalses todavía están en proceso de transferencia a sus operadores, por el momento la Secretaría Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA), los tiene a su cargo, y realiza trabajos únicamente de operación. No se tiene una normativa departamental que establezca requisitos y metodologías para el monitoreo de los sedimentos en los embalses. Por lo tanto, no se cuenta con datos sistematizados del estado de la sedimentación en los embalses en operación.

La problemática de los sedimentos en el Valle Central de Tarija (VCT) fue identificada desde los primeros estudios de balance hídrico que se realizaron en esta zona. Frías Cornejo (1989) realiza la caracterización fisiográfica del Valle Central de Tarija y la identifica como una superficie variada y muy accidentada, que presenta procesos de erosión típica de áreas secas, con sedimentos finos y conglomerados, que forman pilares irregulares de sedimento y topografía quebrada e inestable.

El objetivo de este estudio es realizar mediciones topobatimétricas para evaluar los volúmenes sólidos sedimentados en los embalses del VCT, y estimar parámetros como la capacidad de retención, la densidad aparente de los sedimentos, la degradación de la cuenca, la vida útil y determinar un indicador de colmatación. Con los resultados obtenidos se formuló una ecuación regional de producción de sedimentos como referencia para proyectos de regulación hídrica.

Materiales y métodos

Se plantea para el presente trabajo desarrollar una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema en un contexto determinado, es decir busca la aplicación o utilización de conocimientos, con el propósito de implementarlos de forma práctica para satisfacer una necesidad concreta, proporcionando una solución a problemas del sector social o productivo.

Los materiales y el equipamiento que fueron utilizados para la ejecución de los levantamientos topobatimétricos de los embalses han sido dispuestos por el Centro de Investigación del Agua de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Para el desarrollo del presente trabajo se dividió el estudio en 3 etapas:

Etapla 1: Recopilación, sistematización y ajuste de la información relevante.

Etapla 2: Ejecución de mediciones topobatimétricas en los embalses.

Etapla 3: Caracterización del estado de la sedimentación de los embalses del VCT.

Ubicación del área de estudio

El desarrollo de la presente investigación se realizó en la cuenca del río Guadalquivir, conocida también como Valle Central de Tarija (VCT), ubicada en el Departamento de Tarija, al Sur de Bolivia. Ver figura 1.

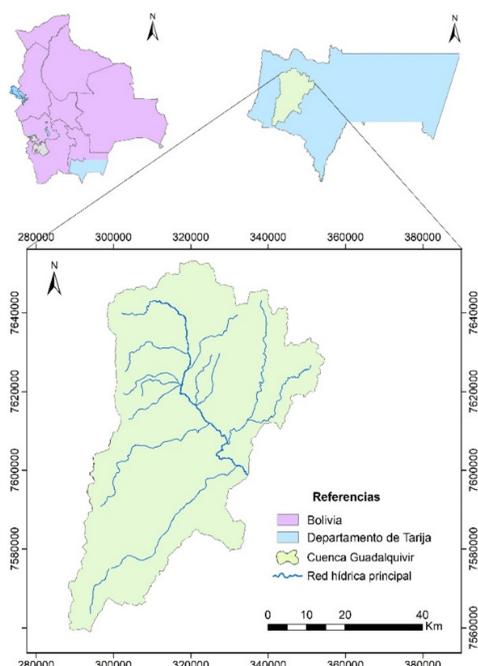


Figura 1 Ubicación del área de estudio

La región del VCT, se encuentra constituida por cuatro Municipios (San Lorenzo, Cercado, Uriondo y la zona de valles de Padcaya) y 165 comunidades (GAD Tarija, 2019). La cuenca tiene una extensión aproximada de 3,330 km² que representa el 9% del territorio del Departamento, un 43% de la cuenca corresponde al Municipio de Tarija, 23% a San Lorenzo, 21% a Uriondo y 13% a Padcaya. La importancia de la cuenca radica en que el 54% de la población departamental se encuentra albergada dentro de la misma.

Para la selección de los embalses que serán parte del presente trabajo se tomaron dos criterios:

- Que la capacidad de almacenamiento sea mayor de un millón de metros cúbicos.
- Que el embalse tenga más de 5 años de operación.

Se tiene 3 embalses en el Valle Central de Tarija que cumplen con estos dos criterios:

1. La Hondura
2. Calderas
3. San Jacinto

Por su cercanía se realizó también la medición en el embalse de Huacata que tiene características geológicas y topográficas similares a los del VCT, además que las aguas almacenadas son trasvasadas mediante un túnel a la cuenca del río Guadalquivir. Ver ubicación de los embales en la figura 2.

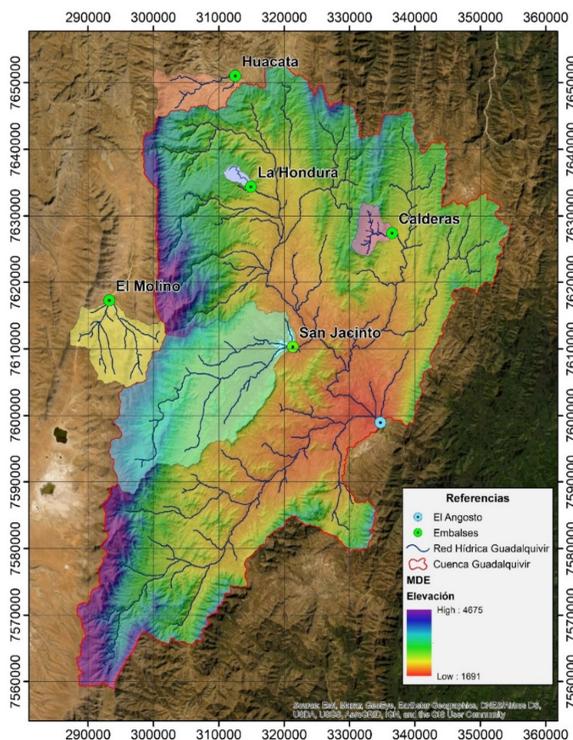


Figura 2 Ubicación de los embalses estudiados y sus cuencas de aporte

EMBALSE	UBICACIÓN			
	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
	Latitud S	Longitud O	E	S
La Hondura	21° 22' 54.18"	64° 47' 7.42"	314,921	7,634,542
Calderas	21° 26' 60.00"	64° 34' 50.58"	336,200	7,627 221
Huacata	21° 14' 4.31"	64° 48' 24.35"	312,496	7,650,824
San Jacinto	21° 36' 6.41"	64° 43' 35.86"	321,262	7,610,253

Tabla 1 Ubicación de los embalses estudiados

EMBALSE	Inicio operación	N.A.N. msnm	Altura m	Tipo de Presa	Área del Embalse ha	Cuenca km ²	Tipo Captación
La Hondura	2009	2,138.50	24.0	Tierra	10.56	7.23	Directa
Calderas	2012	2,084.44	32.9	CFRD	50.48	30.46	Trasvase
Huacata	2012	2,807.00	27.0	CFRD	169.65	13.00	Trasvase
San Jacinto	1988	1,884.00	40.0	Arco	518.39	420.00	Directa

*CFRD: Concrete Face Rockfill Dam

Tabla 2 Características de los embalses estudiados

Información disponible

La región del VCT es parte de la cuenca del Río Bermejo. A nivel nacional en territorio boliviano, la Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB) realiza actividades relacionadas con la medición de parámetros hidrométricos principalmente en la cuenca del Río Guadalquivir, y en territorio argentino la Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE) integrada por el Ministerio del Poder Ejecutivo Nacional y las Gobernaciones de las Provincias del Chaco, Formosa, Jujuy, Salta, Santa Fe y Santiago del Estero. Ambas instituciones han desarrollado estudios de la cuenca transfronteriza de la cuenca del Río Bermejo, determinando los caudales sólidos en diversos puntos de la cuenca. En la figura 3 se resumen los valores medidos de los caudales sólidos suspendidos, estos datos son importantes para revisar la estimación de la producción de sedimentos en las cuencas de los embalses analizados en la presente investigación.

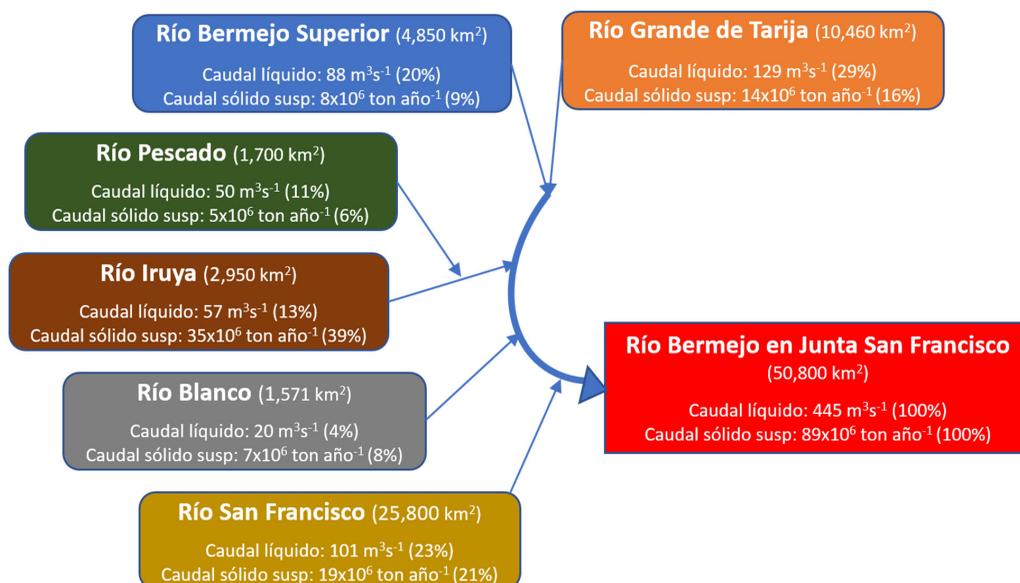


Figura 3 Valores medidos de caudales sólidos suspendidos en la cuenca del Río Bermejo (COREBE, 2023)

El embalse San Jacinto es el único que cuenta con mediciones topobatimétricas, ya que, desde el momento de su puesta en operación, uno de los principales problemas que se identificaron fue la cantidad de sedimentos que se depositaba en el vaso de almacenamiento. Ver detalle de topobatimetrías realizadas en tabla 3.

AÑO	Entidad Ejecutora
1989	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)
1995	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)
2004	Empresa Consultora CARYGLOBAL S.R.L.
2013	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)
2016	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN)

Tabla 3. Topobatimetrías realizadas en el embalse San Jacinto.

Para caracterizar el estado de la sedimentación de los embalses se utilizaron las siguientes ecuaciones empíricas aplicadas para embalses en zonas de montaña y ubicados en zonas semiáridas como lo recomienda Perales., (2022). Ver figura 4. La secuencia de cálculo es la siguiente:

- Capacidad de retención (Avendaño et al., 1999; Brown, 1943; ICOLD, 1989; Lane & Koelzer, 1943)
- Densidad aparente de los sedimentos (Avendaño et al., 1999; Lane & Koelzer, 1943; Lara & Pemberton, 1963; Miller, 1953)
- Degradación específica de la cuenca (Avendaño et al., 1999)
- Vida útil (Brune, 1953; Churchil, 1948; Julien, 2010)
- Indicador de colmatación de embalses (Central Water Commission, 2019)

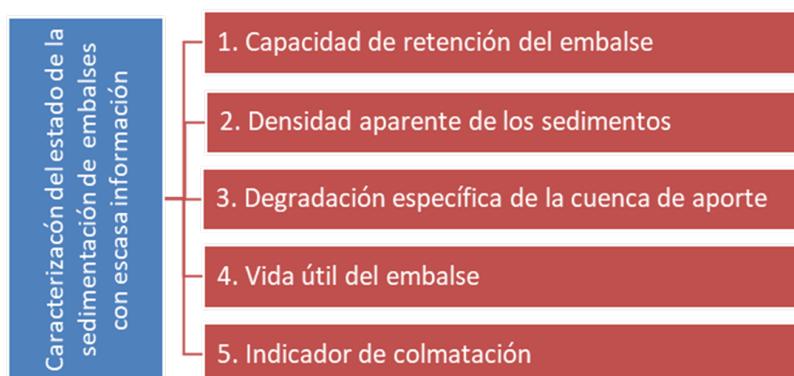


Figura 4. Parámetros que caracterizan el estado de la sedimentación de los embalses de montaña (Perales, 2022)

Capacidad de retención del embalse

La capacidad de retención o atrape de sedimentos de un vaso, está determinado por el cociente entre la cantidad de sedimentos depositados y la cantidad de material que llega al embalse (Gracia, 1997).

Para el presente estudio se determinó la capacidad de retención del embalse San Jacinto empleando la ecuación de Brown, ya que este método no solo es el más apropiado para los embalses situados en las zonas de cabecera de una cuenca (Butcher et al., 1992), sino que también requiere de un número reducido de datos para su cálculo.

Se basa en la relación existente entre la capacidad del embalse y la superficie de la cuenca de drenaje (Brown, 1943).

$$ER = 100 \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{(K \times C)}{W}} \right] \quad (1)$$

Donde:

ER = Eficiente de retención del embalse en %

C = Capacidad del embalse en miles de m³

W = Área de drenaje en km²

K = Coeficiente que varía entre 0.09 y 2.1 en función del régimen de explotación del embalse, ver tabla 4

Tipo de embalse	Régimen de explotación	K
Tipo 1	Embalses siempre o casi siempre lleno Sedimentos siempre sumergidos o casi sumergidos	2.10
Tipo 2	Embalses con descensos moderados del nivel de agua Sedimentos sumergidos excepto en raras ocasiones	1.43
Tipo 3	Embalses con descensos considerables del nivel del agua Sedimentos con cambios mojado-seco	0.26
Tipo 4	Embalses habitualmente vacíos Sedimentos secos	0.09

Tabla 4. Tipo de embalses y valores del coeficiente K en función del régimen de explotación (Avendaño et al., 1999)

Densidad aparente de los sedimentos acumulados en un embalse

Para la determinación de la densidad aparente, se ha utilizado el modelo planteado por Lane y Koeltzer (1943). Ver ecuación 2.

$$W_t = W_1 + 0.4343 K \left[\frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right] \quad (2)$$

En la que: W_t = representa la densidad media de sedimentos después de T años de explotación del embalse (ton m⁻³); T = Tiempo en años; W_1 = densidad inicial de sedimentos, que viene definida a su vez por la ecuación 3.

$$W_1 = \frac{(W_c \times P_c) + (W_m \times P_m) + (W_s \times P_s)}{100} \quad (3)$$

Donde: P_c , P_m , P_s representan los porcentajes de arcilla, limo y arena respectivamente; W_c , W_m y W_s son coeficientes que indican la densidad inicial de arcilla, limo y arena, cuyo valor depende del régimen de explotación del embalse (Avendaño et al., 1999), ver tabla 5.

TIPO DE EMBALSE	Densidad Inicial (ton m ⁻³)		
	Arcilla Wc	Limo Wm	Arena Ws
Tipo 1	0.481	1.041	1.490
Tipo 2	0.737	1.185	1.490
Tipo 3	0.961	1.266	1.490
Tipo 4	1.245	1.314	1.490

Tabla 5. Variación de los coeficientes Wc, Wm y Ws del régimen de explotación del embalse. Modificado de ICOLD, (1989) y Lan y Koeltzer, (1943)

Donde:

K= Parámetro de consolidación. Constante que depende del régimen de explotación del embalse y el tamaño de los sedimentos y puede tomar los valores expresados en la tabla 6.

TIPO DE EMBALSE	K		
	Arena	Limo	Arcilla
1	0	0.091	0.256
2	0	0.043	0.171
3	0	0.016	0.096
4	0	0	0

Tabla 6. Variación de la constante K en función del régimen de explotación del embalse. Modificado de ICOLD (1989) y Lan y Koeltzer (1943)

$$K = \frac{(K_{arena} \times \%arena) + (K_{limo} \times limo) + (K_{arcilla} \times \%arcilla)}{100} \quad (4)$$

Degradación específica de una cuenca

Se puede estimar la degradación específica de la cuenca vertiente al embalse a partir de la expresión propuesta por Avendaño et al., (1999).

$$DE = \frac{SAE}{Tf \times (Ac - Ae)} \quad (5)$$

Donde:

DE = degradación específica de la cuenca (ton km⁻² año⁻¹)

SAE = cantidad de sedimentos que se han depositado en el embalse

Tf = tiempo de funcionamiento del embalse

Ac = superficie de la cuenca de drenaje (km²)

Ae = superficie del embalse (km²)

Vida útil del embalse

Es el período de tiempo durante el cual el embalse puede ser explotado para su finalidad original o para una finalidad modificada, independientemente de que dicha utilización genere o no beneficios económicos netos (Murthy, 1977). La explotación de los embalses puede subvencionarse más allá de su vida económica por consideraciones sociales, políticas, medioambientales o de otro tipo, o por las imperfecciones del mercado. Al final de su vida útil, la presa puede ser desmantelada y rota, eliminada o simplemente abandonada. Es decir, es el tiempo previsto para que el volumen de sedimento depositado en el vaso de almacenamiento sea igual al volumen total del embalse.

Indicador de colmatación de embalses

Se propone la categorización de los problemas generados por los sedimentos en el embalse con base en un indicador simple (Central Water Commission, 2019), que se determina mediante el porcentaje observado de pérdida de almacenamiento anual (ASL) del reservorio:

ASL = Pérdida de almacenamiento total en% / Años totales de operación
Obteniéndose cuatro categorías. Ver tabla 7.

ASL	Categoría
$ASL \leq 0.2 \%$	BAJO
$0.2\% \leq ASL \leq 0.5\%$	MEDIO
$0.5\% \leq ASL \leq 2.0\%$	ALTO
$ASL \geq 2.0 \%$	EXTREMO

Tabla 7. Categorización de los problemas generados por los sedimentos en un embalse (Central Water Commission, 2019).

Equipo utilizado

Para la generación de red geodésica, se utilizó con el receptor GPS de doble frecuencia marca Geofennel y nivel de ingeniero digital Sokkia SDL50 (Ver figura 5). La ejecución de los levantamientos topobatimétricos fue realizada mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) marca DJI modelo Phantom 4 RTK (Ver figura 6) para la topografía de las márgenes no inundadas del embalse.



Figura 5 Equipo utilizado para la conformación de la red geodésica.



Figura 6 Drone Phantom 4 RTK.

Para el levantamiento batimétrico se empleó la embarcación no tripulada Z-Boat de la marca Teledyne, compuesta por una ecosonda monohaz de doble frecuencia CV100, un GPS RTK Hemisphere. Ver figura 7.



Figura 7 Equipo utilizado para el levantamiento batimétrico.

Resultados y discusión

A diferencia de los levantamientos topográficos terrestres, los levantamientos batimétricos e hidrográficos tienen pocos indicadores de control de calidad para verificar la precisión resultante. Debido a que la elevación del fondo que se está midiendo no es visible, a veces incluso los errores flagrantes son difíciles de detectar. Como tal, mantener los criterios de precisión prescritos requiere precisión, cuidado y control de calidad en el proceso de medición (Byrnes et al., 2002).

Para asegurar la precisión del levantamiento topobatimétrico se conformó una red geodésica local para cada uno de los embalses estudiados, estableciendo mediante monumentos físicos permanentes una referencia que permita su interconexión y la determinación de su posición y altura con relación a un sistema de referencia, en este caso a la red geodésica mundial ITRF y a las redes regionales como SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) y de manera nacional su enlace de la RED MARGEN (Marco de Referencia Geodésico Nacional). La distribución de los puntos geodésicos fue realizada tomando consideraciones de accesibilidad, visibilidad entre vértices y distribución en la cabecera, cuerpo y cola del embalse. Ver figura 8.

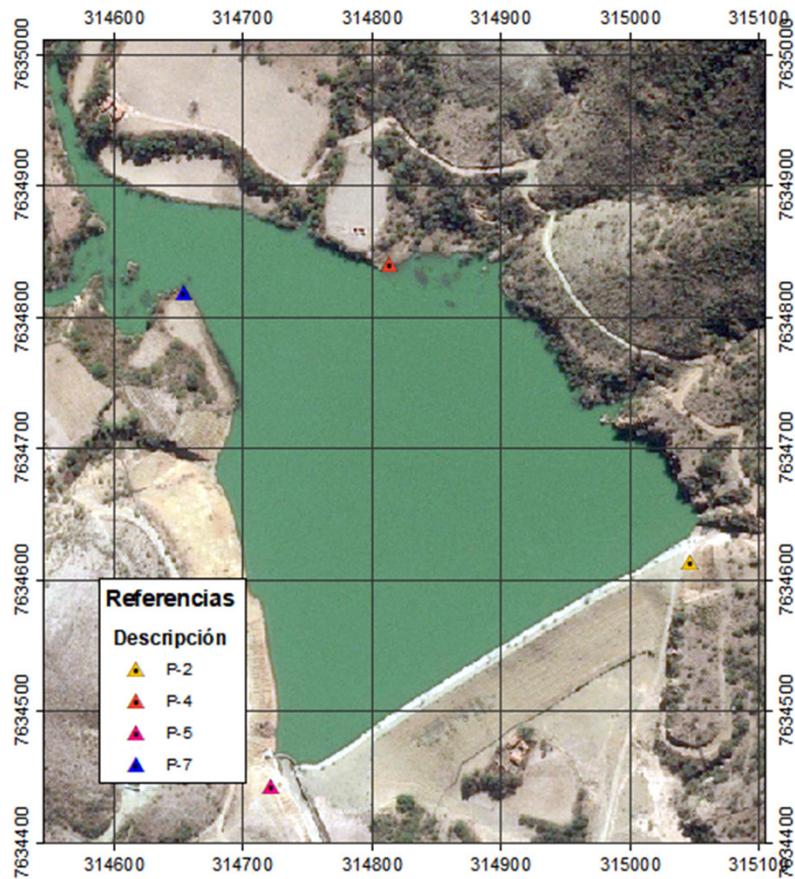


Figura 8 Ubicación de pares geodésicos en el embalse La Hondura

Las observaciones GPS, no permiten obtener la cota con referencia al nivel del mar. Estas deben ser ajustadas a un nivel de referencia ya sea la cota del vertedero o la graduación de la regleta. Para el caso de los embalses estudiados se usó la referencia de la cota del vertedero y se realizó la nivelación de los puntos geodésicos utilizando un nivel digital. El tiempo de observación fue de dos horas por cada punto, posteriormente se realizó el post proceso o ajuste de datos GPS. Ver detalle de la red geodésica generada en tabla 9.

No	Embalse	Identificación Punto	Este	Norte	Cota msnm
1	La Hondura	P-5	314,722.15	7,634,442.20	2,145.60
2		P-2	315,048.11	7,634,614.10	2,141.98
3		P-7	314,654.59	7,634,818.88	2,138.37
4		P-4	314,813.72	7,634,840.78	2,138.69
5	Calderas	P-1	336,452.44	7,627,225.09	2,088.50
6		P-3	336,379.55	7,627,447.26	2,087.53
7		P-6	336,244.31	7,627,672.53	2,084.30
8		P-8	336,108.52	7,626,926.93	2,087.16
9	Huacata	P-9	312,205.98	7,650,503.15	2,817.27
10		P-10	312,321.17	7,650,933.21	2,809.13
11		P-11	312,792.56	7,650,944.52	2,818.64
12		P-12	312,979.87	7,650,410.38	2,821.99
13		P-13	312,770.56	7,649,742.96	2,819.22
14		P-14	312,549.26	7,649,147.76	2,817.48
15		P-15	311,662.85	7,649,228.40	2,814.76
16		P-16	312,395.43	7,649,664.22	2,814.80
17	San Jacinto	P-1	7,610,313.78	321,340.15	1,931.66
18		P-2	7,610,355.67	321,623.37	1,939.49
19		P-3	7,610,067.45	320,915.94	1,938.49
20		P-4	7,610,302.26	321,508.08	1,945.30
21		P-5	7,609,997.69	318,869.69	1,903.07
22		P-6	7,610,323.94	321,275.76	1,890.35
23		P-7	7,610,981.81	320,061.27	1,906.90
24		P-8	7,611,260.74	320,723.34	1,907.29
25		P-9	7,610,977.30	320,647.14	1,899.59
26		P-10	7,611,861.98	321,669.82	1,900.02

Tabla 8 Coordenadas y cotas de la red geodésica conformada

Disminución de la capacidad de almacenamiento

Una vez realizado el levantamiento y procesados los datos, se tiene actualizadas las superficies topobatimétricas. Para realizar la comparación de estas nuevas superficies con una de referencia, que en el caso de todos los embalses a excepción del embalse San Jacinto que contaba con mediciones batimétricas precedentes, fueron comparados con la topografía ejecutada durante la etapa de preinversión del proyecto. Se determinó el volumen de sedimentos depositados. Ver tabla 9.

No	Embalse	Volumen inicial m ³	Año de inicio operación	Año Batimetría	Años de operación	Volumen Actual m ³	Volumen Sedimentado m ³	Reducción Volumen %	Reducción Anual %
1	LA HONDURA	1,193,220.66	2009	2009	10	1,153,906.80	39,313.86	3.29	0.33
2	CALDERAS	4,995,956.73	2012	2019	7	4,908,478.90	87,477.83	1.75	0.25
3	HUACATA	13,547,996.05	2012	2020	8	13,503,645.32	44,350.73	0.33	0.04
4	SAN JACINTO	61,721,755.14	1989	2019	30	45,198,142.65	16,523,612.49	26.77	0.89
		81,458,928.58				64,764,173.67	16,694,754.91	20.49	0.38

Tabla 9 Volúmenes característicos y volúmenes de sedimentos medidos en los embalses del VCT

Se tiene disminuciones de la capacidad de almacenamiento anual en porcentaje en el rango de 0.04% como mínimo para el embalse Huacata y de 0.89% como máxima para el embalse San Jacinto. Este rango de valores es Se determinó la reducción de la capacidad de almacenamiento de los embalses del VCT del 20.49%. Este dato es preocupante porque la mayoría de las presas analizadas tienen menos de 10 años de operación y a pesar de esto el problema de la disminución de la capacidad de almacenamiento resulta evidente, además que estos cuatro embalses representan el 90% del agua almacenada de la cuenca.

No	Embalse	Años de operación	Capacidad de retención	Tasa de sedimentación promedio anual m ³ año ⁻¹	Degradación específica ton km ² año ⁻¹	Indicador de colmatación
1	LA HONDURA	10	99.54	3,931.39	606.04	Medio
2	CALDERAS	7	99.58	12,496.83	503.03	Medio
3	HUACATA	8	99.63	5,543.84	580.48	Bajo
4	SAN JACINTO	30	99.40	401,060.79	1,044.70 *	Alto

* La degradación específica fue calculada en el periodo del 2016 - 2019

Tabla 10 Parámetros que caracterizan el estado de los sedimentos de los embalses del VCT

Se evidencia también que la capacidad de retención de todos los embalses del Valle Central de Tarija es alta, en promedio el 99.05% del sedimento que llega al área de los embalses se deposita en el vaso de almacenamiento. La degradación específica de la cuenca estimada en tonkm-2año-1 está en el rango de 503 a 1044, siendo el promedio de los cuatro embalses 616.4 tonkm-2año-1. Según el indicador de colmatación los embalses se clasifican como de riesgo bajo el embalse Huacata, riesgo medio los embalses de La Hondura y Calderas y riesgo alto El Molino y San Jacinto. Ver tabla 10.

Se ha estimado la vida útil actual de los embalses, considerando los valores de las tasas de sedimentación actuales y el volumen muerto de los valores de diseño, y se compararon con los valores de la vida útil estimada en la etapa de diseño. En la tabla 11 se resumen los valores obtenidos:

Embalse	Vida Útil (Años)	
	Diseño	Estimada Mediciones Batimétricas
LA HONDURA	Indeterminado	60.7
CALDERAS	Indeterminado	43.0
HUACATA	Indeterminado	79.4
SAN JACINTO	50	33.5

Tabla 11. Comparación de la vida útil de diseño y la estimada con mediciones batimétricas

La vida útil es un importante parámetro de diseño de un embalse que puede afectar a la viabilidad económica y a la sostenibilidad de un proyecto de recursos hídricos. Los tiempos de vida útil fueron estimados suponiendo que las variables de sedimentación y erosión se mantuvieran similares a los patrones medidos en el periodo. Estos resultados son valiosos para la futura planificación y gestión de estos sistemas de embalses. Para el caso del embalse San Jacinto se depositó en el embalse 16.5 hm³ de sedimento, 3.1 hm³ por encima del volumen muerto previsto en proyecto, evidenciando la subestimación de este importante parámetro de diseño.

Al ser la sedimentación en embalses un proceso continuo que generalmente pasa desapercibido, y los parámetros y tasas que generalmente se utilizan para identificar la gravedad de la situación no son familiares para los tomadores de decisión, los indicadores de colmatación permiten priorizar intervenciones de actuación en función de los diferentes problemas que genera la sedimentación en los embalses identificados como de riesgo alto. Además, la actualización del volumen útil disponible genera la necesidad de realizar una nueva distribución de agua para los diferentes usos, mejorando así la distribución y planificando una operación eficiente.

Formulación de una ecuación regionalizada de producción de sedimentos

Una ventaja de realizar mediciones batimétricas en embalses es que permite estimar la producción de sedimentos en el cierre de la cuenca que coincide con la ubicación de la represa, más aún en embalses grandes como los analizados pues su eficiencia de retención es

sensiblemente alta.

Primeramente, se ha observado la mejor correlación que se puede obtener con variables de características físicas de la cuenca (área y pendiente) en función a la producción de sedimentos en la misma.

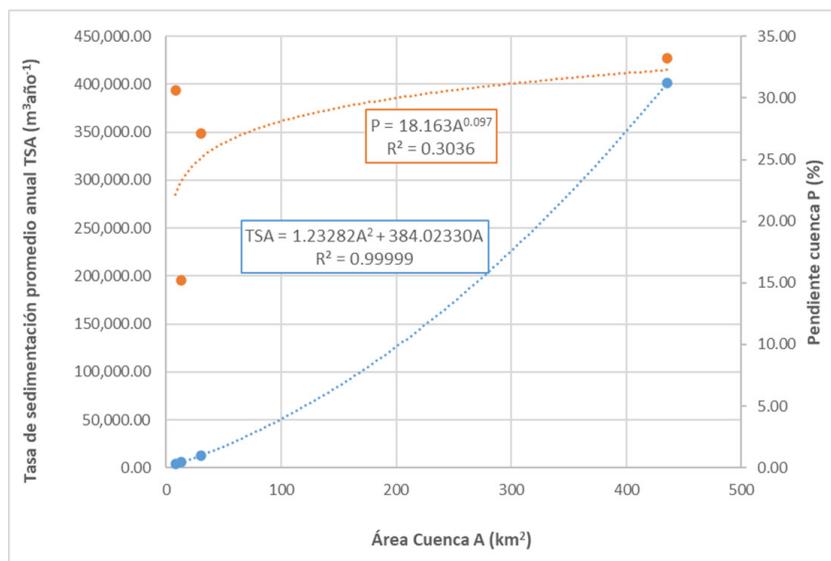


Figura 9 Relación entre la pendiente de la cuenca y la tasa de sedimentación promedio anual en embalses en función al área de la cuenca

La figura 9 nos indica que la mejor correlación corresponde a la tasa de sedimentación promedio anual (TSA) en embalses (equivalente a la producción promedio anual de sedimentos de la cuenca) con el área de la cuenca en el sitio de cierre de la represa correspondiente. Se han analizado los casos de una ecuación exponencial con base en el número de Euler, potencial, logarítmica y polinómica, siendo el caso que mejor ajuste muestra la ecuación parabólica que preserva la esencia del principio físico que a un área nula corresponde una producción de sedimentos nula en la cuenca ($A = 0 \text{ km}^2$, $TSA = 0 \text{ m}^3\text{año}^{-1}$).

Para obtener una ecuación regional que sea aplicable para un mayor rango de magnitud de área, se ha extrapolado este criterio empleando los valores medidos de caudal sólido suspendido publicados por COREBE, considerando que representa el mayor de los aportes de sedimentos en una cuenca, lo que significa que los embalses permiten obtener valores del TSA para áreas de cuenca pequeñas (Hondura, Calderas y San Jacinto) y los datos de caudal sólido suspendido para valores mayores de cuencas de aporte.

Antes de formular la ecuación se analizaron los datos únicamente de las estaciones con registros de caudal sólido en suspensión, lo que ha evidenciado que la cuenca del Río Iruya (punto color rojo) expone una dinámica de producción de sedimentos significativamente alta respecto de las demás, como se puede observar en la figura 10.

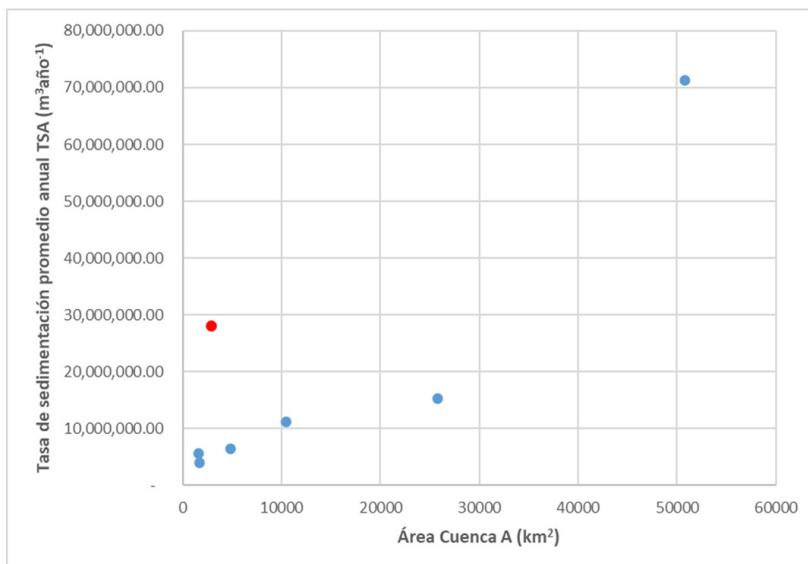


Figura 10 Producción anual de sólidos suspendidos COREBE en función al área de la cuenca de aporte

Es así, que se ha excluido de la formulación de la ecuación regional al dato del Río Iruya, obteniendo la figura 11 que muestra una buena correlación.

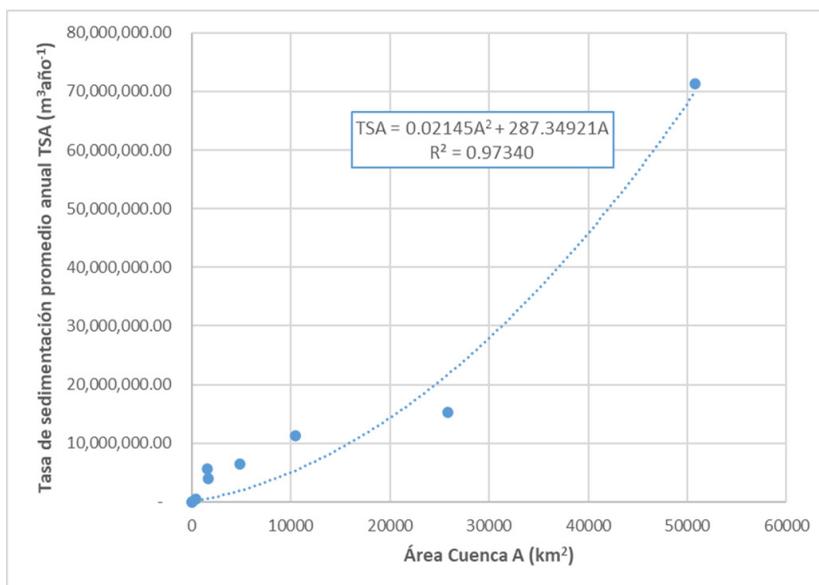


Figura 11 Producción anual de sólidos suspendidos COREBE en función al área de la cuenca de aporte

Los resultados obtenidos a través de la presente investigación demuestran que es factible correlacionar la tasa de sedimentación promedio anual con el área de la cuenca para poder ajustar una ecuación regional que permita tener una referencia de la producción de sedimentos en cuencas similares, sin embargo, pueden existir casos especiales de cuencas con características muy específicas que generen un sesgo en la producción de sedimentos.

Conclusiones

La actualización de las superficies topobatimétricas de los embalses del Valle Central de Tarija y la aplicación de la metodología propuesta basada en fórmulas empíricas nos permitió caracterizar el estado de la sedimentación, considerando la escasa información hidrométrica y sedimentológica disponible.

Se determinó la capacidad de retención del embalse, la densidad aparente de los sedimentos, la degradación de la cuenca, se estimó la vida útil del embalse para finalmente categorizar el problema generado por los sedimentos mediante un indicador de colmatación.

Esta caracterización permite priorizar la intervención en aquellas presas que presentan un riesgo alto de colmatación, además, se correlacionaron curvas que estiman la producción anual de sedimentos en función del área de la cuenca, como referencia para contrastar con los métodos empíricos de estimación del gasto sólido o arrastre de fondo utilizados en el medio para el diseño de proyectos de aprovechamiento hidráulico.

Es posible formular ecuaciones regionales de producción de sedimentos que sean de fácil aplicación para estimaciones preliminares de la producción de una cuenca, empleando los valores de mediciones batimétricas y de caudales de sólidos suspendidos aforados en estaciones hidrosedimentológicas de la cuenca. Para tal propósito es importante considerar las características específicas de los afluentes y sus cuencas, que aseguren la representatividad de la ecuación regional.

Los datos de medición y el monitoreo son importantes para llevar a cabo investigaciones hidrológicas, hidráulicas y morfológicas en todas las etapas, incluyendo la planificación, el diseño, la viabilidad, la evaluación de impactos y riesgos, así como durante la operación, lo que permite optimizar y adaptar las estrategias y prácticas de gestión.

El inventario actual de embalses del VCT no puede gestionarse de forma sostenible sin una ampliación sustancial de la recogida de datos y un mejor análisis de los mismos. La cuestión más crítica en este momento es estudiar los embalses a intervalos regulares para determinar mejor los índices de pérdida de almacenamiento a largo plazo y documentar la variabilidad temporal de estos índices.

Es necesario formular e implementar planes para monitorear periódicamente la sedimentación de los embalses para documentar la capacidad de almacenamiento restante y estimar cuándo se verán afectadas las instalaciones importantes de la presa y del embalse. Al mismo tiempo, es necesario formular planes de gestión de sedimentos a largo plazo para cada embalse. Estos planes de gestión deberían incluir la aplicación de prácticas sostenibles de gestión de sedimentos.

Se recomienda la implementación de estaciones hidrométricas automáticas o limnógrafos en los cursos tributarios a los embalses, que realicen la medición de los caudales de manera continua, como también la medición de los caudales sólidos, tanto de sedimentos en suspensión como transporte de fondo. Estos datos de mediciones directas, sumados a los generados con las topobatimetrías permitirán futuros trabajos de modelación numérica a nivel hidrodinámico y morfológico del embalse y de los principales afluentes.

Es necesario continuar desarrollando esta línea de investigación para orientar la futura gestión de las presas del VCT y justificar la inversión que será necesaria. Deberían ampliarse las áreas de investigación para incluir una evaluación exhaustiva del impacto del cambio climático y la determinación de la respuesta del ecosistema al ingreso de sedimentos en los embalses. También es esencial un estudio crítico de la dimensión social y los efectos de las intervenciones para una gestión adecuada de los sedimentos.

Referencias

- Annandale, G. (2013). *Quenching the Thirst: Sustainable Water Supply and Climate Change—George Annandale*. https://books.google.com.bo/books/about/Quenching_the_Thirst.html?id=A8LYnQEACAAJ&redir_esc=y
- Avendaño, C., Cobo Rayán, R., Gómez Montaña, J. L., & Sanz Montero, M. E. (1999). Procedimiento para evaluar la degradación específica (erosión) de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. *Revista Digital del Cedex*, 51-58.
- Becerra, M. H. I. (2021). *Producción de Sedimento en la cuenca del río Arque mediante el uso de HEC-HMS. Cochabamba, Bolivia* [Thesis]. <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/handle/123456789/23224>
- Benítez, R. A. (2007). Evaluación del método de predicción y de las medidas de control de la sedimentación en el embalse “San Jacinto”. *Revista Ingeniería Civil, CEDEX*, 70(145), 151-157.
- Brown, C. B. (1943). Discussion of «Sedimentation in reservoirs by J. Witzig». *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109, 1080-1086.
- Brune, G. M. (1953). Trap efficiency of reservoirs. *Transactions, American Geophysical Union*, 34(3), 407. <https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407>
- Butcher, D. P., Labadz, J. C., Potter, A. W. R., & White, P. (1992). *Reservoir sedimentation rates in the Southern Pennine region, UK* (R. W. Duck & J. McManus, Eds.). Wiley. <http://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/10203/>
- CAT PRONAR. (2006). *Sedimentos en microcuencas y diseño de obras de almacenamiento*. Componente De Asistencia Técnica Del Programa Nacional De Riego. <https://isbn.cloud/9789995470708/sedimentos-en-microcuencas-y-diseno-de-obras-de-almacenamiento/>
- Central Water Commission. (2019). *Handbook for Assessing and Managing Reservoir Sedimentation*.
- Churchil, M. A. (1948). *Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data*. Proceedings of Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, Colorado.
- COREBE. (2023). Sedimentos. *Comisión Regional del Río Bermejo*. <https://corebe.org.ar/web2022/cuenca/sedimentos/>
- Flores J. (2001). *Impactos Ambientales de Presas y Bordos*.
- Flyvbjerg, B. (2016). *How to Get Your Business Case Right, by Using Kahneman’s Outside View* (SSRN Scholarly Paper N.o 2769829). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2769829>
- Frías Cornejo, R. (1989). *Balance hídrico superficial de la cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija: Río de la Plata, Bolivia*. <http://servicios.ucbtja.edu.bo:8090/sihita/principal>.

jsp?codigo=EST-00009

- Ghimire, G. R., & DeVantier, B. A. (2016). *Sediment Modeling to Develop a Deposition Prediction Model at the Olmsted Locks and Dam Area*. 410-420. <https://doi.org/10.1061/9780784479872.042>
- Gracia, S. J. (1997). Capítulo 18: Sedimentación en embalses. En *Manual de ingeniería de ríos* (Comisión Nacional del Agua, Vol. 588, p. 54). Universidad Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. <http://dimsec.com/wp-content/uploads/2017/08/Cap-18-MIR-588-Sedimentacion-en-embalses.pdf>
- Hao, C.-F., Qiu, J., & Li, F.-F. (2017). Methodology for Analyzing and Predicting the Runoff and Sediment into a Reservoir. *Water*, 9(6), Art. 6. <https://doi.org/10.3390/w9060440>
- ICOLD. (1989). *Sedimentation control of reservoirs. Guidelines*. Bulletin 67.
- Iriondo, M., Colombo, F., & Kröhling, D. (2000). El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina- Bolivia-Paraguay: Características y significado sedimentario. 28, 79-82.
- Jiménez O. y Farías H. (2005). *Problemática de la Sedimentación del Embalse Valdesia, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI). Santo Domingo, República Dominicana.
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press.
- Kantoush, S., & Sumi, T. (2016). *The aging of Japan's dams: Innovative technologies for improving dams water and sediment management* (pp. 1030-1037). <https://doi.org/10.1201/9781315623207-182>
- Kazimierski, L. D., Irigoyen, M., Brea, J. D., Spalletti, P., & Nicolás, Á. (2012). *Impacto del Cambio Climático en la Producción de Sedimentos en las Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo*. 1er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Buenos Aires - Argentina.
- Landwehr, T., Kantoush, S. A., Pahl-Wostl, C., Sumi, T., & Irie, M. (2020). The effect of optimism bias and governmental action on siltation management within Japanese reservoirs surveyed via artificial neural network. *Big Earth Data*, 4(1), 68-89. <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1711632>
- Lane, E. W., & Koelzer, V. A. (1943). *Density of sediments deposited in reservoirs* (Reporte No 9 N.o 9; p. 56). St+ Paul U. S. Engineer District Sub-Office Wdraulic Laboratory, University of Iowa. https://water.usgs.gov/fisp/docs/Report_9.pdf
- Lara, J., & Pemberton, E. (1963). *Initial unit weight of deposited sediments*. 818-845.
- Maillard, O., Salinas, J. C., Angulo, S., & Vides-Almonacid, R. (2019). Riesgos ambientales en las unidades hidrográficas de las serranías chiquitanas, departamento de Santa Cruz, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 54(2), 83-95.

- Mercado, A. R. V. (2019). *Producción de sedimentos en la cuenca Laka Laka mediante HecHMS*.
- Miller, C. R. (1953). *Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computation*. U.S. Bureau of Reclamation.
- Murthy, B. N. (1977). *Life of reservoir*. Central Board of Irrigation and Power.
- Omer, A. Y. A., Ali, Y. S. A., Roelvink, J. A., Dastgheib, A., Paron, P., & Crosato, A. (2015). Modelling of sedimentation processes inside Roseires Reservoir (Sudan). *Earth Surface Dynamics*, 3(2), 223-238. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-223-2015>
- Perales, A. M. (2022). *Análisis de los principales problemas generados por los sedimentos y su impacto en la gestión sostenible de los embalses del Valle central de Tarija* (Doctoral N.o 2). Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- Perales, A. M., Saavedra, O. C., & Soria, F. (2022, octubre 31). Caracterización de la dinámica sedimentaria en embalses con escasa información. Caso de aplicación embalse San Jacinto—Bolivia. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 9(2).
- Ponce, S. P. (2021). Características hidráulicas y la concentración de plomo en agua y sedimentos en el río Suches- frontera Perú – Bolivia– 2021. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/62939>
- Saavedra, C. P., & Mannaerts, C. (2003). *Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remotos y SIG. Caso de estudio en la región Andina, Cochabamba, Bolivia*. 17.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
- Spalleti P. y Brea J. (1998). *Producción de Sedimentos en Cuencas de ríos de Montaña. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- Ureña, J. E., Saavedra, O. C., & Perales, M. (2020). Estimación de sedimentos en la cuenca Pilcomayo usando un producto de precipitación combinado con sensores abordo de satélites. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 67-80.
- Vallejos, P., Vallejos, G., Maldonado, R., & Juan, J. (2021). Efecto de la producción de quinua en la erosión y generación de sedimentos en la subcuenca Orinoca de Oruro (Bolivia). *RINDERESU*, 5(2).
- Villazón, M., & Efrain, H. (2018, agosto 29). *Evaluación y comparación de técnicas de muestreo de sedimentos en suspensión en el Río Beni-Bolivia*.
- Villegas, O. M. Á. (2017). *Estimación de la sedimentación y priorización de áreas de intervención en la cuenca de aporte del embalse Tapera, Aiquile Bolivia*.
- Yang, S. (2013). Why cannot sediment transport be accurately predicted. *Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part A*, 1-10.

Zeleke, T., Moussa, A. M., & El-Manadely, M. S. (2013). Prediction of sediment inflows to Angereb dam reservoir using the SRH-1D sediment transport model. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 18(4), 366-371. <https://doi.org/10.1111/lre.12047>

Contribución de los Autores

Nombres y Apellidos del autor	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Moisés Perales Avilés	x	x		x		x	x	x		x	x		x	
Mario Gamarra Mendoza		x	x		x				x	x	x	x	x	x

1-Administración del proyecto, 2-Adquisición de fondos, 3-Análisis formal, 4-Conceptualización, 5-Curaduría de datos, 6-Escritura - revisión y edición, 7-Investigación, 8-Metodología, 9-Recursos, 10-Redacción - borrador original, 11-Software, 12-Supervisión, 13-Validación, 14-Visualización.