

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-01-01

Artículos

Sedimentación de embalses en Colombia: panorama y análisis de casos

Reservoir sedimentation in Colombia: Overview and case analysis

Juan Daniel Ríos-Arboleda¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-9968>

¹Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia,
juan_da0716@hotmail.com

Autor para correspondencia: Juan Daniel Ríos-Arboleda,
juan_da0716@hotmail.com

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión exhaustiva del panorama actual de sedimentación de embalses en Colombia, se documentan las soluciones implementadas a la fecha y se analiza con el modelo Reservoir Conservation 2 (RESCON 2 Beta) del Banco Mundial la efectividad técnica a nivel de prefactibilidad de varias estrategias de gestión de sedimentación en el embalse del proyecto hidroeléctrico Porce II (uno de los casos críticos), el cual se localiza en el noroccidente de Colombia y presenta una pérdida de capacidad promedio de 2.09 Mm³/año. Los

resultados muestran que, de no tomar acción, para el escenario de sedimentación más crítico ($3.36 \text{ Mm}^3/\text{año}$), en poco más de 40 años de operación se pierde el volumen útil o activo, y al cabo de 105 años se pierde el volumen total de almacenamiento; por otro lado, de tomar acción y aplicar la técnica del trasvase (*by-pass*) y el supuesto de que se alcanzara un cuasi equilibrio sedimentológico entre lo que ingresa al embalse y lo que se descarga aguas abajo de la presa se podría prolongar la vida útil del embalse. Se concluye que los embalses en Colombia son un recurso finito que debe gestionarse con especial cuidado para garantizar la seguridad energética de la nación.

Palabras clave: sedimentación, estrategias de gestión, RESCON 2, Colombia.

Abstract

This paper provides a comprehensive review of the current reservoir sedimentation landscape in Colombia and documents the solutions implemented to date. It analyzes, using the World Bank's Reservoir Conservation 2 (RESCON 2 Beta) model, the technical effectiveness of several sedimentation management strategies at the pre-feasibility level in the Porce II hydroelectric project reservoir. This reservoir is one of the critical cases, located in northwestern Colombia, and presents an average capacity loss of $2.09 \text{ Mm}^3/\text{year}$. The results indicate that, if no action were taken, the most critical scenario ($3.36 \text{ Mm}^3/\text{year}$) would result in loss of useful or active volume after just over 40 years of operation. After 105 years, the total storage volume would be lost. In contrast, by taking action and applying the transfer technique (*by-pass*), and assuming quasi-sedimentological equilibrium between inflow and discharge downstream

of the dam, the useful life of the reservoir could be extended. It is concluded that reservoirs in Colombia are a finite resource that must be managed with special care to guarantee the nation's energy security.

Keywords: Sedimentation, management strategies, RESCON 2, Colombia.

Recibido: 25/02/2025

Aceptado: 25/03/2025

Publicado *ahead of print*: 08/04/2025

Versión final: 01/01/2026

Introducción

A lo largo de la historia múltiples autores (Fan & Morris, 1992b; Gracia, 1996; Morris & Fan, 1998; Palau, 2002; Batalla, 2003; Kondolf *et al.*, 2014) han analizado los procesos de sedimentación y pérdida de capacidad que ocurren en los embalses, sin embargo, gran parte de los datos existentes corresponden a latitudes extratropicales (Morris, Annandale, & Hotchkiss, 2008; Schleiss, Franca, Juez, & De Cesare, 2016; Morris, 2020; Randle *et al.*, 2021a; Kantoush, Mousa, Shahmirzadi, Toshiyuki, & Sumi, 2021), donde los procesos naturales ocurren en escalas de tiempo y espacio diferentes a las del trópico.

Por otro lado, en Colombia más del 60 % de la matriz de generación de energía eléctrica es hidráulica (Acolgen, 2019), razón por la cual, los reservorios y embalses son de suma importancia para la seguridad energética de la nación; sin embargo, todos los embalses tropicales están

sometidos a procesos de sedimentación que los hacen perder volumen útil más rápido que en otras latitudes (Jiménez, Farias, & Rodríguez, 2005). Por ejemplo, Ríos (2021) ha reportado que algunos embalses en Colombia presentan tasas promedio anuales de pérdida de capacidad superiores al 1.0 %, tasas superiores incluso a las reportadas para zonas semiáridas como Irán (Emamgholizadeh, Bateni, & Nielson, 2018).

En general, el proceso de sedimentación ocurre debido a la reducción de la velocidad del flujo al ingreso al embalse, lo cual permite que comience una sedimentación selectiva a lo largo del embalse (Palau, 2002), donde los materiales grueso granulares (gravas) se decantan en la cola del embalse (formando así lo que se conoce como el delta) y los materiales fino granulares (limos y arcillas) se asientan en vecindad de la presa, donde la velocidad del flujo es prácticamente nula (Fan & Morris, 1992b).

Debido al riesgo que genera la sedimentación en el interior de los embalses, a nivel global se han creado diferentes métodos o estrategias de gestión de los sedimentos, que buscan prolongar la vida útil de los reservorios (Morris & Fan, 1998; Fan & Morris, 1992a). Según Palmieri, Shah, Annandale y Dinar (2003), es posible gestionar con éxito la sedimentación de los embalses mediante el uso de una o más técnicas de conservación: 1) reducción del aporte de sedimentos, 2) manejo de sedimentos dentro del embalse, 3) evacuación de sedimentos del embalse o 4) reemplazo del almacenamiento perdido.

Como sugieren Randle *et al.* (2021b), el paradigma actual de aceptar la retención continua de sedimentos no es una estrategia sostenible a largo plazo; además, como señalan Morris y Fan (1998), el objetivo de la gestión de sedimentos es lograr un equilibrio de sedimentos en todos los embalses, maximizando al mismo tiempo la capacidad de

almacenamiento utilizable u otros beneficios una vez alcanzado este equilibrio.

En particular, el proyecto Porce II no es el único en Colombia con graves problemas de sedimentación, cabe la pena recordar las costosas operaciones de dragado que se realizan en el proyecto del Bajo Anchicayá (Castro & Mantilla, 2021) sin interrupción desde 1962. Este panorama es un problema mundial, y debido a esto Kondolf y Yi (2022) sugieren que la capacidad de almacenamiento de los embalses debe tratarse como un recurso no renovable.

Motivado por lo anterior, el presente estudio analiza el panorama actual de sedimentación en algunos embalses colombianos y evalúa con el modelo RESCON 2 Beta del Banco Mundial —desarrollado por Palmieri *et al.* (2003); Kawashima, Johndrow, Annandale y Shah (2003), y Efthymiou, Palt, Annandale y Karki (2017)— la efectividad técnica de varias estrategias de gestión de sedimentación en el embalse del proyecto hidroeléctrico Porce II, el cual se localiza en Antioquia y presenta una pérdida de capacidad anual del 1.46 %. El modelo RESCON 2 Beta ha sido usado recientemente por Idrees, Lee y Kim (2019), e Idrees, Lee, Kim y Kim (2021) para evaluar la técnica del *flushing* en embalses de Pakistán y Corea del Sur, respectivamente, sin embargo, para zonas tropicales suramericanas como Colombia no se encuentran en la literatura este tipo de evaluaciones técnico-ambientales. Por último se debe resaltar que el aporte específico a la ingeniería es una metodología clara para el análisis de estrategias de gestión de sedimentación en embalses tropicales.

Materiales y métodos

Revisión del panorama actual de sedimentación

Para consolidar un resumen del panorama actual de sedimentación en Colombia se han analizados los reportes del Consejo Nacional de Operación (CNO), de la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (Acolgen), de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y de los propios generadores.

Caso de estudio

El embalse del proyecto hidroeléctrico Porce II se localiza en Colombia, al nordeste del departamento de Antioquia (Figura 1), en jurisdicción de los municipios de Amalfi, Gómez Plata y Yolombo. Es alimentado principalmente por el río Porce (caudal medio multianual de $117.62 \text{ m}^3/\text{s}$), cuya cuenca al sitio de la presa posee un área de drenaje de aproximadamente $3\,020 \text{ km}^2$ (EPM, 2008), y por dos afluentes menores que son las Quebradas Guaduas (12.88 km^2) y Cancana (42.19 km^2).

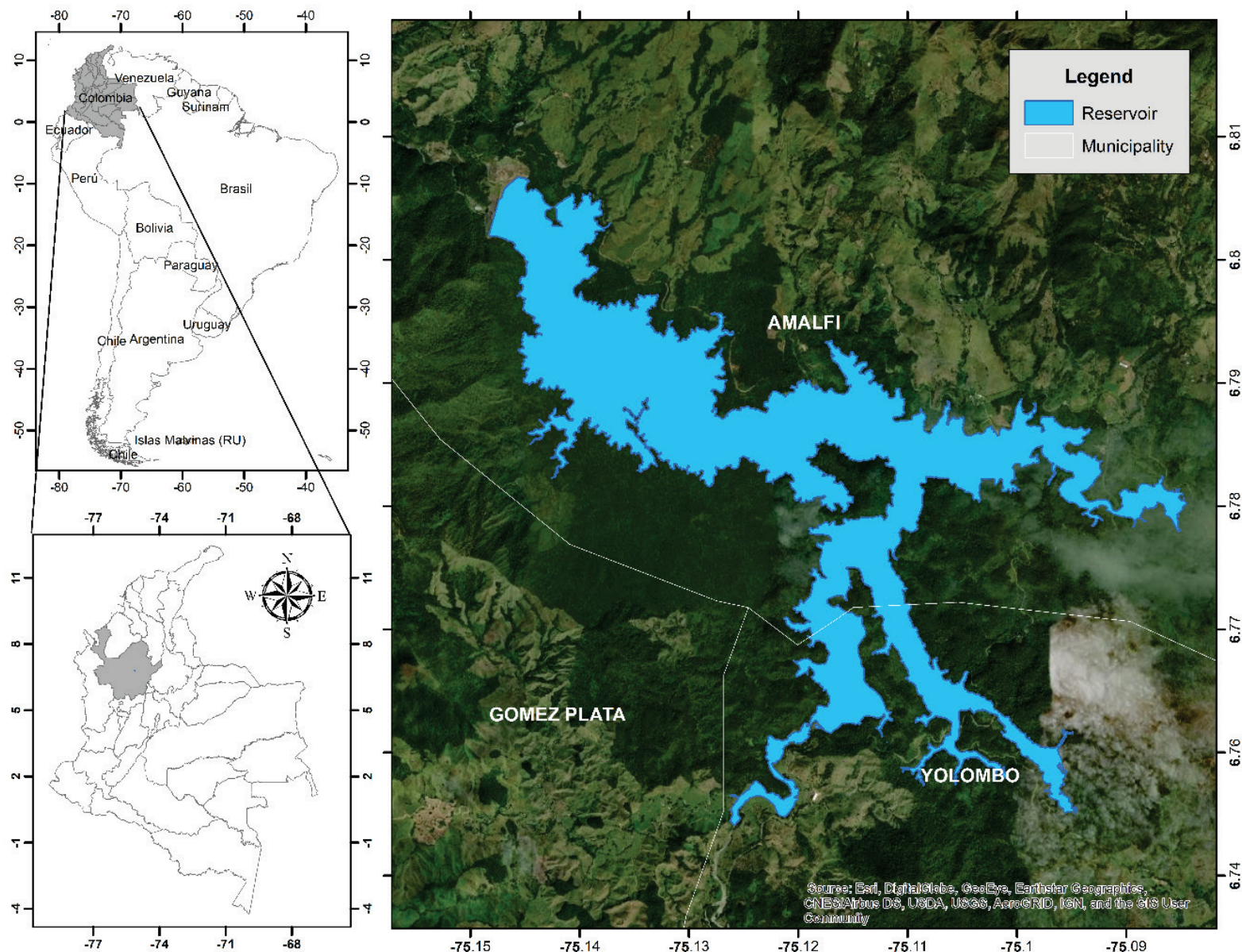


Figura 1. Localización del embalse del proyecto hidroeléctrico Porce II.

El reservorio tiene un área superficial de 931 ha, una longitud de 11 km y actualmente cuenta con un volumen total de 189.14 millones de metros cúbicos; la presa mixta (concreto compactado con rodillo y tierra) tiene una altura de 122 m y el vertedero de excesos es un canal abierto controlado por cuatro compuertas radiales; por su parte, la cola del

embalse exhibe un gran delta de sedimentos avanzando en la dirección longitudinal (Figura 2).

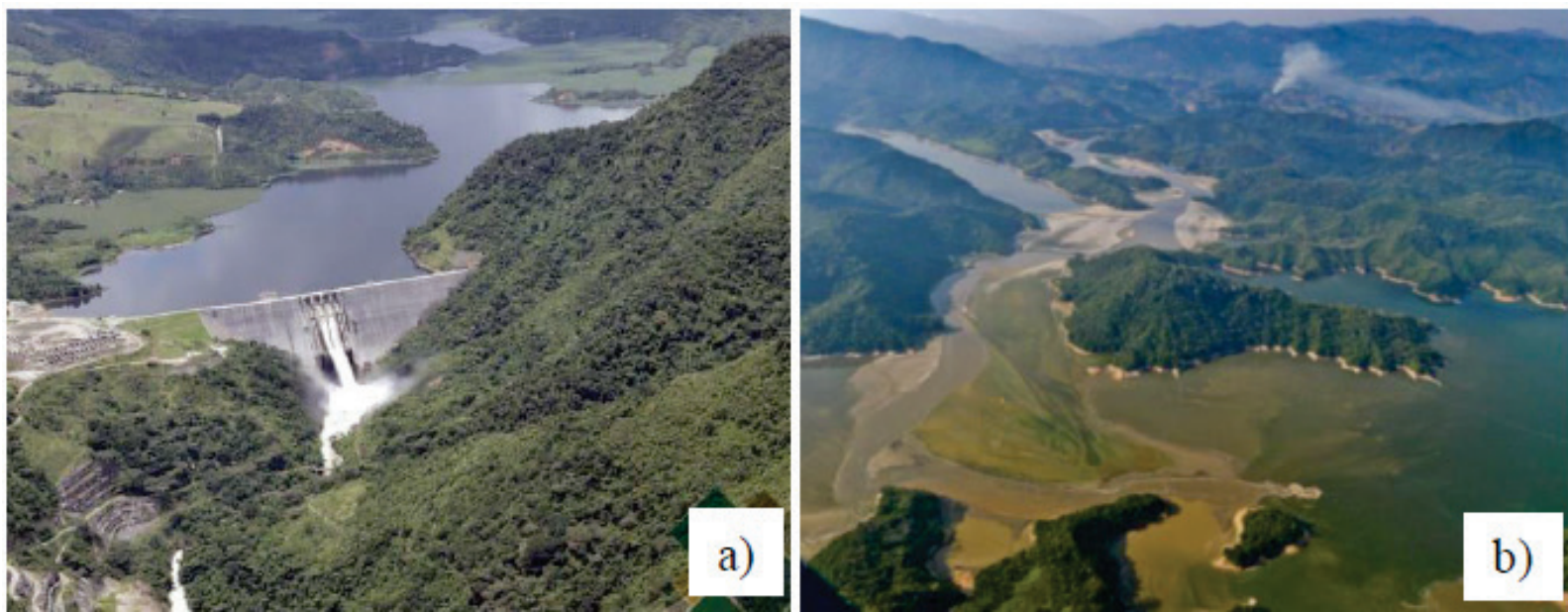


Figura 2. Proyecto hidroeléctrico Porce II: a) sitio de presa) y b) cola del embalse y delta de sedimentos. Fuente: Integral S. A., y EPM (2018).

Información geométrica

El primer grupo de datos corresponde a los geométricos (Tabla 1), los cuales fueron suministrados por Empresas Públicas de Medellín (EPM) propietaria del proyecto Porce II. Cabe aclarar que el volumen activo del embalse corresponde a la suma del volumen útil y el mínimo técnico (124.67 Mm^3 y 65.92 % del volumen total) y el volumen inactivo al volumen muerto (64.47 Mm^3 y 34.09 % del volumen total).

Tabla 1. Características geométricas del embalse.

Parámetro	Valor
Volumen total (Mm ³)	189.14
Volumen útil (Mm ³)	85.89
Volumen muerto (Mm ³)	64.47
Volumen mínimo técnico (Mm ³)	38.79
Volumen máximo técnico (Mm ³)	124.67
Nivel máximo de operación (m s. n. m.)	924.50
Nivel mínimo técnico (m s. n. m.)	911.40
Nivel mínimo físico (m s. n. m.)	900.40
Elevación mínima en el sitio de presa (m s. n. m.)	838.56
Altura de la presa (m)	122
Ancho de la cresta (m)	455

Información hidrológica

Un segundo grupo de datos recopilados fueron los hidrológicos, correspondientes a la estación limnigráfica PP-2A El Diamante de la empresa EPM, localizada 5 km aguas arriba del embalse sobre el cauce principal del río Porce y donde se registra un caudal medio multianual de 117.62 m³/s, además, el régimen de caudales presenta un comportamiento bimodal (Figura 3), con dos periodos secos y dos periodos húmedos (mayo-junio y octubre-noviembre). La distribución anual de entrada de agua al embalse se muestra en la Figura 3. Según Flórez-Molina *et al.* (2018), el tiempo de retención del agua en el embalse es de 20 días.

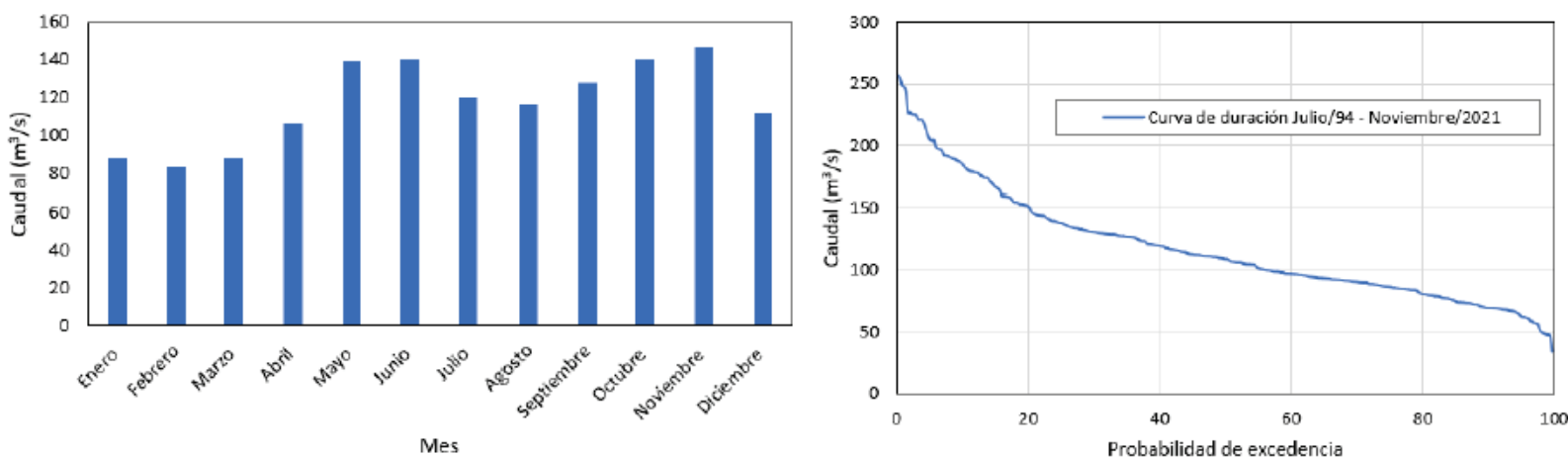


Figura 3. Ciclo anual de caudales medios y curva de duración caudales del río Porce en la estación limnigráfica PP-2A El Diamante.

Información sedimentológica

El tercer y último grupo de datos recopilados fueron los sedimentológicos, entre ellos la densidad seca promedio de los materiales que llegan al embalse (1.1 ton/m^3) y las tasas de sedimentación reportadas por el generador en 2018 a la Comisión Nacional de Operación y calculadas a partir de cuatro estudios batimétricos ejecutados en los años 2002 ($3.00 \text{ Mm}^3/\text{año}$ o 3.30 Mton/año); 2004 ($0.23 \text{ Mm}^3/\text{año}$ o 0.25 Mton/año); 2007 ($1.78 \text{ Mm}^3/\text{año}$ o 1.95 Mton/año), y 2015 ($3.36 \text{ Mm}^3/\text{año}$ o 3.70 Mton/año).

El perfil longitudinal del embalse (Figura 4) muestra un delta en avance hacia el sitio de presa con una velocidad promedio de 0.34 km/año y espesores de hasta 37 m según los análisis realizados por Córdoba-Yepes (2021). El perfil longitudinal es consistente con las tasas de sedimentación reportadas, siendo el periodo 2007-2015 el más crítico en términos del avance del delta y la sedimentación del cuerpo de agua.

Además, según Córdoba-Yepes (2021), existe un proceso de sedimentación anticipada donde las condiciones de flujo son incapaces de arrastrar los sedimentos hasta el sitio destinado para su deposición (volumen muerto o inactivo).

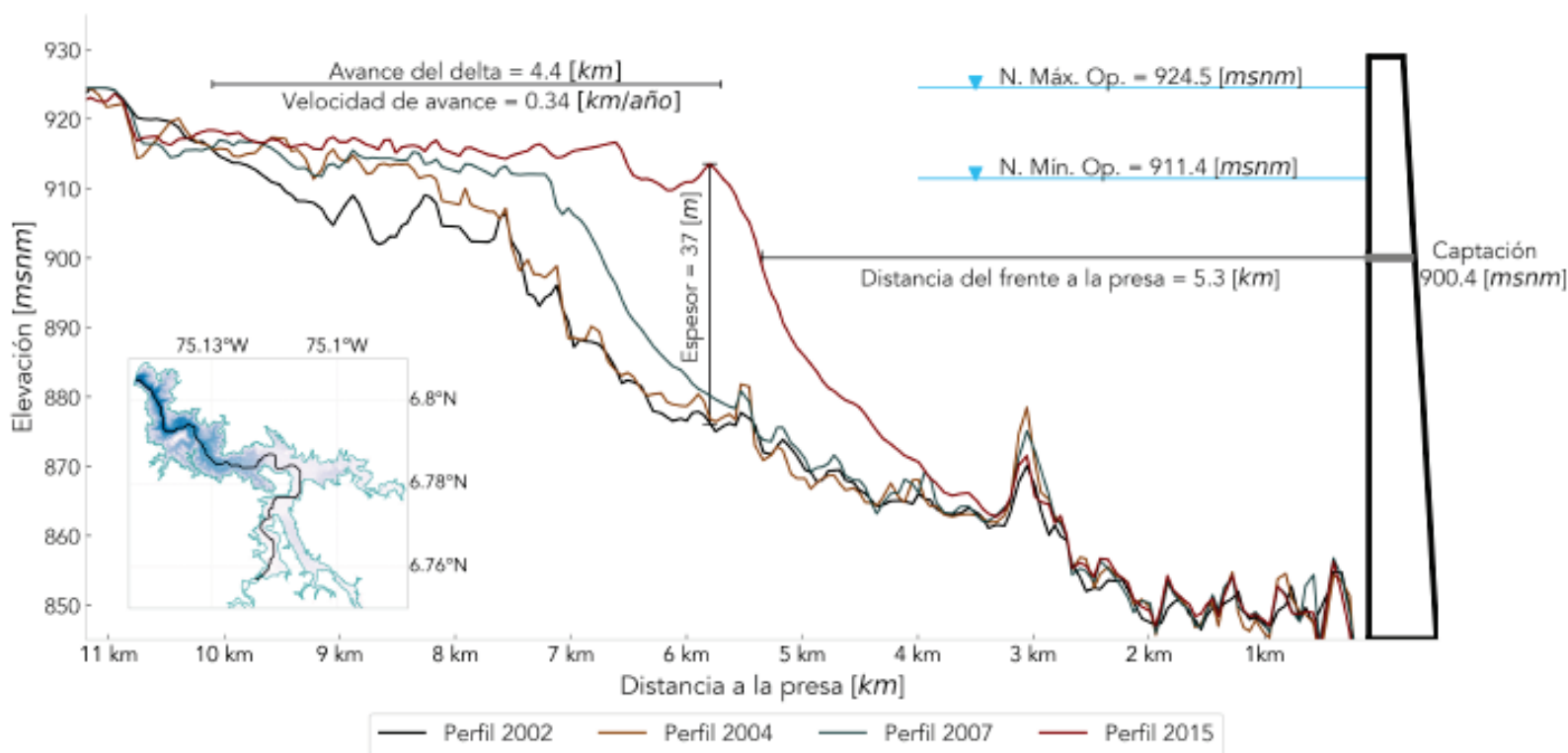


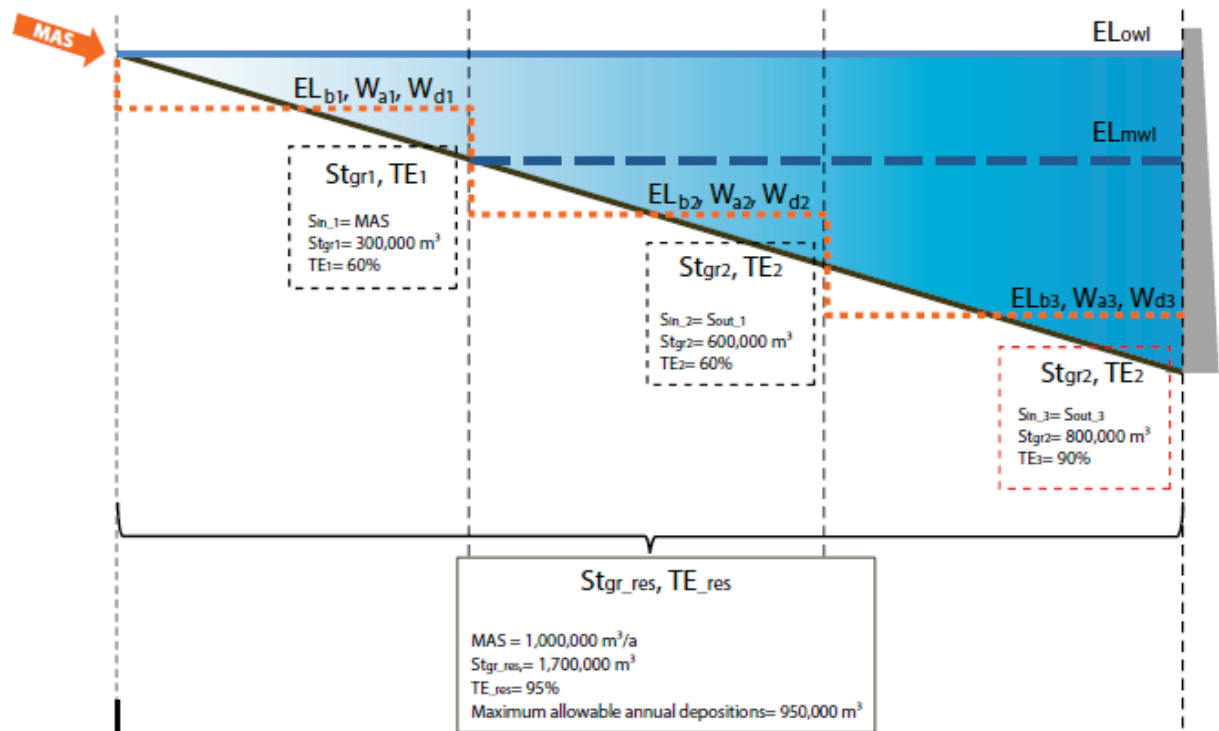
Figura 4. Perfil longitudinal del embalse Porce II y delta de sedimentos entre los años 2002 y 2015. Fuente: Córdoba-Yepes (2021).

Por otro lado, una de las grandes dificultades que genera la acumulación de los sedimentos es la desconexión de los afluentes (río Porce y quebradas Guaduas y Cancana) del embalse, como lo han reportado EPM (2018) y Flórez-Molina *et al.* (2018).

Modelo RESCON2 Beta

El análisis del embalse del proyecto Porce II a nivel de prefactibilidad se realizó con el modelo Reservoir Conservation (RESCON2) versión 2.2 Beta, que es una herramienta de análisis técnico que sirve para la evaluación rápida de alternativas de gestión de sedimentación en embalses a nivel de prefactibilidad, y cuyo objetivo es maximizar los rendimientos netos de la práctica de cada técnica o estrategia de gestión de los sedimentos. El rendimiento del embalse se basa en la capacidad volumétrica restante (V_t) y el valor unitario de este rendimiento es el determinante clave de los ingresos anuales; el escenario modelado fue con base en la tasa de sedimentación más alta y crítica (2015).

El modelo RESCON2 divide el embalse en varios compartimientos (mínimo 3 y máximo 10) y realiza un balance de masas a escala anual (Figura 5) entre el volumen medio anual de sedimento (carga de fondo más carga en suspensión) que ingresa al embalse (MAS), el volumen que es atrapado en este y el volumen que tiene la capacidad de salir, y usa dichos valores para estimar el volumen activo (V_a), el volumen inactivo (V_i) y el volumen total (V_t) en cada paso de tiempo.



Compartment		1	2	3	
Sediment Inflow in Compartment	Sin_i	1,000,000 m ³ (Mean Annual Sediment inflow in reservoir)	700,000 m ³ (Sediment release from compartment 1)	210,000 m ³ (Sediment release from compartment 2)	
Compartment's Trap Efficiency	TE_i	60%	70%	90%	
Potential deposits in the compartment	$Dep_{pot,i}$	600,000 m ³ ($Sin_1 \times TE_1$)	490,000 m ³ ($Sin_2 \times TE_2$)	189,000 m ³ ($Sin_3 \times TE_3$)	
Total deposits limitation	$Dep_{max,i}$	950,000 m ³ ($TE_{res} \times MAS$)	650,000 m ³ ($TE_{res} \times MAS - dep_1$)	160,000 m ³ ($TE_{res} \times MAS - dep_1 - dep_2$)	
Compartment Storage limitation	$Stgr_i$	300,000 m ³ (available compartment storage $Stgr_1$)	500,000 m ³ (available compartment storage $Stgr_2$)	800,000 m ³ (available compartment storage $Stgr_3$)	
Deposits in compartment i	Dep_i	300,000 m ³ Min ($Dep_{pot,i}$, $Dep_{max,i}$, $Stgr_i$)	490,000 m ³ Min ($Dep_{pot,i}$, $Dep_{max,i}$, $Stgr_i$)	160,000 m ³ Min ($Dep_{pot,i}$, $Dep_{max,i}$, $Stgr_i$)	950,000 ΣDep_i
Sediment Release from compartment i	$Sout_i$	700,000 m ³ ($Sin_i - Sout_i$)	210,000 m ³ ($Sin_i - Sout_i$)	50,000 m ³ ($Sin_i - Sout_i$)	50,000 (Sediment release from reservoir)

Figura 5. Ejemplo del método aplicado para la determinación de depósito de sedimentos en los compartimentos del embalse. Fuente: Efthymiou, *et al.* (2017).

Para el cálculo del atrapamiento de sedimentos en el embalse se puede elegir entre las metodologías de Brune, Churchill y Borland. Para este caso se usó la formulación de Brune y se consideró que la carga de fondo es el 20 % de la carga total de sedimentos que ingresan al embalse.

Resultados

Panorama actual de sedimentación

A continuación se muestra el resumen del panorama actual de sedimentación más crítica de las 21 centrales y embalses agremiados en la Acolgen. Es de resaltar que los porcentajes son calculados considerando una capacidad instalada total de 18.9 GW reportada por el Ministerio de Minas y Energía a mayo de 2023.

Estrategias de gestión disponibles

Como ya se mencionó, existen varias estrategias de gestión de sedimentos o técnicas de conservación, entre ellas la reducción del aporte de sedimentos a través de la gestión de cuenca hidrográfica (*catchment management*); el manejo de sedimentos dentro del embalse a través de la ventilación de corrientes de densidad (*density current venting*) y trasvases (*by-pass*); la evacuación de sedimentos del embalse a través de dragado (*dredging*) o evacuación en camiones (*trucking*), o el reemplazo del almacenamiento perdido. Sin embargo, luego del análisis de alternativas se identificó una dificultad adicional, la cual radica en que el proyecto Porce II opera en cadena con el proyecto Porce III, que presenta un embalse sumamente conservado gracias a la regulación de

los caudales líquidos y sólidos en el proyecto Porce II. Razón por la cual, actividades como el lavado de sedimentos (*flushing*) no son analizadas aquí. Además, hoy en día la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de Colombia (ANLA) no permite dicho tipo de descargas debido a la abundante fauna íctica presente en los ríos colombianos y que podría verse afectada.

Rendimiento físico del embalse Porce II sin acción

De los resultados del comportamiento del embalse para el escenario de sedimentación más crítico ($3.36 \text{ Mm}^3/\text{año}$) sin acción (Figura 6, Tabla 2), es decir, dejar que el proceso de sedimentación continúe sin ningún tipo de intervención, se observa que luego de poco de más de 40 años de operación se pierde el volumen útil o activo (línea azul), y al cabo de 105 años se pierde el volumen total de almacenamiento (línea gris).

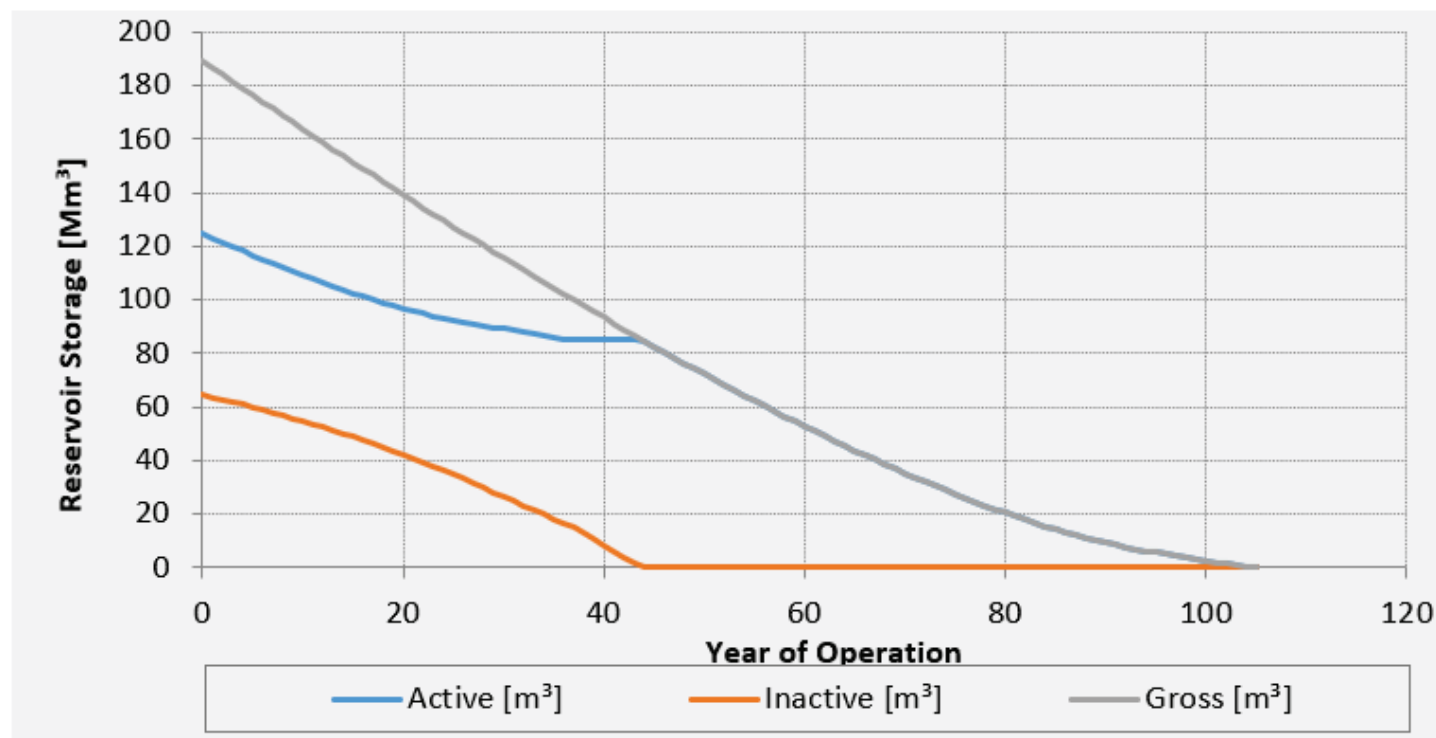


Figura 6. Capacidad remanente en el embalse para el escenario de no acción. Fuente: elaboración propia con base en el modelo RESCON2.

Tabla 2. Resumen del panorama actual de sedimentación.

Reducción	Centrales		Capacidad instalada (MW)	Generación año (GWh)	% capacidad instalada país
Del volumen muerto	< 20%	5 centrales	1 341	6 427	7.1
	20-50 %	3 centrales	1 084	4 785	5.7
	50-70 %	2 centrales	2 453	11 807	13.0
	> 70%	3 centrales	1 674	7 870	8.9
Del volumen útil	< 5%	6 centrales	3 533	16 439	18.7
	5-10 %	4 centrales	2 056	9 586	10.9
	10-20 %	1 central	540	2 091	2.9
	> 70%	1 central	74	330	0.4

Rendimiento físico del embalse Porce II, varias estrategias

Al analizar y evaluar las estrategias de gestión de sedimentos o técnicas de conservación se identifica que la técnica de la ventilación de corrientes de densidad (*density current venting*) presenta la menor efectividad (Figura 7), pues el volumen total de almacenamiento se pierde en menos tiempo que en el escenario de no acción (Figura 6); por otro lado, la técnica de la gestión de cuenca hidrográfica (*catchment management*), con un porcentaje de reducción de la carga de sedimentos del 10 % no supone mayores diferencias con el escenario de no acción (Figura 7). La técnica del trasvase (*by-pass*) y el supuesto de que se alcanzara un cuasi equilibrio sedimentológico entre lo que ingresa al embalse y lo que se descarga aguas abajo de la presa presentaron un mejor rendimiento de al menos 150 años hasta alcanzar la colmatación del cuerpo de agua. Finalmente, las técnicas de dragado (*dredging*) o evacuación en camiones (*trucking*) presentan los mejores desempeños al no depender en gran medida de la hidrodinámica del embalse sino más bien del músculo financiero y la capacidad de los equipos de evacuación.

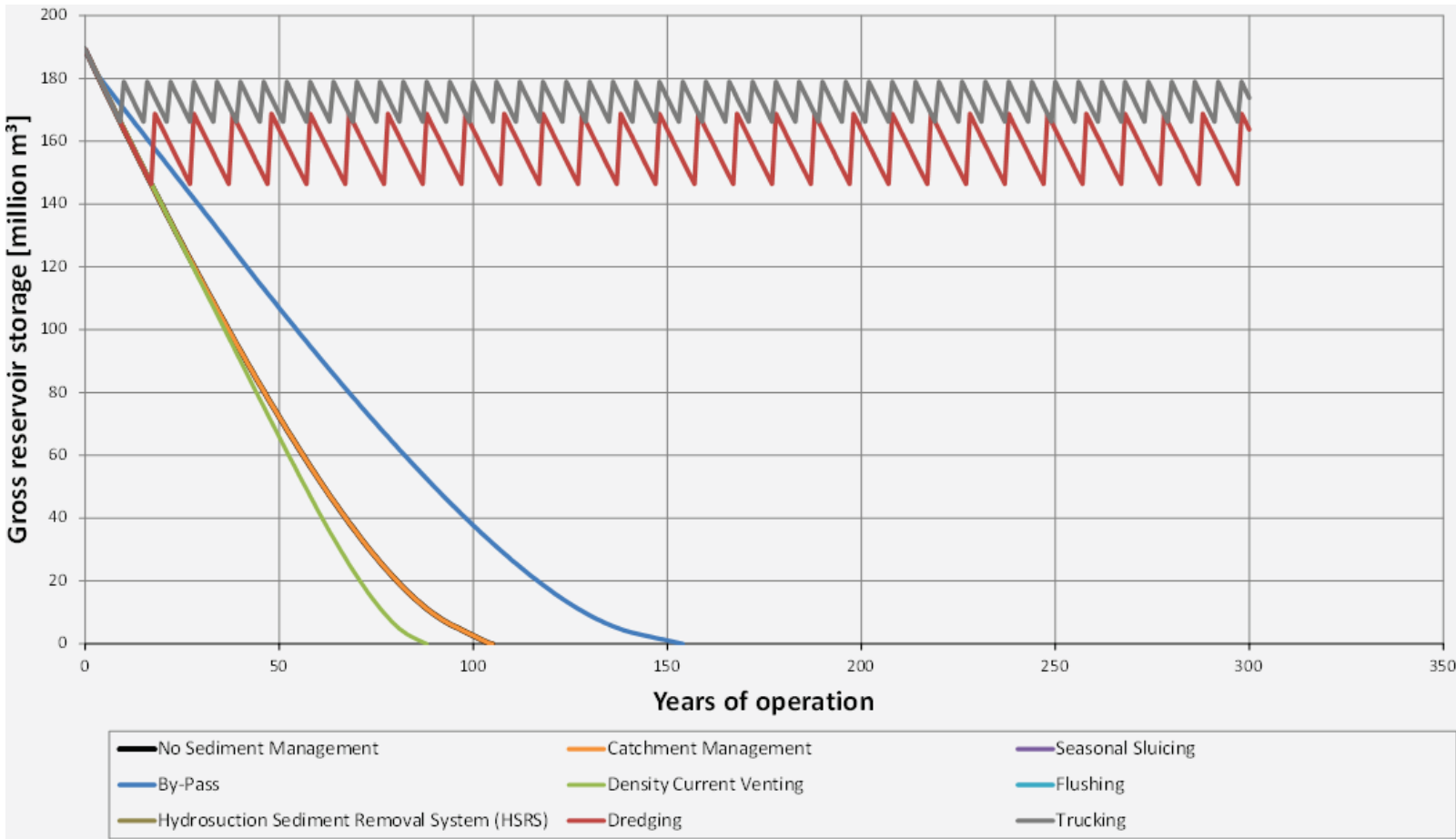


Figura 7. Capacidad remanente en el embalse para varias estrategias.
Fuente: elaboración propia con base en el modelo RESCON2.

Soluciones implementadas en casos críticos

A continuación se documentan las soluciones implementadas en tres de los casos críticos e históricos: 1) Bajo Anchicayá (74 MW), 2) Calderas (19.9 MW) y 3) Chivor (1000 MW). La central hidroeléctrica Bajo Anchicayá (CHBA) inició operaciones en 1955 con dos grupos de 13 MW y en 1957 con dos grupos de 24 MW. Aprovecha un caudal de 104 m³/s del río Anchicayá (proveniente de la descarga del Alto Anchicayá) y del río Dagua, y tiene como objetivo proveer de energía eléctrica a la zona

suroccidente de Colombia. Desde 1962 se realizan actividades continuas de dragado (Figura 8a y 8b) para mantener el proyecto en operación.



Figura 8. Aspecto de casos críticos de sedimentación en Colombia.

El embalse de la central hidroeléctrica Calderas tiene una capacidad de almacenamiento total de 330 000 m³, un volumen útil de 176 000 m³ y aprovecha las aguas de los ríos Calderas (5.2 m³/s) y Tafetanes (1.6 m³/s) para producir anualmente 87 GWh. La gestión de sedimentos se enfoca en remoción mecánica y/o apertura de la descarga de fondo (Figura 8c y 8d); sin embargo, luego de esta última actividad, las concentraciones de sólidos suspendidos aguas abajo de la presa han superado los 14 000 mg/l.

La central hidroeléctrica Chivor cuenta con el embalse La Esmeralda, el cual inició llenado en 1975 y para 2015 presentaba una disminución de volumen útil del 14 % y una reducción de volumen muerto del 80 %, razón por la cual se decidió abandonar la gestión de sedimentos y construir una nueva captación, como lo han documentado Del Río, Moffett, Nieto-Londoño, Vásquez y Escudero-Atehortúa (2020), lo cual prolongó la vida útil del proyecto 50 años más.

Discusión

El modelo *REServoir CONservation 2* (RESCON2) ha mostrado ser una herramienta útil para proyectar estrategias de gestión de la sedimentación desde el punto de vista técnico a nivel de prefactibilidad; además, la evaluación económica no tratada aquí permite traducir la regla de operación del embalse a valores cuantitativos que pueden ser provechosos para los tomadores de decisiones.

Asimismo, con respecto al caso de estudio analizado, se considera que la situación de este embalse es crítica y reclama atención debido a que se perdería capacidad de generación y seguridad energética para la

nación. El paso a seguir para completar el diseño de soluciones sería la realización de simulaciones numéricas tridimensionales (3D) con sedimento y, de ser posible, también evaluaciones en modelo físico. Es de resaltar el compromiso del generador, en este caso Empresas Públicas de Medellín (EPM), con el monitoreo periódico de las condiciones del embalse y la generación de datos para realizar proyecciones como las aquí realizadas.

Algunos autores consideran que para que la estrategia del trasvase (*by-pass*) funcione es común que se requiera vaciar casi totalmente un embalse para la extracción, pues con niveles altos en el vaso no se mueve el sedimento. Esto implica considerar en las maniobras que se lleven a cabo la “pérdida” del agua almacenada y la necesidad de volver a llenar el vaso, lo cual significa tiempo y dinero.

A pesar de que existen estrategias de gestión de sedimentos o técnicas de conservación del volumen de los embalses, esta capacidad debe tratarse como un recurso no renovable, como sugieren Kondolf y Yi (2022), más aún en cuencas tropicales altamente antropizadas y con altas tasas de producción de sedimentos.

Por último, aunque en Colombia es evidente un cambio de los proyectos a la tecnología solar-fotovoltaica, preservar los proyectos hidroenergéticos es vital debido a la confiabilidad y respaldo que le dan al sistema; ejemplo de esto es el famoso cargo por confiabilidad que se paga a los generadores para dar respaldo al sistema en condiciones críticas de disponibilidad.

Conclusiones

Los resultados del análisis permiten entender dos cosas: 1) la vida útil de un embalse tropical no es infinita, pues las cuencas hidrográficas del trópico producen muchos sedimentos y estos se van acumulando, como se ha mostrado aquí; 2) el caso de estudio permitió presentar una metodología de análisis a nivel de prefactibilidad actual y consecuente con las realidades del país, además de bajo costo y fácil implementación en muchos más casos de estudio.

Agradecimientos

Se agradece de manera especial a Empresas Públicas de Medellín (EPM) por los datos suministrados y a la Universidad Cooperativa de Colombia por los recursos aportados para el desarrollo de este trabajo a través del proyecto INV 3211.

Referencias

- Acolgen, Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica. (2019). *Capacidad instalada en Colombia*. Recuperado de <https://www.acolgen.org.co/>
- Batalla, R. (2003). Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 17, 79-91.

- Castro, P. W., & Mantilla, C. A. (2021). Implementation of strategies for the management of dams with sedimented reservoirs. *Water Resources Management*, 35(13), 4399-4413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02956-7>
- Córdoba-Yepes, S. (2021). *Modelación numérica bidimensional de la dinámica de sedimentación en un embalse tropical* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80536>
- Del Río, D. A., Moffett, H., Nieto-Londoño, C., Vásquez, R. E., & Escudero-Atehortúa, A. (2020). Chivor's life extension project (CLEP): From sediment management to development of a new intake system. *Water*, 12(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/w12102743>
- Efthymiou, N. P., Palt, S., Annandale, G. W., & Karki, P. (2017). *Reservoir conservation model Rescon 2 beta. Economic and engineering evaluation of alternative sediment management strategies. User Manual*. Washington, DC, USA: Banco Mundial. Recuperado de <https://www.hydropower.org/sediment-management-resources/tool-reservoir-conservation-model-rescon-2-beta>
- Emamgholizadeh, S., Bateni, S. M., & Nielson, J. R. (2018). Evaluation of different strategies for management of reservoir sedimentation in semi-arid regions: A case study (Dez Reservoir). *Lake and Reservoir Management*, 34(3), 270-282. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402381.2018.1436624>
- EPM, Empresas Públicas de Medellín. (2008). *Ingeniería de presas en Empresas Públicas de Medellín*. Medellín, Colombia: Empresas Públicas de Medellín.

- EPM, Empresas Públicas de Medellín. (2018). *Avances en gestión de sedimentos en el embalse Porce II*. Medellín, Colombia: Empresas Públicas de Medellín.
- Fan, J., & Morris, G. L. (1992a). Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), 354-369. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:3\(354\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(354))
- Fan, J., & Morris, G. L. (1992b). Reservoir sedimentation. II: Reservoir desiltation and long-term storage capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), 370-384. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:3\(370\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(370))
- Flórez-Molina, M. T., Parra-Sánchez, L. N., Bolaños-Benitez, S. V., Gallo-Sánchez, L. J., Poveda-Sáenz, A., & Agudelo-Echavarría, D. M. (2018). Tasas de sedimentación y características de sedimentos de fondo en tres embalses de Antioquia, Colombia. *Ingeniería del Agua*, 22(4 SE-Artículos), 177-194. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8001>
- Gracia, J. (1996). Sedimentación en embalses. En: *Manual de ingeniería de ríos*. México, DF, México: Instituto de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Idrees, M. B., Lee, J.-Y., Kim, D., & Kim, T.-W. (2021). Complementary modeling approach for estimating sedimentation and hydraulic flushing parameters using artificial neural networks and RESCON2 model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(10), 3766-3778. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1877-9>

- Idrees, M. B., Lee, J.-Y., & Kim, T.-W. (2019). Estimating RESCON model parameters for efficient sediment flushing in a dam reservoir. *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 224. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8229-9>
- Jiménez, Ó., Farias, H. D., & Rodríguez, C. (2005). Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería del Agua*, 12(3), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2005.2561>
- Kantoush, S. A., Mousa, A., Shahmirzadi, E. M., Toshiyuki, T., & Sumi, T. (2021). Pilot field implementation of suction dredging for sustainable sediment management of dam reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(2), 4020098. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001843](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001843)
- Kawashima, S., Johndrow, T., Annandale, G. W., & Shah, F. (2003). *Reservoir conservation. Volume II. RESCON model and user manual*. Washington, DC, USA: The World Bank.
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.-W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., & Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256-280. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>
- Kondolf, M., & Yi, J. (2022). Dam renovation to prolong reservoir life and mitigate dam impacts. *Water*, 14(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/w14091464>

- Morris, G. L. (2020). Classification of management alternatives to combat reservoir sedimentation. *Water*, 12(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030861>
- Morris, G. L., Annandale, G., & Hotchkiss, R. (2008). Reservoir sedimentation. In: *Sedimentation Engineering* (pp. 579-612). DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784408148.ch12>
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook*. New York, USA: McGraw-Hill Book Co.
- Palau, A. (2002). *La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras*. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, 10. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/57917394/La-sedimentacion-en-embalses-medidas-preventivas-y-correctoras>
- Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G. W., & Dinar, A. (2003). *Reservoir conservation. Volume I. The RESCON approach*. Washington, DC, USA: The World Bank.
- Randle, T. J., Morris, G. L., Tullos, D. D., Weirich, F. H., Kondolf, G. M., Moriasi, D. N., Annandale, G. W., Fripp, J., Minear, J. T., & Wegner, D. L. (2021a). Sustaining United States reservoir storage capacity: Need for a new paradigm. *Journal of Hydrology*, 602, 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126686>
- Randle, T. J., Morris, G. L., Tullos, D. D., Weirich, F. H., Kondolf, G. M., Moriasi, D. N., Annandale, G. W., Fripp, J., Minear, J. T., & Wegner, D. L. (2021b). Sustaining United States reservoir storage capacity: Need for a new paradigm. *Journal of Hydrology*, 602, 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126686>

- Ríos, D. (2021). Sedimentación reciente e histórica en embalses de Colombia. *Revista Hidrolatinoamericana*, 5, 16-19.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>