

Gestión Sostenible de Embalses: Estrategia para impulsar la transición energética del país

Pedro Wirley Castro Fori
Celsia Colombia S.A. E.S.P.
Calle 15 No. 29B – 30 Autopista Cali - Yumbo
E-mail: pwcastro@celsia.com
Yumbo – Colombia

Henry Nelson Vargas Lozano,
Celsia Colombia S.A. E.S.P.
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: hnvargas@celsia.com
Cali – Colombia

Carlos Alberto Mantilla
Celsia Colombia S.A. E.S.P.
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: camantilla@celsia.com
Cali – Colombia

Resumen

Este trabajo analiza las estrategias de gestión sostenible de embalses y su papel fundamental en la transición energética del país. En un contexto en el que la pérdida de capacidad de almacenamiento es una preocupación creciente, con tasas anuales de reducción que oscilan entre el 0.1% y el 1%, el presente artículo subraya la urgente necesidad de aplicar enfoques innovadores para preservar y optimizar los embalses, manteniendo su capacidad de almacenamiento como fuentes de energía renovable.

En este artículo se abordan los principales desafíos que enfrentan los gestores de embalses, como la optimización de la eficiencia de los equipos y la gestión racional del recurso hídrico a través del mantenimiento y la regulación del embalse para asegurar su capacidad de almacenamiento, explorando oportunidades para desarrollar la producción de energía eléctrica bajo principios de sostenibilidad. El estudio detalla estrategias específicas para mitigar los efectos de la sedimentación, maximizar el rendimiento de los embalses, demostrando cómo estas medidas contribuyen al fortalecimiento de la seguridad energética y a la reducción de las emisiones de gases

de efecto invernadero, en línea con las estrategias globales para una transición energética sostenible.

Además, se presenta un caso de éxito en la implementación de prácticas de gestión sostenible de embalses, destacando cómo estas estrategias no solo han logrado mantener la capacidad de almacenamiento, sino que también han promovido la resiliencia y sostenibilidad a largo plazo del embalse. Los resultados de la implementación de estas prácticas proporcionan una guía práctica para gestores, administradores del recurso y responsables de políticas que buscan integrar los embalses de manera efectiva en la transición hacia un sistema energético más verde y sostenible.

Introducción

Los embalses han sido infraestructuras fundamentales para la regulación de recursos hídricos y la generación de energía hidroeléctrica a lo largo de la historia. Sin embargo, su vida útil está siendo progresivamente amenazada por la acumulación de sedimentos, un proceso que reduce su capacidad de almacenamiento y, en consecuencia, afecta su eficiencia. A nivel mundial, la sedimentación en los embalses representa uno de los

principales factores que contribuyen a la disminución del rendimiento de estos sistemas. Se estima que la capacidad de almacenamiento de muchos embalses se reduce entre un 0.1% y un 1% anualmente [1], lo que resulta en una pérdida considerable de recursos hídricos esenciales.

Este fenómeno no solo impacta la capacidad de almacenamiento de agua y la generación de energía, sino que también tiene efectos negativos sobre el medio ambiente y las comunidades que dependen de estos recursos. En este contexto, la gestión eficiente de los embalses y de los sedimentos acumulados se posiciona como un aspecto clave para asegurar que estas infraestructuras sigan desempeñando un papel crucial en la transición energética hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

El objetivo de este artículo es explorar las estrategias de gestión sostenible de embalses, buscando preservar su capacidad operativa y optimizar su contribución a la matriz energética nacional. Para ello, se presenta un diagrama de flujo que ilustra cómo implementar un programa de gestión sostenible, con un enfoque integral, que garantice la eficiencia operativa y favorezca el desarrollo de un sistema energético más verde y resiliente.

Estrategias de gestión sostenible de embalse

Según Peviani [2], no existe un único método para recuperar la capacidad de un embalse; la estrategia más efectiva es una combinación de intervenciones gestionadas mediante un enfoque integral. Estas intervenciones incluyen: la remoción mecánica eficiente de sedimentos, el tránsito controlado de sedimentos durante la operación de las turbinas y la presa, y la dilución del flujo mínimo de sedimentos, siempre con el objetivo de reducir al máximo el impacto ambiental.

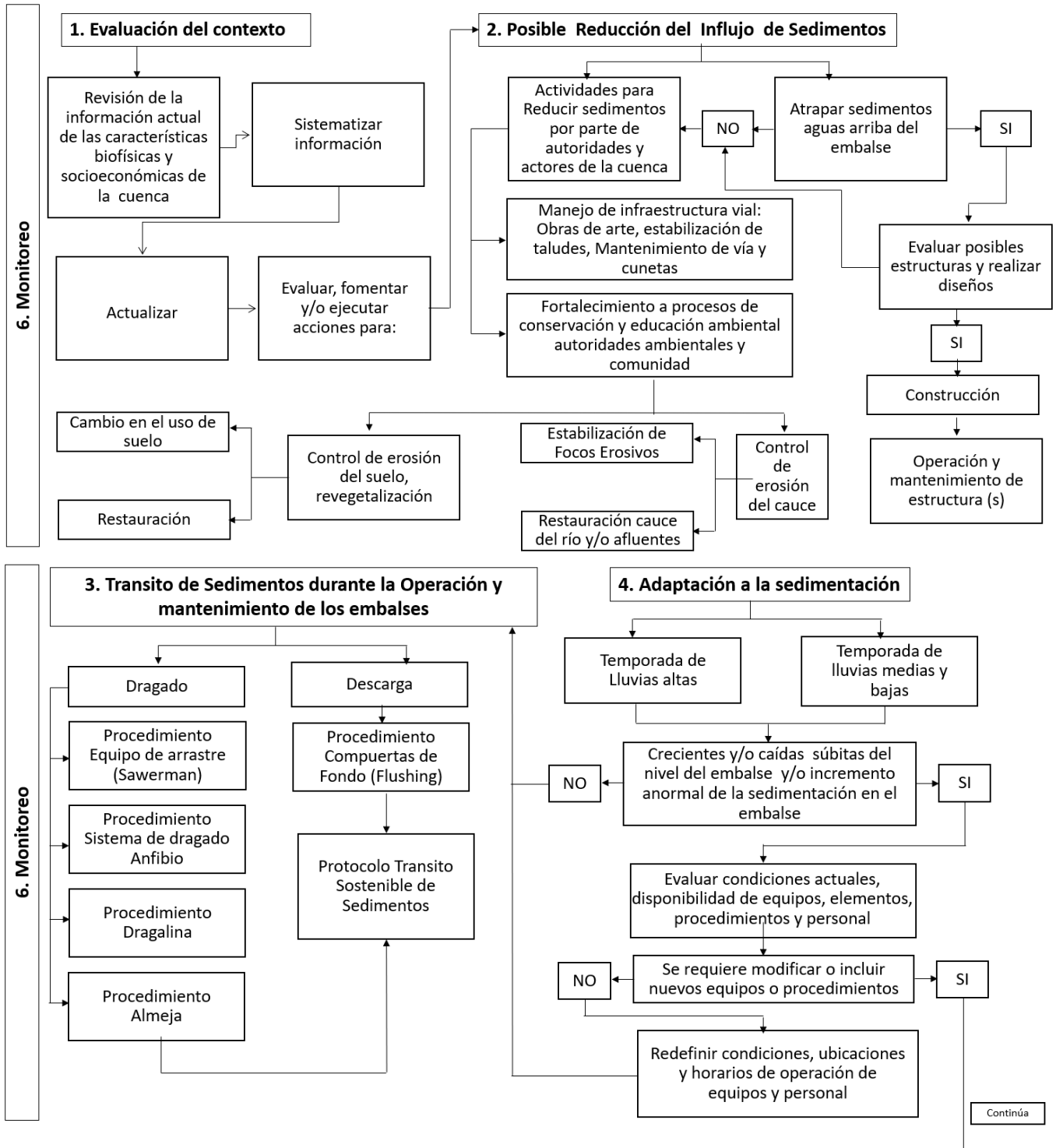
De manera complementaria, Morris [3] sugiere que, para lograr una gestión sostenible de sedimentos, es esencial evaluar varios aspectos, como los cambios operacionales, las modificaciones estructurales y la implementación de un monitoreo exhaustivo de las

actividades y los impactos ambientales asociados. Siguiendo estos principios, Vargas [4] propone una adaptación específica para la Central Hidroeléctrica de Bajo Alto (CHBA), basada en las recomendaciones de Peviani y Morris.

Castro y Mantilla [5], así como Castro [6], documentan casos exitosos en los que la gestión sostenible de sedimentos ha facilitado la recuperación de embalses. Mantilla et al. [7] presentan un programa exitoso de tránsito sostenible de sedimentos, mientras que Castro y Vargas [8] desarrollaron estudios sobre la calidad del agua que evidencian los resultados positivos de la implementación de programas de tránsito sostenible, demostrando la efectividad de estas prácticas para mitigar impactos ambientales.

A continuación, en la Fig. 1, se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso para implementar un programa de tránsito sostenible de sedimentos. Este enfoque se constituye como un pilar fundamental que puede adaptarse y aplicarse por parte de los distintos gestores de embalses, sirviendo como modelo para una gestión más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Gestión Sostenible de Sedimentos en Embalses



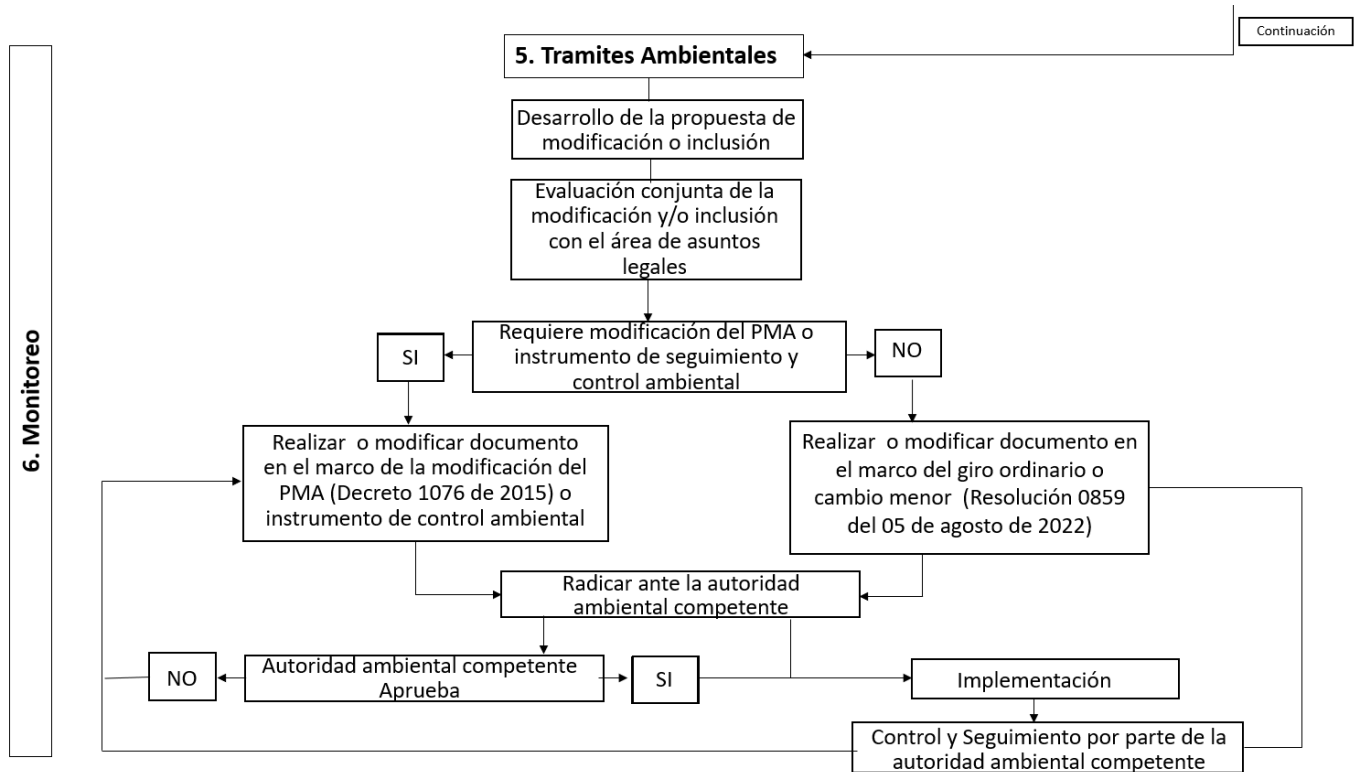


Fig. 1. Diagrama de flujo para la implementación de un programa de gestión sostenible de sedimentos.

Desafíos y oportunidades de los embalses para la generación hidroeléctrica como pilar en la transición energética.

La transición energética busca transformar el sistema energético global, migrando de un modelo dependiente de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) hacia uno centrado en energías renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica. Esta transición no solo tiene como objetivo la reducción de los gases de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático, sino también la construcción de un sistema energético más sostenible, equitativo y resiliente [9][10].

En este contexto, Colombia ha ratificado su compromiso con la transición energética a través de la promulgación de la Ley 2099 de 2021. Aunque esta ley está orientada principalmente a promover energías renovables no convencionales, las hidroeléctricas siguen siendo un pilar fundamental en la matriz energética del país. Estas fuentes de energía

proporcionan una opción confiable, complementando la intermitencia de las energías renovables no convencionales.

Sin embargo, para que los embalses sigan siendo una fuente clave de energía renovable, es necesario enfrentar diversos desafíos y aprovechar las oportunidades que presenta el contexto actual, marcado por políticas nacionales e internacionales que favorecen las energías renovables. Uno de los principales retos es la adaptación a la variabilidad climática, particularmente al fenómeno de El Niño, que ha causado descensos críticos en los niveles de los embalses. Aunque se ha logrado mitigar este impacto mediante el uso de fuentes de energía térmica, la gestión sostenible de los embalses a través de un tránsito responsable de los sedimentos podría mejorar su capacidad de almacenamiento, garantizando una mayor disponibilidad del recurso durante periodos de sequía.

Otro desafío relevante es la necesidad de fomentar la sinergia entre los diversos actores y autoridades encargadas de las cuencas hidrográficas que abastecen los embalses. Un manejo conjunto del control de la deforestación, las actividades agropecuarias, las vías y el saneamiento básico (agua potable, residuos y aguas residuales) contribuiría a una gobernanza del agua que mantuviera su calidad y cantidad, reduciendo significativamente los sedimentos que llegan a los embalses y, por ende, preservando su capacidad de almacenamiento.

Además, es crucial que las autoridades ambientales, tanto nacionales como regionales, establezcan políticas claras y eficientes en relación con el tránsito de sedimentos. Aunque la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ha avanzado en este ámbito, aún queda mucho por hacer para cumplir los retos de la transición energética en Colombia.

Por otro lado, muchas de las centrales hidroeléctricas del país fueron construidas entre las décadas de 1950 y 1980, por lo que requieren una actualización tecnológica. Si bien ya se han implementado algunas mejoras, es fundamental que los componentes de estas centrales alcancen los estándares tecnológicos actuales para garantizar su eficiencia y sostenibilidad.

A pesar de estos desafíos, las oportunidades también son significativas. Desde la promulgación de la Ley 99 de 1993, las centrales hidroeléctricas han estado evaluando los impactos de sus operaciones y desarrollando controles operacionales ambientales, basados en la normativa vigente. Además, la recopilación de datos relacionados con los ecosistemas hídricos y terrestres, especialmente en las áreas aguas arriba de los embalses, permite gestionar mejor el territorio y fortalecer la resiliencia de los embalses frente a los cambios en la cantidad y calidad del agua, especialmente en lo que respecta a los sedimentos.

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) de la ONU ha destacado que es más rentable desde el punto de vista ambiental, social y económico recuperar, aumentar y mantener la capacidad de los embalses existentes, en lugar de clausurarlos y construir nuevos. En línea con esta premisa, diversas políticas están orientadas a apoyar la actualización de los embalses y sus componentes. La Ley 2099 de 2021

establece incentivos económicos y fiscales, como deducciones tributarias, exenciones de IVA, exoneración de aranceles y depreciación acelerada, lo que abre una ventana para renovar la infraestructura hidroeléctrica del país.

Adicionalmente, los avances en ciencia y tecnología se han vuelto más accesibles y aplicables, lo que representa una oportunidad clave para mejorar las condiciones de los embalses y optimizar su infraestructura. La creciente demanda de energía también se configura como una oportunidad para asegurar el suministro constante de electricidad, consolidando los ingresos necesarios para atender los cambios que exige la transición energética.

Caso de éxito en la implementación de una gestión sostenible de embalse

Un ejemplo sobresaliente de gestión sostenible de embalses se encuentra en la Central Hidroeléctrica de Bajo Alto (CHBA), donde se implementó un programa exitoso que no solo recuperó la capacidad operativa del embalse, sino que también aseguró la continuidad en la generación de energía de la central.

El enfoque adoptado en la CHBA incluyó diversas intervenciones técnicas y operacionales, respaldadas por un monitoreo constante de la cantidad de sedimentos y de las condiciones del agua (como se ilustra en la Fig. 1). Este sistema de monitoreo permitió una gestión más eficiente y precisa de los recursos hídricos, optimizando tanto el rendimiento energético como la sostenibilidad ambiental del embalse.

El éxito de este programa ha demostrado la viabilidad de implementar estrategias de gestión sostenible que integren la operación eficiente de las centrales hidroeléctricas con la conservación del entorno natural. Esta experiencia ha servido como modelo para otras centrales hidroeléctricas del país, destacando la importancia de combinar el manejo responsable de los sedimentos con el aprovechamiento de nuevas oportunidades tecnológicas y las políticas de sostenibilidad vigentes.



Fig. 2. Embalse CHBA sedimentado



Fig. 3. Recuperación embalse CHBA.

Recomendaciones

Es crucial implementar programas de manejo sostenible de sedimentos, como los que han demostrado éxito en la CHBA, para mantener la capacidad de almacenamiento de los embalses. Se recomienda integrar un monitoreo constante de sedimentos y condiciones hídricas en las operaciones de las centrales hidroeléctricas, lo que permitirá una gestión más eficiente de los recursos y aumentará la resiliencia frente a los efectos del cambio climático.

Es necesario promover una mayor colaboración entre los diversos actores involucrados en la gestión de cuencas hidrográficas, incluidas autoridades locales, comunidades y sectores productivos. Una gestión conjunta de las cuencas, que contemple el control de la deforestación, el manejo de actividades agropecuarias y el saneamiento básico, contribuirá a reducir los sedimentos en los embalses, mejorando tanto su

capacidad de almacenamiento como la calidad del recurso hídrico.

Aprovechar los avances científicos y tecnológicos, especialmente en el monitoreo y tratamiento de sedimentos, será clave para mejorar la eficiencia operativa de los embalses. Se recomienda invertir en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que optimicen el uso de los recursos hídricos, reduzcan los impactos ambientales y fortalezcan la generación de energía hidroeléctrica.

Las autoridades ambientales deben seguir desarrollando políticas claras y efectivas sobre la gestión sostenible de sedimentos y la adaptación al cambio climático. Es fundamental establecer marcos regulatorios que promuevan la actualización de las infraestructuras hidroeléctricas y favorezcan la sostenibilidad de los embalses a largo plazo, alineándose con los principios de la transición energética.

Conclusiones

Los embalses hidroeléctricos son esenciales en la matriz energética nacional, particularmente en países como Colombia, donde garantizan la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico. A pesar de los desafíos del cambio climático, los embalses siguen siendo una fuente renovable de energía que puede aprovecharse de manera más eficiente mediante una gestión sostenible.

Las estrategias de gestión sostenible de embalses, como el tránsito controlado de sedimentos, el monitoreo continuo y la actualización tecnológica de las infraestructuras, son fundamentales para asegurar la operatividad y eficiencia a largo plazo. La experiencia de la CHBA es un ejemplo exitoso de cómo un enfoque integral puede mejorar la capacidad de almacenamiento y la generación de energía, fortaleciendo la seguridad energética del país.

Si bien los embalses enfrentan desafíos, como la sedimentación y los efectos del cambio climático, también presentan oportunidades para garantizar mayor estabilidad energética dentro de la transición hacia fuentes de energía más limpias. Las políticas

públicas y los avances tecnológicos son clave para maximizar el potencial de los embalses y asegurar su contribución al sistema energético.

La gestión sostenible de embalses requiere un enfoque coordinado entre autoridades, gestores hidroeléctricos, comunidades locales y otros actores clave. Solo mediante una acción integrada y colaborativa se podrá garantizar la preservación de los recursos hídricos, mejorar la eficiencia energética y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los embalses como fuentes de energía renovable.

Bibliografía

- [1] Morris, Annandale and Hotchkiss. Reservoir Sedimentation. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. 2008.
- [2] Peviani M. (2015) Marco regulatorio, Implementación de programas de manejo sostenible de sedimentos. 1er taller sobre gestión de sedimentos en embalses en Colombia, Consejo Nacional de Operación, Bogotá. Archivo digital CELSIA COLOMBIA.
- [3] Morris G. & Porlatín J, (2015) Manejo de Sedimentación en Embalses Hidroeléctricas, 1er taller sobre gestión de sedimentos en embalses en Colombia, Consejo Nacional de Operación, Bogotá. Recuperado de: <https://www.cno.org.co/sites/default/files/documentos/noticias/1-GREGORY%20MORRIS%20-ESP-%20Sedimentaci%C3%B3n%20de%20Embalses-Presentaci%C3%B3n%20CNO-Mayo%202015.pdf>
- [4] Vargas H. (2018) Gestión Sostenible de Sedimentos en el Embalse de la Central Hidráulica Bajo Anchicayá. Congreso Internacional de Mantenimiento y gestión de Activos. Tomado de: https://www.google.com/search?q=aciem+conrego&rlz=1C1GGRV_enCO751CO751&oq=aciem+conrego&aqs=chrome..69i57j0i13.2664j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [5] P.W. Castro and C. A. Mantilla. Implementation of Strategies for the Management of Dams with Sedimented Reservoirs. Water Resour Manage 35, pp. 4399–4413, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02956-7>

[6] Castro, P. W. (2022). Sediment management at the water intake of hydropower plants. Arabian Journal of Geosciences, 15(12), 1-11.

[7] Mantilla, C., Castro, P., Vargas, H., & Arteaga, H. (2022). Gestión sostenible de sedimentos: Una necesidad del sector hidroeléctrico. CIMGA. Retrieved 24-05-2022 from

https://cimga.com/2022/Trabajos/045_TRA_COL_C_MANTILLA_CIMGA2022.pdf

[8] Castro, P.W., Vargas, H.N. Assessment of water quality on the reservoir of hydropower plant: case study Bajo Anchicayá dam, Colombia. Arab J Geosci 18, 43 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12517-025-12187-4>

[9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Global Warming of 1.5°C.

Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15>

[10] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Renewable Energy and Jobs – Annual Review.

Disponible en: <https://www.irena.org/publications>

Pedro Wirley Castro Fori: Ingeniero Mecánico con un MBA en Gestión de Activos.

Actualmente trabaja como líder de centrales hidráulicas en la Gerencia de Generación de Celsia Colombia S.A. E.S.P.

Cuenta con más de 13 años de experiencia en gestión de activos, enfocada en centrales hidráulicas, Dragado, tránsito de sedimentos y recuperación de embalses, seguridad de presas y gestión del riesgo. Su trayectoria se caracteriza por un enfoque práctico y técnico para garantizar el adecuado funcionamiento y mantenimiento de los activos en el sector energético.

Celsia Colombia S.A. E.S.P.

Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo

E-mail: pwcastro@celsia.com

Cali – Colombia

Henry Nelson Vargas Lozano, Ecólogo, Msc
Energías Renovables y Sostenibilidad Energética.
Ambiental Centrales Hidráulicas. Gerencia de
Generación. Celsia Colombia S.A.E.S.P.
Experto en gestión ambiental y gestión sostenible
de centrales hidráulicas.
Celsia Colombia S.A. E.S.P.
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: hnvargas@celsia.com
Cali – Colombia

Carlos Alberto Mantilla, Ingeniero Mecánico,
Msc Ingeniería mecánica. Lider Generacion
hidráulica y eólica. Gerencia de Generación.
Celsia Colombia S.A.E.S.P.
Experto en gestión de activos, centrales
hidráulicas, embalse, seguridad de presas,
gestión del riesgo y activos en centrales
hidráulicas.
Celsia Colombia S.A. E.S.P.
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: camantilla@celsia.com