

Más allá de la energía: Explorando las implicaciones de las grandes hidroeléctricas a niveles regionales y fortalecer su camino hacia una energía renovable sustentable.

Anthony Parra Malaver - Leonardo Diaz Orozco
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Las centrales hidroeléctricas generan energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía potencial contenida en el flujo de agua, estas desempeñan un papel crucial en la matriz energética global. La mayor composición de centrales generadoras a nivel mundial aprovecha el agua como recurso para generar energía. Según (*Energy Agency, 2021*) “A nivel mundial, la industria hidroeléctrica cubre casi el 17 % de la demanda mundial de electricidad”, contribuyendo así significativamente a la estabilidad y sostenibilidad del suministro energético. Estas instalaciones de generación pueden estar clasificadas según la magnitud de su capacidad, adaptándose a las diversas necesidades y condiciones geográficas de cada región. Además de su importancia como fuente de energía renovable, las hidroeléctricas también proporcionan beneficios adicionales, como el almacenamiento de energía y la regulación del suministro eléctrico, lo que las convierte en una opción integral para el desarrollo sostenible a nivel mundial.

La construcción y operación de centrales hidroeléctricas a gran escala generan una serie de impactos ambientales significativos, aunque las centrales más pequeñas también lo hagan, el enfoque se centrara en las primeras. Además de los cambios en el territorio y las alteraciones en el ecosistema natural, estas instalaciones pueden perturbar el ciclo de vida de la fauna local al modificar el flujo natural del agua, afectando los patrones reproductivos y desplazando especies acuáticas. La acumulación de sedimentos en el embalse creado por la represa puede provocar cambios en la composición del lecho del río aguas abajo, comprometiendo la biodiversidad y la salud de los hábitats circundantes. La calidad del agua represada se ve afectada por la acumulación de materia orgánica, nutrientes y sedimentos, lo que afecta los ecosistemas acuáticos y las comunidades que dependen de fuentes de agua saludables. La pérdida de zonas de pesca y hábitats ribereños subraya cómo estos proyectos pueden afectar directamente las actividades económicas y la biodiversidad local (Restrepo et

GIPeM 05, diciembre (2023)
pp. 68-76
www.gipem.co/revista-gipem
gipem_fiarman@unal.edu.co
©Derechos patrimoniales
Universidad Nacional de
Colombia

al., 2019). Por lo tanto, es crucial implementar medidas de mitigación y prácticas sostenibles en la planificación y gestión de centrales hidroeléctricas para minimizar su impacto ambiental y promover un equilibrio entre la generación de energía y la conservación del medio ambiente.

Los impactos ecológicos de las centrales hidroeléctricas también se ven reflejados en la fragmentación de los ríos, se estima que el 70 % de los ríos del mundo están interrumpidos por presas, y la construcción y el funcionamiento de más de 50 000 grandes presas en todo el mundo han alterado gravemente el flujo global de agua y sedimentos de los continentes a los océanos, lo que impide la migración de peces y la conectividad de ecosistemas acuáticos (Cui et al., 2021). A nivel social, las comunidades locales han sufrido desplazamientos forzados, afectando su modo de vida y actividades productivas. Durante el desarrollo de este ensayo se profundizará en el análisis de los principales impactos ecológicos y sociales derivados por la instalación de hidroeléctricas, y se examinará cómo estos impactos varían de acuerdo al dimensionamiento de la misma. En el contexto actual de la generación de energía hidroeléctrica, es fundamental analizar si es posible desarrollar un modelo que sea ambiental y socialmente sustentable, o si los impactos ecológicos y comunitarios son inevitables.

Las centrales hidroeléctricas suelen operar desviando el curso natural de los ríos, almacenando el agua en grandes embalses antes de liberarla de manera controlada hacia las turbinas generadoras y, finalmente, devolverla al cauce aguas abajo. No obstante, este proceso altera drásticamente los caudales en ciertos periodos y genera volúmenes considerables de agua en otros. Además, perturba el transporte normal de nutrientes y sedimentos, provocando consecuencias ecológicas de gran magnitud. La interrupción de estos procesos esenciales puede afectar negativamente la biodiversidad acuática, la calidad del agua y la salud general de los ecosistemas fluviales. Por consiguiente, la planificación y gestión cuidadosa de las operaciones hidroeléctricas son esenciales para mitigar estos impactos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados.

En este contexto, uno de los impactos significativos de las centrales hidroeléctricas radica en la perturbación del caudal ecológico de los ríos. El término "caudal ecológico" se refiere al flujo mínimo de agua necesario en un río para preservar los procesos ecológicos y la biodiversidad (Aguilera & Pouilly, 2012). Este fenómeno destaca la relevancia del concepto de caudal ambiental, que busca proteger y conservar los valores ambientales de un río al asegurar la presencia de un volumen adecuado de agua en su cauce. Esta noción no solo aborda la dimensión cuantitativa del caudal, sino que también reconoce la importancia de mantener los patrones naturales de este. La regulación del caudal por las hidroeléctricas no solo interrumpe estos patrones naturales, sino que también puede disminuir de manera significativa los caudales, especialmente durante periodos de bajos niveles de agua (Santacruz & Palacios, 2013).

Estas alteraciones afectan la dinámica de los ecosistemas acuáticos y ribereños que dependen de las variaciones estacionales y los pulsos de inundación para funcionar correctamente. Es aquí donde el caudal ambiental cobra relevancia, ya que su alcance va mucho más allá que la cantidad de agua presente en el río. La permanencia y el volumen adecuado de agua en el cauce se convierte en un mecanismo crucial para la conservación del ecosistema. Este equilibrio asegura no solo la supervivencia de diversas especies acuáticas y ribereñas, sino también el transporte apropiado de sedimentos, nutrientes y materia orgánica. Estos procesos son esenciales para mantener la salud y la diversidad biológica de los ecosistemas fluviales, contribuyendo a su sostenibilidad a largo plazo. Es por esto que, la gestión cuidadosa del caudal ambiental se revela como un componente vital para mitigar los impactos adversos de las alteraciones hidroeléctricas en los sistemas acuáticos y ribereños.

En este contexto de interdependencia ecológica, uno de los efectos más destacados de las hidroeléctricas es la eutrofización, un proceso en el cual la disminución del flujo de agua en el embalse conlleva una reducción del oxígeno disuelto y un aumento en la concentración de nutrientes, fomentando el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas. Esta alteración impacta todo el ecosistema y puede

resultar en la muerte masiva de peces y otras especies debido a la falta de oxígeno, causada por el cambio en la presión arterial ocasionada por las burbujas que bloquean los vasos sanguíneos (Li et al., 2010; Tomczyk & Wiatkowski, 2021). Además, la represa bloquea las rutas migratorias de los peces aguas arriba y aguas abajo, impidiendo su encuentro para el desove, lo que afecta significativamente la biodiversidad de los peces en los ecosistemas fluviales. Este impacto en la biodiversidad de los peces ha sido destacado por estudios recientes (Sedighkia & Abdoli, 2023; Wu et al., 2019).

Adicionalmente, el embalse inunda extensas áreas de bosque y vegetación ribereña, ocasionando la destrucción de hábitats y nichos ecológicos. Esto afecta toda la red trófica, desde anfibios, aves e insectos hasta grandes depredadores como jaguares que dependen de la caza de peces migratorios. Para abordar estos desafíos, es esencial emplear sistemas de evaluación que consideren todos los posibles impactos ambientales y sociales. Uno de estos enfoques, propuesto por (Zi,2010), implica establecer clasificaciones que permitan estimar los servicios ecosistémicos hídricos de los ríos. Esta perspectiva ofrece juicios de valor que facilitan la minimización de los impactos generados. Además, la aplicación de tecnologías geoespaciales, como la empleada en Brasil por (Jardini et al.,2013) para la central eléctrica de Lajeado, se presenta como otro método valioso en este contexto.

El uso del método geoespacial implica realizar un análisis riguroso para determinar el comportamiento económico de las zonas y su repercusión que causa en estas desde la creación de la hidroeléctrica, con el objetivo de proporcionar y fomentar actividades económicas como la agricultura, la pesca, el turismo y otras relacionadas. De esta manera, se busca optimizar el uso del suelo del embalse, no limitándolo únicamente al impacto ambiental y social generado. Un ejemplo ilustrativo de este enfoque se encuentra en los proyectos hidroeléctricos en Nigeria, que según (Chioma et al.,2019), estos han “contribuido positivamente al desarrollo económico de Nigeria y ha brindado muchas oportunidades a las comunidades locales con empleo antes y después de la construcción”. Además, los lagos embalses representan elementos activos con potencial para impulsar el turismo. Estos cuerpos de agua no solo sirven como sitios de recreación, sino que también ofrecen oportunidades para diversas actividades acuáticas, como paseos en bote, esquí, pesca y alojamiento. En consecuencia, este enfoque integral no solo busca mitigar los impactos negativos, sino también capitalizar las oportunidades económicas y recreativas asociadas con los embalses (Bobat, 2015).

Este enfoque integral para aprovechar los embalses, no solo busca mitigar los impactos negativos, sino también capitalizar las oportunidades económicas y recreativas asociadas. En el mismo contexto, la construcción de centrales hidroeléctricas se ve influenciada por la zona de intervención y los tipos de estructuras ejecutadas, como represas con embalses, represas con almacenamiento por bombeo y centrales de generación en cascada o de paso. A pesar de que estudios indican que las centrales de generación en cascada tienen menores impactos ecológicos, ya que aprovechan la corriente natural del río sin necesidad de represar grandes volúmenes de agua ni alterar significativamente el ecosistema, aunque presentan desventajas en su capacidad de generación en comparación con las grandes represas (Fu et al., 2008; Naidoo, 2009). Por lo tanto, la selección del tipo de central debe considerar cuidadosamente los beneficios energéticos y los impactos ambientales para cada situación particular.

En el embalse de una hidroeléctrica, se observa un fenómeno preocupante asociado a la generación de una cantidad considerable de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), específicamente de dióxido de carbono (C). Esta abundancia de emisiones plantea interrogantes sobre la magnitud real de la reducción de las emisiones de GEI atribuidas comúnmente a las hidroeléctricas (Jin et al., 2016). Este debate ha generado controversias al cuestionar la posición de un método de generación ampliamente utilizado en todo el mundo y que ha sido considerado renovable (Xiaosan et al., 2021). La magnitud del problema ha llevado a afirmaciones, aunque exageradas, de que las emisiones de GEI por kilovatio hora de los embalses podrían equipararse a las de una central termoeléctrica convencional (Fearnside, 2004; Giles, 2006; Roland et al., 2010a; Rudd et al., 1993). Este dilema ha motivado la realización de diversos estudios en diferentes embalses de hidroeléctricas en el mundo como lo son los realizados en el lago

Soyang de Corea del Sur (Jin et al., 2016), y los embalses brasileños de Luis C. B de Carvalho, Manso, Funil, Furnas, Mascarenhas de Moraes (Roland et al., 2010). Estos estudios han permitido establecer puntos fundamentales con las emisiones y el impacto ecológico generado por hidroeléctricas. La intensidad de estas emisiones se puede presentar con mayor o menor intensidad dependiendo de diferentes factores como el clima, la ubicación geográfica, el tamaño del embalse, la hidrología, la biomasa inundada y el aporte de materia orgánica de la cuenca (Roland et al., 2010).

La contaminación de las hidroeléctricas se atribuye a varios factores, entre ellos, las inundaciones para la creación de los embalses, ya que estas descomponen la vida vegetal, así como el suelo, generando que estos liberen metano y dióxido de carbono. La parte más alta de los embalses funciona como un punto de llegada de materia orgánica, esta se degrada y produce CO₂ y CH₄, ya sea por procesos de desgasificación o de oxidación (Rahman et al., 2022). A pesar de los impactos ambientales de las grandes centrales hidroeléctricas, que han provocado cambios en el medio ambiente por la cantidad de destrucción de la fauna y flora (Heydari et al., 2013), pero a su vez las mega construcciones pueden ayudar a reducir los niveles de impacto ambiental. (Lee, 2004), señala que el proyecto de las Tres Gargantas en China ha reducido aproximadamente 40 millones de toneladas de carbón asociadas a emisiones de dióxido de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Además (Kusakana et al., 2008), nos enseña que debemos considerar y cómo se puede implementar sistemas híbridos de hidroenergía y diésel que nos pueden ayudar a reducir los niveles contaminantes de CO₂.

Sin embargo, es fundamental reconocer que no solo las hidroeléctricas a mediana y gran escala pueden generar impactos negativos en el medio ambiente. También existen situaciones donde un diseño deficiente y una implementación inadecuada de estos sistemas de generación puede intensificar su impacto. Por ejemplo, un estudio realizado en el río Jauru evaluó la calidad del agua antes y después de la instalación de seis pequeñas hidroeléctricas en cascada, concluyendo que estas generan un deterioro acumulativo en las características del agua (da Silva et al., 2019). De manera similar, los hallazgos de (Light, 2016) revelaron resultados análogos, evidenciando cambios significativos en la temperatura del agua, el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la conductividad entre los sitios aguas arriba y aguas debajo de la descarga de la central, subrayando la importancia de considerar cuidadosamente incluso las instalaciones hidroeléctricas de menor escala.

Las hidroeléctricas de gran escala se pueden ver en dos localizaciones claves que definen la cantidad de terreno que necesitarán para la creación de su embalse. Aquellas que estén construidas en zonas montañosas requerirán de un área menor, ya que poseerán una mayor profundidad; por el contrario, aquellas que estén en zonas llanas van a requerir de una mayor extensión (Rahman et al., 2022). Esto ocurre en zonas como en las amazonas donde hidroeléctricas brasileñas como Tucuri, Balbina, Samuel HPP, Belo Monte, cada una con 2400 km², 2360 km², 560 km², 516 km² (originalmente se había planeado para 860 km²), respectivamente (da Silva Junior et al., 2018a). Estas grandes extensiones de terreno hacen que sea necesario un análisis exhaustivo de las tierras aguas arriba de la represa las cuales se verán inundadas, ya que en estas puede haber asentamientos de personas, reservas naturales, zonas arqueológicas, resguardos indígenas, etc (Rahman et al., 2022).

Esta zona de influencia de la hidroeléctrica no se limitará únicamente al lugar en donde se encuentre la represa, sino que también estará en un área mucho más extensa de lo que se podría pensar inicialmente, generando un cambio en toda esta zona y mostrando una apropiación del territorio. Para las hidroeléctricas que se encuentran en las zonas amazónicas mencionadas anteriormente, se logra encontrar que en Tucuri había 1000 km de carreteras para 1974 y para el 2015 este ascendió a 13000 km. Analizando 90000 km², se encuentra un 52 % de deforestación, y de las áreas sumergidas 36 % pertenecían al pueblo indígena Parakan. En Samuel HPP, había 3700 km de carretera y para el 2015 hay aproximadamente 8000 km. Considerando el peor panorama, se podría presenciar la pérdida del 32 % de la cubierta vegetal del área circundante. Aunque en este caso, río arriba no se inundó territorio

indígena, aguas abajo a 160 km, la tribu Uru-Eu-Uau-Uau si notó el cambio en la migración de peces y en el comportamiento del río, que hacía parte vital de su sustento. En Belo Monte ya había un alto porcentaje de deforestación para el 2011 fue de 17198 km² y para el 2015 de 19000 km² un aumento del 10 % (da Silva Junior et al., 2018a).

Todos estos datos son preocupantes dado el papel fundamental de que tiene los árboles en la eliminación del carbono que es liberado a la atmósfera, se estima que los ecosistemas terrestres ayudan a la eliminación de un 29 % de estas emisiones (Lawrence et al., 2022). La deforestación, aparte de reducir la capacidad natural del planeta para la eliminación de estas, es una actividad que por sí sola ya genera un impacto significativo de emisiones (Lawrence et al., 2022). En las hidroeléctricas ubicadas en la amazonia que se presentaron anteriormente, la madera extraída de las zonas subyacentes a las represas se usó allí mismo debido a los crecimientos poblacionales del lugar, pero también, dadas las grandes cantidades de bosques deforestados, estas comenzaron un proceso de comercialización, de exportación o de consumo interno en los países sudamericanos (da Silva Junior et al., 2018b). El panorama sigue empeorando si se tiene en cuenta que la deforestación ya ha alcanzado casi el 20 % de la superficie forestal original de la Amazonía brasileña (Zemp et al., 2017), por lo que es de necesidad inmediata llevar a cabo políticas en las que se desligue por completo a la creación de hidroeléctricas con este tipo de actividades perjudiciales para el medio ambiente y en especial para una zona tan importante en el panorama global como lo es la selva amazónica (Rödiger et al., 2018; Silva-Olaya et al., 2022).

Teniendo en cuenta las extensiones de terreno que abarcan estos proyectos, es inevitable que, ya sea aguas arriba o aguas abajo, se generen conflictos de interés entre los promotores de los proyectos y las comunidades aledañas. Estos choques pueden llegar a generar un atraso del cronograma, una posible detención de obra, o incluso la no realización de esta (Sperling, 2012). En relación con las comunidades indígenas es necesario llevar a cabo un acompañamiento íntegro que permita el desarrollo de estrategias para la generación de armonía entre ambas partes. Por ejemplo, en la construcción del embalse en el río *Black Volta* en Bui, Ghana, donde hubo una fuerte oposición de la comunidad a la creación de la obra, lo que obligó a las autoridades y promotoras de la obra a llevar a cabo procesos de exhumación y reubicación de restos ancestrales gracias a la evaluación del impacto social y ambiental promovido por la *Bui Power Authority* (BPA) (Apoth & Gavua, 2016a), estos procesos fueron importantes para las comunidades aledañas, donde se tuvo una gran participación de expertos en arqueología, poniendo esta labor como un partícipe relevante en la conservación de los derechos humanos y el patrimonio cultural de las comunidades (Apoth & Gavua, 2016b). Lamentablemente, en algunos casos se podría estar hablando incluso de la inundación de poblados con habitantes, generando desalojos, reubicación y migración forzada de poblados, lo que podría llevar a un resentimiento entre las comunidades trasladadas de sus zonas de origen a lugares desconocidos. Además, las ayudas gubernamentales prometidas no siempre se cumplen, y en caso de cumplirse, no garantizan que la reubicación y las nuevas viviendas mantengan las condiciones de vida previas en las zonas de origen (Lee, 2004; Apoth & Gavua, 2016a).

La generación de energía eléctrica mediante plantas hidroeléctricas ha experimentado una consolidación considerable en los últimos años, destacándose como una forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Su eficacia se refleja en bajas emisiones de gases de efecto invernadero y su capacidad para implementarse en diversas regiones del mundo, lo que ha contribuido significativamente a la matriz energética global. Se anticipa que esta participación seguirá creciendo en los próximos años, impulsada por la creciente necesidad global de transitar hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, alejándose de los combustibles fósiles. No obstante, a pesar de ser parte integral de esta transición hacia opciones más renovables, la energía hidroeléctrica enfrenta desafíos cruciales que requieren atención detallada. Es esencial reconocer que, para considerarla verdaderamente renovable, deben abordarse y mitigarse los problemas asociados con la construcción y operación de estas infraestructuras.

La tala indiscriminada de árboles representa uno de los problemas críticos, ya que puede resultar en la pérdida de hábitats naturales y afectar negativamente la biodiversidad. El desplazamiento forzado de comunidades locales, a menudo necesario para la creación de embalses, plantea cuestionamientos éticos y sociales que deben ser considerados y abordados de manera justa. La violación de los derechos de los pueblos indígenas es otro aspecto delicado que requiere atención, ya que las represas a menudo afectan áreas de importancia cultural y espiritual para estas comunidades. Además, los cambios en la fauna y los impactos en el ecosistema acuático son preocupaciones medioambientales significativas. La construcción de represas puede alterar drásticamente los patrones naturales de los ríos, afectando a especies de peces y otros organismos acuáticos. Asimismo, la contaminación asociada con la construcción y operación de plantas hidroeléctricas, así como la gestión inadecuada de los residuos, pueden generar impactos negativos en los cuerpos de agua y en los ecosistemas circundantes.

Para abordar estos desafíos, es crucial llevar a cabo investigaciones rigurosas desde una perspectiva académica y profesional. Se deben desarrollar herramientas y mecanismos que reduzcan al máximo el impacto ambiental y social de la energía hidroeléctrica. La implementación de prácticas sostenibles, la aplicación de tecnologías más avanzadas y la participación activa de las comunidades afectadas son elementos esenciales para garantizar que la energía hidroeléctrica se posicione como una alternativa renovable con mínimos efectos negativos en las emisiones de gases de efecto invernadero y en el medio ambiente en general.

Referencias

- Aguilera, G., & Pouilly, ; Marc. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. *Acta zoológica lilloana*, 56(2), 15-30.
- Apoh, W., & Gavua, K. (2016a). “We will not relocate until our ancestors and shrines come with us”: Heritage and conflict management in the bui dam project area, ghana. *Community Archaeology and Heritage in Africa: Decolonizing Practice*, 204-223. <https://doi.org/10.4324/9781315621708-17>
- Apoh, W., & Gavua, K. (2016b). “We will not relocate until our ancestors and shrines come with us”: Heritage and conflict management in the bui dam project area, ghana. *Community Archaeology and Heritage in Africa: Decolonizing Practice*, 204-223. <https://doi.org/10.4324/9781315621708-17>
- Bobat, A. (2015). *Thermal Pollution Caused by Hydropower Plants*. 19-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16024-5_2
- Chioma, O., Thomas, S., Hussein, S. U., Aboi, G., Oshiga, O., & Ahmed, A. A. (2019). Hydro power generation 1n nigeria: Impacts and mitigation. *2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation, ICECCO 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICECCO48375.2019.9043184>
- Cui, G., Wang, B., Xiao, J., Qiu, X. L., Liu, C. Q., & Li, X. D. (2021). Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in karst hydroelectric reservoirs. *Journal of Hydrology*, 592. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125607>
- da Silva, A. C. C., Fantin-Cruz, I., de Lima, Z. M., & de Figueiredo, D. M. (2019). Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru River, tributary of the Pantanal floodplain. *RBRH*, 24, e18. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180047>
- da Silva Junior, O. M., dos Santos, M. A., Szlafsztein, C. F., Gomez, J. M. A., & Pereira, J. P. (2018a).

- Protected areas as strategies for preserving vegetation cover in the vicinity of hydroelectric projects in the Brazilian Amazon. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1).
<https://doi.org/10.1186/S13705-018-0172-1>
- da Silva Junior, O. M., dos Santos, M. A., Szlafsztein, C. F., Gomez, J. M. A., & Pereira, J. P. (2018b). Protected areas as strategies for preserving vegetation cover in the vicinity of hydroelectric projects in the Brazilian Amazon. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1).
<https://doi.org/10.1186/S13705-018-0172-1>
- Energy Agency, I. (s/f). *Hydropower Special Market Report*. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de www.iea.org/t&c/
- Fearnside, P. M. (2004). Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. An editorial comment. *Climatic Change*, 66(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043174.02841.23/METRICS>
- Fu, Y. Q., Zhang, Q. W., & Cheng, W. (2008). Assessing the sustainability of cascade hydropower development based on complex ecology system. *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2008*, 4282-4285. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2008.570>
- Giles, J. (2006). Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 444(7119).
<https://doi.org/10.1038/444524A>
- Heydari, M., Othman, F., & Noori, M. (2013). A Review of the Environmental Impact of Large Dams in Iran. *International Journal of Advancements Civil Structural and Environmental Engineering – IJACSE*, 1, 1-4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18263>
- Jardini, M. G. M., Jardini, J. A., Oliveira, E. C. F. G., Quintanilha, J. A., Magrini, L. C., Chen, E. W., Nicoli, S., & Dzedzej, M. (2013). Geotechnology application upon a Brazilian hydroelectric plant to determine ambient impacts and environmental restrictions. *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652084>
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J., & Park, J. H. (2016a). Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124003>
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J., & Park, J. H. (2016b). Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124003>
- Kusakana, K., Munda, J. L., & Jimoh, A. A. (2008). Economic and environmental analysis of micro hydropower system for rural power supply. *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, 441-444. <https://doi.org/10.1109/PECON.2008.4762516>
- Lawrence, D., Coe, M., Walker, W., Verchot, L., & Vandecar, K. (2022). The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2022.756115>
- Lee, W. J. (2004). The environmental impact of large scale hydroelectric development: Lessons from three gorges. *2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2, 1390-1392.
<https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373090>

- Li, W., Liu, D., Yang, X., & Huang, Y. (2010). The impact of hydroelectric energy development on fish habitat. *Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010*, 2, 696–698. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.367>
- Light, T. (2016). Chemical and Physical Characteristics of Rivers Above and Below Four Hydroelectric Power Facilities in the Chiriquí Viejo and Chico Watersheds of Chiriquí, Panama. *Independent Study Project (ISP) Collection*. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2393
- Naidoo, P. (2009). New strategies for harvesting large scale bulk energy from the Congo river without a conventional dam. *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275457>
- Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112279>
- Restrepo, M., Francesca, R., & Maetzke, L. (2019). Afectaciones socioambientales en las zonas aguas abajo de grandes represas hidroeléctricas, casos de estudio Hidroituango y La Miel. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15909>
- Rödig, E., Cuntz, M., Rammig, A., Fischer, R., Taubert, F., & Huth, A. (2018). The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest. *Environmental Research Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AABC61>
- Roland, F., Vidal, L. O., Pacheco, F. S., Barros, N. O., Assireu, A., Ometto, J. P. H. B., Cimpleris, A. C. P., & Cole, J. J. (2010a). Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, 72(3), 283–293. <https://doi.org/10.1007/S00027-010-0140-0>
- Roland, F., Vidal, L. O., Pacheco, F. S., Barros, N. O., Assireu, A., Ometto, J. P. H. B., Cimpleris, A. C. P., & Cole, J. J. (2010b). Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, 72(3), 283–293. <https://doi.org/10.1007/S00027-010-0140-0>
- Rudd, J., Harris, R., Kelly, C., & Hecky, R. (1993). Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases? 22, 1–3.
- Santacruz, M., & Palacios, S. (2013). Régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23, 77. <https://doi.org/10.18359/rcin.224>
- Sedighkia, M., & Abdoli, A. (2023). An optimization approach for managing environmental impacts of generating hydropower on fish biodiversity. *Renewable Energy*, 218, 119283. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119283>
- Silva-Olaya, A. M., Ortíz-Morea, F. A., España-Cetina, G. P., Olaya-Montes, A., Grados, D., Gasparatos, A., & Cherubin, M. R. (2022). Composite index for soil-related ecosystem services assessment: Insights from rainforest-pasture transitions in the Colombian Amazon. *Ecosystem Services*, 57. https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2022.101463/COMPOSITE_INDEX_FOR_SOIL_RELATED_ECOSYSTEM_SERVICES_ASSESSMENT_INSIGHTS_FROM_RAINFOREST_PASTURE_TRANSITIONS_IN_THE_COLOMBIAN_AMAZON.PDF
- Sperling, E. Von. (2012). Hydropower in Brazil: Overview of positive and negative environmental

- aspects. *Energy Procedia*, 18, 110–118.
https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.05.023/HYDROPOWER_IN_BRAZIL_OVERVIEW_OF_POSITIVE_AND_NEGATIVE_ENVIRONMENTAL_ASPECTS.PDF
- Tomczyk, P., & Wiatkowski, M. (2021). The Effects of Hydropower Plants on the Physicochemical Parameters of the Bystrzyca River in Poland. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2075, 14(8), 2075.
<https://doi.org/10.3390/EN14082075>
- Wu, H., Chen, J., Xu, J., Zeng, G., Sang, L., Liu, Q., Yin, Z., Dai, J., Yin, D., Liang, J., & Ye, S. (2019). Effects of dam construction on biodiversity: A review. *Journal of Cleaner Production*, 221, 480–489. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.001>
- Xiaosan, Z., Qingquan, J., Iqbal, K. S., Manzoor, A., & Ur, R. Z. (2021). Achieving sustainability and energy efficiency goals: Assessing the impact of hydroelectric and renewable electricity generation on carbon dioxide emission in China. *Energy Policy*, 155, 112332.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112332>
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., & Rammig, A. (2017). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6182–6190.
<https://doi.org/10.1002/2017GL072955>
- Zi, T. (2010). Assessment on water ecosystem services in the Songhua River basin by AHP method. 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010.
<https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5514915>