

Hidroeléctricas y desarrollo sustentable: Un análisis de la gestión del agua en el contexto de la transición energética

Hiram Rodríguez Zalapa¹

Casimiro Leco Tomás²

Resumen

Este estudio analiza el impacto de las centrales hidroeléctricas en el desarrollo sustentable, centrándose en el caso de la central Atexcaco ubicada entre los municipios de Hueyapan y Teziutlán en Puebla, México. El problema planteado explora cómo estas infraestructuras afectan diversos aspectos socioeconómicos como empleo e infraestructura en las comunidades locales. Los objetivos de la investigación incluyen evaluar el estado actual y las tendencias futuras de la energía hidroeléctrica en la matriz energética, analizar los impactos ambientales y sociales, examinar las interacciones con otros usos del agua, y proponer lineamientos para una gestión sostenible. La metodología empleada combina análisis estadísticos, incluyendo regresión lineal y pruebas no paramétricas como Kruskal-Wallis, con estudios comparativos pre y post construcción de las centrales. Se realizaron encuestas a la población local utilizando una muestra representativa determinada mediante cálculos estadísticos. Los resultados indican fuertes correlaciones positivas entre las variables estudiadas, con un coeficiente de determinación (R^2) del 86.2% en el modelo de regresión, sugiriendo que factores como la modificación de infraestructura y el empleo tienen un impacto significativo en el desarrollo sustentable centrado en la gestión del agua. El estudio destaca la importancia de equilibrar el desarrollo energético con la conservación ambiental y el progreso socioeconómico. Como conclusión se subraya la complejidad de integrar proyectos hidroeléctricos en el tejido socioeconómico y ambiental de la región, enfatizando la necesidad de un enfoque holístico que considere tanto los beneficios energéticos como los impactos en las comunidades locales y los ecosistemas. Este análisis proporciona una base para la formulación de estrategias que maximicen los beneficios de las centrales hidroeléctricas mientras mitigan sus potenciales efectos negativos, contribuyendo así a un desarrollo más sostenible en la región.

Conceptos clave: Hidroeléctricas, desarrollo sustentable, generación eléctrica, gestión el agua.

Introducción

La creciente preocupación global por el cambio climático ha impulsado una transformación significativa en el sector energético, tendiendo intrínsecamente un enfoque particular en el desarrollo y expansión de energías renovables. En este sentido, la energía hidroeléctrica ocupa un lugar preponderante por su capacidad de generación a gran escala y su contribución a la estabilidad de las redes eléctricas, así como la gestión en el almacenamiento del agua. Con base en esto, el panorama energético mundial está experimentando una profunda metamorfosis en la capacidad instalada de energías renovables que a nivel global alcanzó los 2,799 GW en 2020, representando

¹ Maestro en Ciencias del Desarrollo Regional. Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2251721x@umich.mx

² Doctor en Estudios Rurales por el Colegio de Michoacán. Profesor-investigador, Titular "C" del Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. casimiro.leco@umich.mx

un incremento del 10.3% respecto al año anterior. Esta transición no se limita únicamente a la sustitución de fuentes renovables, sino que implica una transformación integral del sistema energético, desde la generación hasta el consumo final (IEA, 2021).

Las centrales hidroeléctricas han desempeñado históricamente un papel fundamental en la matriz energética de numerosos países, y su relevancia se acentúa en el marco de la transición hacia un modelo energético más sostenible. La hidroelectricidad representa aproximadamente el 16% de la generación eléctrica mundial y el 62% de la producción de electricidad a partir de fuentes renovables (IEA, 2021). Además de la generación de electricidad, las hidroeléctricas ofrecen beneficios adicionales. Los embalses asociados a las grandes centrales pueden cumplir funciones múltiples, como el control de inundaciones, el suministro de agua para riego y consumo humano, y la promoción de actividades recreativas y turísticas, por lo que esta multifuncionalidad aumenta su valor estratégico en el contexto del desarrollo sostenible y la gestión integrada de los recursos hídricos (Berga, 2016).

No obstante, estos beneficios, el desarrollo de proyectos hidroeléctricos enfrenta desafíos significativos y crecientes cuestionamientos desde perspectivas ambientales y sociales. La construcción de grandes presas y embalses implica alteraciones sustanciales en los ecosistemas fluviales, afectando la biodiversidad acuática y terrestre, modificando los regímenes hidrológicos naturales y, en muchos casos, desplazando comunidades humanas de sus territorios ancestrales (Moran *et al.*, 2018). Así mismo, el cambio climático añade una capa adicional de complejidad a esta problemática. La variabilidad climática y los eventos meteorológicos extremos pueden afectar la disponibilidad y regularidad de los recursos hídricos, impactando directamente en la confiabilidad y eficiencia de las centrales hidroeléctricas (Van-Vliet *et al.*, 2016).

Adicionalmente, la competencia por el uso del agua entre diferentes sectores se intensifica en un contexto de creciente estrés hídrico en muchas regiones del mundo. Esta situación plantea dilemas complejos en términos de priorización y asignación de recursos, exigiendo enfoques integrados de gestión que consideren las múltiples dimensiones del nexo agua-energía-alimentos (Hoff, 2011).

Planteamiento del problema

Ante el panorama actual, se hace evidente la urgente necesidad de reconsiderar y reevaluar el papel que desempeñan las centrales hidroeléctricas en el contexto de la transición energética global y el desarrollo sostenible. Esta reevaluación surge de la complejidad inherente a los proyectos hidroeléctricos, que, si bien ofrecen beneficios significativos en términos de generación de energía limpia y renovable, también conllevan impactos considerables sobre los ecosistemas acuáticos y las comunidades locales.

En este escenario, surge la necesidad imperiosa de reevaluar el papel de las hidroeléctricas en el marco de la transición energética y el desarrollo sostenible. ¿Cómo pueden optimizarse los beneficios de la energía hidroeléctrica minimizando sus impactos negativos? ¿Qué estrategias de gestión del agua pueden implementarse para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de estos proyectos? ¿Cómo se puede lograr un equilibrio entre las necesidades energéticas, la conservación de los ecosistemas acuáticos y los derechos de las comunidades locales?

El presente estudio se propone analizar de manera integral el rol de las hidroeléctricas en el contexto de la transición energética global, con un enfoque particular en la gestión sostenible del

agua como recurso fundamental para la generación de energía y el desarrollo sostenible, en donde los objetivos específicos incluyen: evaluar el estado actual y las tendencias futuras de la energía hidroeléctrica en la matriz energética global y sustentable, Analizar los impactos ambientales y sociales asociados a los proyectos hidroeléctricos, examinar las interacciones entre el desarrollo hidroeléctrico y otros usos del agua, para proponer lineamientos para una gestión sostenible del agua en el sector hidroeléctrico. El estudio aspira a ofrecer una perspectiva balanceada que reconozca tanto el potencial como los desafíos de la hidroelectricidad, promoviendo un enfoque holístico y adaptativo en la gestión de este recurso vital para el desarrollo sostenible.

Contexto

Las bases conceptuales para el análisis de las hidroeléctricas y el desarrollo sustentable en el contexto de la gestión del agua y la transición energética se abordan en cinco ejes fundamentales que permiten una comprensión integral de la problemática: desarrollo sustentable, gestión integrada de recursos hídricos, energía hidroeléctrica, nexo agua-energía-alimentos, y servicios ecosistémicos y valoración ambiental.

El concepto de desarrollo sustentable ha evolucionado significativamente desde su introducción formal en el Informe Brundtland de 1987, que lo definió como aquel que "satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Brundtland and Mansour, 2010, p. 43).

Desde entonces, el concepto ha sido objeto de numerosas interpretaciones y refinamientos, reflejando la complejidad de conciliar el crecimiento económico con la protección ambiental y la equidad social. En este sentido, se reconoce que el desarrollo sustentable se sustenta en tres pilares fundamentales e interrelacionados: económico, social y ambiental, por lo que el pilar económico enfatiza la necesidad de un crecimiento económico equitativo y eficiente en el uso de recursos, de igual modo el pilar social se centra en la inclusión, la equidad y el bienestar humano, y por su parte, el pilar ambiental subraya la importancia de preservar la integridad ecológica y la biodiversidad. La integración equilibrada de estos tres aspectos es crucial para lograr un desarrollo verdaderamente sustentable (Purvis, Mao and Robinson, 2019).

Para el ámbito de los recursos hídricos, la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) ha emergido como un paradigma fundamental para abordar los desafíos del desarrollo sustentable. La GWP (GWP, 2000), define la GIRH como un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. En este sentido, los principios clave de la GIRH incluyen la consideración del agua como un recurso finito y vulnerable, la participación de todos los actores en la gestión del agua, el reconocimiento del papel central de las mujeres en la provisión y gestión del agua, y la valoración económica del agua (Benson, Gain and Rouillard, 2015). Estos principios se han incorporado en diversos marcos regulatorios internacionales, como la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, específicamente el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento (United, 2015).

En el contexto energético, la hidroelectricidad juega un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables. Las centrales hidroeléctricas se clasifican generalmente en tres tipos principales: de embalse, de pasada y de bombeo (o reversibles). Las centrales de embalse, que utilizan una presa para almacenar agua, ofrecen mayor flexibilidad en la

generación, pero también mayores impactos ambientales. Las centrales de pasada, que aprovechan el flujo natural del río, tienen menor impacto ambiental pero menor capacidad de regulación. Las centrales de bombeo, que pueden almacenar energía bombeando agua a un reservorio superior, son cada vez más relevantes para la integración de otras fuentes renovables intermitentes (Kougias and Schleker, 2019).

Así mismo, los avances tecnológicos recientes en el sector hidroeléctrico se han centrado en mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales. Estos incluyen el desarrollo de turbinas más eficientes y respetuosas con la fauna acuática, sistemas de paso de peces más efectivos, y tecnologías de monitoreo ambiental en tiempo real, además, se están explorando conceptos innovadores como las centrales hidroeléctricas flotantes y las microturbinas para aprovechar pequeños saltos de agua en infraestructuras existentes (De Kuyper, 2014).

La comprensión y valoración de los servicios ecosistémicos es otro elemento clave en el análisis de la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos. Los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, y se categorizan generalmente en servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte, los ecosistemas fluviales proporcionan una amplia gama de servicios, desde la provisión de agua y alimentos hasta la regulación de inundaciones y el soporte a la biodiversidad (González, Escobar and Jiménez, 2007).

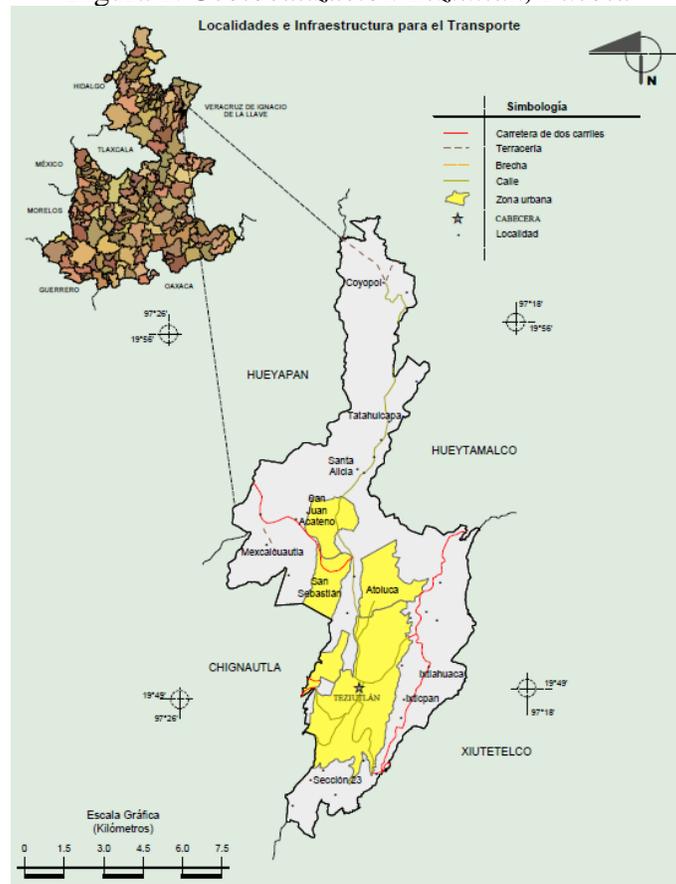
En este sentido la valoración económica de estos servicios ecosistémicos se ha convertido en una herramienta importante para informar la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales. Métodos como la valoración contingente, el costo de viaje y los precios hedónicos se utilizan para cuantificar en términos monetarios los beneficios proporcionados por los ecosistemas. En el contexto de las hidroeléctricas, la valoración de servicios ecosistémicos puede ayudar a evaluar de manera más integral los costos y beneficios de los proyectos, incluyendo impactos que tradicionalmente no se han considerado en los análisis económicos convencionales (Garrido, Lalouf and Moreira, 2013).

Así mismo, el análisis de la gestión del agua en el contexto de la transición energética se puede medir en función de los cambios de infraestructura originados por el establecimiento de presas para la generación hidroeléctrica. Cabe destacar que no es el único factor, también se debe considerar las necesidades de la región, las cuales pueden de manera indirecta medir en la generación o pérdidas de empleo derivados de la instalación de estos complejos hídricos.

El objeto de estudio se centra en la central hidroeléctrica Atexcaco, ubicada entre los municipios de Hueyapan y Teziutlán en Puebla, México, su localización se muestra en la Figura 1 es un proyecto energético significativo en la región. Construida en 2011 y adquirida por el grupo minero Autlán en 2013, cuenta con dos turbinas Pelton que generan 36 MW de capacidad. La compañía propietaria ha adoptado una estrategia de responsabilidad social alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, implementando programas específicos para mejorar los indicadores relacionados en la zona (CEM, 2022).

Teziutlán, una de las ciudades cercanas a la central, se encuentra en la Sierra Norte de Puebla, región conocida por su belleza natural y rico patrimonio cultural. La ciudad es un importante centro económico, educativo y cultural, con una economía diversificada que incluye agricultura, ganadería, industria y comercio. Destaca su producción de café y su oferta educativa, con instituciones como la Universidad Tecnológica de Teziutlán. La zona también es rica en diversidad étnica, con presencia de comunidades nahuas y totonacos, y ofrece atractivos turísticos como el Parque Nacional Pico de Orizaba (INEGI, 2010).

Figura 1. Geolocalización Teziutlán, Puebla



Fuente: (INEGI, 2010).

Marco teórico

El concepto de desarrollo sustentable se ha convertido en una piedra angular en la formulación de políticas y estrategias globales destinadas a asegurar un equilibrio entre las necesidades humanas y la capacidad del planeta para satisfacerlas. Este enfoque reconoce que el desarrollo debe satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. En este contexto, la gestión integrada de recursos hídricos, la energía hidroeléctrica y el nexo agua-energía-alimentos son aspectos fundamentales que influyen en la sostenibilidad. Además, la valoración de los servicios ecosistémicos se vuelve esencial para entender y mantener el equilibrio entre las actividades humanas y los procesos naturales. Este ensayo explorará estos temas interrelacionados para proporcionar una visión integral de cómo se puede alcanzar un desarrollo sustentable.

El desarrollo sustentable, definido por el Informe Brundtland en 1987, busca la integración equilibrada de las dimensiones económica, social y ambiental del desarrollo. Este concepto enfatiza la necesidad de crecimiento económico que no solo mejore la calidad de vida, sino que también preserve los recursos naturales y garantice la equidad social. Para alcanzar estos objetivos, es necesario un enfoque holístico que considere el impacto de las actividades humanas en el medio

ambiente y busque soluciones que beneficien tanto a las generaciones presentes como a las futuras (Pierri, 2005).

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) es una estrategia que busca optimizar el uso y conservación del agua a través de una visión holística e inclusiva. Este enfoque reconoce que el agua es un recurso limitado y multifacético, esencial para la vida, el desarrollo económico y el bienestar ambiental. La GIRH promueve la coordinación entre diferentes sectores y niveles de gobierno para abordar problemas relacionados con el agua, tales como la escasez, la contaminación y la distribución desigual. La implementación efectiva de la GIRH requiere la integración de conocimientos científicos, la participación de las comunidades locales y la adopción de políticas que promuevan la sostenibilidad (González, Escobar and Jiménez, 2007).

La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable que utiliza el flujo de agua para generar electricidad. Este tipo de energía ha sido ampliamente utilizado debido a su capacidad para producir grandes cantidades de energía de manera continua y confiable. Sin embargo, la construcción de represas y otras infraestructuras hidroeléctricas puede tener impactos ambientales significativos, como la alteración de ecosistemas acuáticos y terrestres y el desplazamiento de comunidades locales. La energía hidroeléctrica debe ser gestionada de manera que maximice sus beneficios mientras se minimizan sus impactos negativos. Esto incluye la evaluación cuidadosa de los proyectos, la implementación de medidas de mitigación y la consideración de alternativas sostenibles (Spiegel and Cifuentes, 2016).

El nexo agua-energía-alimentos se refiere a la interconexión entre estos tres recursos fundamentales y cómo su gestión integrada es crucial para la sostenibilidad. Cada uno de estos recursos depende del otro: la producción de alimentos requiere agua y energía, la generación de energía puede necesitar grandes cantidades de agua, y el acceso al agua puede verse afectado por la producción de alimentos y energía. Un enfoque de gestión que considere estas interrelaciones es esencial para evitar conflictos y asegurar que los recursos se utilicen de manera eficiente y equitativa. Este enfoque integrado ayuda a identificar sinergias y *trade-offs*, promoviendo políticas y prácticas que optimicen el uso de recursos y reduzcan las presiones ambientales (FAO, 2004).

Marco empírico

Dentro de la revisión bibliográfica se encontró que en Argentina, según Bandieri y Blanco (1968), la evolución de las expectativas en torno a la cuenca norpatagónica y la empresa Hidronor pasó de un enfoque inicial en proyectos hidroeléctricos con múltiples propósitos a la maximización de beneficios empresariales tras la privatización en los años 90. Esto generó impactos negativos en las poblaciones ribereñas y el medio ambiente, frustrando las expectativas de desarrollo regional. Así mismo, Jerez (2015), plantea la necesidad de un enfoque desde el trabajo social que promueva la justicia ambiental, la democracia territorial y el respeto por los derechos humanos en los conflictos eco-territoriales.

Por otra parte, en Brasil, la construcción de centrales hidroeléctricas ha sido una estrategia para aprovechar los recursos hídricos y satisfacer la demanda energética. Sin embargo, proyectos como la hidroeléctrica de *Belo Monte* en el río *Xingu* han generado conflictos sociales. En este sentido, Pont (2010), destaca la influencia de aspectos históricos y culturales en el desarrollo institucional de la región y observa una postura de *free-rider* entre los agentes económicos, así como desconfianza hacia las acciones gubernamentales debido a errores administrativos e informes insuficientes.

En Chile, Rojas y Hansen (2006), señalan que la construcción de centrales hidroeléctricas ha sido importante para el desarrollo regional, pero ha enfrentado desafíos debido a su impacto ambiental y social. En este sentido, se ha generado un debate sobre la necesidad de diversificar la matriz energética hacia fuentes más sostenibles. El caso de la región de Aysén ilustra el conflicto entre la protección de la biodiversidad y los megaproyectos hidroeléctricos, planteando la necesidad de un desarrollo endógeno basado en el turismo de naturaleza.

Por otra parte, Romero *et al.* (2009), argumentan que la aplicación de premisas neoliberales en Chile ha tratado los recursos territoriales como commodities, generando conflictos socio-territoriales. La privatización del agua ha creado asimetrías de poder, priorizando intereses capitalistas sobre la conservación ambiental y el desarrollo local, debido a esto, Torres y García (2009), proponen la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) como solución para abordar estos conflictos, enfatizando la necesidad de empoderar a las comunidades locales en la toma de decisiones sobre el uso del agua en sus territorios.

Mientras tanto en Colombia, las centrales hidroeléctricas han sido fundamentales para el desarrollo regional, aprovechando los abundantes recursos hídricos del país. Sin embargo, también han generado controversia debido a los desafíos sociales y ambientales asociados, destacando la importancia de vincular el turismo como un proceso complementario en las zonas afectadas por estos proyectos, buscando aumentar las oportunidades y participación de la comunidad local en el desarrollo del destino (Hernández, 2019).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas pueden reducir el mercado de carbono, teniendo una oportunidad en Colombia, especialmente en Antioquia, los cuales podrían contribuir significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ y generar ingresos a través de la venta de certificados de reducción de emisiones. Sin embargo, la construcción de hidroeléctricas también ha afectado negativamente a actividades tradicionales como la pesca artesanal, obligando a las comunidades a diversificar sus medios de vida (Estrada, 2016).

En este sentido es importante que se analice la construcción de la Central Hidroeléctrica Pescadero-Ituango en Antioquia, Colombia, que ha planteado diversas problemáticas jurídico-ambientales relacionadas con el impacto en los ecosistemas. Aunque la normatividad colombiana busca establecer lineamientos para minimizar los efectos negativos, se destaca la necesidad de que las entidades reguladoras cumplan efectivamente sus funciones de manera preventiva (Orozco G. and Présiga, 2014).

Autores como Torres *et al.* (2014) y Viviescas (2014), concluyen que los proyectos hidroeléctricos en Colombia, como el caso de Ituango, han generado dudas sobre si los beneficios reales compensan las afectaciones negativas. Se concluye que estos proyectos no han generado el desarrollo económico local esperado, ya que los beneficios se dirigen a poblaciones que no enfrentan los impactos negativos directos. Se enfatiza la importancia de considerar escenarios más allá de las evaluaciones de impacto ambiental convencionales y de dirigir las compensaciones a la población verdaderamente afectada.

Metodología

El presente estudio adopta un enfoque de investigación mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para abordar de manera integral la complejidad de la gestión del agua en el contexto de las hidroeléctricas y el desarrollo sustentable. Esta aproximación metodológica permite una

comprensión más profunda y matizada de las interacciones entre los sistemas energéticos, hídricos y socioecológicos (Creswell and Creswell, 2017).

La recolección de datos se estructura en cuatro componentes principales. En primer lugar, se realiza una revisión sistemática de la literatura científica y técnica relevante, siguiendo los lineamientos propuestos por Maier *et al.* (2016). Esta revisión abarca artículos académicos, informes técnicos, documentos de política y estudios de organizaciones internacionales, con el objetivo de establecer el estado del arte en la materia e identificar tendencias y brechas de conocimiento. Complementándose con la realización de entrevistas semiestructuradas a residentes locales. Estas entrevistas se diseñan siguiendo para maximizar la calidad y relevancia de la información obtenida. Los participantes incluyen planificadores energéticos, gestores de recursos hídricos, ecólogos, representantes de comunidades afectadas y tomadores de decisiones políticas, asegurando así una diversidad de perspectivas (Kallio *et al.*, 2016).

Los análisis estadísticos fueron realizados con ayuda del SPSS, o *Statistical Package for the Social Sciences*, la cual es una herramienta de análisis de datos ampliamente utilizada en diversos campos, desde las ciencias sociales hasta las empresas. Este software destaca por su interfaz intuitiva, que facilita la gestión y análisis de grandes conjuntos de datos. Con SPSS, se puede realizar una amplia variedad de procedimientos estadísticos, desde cálculos básicos como frecuencias y tablas cruzadas hasta análisis más complejos como pruebas t, ANOVA, regresión lineal y modelos multivariados. Su capacidad para manejar diferentes tipos de datos y generar visualizaciones claras lo convierte en una herramienta valiosa para la investigación y la toma de decisiones basadas en datos (Pedroza and Dicovalskyi, 2007).

Además de sus funciones estadísticas, SPSS ofrece herramientas para la preparación de datos, como la limpieza y transformación de variables. También permite crear informes personalizados y exportar resultados en diversos formatos. Con cada nueva versión, SPSS se ha ido enriqueciendo con nuevas funcionalidades y módulos especializados, ampliando aún más su capacidad para abordar problemas de análisis de datos cada vez más complejos. Gracias a su versatilidad y facilidad de uso, SPSS se ha consolidado como uno de los software estadísticos más populares en el mundo académico y empresarial (Pedroza and Dicovalskyi, 2007).

El análisis de datos se desarrolla en tres etapas principales. Primero, se realiza un análisis estadístico de las variables hidrológicas y energéticas recopiladas, utilizando técnicas de estadística descriptiva e inferencial para identificar patrones, tendencias y correlaciones significativas. Este análisis cuantitativo se complementa con un análisis de contenido de las entrevistas y documentos relevantes, siguiendo el método propuesto por Erlingsson y Brysiewicz (Erlingsson and Brysiewicz, 2017).

Para extraer temas y conceptos clave que emergen de los datos cualitativos. En este sentido, el análisis implica el modelado de escenarios futuros, utilizando técnicas de simulación y análisis de sistemas para proyectar diferentes trayectorias de desarrollo hidroeléctrico y sus implicaciones mediante un modelo de regresión lineal para la gestión del agua y la sustentabilidad. Este enfoque prospectivo permite explorar las consecuencias potenciales de diferentes decisiones y políticas, informando así la toma de decisiones estratégicas (Maier *et al.*, 2016).

La integración de la central hidroeléctrica Atexcaco en este contexto sustentable plantea tanto oportunidades como desafíos. Por un lado, contribuye a la diversificación económica y la generación de energía limpia, alineándose con objetivos de desarrollo sostenible. Por otro, su operación requiere un enfoque cuidadoso para respetar y preservar el patrimonio natural y cultural

de la zona. El éxito a largo plazo de esta iniciativa dependerá de la capacidad para equilibrar el desarrollo energético con la conservación ambiental y el progreso socioeconómico de la región.

En este sentido se determinó el tamaño de la muestra representativa, se aplicó un método estadístico basado en una estimación estadística que calcula el tamaño de la muestra para estimar una población: intervalo de confianza, considerando un nivel de confianza del 95%, una proporción de 0.5 y un margen de error del 5%. Inicialmente, se consideró una población de 38,516 habitantes, según el censo de población, tenido como resultado una muestra requerida de 381 habitantes INEGI (INEGI, 2010).

En el proceso de análisis, se adoptó un enfoque estructurado para facilitar la comparación entre los dos casos de estudio. Las preguntas del cuestionario se agruparon según las variables de investigación correspondientes, creando así un vector de datos común para cada variable. Este método permite una evaluación más coherente y sistemática de la información recopilada. La cuantificación de las respuestas se basó en la escala Likert previamente definida en la metodología. Para las variables de infraestructura y empleo, se calculó la suma total de los valores asignados en esta escala, para después promediarla, de tal modo que este procedimiento genera un puntaje agregado que representa la intensidad o magnitud de cada variable en estudio.

Resultados

Para el análisis de los resultados es importante primero determinar el comportamiento de las variables, es decir, si esta tiene una distribución normal con el objetivo principal. Para ello, emplea un estadístico de prueba que sigue aproximadamente una distribución paramétrica utilizando el método de Pearson.

La interpretación de los resultados se basa en el valor p obtenido: si este es inferior al nivel de significancia predeterminado, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que existe una diferencia significativa entre al menos una de las medianas poblacionales y las demás. Este método estadístico ofrece una herramienta valiosa para los investigadores que se enfrentan a datos no normalmente distribuidos, permitiendo realizar comparaciones múltiples de manera robusta y confiable (Cortina-Borja, 2012).

Tabla 1. *Correlación de variables empleo, infraestructura y desarrollo.*

		Total de desarrollo	Total de empleo	Total de infraestructura
Total de desarrollo	Correlación de Pearson	1	.749**	.874**
	Sig. (bilateral)		.000	.000
	N	383	383	383
Total de empleo	Correlación de Pearson	.749**	1	.560**
	Sig. (bilateral)	.000		.000
	N	383	383	383
Total de infraestructura	Correlación de Pearson	.874**	.560**	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	
	N	383	383	383

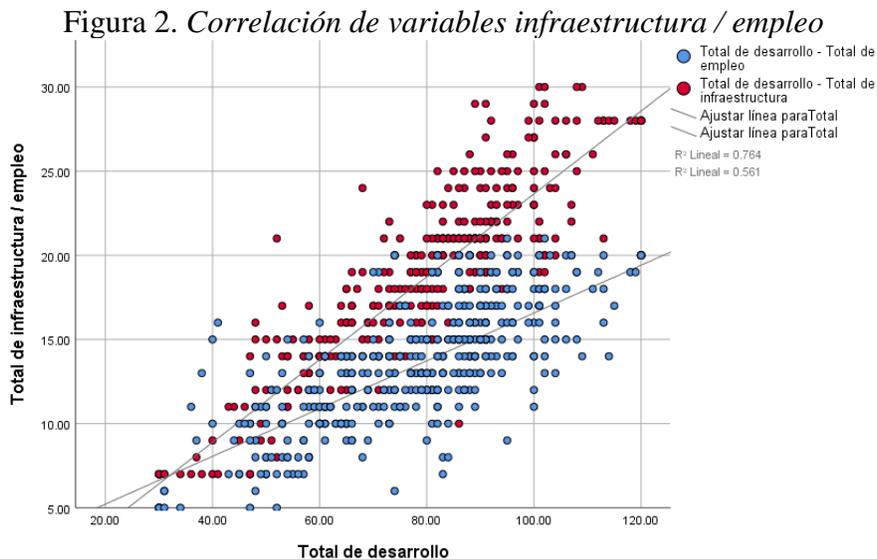
** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta y procesados con SPSS.

El análisis de correlación presentado en la

Tabla 1 que revela una relación robusta y positiva entre las variables examinadas. Los coeficientes de correlación, todos superiores a 0.7, indican una fuerte asociación entre las variables estudiadas. Este alto grado de correlación sugiere que las variables tienden a moverse en la misma dirección, es decir, cuando una variable aumenta, las otras también tienden a incrementar. Además, el nivel de significancia del 99% asociado a estas correlaciones proporciona un alto grado de confianza en la validez estadística de estas relaciones, minimizando la probabilidad de que estos resultados sean producto del azar.

La representación gráfica de estas relaciones, ilustrada en la Figura 2, ofrece una visualización clara e intuitiva de los patrones de correlación descritos numéricamente en la Tabla 2. Esta representación visual permite observar de manera directa cómo las variables se mueven conjuntamente, reforzando la interpretación de los coeficientes de correlación. La fuerza y dirección de estas relaciones tienen implicaciones importantes para la comprensión del fenómeno estudiado, sugiriendo que los factores examinados están intrínsecamente ligados y que los cambios en una variable probablemente tendrán repercusiones significativas en las otras.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta y procesados con SPSS.

Con el análisis previo de que las variables tienen una distribución normal, se elabora un modelo de regresión lineal, que es una técnica estadística fundamental que analiza la relación entre variables, expresando una variable dependiente como una función lineal de una o más variables independientes y que se basa en la ecuación (1).

$$Y = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad (1)$$

La evaluación del modelo incluye el análisis del coeficiente de determinación (R^2) mostrado en la Tabla 2 y pruebas de significancia. Es crucial verificar los supuestos del modelo, como linealidad, independencia, homocedasticidad y normalidad de residuos. A pesar de su simplicidad, el modelo de regresión lineal es versátil y sirve como base para técnicas más avanzadas, siendo aplicable en diversos campos como economía, psicología y ciencias naturales. Su comprensión es

esencial en la era del *big data* y el aprendizaje automático para el análisis e inferencia estadística (Montgomery and Peck, 2021).

Tabla 2. *Resumen del modelo*

Resumen del modelo									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en R cuadrado	Estadísticos de cambio			Sig. Cambio en F
						Cambio en F	gl1	gl2	
1	.929 ^a	.862	.862	7.05285	.862	1189.732	2	380	.000

a. Predictores: (Constante), Total de infraestructura, Total de empleo

b. Variable dependiente: Total de desarrollo

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta y procesados con SPSS.

El análisis del modelo de regresión lineal revela resultados significativos que proporcionan una visión detallada de la relación entre las variables estudiadas. El coeficiente de determinación (R^2) de 86.2% indica que el modelo explica una proporción sustancial de la variabilidad en los datos, lo que sugiere un ajuste robusto y una alta capacidad predictiva. Este valor implica que el modelo puede predecir con un 80% de certeza el comportamiento de la variable dependiente basándose en las variables independientes incluidas.

Los coeficientes estimados del modelo, obtenidos a través del análisis en SPSS y mostrados en la Tabla 3, ofrecen información valiosa sobre la naturaleza de las relaciones entre las variables. El intercepto (β_0) de 2.350 representa el valor esperado de la variable dependiente cuando todas las variables independientes son cero. Por su parte, el coeficiente de pendiente (β_1) de 2.0 indica el cambio esperado en la variable dependiente por cada unidad de cambio en la variable independiente asociada al empleo en la región.

Estos parámetros permiten construir un modelo predictivo que puede utilizarse para examinar cómo el desarrollo de la región, particularmente en lo que respecta a la gestión del agua, se ve influenciado por cambios en la infraestructura local y en el empleo. El término constante (ϵ) de 8.331 captura la variabilidad no explicada por las variables incluidas en el modelo, representando otros factores que pueden influir en el desarrollo sustentable pero que no han sido explícitamente modelados.

Tabla 3. *Coefficientes del modelo.*

Modelo		Coeficientes					95.0% intervalo de confianza para B		
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	Límite inferior	Límite superior
		B	Desv. Error	Beta					
1	(Constante)	8.331	1.525		5.464	.000	5.333	11.328	
	Total de empleo	2.000	.121	.379	16.494	.000	1.762	2.239	
	Total de infraestructura	2.350	.082	.662	28.810	.000	2.190	2.511	

a. Variable dependiente: Total de desarrollo

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta y procesados con SPSS.

Análisis y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan evidencia empírica significativa sobre la relación entre las centrales hidroeléctricas, el desarrollo sustentable y la gestión del agua en las comunidades locales. Las fuertes correlaciones positivas encontradas entre las variables estudiadas (coeficientes > 0.7 , $p < 0.01$) son consistentes con investigaciones previas que han destacado la naturaleza interconectada del desarrollo sustentable.

Por ejemplo, Liu *et al.* (2013), encontraron que los proyectos hidroeléctricos en China tenían impactos multidimensionales en las comunidades locales, afectando no solo la economía, sino también aspectos sociales y ambientales. Los hallazgos refuerzan esta idea de interconexión, sugiriendo que los cambios en un aspecto del desarrollo (como el empleo) pueden tener efectos en cascada en otros ámbitos.

El alto coeficiente de determinación ($R^2 = 86.2\%$) obtenido en nuestro modelo de regresión indica una fuerte capacidad predictiva, superior a la reportada en algunos estudios previos. Por ejemplo, Siciliano *et al.* (2015), obtuvieron un R^2 de 72% en su análisis de los impactos socioeconómicos de las represas en el sudeste asiático. Esta diferencia podría atribuirse a la inclusión de variables adicionales en nuestro modelo o a las características específicas de la región de estudio.

La relación positiva entre el empleo y el desarrollo sustentable centrado en la gestión del agua ($\beta_1 = 2.0$) es particularmente interesante. Este hallazgo está en línea con el estudio de Ansar *et al.* (2014), quienes encontraron que los grandes proyectos hidroeléctricos pueden generar beneficios significativos en términos de empleo local. Sin embargo, es importante notar que Ansar *et al.* (2014), también advirtieron sobre los posibles impactos negativos a largo plazo si no se gestionan adecuadamente estos proyectos.

Estos resultados también respaldan la idea de que el desarrollo sustentable, particularmente en el contexto de la gestión del agua, es un fenómeno multifacético. Esto concuerda con el marco conceptual propuesto por Tortajada (2015), quien argumenta que la evaluación de los proyectos hidroeléctricos debe ir más allá de los indicadores económicos tradicionales e incluir aspectos sociales y ambientales.

La fuerte correlación entre las variables estudiadas subraya la importancia de adoptar un enfoque holístico en la planificación y evaluación de proyectos hidroeléctricos. Esto está en línea con las recomendaciones de la Comisión Mundial de Represas (2000), que enfatizó la necesidad de considerar una gama más amplia de opciones y criterios en la toma de decisiones sobre represas.

En este sentido, es importante reconocer las limitaciones de nuestro estudio. Aunque nuestro modelo muestra una fuerte capacidad predictiva, no podemos inferir causalidad directa de estas correlaciones. Como señalan Kirchherr y Charles (2016), en su revisión sistemática de los impactos de las represas, la relación entre los proyectos hidroeléctricos y el desarrollo local es compleja y puede variar significativamente según el contexto.

Además, el estudio se centra principalmente en los aspectos positivos del desarrollo, como el aumento del empleo. Futuros estudios deberían considerar también los posibles impactos negativos, como el desplazamiento de comunidades o la alteración de ecosistemas, aspectos que han sido destacados por investigadores como Zarfl *et al.* (2015), en su análisis global de los impactos de las represas.

En conclusión, nuestros hallazgos proporcionan evidencia empírica que respalda la idea de que las centrales hidroeléctricas pueden tener impactos significativos y multidimensionales en el desarrollo sustentable local. Sin embargo, como sugieren Moran *et al.* (2018), es crucial que estos proyectos se planifiquen y gestionen cuidadosamente para maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos en las comunidades locales y los ecosistemas.

Conclusiones

Es importante señalar algunas limitaciones del estudio. Aunque el modelo de regresión muestra un alto poder explicativo, no establece causalidad directa. Factores no incluidos en el modelo podrían estar influyendo en las relaciones observadas. Además, el estudio se basa en datos de un momento específico en el tiempo, lo que limita nuestra capacidad para entender cómo estas relaciones pueden evolucionar a lo largo del tiempo.

En conclusión, este estudio proporciona evidencia empírica sólida sobre la interrelación entre las centrales hidroeléctricas, el desarrollo sustentable y la gestión del agua. Los resultados subrayan la necesidad de un enfoque integrado en la planificación y gestión de proyectos hidroeléctricos, los cuales se deben de considerar no solo los aspectos técnicos y económicos, sino también los impactos sociales y ambientales más amplios. Esta comprensión más profunda puede contribuir a políticas y prácticas más sostenibles en el desarrollo de infraestructuras energéticas y la gestión de recursos hídricos (Martinez-Alier *et al.*, 2016).

Futuras investigaciones podrían beneficiarse de un enfoque longitudinal, examinando cómo los impactos de las centrales hidroeléctricas cambian a lo largo del tiempo. También sería valioso explorar más a fondo los mecanismos específicos a través de los cuales las centrales hidroeléctricas influyen en diferentes aspectos del desarrollo sustentable.

Referencias literarias

- Ansar, A. et al.** (2014) 'Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development', *Energy policy*, 69, pp. 43–56.
- Bandieri, S. and Blanco, G.** (1968) 'Promesas incumplidas: hidroenergía y desarrollo agrario regional en la norpatagonia argentina Susana', *Centro de estudio de la Argentina Rural-UNQ*, 34(2), pp. 78–86.
- Benson, D., Gain, A. and Rouillard, J.** (2015) 'Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a 'nexus' approach?', *Water alternatives*, 8(1), pp. 756–773.
- Berga, L.** (2016) 'The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: a review', *Engineering*, 2(3), pp. 313–318.
- Brundtland, G.H. and Mansour, K.** (2010) 'World Commission on Environment and Development (WCED). 1987', *Our common future*, p. 2010.
- CEM** (2022) Autlan. Available at: <https://www.autlan.com.mx>.
- Cortina-Borja, M.** (2012) 'Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures, 5th EDN'. Oxford University Press.

- Creswell, J. and Creswell, J.** (2017) *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications.
- Erlingsson, C. and Brysiewicz, P.** (2017) 'A hands-on guide to doing content analysis', *African journal of emergency medicine*, 7(3), pp. 93–99.
- Estrada, Z.P.** (2016) *Trasformación de los medios de vida de los pescadores artesanales, por la puesta en marcha de la central hidroeléctrica Sogamoso. El caso de los pescadores ubicados aguas abajo del río Sogamoso en el departamento de Santander*. Tesis de Maestría, Universidad Javeriana.
- FAO** (2004) *Política de desarrollo agrícola, Política de desarrollo agrícola: conceptos y principios*.
- Garrido, S., Lalouf, A. and Moreira, J.** (2013) 'Implementación de energías renovables como estrategia para modificar la matriz energética en Argentina. De las políticas puntuales a las soluciones sistémicas', *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 17, pp. 35–41.
- González, M., Escobar, Y. and Jiménez, H.** (2007) 'La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático', *Ingeniería y competitividad*, 9(1), pp. 19–29.
- GWP, T.** (2000) 'Integrated Water Resources Management., TAC Background Paper No. 4', *Global Water Partnership Technical Advisory Committee, Stockholm* [Preprint].
- Hernández, L.F.** (2019) *Lineamientos para el desarrollo del turismo en la zona de restauración de la Central Hidroeléctrica El Quimbo*. Universidad Externado de Colombia.
- Hoff, H.** (2011) 'Understanding the nexus'.
- IEA, P.** (2021) 'Hydropower special market report', in. IEA Paris, France.
- INEGI** (2010) 'Compendio de información geográfica municipal 2010 Tezuitlán, Puebla', Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Preprint].
- Jerez, B.** (2015) 'Conflictos ecoterritoriales, megaproyectos de minería y centrales hidroeléctricasen los andes patagónicos: Escenarios y desafíos emergentes para el trabajo social', *Intervención*, 4, pp. 41–48.
- Kallio, H. et al.** (2016) 'Systematic methodological review: developing a framework for a qualitative semi-structured interview guide', *Journal of advanced nursing*, 72(12), pp. 2954–2965.
- Kirchherr, J. and Charles, K.** (2016) 'The social impacts of dams: A new framework for scholarly analysis', *Environmental Impact Assessment Review*, 60, pp. 99–114.
- Kougias, I. and Schleker, T.** (2019) *Hydropower technology development report 2018*. EUR.
- De Kuyper, J.** (2014) 'Fuentes de energía renovables y no renovables. Aplicaciones.', *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (77), pp. 216–218.
- Liu, J. et al.** (2013) 'Sustainability in hydropower development—A case study', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 230–237.

- Maier, H. et al.** (2016) 'An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together?', *Environmental modelling & software*, 81, pp. 154–164.
- Martinez-Alier, J. et al.** (2016) 'Is there a global environmental justice movement?', *The Journal of Peasant Studies*, 43(3), pp. 731–755.
- Montgomery, D. and Peck, E.** (2021) *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Moran, E. et al.** (2018) 'Sustainable hydropower in the 21st century', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(47), pp. 11891–11898.
- Orozco G., M. and Présiga, J.** (2014) *Problemáticas Jurídico-Ambientales Generadas En El Marco De La Construcción De La Central Hidroeléctrica Ituango (Departamento De Antioquia)*. Universidad de Medellín. Available at: [https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/1189/Problemáticas_jurídicoambientales_generadas_en_el_marco_de_la_construcción_de_la_Central_Hidroeléctrica_Ituango %28Departamento de Antioquia%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/1189/Problemáticas_jurídicoambientales_generadas_en_el_marco_de_la_construcción_de_la_Central_Hidroeléctrica_Ituango_%28Departamento_de_Antioquia%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Pedroza, H. and Dicovsky, L.** (2007) 'Sistema de análisis estadísticos con SPSS'.
- Pierri, N.** (2005) 'Historia del concepto de desarrollo sustentable', *Sustentabilidad*, pp. 27–81.
- Pont, J.** (2010) 'Acción gubernamental e institucionalismo en la Amazonia brasileña: El conflicto en torno a las infraestructuras hidroeléctricas', *Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 18(36), pp. 99–124. Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572010000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es (Accessed: 14 December 2022).
- Presas Comisión Mundial de** (2000) 'Represas y desarrollo: un nuevo marco para la toma de decisiones. El reporte final de la Comisión Mundial de Presas'. Earthscan Publications Ltd Londres.
- Purvis, B., Mao, Y. and Robinson, D.** (2019) 'Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins', *Sustainability science*, 14, pp. 681–695.
- Rojas, J. and Hansen, G.** (2006) 'Turismo de naturaleza, desarrollo local sustentable y megaproyectos hidroeléctricos en la Patagonia chilena* Ecotourism in nature, local sustainable development, and hydroelectric megaprojects in the Chilean Patagonia', *Sociedad hoy*, 11, pp. 87–108.
- Romero, H., Romero A., H. and Toledo, X.** (2009) 'Agua, poder y discursos en el conflicto-territorial por la construcción de represas hidroeléctricas en la Patagonia Chilena.', *Anuario de estudios americanos*, 66, pp. 81–103. Available at: [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117821/Agua, poder y discursos en el conflicto socio-territorial por la construccion de represas hidroelectricas en la Patagonia C.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117821/Agua,_poder_y_discursos_en_el_conflicto_socio-territorial_por_la_construccion_de_represas_hidroelectricas_en_la_Patagonia_C.pdf?sequence=1).
- Siciliano, G. et al.** (2015) 'Hydropower, social priorities and the rural–urban development divide: The case of large dams in Cambodia', *Energy Policy*, 86, pp. 273–285.
- Spiegeler, C. and Cifuentes, J.** (2016) 'Definición e información de energías renovables'.

- Torres, A., Caballero, H. and Awad, G.** (2014) ‘Hidroeléctricas y desarrollo local ¿ mito o realidad? caso de estudio: Hroituango’, En revista. Energética del instituto de energía, Facultad de Minas, p. 10.
- Torres, A. and García, A.** (2009) ‘Conflictos por el agua en Chile: el gran capital contra las comunidades locales. Análisis comparativo de las cuencas de los ríos Huasco (desierto de Atacama) y Baker (patagonia austral).’, Espacio abierto: cuaderno venezolano de sociología, 18(4), pp. 695–708.
- Tortajada, C.** (2015) ‘Dams: an essential component of development’, Journal of Hydrologic Engineering, 20(1), p. A4014005.
- United, N.** (2015) ‘Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development’, New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 1, p. 41.
- Van-Vliet, M. et al.** (2016) ‘Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources’, Nature Climate Change, 6(4), pp. 375–380.
- Viviescas, M.A.** (2014) ‘Caracterización de impactos ambientales y sociales generados por la construcción de grandes centrales hidroeléctricas en el país’, Universidad Militar Nueva Granada, p. 25. Available at: [http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12036/1/Artículo Alejandra Viviescas.pdf](http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12036/1/Artículo_Alejandra_Viviescas.pdf).
- Zarfl, C. et al.** (2015) ‘A global boom in hydropower dam construction’, Aquatic Sciences, 77, pp. 161–170.