

Informe de arranque

Versión 3

Assessment of the Small-scale hydropower potential in Colombia

07 noviembre 2025

Contenido

1. Abstracto.....	6
2. Contexto.....	7
3. Entendimiento del Alcance de estudio.....	12
4. Análisis detallado de las turbinas hidro cinéticas como tecnología factible para la generación de energía en las ZNI de Colombia	13
4.1. Introducción.....	13
4.2. Marco Teórico.....	13
4.3. Los ríos colombianos en las regiones Orinoquía y Amazonia colombiana.....	16
4.4. Análisis de la aplicabilidad de las turbinas hidro cinéticas en los ríos de la Orinoquía y la Amazonía colombianas - Variable velocidad.....	20
4.5. Análisis de la aplicabilidad de las turbinas hidro cinéticas en los ríos de la Orinoquía y la Amazonía colombianas - Otras consideraciones.....	25
4.6. Conclusiones.....	27
4.7. Referencias bibliográficas	28
5. Metodología y planificación.....	28
5.1. Metodología	28
5.1.1. Actividad 0: Arranque del proyecto	29
5.1.2. Actividad 1: Investigación y análisis tecnológico	29
5.1.3. Actividad 2: Metodología de dimensionamiento y costos del sistema	30
5.1.4. Actividad 3: Evaluación regulatoria y financiera	31
5.1.5. Actividad 4: Desarrollado del modelo	32
5.1.6. Actividad 5: Fortalecimiento de capacidades.....	33
5.1.7. Actividad 6: Informe final.....	34
5.2. Entregables	34
5.3. Planificación.....	35
6. Primeros pasos del Proyecto.....	39
7. Stakeholders.....	40
8. Modelo de gobernanza.....	41

8.1. Capa de Alineación Estratégica – WBG, UPME y Dirección del Proyecto.....	42
8.2. Capa de Gestión Operativa – coordinación técnica y dirección de la ejecución.....	42
9. Riesgos del proyecto	43

Ilustraciones

Ilustración 1: Zonas no interconectadas (ZNI).....	8
Ilustración 3: Necesidades UNMET y Índice de calidad de vida	10
Ilustración 4: THCs de flujo axial. a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido. Fuente: Vermaak et al. (2014).	14
Ilustración 5: THCs de flujo cruzado. a) de eje horizontal, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius. Fuente: Vermaak et al. (2014).	14
Ilustración 6: Diagrama TSR vs. Cp de diferentes turbinas. Fuente: adaptado de Guney (2011).....	16
Ilustración 7: Hidrografía de la Orinoquía colombiana	17
Ilustración 8: Clasificación de ríos de Rosgen, D. (1996) y su evidencia en los ríos Meta, Bitá y Tomo	18
Ilustración 9: Cálculo de la velocidad media de los ríos en la Orinoquía y Amazonía colombiana.....	19
Ilustración 10: Relación del diámetro del sedimento de las márgenes de un río y las velocidades del flujo	20
Ilustración 11: Potencia y velocidades de las THCs analizadas	24
Ilustración 12: Acumulación de ramas y hojas en instalaciones de THCs.....	26
Ilustración 13: Costo de diferentes equipos de generación de THCs. Fuente: Kirke, B. (2024).....	26
Ilustración 14: Actividades de la metodología.....	29
Ilustración 15: Planificación del proyecto.....	36
Ilustración 16: Ilustrativo reunión de seguimiento	38
Ilustración 17: Modelo de gobierno.....	42
Ilustración 18: Estructura de alineación estratégica y operativa del proyecto.....	43

Ecuaciones

Equación 1: Cálculo de la potencia disponible en sistemas THC.....	14
Equación 2: Cálculo Coeficiente de potencia	15
Equación 3: Relación de velocidad de punta (TSR) para turbinas hidrocinéticas.....	15
Equación 4: Velocidad del flujo en canales abiertos según la fórmula de Manning.....	16

Acrónimos

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO	ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
AHP	Analytic Hierarchy Process	IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (National Environmental Licensing Authority)	kW	Kilowatt
ASIC	Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales	LCOE	Levelized Cost of Electricity
CAPEX	Capital Expenditures	MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
CARs	Corporaciones Autónomas Regionales (Regional Environmental Authorities)	MME	Ministerio de Minas y Energía (Ministry of Mines and Energy)
CAF	Corporación Andina de Fomento (Development Bank of Latin America)	NGO	Non-Governmental Organization
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas (Energy and Gas Regulatory Commission)	OPEX	Operational Expenditures
CSV	Comma-Separated Values (File Format)	PAYG	Pay-As-You-Go
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (National Statistics Department)	PPA	Power Purchase Agreement
DEM	Digital Elevation Model	PRONE	Programa de Normalización de Redes Eléctricas
ESG	Environmental, Social, and Governance	Q	Flow Rate (in hydropower equation)
FAER	(Financial Support Fund for Electrification of Rural Interconnected Areas)	RCE	Registro de Comunidades Energéticas (Energy Communities Registry)
FAZNI	Fondo de Apoyo para Zonas No Interconectadas (Support Fund for Non-Interconnected Zones)	REC	Renewable Energy Certificate

FECFGN	Fondo Especial Cuota de Fomento de Gas Natural	ROI	Return on Investment
FIR	Fondo de Infraestructura Privada (Private Infrastructure Fund)	SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (Non-Conventional Renewable Energy Sources)	SHF	Small Hydropower Facility (contextually implied)
FONENERGÍA	Fondo Único de Soluciones Energéticas	SHP	Small-Scale Hydropower
GCF	Green Climate Fund	SIN	Sistema Interconectado Nacional (National Interconnected System)
GEF	Global Environment Facility	SISFV	Soluciones Individuales Solares Fotovoltaicas
GIS	Geographic Information System	UPME	Unidad de Planeación Minero Energética (Mining and Energy Planning Unit)
IDB	Inter-American Development Bank	VCS	Verified Carbon Standard
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	ZNI(s)	Zonas No Interconectadas (Non-Interconnected Zones)
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi		

1. Abstracto

Este Informe de Inicio constituye el primer hito formal en el proyecto de evaluación del potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Colombia, una iniciativa impulsada por el WBG y ejecutada por el consorcio Minsait, Ingeniería Elemental y Easy Hydro en coordinación directa con la UPME como beneficiario principal.

El proyecto se enmarca en los esfuerzos nacionales para avanzar en la transición energética justa y ampliar el acceso a energía en zonas no interconectadas (ZNIs), donde las soluciones hidroeléctricas a pequeña escala representan una alternativa estratégica para reemplazar generación basada en diésel, mejorar la resiliencia territorial y contribuir a los objetivos de electrificación rural del país.

El propósito de este informe es establecer las bases estratégicas, operativas y metodológicas que guiarán la ejecución del proyecto y asegurarán su alineación con las prioridades de planificación energética del país y los mandatos de la UPME.

El documento inicia con una contextualización del entorno institucional y regulatorio de las ZNI en Colombia. Posteriormente, define el alcance del proyecto y los resultados esperados en cada una de las actividades principales:

- Arranque del proyecto y alineación estratégica
- Investigación y análisis tecnológico de soluciones PCH
- Metodología de dimensionamiento y costos del sistema
- Evaluación regulatoria y financiera para proyectos de PCH en ZNIs
- Desarrollo del modelo geoespacial y herramienta de visualización
- Fortalecimiento de capacidades para garantizar la transferencia de conocimientos
- Informe Final

Cada actividad se articula mediante una planificación detallada que define entregables, fechas clave y puntos de validación, garantizando la aplicabilidad y adopción de los resultados.

Se incorpora también un mapeo de stakeholders, identificando a los actores institucionales y comunidades beneficiarias relevantes para la futura implementación del modelo.

Finalmente, se presenta el modelo de gobernanza del proyecto, estructurado en dos niveles: estratégico y operativo, junto con los canales de comunicación, protocolos de validación y mecanismos de mitigación de riesgos acordados con WBG y UPME. En conjunto, estos elementos establecen una base sólida para las siguientes fases de trabajo y garantizan que el proyecto se ejecute de manera robusta, eficiente y alineada con la planificación acordada.

2. Contexto

En el marco de la política pública de cobertura de energía eléctrica de Colombia, la Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME] está evaluando mecanismos que permitan cerrar brechas energéticas avanzando en la universalización del servicio de energía eléctrica a través de la expansión de su cobertura en las zonas conectadas al Sistema Interconectado Nacional [SIN] y Zonas no Interconectadas [ZNI]. Entre las alternativas analizadas se incluyen pequeñas centrales hidroeléctricas [PCH], micro redes híbridas, sistemas fotovoltaicos y otras fuentes renovables que permitan diversificar la matriz energética y mejorar la cobertura y calidad del servicio eléctrico en las zonas más aisladas del país. En este contexto, el presente proyecto se centra en el análisis y desarrollo de una metodología para la planificación y dimensionamiento de PCH, como una opción costo-eficiente y ambientalmente sostenible para la electrificación de las ZNI.

El sistema eléctrico colombiano se estructura en dos grandes áreas: el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las Zonas No Interconectadas (ZNI). El SIN integra la generación, transmisión y distribución de electricidad a través de una red que cubre la mayor parte de la población, mientras que las ZNI, definidas en la Ley 855 de 2003, corresponden a municipios, corregimientos y localidades que no están conectados a la red nacional. Estas zonas abarcan entre el 52% aproximadamente del territorio colombiano, pero albergan solo alrededor del 3,8% de la población, de la cual aproximadamente el 50% aún carece de acceso a energía eléctrica confiable.

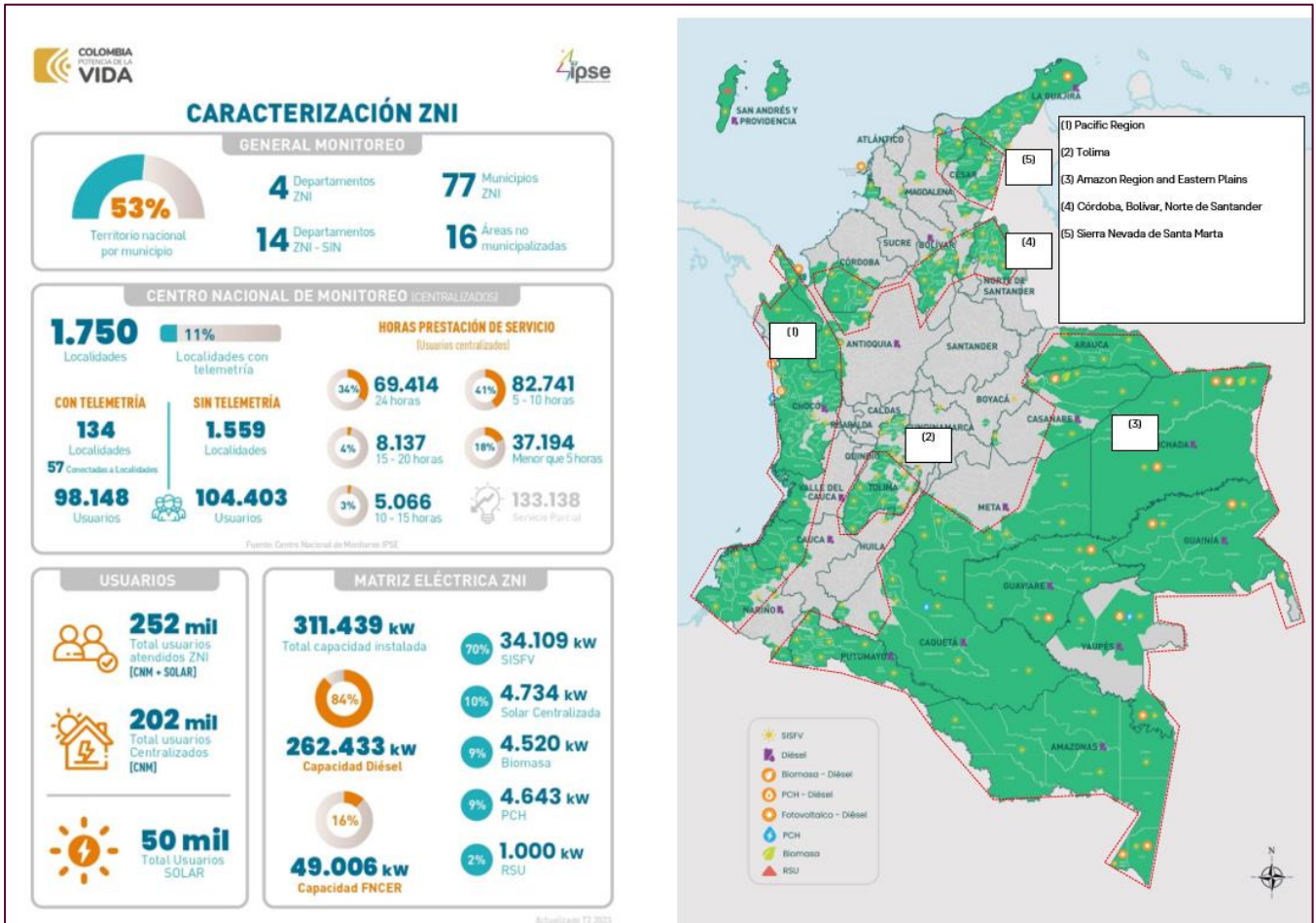


ILUSTRACIÓN 1: ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)¹

La ilustración muestra la caracterización energética de las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, que comprenden 4 departamentos ZNI, 77 municipios y 16 áreas no municipalizadas, representando el 53% del territorio nacional por municipio. Se reportan 1.750 localidades monitoreadas por el IPSE, de las cuales solo 134 cuentan con telemetría, mientras 1.559 no disponen de este sistema. La prestación de servicio energético presenta una marcada variabilidad: el 34% de las localidades recibe entre 20 y 24 horas de servicio, el 45% entre 15 y 20 horas, el 21% menos de 15 horas y un porcentaje menor incluso dispone de menos de 10 horas/día. En total, las ZNI registran cerca de 252 mil usuarios, incluyendo 202 mil atendidos por el Centro Nacional de Monitoreo y 50 mil usuarios solares.

La matriz eléctrica ZNI evidencia una fuerte dependencia del diésel, con 262.433 kW instalados (84%), mientras que las Fuentes No Convencionales (FNCER), como solar y PCH, representan 49.006 kW (16%). Se observa además presencia de soluciones híbridas (biomasa-diésel, solar-diésel y PCH-diésel) distribuidas en diversos departamentos del país, según se aprecia en el mapa adjunto.

¹ Fuente: [Caracterización Energética de las ZNI - IPSE-CNM](#)

La capacidad instalada en las ZNI representa apenas 1,5% del total nacional (aproximadamente 311 MW), y su generación depende principalmente de plantas diésel (más del 80%), complementadas con soluciones basadas en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como solar, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas. Esta alta dependencia del diésel genera elevados costos de operación y emisiones, lo que limita la sostenibilidad y expansión del servicio eléctrico.

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), bajo la dirección del Ministerio de Minas y Energía (MME), lidera la planificación y ejecución de proyectos energéticos en las ZNI, en coordinación con la UPME, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y las autoridades locales. Sin embargo, la fragmentación institucional, la falta de mecanismos financieros ágiles y los complejos procesos regulatorios siguen siendo desafíos relevantes para la implementación de soluciones energéticas sostenibles.

Colombia posee un alto potencial hidroenergético, derivado de su ubicación ecuatorial, que favorece la alta pluviosidad y de la presencia de la Cordillera de los Andes, que genera fuertes gradientes altimétricos. Según la UPME, existe una alta densidad de potencial hidroeléctrico de pequeña escala (<500 kW) en la región del Pacífico y una densidad media en la Amazonía y los Llanos Orientales. Este potencial convierte a las PCH en una alternativa técnica y ambientalmente viable para la electrificación de las ZNI, con beneficios en términos de confiabilidad, sostenibilidad y reducción de costos a largo plazo.

La ilustración correspondiente al Atlas de Potencial Hidroenergético de Colombia muestra la distribución espacial del recurso hidroenergético a escala nacional, destacando las cuencas y subcuencas con mayor disponibilidad de caudal y desnivel aprovechable. El mapa identifica regiones con alto potencial, entre ellas el Pacífico colombiano, las áreas montañosas de Tolima, la Orinoquía y Amazonía, el corredor Córdoba–Bolívar–Norte de Santander, y la Sierra Nevada de Santa Marta, donde la densidad de drenajes y la topografía favorecen el desarrollo de soluciones hidroeléctricas. En contraste, se visualizan en líneas rojas los límites de las Zonas No Interconectadas (ZNI), evidenciando que gran parte de estas áreas coincide con zonas de difícil acceso, baja densidad poblacional y condiciones geográficas complejas, pese a contar en varios casos con un potencial hidroenergético significativo. Esta descripción sintetiza los elementos principales de la ilustración original proveniente del Atlas de Potencial Hidroenergético – UPME [2].

La pequeña hidroenergía (PCH) se clasifica, según la UPME, en cuatro categorías:

- **Small hydro:** 500–20.000 kW
- **Mini hydro:** 50–500 kW
- **Micro hydro:** 5–50 kW
- **Pico hydro:** 0,5–5 kW

² Fuente: [Atlas_p73-100.pdf](#)

En comunidades rurales dispersas, una planta de 100 kW puede abastecer a unas 500 personas, lo que ilustra su potencial para cubrir necesidades básicas mediante soluciones modulares, de bajo impacto ambiental y adaptadas al contexto local.

El limitado acceso a la electricidad en las ZNI no solo refleja desigualdades territoriales, sino que constituye una barrera estructural al desarrollo humano. Estas zonas presentan los valores más altos de necesidades básicas insatisfechas (NBI) y los índices más bajos de calidad de vida y desarrollo humano (IDH). Estudios nacionales e internacionales muestran una correlación directa entre el consumo energético per cápita y el IDH, destacando la energía como un habilitador esencial para el progreso social y económico.

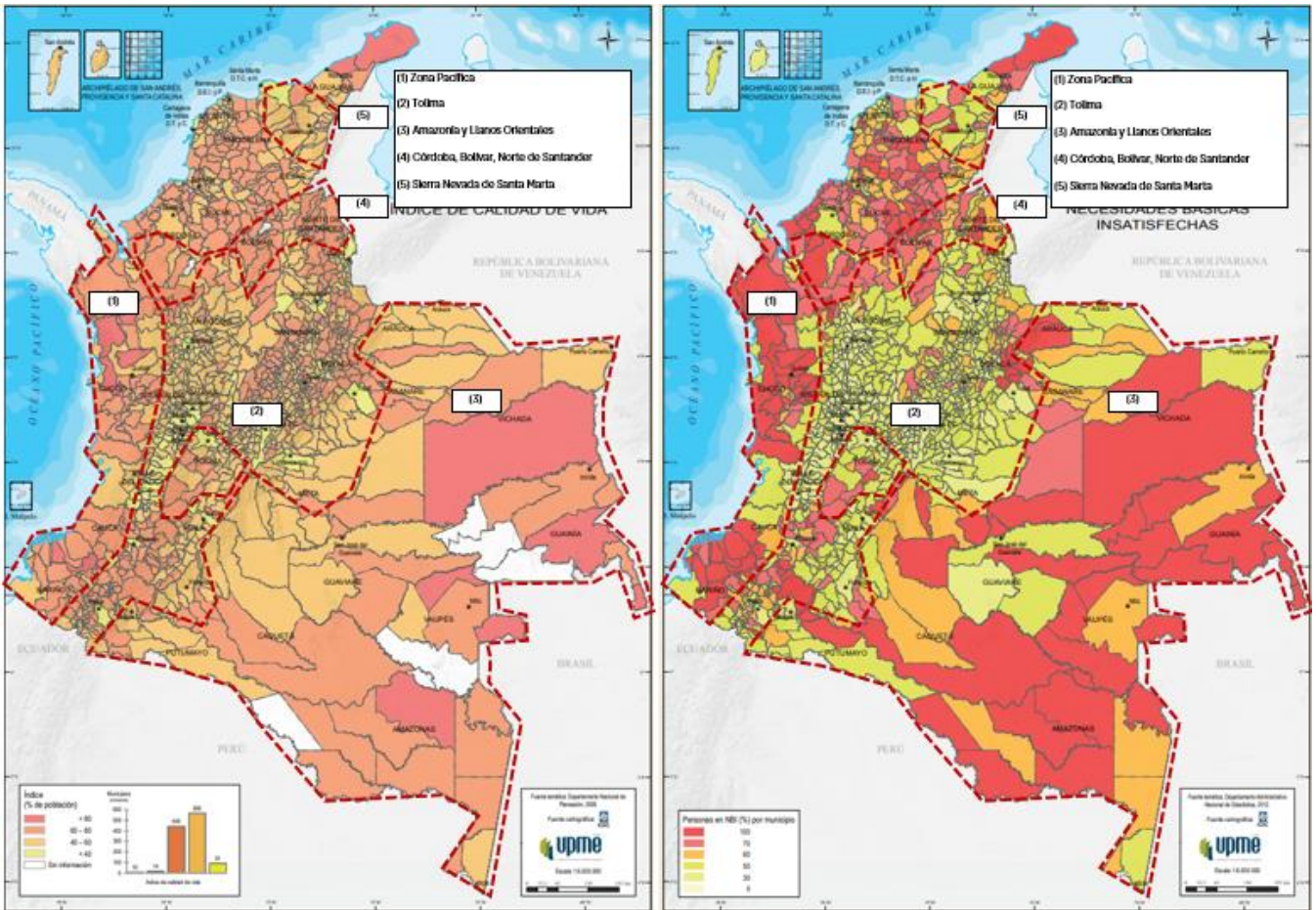


ILUSTRACIÓN 2: NECESIDADES UNMET Y ÍNDICE DE CALIDAD DE VIDA³

En la Ilustración 3, la sigla UNMET hace referencia a los "Unmet Basic Needs", o Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), un indicador utilizado para medir el nivel de pobreza multidimensional a partir de carencias estructurales como acceso a servicios públicos, condiciones de la vivienda, educación y dependencia económica. Este índice permite identificar territorios con mayores brechas socioeconómicas y contraste con el Índice de Calidad de Vida [ICV] mostrado en paralelo, facilitando la priorización de zonas para intervenciones energéticas y sociales [2].

³ Fuente: [Atlas_p101-127.pdf](#)

El acceso sostenible a la energía tiene impactos positivos comprobados en múltiples dimensiones (CAF 2023):

- **Empleo y productividad:** la electrificación puede aumentar el empleo hasta un **47%** y mejorar la productividad industrial en un **14%**.
- **Condiciones de vida:** se asocia con mejoras de entre el **16% y el 20%** en los índices de desarrollo humano y una **reducción de la pobreza de hasta el 13%**.
- **Educación y salud:** la disponibilidad de energía mejora la infraestructura educativa, prolonga el tiempo de estudio y reduce enfermedades respiratorias vinculadas al uso de combustibles fósiles.
- **Medio ambiente:** el reemplazo de generación diésel por fuentes renovables, como la hidroenergía a pequeña escala, reduce significativamente las **emisiones de CO₂** y los **costos energéticos domésticos**.

En este contexto, el desarrollo de soluciones hidroeléctricas descentralizadas adaptadas a las condiciones técnicas, económicas y geográficas de las ZNI representa una oportunidad estratégica para impulsar la equidad territorial, la transición energética y el desarrollo sostenible. La articulación entre la UPME, el MME, el IPSE y otros actores institucionales será clave para avanzar hacia modelos energéticos más inclusivos, resilientes y sostenibles, en beneficio de las comunidades más vulnerables del país.

CAF, 2023. Electrificación para un desarrollo sostenible. Fuente <https://www.caf.com/media/4666612/impacto-caf-electrificacion-sostenible-informe-completo.pdf>

3. Entendimiento del Alcance de estudio

La motivación principal de este estudio surge del interés de ampliar la cobertura del servicio de energía eléctrica en Colombia, especialmente hacia las comunidades asentadas en las Zonas No Interconectadas (ZNI) que aún carecen de acceso al suministro, muchas de ellas localizadas en áreas con importante potencial hidroenergético.

Para alcanzar este objetivo, se requiere definir un marco técnico, económico, ambiental y normativo eficaz que permita acelerar y facilitar las inversiones orientadas a la expansión de la cobertura eléctrica en estas zonas, bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia.

En ese sentido, se han definido los siguientes criterios que propenden por ese enfoque para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos a pequeña escala en esas ZNI:

- Minimizar los tiempos de puesta en operación
- Disminuir los costos de inversión
- Maximizar el retorno de inversión a través de zonas con mayor potencial
- Facilitar su mantenimiento

La combinación de estos criterios permite excluir del ámbito del estudio las zonas insulares, los Llanos Orientales y la Amazonía, concentrando el trabajo en las ZNI localizadas en regiones montañosas, donde las condiciones topográficas e hídricas favorecen la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).

El alcance del estudio se limita a la evaluación de la viabilidad técnica, económica, regulatoria e institucional de centrales hidroeléctricas con características acordes a las necesidades energéticas de las poblaciones objetivo. Además, se limitará a la evaluación de centrales hidroeléctricas con las características que requieren las poblaciones de interés, cuyo tamaño será definido en las primeras semanas de ejecución de las actividades

Finalmente, se aclara que no se contempla en el alcance de este estudio la comparación de los resultados con otras fuentes de generación en las mismas zonas analizadas. Dicha comparación se considera un paso posterior y complementario, que deberá abordarse en el marco de un alcance adicional, con el fin de orientar futuras decisiones estratégicas de electrificación y diversificación energética en las ZNI.

4. Análisis detallado de las turbinas hidro cinéticas como tecnología factible para la generación de energía en las ZNI de Colombia

4.1. Introducción

A continuación, se presenta el motivo de la exclusión de las zonas insulares, así como de los Llanos Orientales y la Amazonía, además del análisis de la aplicabilidad de las turbinas hidro cinéticas para la generación de energía eléctrica en dichas regiones.

Dentro de las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, una proporción significativa se localiza en las regiones de la Orinoquía, que comprende los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta y la Amazonía, integrada por los departamentos de Guainía, Guaviare, Vaupés, Caquetá, Putumayo y Amazonas, como se muestra en la Ilustración 1 del capítulo 2 (Contexto).

Exceptuando las estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes, estas zonas presentan un relieve predominantemente plano, con ríos de baja pendiente y una dinámica fluvial meándrica o anastomosada, condiciones que influyen directamente en la disponibilidad y aprovechamiento del recurso hidráulico.

Con el fin de evaluar la viabilidad técnica de las turbinas hidro cinéticas (THCs) en estas regiones, se realizó el análisis que se expone a continuación, considerando las características hidrológicas, morfológicas y energéticas de los principales ríos de la Orinoquía y la Amazonía colombianas.

4.2. Marco Teórico

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motriz que aprovecha la energía del fluido que la atraviesa para generar un movimiento de rotación. Este movimiento, transmitido mediante un eje, puede accionar directamente una máquina o un generador eléctrico encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Las turbinas hidráulicas se clasifican, en términos generales, en dos grandes grupos:

1. Las que aprovechan principalmente la energía potencial del flujo, entre las cuales se encuentran las turbinas Pelton, Francis, Kaplan, Banki y Turgo.
2. Las que aprovechan la energía cinética de la corriente de agua, conocidas como turbinas hidro cinéticas (en adelante, *THCs*). Estas últimas, a su vez, pueden dividirse en dos tipos principales:
 - Las turbinas de flujo axial, que se ilustran en la siguiente ilustración:

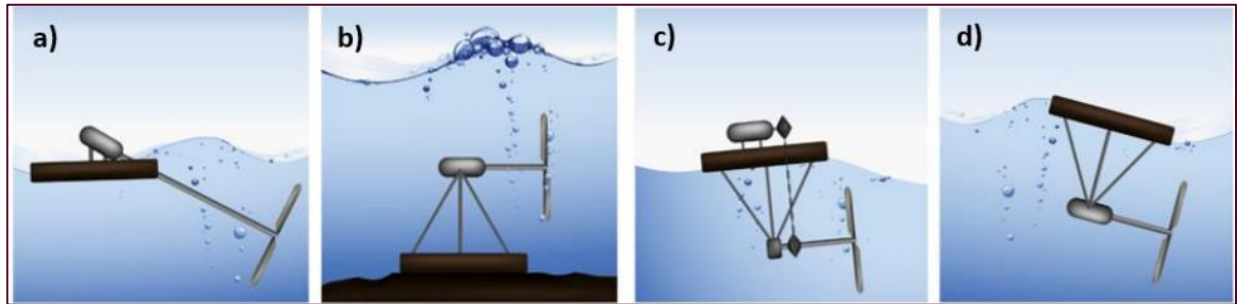


ILUSTRACIÓN 3: THCS DE FLUJO AXIAL. A) EJE INCLINADO, B) AMARRE RÍGIDO, C) GENERADOR NO SUMERGIDO Y D) GENERADOR SUMERGIDO. FUENTE: VERMAAK ET AL. (2014).

- Las de flujo cruzado, como las que se ilustran a continuación:

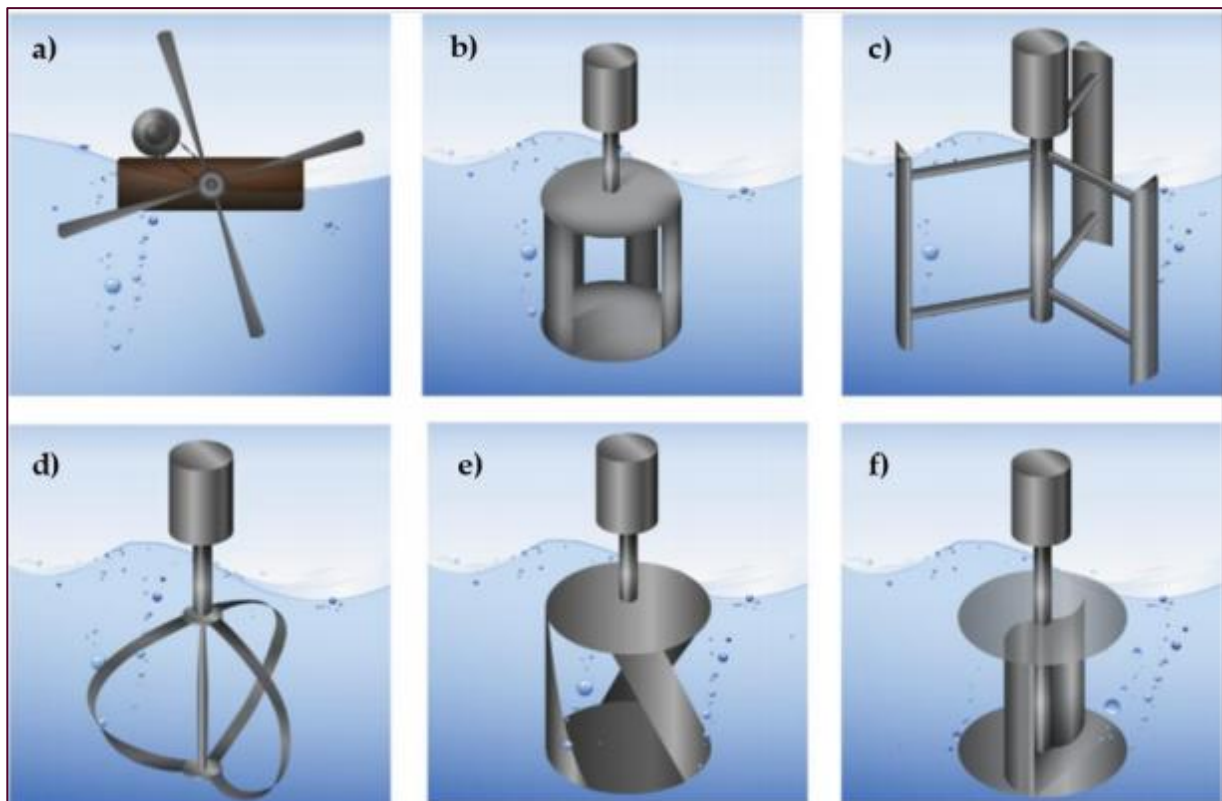


ILUSTRACIÓN 4: THCS DE FLUJO CRUZADO. A) DE EJE HORIZONTAL, B) JAULA DE ARDILLA DARRIEUS, C) H-DARRIEUS, D) DARRIEUS, E) GORLOV Y F) SAVONIUS. FUENTE: VERMAAK ET AL. (2014).

- La potencia de [2], las THCs, puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$P = kQh = \frac{1}{2} \rho \eta AV^3 C_p$$

[1]

- P: potencia generada [W]
- k: constante que integra factores del sistema, dependiente de la densidad del agua, eficiencia global y coeficiente de potencia [–, adimensional]
- Q: caudal del fluido [m³/s]
- h: salto hidráulico disponible [m]
- ρ : densidad del agua [kg/m³]
- η : eficiencia global del sistema [–, adimensional]
- A: área transversal barrida por el álabe o área de paso del flujo [m²]
- V: velocidad del fluido [m/s]
- C_p: coeficiente de potencia [–, adimensional]

- El máximo coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593 \quad [2]$$

- C_p: coeficiente de potencia [–, adimensional]. Corresponde al límite teórico máximo de conversión de energía para turbinas hidrocinéticas y eólicas según la ley de Betz.

Este valor, conocido como número de Betz, representa la fracción de energía cinética del flujo que puede ser extraída y convertida en energía mecánica en el eje de la turbina. Posteriormente, se desarrolló una extensión de esta teoría denominada límite de Lanchester-Betz, la cual establece que no es posible capturar la totalidad de la energía disponible en el flujo, ya que ello implicaría una obstrucción completa del mismo.

Por otro lado, el coeficiente de rendimiento de las distintas turbinas hidro cinéticas (THCs) depende de la relación de velocidad de punta (*Tip Speed Ratio*, TSR por sus siglas en inglés), definida como la relación entre la velocidad tangencial en la punta del álabe y la velocidad de referencia del flujo libre. La TSR se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad [3]$$

- λ: relación de velocidad de punta [Tip Speed Ratio, TSR] — [–, adimensional].
- R: radio barrido por el álabe de la turbina [m].
- ω: velocidad angular de rotación de la turbina [rad/s].
- V: velocidad del fluido incidente [m/s].

En la siguiente ilustración se muestra el diagrama C_p en función de la TSR [Eje X → λ (TSR); Eje Y → C_{w,T}, coeficiente de potencia]. En ella se puede observar que las turbinas de flujo cruzado trabajan a bajas velocidades de punta y presentan bajos coeficientes de potencia, en comparación con las turbinas axiales.

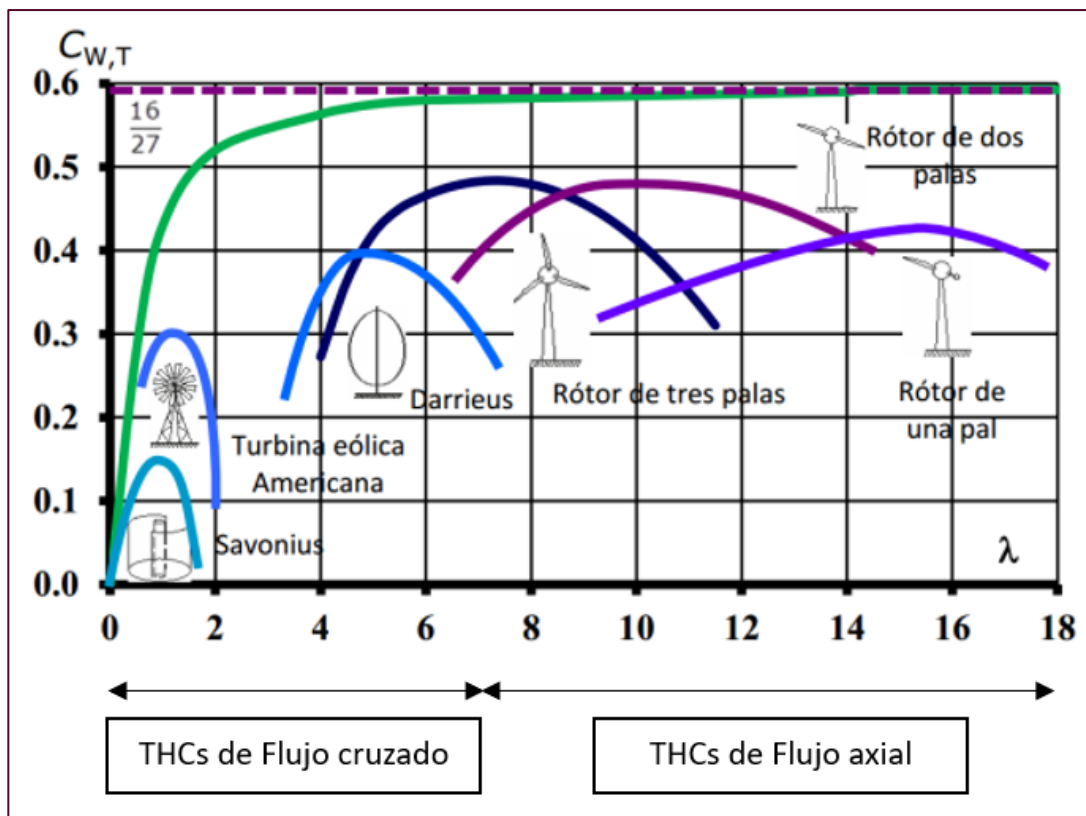


ILUSTRACIÓN 5: DIAGRAMA TSR VS. CP DE DIFERENTES TURBINAS. FUENTE: ADAPTADO DE GUNEY (2011)

4.3. Los ríos colombianos en las regiones Orinoquía y Amazonia colombiana

Como se ha visto y como su propio nombre lo indica, las THC's dependen de la velocidad del fluido que se quiere aprovechar. Esa velocidad puede ser calculada, en canales abiertos, mediante la formulación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \tag{4}$$

- o V: velocidad del flujo (m/s).
- o n: coeficiente de rugosidad de Manning [-, adimensional]. En ríos suele tomarse n = 0.035.
- o \$R_h\$: radio hidráulico de la sección transversal (m). (Área transversal / Perímetro mojado)
- o S: pendiente longitudinal del río [-, adimensional usualmente expresada como m/m).

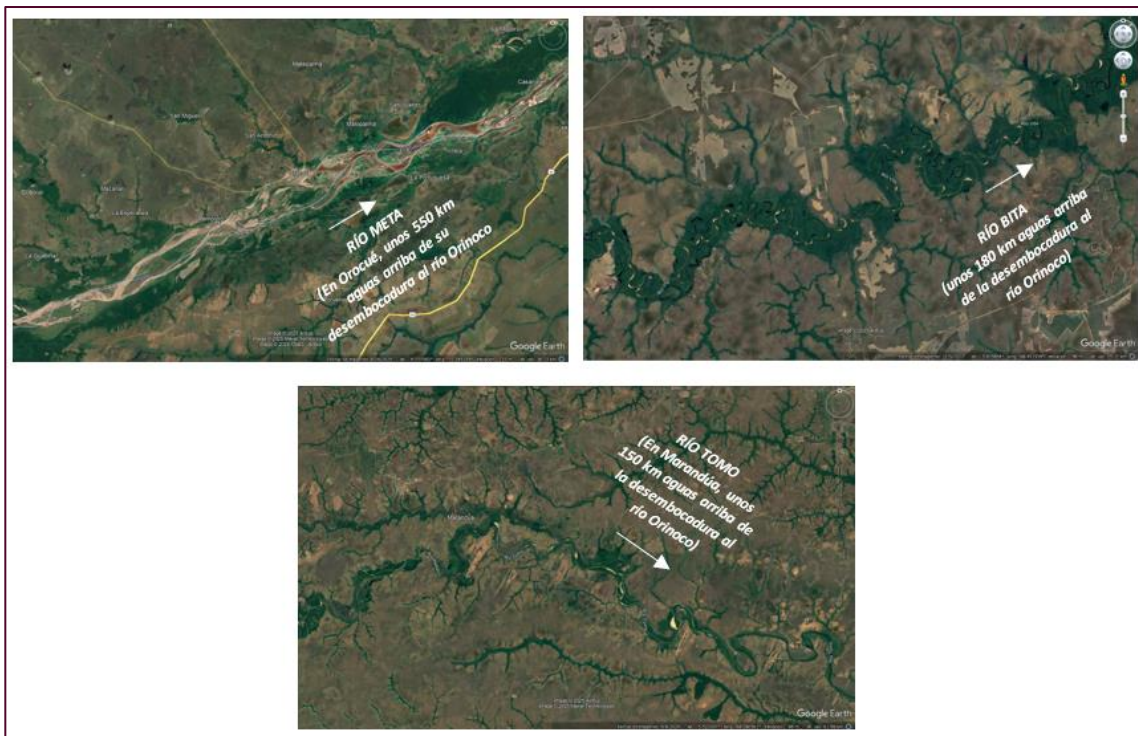
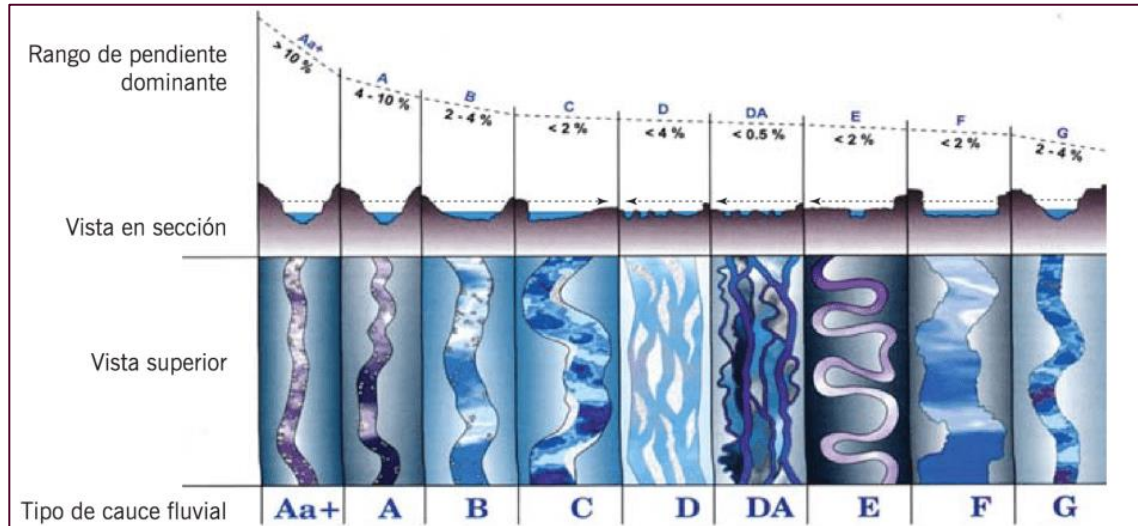


ILUSTRACIÓN 7: CLASIFICACIÓN DE RÍOS DE ROSGEN, D. (1996) Y SU EVIDENCIA EN LOS RÍOS META, BITA Y TOMO

Con la formulación de Manning, y asumiendo una sección rectangular del cauce, es posible construir la siguiente tabla. En ella se presenta la velocidad media de la corriente para distintos anchos, profundidades y pendientes del río, todas dentro de los rangos previamente descritos.

Ancho, b (m)	100	400	1000	100	400	1000	100	400	1000
Profundidad, y (m)	2	2	2	3	3	3	4	4	4
Área, A (m ²)	200	800	2000	300	1200	3000	400	1600	4000
Perímetro, P (m)	104	404	1004	106	406	1006	108	408	1008
Radio hidráulico, Rh (m)	1.92	1.98	1.99	2.83	2.96	2.98	3.70	3.92	3.97
Rugosidad de Manning, n	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Pendiente longitudinal, S	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%	0.008%
Velocidad, V (m/s)	0.40	0.40	0.40	0.51	0.53	0.53	0.61	0.64	0.64
Ancho, b (m)	100	400	1000	100	400	1000	100	400	1000
Profundidad, y (m)	2	2	2	3	3	3	4	4	4
Área, A (m ²)	200	800	2000	300	1200	3000	400	1600	4000
Perímetro, P (m)	104	404	1004	106	406	1006	108	408	1008
Radio hidráulico, Rh (m)	1.92	1.98	1.99	2.83	2.96	2.98	3.70	3.92	3.97
Rugosidad de Manning, n	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Pendiente longitudinal, S	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%	0.009%
Velocidad, V (m/s)	0.42	0.43	0.43	0.54	0.56	0.56	0.65	0.67	0.68
Ancho, b (m)	100	400	1000	100	400	1000	100	400	1000
Profundidad, y (m)	2	2	2	3	3	3	4	4	4
Área, A (m ²)	200	800	2000	300	1200	3000	400	1600	4000
Perímetro, P (m)	104	404	1004	106	406	1006	108	408	1008
Radio hidráulico, Rh (m)	1.92	1.98	1.99	2.83	2.96	2.98	3.70	3.92	3.97
Rugosidad de Manning, n	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Pendiente longitudinal, S	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%
Velocidad, V (m/s)	0.44	0.45	0.45	0.57	0.59	0.59	0.68	0.71	0.72
Ancho, b (m)	100	400	1000	100	400	1000	100	400	1000
Profundidad, y (m)	2	2	2	3	3	3	4	4	4
Área, A (m ²)	200	800	2000	300	1200	3000	400	1600	4000
Perímetro, P (m)	104	404	1004	106	406	1006	108	408	1008
Radio hidráulico, Rh (m)	1.92	1.98	1.99	2.83	2.96	2.98	3.70	3.92	3.97
Rugosidad de Manning, n	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Pendiente longitudinal, S	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%	0.011%
Velocidad, V (m/s)	0.46	0.47	0.47	0.60	0.62	0.62	0.72	0.75	0.75

ILUSTRACIÓN 8: CÁLCULO DE LA VELOCIDAD MEDIA DE LOS RÍOS EN LA ORINOQUÍA Y AMAZONÍA COLOMBIANA

Se observa que, en todos los casos, la velocidad media del agua no supera los 0,75 m/s. Esto se debe a la existencia de una velocidad de equilibrio en los ríos con márgenes erosionables. Cuando la velocidad del flujo aumenta, se produce erosión en las márgenes, ampliando la sección transversal y reduciendo consecuentemente la velocidad. Por el contrario, si la velocidad disminuye, ocurre sedimentación de las partículas en suspensión, lo que reduce el área de la sección y provoca un incremento en la velocidad del flujo.

Este comportamiento se ilustra claramente en la siguiente figura, que relaciona el diámetro medio de los sedimentos del lecho y las márgenes del río (en milímetros) con la velocidad del flujo (en centímetros por segundo).

Se puede observar que, para arcillas (clay), existe una velocidad umbral a partir de la cual comienza la erosión de las márgenes, alrededor de 1,2 m/s. En el caso de limos (silt) y arenas

[sand], dicho umbral es considerablemente menor, mientras que, para gravas, material no predominante en los ríos analizados, la velocidad crítica es significativamente mayor.

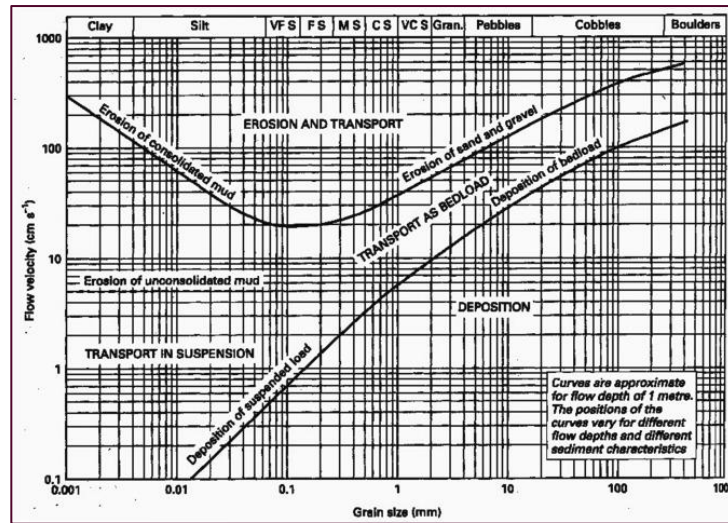


ILUSTRACIÓN 9: RELACIÓN DEL DIÁMETRO DEL SEDIMENTO DE LAS MÁRGENES DE UN RÍO Y LAS VELOCIDADES DEL FLUJO

Este comportamiento dinámico explica por qué estos ríos se encuentran en un constante proceso de cambio, tanto en su forma en planta como en su sección transversal, adoptando las morfologías mostradas en la Ilustración 10.

Exceptuando los casos en los que existen controles estructurales rocosos presentes en algunos ríos de la Orinoquía colombiana, el comportamiento general observado corresponde a velocidades del agua bajas o muy bajas (inferiores a 0,75 m/s). Este mismo patrón se presenta también en los ríos de la región amazónica, caracterizados por pendientes suaves y dinámica fluvial predominantemente meándrica o anastomosada.

4.4. Análisis de la aplicabilidad de las turbinas hidro cinéticas en los ríos de la Orinoquía y la Amazonía colombianas - Variable velocidad

Se han utilizado referencias tanto para turbinas de flujo axial como de flujo cruzado. Se realizó una búsqueda y análisis de bibliografía científica, así como de datos de prototipos y turbinas hidro cinéticas comerciales con capacidades acordes al abastecimiento de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas (ZNI) consideradas en el presente contrato. El objetivo fue evaluar la velocidad del agua necesaria para el adecuado funcionamiento de este tipo de tecnologías.

A continuación, se presenta una breve descripción de la información recopilada, que incluye referencias tanto de turbinas de flujo axial como de flujo cruzado.

- **Revisión de bibliografía científica**

- Singal, S.K. et al. (2023): "...it becomes clear that the energy obtained from hydrokinetic turbines depends strongly on the speed of the stream and that


installation of hydrokinetic turbines is not cost-effective if the current speed is less than 1-1.5 m/s”.

• **Prototipos**

- E. Chica et al. (2025): “Three blades of a 1 Hp (746 W) prototype hydrokinetic turbine were designed for a water velocity of 1.5 m/s with a tip speed ratio of 6.325, an angle of attack of 5o and 0o as the pitch angle; in order to obtain the maximum power coefficient of the turbine”.
- Gohil, P.P. et al. (2025) “A Savonius-type HK turbine can generate energy from low-velocity magnitudes of around 0.5 m/s..”.


• **Turbinas comerciales**

- Evolution™ series Evo5 (5 kW), Evo10 (10 kW) and Evo25 (25 kW) turbines of Hydrokinetic Power Generation (<https://www.hpgs.ca/>).



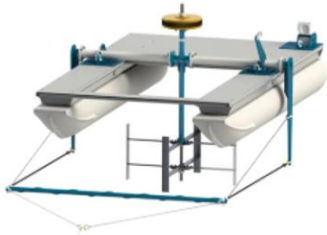
Turbine Characteristics	Evo5	Evo10	Evo25
Rated Power	5kW	10kW	25kW
Rated water speed	1.6m/s *	2m/s *	2.7m/s *
Start-up water speed	0.7m/s	0.7m/s	1m/s
Cut out water speed	2m/s *	2.4m/s *	3.0m/s *
Diameter of rotor (Standard)	3m *	3m *	3m *
Height of rotor (Standard)	2m *	2m *	2m *
RPM at Rated Power	25rpm	30rpm	45rpm

- 3kW and 12 kW turbines of GKinetic Energy (<https://www.gkinetic.com/>)



Rated Power [kW]	3kW	12kW
Min water depth for operation [metres]	0.5 m	1.4 m
Min draft for floating [metres]	0.7 m	1.9 m
Rated Speed for max output [metres per second, m/s]	2.2 m/s	2.2 m/s
Cut-in speed [m/s]	0.6 m/s	0.6 m/s
Cut-out speed [m/s]	2.5 m/s	3.3 m/s
Weight [ton]	0.25	2
	3kW Brochure	12kW Brochure

- o EVG-005 (5 kW) and EVG-025 (25 kW) turbines of New Energy Corp. (<https://www.newenergycorp.ca/about-the-tech>)



Performance Characteristics


Power Output: 5kW at 3m/s

Maximum Flow Velocity: 3.5m/s

Minimum Flow Velocity: 1.5 m/s

Minimum Operating Depths: 1.25m (fixed) and 1.4m (floating)

EVG-005



Performance Characteristics

Power Output: 25kW at 3m/s

Maximum Flow Velocity: 3.5m/s

Minimum Flow Velocity: 1.5 m/s

Minimum Operating Depths: 3m (fixed) and 3.4m (floating)

EVG-025

- o Smart MonoFloat (5 kW) and Smart FreeStream (5kW) of Smart Hydro Power (<https://www.smart-hydro.de/es/>)

One diving float
submerges to avoid debris when the water flow speed increases

Debris protection
stainless steel cables are carefully designed such that debris neither accumulates nor damages the blades

Rotor
slightly curved blades improve performance against debris

Diffuser
protects the generator and increases water velocity when passing through it

5 kW underwater generator
permanent-magnet generator provides three-phase AC power

Output	250 – 5000 W
Dimensions	Length: 3130 mm Width: 1600 mm Height: 2010 mm
Rotational speed	90 – 230 rpm
Weight	380 kg
Number of rotor blades	3
Rotor ø	1000 mm

Specifications:

- The permanent magnet underwater generator provides AC power
- Dives when water level rises
- Especially suitable for waters with heavy debris
- Expandable system with multiple turbines
- Available as an off-grid solution, grid-connected and hybrid version
- Scope of delivery and specifications can be adapted to special projects
- **Max. power output at 2.8 m/s**

Debris protection
stainless steel cables are carefully designed such that debris neither accumulates nor damages the blades

Rotor
slightly curved blades improve performance against debris

5 kW underwater generator
permanent-magnet generator provides three-phase AC power

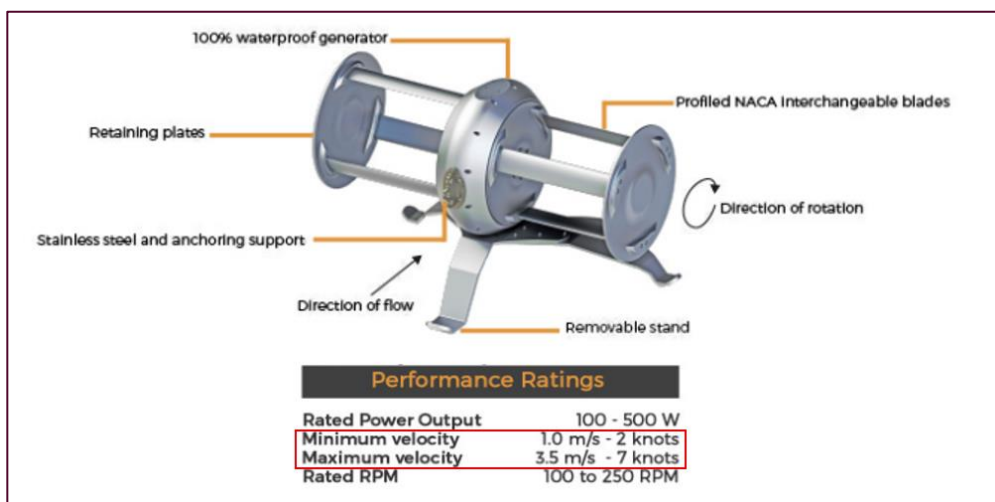
TECHNICAL SPECIFICATIONS

Output	250 – 5000 W
Dimensions	Length: 2640 mm Width: 1120 mm Height: 1120 mm
Rotational speed	90 – 230 rpm
Weight	300 kg
Number of rotor blades	3
Rotor ø	1000 mm

Specifications:

- The permanent-magnet underwater generator provides AC power
- Expandable system with multiple turbines
- Available as an off-grid solution, grid-connected and hybrid version
- Scope of delivery and specifications can be adapted to special projects
- **Max. power output at 3.1 m/s**
- 1 turbine placed on the bottom of the river/canal

- o Riverlution Turbine (100 W - 500 W) of Idenergie (<https://idenergie.ca/es/apropos/>)



Se anexan las especificaciones técnicas de algunas de estas THC's comerciales. La tabla siguiente muestra el resumen de estos datos:

Fuente	Potencia (kW)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad nominal (m/s)
Singal, S.K. <i>et al.</i> (2023)	N.A.	1.0	N.D.	N.D.
E. Chica <i>et al.</i> (2015)	0.746	1.5	N.D.	N.D.
Gohil, P.P. <i>et al.</i>	N.D.	0.5	N.D.	N.D.
Hydrokinetic Power Generation	5	0.7	2.0	1.6
Hydrokinetic Power Generation	10	0.7	2.4	2.0
Hydrokinetic Power Generation	25	1.0	3.0	2.7
GKinetic Energy	3	0.6	2.5	2.2
GKinetic Energy	12	0.6	3.3	2.2
New Energy Corp.	5	1.5	3.5	3.0
New Energy Corp.	25	1.5	3.5	3.0
Smart Hydro Power	0.25-5	1.0	2.8	N.D.
Smart Hydro Power	0.25-5	1.0	3.1	N.D.
Idenergie	0.1-0.5	1.0	3.5	N.D.

ILUSTRACIÓN 10: POTENCIA Y VELOCIDADES DE LAS THC'S ANALIZADAS

Toda la información recopilada y analizada permite concluir que la velocidad mínima del flujo de agua necesaria para iniciar el funcionamiento de una turbina hidro cinética (THC) es de aproximadamente 0,6 m/s en el mejor de los casos, aunque algunos prototipos experimentales han logrado operar desde 0,5 m/s, con eficiencias muy bajas. En contraste, la velocidad nominal de operación de las THC's comerciales se encuentra en el rango de 1,6 a 2,7 m/s. De hecho, diversos estudios coinciden en señalar que velocidades inferiores a 1,5 m/s hacen inviable la aplicación de esta tecnología.

Los resultados son consistentes para ambos tipos de turbinas hidro cinéticas, tanto de flujo axial como de flujo cruzado, y no dependen significativamente del tamaño dentro del rango analizado (0,1–25 kW). En consecuencia, se concluye que las THCs no son aplicables en ríos con velocidades medias inferiores a 1,5 m/s, siendo deseable contar con valores del orden de 2,2 m/s para un desempeño eficiente. Ninguno de los ríos de la Orinoquía ni de la Amazonía colombianas alcanza tales velocidades.

Un análisis inverso indica que dichas velocidades solo se presentan en ríos con pendientes longitudinales superiores al 0,25%.

Por último, aunque es cierto que la velocidad del agua puede incrementarse artificialmente mediante canalizaciones tipo Venturi o desviaciones controladas del flujo, estas soluciones implican un aumento considerable en los costos de inversión, lo cual contraviene los criterios económicos definidos para el presente estudio. Un análisis más detallado sobre este aspecto puede consultarse en Patel et al. (2018).

4.5. Análisis de la aplicabilidad de las turbinas hidro cinéticas en los ríos de la Orinoquía y la Amazonía colombianas - Otras consideraciones

Más allá de la velocidad media del flujo, existen otras variables determinantes para evaluar la viabilidad de aplicación de turbinas hidro cinéticas (THCs) en los ríos de las regiones de la Orinoquía y la Amazonía colombianas. Entre ellas se destacan:

- La turbulencia del flujo.
- La profundidad de la corriente.
- La presencia de grandes sedimentos o elementos flotantes (como troncos de madera), que pueden comprometer la integridad de las instalaciones y los costos de inversión asociados.

La presencia de turbulencias reduce la velocidad efectiva del flujo incidente sobre la turbina, ya que el vector resultante de velocidad es menor al esperado en un flujo ideal o laminar. Si bien los flujos laminares son poco comunes en ambientes naturales, es recomendable seleccionar zonas con baja turbulencia o con velocidades relativamente homogéneas en la sección transversal del cauce. Este tipo de condiciones suelen encontrarse en tramos rectos de los ríos; sin embargo, como se explicó en el Apartado 3 y se muestra en la ilustración 9, resulta difícil identificar segmentos estables y poco dinámicos en los ríos de estas regiones, caracterizados por su alta movilidad morfológica.

En cuanto a la profundidad, los fabricantes de THCs establecen valores mínimos operativos de entre 1,5 m y 2,0 m, según las especificaciones técnicas revisadas y el tamaño de los equipos. No obstante, durante ciertas épocas del año, algunos ríos de la Orinoquía no alcanzan dichas profundidades, lo que limita su aplicabilidad.

Respecto al material en suspensión y elementos flotantes, aunque los ríos de estas regiones suelen presentar aguas relativamente limpias, ocasionalmente pueden transportar troncos, ramas y otros residuos vegetales, que podrían dañar las turbinas o interferir en su funcionamiento. Sin embargo, existen rejillas y sistemas de protección diseñados para minimizar este riesgo.



ILUSTRACIÓN 11: ACUMULACIÓN DE RAMAS Y HOJAS EN INSTALACIONES DE THCS

Los costos de inversión de estas instalaciones son altos. Kirke, B. (2024) hizo un ejercicio de recopilar los costos de los equipos de generación de diferentes THCs comerciales. La tabla siguiente los muestra.

Compañía	Equipos	Potencia (kW)	Precio (USD)	Precio (USD/kW)
New Energy Corp Canada	Vertical axis turbine, complete off-grid system, 5 kW in 3 m/s current	5	50,000	10,000
	Free Stream Turbine, Generator, structure incl. Debris protection, anchoring cables, and 50 m electrical cable			
Smart Hydro Germany	Off-grid electrical cabinet, inverter & dump load	5	32,900	6,580
	Grid-connected inverter, controller, dump load, and fuse box)			
Smart Hydro Germany	10 kWh, 48 V battery bank			
	Monofloat Turbine, Generator, shroud, debris protection, float, side anchoring set, anchor buoy set, 50 m electrical cable			
	Off-grid electrical cabinet, inverter & dump load	5	35,242	7,048
	Grid-connected inverter, controller, dump load, and fuse box			
New Energetics USA.	1 kW for flows up to 1.2 m/s. One-speed motor, 1-phase or 3-phase output. Plug-in ready	1	8,500	8,500
	5 kW for flows up to 2 m/s. Two-speed motor, 1-phase or 3-phase output. Plug-in ready	5	13,500	2,700
	10 kW for flows up to 2.5 m/s. Two-speed motor, 1-phase or 3-phase output.	10	20,000	2,000
Idenergie	500 W in 3 m/s flow	0.5	10,000	20,000
Greenenergy Hydrocat	183 W in 1 m/s	0.183	16,600	90,710
	40 kW in 3 m/s	40	75,000	1,875
Promedio				16,602

ILUSTRACIÓN 12: COSTO DE DIFERENTES EQUIPOS DE GENERACIÓN DE THCS. FUENTE: KIRKE, B. (2024)

Los costos de la tabla anterior se refieren al suministro en fábrica de los equipos de generación y, por ende, son sólo una parte (un 50%) de lo que requiere una instalación de este tipo. Esos costos pueden representar un valor 6 veces mayor que el de una central hidroeléctrica que aprovecha la energía potencial del mismo tamaño. El mismo autor propone un nuevo modelo que puede disminuir sustancialmente los costos de fabricación, pero apenas esa propuesta está actualmente a nivel conceptual. Por lo tanto, parece ser más lógico evaluar otro tipo de tecnologías para las zonas descritas en este documento, tales como la energía solar fotovoltaica o la biomasa.

4.6. Conclusiones

El análisis técnico realizado demuestra que las turbinas hidro cinéticas (THCs) no resultan viables para la generación de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de las regiones Orinoquía y Amazonía colombianas, debido a las condiciones hidrológicas, morfológicas y económicas propias de estas áreas.

Las velocidades medias del flujo en los principales ríos de estas regiones, Meta, Bitá y Tomo, no superan los 0,75 m/s, valor muy inferior al requerido para el funcionamiento eficiente de las THCs. La información técnica recopilada indica que:

- La velocidad mínima de arranque se sitúa en torno a 0,6 m/s.
- La velocidad nominal de operación varía entre 1,6 y 2,7 m/s.
- Las condiciones óptimas se alcanzan únicamente con velocidades superiores a 2,0 m/s.

Dichas velocidades solo se presentan en ríos con pendientes longitudinales superiores al 0,25%, mientras que los ríos analizados presentan pendientes menores al 0,011%, lo que evidencia la imposibilidad física de aplicar esta tecnología en las condiciones locales. A ello se suma que, durante ciertas épocas del año, las profundidades mínimas requeridas (entre 1,5 y 2,0 m) tampoco se alcanzan, limitando aún más su factibilidad operativa.

Más allá de la velocidad, otros factores confirman esta inviabilidad: la alta turbulencia y variabilidad morfológica de los cauces, la posible presencia de material flotante (troncos, ramas y sedimentos gruesos) y, de manera especialmente relevante, los elevados costos de inversión. Estos pueden ser hasta seis veces mayores que los de pequeñas centrales hidroeléctricas convencionales que aprovechan energía potencial. Incluso sin considerar las obras complementarias, el costo de los equipos de generación por sí solo representa una inversión significativamente superior a la de otras tecnologías renovables disponibles. Por tanto, independientemente del tipo de turbina (de flujo axial o de flujo cruzado) o del tamaño analizado (0,1-25 kW), el uso de THCs no resulta económicamente razonable en estas condiciones.

Si bien es posible aumentar la velocidad del flujo de agua de forma artificial mediante canalizaciones tipo Venturi u otras soluciones hidráulicas, estas alternativas incrementan de manera sustancial los costos de implementación y mantenimiento, lo que contradice los criterios de sostenibilidad y eficiencia económica definidos para este estudio.

En consecuencia, no resulta lógico analizar la viabilidad de instalar THCs en zonas con ríos extremadamente planos, como los de la Orinoquía y Amazonía colombianas. Asimismo, las centrales hidroeléctricas convencionales que aprovechan energía potencial tampoco son viables en regiones con pendientes tan bajas.

Por todo lo anterior, se recomienda que en las Zonas No Interconectadas de la Orinoquía y Amazonía colombianas se priorice la evaluación e implementación de tecnologías alternativas, como la energía solar fotovoltaica, la biomasa o sistemas híbridos renovables, que presenten mayor viabilidad técnica, económica y ambiental para garantizar un suministro energético sostenible a las comunidades locales.

4.7. Referencias bibliográficas

- Cardona-Mancilla, C., Sierra del Río, J., Chica-Arrieta, E., & Hincapié-Zuluaga, D. (2018). Turbinas hidro cinéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 9(3), 180–197. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-08>.
- E. Chica, F. Pérez, A. Rubio-Clemente, S. Agudelo (2025). Design of a hydrokinetic turbine. *Energy and Sustainability*, VI, 137-147 doi:10.2495/ESUS150121.
- Kirke, B. (2024). Towards more cost-effective river hydrokinetic turbines. *Energy for Sustainable Development* Volume 78, February 2024, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101370>.
- P. P. Gohil, V. Patel and A. U. Mehta. Computationally Investigate Low Velocity Hydrokinetic Turbines with Variant Systems. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 769-786, 2025. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.3.2802>.
- Sunil Kumar Singal, Varun Goel, Himanshu Nautiyal, Dimitrios E. Papantonis. (2023). Chapter 5 - Elements of small hydropower: mechanical equipment. *Small Hydropower Design and Analysis*, Pages 71-152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91757-5.00006-3>.
- Vermaak, H.J., Kusakana, K. and Koko, S.P. (2014). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29(0), pp. 625–633.
- Vimal Patel, T.I. Eldho, S.V. Prabhu. Velocity and performance correction methodology for hydrokinetic turbines experimented with different geometry of the channel. *Renewable Energy*, Volume 131, February 2019, Pages 1300-1317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.027>.

5. Metodología y planificación

Esta sección presenta la metodología propuesta y el plan de implementación que guiarán la ejecución del proyecto de evaluación del potencial hidroeléctrico a pequeña escala en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia.

Comienza detallando el enfoque general y las actividades y trabajo que se realizará para el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, se expone un plan de trabajo estructurado, que abarca las principales actividades, cronograma, entregables y mecanismos de coordinación entre los equipos de trabajo y las entidades participantes (UPME, Banco Mundial y Minsait).

5.1. Metodología

El proyecto contará con 7 actividades, una primera actividad 0 con el informe de arranque y 6 actividades principales del proyecto, con sus respectivos entregables en cada una de ellas y una duración total de 15 semanas. A lo largo de cada fase, se mantendrá una estrecha colaboración

con la UPME, mediante reuniones de seguimiento, sesiones de validación y revisión conjunta de los entregables.

Este proceso garantizará la pertinencia, viabilidad y apropiación institucional de los resultados, promoviendo además una planificación energética sostenible y adaptada a las necesidades de las comunidades en las ZNI.



ILUSTRACIÓN 13: ACTIVIDADES DE LA METODOLOGÍA

5.1.1. Actividad 0: Arranque del proyecto

Objetivo: Establecer una comprensión común de los objetivos, prioridades y marco de colaboración del proyecto entre la UPME, el Banco Mundial (WBG) y el equipo del proyecto.

Actividades:

- Realizar la reunión de Kick off
- Alinear de actores: Clarificar roles y canales de comunicación
- Validar del plan del proyecto: Revisar y confirmar el plan detallado
- Comprender las necesidades estratégicas del proyecto
- Definir del enfoque estratégico
 - Identificar regiones prioritarias, tipologías tecnológicas y criterios de decisión
 - Validar del alcance y los resultados esperados de cada tarea
 - Definir del enfoque metodológico y la estructura del equipo para garantizar eficiencia, adaptabilidad y alineación con las necesidades de las partes interesadas

Entregable: Informe de arranque

5.1.2. Actividad 1: Investigación y análisis tecnológico

Objetivo: Esta actividad evalúa tecnologías PCH disponibles, analizando su eficiencia, costo y adaptación a ZNI en Colombia, e incluye referencias de implementación y estudios de caso reales.

Actividades:

- Realizar un benchmark de tecnologías de pequeñas centrales hidroeléctricas: Pelton, Francis, Turgo, PAT, Cross Flow, Kaplan y Low head
- Evaluar KPIS como (eficiencia energética, modularidad y escalabilidad, costos CAPEX, OPEX, LCOE y disponibilidad de repuestos y soporte técnico y grado de implementación real) de las tecnologías identificadas
- Definir las especificaciones técnicas y requerimientos de implementación de las tecnologías PCH, analizando:
 - Especificaciones técnicas clave: potencia, caudal y altura de operación, eficiencia y diseño del sistema
 - Requerimientos de implementación: obras civiles, integración a red o micro red, y condiciones del sitio
 - Sistemas de control y operación autónoma: compatibilidad con PLC, SCADA y reguladores de frecuencia y voltaje
 - Gestión energética en micro redes: integración con almacenamiento o sistemas híbridos (como solar) para garantizar estabilidad y calidad del suministro
- Identificar barreras y oportunidades y entregar recomendaciones estratégicas
- Analizar 2-3 casos de estudio de PCH exitosas en contextos similares a las ZNI de Colombia a través de una plantilla estandarizada, con el objetivo de sacar criterios de selección, recopilar información y sintetizar resultados, buenas prácticas, riesgos, recomendaciones etc.

Entregable: Informe sobre la investigación y análisis de tecnologías

5.1.3. Actividad 2: Metodología de dimensionamiento y costos del sistema

Objetivo: Esta actividad desarrollará una metodología contextualizada para dimensionar y estimar costos de proyectos PCH en ZNI, integrando criterios técnicos, económicos y geográficos, y generando una herramienta práctica para tomadores de decisiones y desarrolladores.

Actividades:

- Identificar todos los costos del ciclo de vida de proyectos PCH (CAPEX, OPEX y fin de vida)
- Recolectar datos sobre costos, operación, ciclo de vida de 5-7 proyectos de referencia
- Definir una estructura de costos adaptada a cada sitio, considerando accesibilidad e infraestructura: CAPEX (equipos principales, obras civiles, transporte e integración con la red o micro redes) y OPEX (mantenimiento, repuestos, mano de obra y costos de desmantelamiento y restauración)
- Comparar y validar patrones de costos de todo el ciclo de vida de los proyectos, ajustados al contexto colombiano

- Definir criterios técnicos para dimensionar los sistemas PCH en ZNI, garantizando viabilidad, confiabilidad y costos óptimos según las condiciones locales
- Desarrollar una metodología práctica y replicable para ayudar a definir configuraciones óptimas de sistemas PCH en ZNI, integrando criterios técnicos y económicos adaptados al territorio. Incluyendo:
 - Tipología de tecnología de PCH
 - Dimensionamiento de generación hidráulica según caudal, altura y estacionalidad
 - Selección de sistemas de control y operación automática
 - Evaluación de necesidades de almacenamiento energético
 - Determinación de requerimientos de micro red o conexión local
 - Modelos de estimación de CAPEX, OPEX y costos de ciclo de vida, ajustados a condiciones logísticas y laborales del contexto colombiano
- Aprobar y validar la metodología, con técnicos y expertos para verificar su viabilidad
- Consolidar un marco metodológico validado y listo para su uso en la planificación de proyectos PCH sostenibles

Entregable: Metodología de dimensionamiento y costos para tecnologías de pequeña hidroenergía en las ZNI

5.1.4. Actividad 3: Evaluación regulatoria y financiera

Objetivo: Esta actividad se centra en identificar los facilitadores y barreras regulatorias y financieras para el desarrollo de proyectos de pequeña hidroenergía en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia.

A través de un diagnóstico legal, análisis de brechas e identificación del panorama financiero, se evaluará el marco institucional y las limitaciones de acceso a financiación que afectan a los sistemas energéticos descentralizados.

El enfoque incluye la participación de actores clave y la formulación de propuestas de mejora normativa.

Actividades:

- Mapear el panorama regulatorio con una visión integral del marco regulatorio para proyectos PCH en ZNI, analizando las normas y procedimientos institucionales que los afectan (permisos y licencias, regulación tarifaria y de mercado, planificación estratégica y financiamiento)
- Identificar las brechas y barreras regulatorias que limitan la implementación de PCH en las ZNI, incluyendo permisos complejos, contratación rígida, incertidumbre legal y financiamiento obsoleto
- Obtener propuestas de mejora enfocadas en: Crear rutas regulatorias diferenciadas, Simplificar los procesos de permisos y contratación, fortalecer la coordinación

institucional y la coherencia regulatoria, asegurar incentivos equitativos y asegurar incentivos equitativos

- Evaluar los instrumentos financieros e incentivos que apoyan la pequeña hidroenergía (PCH) en las ZNI de Colombia, con el objetivo de identificar brechas, barreras y oportunidades para mejorar. Revisión de:
 - Fondos públicos como Fonenergía, FAZNI y el rol del IPSE en el financiamiento y seguimiento de proyectos
 - Fuentes complementarias: subsidios nacionales, bancos de desarrollo, donantes multilaterales, inversión privada y modelos de financiamiento comunitario
 - Desafíos de acceso, coordinación y desembolso a lo largo de las etapas del proyecto, desde la factibilidad hasta la operación
- Validar con actores clave como UPME, MME y otras instituciones a través de sesiones
- Recomendaciones validadas a corto y mediano plazo para fortalecer el entorno regulatorio y financiero de la PCH en las ZNI

Entregable: Evaluación Regulatoria y Financiera

5.1.5. Actividad 4: Desarrollado del modelo

Objetivo: El objetivo principal es desarrollar una herramienta de apoyo a decisiones, integrada en una plataforma GIS, que permita evaluar y priorizar el potencial hidroeléctrico en las ZNI, combinando variables ambientales, sociales, técnicas y económicas.

Actividades:

- En base a los resultados de las actividades previas, se definirán las variables clave, en base a:
 - Ambientales: caudal, pendiente, clima, uso del suelo, áreas protegidas
 - Sociales: población, comunidades étnicas, aceptación social, accesibilidad
 - Técnicas: cercanía a centros de demanda, compatibilidad tecnológica, disponibilidad de infraestructura
 - Económicas: CAPEX/OPEX, incentivos, LCOE, retorno de inversión
- Definir los criterios de selección en base a asignación de pesos, puntuaciones y normalización de sitios, ranking de viabilidad etc.
- Crear un índice que permita priorizar los sitios con mayor potencial de implementación.
- Recolectar información a través de una base de datos con los 4 bloques de variables definidos, para posteriormente alimentar el modelo.
- Con las variables definidas y los datos estructurados, se procederá a crear un modelo interactivo y un algoritmo de soporte a decisiones para priorizar proyectos de PCH en las

ZNI de Colombia. Reunirá la base de datos, calculará el potencial hidroeléctrico en base al índice de priorización calculado y generará Ranking de sitios prioritarios.

- Integrar el modelo en una herramienta GIS para que sea más visual y accesible y se pueda visualizar el potencial hidroeléctrico a través de capas integradas (hidrografía, topografía, precipitación, límites administrativos, infraestructura, áreas protegidas y datos socio energéticos).
- Realizar una prueba piloto en 2–3 regiones representativas (como Chocó, Amazonía u Orinoquía), para ajustar parámetros, evaluar métricas, ajustar la precisión y funcionalidad.

Entregable: Modelo desarrollado

5.1.6. Actividad 5: Fortalecimiento de capacidades

Objetivo: Esta actividad se centra en garantizar la transferencia efectiva de conocimientos y herramientas desarrolladas a lo largo del proyecto hacia la UPME y los actores relevantes.

Actividades:

- Evaluación de las necesidades de capacitación: Se identificará el público objetivo (UPME y otras instituciones relevantes)
- Brechas de conocimiento existentes de dicho público objetivo, relacionadas con las tecnologías hidroeléctricas, el dimensionamiento de sistemas, el análisis de costos y los marcos regulatorios
- Los formatos preferidos y los niveles de detalle técnico para los módulos de capacitación
- Diseñar un programa de capacitación estructurado con 3 sesiones de capacitación, para el público objetivo. Dicho programa incluirá:
 - Presentación de las tecnologías de pequeña hidroenergía y metodologías (identificadas en la actividad 1 y 2)
 - Explicación del modelo desarrollado y como interpretar los datos
 - Aspectos regulatorios y de financiamiento (identificadas en la actividad 3)
- Ejecutar las 3 sesiones en jornadas de 1 día entero. Estas sesiones serán de forma virtual y tendrán la siguiente estructura:
 - Presentación del proyecto
 - Explicación de las tecnologías de pequeña hidroenergía y metodologías
 - Explicación del modelo desarrollado a través de:
 - Ejercicios prácticos y uso guiado de las herramientas de apoyo a la decisión
 - Estudios de caso, análisis de escenarios y simulaciones de modelos guiadas
 - Discusión en grupo y segmentos de preguntas y respuestas (Q&A)

- Aplicaciones prácticas de los conceptos a escenarios de proyectos reales o hipotéticos
- Compartir los materiales de capacitación

Entregable: Sesiones de capacitación y fortalecimiento de capacidades + Materiales formativos

5.1.7. Actividad 6: Informe final

Objetivo: El objetivo de esta actividad final es consolidar y presentar los resultados, hallazgos y recomendaciones derivados de todas las actividades previas del proyecto de manera clara, completa y accionable.

Actividades:

- Recoger en un informe consolidando los resultados, hallazgos y recomendaciones de todas las actividades desarrolladas a lo largo del proyecto, para que sirva como toma de decisiones futuras por parte de actores institucionales y como referencia técnica. Además, incluirá unas conclusiones del proyecto.

Entregable: Informe final (español e inglés)

5.2. Entregables

Esta sección presenta los entregables claves que se desarrollarán y presentarán a lo largo de la ejecución del proyecto. Cada entregable está asociado a cada una de las diferentes actividades del proyecto y alineados con las necesidades de la UPME y los objetivos del proyecto.

A continuación, se estructuran y describen los diferentes informes y entregables que se desarrollarán a lo largo del proyecto, cada uno alineado con las actividades metodológicas definidas y con los hitos de validación acordados con la UPME y el WBG.

- **Informe de arranque** – Formato: Microsoft Word

El Informe de Inicio consolida el análisis del alcance y las necesidades estratégicas. Sirve como base para la ejecución del proyecto y la validación del alcance con la UPME y el WBG.

- **Informe sobre la investigación y análisis de tecnologías** – Formato: Microsoft Word

Este entregable presenta un análisis comparativo de tecnologías PCH disponibles comercialmente, evaluando su eficiencia, costos, mantenimiento y grado de implementación en contextos similares a las ZNI de Colombia. Incluye la definición de especificaciones técnicas y requisitos de implementación, así como casos de estudio que validan la metodología y entregan recomendaciones para su aplicación en el país.

- **Metodología de dimensionamiento y costos para tecnologías de pequeña hidroenergía en las ZNI** – Formato: Microsoft Word

Este entregable desarrolla una metodología contextualizada y replicable para el dimensionamiento y estimación de costos de proyectos PCH en ZNI, integrando criterios

técnicos, económicos y geográficos. Incluye la identificación de componentes de costos [CAPEX, OPEX y ciclo de vida], la definición de parámetros de diseño e implementación, y el desarrollo de un modelo metodológico para la configuración óptima del sistema. La metodología será validada mediante casos representativos y expertos del sector, consolidando un informe que sirva para la planificación y toma de decisiones en el desarrollo de proyectos PCH en Colombia.

- **Evaluación regulatoria y financiera** – Formato: Microsoft Word

Este entregable presenta un análisis integral del marco regulatorio y financiero que afecta el desarrollo de proyectos PCH en ZNI.

Incluye el mapeo de normas, permisos y vacíos institucionales, la identificación de brechas regulatorias y propuestas de mejora, y una evaluación de mecanismos de financiación, subsidios e incentivos públicos y privados. Además, incluye recomendaciones a corto medio plazo para fortalecer el entorno regulatorio y financiero de las PCH en ZNI.

- **Modelo desarrollado**

Se entregará el modelo desarrollado y un manual donde explicará su funcionamiento, variables aplicadas, así como distintos escenarios probados.

- **Material sesiones de capacitación** – Formato: Microsoft Word

Se realizarán 3 sesiones para la transferencia del conocimiento de las actividades anteriores, incluyendo ejercicios prácticos, estudios de casos y explicación del modelo desarrollado.

Este entregable incluye los materiales formativos que se mostrarán durante las sesiones.

- **Informe final** – Formato: Microsoft Word

El entregable consolidará los resultados, hallazgos y recomendaciones obtenidos a lo largo del proyecto, integrando los productos de todas las actividades previas.

El documento se entregará en versiones en español e inglés, acompañado de una presentación ejecutiva con los principales resultados y conclusiones del proyecto.

5.3. Planificación

Se presenta la planificación detallada del proyecto, incluyendo la duración estimada de cada actividad y sus tareas asociadas, así como el calendario de reuniones acordadas para seguimiento y validación de entregables. Adicionalmente, se deja constancia de que podrán programarse reuniones técnicas complementarias en caso de ser necesarias para facilitar la coordinación operativa y asegurar la correcta ejecución del proyecto.

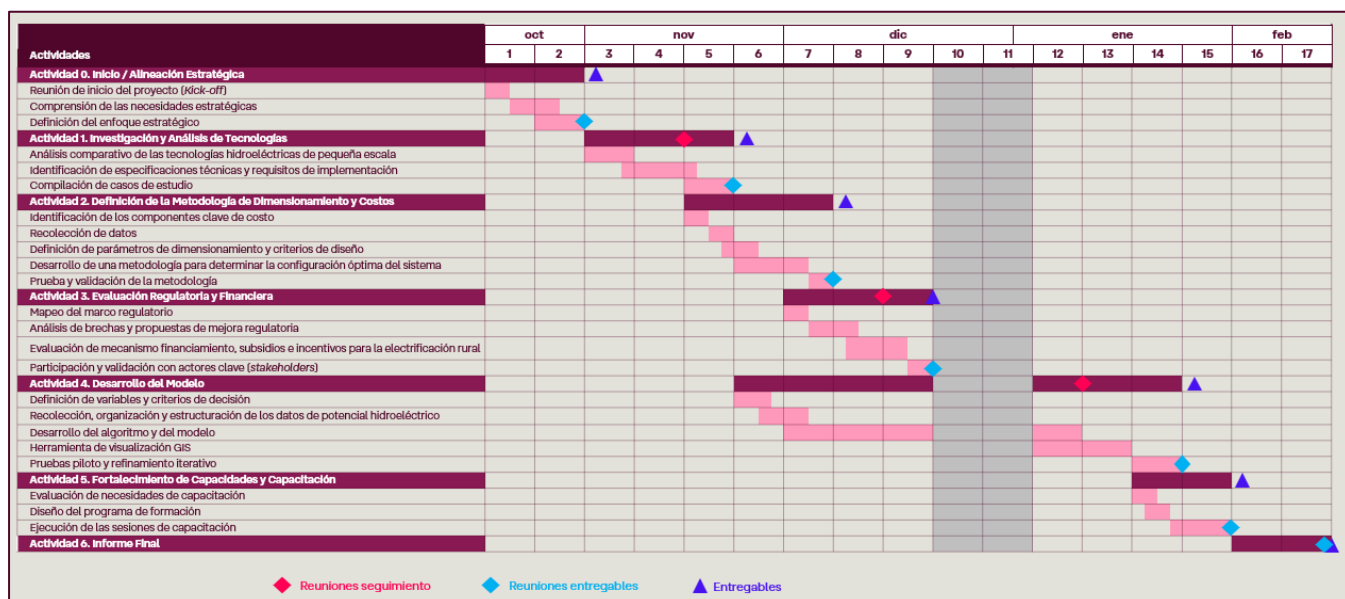


ILUSTRACIÓN 14: PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

El cronograma presentado a continuación muestra la planificación temporal de las actividades del proyecto, incluyendo la ejecución técnica, los hitos de validación y los espacios de coordinación establecidos con la UPME y el WBG. La planificación incorpora diferentes tipos de reuniones y momentos clave de revisión, representados mediante la siguiente codificación visual:

- **Reuniones de entrega de entregables:** Las reuniones de entrega de entregables, representadas en el cronograma con un **rombo rosa**, marcan los hitos clave de presentación formal de los entregables del proyecto. Estas sesiones tienen como objetivo **validar los avances técnicos y los resultados obtenidos** junto con las contrapartes institucionales antes de su cierre definitivo. En particular:
 - Presentación formal del entregable: El equipo expone los resultados, metodología y conclusiones asociadas a cada actividad.
 - Revisión y validación técnica: La UPME y el WBG analizan los contenidos presentados, verificando su coherencia con los objetivos y alcances definidos.
 - Recogida de observaciones: Se registran los comentarios, recomendaciones y ajustes propuestos por las partes interesadas.
 - Cierre y pasos siguientes: Se definen las acciones necesarias para la versión final del entregable y su validación posterior.

Este esquema asegura una **comunicación transparente y validación progresiva**, consolidando la calidad técnica y la alineación institucional a lo largo del proyecto.

- **Entrega del entregable:** Las entregas del proyecto están representadas en el cronograma mediante un **triángulo lila**, ubicado unos días después de la reunión de presentación del entregable. Estas instancias permiten mantener un flujo de trabajo estructurado y colaborativo entre las partes. En particular:

- Incorporación de ajustes: Se reserva un periodo posterior a la reunión de entrega para integrar los comentarios y observaciones recibidas por la UPME y el WBG.
 - Revisión institucional: Ambas entidades dispondrán de una semana de revisión tras cada entrega formal para realizar un análisis detallado del producto y emitir observaciones finales.
 - Validación final: El equipo de trabajo integrará las observaciones acordadas, consolidando la versión definitiva del entregable.
 - Aseguramiento de calidad: Este proceso garantiza la coherencia técnica, la alineación con los objetivos del proyecto y la trazabilidad de los cambios realizados.
- **Reuniones de seguimiento mensual:** Con el fin de mantener una supervisión continua y garantizar el cumplimiento de la planificación del proyecto, se realizarán reuniones de seguimiento mensual, identificadas en el cronograma con un **rombo azul claro**, en las que participarán representantes de la **UPME**, el **WBG** y el **equipo de trabajo**.

El propósito de estas reuniones es:

- Revisar el avance operativo de las actividades y verificar el cumplimiento de los hitos establecidos.
- Analizar posibles desviaciones respecto al cronograma o alcance, proponiendo medidas correctivas oportunas.
- Identificar necesidades de información o coordinación entre las distintas partes involucradas.
- Abordar dificultades emergentes y evaluar su impacto sobre la ejecución técnica y temporal del proyecto.
- Definir las acciones previstas para el siguiente periodo, asignando responsables y fechas de cumplimiento.

Este esquema de seguimiento favorecerá una **gestión transparente y colaborativa**, asegurando la alineación continua entre las partes y la resolución ágil de posibles incidencias.



ILUSTRACIÓN 15: ILUSTRATIVO REUNIÓN DE SEGUIMIENTO

Asimismo, se han bloqueado en gris **dos semanas** correspondientes al periodo de receso de Navidad, durante el cual no se prevé actividad técnica ni coordinación operativa, ajustando el calendario a la disponibilidad institucional.

Tras esta planificación visual, se incluirá una tabla resumen de reuniones programadas, detallando para cada una su propósito, participantes esperados y entregables asociados. Si bien se establece una estructura base de seguimiento, se mantiene la flexibilidad para ajustar fechas según el avance real del proyecto y convocar reuniones ad hoc cuando sea necesario para facilitar la toma de decisiones o resolver aspectos técnicos específicos.

Fecha	Título de la reunión	Entregable	Objetivo	Duración	Participantes
16 oct	Kick-Off	-	Reunión inicial del proyecto para alinear los principales objetivos, responsabilidades de los participantes y alcance	1 Hora	WBG + UPME + Minsait
30 oct	Entregable	Fase de inicio	Presentar el informe de arranque del proyecto	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
13 nov	Seguimiento	-	Reunión de seguimiento mensual, para ver el avance de planificación, posibles desvíos, dificultades que puedan haber surgido, próximas acciones etc.	1 Hora	WBG + UPME + Minsait
20 nov	Entregable	Análisis y investigación	Presentar el informe sobre la investigación y el análisis de tecnologías de energía hidroeléctrica a pequeña escala	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
04 dic	Entregable	Metodología de dimensionamiento del sistema y costos para tecnologías	Presentar la metodología de dimensionamiento del sistema y costos para tecnologías de energía hidroeléctrica a pequeña escala	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
11 dic	Seguimiento	-	Reunión de seguimiento mensual, para ver el avance de planificación, posibles desvíos, dificultades que puedan haber surgido, próximas acciones etc.	1 Hora	WBG + UPME + Minsait
18 dic	Entregable	Evaluación regulatoria y financiera	Presentar y validar los resultados de la evaluación regulatoria y financiera, incluyendo el análisis de brechas y las propuestas de mejora	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
08 ene	Seguimiento	-	Reunión de seguimiento mensual, para ver el avance de planificación, posibles desvíos, dificultades que puedan haber surgido, próximas acciones etc.	1 Hora	WBG + UPME + Minsait
22 ene	Entregable	Desarrollo del modelo	Sesión para presentar el modelo construido	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
29 ene	Entregable	Resultados de las formaciones	Presentar en resultado obtenido de las formaciones realizadas y entregar los materiales formativos	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait
12 feb	Entregable	Informe Final	Presentar y validar el reporte final y cerrar el proyecto	1,5 horas	WBG + UPME + Minsait

Además, se incluye un listado con las fechas de entrega de los entregables, los cuales serán pocos días después de las reuniones de entregables, para poder hacer ajustes en el contenido tras las sesiones.

Entregable	Fecha de entrega
Informe de arranque	30 octubre
Informe sobre la investigación y análisis de tecnologías	24 noviembre
Metodología de dimensionamiento y costos para tecnologías de pequeña hidroenergía en las ZNI	8 diciembre
Evaluación regulatoria y financiera	22 diciembre
Modelo desarrollado	26 enero
Material sesiones de capacitación	2 febrero
Informe final	16 febrero

6. Primeros pasos del Proyecto

Durante la fase inicial del proyecto se llevarán a cabo una serie de acciones clave orientadas a consolidar el entendimiento común del alcance y a preparar las primeras tareas técnicas. Estas actividades permitirán asegurar la alineación entre las partes y sentar las bases metodológicas para el desarrollo del proyecto.

- Se acordará el alcance definitivo del estudio, definiendo los criterios de delimitación en términos de población objetivo, demanda energética y zonas de análisis, con el fin de garantizar que los resultados sean representativos y aplicables al contexto de las Zonas No Interconectadas (ZNI).
- La UPME, como entidad beneficiaria, compartirá la documentación existente relativa a metodologías e investigaciones sobre modelos de cobertura y potencial hidroeléctrico, así como casos de estudio de proyectos eléctricos previamente desarrollados en zonas interconectadas de Colombia. Estos insumos servirán como referencia comparativa para adaptar los tamaños, costos y metodologías al contexto de las ZNI.
- El equipo de Minsait, iniciará la recolección de información técnica sobre tecnologías hidroeléctricas a pequeña escala, con el objetivo de comenzar el análisis comparativo (benchmark) contemplado en la Actividad 1. Este trabajo incluirá la evaluación de soluciones costo-eficientes basadas en el Atlas de Potencial Eléctrico a Pequeña Escala, identificando las tecnologías más adecuadas para su aplicación en las ZNI colombianas.

Estas acciones iniciales garantizarán una comprensión compartida del proyecto y una base técnica sólida para el desarrollo posterior de las actividades.

7. Stakeholders

Los actores clave de este proyecto incluyen todas las entidades e instituciones que se verán afectadas, tienen interés o desempeñan un rol directo en la implementación exitosa de la evaluación del potencial hidroeléctrico a pequeña escala en zonas no interconectadas.

La participación de estos actores es fundamental para garantizar la alineación institucional, facilitar el acceso a la información técnica y asegurar la futura viabilidad de los proyectos identificados.

Los principales stakeholders involucrados son:

- **World Bank (WBG):** Actúan como entidad financiadora y coordinadora estratégica, asegurando el cumplimiento de los objetivos de desarrollo y la coherencia con las políticas globales de acceso sostenible a la energía.
- **UPME – Unidad de Planeación Minero-Energética:** Responsable de la planificación energética nacional y actor principal en la integración de los resultados del modelo dentro de la planificación oficial para ZNIs.
- **Consortio ejecutor (Minsait, Easy Hydro y ingeniería Elemental):** Equipo técnico responsable del desarrollo metodológico, modelado, análisis regulatorio y coordinación operativa con los actores institucionales.
- **IPSE – Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas:** Actor clave para el suministro de información territorial y para la validación operativa de soluciones en campo.
- **MME – Ministerio de Minas y Energía:** Órgano rector de la política energética nacional, cuya alineación normativa es crucial para la adopción de mecanismos regulatorios y financieros propuestos.
- **Autoridades Ambientales (ANLA y CARs regionales):** Responsables de la validación ambiental y los procesos de permisos simplificados para proyectos hidroeléctricos menores a 10 MW en ZNIs.
- **Comunidades locales y organizaciones sociales:** Beneficiarios finales del acceso a energía.

Asegurar canales de comunicación efectivos y participación temprana con estos actores permitirá reducir barreras institucionales, anticipar riesgos y preparar el terreno para eventuales fases de implementación piloto.

Grupo Stakeholder	Intereses / Consideraciones
World Bank (WBG) UPME (Contraparte técnica central) Consorcio ejecutor (Minsait, Easy Hydro, Ingeniería Elemental) IPSE (Zonas No Interconectadas) MME – Ministerio de Minas y Energía Autoridades Ambientales (ANLA y CARs) Comunidades locales y organizaciones sociales	Alineación con objetivos de acceso a energía y eficiencia en ejecución Recibir un modelo técnicamente sólido, aplicable a planificación oficial y validado para futura ejecución en ZNI Garantizar la ejecución metodológica del proyecto, con claridad y alineación para asegurar la adopción de los resultados esperados Disponibilidad de información territorial, aplicabilidad real en campo, enfoque en soluciones escalables para ZNI Coherencia con la política energética nacional, alineación regulatoria, escalabilidad de soluciones para transición energética Cumplimiento ambiental y viabilidad de permisos simplificados Beneficios reales, participación temprana y transparencia en los resultados

8. Modelo de gobernanza

Para garantizar la ejecución exitosa de la iniciativa de evaluación del potencial hidroeléctrico a pequeña escala, ya se han identificado las principales contrapartes institucionales, incluyendo al WBG, la UPME y las entidades técnicas participantes. En coordinación con estos actores clave, se implementará un modelo de gobernanza que permita asegurar la alineación estratégica, una toma de decisiones oportuna y una coordinación operativa efectiva durante todo el ciclo del proyecto.

Se ha definido un modelo de gobernanza de dos niveles para asegurar la alineación estratégica con las prioridades del WBG y la UPME, al mismo tiempo que se garantiza una ejecución ágil por parte del equipo de Minsait. Esta estructura separa la toma de decisiones y la orientación institucional de la coordinación operativa diaria, asegurando tanto supervisión de alto nivel como eficiencia en la ejecución.

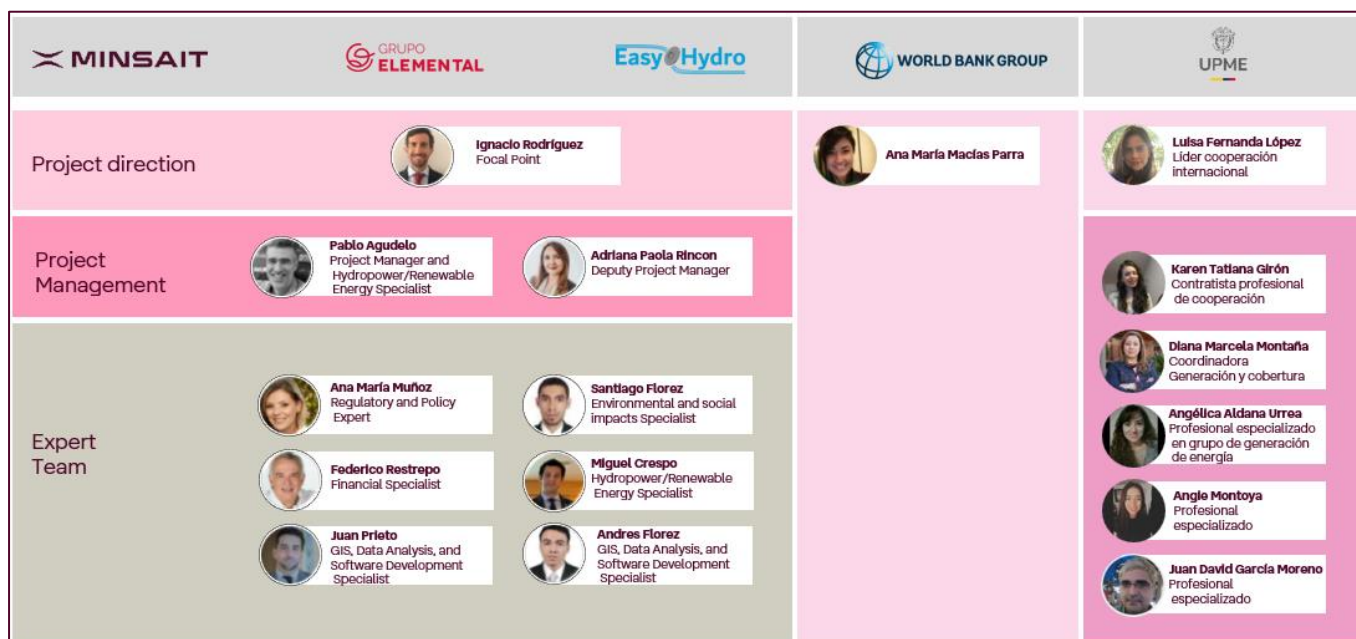


ILUSTRACIÓN 16: MODELO DE GOBIERNO

8.1. Capa de Alineación Estratégica – WBG, UPME y Dirección del Proyecto

De acuerdo con el modelo de gobernanza, en este nivel participa la líder del equipo del Banco Mundial (WBG), las contrapartes institucionales de la UPME y la dirección del proyecto. Esta capa garantiza la alineación estratégica con el alcance del proyecto y los objetivos del Banco Mundial y la UPME.

- **Orientación estratégica:** Asegura que la dirección del proyecto se mantenga alineada con la agenda de acceso a la energía de Colombia y la estrategia hidroeléctrica para las Zonas No Interconectadas.
- **Supervisión de entregables:** Revisa y valida los productos clave del proyecto, incluyendo el Informe de Inicio, la Evaluación Tecnológica, la Metodología de Costos, la Evaluación Regulatoria y Financiera, el prototipo del modelo y el Informe Final.
- **Toma de decisiones ejecutivas:** Proporciona directrices oportunas sobre cuestiones institucionales o regulatorias críticas y garantiza la coordinación entre entidades como UPME, IPSE y MME.
- **Aprobaciones ágiles:** Facilita el proceso de revisión y aprobación de entregables, promoviendo tiempos de respuesta alineados con el calendario del proyecto para evitar retrasos.

8.2. Capa de Gestión Operativa – coordinación técnica y dirección de la ejecución

Tal como se indica en la estructura de gobernanza, en este nivel participan el equipo de gestión del proyecto y los líderes técnicos de las entidades ejecutoras (Minsait, Easy Hydro e Ingeniería

Elemental], junto con los puntos focales designados por la UPME. Esta capa es responsable de la coordinación diaria y de la ejecución operativa de las actividades del proyecto, en estrecha articulación con el Comité Estratégico:

- **Supervisión de flujos de trabajo:** Garantiza que todas las actividades se ejecuten conforme al cronograma, los entregables y los estándares de calidad establecidos.
- **Monitoreo y gestión de riesgos:** Realiza seguimiento continuo del avance, identifica riesgos o bloqueos operativos y gestiona solicitudes de ajuste de manera oportuna.
- **Bucle de retroalimentación estructurado:** Establece un mecanismo sistemático para escalar observaciones operativas y aspectos críticos hacia la capa estratégica, facilitando una toma de decisiones ágil y basada en evidencia.

Al diferenciar claramente lo que debe lograrse [nivel estratégico] de cómo se ejecutará [nivel operativo], este modelo de gobernanza asegura que las prioridades del proyecto se traduzcan eficazmente en acciones, manteniendo al mismo tiempo la flexibilidad necesaria para abordar desafíos emergentes y lecciones aprendidas a lo largo del ciclo de ejecución.

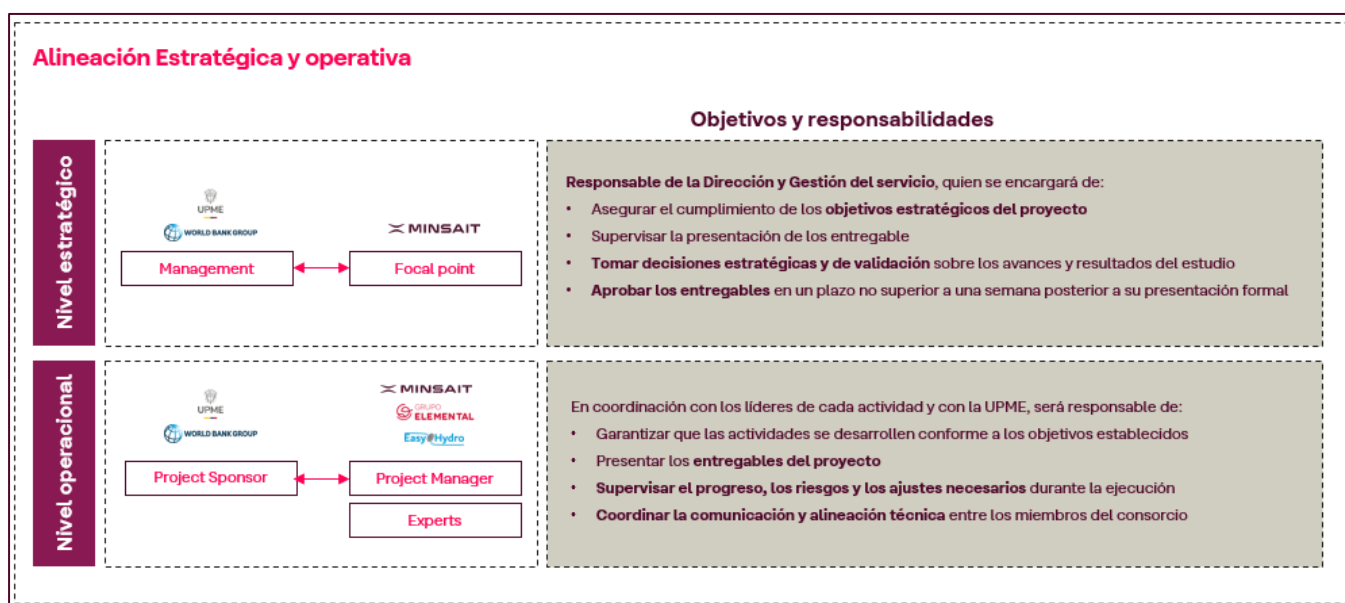


ILUSTRACIÓN 17: ESTRUCTURA DE ALINEACIÓN ESTRATÉGICA Y OPERATIVA DEL PROYECTO

9. Riesgos del proyecto

Esta sección presenta los principales riesgos del proyecto identificados hasta la fecha en relación con la participación del WBG y la UPME, particularmente aquellos que podrían afectar la disponibilidad de información, la coordinación institucional y el cumplimiento oportuno de los hitos establecidos.

Los riesgos detectados se vinculan principalmente a los tiempos de validación, el acceso a datos técnicos y la programación de reuniones con actores gubernamentales clave. Cada riesgo ha sido evaluado en términos de su impacto potencial y se acompaña de las acciones de mitigación propuestas para garantizar una ejecución fluida de las fases iniciales del proyecto.

A continuación, se presenta la matriz de riesgos junto con las medidas previstas para su mitigación.

Categoría	Riesgo	Descripción	Nivel	Plan de mitigación
Gestión/ cliente	Retrasos en la validación de entregables por parte del WBG y UPME	Los periodos de revisión y retroalimentación por parte del WBG y UPME pueden ser más largos de lo esperado, afectando el cronograma y la entrega final	Medio	Establecer un calendario con plazos de respuesta y mantener una comunicación continua a través de las reuniones de seguimiento
Técnico	Calidad o disponibilidad insuficiente de datos hidrológicos y geoespaciales	Datos incompletos o inconsistentes, pueden afectar la precisión del modelo	Bajo	Validar las fuentes de datos desde el inicio, definir estándares de calidad y realizar pruebas piloto de modelado antes del procesamiento a gran escala
Coordinación Institucional	Retrasos en la recopilación de información y dificultad para programas reuniones con instituciones clave (UPME, MME, IPSE, ANLA, etc.)	La coordinación con múltiples entidades públicas puede generar demoras en la entrega de información	Medio	Acordar un calendario de entregas y realizar reuniones de seguimiento. Apoyo por parte del WBG y UPME

La gestión de estos riesgos será un componente integrado de la gobernanza del proyecto. Para ello, se realizará un monitoreo continuo durante las reuniones de seguimiento con el WBG y la UPME, donde se evaluará el estado de cada riesgo, el grado de avance de las acciones de mitigación y la necesidad de ajustes operativos o institucionales.

Este enfoque permitirá anticipar posibles desviaciones y garantizar una toma de decisiones ágil y coordinada, especialmente en lo relacionado con la disponibilidad de información, la validación de entregables y la articulación con las entidades clave del sector energético en Colombia.

Asimismo, cualquier riesgo emergente identificado durante la ejecución será incorporado en la matriz para asegurar una trazabilidad clara y una respuesta oportuna alineada con los objetivos del proyecto.

Tech for impact