

Informe Investigación y análisis tecnológico

Versión 4

Assessment of the Small-scale
hydropower potential in Colombia

21 enero 2026

Contenido

1. Abstracto.....	8
2. Benchmarking de Tecnologías de Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) e Hidrocinéticas 9	
2.1. Introducción.....	9
2.2. Metodología.....	9
2.3. Modelo de Scoring y ponderación.....	11
2.4. Estructura del análisis: bloques y características evaluadas.....	12
2.5. Benchmarking de Tecnologías hidroeléctricas.....	16
2.5.1. Introducción.....	16
2.5.2. Tecnologías de turbinas hidroeléctricas analizadas.....	17
2.5.3. Resultados obtenidos del Benchmark de hidroeléctricas.....	23
2.5.4. Matriz comparativa Hidroeléctricas.....	26
2.5.5. Conclusiones Benchmark Hidroeléctricas.....	31
2.6. Benchmark de tecnologías hidrocinéticas.....	32
2.6.1. Introducción.....	32
2.6.2. Tecnologías de turbinas hidroeléctricas analizadas.....	32
2.6.3. Resultados obtenidos del Benchmark de hidrocinéticas.....	35
2.6.4. Matriz comparativa hidrocinéticas.....	39
2.6.5. Conclusiones Benchmark Hidrocinéticas.....	43
2.7. Conclusiones del Benchmark.....	44
3. Especificaciones Técnicas y Requerimientos de Implementación.....	47
3.1. Conceptos básicos.....	47
3.2. Criterios de implementación.....	48
3.2.1. Potencia pico requerida por proyecto.....	48
3.2.2. Área de cuenca y caudal medio de la corriente de agua.....	50
3.2.3. Caudal nominal y factor de planta.....	51
3.2.4. Obras civiles.....	51

3.2.5.	Equipos electromecánicos	52
3.2.6.	Tamaño de los elementos	52
3.2.7.	Replicabilidad y modularidad	52
3.3.	Niveles de eficiencia y operatividad.....	52
3.3.1.	Niveles de eficiencia	52
3.3.2.	Niveles de operatividad	53
4.	Compilación de casos de estudio	54
4.1.	Introducción.....	55
4.2.	Criterios de selección	57
4.2.1.	Condiciones geográficas	57
4.2.2.	Condiciones hidrológicas	59
4.2.3.	Zonas climáticas.....	61
4.2.4.	Contexto socioeconómico.....	63
4.2.5.	Contexto ambiental.....	65
4.2.6.	Resumen	67
4.3.	Casos de estudio	67
4.3.1.	Caso de estudio de la zona 1.....	69
4.3.2.	CASO DE ESTUDIO DE LA ZONA 2	75
4.4.	Datos e información.....	83
4.4.1.	Caso de estudio de la zona 1.....	83
4.4.2.	Caso de estudio de la zona 2	85

Ilustraciones

Ilustración 1: Turbina Francis	18
Ilustración 2: Turbina PAT	19
Ilustración 3: Turbina Kaplan.....	19
Ilustración 4: Turbina Pelton.....	20
Ilustración 5: Turbina Turgo.....	21
Ilustración 6: Turbina Cross Flow.....	21

Ilustración 7: Turbina Deriaz.....	22
Ilustración 8: Turbina Bulbo	23
Ilustración 9: Turbina New Energy.....	33
Ilustración 10: Turbina New Energetics.....	34
Ilustración 11: Turbina Idenergie	34
Ilustración 12: Turbina GKinetic	35
Ilustración 13: Zonas no interconectadas (ZNI).....	56
Ilustración 14: Zonas No Interconectadas de Colombia. Condiciones geográficas.....	57
Ilustración 15: Zonas No Interconectadas de Colombia. Condiciones hidrológicas. (A) Precipitación media multianual y (B) Evaporación media multianual	60
Ilustración 16: Zonas No Interconectadas de Colombia. Condiciones climáticas. (A) Zonas climáticas PIEC, (B) Clasificación climática de Lang	62
Ilustración 17: Zonas No Interconectadas de Colombia. Contexto socioeconómico. (A) Densidad de población, (B) Distribución de minorías étnicas, (C) Necesidades Básicas Insatisfechas, (D) Índice de Calidad de Vida	64
Ilustración 18: Zonas No Interconectadas de Colombia. Contexto ambiental. (A) Cobertura de suelos, (B) Áreas protegidas, (C) Ecosistemas reglamentados.	66
Ilustración 19: Zonas No Interconectadas de Colombia. Contexto geográfico, social y ambiental	67
Ilustración 20: Zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	69
Ilustración 21: Área de estudio de detalle para el municipio de Unguía. Fuente: Elaboración propia con GoogleEart.....	70
Ilustración 22: Área de estudio de detalle para el municipio de Acandí. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	71
Ilustración 23: Localización de posibles aprovechamientos hidroeléctricos en Unguía. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	72
Ilustración 24: Localización de posibles aprovechamientos hidroeléctricos en Acandí. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	72
Ilustración 25: Localización de posibles aprovechamientos hidroeléctricos en la Zona 1. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	73
Ilustración 26: Área de estudio de detalle para el municipio de Calamar, Guaviare. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	76
Ilustración 27: Área de estudio de detalle para el municipio de El Retorno, Guaviare. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	76
Ilustración 28: Área de estudio de detalle para el municipio de Cartagena del Chairá, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	77

Ilustración 29: Área de estudio de detalle para el municipio de El Doncello, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	77
Ilustración 30: Área de estudio de detalle para el municipio de Puerto Rico, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	78
Ilustración 31: Área de estudio de detalle para el municipio de San José del Fragua, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	78
Ilustración 32: Área de estudio de detalle para el municipio de San Vicente del Caguán, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	79
Ilustración 33: Área de estudio de detalle para el municipio de Solano, Caquetá. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	79
Ilustración 34: Área de estudio de detalle para el municipio de Mocoa, Putumayo. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	80
Ilustración 35: Área de estudio de detalle para el municipio de Orito, Putumayo. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	80
Ilustración 36: Área de estudio de detalle para el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	81
Ilustración 37: Área de estudio de detalle para el municipio de Valle del Guamuez, Putumayo. Fuente: Elaboración propia con GoogleEarth.....	81
Ilustración 38: Planchas IGAC 1:25.000 de la Zona de Estudio 1. Fuente: IGAC.....	83
Ilustración 39: Planchas disponibles para el departamento del Putumayo (en gris claro) de la Zona de Estudio 2. Fuente: IGAC.....	86
Ilustración 40: Ubicación estaciones pluviométricas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	87
Ilustración 41: Ubicación de las estaciones sinópticas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	89
Ilustración 42: Ubicación estaciones limnimétricas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	90
Ilustración 43: Ubicación estaciones limnigráficas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	91
Ilustración 44: Ubicación de las estaciones climatológicas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	92
Ilustración 45: Ubicación estaciones agrometeorológicas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia.....	93

Tablas

Tabla 1: Consumos de potencia y energía por cada zona climática. Fuente: PIEC 2024-2028, UPME.....	48
TABLA 2: POTENCIA PICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	48
Tabla 3: Caudal y viviendas. Fuente: Elaboración propia	49
Tabla 4: Caudales medios multianuales. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 5: Eficiencias. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 6: Caudal mínimo turbinable. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 7: Caudal mínimo turbinable. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 8: Estaciones hidrometeorológicas de Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM	84
Tabla 9: Estaciones pluviométricas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	86
Tabla 10: Estaciones pluviométricas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	87
Tabla 11: Estaciones sinópticas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	88
Tabla 12: Estaciones limnimétricas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	89
Tabla 13: Estaciones limnigráficas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	90
Tabla 14: Estaciones climatológicas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM.....	91
Tabla 15: Estaciones agrometeorológicas Zona de Estudio 2. Fuente: Elaboración propia con datos del IDEM	92

Gráficas

Gráfica 1: Diagrama de Aplicación de Turbinas.....	17
Gráfica 2: Diagrama de Aplicación de Turbinas.....	29
Gráfica 3: delimitación cuencas hidrográficas zona 1. Fuente: elaboración propia con googleearth.....	74
Ilustración 4: delimitación de las cuencas hidrográficas identificadas en la zona 2. Fuente: elaboración propia.....	82

1. Abstracto

Este informe presenta los resultados centrales de la fase de investigación tecnológica del proyecto. El objetivo general de esta fase es identificar, analizar y comparar las principales tecnologías de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y hidrocinéticas, aplicables al contexto colombiano, con especial atención a su implementación en Zonas No Interconectadas (ZNI).

El documento integra y desarrolla tres actividades fundamentales: La primera consiste en un benchmark exhaustivo de tecnologías de PCH, donde se analizan turbinas hidroeléctricas ampliamente utilizadas a nivel global, incluyendo Francis, Pelton, Kaplan, Turgo, Cross Flow, Deriaz, Bulbo y PAT. El análisis compara estas tecnologías según indicadores clave de desempeño (eficiencia, peso, modularidad, CAPEX/OPEX, disponibilidad de repuestos, etc.), con el fin de identificar soluciones viables, replicables y adaptables a las particularidades hidrológicas y geográficas de las ZNI colombianas. Adicionalmente, se incorpora un benchmark de tecnologías hidrocinéticas (turbinas de flujo libre sin necesidad de altura de caída), evaluando 4 turbinas comerciales disponibles en el mercado internacional mediante la misma metodología de análisis multicriterio, ampliando así el espectro de alternativas tecnológicas para contextos con recursos hídricos de baja altura y flujo continuo.

En segundo lugar, el informe desarrolla una definición detallada de especificaciones técnicas y requisitos de implementación para cada tecnología seleccionada. Este apartado sintetiza los parámetros técnicos esenciales (potencia, caudal, salto, eficiencia y diseño), los requerimientos, así como las consideraciones operativas necesarias. Este análisis permite asociar cada tecnología con condiciones locales reales, identificando barreras, oportunidades y requisitos críticos.

Finalmente, la tercera actividad comprende una compilación estructurada de casos de estudio de PCH implementadas en contextos similares a las ZNI de Colombia. A partir de 2 casos de estudio, se analizan criterios de selección, desempeño energético, diferentes factores, barreras encontradas y lecciones aprendidas. Estos casos permiten validar la metodología propuesta, aportar evidencia empírica sobre la replicabilidad de las tecnologías estudiadas y consolidar recomendaciones estratégicas aplicables al contexto colombiano.

En conjunto, este informe constituye la base técnica que sustentará las siguientes fases del proyecto: la metodología de dimensionamiento y costes, el análisis regulatorio y financiero y el desarrollo del modelo. Los resultados aquí presentados permiten avanzar hacia una selección tecnológica más informada, robusta y contextualizada, contribuyendo a los objetivos nacionales de transición energética y electrificación rural.

2. Benchmarking de Tecnologías de Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) e Hidrocinéticas

2.1. Introducción

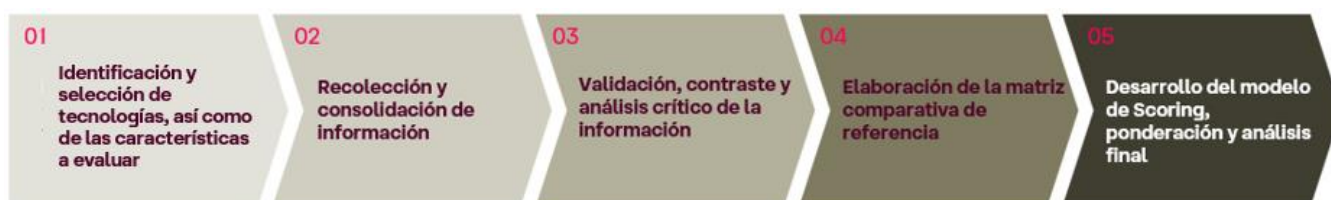
La primera actividad de dicho informe consiste en desarrollar un análisis comparativo (benchmark) de diversas tecnologías de turbinas utilizadas para PCH. El objetivo principal es identificar las soluciones tecnológicas que mejor se ajustan a las condiciones hidrológicas y territoriales colombianas y sus características.

El benchmark se ha construido considerando las tecnologías hidroeléctricas más representativas del sector de pequeña escala: turbinas Francis, Pelton, Kaplan, Turgo, Cross Flow, Deriaz, Bulbo y las turbinas tipo PAT (Pump as Turbines). Adicionalmente, se ha desarrollado un benchmark complementario de turbinas hidrocinéticas, analizando 4 tecnologías comerciales del mercado internacional (New Energy, New Energetics, Idenergie y GKinetic), las cuales operan con flujo libre sin necesidad de altura de caída.

Para cada una de estas turbinas se ha llevado a cabo un análisis amplio, sistemático y estructurado, basado en criterios técnicos, económicos y operativos previamente definidos en coordinación con expertos del sector. La evaluación se fundamenta en información proveniente de literatura especializada, catálogos de fabricantes, estudios, referencias académicas y nuestra experiencia. Esta aproximación metodológica permite establecer una base sólida para comparar el desempeño, las ventajas y las limitaciones de cada tecnología y determinar su potencial aplicabilidad en el contexto colombiano.

2.2. Metodología

La metodología adoptada se diseñó para garantizar rigor técnico, comparabilidad entre tecnologías y objetividad en los resultados. Se estructuró en cinco fases principales:



Fase 1. Identificación y selección de tecnologías, así como de las características a evaluar

En primer lugar, se identificaron y seleccionaron las tecnologías hidroeléctricas y hidrocinéticas más relevantes. Para ello, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de documentos técnicos, estudios especializados, bases de datos de fabricantes y experiencias de proyectos previos. Con el apoyo de expertos, se preseleccionaron las turbinas con mayor adecuación para las zonas

objeto del estudio, disponibilidad comercial y con una inversión y costes de mantenimiento acotados.

En segundo lugar, se determinaron las características a evaluar para cada turbina y se estructuraron los bloques de análisis y los criterios comparativos del benchmark (técnicos, económicos y operativos). Para cada bloque se establecieron los atributos críticos a contrastar entre tecnologías. Esta definición permitió construir un marco homogéneo para analizar, ponderar y comparar el desempeño de las turbinas seleccionadas.

Fase 2. Recolección y consolidación de información

Para cada turbina se recopilaron datos cuantitativos y cualitativos relacionados con rendimiento hidráulico, características mecánicas, costes estimados, comportamiento operacional, limitaciones y requisitos de diseño.

Las fuentes utilizadas incluyeron:

- Catálogos técnicos de fabricantes
- Artículos científicos y documentos especializados
- Información de proyectos reales implementados en contextos similares
- Bases de datos y publicaciones en línea contrastadas

La información se normalizó y sistematizó en fichas técnicas homogéneas para facilitar comparaciones posteriores.

Fase 3. Validación, contraste y análisis crítico de la información

Se verificó la consistencia de los datos, contrastando múltiples fuentes y eliminando valores extremos o específicos que no fueran representativos del funcionamiento típico de cada tecnología.

Esta fase incluyó:

- Revisión de parámetros sensibles
- Discusiones técnicas con especialistas para ajustar valores

Fase 4. Elaboración de la matriz comparativa de referencia

Con la información validada se construyó una matriz comparativa estructurada en tres bloques de análisis (técnico, económico y operativo). Cada bloque reúne indicadores específicos que representan los factores clave que condicionan la idoneidad de cada turbina.

La matriz permite visualizar diferencias tecnológicas, establecer comparaciones directas y facilitar procesos posteriores de ponderación y toma de decisiones.

Fase 5. Desarrollo del modelo de Scoring, ponderación y análisis final

A partir de la matriz comparativa, se implementó un modelo multicriterio de evaluación. El enfoque incluyó:

1. **Asignación de pesos** a las características más relevantes, definidas en base en su relevancia estratégica para el contexto colombiano.
2. **Valoración de cada característica para cada turbina** considerando los criterios definidos.
3. **Obtención de un puntaje global** que permite establecer un ranking comparativo.

Este esquema asegura objetividad y permite reflejar el conocimiento experto en el proceso de recomendación de las tecnologías más adecuadas.

2.3. Modelo de Scoring y ponderación

Con el fin de transformar la matriz comparativa en una herramienta objetiva de decisión, se desarrolló un modelo de scoring basado en análisis multicriterio (MCDM), combinando información cuantitativa, criterios técnicos y el juicio experto del equipo. Este modelo permite comparar tecnologías heterogéneas bajo un mismo marco analítico, identificando cuáles ofrecen un mejor desempeño global para las condiciones de pequeña hidro en Colombia.

Para el cálculo de la puntuación global se excluyeron algunas características, como el tipo de eje, la velocidad específica, el caudal o el rango de altura, entre otras, porque no permiten una comparación objetiva entre tecnologías. Estos parámetros dependen directamente del sitio donde se instalará la turbina (salto, caudal disponible, topografía, condiciones hidráulicas), por lo que su valoración no refleja un desempeño intrínseco de la tecnología sino la adecuación a un caso particular.

Ponderación de cada característica

Para las características seleccionadas se le asigna un peso parcial. Se utilizó una escala simple basada en relevancia:

- 1 → baja relevancia
- 2 → relevancia media
- 3 → alta relevancia

Es decir, a cada característica de alta relevancia, como el nivel de complejidad técnica o el peso/dificultad de transporte, se le asigna un peso tres veces mayor que a una característica de baja relevancia, como la eficiencia pico.

Cálculo del puntaje

Para cada tecnología:

- A cada característica seleccionada de cada turbina se le asignó una valoración cuantitativa según su desempeño:
 - **1:** desempeño poco favorable
 - **2:** desempeño aceptable
 - **3:** desempeño favorable
- Cada puntaje se multiplicó por el peso asignado a esa característica dentro del modelo de evaluación.

- La suma de los puntajes ponderados genera el resultado comparativo final para cada tecnología.

$$Puntuación\ global = \sum_{i=1}^n W_i \cdot S_{i,T}$$

- i = cada característica evaluada (técnica, económica u operativa).
- W_i = peso asignado a la característica (baja relevancia, relevancia media y alta relevancia), según su importancia relativa dentro del bloque.
- $S_{i,T}$ = puntuación otorgada a la turbina T en esa característica (1, 2 o 3), según su desempeño.
- n = total de características consideradas en el modelo.

Este proceso permite comparar tecnologías en condiciones equitativas, ponderando lo más relevante.

Resultado del modelo

La aplicación del modelo de *scoring* permite comparar de forma objetiva el desempeño global de cada tecnología. Este enfoque facilita alinear la selección tecnológica con las condiciones reales del contexto colombiano y priorizar soluciones eficientes, robustas y de bajo coste operativo.

En los apartados siguientes se presentan:

- Los resultados obtenidos del benchmark
- La matriz comparativa
- Las conclusiones

2.4. Estructura del análisis: bloques y características evaluadas

Para garantizar una evaluación integral, las variables analizadas se agruparon en tres bloques principales. Cada bloque reúne características que representan factores fundamentales para la implementación real de los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala. A continuación, se detalla la justificación global de cada bloque y la explicación de cada una de sus características.



Bloque 1. Aspectos Técnicos

Este bloque recoge parámetros directamente vinculados con el desempeño hidráulico y mecánico de cada turbina. Son aspectos esenciales para determinar si una tecnología puede operar eficientemente bajo las condiciones hidrológicas específicas de un sitio.

Justificación del bloque

Las PCH y sistemas hidrocínéticos en Colombia enfrentan condiciones hidrológicas muy variables (altas estacionalidades, ríos con caudal fluctuante, presencia significativa de sedimentos y saltos heterogéneos o ausencia de altura de caída). Estas condiciones exigen una compatibilidad precisa entre la turbina, el recurso y la infraestructura.

Si la tecnología no encaja adecuadamente con el rango de caudales, altura, régimen sólido o velocidad de operación, se compromete la eficiencia energética, la vida útil del equipo y los costes de operación y mantenimiento.

Por ello, este bloque agrupa las variables estrictamente técnicas que determinan el comportamiento hidráulico y mecánico de cada turbina.

Características técnicas evaluadas

- **Rango de altura de caída (head) [m]:** Define los valores de salto neto para los cuales la turbina opera de forma eficiente. Es fundamental para identificar el tipo de emplazamiento (bajo, medio o alto salto) para el cual la tecnología es adecuada. Para turbinas hidrocínéticas, este valor es 0 (operan sin altura de caída).
- **Rango de caudal (flow) [m³/h o m/s]:** Indica el caudal de agua requerido para operar y su tolerancia a variaciones. Este parámetro permite evaluar la robustez de la turbina frente a ríos con alta estacionalidad o caudales irregulares. En hidrocínéticas se expresa como velocidad de flujo [m/s].
- **Curva de eficiencia:** Describe cómo varía la eficiencia a diferentes puntos de operación. Las curvas amplias y estables son deseables en contextos con fluctuaciones de caudal.
- **Eficiencia pico (%):** Corresponde al máximo rendimiento alcanzable. Es relevante porque influye directamente en la energía anual generada, especialmente en sistemas que no operan permanentemente en el punto nominal.
- **Velocidad mínima de operación [m/s]:** Especialmente relevante para turbinas hidrocínéticas, indica el flujo mínimo necesario para iniciar operación y generar electricidad.
- **Velocidades específicas:** Permiten clasificar la turbina según su tipología hidráulica y ayudan a determinar la velocidad de giro esperada, el tipo de generador asociado y las condiciones de diseño hidráulico.

- **Rango de regulación o flexibilidad operativa:** Evalúa la capacidad de la turbina para adaptarse a fluctuaciones del caudal (mediante álabes móviles, inyectores, toberas, compuertas o control de pitch).
- **Rangos de operación:** Incluyen límites mínimo, nominal y máximo de funcionamiento. Determinan la estabilidad, confiabilidad y capacidad de operar en escenarios hidrológicos adversos.
- **Tipo de eje (horizontal / vertical):** Influye en la disposición civil, el monto de obras y la facilidad para integración con el generador. Algunos diseños priorizan compacidad (horizontal) y otra eficiencia mecánica (vertical).
- **Nivel de complejidad técnica:** Evalúa el número de componentes, sofisticación de mecanismos y sensibilidad a fallos.
- **Modularidad:** Indica si la turbina puede desarmarse en módulos transportables y si permite configuraciones en paralelo o ampliaciones progresivas. Un mayor modularidad facilita el transporte, el montaje y la adaptación de la potencia instalada en ZNI.
- **Escalabilidad / Replicabilidad:** Evalúa si la tecnología puede reproducirse en distintos sitios con pocas modificaciones, útil para programas de despliegue regional o comunitario.
- **Peso y dificultad de transporte:** Afecta directamente la logística, especialmente en ZNI donde el acceso se realiza por vías fluviales o caminos no pavimentados.
- **Frecuencia de mantenimiento:** Determina la periodicidad de intervenciones necesarias para mantener el rendimiento, un criterio crítico en zonas con acceso técnico limitado.
- **Detalle del mantenimiento y nivel de complejidad:** Incluye si el mantenimiento requiere herramientas especializadas, técnicos cualificados o repuestos difíciles de conseguir. Tecnologías simples son preferibles para comunidades remotas.

Bloque 2. Aspectos Económicos

Este bloque reúne las características que influyen directamente en la inversión inicial, los costes operativos y el comportamiento económico a lo largo de la vida útil de las tecnologías analizadas. Su objetivo es identificar qué turbinas ofrecen un mejor equilibrio entre coste, desempeño y sostenibilidad financiera, especialmente en contextos remotos como las ZNI.

Justificación del bloque

En pequeñas centrales hidroeléctricas y sistemas hidrocinéticos, la relación coste–beneficio es un factor crítico para la viabilidad del proyecto. Las PCH y turbinas hidrocinéticas en ZNI suelen enfrentarse a condiciones desafiantes: accesos limitados, mayores costes logísticos, dificultades en la provisión de repuestos y recursos locales restringidos para operación y mantenimiento.

Por ello, resulta imprescindible comparar tecnologías no solo por su desempeño técnico, sino también por su coste de adquisición, su coste de operación, su vida útil esperada y la disponibilidad de soporte técnico y repuestos, factores que definen el coste total a lo largo del ciclo de vida.

Características económicas evaluadas

- **Coste estimado de inversión (CAPEX) [USD/kW]:** Incluye la turbina, sistemas mecánicos y eléctricos, acondicionamiento del sitio, obras civiles y montaje. Determina la barrera de entrada económica de cada tecnología y su competitividad inicial.
- **Coste de mantenimiento (OPEX) [% anual del CAPEX]:** Representa los gastos recurrentes asociados a inspecciones, lubricación, reemplazo de componentes y mano de obra.
- **Vida útil estimada [años]:** Permite evaluar la durabilidad y la frecuencia de reemplazos. Turbinas robustas y de baja complejidad presentan vidas útiles superiores, lo que puede reducir el coste del ciclo de vida.
- **Disponibilidad de repuestos y soporte técnico:** Factor clave en zonas remotas. Incluye facilidad de acceso a piezas críticas, presencia de proveedores regionales, tiempos de entrega y disponibilidad de personal capacitado. Tecnologías estandarizadas ofrecen mayores ventajas logísticas y reducen el riesgo de paradas prolongadas.

Bloque 3. Aspectos Operativos

Este bloque analiza los factores que condicionan la operación cotidiana de las turbinas, su interacción con el entorno y su idoneidad para diferentes contextos sociales y geográficos. Estos aspectos son especialmente relevantes en proyectos ubicados en zonas rurales o remotas, donde las capacidades técnicas son limitadas y la sostenibilidad ambiental es un criterio prioritario.

Justificación del bloque

La viabilidad operativa y ambiental de una turbina depende no solo de su desempeño técnico o económico, sino también de su capacidad para integrarse adecuadamente en el sitio donde será instalada. En el contexto colombiano, donde la morfología fluvial, los sedimentos, las velocidades de flujo y la accesibilidad pueden variar de forma significativa, estas consideraciones permiten seleccionar tecnologías que garanticen estabilidad, sostenibilidad y adaptación al entorno local.

Características evaluadas

- **Tipo de sitio recomendado (alta montaña, llanuras, etc.):** Permite identificar en qué condiciones geográficas e hidrológicas la turbina opera de manera óptima. Considera factores como el tipo de relieve, la altura de caída disponible (o velocidad de flujo en el caso de hidrocinéticas), el rango de caudales y la configuración del cauce. Esta información facilita el emparejamiento adecuado entre tecnología y sitio.

- **Sensibilidad a sedimentos:** Evalúa el comportamiento de la turbina frente a sólidos en suspensión, sedimentos finos o gruesos, debris y cambios abruptos en el caudal. En ríos colombianos, donde la carga de sedimentos puede ser elevada, esta característica influye directamente en el desgaste, la eficiencia y la frecuencia de mantenimiento. Para turbinas hidrocinéticas, que operan en contacto directo con el flujo libre, este factor es especialmente crítico.
- **Impacto ambiental relativo:** Considera la magnitud de la intervención en el cauce, la necesidad de obras civiles, los efectos sobre comunidades acuáticas, la compatibilidad con pasos de peces y la alteración del régimen hidrológico. Tecnologías compactas o de baja intrusión suelen presentar un impacto ambiental menor. Las turbinas hidrocinéticas típicamente requieren menor infraestructura civil que las hidroeléctricas convencionales.
- **Aplicaciones típicas (micro redes, plantas medianas, bombeo, etc.):** Describe los usos más comunes de cada tecnología según su capacidad, estabilidad operativa y requisitos de instalación. Esto incluye aplicaciones en microrredes aisladas, sistemas híbridos, plantas de generación distribuida o sistemas de bombeo asociados a usos productivos.

Durante la estructuración del benchmark se evaluaron inicialmente diversas características adicionales, sin embargo, algunas de ellas fueron descartadas al comprobar que no aportaban valor diferencial al análisis comparativo.

El **riesgo de cavitación** no se incluyó como criterio discriminante para turbinas hidroeléctricas, ya que todas presentan susceptibilidad a cavitación cuando operan fuera de su punto de diseño, lo que convierte esta variable en un factor transversal y no diferenciador.

De igual forma, el número de jets, álabes o palas no se incluyó en el análisis porque estos elementos dependen directamente del tamaño de la máquina, la velocidad específica y las condiciones hidráulicas de diseño. Dado que el estudio se desarrolla a un nivel comparativo general, sin un caso de dimensionamiento particular, estos parámetros no aportan información relevante ni permiten establecer diferencias significativas entre tecnologías a nivel conceptual.

Finalmente, la variable de **disponibilidad de fabricantes en Colombia** fue excluida, ya que las principales casas productoras de turbinas hidroeléctricas y fabricantes de turbinas hidrocinéticas se encuentran fuera de Colombia y presentan una disponibilidad relativamente homogénea a escala internacional, sin generar ventajas comparativas claras entre tipos de turbina. En conjunto, estas exclusiones permiten mantener el enfoque del benchmark en criterios realmente útiles para la selección tecnológica.

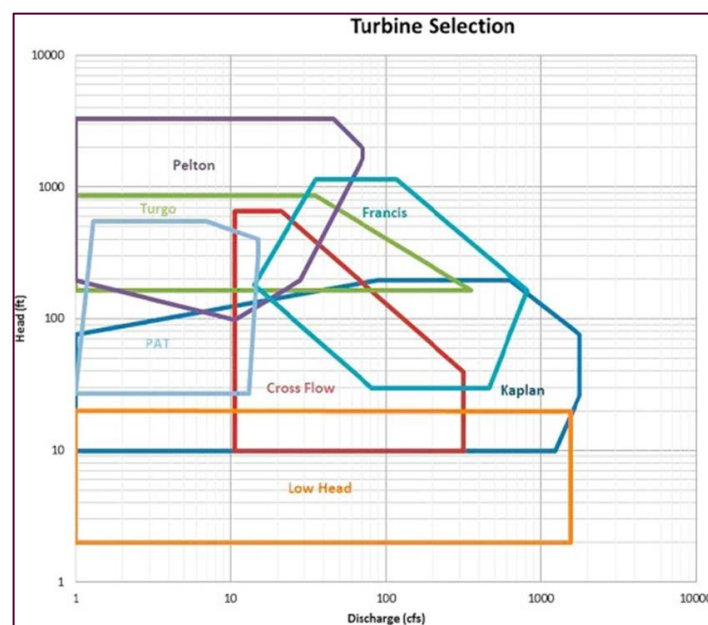
2.5. Benchmarking de Tecnologías hidroeléctricas

2.5.1. Introducción

A continuación, se presenta el benchmark de turbinas hidroeléctricas convencionales para pequeñas centrales (PCH). Se analizan 8 tecnologías (Francis, Pelton, Kaplan, Turgo, Cross Flow, Deriaz, Bulbo y PAT) ampliamente utilizadas a nivel global, evaluadas mediante una metodología multicriterio que considera aspectos técnicos, económicos y operativos relevantes para el contexto colombiano.

2.5.2. Tecnologías de turbinas hidroeléctricas analizadas

En esta sección se describen brevemente las tecnologías seleccionadas, destacando sus principios de funcionamiento, rangos de aplicación y atributos clave.



GRÁFICA 1: DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE TURBINAS

El diagrama muestra los rangos óptimos de aplicación de diferentes tecnologías de turbinas hidroeléctricas en función de dos parámetros fundamentales: la altura de caída y el caudal disponible, representados en los ejes vertical y horizontal, respectivamente, expresados en unidades anglosajonas.

- **Eje vertical (Y):** Representa la altura de caída neta (*head*) en pies [ft], correspondiente al desnivel hidráulico aprovechable. El rango mostrado abarca desde caídas muy bajas (del orden de algunos pies) hasta caídas elevadas superiores a 1.000 ft.
- **Eje horizontal (X):** Representa el caudal (*discharge*) en pies cúbicos por segundo [cfs], correspondiente al volumen de agua disponible. La escala logarítmica permite cubrir un amplio rango de caudales, desde valores bajos típicos de pequeñas centrales hidroeléctricas hasta caudales elevados propios de aprovechamientos de mayor escala.

Cada zona de color identifica el rango de operación recomendado para un tipo específico de turbina: Pelton para altas caídas y bajos caudales; Francis como una alternativa versátil para rangos intermedios de caudal y altura; Kaplan para bajas caídas y altos caudales; Crossflow y turbinas tipo PAT como opciones de menor costo para pequeñas centrales; Turgo para condiciones intermedias; y tecnologías de *Low Head* para aprovechamientos de muy baja caída.

Las áreas de solapamiento entre tecnologías indican que, para determinadas combinaciones de caudal y altura de caída, pueden existir múltiples alternativas técnicamente viables. En estos casos, la selección final de la turbina requiere un análisis técnico-económico adicional que considere aspectos como costos de inversión, variabilidad del caudal, eficiencia operativa, disponibilidad de repuestos y requerimientos de operación y mantenimiento.

- **Turbina Francis**

Las turbinas Francis (ver ilustración 1) son turbinas de reacción muy utilizadas en centrales hidroeléctricas debido a su alta eficiencia y versatilidad. Operan eficazmente en un amplio rango de saltos medios y caudales y pueden instalarse en configuración horizontal o vertical. Su funcionamiento se basa en un cambio de dirección del flujo: el agua entra radialmente hacia el rodete y sale axialmente, lo que permite un aprovechamiento eficiente de la energía hidráulica.

Características destacadas: elevada eficiencia, fiabilidad y amplia disponibilidad comercial.

Limitaciones: menor flexibilidad ante variaciones grandes de caudal y mayor complejidad mecánica.



ILUSTRACIÓN 1: TURBINA FRANCIS

- **Turbinal PAT**

Las turbinas PAT (Pump as Turbine) (ver ilustración 2) son soluciones no convencionales basadas en el uso de bombas centrífugas operadas en modo inverso, aprovechando la energía de presión del fluido para generar energía mecánica. Su principal atractivo es que se fabrican a partir de bombas comerciales estándar, lo que las hace altamente económicas, robustas y fáciles de instalar, con mantenimiento simple y amplia disponibilidad mundial.

Características destacadas: muy bajo coste, elevada disponibilidad comercial, instalación sencilla y mantenimiento reducido.

Limitaciones: menor eficiencia respecto a turbinas diseñadas específicamente, capacidad limitada de control y regulación y curvas de operación menos precisas.

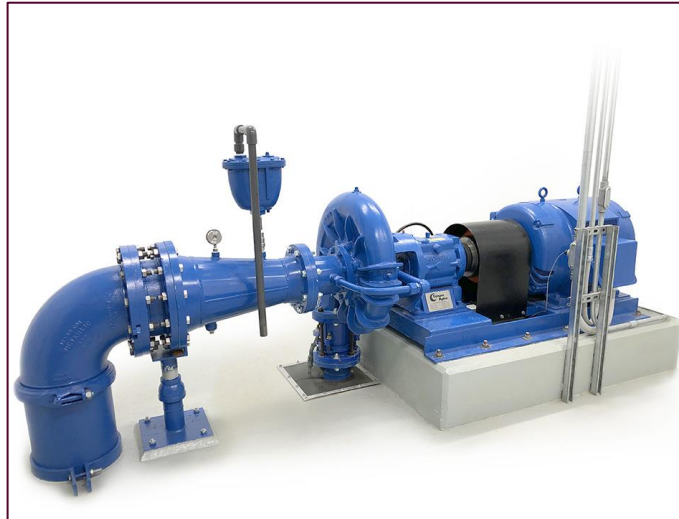


ILUSTRACIÓN 2: TURBINA PAT

- **Turbina Kaplan**

Las turbinas Kaplan (ver ilustración 3) son turbinas de reacción de flujo axial con álabes orientables, diseñadas para operar en saltos bajos y caudales medios–altos. Gracias a su sistema de regulación (variación del ángulo de los álabes y en muchos casos, del distribuidor), mantienen altas eficiencias incluso cuando el caudal fluctúa, siempre que esa variación no sea extrema. Esto las convierte en una tecnología muy adecuada para ríos amplios o de llanura donde existe un caudal relativamente abundante.

Características destacadas: alta eficiencia en bajo salto, buena capacidad de regulación y operación estable en rangos amplios de carga.

Limitaciones: mayor complejidad mecánica y de mantenimiento, sensibilidad a sedimentos y mayor CAPEX, especialmente en pequeñas escalas o sitios con obra civil exigente.



ILUSTRACIÓN 3: TURBINA KAPLAN

- **Turbina Pelton**

Las turbinas Pelton (ver ilustración 4) son turbinas de acción o impulso que operan aprovechando exclusivamente la energía cinética del agua, la cual incide a presión atmosférica sobre los cangilones del rodete. Son especialmente adecuadas para altos saltos y caudales relativamente bajos, utilizando una o varias toberas que permiten regular el caudal y adaptar la operación a variaciones del recurso hídrico.

Características destacadas: excelente eficiencia en alto salto, buena adaptación a caudales variables mediante toberas y elevada fiabilidad.

Limitaciones: no apropiada para saltos bajos y sensible a sedimentos abrasivos si no se dispone de un sistema de filtrado adecuado.

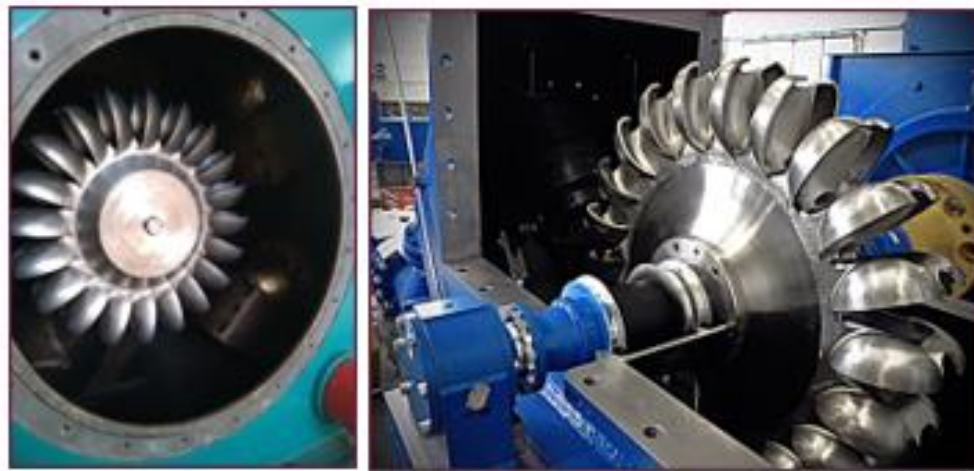


ILUSTRACIÓN 4: TURBINA PELTON

- **Turbina Turgo**

Las turbinas Turgo (ver ilustración 5) son turbinas de impulso derivadas del diseño Pelton, optimizadas para operar en rangos de salto medio-alto y con mayores caudales específicos. El chorro de agua incide sobre el rodete en ángulo, permitiendo manejar más caudal con un rodete más pequeño y a mayor velocidad específica, lo que facilita el acoplamiento directo al generador sin necesidad de sistemas de transmisión.

Características destacadas: diseño más compacto que Pelton, buena respuesta ante variaciones de caudal y capacidad para manejar mayores caudales manteniendo un rendimiento estable.

Limitaciones: eficiencia ligeramente inferior a la Pelton y sensibilidad a sedimentos abrasivos.



ILUSTRACIÓN 5: TURBINA TURGO

- **Turbina Cross Flow**

Las turbinas Cross Flow (ver ilustración 6), también conocidas como Banki-Michell u Ossberger, son turbinas de acción ampliamente utilizadas en pequeñas instalaciones hidroeléctricas debido a su simplicidad, robustez y buena respuesta ante variaciones de caudal. El flujo atraviesa el rodete dos veces, entrada y salida, lo que permite mantener un rendimiento estable incluso en condiciones de operación no nominales. Suelen emplearse en sitios de bajo a medio salto, típicamente por debajo de 40 metros.

Características destacadas: alta flexibilidad operativa, facilidad de mantenimiento, tolerancia a sedimentos y sólidos, y buena adaptación a caudales variables.

Limitaciones: eficiencia inferior a soluciones como Francis o Pelton en condiciones nominales.

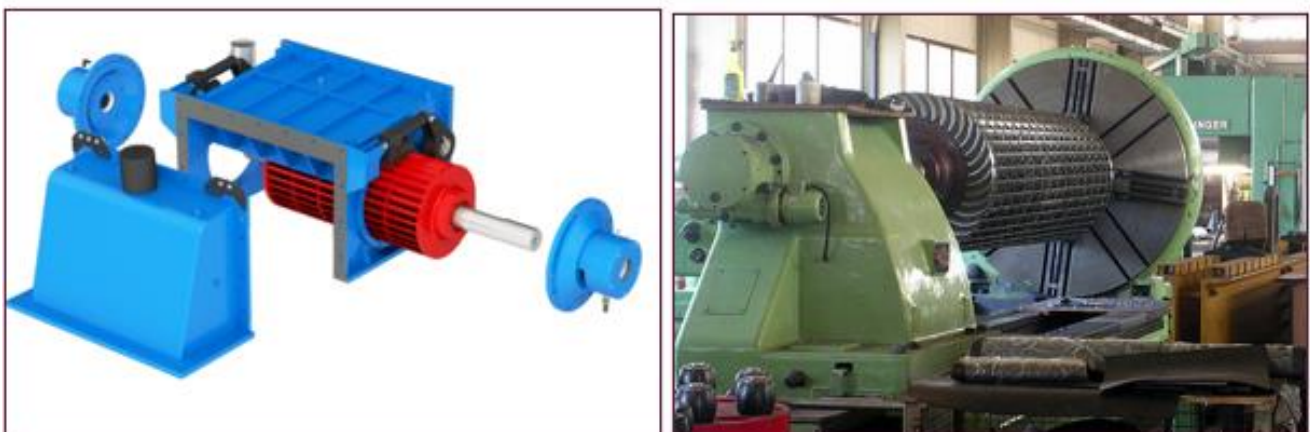


ILUSTRACIÓN 6: TURBINA CROSS FLOW

- **Turbina Deriaz**

Las turbinas Deriaz (ver ilustración 7) son turbinas de reacción de tipo hélice con álabes regulables y funcionamiento diagonal, derivadas del diseño Kaplan. Su configuración de álabes inclinados les permite operar eficientemente en rangos medios de salto y caudal, ofreciendo una distribución uniforme de carga, bajo riesgo de cavitación y una muy buena capacidad de regulación ante variaciones del recurso hídrico. Aunque su disponibilidad comercial es más limitada, destacan por su versatilidad y estabilidad operativa.

Características destacadas: alta eficiencia en amplios rangos operativos, buena regulación con caudales variables y operación estable con baja propensión a cavitación.

Limitaciones: menor disponibilidad comercial y mayor complejidad mecánica respecto a otras tecnologías de pequeña escala.



ILUSTRACIÓN 7: TURBINA DERIAZ

- **Turbina Bulbo**

Las turbinas Bulbo (ver ilustración 8) son turbinas de reacción derivadas del diseño Kaplan, en las que todos los componentes, incluido el generador, se encuentran encapsulados dentro de un bulbo instalado directamente en la corriente. Están especialmente diseñadas para operar en sitios de salto muy bajo y grandes caudales, donde su configuración permite alcanzar alta eficiencia gracias al flujo mixto axial-radial que atraviesa el bulbo.

Características destacadas: excelente eficiencia en bajo salto, diseño compacto y adecuada para ríos de gran caudal.

Limitaciones: requieren obras civiles más complejas y costosas, y no resultan adecuadas para caudales pequeños.



ILUSTRACIÓN 8: TURBINA BULBO

2.5.3. Resultados obtenidos del Benchmark de hidroeléctricas

La matriz comparativa sintetiza el desempeño de ocho tecnologías hidroeléctricas: Francis, PAT, Pelton, Kaplan, Turgo, Crossflow, Deriaz y Bulbo, evaluadas bajo criterios técnicos, económicos y operativos. Su análisis permite identificar qué turbinas son más adecuadas para diferentes contextos hidrológicos, niveles de infraestructura y condiciones de operación típicas en Colombia.

Aspectos técnicos

- Rango de caída y caudales
 - Pelton y Turgo se concentran en saltos altos, con caudales bajos-medios (100–35.000 m³/h), por lo que son más adecuadas para zonas montañosas.
 - Kaplan, Bulbo y Deriaz trabajan con saltos bajos-medios y caudales muy altos, siendo apropiadas para ríos anchos y de llanura.
 - Francis cubre un rango intermedio amplio, ofreciendo gran versatilidad.
 - Cross Flow se sitúa en bajos-medios saltos y caudales medios, lo que la hace interesante para pequeña hidro en laderas y piedemonte.
 - PAT presenta rango muy amplio de caída, pero con caudales más limitados y menor eficiencia, siendo una opción económica para sitios de caudal bajo-medio.
- Complejidad, modularidad y transporte
 - PAT y Crossflow son las tecnologías más simples, con baja complejidad técnica, componentes relativamente modulares y fácil transporte, lo que facilita su instalación en zonas remotas.

- Francis, Pelton, Turgo y Deriaz presentan alta complejidad técnica, con geometrías y componentes especializados que requieren personal capacitado para montaje y mantenimiento.
- Kaplan y Bulbo también muestran complejidad alta, pero además son pesadas o voluminosas, con mayor dificultad logística y necesidad de equipos de transporte especializado.
- Mantenimiento

En todas las tecnologías se requiere mantenimiento preventivo anual y correctivo cada 3–5 años, pero:

- Francis, Pelton, Kaplan, Crossflow, Turgo, Deriaz y Bulbo: Requieren mantenimiento especializado, es decir, personal con experiencia específica en esa turbina y sus componentes.
- PAT: Presenta mantenimiento estandarizado, que puede ser realizado por técnicos generales familiarizados con máquinas rotativas, lo que facilita su implementación y operación en zonas aisladas de difícil acceso.

Aspectos económicos

- CAPEX
 - PAT, Crossflow y Francis presentan los costes por kW más bajos, siendo tecnologías competitivas en pequeña escala y con requerimientos de obra civil moderados.
 - Pelton, Turgo y Bulbo se ubican en un rango medio de inversión, combinando equipos relativamente accesibles con obras civiles que pueden variar según el sitio.
 - Kaplan y Deriaz son las tecnologías de mayor CAPEX, principalmente debido a su complejidad mecánica y a la necesidad de obras civiles más exigentes, especialmente en configuraciones de bajo salto.
- OPEX
 - La mayoría se ubica entre 2–4% del CAPEX anual, excepto PAT, ligeramente más baja (1–2%), debido a su simplicidad mecánica.
 - En contraste, las turbinas que requieren mantenimiento especializado, Francis, Pelton, Kaplan, Turgo, Cross Flow, Deriaz y Bulbo, suelen asociarse a OPEX más altos, derivados de intervenciones más técnicas, mayor complejidad y necesidad de personal capacitado.
- Vida útil
 - Francis, Pelton, Turgo, Deriaz, Bulbo: 40 años
 - Crossflow y Kaplan: 35–40 años
 - PAT: 25 años

- Disponibilidad de repuestos
 - PAT presenta la mejor disponibilidad, dado que utiliza equipos *off-the-shelf* basados en bombas comerciales con repuestos estandarizados y de fácil acceso en el mercado
 - Francis, Pelton, Kaplan, Turgo, Crossflow, Deriaz y Bulbo tienen baja disponibilidad, principalmente por necesidad de componentes especializados

Aspectos operativos

- Sitio recomendado
 - Pelton, Turgo, Crossflow: Ideales para zonas montañosas, con saltos medios–altos y caudales bajos–medios.
 - Kaplan, Bulbo: Adecuadas para ríos de bajo salto y altos caudales, típicos de llanuras o tramos amplios.
 - Deriaz: Muy versátil en saltos bajos–medios con caudales variables, permitiendo buena regulación.
 - Francis: Tecnología intermedia y flexible, apta para una amplia variedad de condiciones (saltos y caudales medios).
 - PAT: Opción de bajo coste para sitios de salto y caudal moderado, útil en proyectos comunitarios o de pequeña escala
- Impacto Ambiental
 - Más bajo: PAT, Crossflow y Bulbo
 - Medio: Kaplan, Turgo
 - Medio-alto: Francis, Pelton, Kaplan y Deriaz
- Aplicaciones típicas
 - Micro redes y sistemas pequeños: PAT, Crossflow - Bajo coste, fácil mantenimiento y buena adaptación a caudales variables.
 - Plantas pequeñas y medianas: Kaplan, Turgo, Deriaz - Buena eficiencia y regulación para proyectos de baja y media potencia.
 - Plantas medianas–grandes: Francis, Pelton - Alta eficiencia y fiabilidad para instalaciones de mayor escala.
 - Ríos de baja caída / canales: Bulbo - Ideal para muy bajos saltos y grandes caudales.

2.5.4. Matriz comparativa Hidroeléctricas

Diccionario de valores

En la matriz comparativa se emplean calificadores como *alto*, *medio*, *bajo*, entre otros, para describir de forma homogénea características que no pueden expresarse únicamente con datos numéricos. Con el fin de garantizar claridad y consistencia en la interpretación, todos estos valores se definen explícitamente en el siguiente diccionario de referencia.

Las valoraciones cualitativas (alto, medio, bajo, etc.) asignadas a cada tecnología en la matriz comparativa se fundamentan en la experiencia técnica del equipo: Las calificaciones han sido establecidas por el equipo técnico de Easy Hydro y Grupo Elemental, basándose en su experiencia acumulada en el diseño, implementación y operación de pequeñas centrales hidroeléctricas en diversas condiciones geográficas y climáticas.

Este diccionario constituye la **base metodológica** para la asignación de los valores cualitativos, utilizados en la matriz comparativa de la página 20. De esta manera, cada puntuación puede interpretarse de forma consistente, transparente y reproducible, facilitando la comparación objetiva entre tecnologías y respaldando el proceso de toma de decisiones.

Característica	Bajo	Medio	Alto
Nivel de complejidad técnica	Diseño simple; pocos componentes; fácil de operar y mantener	Componentes especiales; requiere cierta experiencia técnica	Geometrías complejas; alta precisión; requiere personal especializado
Modularidad	Difícil de desmontar; grandes piezas únicas	Algunos componentes desmontables; modularidad parcial.	Totalmente modular; fácil de transportar e instalar en sitios remoto
Escalabilidad / Replicabilidad	Poco adaptable a variaciones; requiere rediseño	Adaptable a un rango moderado con ajuste	Muy replicable; fabricación estándar y adaptable sin rediseño.
Peso ¹ / dificultad de transporte	Ligera; puede transportarse sin maquinaria pesada	Requiere equipos de carga moderados (grúa liviana, tractor)	Pesada o voluminosa; exige grúas grandes o transporte especializado
Sensibilidad a sedimentos o variaciones de caudal	La turbina puede operar con caudales fluctuantes sin afectar a la eficiencia, y tolera cierto grado de sólidos suspendidos	La turbina es sensible a la fluctuación de caudales y en presencia de sólidos suspendidos precisa mayor frecuencia de mantenimiento	La turbina no tolera variaciones de caudales y en presencia de sólidos suspendidos precisa mantenimiento más recurrente

¹: La característica "Peso / dificultad de transporte" se evalúa de forma comparativa y cualitativa entre las tecnologías, sin establecer rangos de peso específicos. Esto se debe a que, a diferencia de las turbinas hidrocinéticas (que presentan diseños modulares estandarizados), las turbinas hidroeléctricas convencionales presentan una alta variabilidad de peso en función de múltiples factores: potencia nominal de la instalación, salto hidráulico, caudal de diseño, calidad del agua (que determina los requerimientos de materiales y espesores), y especificaciones del fabricante. Por tanto, establecer rangos fijos resultaría arbitrario y poco representativo de la realidad del mercado. El enfoque comparativo adoptado permite evaluar la transportabilidad relativa de cada tecnología sin incurrir en simplificaciones que podrían inducir a error en la fase de diseño.

Característica	Especializado	Estandarizado
Detalle de mantenimiento / Nivel de complejidad	Requiere personal capacitado en esa turbina	Puede hacerlo personal técnico general (máquinas rotativas)

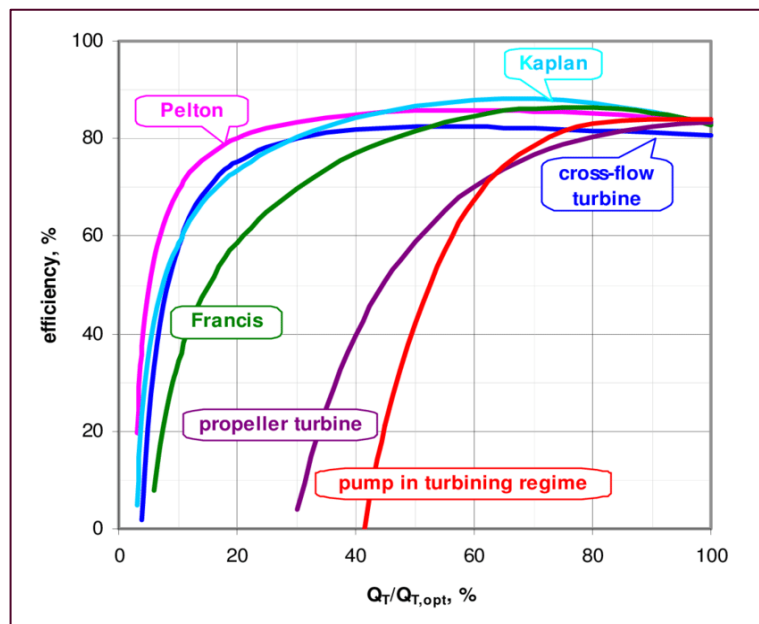
Característica	Bajo (mantenimiento especializado)	Altos (equipos off-the-shelf)
Disponibilidad de repuestos / soporte técnico	Repuestos de difícil acceso; requieren importación directa; tiempos largos de entrega; el mantenimiento depende de técnicos especializados del fabricante	Repuestos estándar y fácilmente disponibles; múltiples proveedores; tiempos cortos de entrega; mantenimiento realizable por personal generalista

Característica	Bajo	Medio	Medio-Alto	Alto
Impacto ambiental relativo	Mínima afectación; obras pequeñas; poca alteración del cauce	Requiere obras visibles o altera moderadamente el flujo	Puede causar hydropreaking, variaciones fuertes o supersaturación	Alteración severa del cauce o grandes obras civiles

Referencias utilizadas para el benchmark

- The Engineering ToolBox. Specific Speed of Pumps, Fans and Turbines. https://www.engineeringtoolbox.com/specific-speed-pump-fan-d_637.html
- Santolin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Ardizzon, G., & Rossetti, A. [2018]. The cost of electromechanical equipment in a small hydro power storage plant. Figura: Ecuaciones de costes para equipamiento electromecánico desarrolladas por Giovanna et al. https://www.researchgate.net/figure/Summary-cost-equations-for-electromechanical-equipment-developed-by-Giovanna-14-Turbine_tbl1_330021634
- DIVE Turbinen GmbH & Co. KG (Alemania). Turbinas hidroeléctricas para aplicaciones de baja y media altura. <https://dive-turbine.de/en>
- Elsevier B.V. Bulb Turbines - Engineering Topics. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bulb-turbines>
- Artículo de revista en Journal of Energy Storage. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X19302750> (Se requiere acceso institucional para detalles completos)
- Análisis técnico del equipo. Easy Hydro + Grupo Elemental. Valoraciones cualitativas basadas en experiencia acumulada en diseño e implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas y evaluación de viabilidad para contexto colombiano.

Bloque	Característica	W i	Francis	S i	PAT	S i	Pelton	S i	Kaplan / Low heat	S i	Turgo	S i	Cross flow	S i	Deriaz	S i	Bulbo	S i
Aspectos técnicos	Rango de altura de caída (head) [m]		[9-350]		[1-1500]		[30-1000]		[5-60]		[50-300]		[5-200]		[20-200]		[18-300]	
	Rango de caudal (flow) [m3/h]		[1500-85000]		[2-18000]		[100-7000]		[100-170000]		[100-35000]		[1000-30000]		[5-300]		[15-6000]	
	Curva de eficiencia		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2		Se adjunta curvas de eficiencia en la ilustración 2	
	Eficiencia pico (%)	1	92	3	86	2	90	3	89	3	87	2	70	1	90	3	90	3
	Velocidades específicas (Ns)		[70-500]		[20-80]		[0-80]		[100-350]		[10-80]		[10-80]		[100-400]		[100-200]	
	Rango de regulación o flexibilidad operativa	2	40-100% del caudal nominal	2	55-110% caudal nominal	2	20-100% del caudal nominal	3	30-100% del caudal nominal	2	20-100% del caudal nominal	3	20-100% del caudal nominal	3	40-100% del caudal nominal	2	50-110 % del caudal nominal	2
	Rangos de operación	2	40-100% del caudal nominal	2	55-110% caudal nominal	2	20-100% del caudal nominal	3	30-100% del caudal nominal	2	20-100% del caudal nominal	3	20-100% del caudal nominal	3	40-100% del caudal nominal	2	50-110 % del caudal nominal	2
	Tipo de eje (horizontal / vertical)		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical		Horizontal y vertical	
	Nivel de complejidad técnica	3	Alto	1	Bajo	3	Alto	1	Alto	1	Alto	1	Medio	2	Alto	1	Alto	1
	Modularidad	2	Bajo	1	Alta	3	Bajo	1	Medio	2	Bajo	1	Medio	2	Bajo	1	Medio	2
	Escalabilidad / Replicabilidad	3	Bajo	1	Alta	3	Bajo	1	Bajo	1	Bajo	1	Medio	2	Bajo	1	Medio	2
	Peso / dificultad de transporte	3	Alto	1	Bajo	3	Bajo	3	Alto	1	Alto	1	Medio	2	Alto	1	Medio	2
	Frecuencia de mantenimiento		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (3- 5 años)	
Detalle de mantenimiento y nivel de complejidad	3	Especializado	2	Estandarizado	3	Especializado	2	Especializado	2	Especializado	2	Especializado	2	Especializado	2	Especializado (complejo)	2	
Aspectos económicos	Coste estimado de inversión (CAPEX, \$/kW)	2	240-950 \$/kW	2	50-150 \$/kW	3	200-400 \$/kW	2	250-600 \$/kW	1	190-400 \$/kW	2	150-250 \$/kW	2	350-550 \$/kW	1	220-400 \$/kW	2
	Coste de mantenimiento (OPEX) [% anual del CAPEX]	3	2-4%	1	1-2%	3	2-4%	1	2-4%	1	2-4%	1	2-3%	2	2-4%	1	2-3%	2
	Vida útil estimada [años]		40		25		40		35 - 40		40		30-35		40		40	
	Disponibilidad de repuestos / soporte técnico	3	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Altos (equipos off-the-shelf)	3	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	1
Aspectos operativos	Tipo de sitio recomendado (alta montaña, llanuras, etc.)		Sitios con caudales medios-altos y saltos medios		Sitios con caudal medio-bajo y saltos bajos-medios		Alta montaña; saltos altos y caudal bajo-medio		Ríos de bajo salto con alto caudal		Sitios de salto medio-alto y caudal bajo-medio		Saltos bajos-medios con caudal variable		Ríos de salto bajo-medio y caudales variables (aprovechamiento flexible)		Ríos de bajo salto y alto caudal (montaje embebido)	
	Sensibilidad a sedimentos	2	Medio	2	Alto	1	Medio	2	Bajo	3	Medio	2	Medio	2	Medio	2	Medio	2
	Impacto ambiental relativo	1	Medio - Alto	1	Bajo	3	Medio - Alto	1	Medio-alto	1	Medio	2	Bajo	3	Medio-Alto	1	Bajo	3
	Aplicaciones típicas (microredes, plantas medianas, bombeo, etc.)		Plantas hidráulicas medianas-grandes y bombeo		Microredes, bombeo, pequeñas plantas hidro, autoconsumo.		Plantas hidráulicas medianas-grandes		Planta hidráulicas pequeñas y medianas		Plantas hidroeléctricas pequeñas y medianas		Microcentrales, plantas pequeñas, microredes, irrigación		bombeo, plantas pequeñas y medianas		micro redes de baja caída, plantas pequeñas, centrales fluviales	
Puntuación global				43		81		53		45		47		61		41		56



GRÁFICA 2: DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE TURBINAS¹

La Gráfica 2 presenta las curvas de eficiencia de distintas tecnologías de turbinas hidroeléctricas en función del caudal relativo ($Q_T/Q_{T,opt}$ %). Esta representación resulta fundamental para comprender el comportamiento real de cada tecnología fuera de las condiciones nominales y constituye un soporte técnico directo de las valoraciones incluidas en la matriz comparativa.

La relevancia de esta gráfica radica en que las Zonas No Interconectadas (ZNI) se caracterizan por una alta variabilidad hidrológica, donde los caudales disponibles rara vez coinciden de forma continua con el punto de diseño. Por ello, no basta con evaluar únicamente la eficiencia máxima de una turbina, sino que resulta crítico analizar su desempeño a lo largo de un amplio rango de operación. Esta ilustración permite visualizar de forma clara qué tecnologías mantienen niveles aceptables de eficiencia ante variaciones de caudal y cuáles presentan una operación más restringida, aspecto clave para la viabilidad técnica y económica de los proyectos en ZNI.

- **Flexibilidad operativa:** Las turbinas Kaplan y Pelton mantienen eficiencias superiores al 80 % en rangos amplios de caudal (aproximadamente entre el 20 % y el 100 % del caudal óptimo), lo que respalda su baja sensibilidad a variaciones de caudal reflejada en la matriz comparativa.
- **Eficiencia pico:** Las turbinas Kaplan, Pelton y Cross Flow alcanzan eficiencias máximas del orden del 87–90 %, coherentes con las puntuaciones más favorables asignadas en la fila de “Eficiencia pico (%)” de la matriz.
- **Limitaciones operativas:** Las turbinas Francis presentan una caída más pronunciada de eficiencia fuera de su punto óptimo, especialmente a bajos caudales, lo que justifica su menor flexibilidad operativa y su mayor sensibilidad a variaciones del recurso hídrico.

- **Aplicaciones específicas:** Las turbinas PAT (bomba operando como turbina) muestran el rango operativo más limitado, con eficiencias aceptables concentradas en un intervalo estrecho de caudal (aproximadamente 40–80 %), reforzando su caracterización en la matriz como una solución adecuada para sitios con caudales relativamente estables.

Relación con la matriz comparativa

Las curvas de eficiencia constituyen el sustento técnico de varios de los criterios evaluados en la matriz comparativa, en particular:

- El **rango de regulación o flexibilidad operativa**, donde las tecnologías con curvas más planas y extendidas reciben mejores calificaciones.
- La **eficiencia pico**, validada por el valor máximo alcanzado por cada curva.
- La **sensibilidad a variaciones de caudal**, evidenciada por la rapidez con la que la eficiencia disminuye fuera del punto óptimo de operación.

En conjunto, esta ilustración permite traducir las valoraciones cualitativas de la matriz en evidencia cuantificable, reforzando la coherencia del benchmark y facilitando una selección tecnológica más robusta y alineada con las condiciones reales de operación en las ZNI.

¹ Fuente: [Turbine Efficiency Curves | Download Scientific Diagram](#)

Otras fuentes: [Bulb Turbines - an overview | ScienceDirect Topics](#) / [Deriaz pump-turbine for pumped hydro energy storage and micro applications - ScienceDirect](#)

2.5.5. Conclusiones Benchmark Hidroeléctricas

El benchmark realizado permite identificar con claridad qué tecnologías hidroeléctricas se ajustan mejor a las condiciones reales de las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, un territorio vasto y complejo que abarca desde las selvas extremadamente húmedas de la región Pacífica hasta las laderas andinas del Tolima, las planicies de la Orinoquía y Amazonía, las estribaciones montañosas de Córdoba–Bolívar–Norte de Santander y la Sierra Nevada de Santa Marta. Estas zonas comparten desafíos comunes: accesos difíciles, caminos estrechos o inexistentes, fuerte variabilidad de caudales, presencia de sedimentos, limitaciones logísticas y poca disponibilidad de personal técnico especializado. En este contexto, la selección tecnológica no depende únicamente del rendimiento hidráulico, sino también del peso, la modularidad, la transportabilidad y los costes de instalación y operación.

Los resultados del análisis, reflejados en la puntuación global del modelo, muestran que las turbinas PAT (81 puntos) y Crossflow (61 puntos) son las opciones más compatibles con las necesidades de las ZNI. Las PAT sobresalen como la tecnología mejor puntuada del estudio gracias a su bajo CAPEX, altísima disponibilidad de repuestos, mantenimiento estandarizado y, sobre todo, por su bajo peso y modularidad natural, aspectos clave cuando el transporte solo es posible mediante motos, pequeñas embarcaciones o incluso a pie. Su simplicidad mecánica y su carácter “off-the-shelf” eliminan gran parte de la dependencia de proveedores especializados, lo que las convierte en la alternativa más viable para proyectos sistemas rurales aislados.

Las Crossflow, con la segunda mejor puntuación (61), se posicionan como la tecnología más equilibrada del conjunto. Son robustas, toleran muy bien los caudales variables, un comportamiento muy frecuente en ríos tropicales de las ZNI, aceptan sedimentos moderados y su diseño modular facilita el traslado y montaje en zonas remotas. Además, mantienen costes accesibles y requieren un nivel de especialización más bajo que la mayoría de las turbinas convencionales, lo que les otorga un excelente balance entre rendimiento técnico y viabilidad real.

En un nivel intermedio, las turbinas Turgo (47 puntos) y Francis (43 puntos) pueden ser adecuadas en escenarios específicos: la Turgo cuando existen saltos altos accesibles y la Francis cuando se cuenta con mejores condiciones logísticas. Sin embargo, su mayor complejidad, necesidad de personal capacitado y disponibilidad limitada de repuestos reducen su aplicabilidad en zonas rurales aisladas.

Por el contrario, tecnologías como Pelton (33 puntos), Kaplan/low-head (45 puntos), Deriaz (41 puntos) y Bulbo (36 puntos), aunque eficientes en proyectos convencionales, muestran limitaciones importantes para las ZNI: requieren obras civiles más exigentes, transporte difícil por su volumen y peso, y mantenimiento especializado. Además, Kaplan, Bulbo y Deriaz dependen de caudales muy altos y de condiciones hidráulicas que no suelen coincidir con la realidad fluvial de la mayoría de las regiones aisladas del país.

En conjunto, la conclusión es clara: PAT y Crossflow encabezan el ranking por su combinación de simplicidad, bajo coste, facilidad de transporte, modularidad y compatibilidad con los patrones hidrológicos de las ZNI. En zonas puntuales donde se disponga de saltos altos y accesibilidad suficiente, la Turgo aparece como alternativa complementaria. Estas tecnologías constituyen la base más sólida para impulsar la generación hidroeléctrica distribuida en territorios remotos,

ofreciendo soluciones sostenibles y adaptadas a las condiciones logísticas, económicas y ambientales propias del país.

2.6. Benchmark de tecnologías hidrocínéticas

2.6.1. Introducción

A continuación, se presenta el benchmark de turbinas hidrocínéticas, tecnologías que operan con flujo libre sin necesidad de altura de caída. Se analizan 4 turbinas comerciales (New Energy, New Energetics, Idenergie y GKinetic) en el rango de 0.5-12 kW, evaluadas mediante la misma metodología multicriterio utilizada para las turbinas hidroeléctricas convencionales, con pesos ajustados para el contexto colombiano.

2.6.2. Tecnologías de turbinas hidroeléctricas analizadas

En esta sección se describen brevemente las tecnologías seleccionadas, destacando sus principios de funcionamiento, rangos de aplicación y atributos clave.



- **Turbina New Energy (Flujo vertical)**

Las turbinas New Energy (ver ilustración 9) son turbinas hidrocínéticas de eje vertical tipo Darrieus, escalables desde 5 kW hasta 250 kW mediante configuraciones en array. Utilizan diseño de flujo cruzado con dos o tres palas verticales montadas sobre una estructura flotante o fija. Su sistema permite adaptación a diferentes profundidades (1.2-2.15 m) y está diseñado para resistir condiciones variables de flujo.

Características destacadas: alta escalabilidad (5-250 kW), robustez estructural, vida útil prolongada (20-25 años) y disponibilidad de red de soporte global.

Limitaciones: CAPEX elevado (\$10,000/kW), peso considerable que requiere grúa (>300 kg), velocidad mínima alta (2.4-3.0 m/s) que limita su aplicabilidad, mantenimiento especializado y alta sensibilidad a debris.

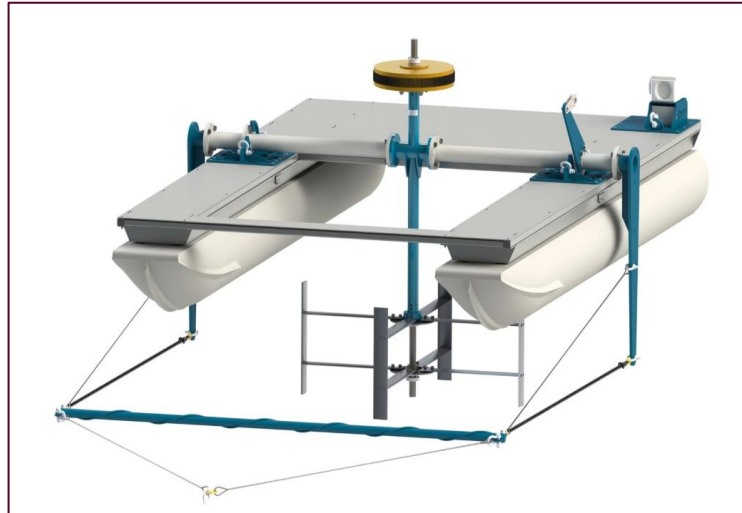


ILUSTRACIÓN 9: TURBINA NEW ENERGY

- **Turbina New Energetics (Flujo axial)**

Las turbinas New Energetics (ver ilustración 10) son turbinas hidrocínicas de flujo axial diseñadas para aplicaciones de micro y pequeña escala (1-10 kW). Operan directamente con la energía cinética del flujo del río sin necesidad de obras civiles de represamiento. Disponibles en tres modelos estándar (1 kW, 5 kW y 10 kW), están diseñadas para instalación "plug-in ready", facilitando su despliegue en comunidades remotas. Su velocidad mínima de operación (1.0-1.5 m/s) les permite funcionar en ríos con flujos moderados.

Nota importante sobre disponibilidad: Aunque esta tecnología se encuentra ampliamente documentada en literatura académica reciente (Kirke, 2020, 2024) con especificaciones técnicas detalladas, no se ha podido confirmar disponibilidad comercial actual y se cree que la compañía no continúa operativa o a discontinuado sus productos. Se incluye en este análisis como referencia técnica de turbinas de flujo axial, ante la posibilidad de que vuelva a producirse en el futuro o esté temporalmente fuera del mercado, y por su valor como benchmark comparativo para tecnologías similares en desarrollo.

Características destacadas: bajo CAPEX (\$2,000-8,500/kW), mantenimiento estandarizado, peso transportable (<150 kg), OPEX bajo (3-5%) y alta modularidad para configuraciones en paralelo.

Limitaciones: eficiencia moderada (25-35%), disponibilidad de repuestos limitada a USA y sensibilidad media a sedimentos que requiere inspección regular.



ILUSTRACIÓN 10: TURBINA NEW ENERGETICS

Turbina Idenergie (Flujo vertical)

Las turbinas Idenergie (ver ilustración 11) son turbinas hidrocínéticas de micro escala (0.3-0.7 kW) diseñadas para aplicaciones individuales o de muy baja demanda. Su diseño compacto y ligero (<50 kg) las hace ideales para instalaciones en arroyos, quebradas o ríos pequeños donde el acceso es limitado. Están orientadas a sistemas de respaldo, carga de baterías o alimentación de cargas DC en sitios muy remotos.

Características destacadas: peso muy bajo (<50 kg), fácil transporte e instalación manual, diseño compacto y bajo impacto ambiental.

Limitaciones: CAPEX muy elevado (\$20,000/kW), capacidad extremadamente limitada (0.5 kW), requiere velocidades de flujo medias-altas (2.0-2.5 m/s), mantenimiento especializado, OPEX alto (8-12%) y disponibilidad de repuestos limitada.



ILUSTRACIÓN 11: TURBINA IDENERGIE

- **Turbina GKinetic (Flujo vertical)**

Las turbinas GKinetic (ver ilustración 12) son turbinas hidrocinéticas de eje vertical con control de pitch activo en las palas, lo que les permite optimizar la captura de energía ante variaciones de flujo. Con una capacidad de 5-15 kW, incorporan sistemas de desviación de debris y están diseñadas para operar en flujos bajos optimizados mediante aceleración hidrodinámica. Su sistema de doble turbina lateral y control electrónico avanzado les proporciona alta flexibilidad operativa.

Características destacadas: eficiencia pico elevada (30-35%), amplio rango de regulación operativa (30-100%), sistema activo de control de pitch, baja sensibilidad a sedimentos gracias al sistema de deflexión y buen comportamiento en flujos bajos.

Limitaciones: peso muy elevado (1.9 toneladas) que imposibilita transporte manual, requiere grúa o equipo pesado para instalación, muy alta complejidad técnica, mantenimiento especializado muy complejo, CAPEX moderado-alto (\$7,000/kW), OPEX alto (8-12%) y disponibilidad limitada de repuestos en fase de desarrollo comercial.



ILUSTRACIÓN 12: TURBINA GKINETIC

2.6.3. Resultados obtenidos del Benchmark de hidrocinéticas

La matriz comparativa sintetiza el desempeño de cuatro tecnologías hidrocinéticas: New Energetics, New Energy, Idenergie y GKinetic, evaluadas bajo criterios técnicos, económicos y operativos ajustados al contexto colombiano. Su análisis permite identificar qué turbinas son más adecuadas para diferentes contextos fluviales, niveles de accesibilidad y condiciones de operación típicas en zonas remotas de Colombia, particularmente en áreas con recursos hídricos de flujo continuo, pero baja o nula altura de caída.

Aspectos técnicos

- **Velocidad de flujo requerida**

- New Energetics opera desde 1.0-1.5 m/s, permitiendo su funcionamiento en ríos con flujos moderados comunes en Colombia.
- GKinetic requiere 1.5-2.0 m/s, velocidad media que limita moderadamente su aplicabilidad.
- Idenergie necesita 2.0-2.5 m/s, velocidad media-alta que restringe su uso a ríos con flujos más vigorosos.
- New Energy presenta el mayor requerimiento de velocidad mínima (2.4-3.0 m/s), siendo la menos adaptable a flujos bajo y limitando significativamente su viabilidad en muchos ríos colombianos.

- **Rango de potencia**

- New Energetics: 1-10 kW con tres modelos estándar, ofreciendo gran versatilidad para diferentes demandas.
- New Energy: 5-250 kW altamente escalable mediante configuraciones en array, apta para proyectos comunitarios medianos.
- GKinetic: Cambiar a "GKinetic: 5-15 kW, orientada a aplicaciones específicas de pequeña escala
- Idenergie: Cambiar a "Idenergie: 0.3-0.7 kW extremadamente limitado

- **Complejidad, modularidad y transporte**

- New Energetics e Idenergie son las más simples, con componentes relativamente modulares, peso ligero (<150 kg y <50 kg respectivamente) y fácil transporte manual o en vehículo pequeño, ideales para zonas remotas sin infraestructura de acceso.
- New Energy presenta complejidad alta con peso considerable (>300 kg) que requiere grúa o equipo mecánico, dificultando su instalación en áreas aisladas.
- GKinetic es la más compleja técnicamente, con peso muy elevado (1.9 toneladas), sistema de control de pitch activo y requerimientos de grúa o barcaza, haciéndola prácticamente inviable para zonas remotas colombianas.

- **Mantenimiento**

- New Energetics e Idenergie ofrecen las frecuencias más bajas (trimestral-semestral para preventivo).
- New Energy y GKinetic requieren mantenimiento más frecuente (mensual-bimensual).

En cuanto al nivel de especialización:

- New Energetics: Mantenimiento estandarizado, puede ser realizado por técnicos generales con conocimientos básicos de sistemas mecánicos y eléctricos, facilitando su operación en zonas aisladas.

- New Energy, Idenergie y GKinetic: Requieren mantenimiento especializado con personal capacitado específicamente en estas turbinas y sus componentes.

Aspectos económicos

• CAPEX

- New Energetics presenta el CAPEX más competitivo [\$2,000-8,500/kW según modelo], siendo la tecnología más accesible económicamente.
- GKinetic se ubica en rango medio [\$7,000/kW], aunque su peso y complejidad incrementan significativamente los costes de instalación.
- New Energy muestra CAPEX alto [\$10,000/kW], compensado parcialmente por su escalabilidad.
- Idenergie presenta el CAPEX más elevado [\$20,000/kW], haciéndola económicamente inviable para la mayoría de las aplicaciones en Colombia.

• OPEX

- New Energetics: OPEX más bajo [3-5% anual], derivado de su simplicidad mecánica y mantenimiento estandarizado.
- New Energy: OPEX medio [5-10% anual].
- Idenergie y GKinetic: OPEX alto [8-12% anual], asociado a mantenimiento especializado y mayor complejidad técnica.

• Vida útil

- New Energy: 20-25 años (más prolongada)
- New Energetics, Idenergie y GKinetic: 15-20 años
- Nota: Las turbinas hidrocínicas presentan vida útil significativamente menor que las hidroeléctricas convencionales debido a su exposición directa al flujo y elementos del río.

• Disponibilidad de repuestos

- New Energetics y New Energy presentan mejor disponibilidad, con redes de distribución establecidas en USA y Canadá respectivamente, aunque requieren importación a Colombia.
- GKinetic tiene disponibilidad media, al encontrarse aún en fase de desarrollo comercial.
- Idenergie muestra baja disponibilidad, con distribución muy limitada y dependencia de importación directa desde Canadá.
- Todas las tecnologías enfrentan el desafío de carecer de distribuidores regionales en Latinoamérica, incrementando tiempos de entrega y costes logísticos

Aspectos operativos

• Sitio recomendado

- New Energetics: Ríos pequeños-medianos, canales, quebradas con flujo 1.0-2.5 m/s. Ideal para zonas de piedemonte, valles interandinos y áreas con flujos moderados continuos.
- GKinetic: Ríos pequeños-medianos con caudal bajo optimizado (1.5-4.0 m/s), canales de riego. Requiere acceso vehicular para instalación.
- New Energy: Ríos medianos-grandes con flujos altos (2.4-5.0+ m/s), requiere profundidad 1.2-2.15 m y estructura flotante o fija robusta. Apto para ríos de llanura con caudal abundante.
- Idenergie: Ríos pequeños, arroyos grandes, quebradas con flujo medio-alto (2.0-4.0 m/s). Aplicación muy limitada por su baja capacidad.

• Sensibilidad a sedimentos

- GKinetic: Baja sensibilidad gracias a sistema activo de deflexión de debris, mejor desempeño en ríos con alta carga de sedimentos.
- New Energetics e Idenergie: Sensibilidad media, toleran condiciones moderadas con limpieza periódica.
- New Energy: Alta sensibilidad, requiere protección especial y mantenimiento frecuente en ríos con sedimentos, limitando su aplicabilidad en ríos andinos colombianos con alta carga sedimentaria.

• Impacto ambiental

- Más bajo: New Energetics, Idenergie (instalación simple, mínima intervención del cauce)
- Bajo-medio: GKinetic (estructura más robusta, pero sin represamiento)
- Medio: New Energy (requiere estructura flotante o fija de mayor envergadura)
- Todas presentan impacto significativamente menor que hidroeléctricas convencionales al no requerir obras de represamiento ni alterar significativamente el régimen hidrológico.

• Aplicaciones típicas

- Microredes aisladas y sistemas muy pequeños (1-5 kW): New Energetics, bajo CAPEX/OPEX, fácil transporte e instalación, mantenimiento simple. Ideal para hogares, fincas, veredas, bombeo de agua, carga de baterías en sistemas híbridos.
- Viviendas individuales remotas (<1 kW): Idenergie, única opción para demandas mínimas, pero limitada por alto CAPEX.
- Microredes comunitarias pequeñas (5-15 kW): GKinetic, cuando existe acceso adecuado para instalación de equipo pesado y se cuenta con soporte técnico especializado.

- Proyectos escalables medianos (5-50 kW): New Energy, viable solo en ríos con flujos altos continuos (>2.5 m/s) y cuando se justifica la inversión elevada mediante configuraciones en array.

2.6.4. Matriz comparativa hidrocinéticas

Diccionario de valores

En la matriz comparativa de turbinas hidrocinéticas se emplean calificadores como alto, medio, bajo, entre otros, para describir de forma homogénea características que no pueden expresarse únicamente con datos numéricos. Con el fin de garantizar claridad y consistencia en la interpretación, todos estos valores se definen explícitamente en el siguiente diccionario de referencia.

Las valoraciones cualitativas (alto, medio, bajo, etc.) asignadas a cada tecnología en la matriz comparativa se fundamentan en la experiencia técnica del equipo y en literatura especializada: Las calificaciones han sido establecidas por el equipo técnico de Easy Hydro y Grupo Elemental, basándose en su experiencia en pequeñas centrales hidroeléctricas, complementada con el análisis de documentación académica y técnica sobre turbinas hidrocinéticas y especificaciones de fabricantes.

Los criterios se han ajustado específicamente para reflejar las particularidades de las turbinas hidrocinéticas (operación sin altura de caída, sensibilidad a debris, velocidades de flujo en m/s, facilidad de transporte a zonas remotas) y las prioridades del contexto colombiano (accesibilidad, disponibilidad de soporte técnico, costes de importación).

Este diccionario constituye la base metodológica para la asignación de los valores cualitativos utilizados en la matriz comparativa de turbinas hidrocinéticas. De esta manera, cada puntuación puede interpretarse de forma consistente, transparente y reproducible, facilitando la comparación objetiva entre tecnologías y respaldando el proceso de toma de decisiones

Característica	Bajo	Medio	Alto
Nivel de complejidad técnica	Diseño simple; componentes comerciales estándar; fácil instalación por personal no especializado; mantenimiento básico	Componentes semi-especializados; requiere personal con experiencia técnica; instalación moderadamente compleja; mantenimiento regular	Geometrías complejas; sistemas de control avanzados (ej. pitch variable); requiere personal altamente especializado; instalación compleja
Modularidad	Unidad monolítica; difícil de desmontar; no escalable; grandes piezas únicas	Algunos componentes desmontables; modularidad parcial; posible escalar con limitaciones	Totalmente modular; fácil de transportar e instalar en sitios remotos; componentes intercambiables; altamente escalable
Escalabilidad / Replicabilidad	Poco adaptable; diseño específico de sitio; requiere rediseño para variaciones; fabricación artesanal o discontinuada	Adaptable a rango moderado de condiciones; algunos ajustes necesarios; fabricación semi-estándar	Muy replicable; diseño estándar adaptable sin rediseño; fabricación en serie disponible; múltiples instalaciones existentes
Peso / dificultad de transporte	Ligera (<50 kg); transportable manualmente o en vehículo pequeño; instalación 1-2 personas sin equipo especial	Peso moderado (50-500 kg); requiere vehículo mediano; equipo de carga moderado (winch, polipasto); instalación 3-4 personas	Pesada o voluminosa (>500 kg); requiere grúa, barcaza o equipo especializado; transporte complejo; instalación 5+ personas
Sensibilidad a sedimentos o variaciones de caudal	Tolera altas cargas de sedimentos y debris; opera con variaciones >±40% de caudal sin degradación significativa; diseño robusto para ríos con alto contenido de sólidos; bajo mantenimiento por obstrucciones	Sensibilidad moderada; tolera variaciones ±20-40% de caudal; requiere protección básica contra debris; limpieza preventiva regular; puede operar con sedimentos finos	Muy sensible; requiere filtración o desviación de debris; no tolera variaciones >±20% de caudal sin pérdida de eficiencia; requiere mantenimiento frecuente por obstrucciones; solo para aguas limpias
Impacto ambiental relativo	Mínima alteración del cauce; paso libre para peces y fauna acuática; muy pequeña o sin estructura visible; sin barrera física; velocidades de punta <8 m/s; no afecta navegación	Genera obra visible o estructura moderada; puede alterar flujo localmente; velocidades medias (8-12 m/s); peces pueden evitar, pero no quedan atrapados; impacto visual moderado; puede afectar navegación menor	Alteración significativa del cauce; estructura grande o múltiples turbinas; velocidades altas >12 m/s pueden dañar fauna; barrera parcial; impacto visual significativo; puede afectar navegación

Característica	Especializado	Estandarizado
Detalle de mantenimiento / Nivel de complejidad	Requiere personal capacitado específicamente en esa turbina; mantenimiento de sistemas de control complejos; calibración especializada; herramientas específicas	Puede realizarlo personal técnico general con conocimientos básicos de hidráulica y mecánica; mantenimiento visual e inspección; herramientas estándar; procedimientos documentados

Característica	Bajo (mantenimiento especializado)	Altos (equipos off-the-shelf)
Disponibilidad de repuestos / soporte técnico	Repuestos de difícil acceso; requieren importación directa del fabricante; tiempos largos de entrega (meses); mantenimiento depende de técnicos especializados; tecnología propietaria; producto discontinuado o en desarrollo	Repuestos estándar y fácilmente disponibles; múltiples proveedores; tiempos cortos de entrega (días-semanas); mantenimiento realizable por personal técnico generalista; componentes comerciales estándar; producto maduro y establecido

Referencias utilizadas para el benchmark

- Kirke, B. [2024]. Towards more cost-effective river hydrokinetic turbines. Documento académico. [Download Scientific Diagram](#)
- New Energy Corporation (Canadá). Sistema EnviroGen. www.newenergycorp.ca
- Idenergie (Canadá). Turbina 0.5 kW. www.idenergie.ca
- GKinetic Energy (Irlanda). Sistema 12 kW con control de pitch. www.gkinetic.ie
- Análisis técnico del equipo. Easy Hydro + Grupo Elemental. Valoraciones cualitativas basadas en experiencia acumulada en diseño e implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas y evaluación de viabilidad para contexto colombiano

Selección de literatura científica relevante sobre turbinas hidrocínéticas:

- Behrouzi, F., Nakisa, M., Maimun, A., & Ahmed, Y.M. [2016]. Global renewable energy and its potential in Malaysia: A review of Hydrokinetic turbine technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1270-1281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.057>
- Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M., & Quaicoe, J. [2009]. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823-1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- Kirke, B.K. [2020]. Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers. *Energy for Sustainable Development*, 58, 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.003>
- Lago, L.I., Ponta, F.L., & Chen, L. [2010]. Advances and trends in hydrokinetic turbine systems. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.004>
- Yuce, M.I., & Muratoglu, A. [2015]. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>
- Sood, M., & Singal, S.K. [2019]. Development of hydrokinetic energy technology: A review. *International Journal of Energy Research*, 43, 5552-5571. <https://doi.org/10.1002/er.4529>
- Tan, K.W., Kirke, B.K., & Anyi, M. [2021]. Small-scale hydrokinetic turbines for remote community electrification. *Energy for Sustainable Development*, 63(7), 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.005>
- Kusakana, K. [2014]. Techno-economic analysis of off-grid hydrokinetic-based hybrid energy systems for onshore/remote area in South Africa. *Energy*, 68(15), 947-957. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.047>
- Niebuhr, C.M., Van Dijk, M., & Bhagwan, J.N. [2021]. Development of a design and implementation process for the integration of hydrokinetic devices into existing infrastructure in South Africa. *Water SA*, 45(3). <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i3.6740>
- U.S. Department of Energy (DOE). [2020]. U.S. Department of Energy announces \$35 million in funding for hydrokinetic turbine development. <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-35-million-funding-hydrokinetic-turbine-development>
- Johnson, J.B., Kasper, J.L., Schmid, J., Duvoy, P., Kulchitsky, A., Mueller-Stoffels, M., & Seitz, A.C. [2015]. Surface debris characterization and mitigation strategies and their impact on the operation of river energy conversion devices on the Tanana River at Nenana, Alaska. Alaska Center for Energy and Power, Alaska Hydrokinetic Energy Research Center Final Report. <https://www.uaf.edu/acep/>
- Kirke, B.K., & Lazauskas, L. [2011]. Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch. *Renewable Energy*, 36, 893-897. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.027>

Bloque	Característica	W i	New Energy (Canadá)	S i	New Energetics (USA) *Posiblemente descatalogada"	S i	Idenergie (Canadá)	S i	GKinetic (Irlanda)	S i
Aspectos técnicos	Rango de altura de caída (head) [m]		[0 (hidrocinética)]		[0 (hidrocinética)]		[0 (hidrocinética)]		[0 (hidrocinética)]	
	Rango de velocidad de flujo operativo [m/s]		[1.5-5.0+ m/s]		[1.0-3.5 m/s]		[2.0-4.0 m/s]		[1.5-4.0 m/s]	
	Eficiencia pico (%)	1	90	2	86	2	85	2	92	3
	Velocidad mínima (m/s)		[2.4-3.0]		[1.0-1.5]		[2.0-2.5]		[1.5-2.0]	
	Rango de regulación o flexibilidad operativa	2	50-100% del caudal nominal	2	40-100% del caudal nominal	3	60-100% del caudal nominal	2	30-100% del caudal nominal	3
	Rangos de operación	2	5-250 kW escalable	3	1-10 kW modelos estándar	3	0.3-0.7 kW	1	5-15 kW	2
	Tipo de eje (horizontal / vertical)		Vertical		Horizontal (flujo axial)		Vertical		Vertical	
	Nivel de complejidad técnica	3	Alto	1	Medio	2	Medio	2	Muy Alto	1
	Modularidad	2	Alto	3	Alto	3	Medio	2	Medio	2
	Escalabilidad / Replicabilidad	3	Alto	3	Alto	3	Medio	2	Medio	2
	Peso / dificultad de transporte	3	Alto	1	Medio	3	Bajo	3	Alto	1
	Frecuencia de mantenimiento		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (según necesidad)		Mantenimiento preventivo (semestral) Mantenimiento correctivo (según necesidad)		Mantenimiento preventivo (anual) Mantenimiento correctivo (según necesidad)		Mantenimiento preventivo (mensual) Mantenimiento correctivo (según necesidad)	
Detalle de mantenimiento y nivel de complejidad	3	Especializado	1	Estandarizado	3	Especializado	1	Especializado (complejo)	1	
Aspectos económicos	Coste estimado de inversión (CAPEX, \$/kW) Se incluye también la instalación	2	\$10,000/kW	1	\$2,000-8,500/kW	3	\$20,000/kW	1	\$7,000/kW	2
	Coste de mantenimiento (OPEX) [% anual del CAPEX]	3	5-10%	2	3-5%	3	8-12%	1	8-12%	1
	Vida útil estimada [años]		20-25		15-20		15-20		15-20	
	Disponibilidad de repuestos / soporte técnico	3	Alto (repuestos off-the-shelf)	3	Alto (repuestos off-the-shelf)	3	Bajo (mantenimiento especializado)	1	Bajo (mantenimiento especializado)	2
Aspectos operativos	Tipo de sitio recomendado (alta montaña, llanuras, etc.)		Ríos grandes, caudal medio-alto, requiere estructura flotante		Ríos pequeños-medianos, canales, caudal bajo-medio (1-2.5 m/s)		Ríos pequeños, arroyos grandes, caudal medio-alto		Ríos medianos, caudal bajo optimizado, adaptativo	
	Sensibilidad a sedimentos	2	Alto	2	Medio	2	Medio	2	Bajo	2
	Impacto ambiental relativo	1	Medio	1	Bajo	3	Bajo	3	Bajo	2
	Aplicaciones típicas (microrredes, plantas medianas, bombeo, etc.)		Microrredes medianas, comunidades remotas, arrays escalables, industrial pequeño		Hogares individuales, bombeo, carga baterías, sistemas híbridos		Vivienda individual, cabañas remotas, refugios, sistemas respaldo		Microrredes inteligentes, gestión demanda, sistemas híbridos, monitoreo remoto	
Puntuación global				58		84		51		51

2.6.5. Conclusiones Benchmark Hidrocinéticas

El benchmark de turbinas hidrocinéticas permite identificar qué tecnologías de flujo libre son más viables para aplicaciones en Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, particularmente en regiones de planicie como la Amazonia, Orinoquia, zonas costeras y valles interandinos donde los ríos presentan velocidades moderadas (1-2 m/s) sin desniveles aprovechables. Estas zonas comparten desafíos comunes: accesos difíciles, transporte limitado a embarcaciones o vehículos pequeños, alta carga de sedimentos y debris, y escasa disponibilidad de técnicos especializados. En este contexto, la selección tecnológica depende críticamente del peso, la velocidad mínima de operación, la facilidad de transporte, el mantenimiento estandarizado y los costes del ciclo de vida.

New Energetics (USA) obtuvo la mayor puntuación del análisis con 84 puntos, destacándose significativamente por sus características técnicas ideales: velocidades de operación muy bajas (1.0-1.5 m/s), CAPEX competitivo (\$2,000-8,500/kW), peso transportable (<150 kg), mantenimiento estandarizado único en su clase, OPEX bajo (3-5%) y alta modularidad. Sin embargo, debe descartarse como opción viable debido a que su disponibilidad comercial actual no ha podido ser confirmada. No se ha logrado establecer contacto con la empresa, sugiriendo que podría estar descontinuada o inactiva. A pesar de su excelente puntuación técnica, una tecnología sin disponibilidad verificable no representa una solución práctica para proyectos reales.

Descartada New Energetics, New Energy Corp (Canadá) se posiciona como la mejor opción comercialmente disponible con 58 puntos. Esta turbina, aunque presenta limitaciones importantes, cuenta con disponibilidad verificable, proyectos documentados (Sagkeeng First Nation, Bay of Fundy) y soporte comercial activo. Sus principales restricciones incluyen: velocidades mínimas altas (2.4-3.0 m/s) que limitan aplicabilidad en ríos de bajo flujo, peso considerable (>300 kg) que exige equipos de izaje, CAPEX elevado (\$10,000/kW), alta sensibilidad a sedimentos y requerimiento de mantenimiento especializado. Podría considerarse en casos específicos con ríos de flujo vigoroso (>2.5 m/s constantes), acceso adecuado para transporte de equipos pesados y presupuesto suficiente para la inversión inicial.

Las tres tecnologías restantes con disponibilidad verificable presentan puntuaciones relativamente cercanas (New Energy Corp: 58 puntos, GKinetic e Idenergie: 51 puntos cada una), lo que refleja que ninguna representa una solución claramente superior en el mercado actual. GKinetic (Irlanda, 51 puntos) enfrenta barreras críticas para aplicaciones en ZNI colombianas: peso prohibitivo de 1.9 toneladas que requiere grúa o barcaza (inviabile en zonas remotas), mantenimiento altamente complejo con control de pitch activo, CAPEX moderado-alto (\$7,000/kW) y disponibilidad limitada por encontrarse en fase de desarrollo comercial temprana. Idenergie (Canadá, 51 puntos) presenta limitaciones igualmente restrictivas: capacidad extremadamente reducida (0.3-0.7 kW, promedio 0.5 kW) insuficiente para la mayoría de las aplicaciones comunitarias, y el CAPEX más elevado del conjunto (\$20,000/kW), aproximadamente 10 veces superior a New Energetics y el doble que New Energy Corp, lo que la hace económicamente prohibitiva excepto para aplicaciones individuales muy específicas.

La conclusión del benchmark es cautelosa: entre las tecnologías hidrocinéticas comercialmente disponibles, ninguna representa una solución claramente óptima para el contexto colombiano. New Energy Corp, con 58 puntos, constituye la mejor opción verificable pero solo para escenarios muy específicos (ríos >2.5 m/s, acceso adecuado, presupuesto elevado). GKinetic e Idenergie,

con 51 puntos cada una, enfrentan barreras estructurales, peso excesivo y capacidad insuficiente respectivamente, que limitan drásticamente su aplicabilidad. La estrecha diferencia de puntuación entre las tres opciones disponibles (58-51-51) subraya la ausencia de tecnologías hidrocínéticas maduras, accesibles y adaptadas a las condiciones reales de los ríos colombianos de planicie.

2.7. Conclusiones del Benchmark

Los dos análisis comparativos desarrollados, turbinas hidroeléctricas convencionales y turbinas hidrocínéticas, establecen un marco de referencia técnico-económico complementario para la electrificación de Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia. Ambos benchmarks revelan un patrón consistente: las tecnologías que triunfan en contextos rurales aislados combinan simplicidad mecánica, bajo peso, mantenimiento estandarizado y costes accesibles. Sin embargo, el análisis comparativo revela una asimetría económica fundamental que condiciona decisivamente la viabilidad de cada familia tecnológica.

La diferencia de costes entre ambas tecnologías es abismal y constituye el factor determinante cuando existe libertad de elección geográfica. Las turbinas hidroeléctricas convencionales presentan rangos de CAPEX de \$50-950/kW (PAT: \$50-150/kW, Crossflow: \$150-250/kW), mientras que las turbinas hidrocínéticas comerciales oscilan entre \$7,000-20,000/kW (New Energy Corp: \$10,000/kW, GKinetic: \$7,000/kW, Idenergie: \$20,000/kW). Esto significa que las hidrocínéticas son entre 10 y 100 veces más caras por kW instalado que las hidroeléctricas cuando se mide en términos de capacidad nominal. Esta brecha se amplifica al considerar OPEX (hidrocínéticas: 3-12% anual vs. hidroeléctricas: 1-4%) y vida útil (hidrocínéticas: 15-25 años vs. hidroeléctricas: 25-40 años). En términos prácticos: una instalación PAT de 5 kW puede costar \$500-750, mientras que una New Energy Corp equivalente alcanza \$50,000, entre 70 y 100 veces más cara para la misma capacidad nominal.

Vale señalar que New Energetics (USA), que obtuvo la mayor puntuación técnica del análisis hidrocínético con 84 puntos y presentaba costes más accesibles (\$2,000-8,500/kW), debe descartarse por disponibilidad comercial no confirmada. Este descarte agrava aún más la brecha económica, ya que las únicas opciones hidrocínéticas verificables presentan costes significativamente superiores.

Esta diferencia económica no es marginal sino estructural, derivada de tres factores fundamentales:

- **Inmadurez de mercado:** las hidrocínéticas son tecnologías emergentes con volúmenes de producción limitados, sin economías de escala, frente a hidroeléctricas con más de un siglo de desarrollo industrial.
- **Complejidad técnica relativa:** capturar energía de flujo libre a 1-2 m/s requiere turbinas de gran área barrida y sistemas robustos de anclaje/flotación, mientras que aprovechar 10-50 m de caída con caudales modestos permite equipos más compactos y eficientes.
- **Cadenas de suministro:** PAT y Crossflow tienen fabricación local/regional accesible, mientras que todas las hidrocínéticas requieren importación desde USA, Canadá o Europa con costes logísticos significativos.

La complementariedad entre ambas familias tecnológicas debe entenderse no como una competencia de alternativas equivalentes, sino como soluciones específicas para contextos geográficos mutuamente excluyentes. Esta distinción es crítica para evitar interpretaciones erróneas:

Cuando existe altura de caída aprovechable, incluso mínima, desde 5-10 metros, las turbinas hidroeléctricas convencionales (PAT, Crossflow, Turgo) son la opción inequívoca debido a su radical ventaja económica (10-100 veces más baratas), madurez tecnológica, disponibilidad de componentes y experiencia acumulada. En estos contextos, elegir una turbina hidrocínética representaría una mala asignación de recursos, sacrificando 70-100% del presupuesto disponible para obtener la misma capacidad instalada que se lograría con tecnologías convencionales probadas.

Sin embargo, cuando la geografía impone flujo continuo sin desnivel aprovechable, extensas planicies amazónicas y orinocenses, valles interandinos amplios de pendiente nula, zonas costeras y tramos fluviales donde la ausencia total de altura hace físicamente imposible instalar una micro-PCH, las turbinas hidrocínéticas adquieren plena justificación técnica y económica a pesar de su mayor coste. En estos contextos sin altura de caída, la comparación relevante no es hidrocínética versus hidroeléctrica (comparación irrelevante por imposibilidad física), sino hidrocínética versus generación diésel. Bajo esta óptica, a pesar del CAPEX significativamente mayor, la hidrocínética puede resultar competitiva considerando:

- Eliminación de costes recurrentes de combustible (\$1.50-3.00/litro en zonas remotas)
- Eliminación de transporte logístico complejo de diésel por río/helicóptero
- Eliminación de mantenimiento frecuente de motores
- Eliminación de riesgos de desabastecimiento energético por problemas logísticos.

En estas geografías específicas, el mayor CAPEX hidrocínético se justifica como inversión única frente a costes operativos perpetuos del diésel.

La clave está, por tanto, en aplicar el criterio de selección correcto según el contexto: si existe altura de caída, el coste es la variable dominante y las hidroeléctricas convencionales son superiores; si no existe altura de caída, la física dicta la única opción posible y el coste debe evaluarse contra la alternativa real (diésel), no contra una tecnología geográficamente inaplicable.

El análisis revela, además, asimetrías importantes en la madurez tecnológica y disponibilidad comercial. Las turbinas hidroeléctricas convencionales, especialmente PAT y Crossflow, cuentan con décadas de experiencia acumulada, cadenas de suministro bien establecidas, fabricación local o regional accesible (talleres metalmecánicos en ciudades intermedias pueden reparar o fabricar componentes) y personal técnico familiarizado con su operación. En contraste, las turbinas hidrocínéticas comerciales enfrentan barreras estructurales: todas requieren importación; carecen de distribuidores regionales en Latinoamérica; presentan disponibilidad limitada de repuestos (particularmente crítico para New Energy Corp e Idenergie con mantenimiento especializado); y demandan tiempos de entrega que pueden extenderse 4-8 meses considerando fabricación, envío internacional, nacionalización y transporte a zonas remotas. Esta fragilidad de cadena de suministro representa un riesgo operativo adicional que debe ponderarse en la evaluación de viabilidad.

No obstante, el desarrollo de capacidades locales en hidrocínéticas representa una oportunidad estratégica de innovación tecnológica nacional con potencial de reducción dramática de costes. La relativa simplicidad de diseños documentados en literatura (flujo axial tipo New Energetics, <150 kg, mantenimiento estandarizado) contrasta favorablemente con la complejidad de fabricar turbinas Francis o Kaplan de calidad.

En síntesis, el benchmark dual establece que la electrificación efectiva de ZNI depende de aplicar el criterio de selección adecuado a cada contexto geográfico. PAT y Crossflow constituyen la base sólida y económicamente viable para la inmensa mayoría de sitios con potencial hidroeléctrico donde existe altura de caída, las turbinas hidrocínéticas (New Energy Corp como mejor opción verificable) representan la única solución hidroeléctrica posible en territorios planos específicos donde su coste, aunque 10-100 veces superior a convencionales, debe compararse contra diésel, no contra tecnologías geográficamente inaplicables; y el desarrollo local de prototipos hidrocínéticos representa una apuesta estratégica de mediano plazo para democratizar el acceso a estas tecnologías mediante reducción sustancial de costes. La realidad es matizada: las hidrocínéticas no son "demasiado caras" en términos absolutos, sino que son apropiadas únicamente en contextos geográficos muy específicos donde la física, no la economía, define la tecnología aplicable. En sitios con altura de caída, las hidroeléctricas convencionales son superiores por su ventaja económica radical, en sitios sin desnivel alguno, las hidrocínéticas son la única opción hidroeléctrica posible y su viabilidad debe evaluarse contra generación diésel considerando costes del ciclo de vida completo.

3. Especificaciones Técnicas y Requerimientos de Implementación

Después de haber evaluado las diferentes tecnologías hidroeléctricas disponibles en el mercado a través del proceso de benchmarking, y habiendo identificado aquellas que mejor se adaptan a las condiciones particulares de las Zonas No Interconectadas de Colombia, el siguiente paso natural es traducir ese conocimiento tecnológico en criterios técnicos concretos que permitan implementar proyectos reales sobre el terreno.

Este capítulo representa el puente entre la teoría y la práctica. Mientras que el benchmarking nos mostró qué tecnologías existen y cuáles son sus características comparativas, esta sección establece cómo dimensionar, diseñar e implementar estas tecnologías en el contexto específico de las comunidades colombianas sin acceso a electricidad. Aquí se definen los parámetros técnicos fundamentales que determinarán el éxito o fracaso de cada proyecto: desde la potencia requerida por vivienda según la zona climática, hasta los criterios de diseño que garantizan operación continua incluso durante fenómenos climáticos adversos como El Niño.

La filosofía que guía este capítulo es clara: desarrollar soluciones que sean técnicamente robustas pero operativamente simples, que minimicen la necesidad de obras civiles costosas y complejas, y que puedan ser replicadas y escaladas a lo largo de las diferentes regiones de las ZNI. No se trata solo de llevar electricidad a comunidades aisladas, sino de hacerlo de manera sostenible, económicamente viable y con tecnologías que puedan ser mantenidas con recursos y conocimientos locales.

A continuación, se presentan los fundamentos técnicos, criterios de diseño, niveles de eficiencia esperados y consideraciones prácticas que conforman el marco metodológico para la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en las Zonas No Interconectadas de Colombia.

3.1. Conceptos básicos

La potencia de una central hidroeléctrica se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$P = \gamma * \eta * QD * H \quad (1)$$

Donde:

- P : es la Potencia [kW]
- γ : es el peso específico del agua [kN/m³]
- η : es la eficiencia de las unidades de generación [turbina, generador] [-]
- QD : es el caudal de diseño [m³/s]
- H : es el salto neto, equivalente al salto bruto menos las pérdidas de energía por la conducción [metros]

3.2. Criterios de implementación

3.2.1. Potencia pico requerida por proyecto

Según el Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura de Energía Eléctrica de Colombia 2024-2028, desarrollado por UPME, el consumo de cada vivienda por zona climática es el que se muestra a continuación.

La Tabla 1 presentada a continuación resume los consumos promedio de potencia y energía por vivienda en función de cada zona climática de Colombia. Esta información es fundamental para dimensionar adecuadamente los sistemas de generación hidroeléctrica en las ZNI, ya que permite estimar la demanda energética real de las comunidades objetivo según las condiciones climáticas particulares de cada región.

TABLA 1: CONSUMOS DE POTENCIA Y ENERGÍA POR CADA ZONA CLIMÁTICA. FUENTE: PIEC 2024-2028, UPME

Zona climática	Energía mensual [kWh-mes]	Energía diaria [kWh-día]	Potencia pico [W]
TIPO 1 - FRÍO	95	3,2	1002
TIPO 2 - TEMPLADO	90	3,0	1002
TIPO 3 - CÁLIDO SECO	110	3,7	1002
TIPO 4 - CÁLIDO HÚMEDO	145	4,8	1339

Como se observa en la tabla anterior, el consumo energético varía significativamente entre las diferentes zonas climáticas. La Zona 4 [Cálido Húmedo] presenta el mayor consumo energético con 2.0 kW de potencia y 170.8 kWh/mes por vivienda, mientras que las demás zonas tienen consumos menores que oscilan entre 1.5-1.6 kW y 123.3-132.2 kWh/mes. Esta variabilidad es crucial para el diseño de las centrales hidroeléctricas, ya que determina la capacidad mínima requerida por proyecto.

Considerando un factor de planta de una central hidroeléctrica del 65%, la potencia instalada requerida por vivienda debe ser la que se muestra a continuación.

TABLA 2: POTENCIA PICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tipo	Energía diaria [kWh/día]	Potencia media consumida [kW]	Potencia pico consumida [kW]	Potencia pico requerida* [kW]
1	3.20	0.13	1.00	1.54
2	3.00	0.13	1.00	1.54
3	3.70	0.15	1.00	1.54
4	4.80	0.20	1.34	2.06
* Considerando		65%	de factor de planta	
** Datos por vivienda				

La Tabla 2 muestra la potencia pico requerida por vivienda considerando un factor de planta del 65%. Como se aprecia, para la Zona 4 [Cálido Húmedo], que presenta el mayor consumo, se requiere una potencia instalada de 2.0 kW por vivienda. Este factor de planta del 65% es un parámetro clave que permite garantizar el suministro energético incluso durante periodos de menor disponibilidad hídrica, asegurando que la central opere a su capacidad nominal durante aproximadamente el 65% del tiempo anual.

Si se considera una pico-central hidroeléctrica como aquella cuya potencia instalada es de 5 kW o menos, cada central de estas podría abastecer de energía eléctrica hasta 2.5 viviendas en el peor de los casos (Zona climática 4) y un poco más de 3.0 viviendas en las demás zonas climáticas.

El objeto final de este proyecto es definir los aspectos que se requieran (fundamentalmente técnicos y normativos) para lograr abastecer rápidamente y a un coste asumible la mayor cantidad de población asentada en las Zonas No Interconectadas, ZNI, en las que haya potencial hidroenergético, más allá de las concentraciones de 2 a 3 viviendas.

Esto implica que deberán evaluarse proyectos de mayor potencia que las definidas para una pico-central hidroeléctrica, incluso aquellos que puedan desarrollarse bajo el criterio de pocas o nulas obras civiles. La potencia se define en función del caudal y del salto hidráulico, tal como se muestra en los ejemplos para la Zona Climática Tipo 4 [Cálido Húmedo] presentados en la siguiente tabla, considerando como referencia el abastecimiento energético de viviendas existentes sin acceso previo al servicio eléctrico, y no la construcción de nuevas viviendas en el entorno de las PCH.

TABLA 3: CAUDAL Y VIVIENDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Caudal nominal [m3/s]	Caudal nominal [l/s]	Salto [m]	Potencia instalada [kW]	Cantidad de viviendas
0.025	25	20	3.90	2.0
0.025	25	40	7.80	3.9
0.025	25	60	11.70	5.9
0.050	50	20	7.80	3.9
0.050	50	40	15.60	7.8
0.050	50	60	23.40	11.7
0.075	75	20	11.70	5.9
0.075	75	40	23.40	11.7
0.075	75	60	35.10	17.6
0.100	100	20	15.60	7.8
0.100	100	40	31.20	15.6
0.100	100	60	46.80	23.4

La Tabla 3 presenta ejemplos específicos para la Zona Climática Tipo 4 [Cálido Húmedo], mostrando la relación entre el caudal nominal de la central, el salto hidráulico disponible, y el número de viviendas que pueden ser abastecidas. Esta tabla es fundamental para comprender la escalabilidad de los proyectos hidroeléctricos en las ZNI. Como se observa, con un caudal nominal de apenas 20 l/s y un salto de 50 metros, es posible abastecer aproximadamente 6 viviendas, mientras que con 100 l/s y 10 metros de salto se pueden atender hasta 10 viviendas. La

tabla demuestra que existen múltiples configuraciones de caudal y salto que permiten alcanzar diferentes objetivos de cobertura poblacional.

El caudal determina la cantidad de obra civil requerida, tal como se definirá más adelante. Caudales nominales de 100 l/s implican caudales medios de la corriente de 400 l/s si se sigue el criterio definido más adelante, lo que implica caudales máximos instantáneos muchos más altos (incluso pueden ser 35 veces mayores cuando el período de retorno es de 100 años). Esos caudales ya es difícil captarlos sin obras civiles.

3.2.2. Área de cuenca y caudal medio de la corriente de agua

Una vez establecido el rango de caudales nominales necesarios para abastecer las comunidades objetivo, es fundamental determinar el tamaño de las cuencas hidrográficas requeridas para generar dichos caudales. Este análisis es crucial para identificar sitios potenciales de aprovechamiento hidroeléctrico en las ZNI, ya que permite establecer criterios de selección basados en las dimensiones de las cuencas y sus características hidrológicas.

Definido un valor máximo de 500 l/s como caudal medio multianual de la corriente a evaluar, se puede hacer una estimación rápida de las precipitaciones y evapotranspiraciones requeridas para tener esos valores mediante la metodología de balance hídrico de largo plazo:

$$\langle \bar{P} \rangle - \langle \bar{Q} \rangle = \langle \bar{ET} \rangle + \eta \quad (2)$$

donde:

- $\langle \bar{P} \rangle$: precipitación media del período y área
- $\langle \bar{Q} \rangle$: caudal medio del período y área
- $\langle \bar{ET} \rangle$: evapotranspiración media del período y área
- η : término de discrepancia

En este informe se ha presentado también las características hidroclimatológicas de las ZNI de interés para este proyecto. Se ven que las primeras están, en promedio, entre 1500 y 4000 mm/año y las segundas entre 800 mm/año y 100 mm/año. Teniendo en cuenta esos valores, se puede obtener la siguiente tabla.

TABLA 4: CAUDALES MEDIOS MULTIANUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PPT [mm/año]	EVT [mm/año]	A [km ²]	Caudal medio multianual [m ³ /s]	Caudal medio multianual [l/s]
2000	1000	1	0.03	31.69
2000	1000	2	0.06	63.37
2000	1000	3	0.10	95.06
2000	1000	4	0.13	126.74
2000	1000	5	0.16	158.43
4000	1000	1	0.10	95.06
4000	1000	2	0.19	190.11
4000	1000	3	0.29	285.17
4000	1000	4	0.38	380.23
4000	1000	5	0.48	475.29

Es decir, los caudales medios multianuales requeridos para los proyectos a plantear en este estudio son del orden de 5 km² cuando las precipitaciones son de 4000 mm/año y, por ende, del orden del doble, 10 km², cuando las lluvias son de unos 2000 mm/año.

3.2.3. Caudal nominal y factor de planta

Entendiendo que lo que se busca es garantizar el abastecimiento energético a estas comunidades durante la mayor parte del tiempo, el criterio de diseño deberá establecer el caudal nominal o de diseño de cada proyecto con un valor inferior al caudal medio de la corriente de agua. En determinados períodos de bajos caudales, asociados a fenómenos climáticos como El Niño, la oferta hídrica (en términos de caudales medios) en algunas regiones de Colombia puede disminuir entre un 40 % y un 50 %.

Con el objeto de garantizar el abastecimiento de energía eléctrica incluso durante estos períodos críticos, se adopta como criterio de diseño el dimensionamiento de los proyectos con un caudal equivalente al 25 % del caudal medio multianual de la corriente de agua. Este valor corresponde a un criterio de buena práctica basado en la experiencia técnica y operacional del equipo de la empresa Grupo Elemental en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala, y permite alcanzar factores de planta superiores al 90 % bajo condiciones puramente hidrológicas.

3.2.4. Obras civiles

Se plantearán proyectos con una tipología que no requiera o, en su defecto, que requiera mínimas construcciones de obra civil realizadas in-situ. El caudal máximo instantáneo asociado con 100 años de período de retorno es el caudal normalmente empleado como criterio para la captación de una central de este tipo. Cuando el caudal medio multianual es mayor que 500 l/s (esto es, cuando el caudal de 100 años de período de retorno es de unos 15 m³/s), ya es necesario hacer una captación de aguas con obra civil en cualquier corriente. Cuando el caudal medio multianual

está entre 100 l/s y 500 l/s, se podrá captar el agua sin necesidad de obras civiles dependiendo de la velocidad del agua y, por ende, de la pendiente del agua.

3.2.5. Equipos electromecánicos

Los equipos electromecánicos y de control serán lo más compactos posibles, de tal forma que puedan ser puestos en operación rápidamente y por personal sin mucho conocimiento del asunto.

3.2.6. Tamaño de los elementos

Con el fin de poder ser transportados incluso por caminos de herradura, se plantea el elemento más pesado de hasta 150 kg.

3.2.7. Replicabilidad y modularidad

Se plantearán tipologías y arreglos que permitan replicar el mismo proyecto tantas veces como sea posible. En algunos casos, incluso, podrán proponerse arreglos en serie o en paralelo de los mismos equipos, de tal forma que se multiplique la potencia de cada equipo.

3.3. Niveles de eficiencia y operatividad

3.3.1. Niveles de eficiencia

Para los cálculos planteados en el apartado anterior, se ha hecho uso de un factor de eficiencia combinado de la unidad de generación del 78.0%, lo que parece ser bajo para casi todas las tecnologías analizadas (excepto la crossflow). Ya en el apartado relacionado con el Benchmark, se describió que las eficiencias al pico de las diferentes turbinas son las que se muestran a continuación. En esa tabla se ha incluido además la eficiencia promedio del generador del 90% (que es baja en relación con lo que se encuentra hoy en día en el mercado) y la eficiencia de la unidad generadora.

TABLA 5: EFICIENCIAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Eficiencia de turbina	Eficiencia de generador	Eficiencia unidad
Francis:	92%	90.0%	82.8%
PAT:	86%	90.0%	77.4%
Pelton:	90%	90.0%	81.0%
Kaplan:	89%	90.0%	80.1%
Turgo:	87%	90.0%	78.3%
Crossflow:	70%	90.0%	63.0%
Deriaz:	90%	90.0%	81.0%
Bulbo:	90%	90.0%	81.0%

Es decir, el análisis podrá hacerse perfectamente para una eficiencia al pico de la unidad generadora del 78.0%.

3.3.2. Niveles de operatividad

La operatividad mínima, entendida como el caudal mínimo turbinable en relación con el caudal nominal de la unidad de generación, de cada una de las turbinas es la que se muestra a continuación.

TABLA 6: CAUDAL MÍNIMO TURBINABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Caudal mínimo turbinable/Caudal nominal
Francis:	40.0%
PAT:	55.0%
Pelton:	20.0%
Kaplan:	30.0%
Turgo:	20.0%
Crossflow:	20.0%
Deriaz:	40.0%
Bulbo:	50.0%

Debido al criterio planteado de establecer el caudal nominal de la central como el 25% del caudal medio multianual de la cuenca, los caudales mínimos turbinables de todos los tipos de turbinas son muy bajos en relación con el caudal medio multianual de la corriente de agua, tanto como los que se muestran en la siguiente tabla, lo que garantizará que por esta razón las centrales siempre puedan estar operando. Dicho de otro modo, no hay fenómeno climático en Colombia que haya hecho disminuir los caudales medios de las corrientes de agua tanto como el 10%-15%.

TABLA 7: CAUDAL MÍNIMO TURBINABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Caudal mínimo turbinable/Caudal nominal	Caudal nominal/Caudal medio multianual	Caudal mínimo turbinable/Caudal medio multianual
Francis:	40.0%	25.0%	10.0%
PAT:	55.0%	25.0%	13.8%
Pelton:	20.0%	25.0%	5.0%
Kaplan:	30.0%	25.0%	7.5%
Turgo:	20.0%	25.0%	5.0%
Crossflow:	20.0%	25.0%	5.0%
Deriaz:	40.0%	25.0%	10.0%
Bulbo:	50.0%	25.0%	12.5%

4. Compilación de casos de estudio

Con las tecnologías evaluadas y los criterios técnicos de implementación establecidos, llegamos ahora al momento crucial donde la planificación debe confrontarse con la realidad del territorio. Las Zonas No Interconectadas de Colombia no son un escenario homogéneo: cada región presenta su propia combinación única de condiciones geográficas, climáticas, hidrológicas, socioeconómicas y ambientales. Lo que funciona en la húmeda región Pacífica puede no ser viable en las planicies de la Orinoquía, y lo que es apropiado para las comunidades de la Sierra Nevada puede requerir adaptaciones significativas en la Amazonía.

Este capítulo representa el ejercicio de aterrizar el conocimiento adquirido en contextos reales y específicos. A través de la selección y análisis detallado de casos de estudio representativos, se busca capturar la diversidad del territorio colombiano y demostrar cómo los principios técnicos establecidos en los capítulos anteriores deben adaptarse y modularse según las particularidades locales. Los casos de estudio no son meramente ejemplos académicos, sino laboratorios vivos donde se validarán las metodologías propuestas, se identificarán desafíos específicos de implementación, y se generarán lecciones aprendidas que puedan ser replicadas en contextos similares a lo largo de las ZNI.

La metodología de selección de casos se fundamenta en criterios múltiples que abarcan desde la topografía y el régimen de precipitaciones, hasta las características socioeconómicas de las comunidades y las restricciones ambientales del territorio. El objetivo es identificar sitios que, por un lado, sean representativos de las condiciones prevalentes en amplias áreas de las ZNI y, por otro, presenten condiciones técnicas favorables para el desarrollo de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. A través de este análisis, se construirá un puente entre la teoría técnica y la implementación práctica, identificando no solo las oportunidades sino también los obstáculos y las estrategias para superarlos.

4.1. Introducción

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) abarcan entre el 52 % y el 53 % del territorio nacional, alrededor de 595.000 km² y concentran cerca del 3,8 % de la población colombiana. De estos habitantes, se estima que solo la mitad dispone actualmente de acceso a servicios de energía. A pesar de su gran extensión, las ZNI representan únicamente el 1,5 % de la capacidad eléctrica instalada del país (311.439 kW de un total de 20,7 GW).

Este vasto territorio presenta una notable diversidad geográfica, climática, social y cultural, lo que implica que las soluciones energéticas deben adaptarse a contextos muy específicos. En la figura siguiente se observan las ZNI delimitadas en color verde.

Para efectos de análisis y con el fin de identificar oportunidades para pequeños desarrollos hidroeléctricos, el área se ha subdividido en cinco regiones, marcadas en rojo:

- Región Pacífica
- Tolima
- Orinoquía y Amazonía
- Córdoba, Bolívar y Norte de Santander
- Sierra Nevada de Santa Marta

Esta clasificación permite evaluar con mayor precisión el potencial hidroenergético distribuido y las características particulares de cada zona.

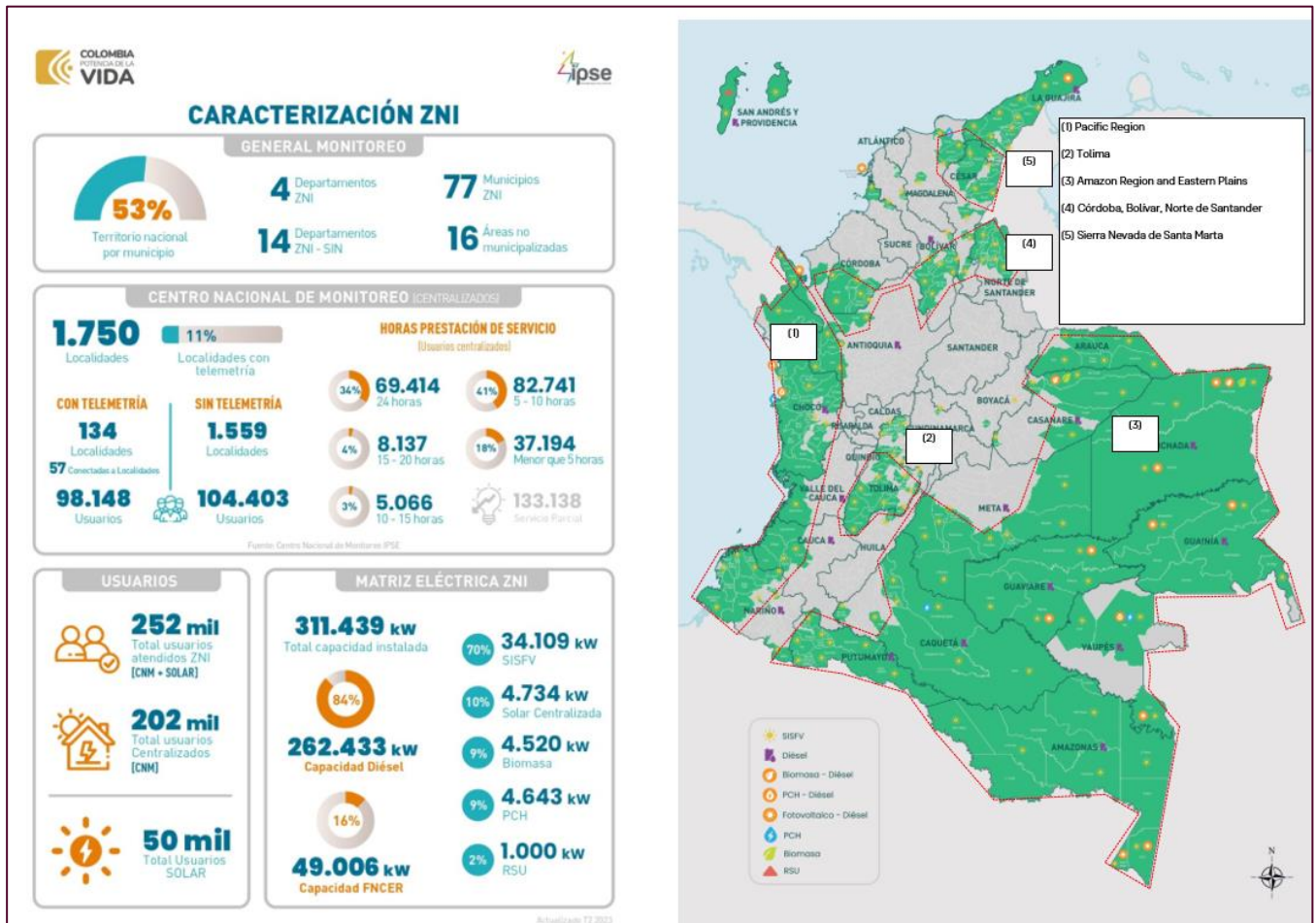


ILUSTRACIÓN 13: ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)¹

La Ilustración 14 muestra la distribución geográfica de las Zonas No Interconectadas (ZNI) a lo largo del territorio colombiano, identificadas en color verde. Estas zonas, que representan entre el 52% y 53% del territorio nacional (aproximadamente 595,000 km²), concentran cerca del 3.8% de la población colombiana. El mapa también destaca las cinco regiones de análisis definidas para este estudio, marcadas en rojo: Región Pacífica, Tolima, Orinoquía y Amazonía, Córdoba-Bolívar-Norte de Santander, y Sierra Nevada de Santa Marta. Esta subdivisión regional permite evaluar con mayor precisión el potencial hidroenergético distribuido y las características particulares de cada zona, considerando su diversidad geográfica, climática, social y cultural.

Toda esta área se está analizando con el objetivo de identificar el potencial hidroenergético apto para pico centrales capaces de abastecer pequeñas comunidades. Para ello, se definió la necesidad de estudiar en detalle tres casos representativos que permitan capturar la diversidad y las condiciones reales del territorio.

La selección de estos casos se realizó a partir de un conjunto de criterios técnicos, geográficos y socioambientales, los cuales se describen a continuación.

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

4.2. Criterios de selección

A continuación, se describen los criterios de selección de casos de estudio.

4.2.1. Condiciones geográficas

En la figura siguiente se presenta un mapa del relieve de Colombia, en el cual se distinguen con claridad las principales Zonas No Interconectadas. Estas comprenden la región Pacífica (1), amplias áreas de la Orinoquía y la Amazonía (3), algunos sectores dispersos de la región Andina (2 y 4) y una porción de la región Caribe (5).

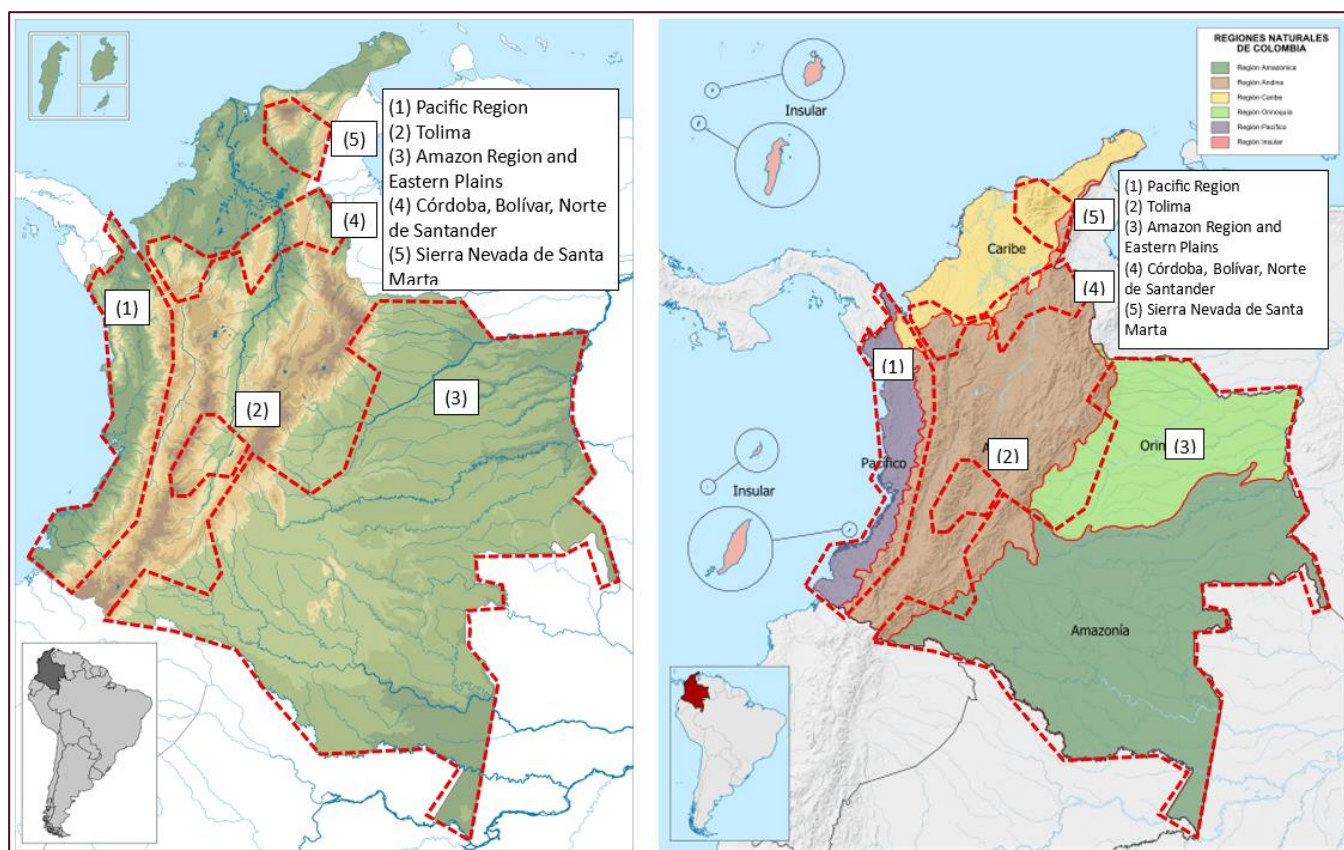


ILUSTRACIÓN 14: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONDICIONES GEOGRÁFICAS²

² Fuente: [IPSE – CNM - Caracterización Energética de las ZNI](#)

A continuación, una descripción general de cada una de ellas:

1. Región Pacífica

La zona (1) corresponde íntegramente a la región Pacífica colombiana. Abarca la mayor parte del denominado *Chocó biogeográfico*, incluyendo casi la totalidad del departamento del Chocó y las franjas costeras de los departamentos de Valle del Cauca, Cauca y Nariño. Se localiza en el extremo occidental del país, limitando al norte con Panamá, al noreste con la región Caribe, al

este con la cordillera Occidental, que la separa de la región Andina, al sur con Ecuador y al oeste con el océano Pacífico, de donde toma su nombre.

En su parte norte predominan serranías de mediana altura, como la serranía del Baudó y la serranía del Darién, mientras que hacia el oriente aparecen las estribaciones de la cordillera Occidental. En términos generales, se trata de una región montañosa, salvo en los valles formados por los grandes ríos Atrato, San Juan, Mira y Patía.

La región Pacífica se destaca por su extraordinaria riqueza ecológica, hidrográfica, forestal y minera, y alberga varios parques nacionales naturales. Es reconocida mundialmente como uno de los territorios con mayor biodiversidad y pluviosidad del planeta, con precipitaciones superiores a los 4.000 mm anuales. Asimismo, constituye un importante núcleo cultural afrocolombiano y hogar de numerosas comunidades indígenas.

2. Tolima

Esta zona se encuentra completamente dentro del departamento del Tolima, perteneciente a la región Andina de Colombia. Esta región toma su nombre de la cordillera de los Andes, que al ingresar al territorio colombiano se divide en tres ramales, Occidental, Central y Oriental a partir de los nudos de los Pastos y del Macizo Colombiano. El departamento del Tolima se ubica sobre la cordillera Central, por lo que presenta un relieve predominantemente montañoso. Solo en el área correspondiente al valle del río Magdalena se observan pendientes más suaves y un paisaje menos abrupto.

3. Regiones Amazonía y Orinoquía

La región Amazónica de Colombia se ubica en el extremo sur del país, limitando al norte con las regiones Andina y Orinoquía; al este con Venezuela; al sureste con Brasil; al sur con Perú; y al suroeste con Ecuador. Está enmarcada al occidente por la cordillera de los Andes y se extiende hacia el oriente hasta las fronteras con Brasil, Perú, Ecuador y Venezuela. De norte a sur, su territorio abarca desde los ríos Guaviare y Vichada hasta el Putumayo y el Amazonas.

Los departamentos del Putumayo y Caquetá presentan zonas montañosas asociadas con las estribaciones orientales de la cordillera Oriental, conformando el denominado Piedemonte Amazónico. El resto de la región corresponde a una amplia planicie boscosa que incluye las llanuras del Caquetá, Inírida, Guaviare, Yarí y Putumayo. También alberga serranías aisladas como la del Chiribiquete. Gran parte de su superficie está cubierta por selva tropical.

Por su parte, la región de la Orinoquía se ubica en el oriente del país, limitando al norte y al este con Venezuela, al sur con la Amazonía y al oeste con la región Andina. Su configuración está determinada por la cuenca del río Orinoco, lo que le otorga un carácter predominantemente plano. La Orinoquía coincide en gran medida con dos unidades que suelen confundirse:

1. La cuenca hidrográfica del río Orinoco, que se extiende desde los Andes hasta la selva amazónica e incluye las cuencas de los ríos Meta, Guaviare y Guainía.
2. Los Llanos, una región natural y cultural colombo-venezolana caracterizada por sus extensas sabanas de clima intertropical y por la presencia de bosques de galería.

4. Córdoba, Bolívar y Norte de Santander

Esta zona corresponde a las áreas de los departamentos de Córdoba, Bolívar y Norte de Santander que se encuentran sobre las estribaciones septentrionales de las tres cordilleras: la cordillera Occidental en Córdoba, la cordillera Central en Bolívar y la cordillera Oriental en Norte de Santander. Se trata de regiones de relieve montañoso que descienden hacia el norte hasta encontrarse con las planicies características de la región Caribe.

5. Sierra Nevada de Santa Marta

La Sierra Nevada de Santa Marta es una cordillera independiente de los Andes que se eleva de manera abrupta desde la costa Caribe colombiana hasta alcanzar picos nevados de hasta 5.710 msnm. Ubicada en el extremo norte del país, se extiende por los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira. Por su naturaleza geológica y morfológica, constituye una zona plenamente montañosa.

4.2.2. Condiciones hidrológicas

Mientras que la topografía define el potencial de salto disponible, son las condiciones hidrológicas las que determinan la cantidad de energía que efectivamente puede ser generada. El régimen de precipitaciones y la evapotranspiración se combinan para definir los caudales medios multianuales de las corrientes de agua, que a su vez determinan la capacidad de generación sostenible de cada proyecto. Una cuenca puede tener un excelente salto hidráulico, pero si no cuenta con suficiente precipitación o si la evaporación es excesiva, el potencial hidroeléctrico será limitado. Por el contrario, en zonas de alta pluviosidad como la región Pacífica, incluso saltos modestos pueden generar cantidades significativas de energía debido a los abundantes caudales disponibles.

A continuación, se presenta una descripción de las condiciones hidrológicas de cada una de las zonas definidas para este proyecto.

Considerando que los caudales medios multianuales resultan del balance entre precipitación y evapotranspiración en cada cuenca, se incluyen en las figuras siguientes los mapas de precipitación y evapotranspiración media multianual del país. La información proviene de registros del IDEAM correspondientes al periodo 1981–2010.

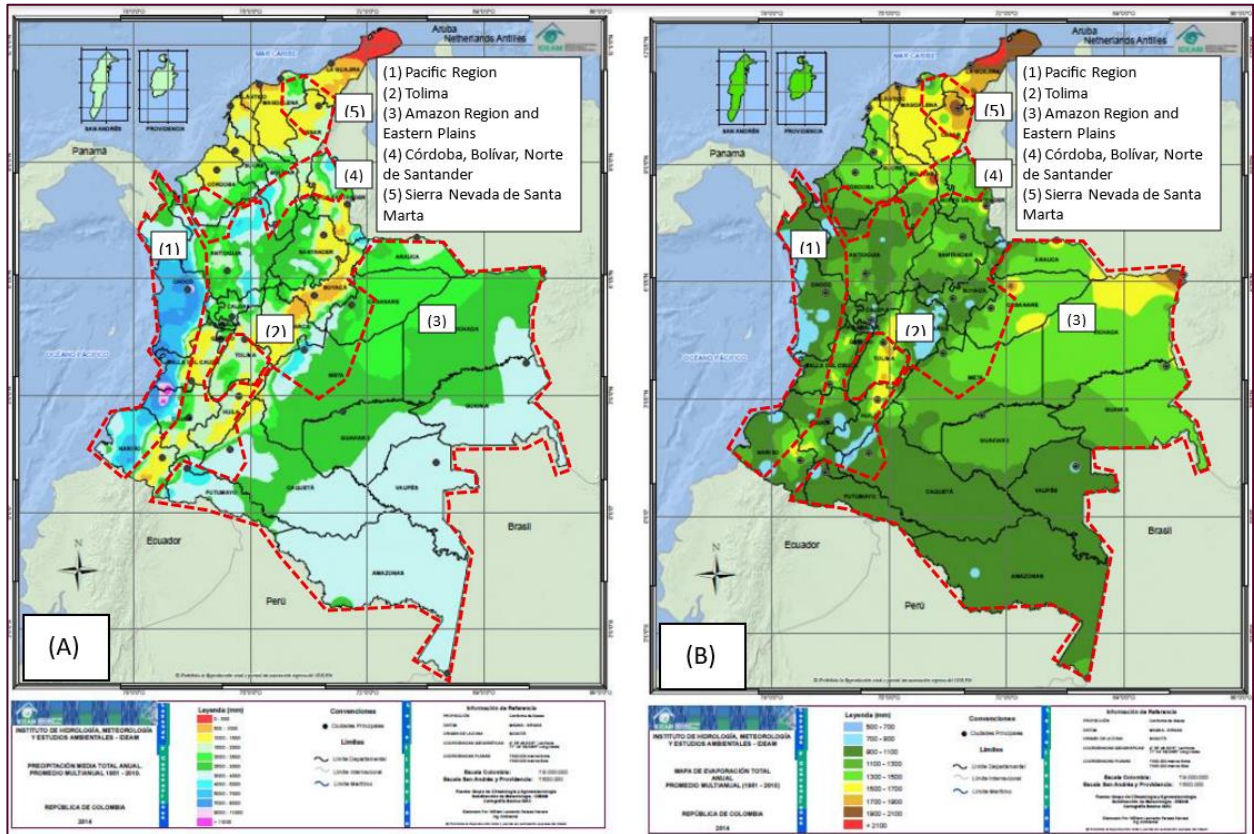


ILUSTRACIÓN 15: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONDICIONES HIDROLÓGICAS. (A) PRECIPITACIÓN MEDIA MULTIANUAL Y (B) EVAPORACIÓN MEDIA MULTIANUAL ³

La Ilustración 16 presenta dos mapas fundamentales para la evaluación del potencial hidroeléctrico: (A) la precipitación media multianual y (B) la evaporación media multianual en las Zonas No Interconectadas de Colombia, basados en registros del IDEAM del periodo 1981-2010. Estos mapas son esenciales porque los caudales medios multianuales de las corrientes de agua resultan del balance entre la precipitación y la evapotranspiración en cada cuenca. A continuación, se describen las condiciones hidrológicas específicas de cada región de estudio, información que permite dimensionar la disponibilidad de recurso hídrico para generación hidroeléctrica.

1. Región Pacífica

Es una zona de pluviosidad excepcionalmente alta, con precipitaciones que superan los 4.000 mm/año en la mayor parte del territorio y alcanzan valores cercanos a 9.000 mm/año en algunos sectores. La evaporación media se sitúa alrededor de 1.000 mm/año.

2. Tolima

Esta zona presenta precipitaciones medias multianuales entre 1.000 y 3.000 mm/año, junto con valores de evaporación media que oscilan entre 1.100 y 1.700 mm/año.

3. Regiones Amazonía y Orinoquía

La región Amazónica presenta precipitaciones cercanas a los 3.500 mm/año y valores de evaporación en torno a 1.000 mm/año. En la Orinoquía, las precipitaciones se sitúan alrededor de 2.500 mm/año, mientras que la evaporación alcanza aproximadamente 1.400 mm/año.

4. Córdoba, Bolívar y Norte de Santander

Esta zona presenta la mayor variabilidad climática dentro del conjunto analizado. La precipitación media multianual oscila entre aproximadamente 1.000 mm/año en sectores de Norte de Santander y cerca de 4.000 mm/año en áreas del sur del departamento de Bolívar. La evaporación promedio se sitúa entre 900 y 1.300 mm/año.

³ Fuente: [Geografía infinita, artículo: El clima de Colombia a través de los mapas](#)

5. Sierra Nevada de Santa Marta

En esta zona las precipitaciones se sitúan principalmente entre 1.000 y 1.500 mm/año, aunque se identifica un sector puntual donde pueden alcanzar hasta 2.500 mm/año. La evaporación promedio es del orden de 1.500 mm/año, con dos áreas diferenciadas: una con valores cercanos a 800 mm/año y otra que llega aproximadamente a 2.000 mm/año.

4.2.3. Zonas climáticas

Según el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC) de la UPME, Colombia puede dividirse en diferentes zonas climáticas a escala municipal, tal como se muestra en la figura siguiente. Esta clasificación guarda una correspondencia aproximada con la clasificación climática de Lang.

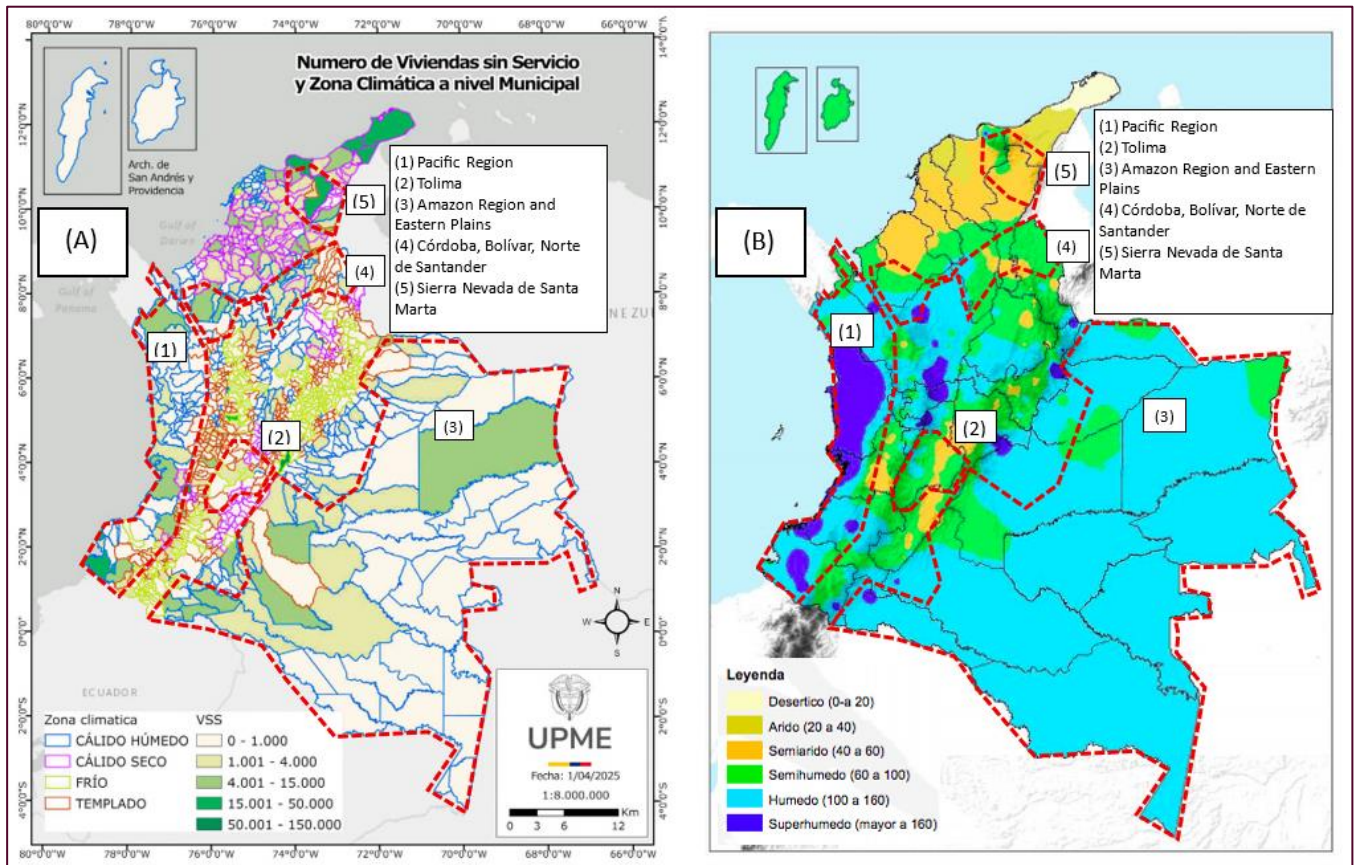


ILUSTRACIÓN 16: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONDICIONES CLIMÁTICAS. (A) ZONAS CLIMÁTICAS PIEC, (B) CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE LANG⁴

⁴ Fuente: [Geografía infinita, artículo: El clima de Colombia a través de los mapas](#)

1. Región Pacífica

Zona caracterizada por un clima cálido húmedo a súper húmedo.

2. Tolima

Área con predominio de clima cálido seco o semiárido.

3. Regiones Amazonía y Orinoquía

Zona mayoritariamente de clima cálido húmedo, con algunos focos aislados de clima semihúmedo.

4. Córdoba, Bolívar y Norte de Santander

Regiones con clima cálido húmedo o semihúmedo, y un sector puntual con condiciones semiáridas.

5. Sierra Nevada de Santa Marta

Zona con clima principalmente cálido seco o semiárido, con un foco localizado de clima semihúmedo.

4.2.4. Contexto socioeconómico

En las ZNI la densidad de población es muy baja, tal como se muestra en la siguiente figura. Por otro lado, en esas zonas se ubican casi todas las comunidades indígenas y afrodescendientes del país, como muestra la siguiente figura. La situación social de estas comunidades no es muy buena. Las dos figuras siguientes lo ilustran: un alto nivel de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) y un bajo Índice de Calidad de Vida. La electricidad es una variable indirecta de las NBI y, a su vez, causa y consecuencia de un menor índice de calidad de vida (y, por consiguiente, de un menor Índice de Desarrollo Humano) en estas zonas. En otras palabras, el acceso limitado o nulo a la electricidad es un síntoma de la marginación social de estas poblaciones, pero también les impide alcanzar el desarrollo social.

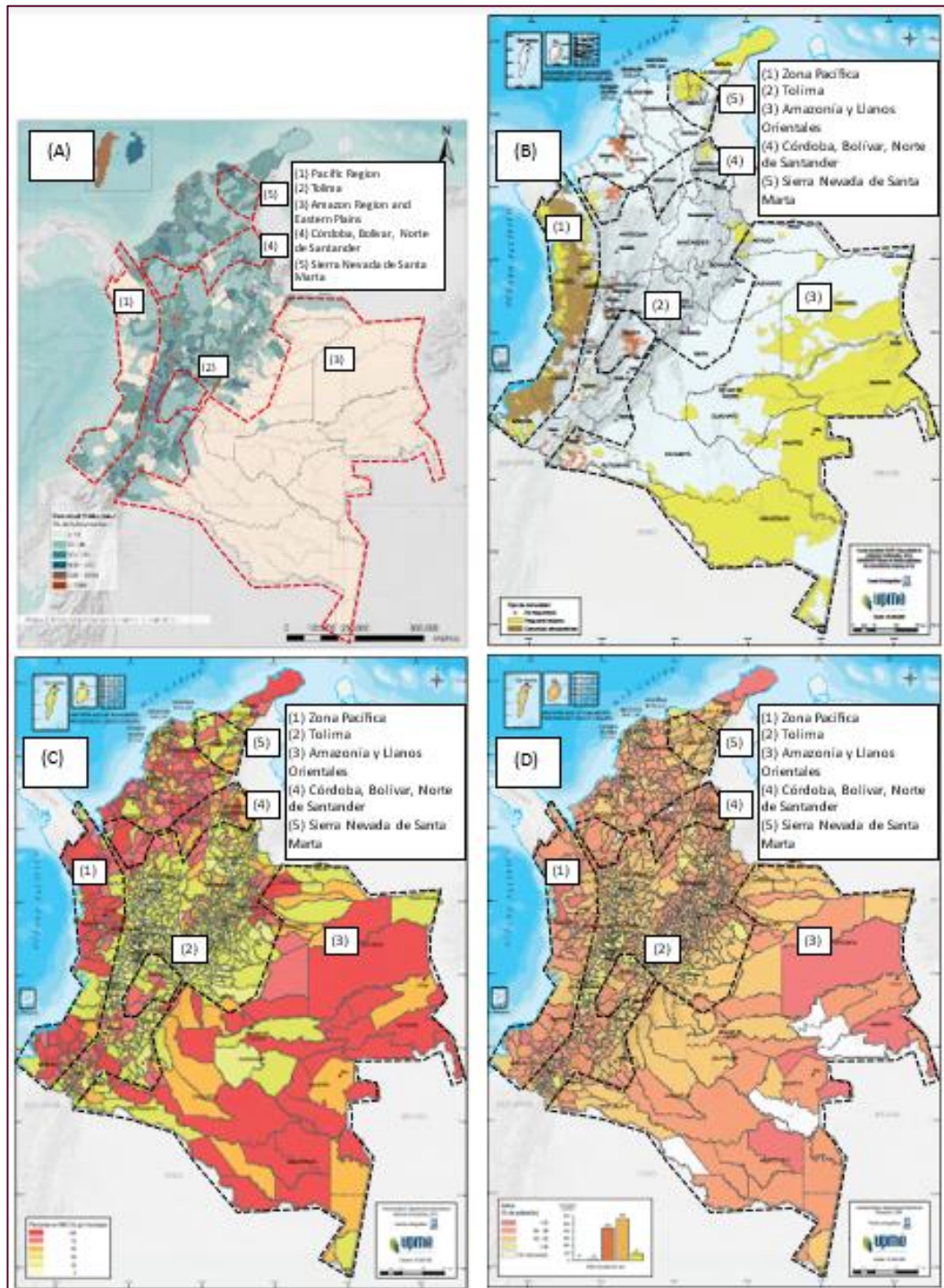


ILUSTRACIÓN 17: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONTEXTO SOCIOECONÓMICO. (A) DENSIDAD DE POBLACIÓN, (B) DISTRIBUCIÓN DE MINORÍAS ÉTNICAS, (C) NECESIDADES BÁSICAS INSATISFECHAS, (D) ÍNDICE DE CALIDAD DE VIDA ⁵

⁵ Fuente: [UPME - Energía eléctrica Atlas Capítulo 5: Aspectos sociales, económicos y ambientales del potencial hidroenergético](#)

Región Pacífica

Baja densidad poblacional (menos que 30 hab/km²) en un contexto social marcado por una alta presencia de minorías étnicas, tanto indígenas como afrodescendientes y una alta cantidad de personas con Necesidades Básicas Insatisfechas.

1. Tolima

Baja densidad poblacional (menos que 30 hab/km²), con un foco poblacional de comunidades no resguardadas. La cantidad de personas con NBI es baja en comparación con el resto del país.

2. Regiones Amazonía y Orinoquía

Muy baja densidad poblacional (menos que 10 hab/km²), quizás la menor de todo Colombia, marcada por una extensión de territorios indígenas. La cantidad de personas con NBI van desde valores medios, en las cercanías de las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental (Región Andina), hasta valores preocupantes en los municipios de los territorios indígenas.

3. Córdoba, Bolívar y Norte de Santander

El comportamiento es muy similar al del Tolima y toda la Región Andina, aunque con mayores personas con NBI.

4. Sierra Nevada de Santa Marta

Aunque con territorios indígenas, la cantidad de personas con NBI muestran valores similares a los de la Región Andina y, por ende, a las zonas [2] y [4].

4.2.5. Contexto ambiental

Por definición, las ZNI se ubican en áreas aisladas del desarrollo económico (y social) del país. Precisamente por esta razón, los ecosistemas en esas zonas están menos alterados que en otras áreas. En ellas existen numerosos bosques intactos (como se muestra en la figura siguiente).

Cabría esperar que hubiera más áreas protegidas en las ZNI que en el resto del país, pero no es así, lo que constituye un motivo más para reflexionar sobre el abandono estatal de estas áreas y para promover (e incluso realizar) inversiones en ellas (como las que propone este proyecto). Las figuras que se muestran a continuación ilustran el sistema de áreas protegidas en Colombia (izquierda) y los ecosistemas declarados de turberas, humedales y manglares (derecha).

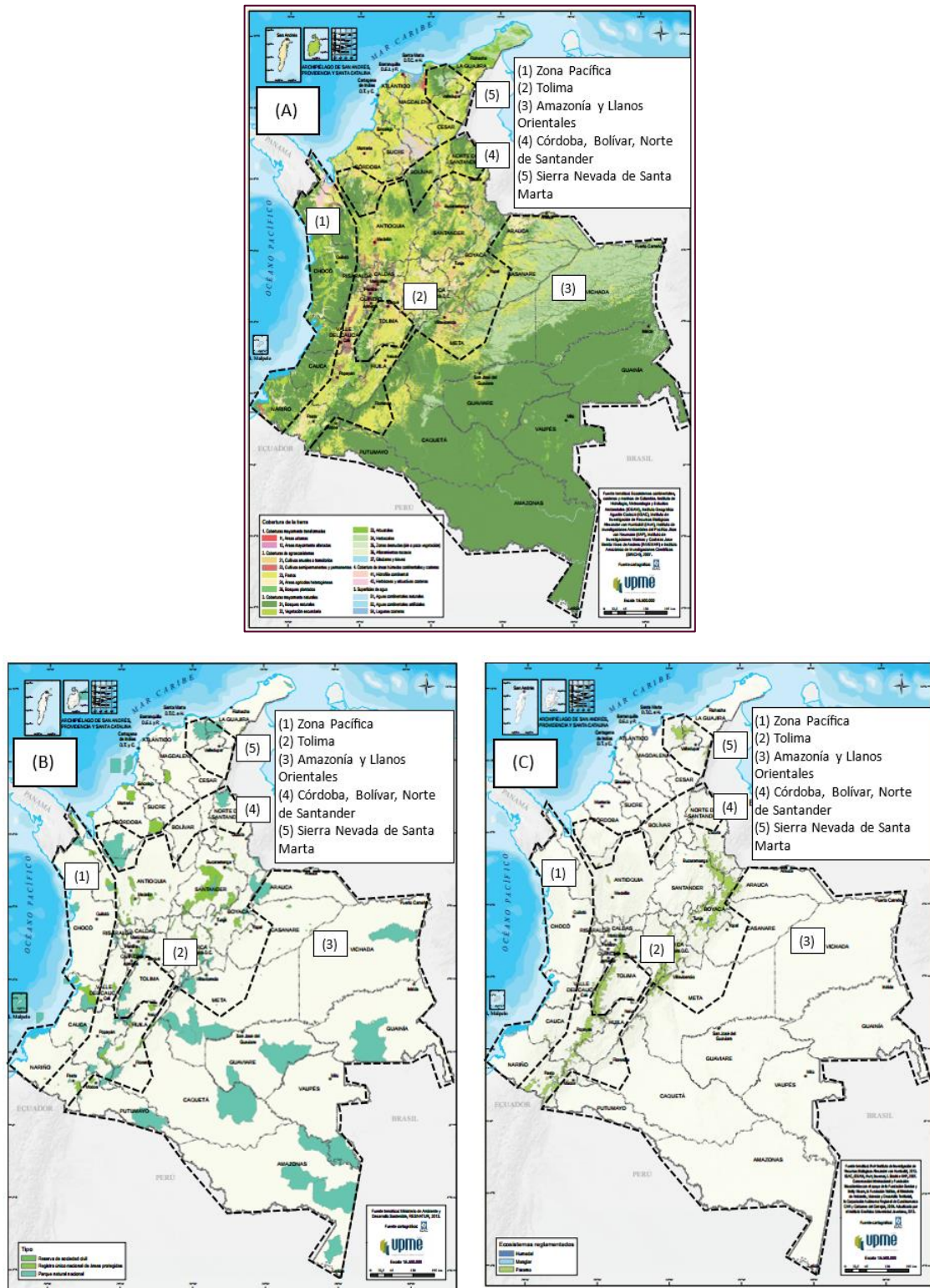


ILUSTRACIÓN 18: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONTEXTO AMBIENTAL. (A) COBERTURA DE SUELOS, (B) ÁREAS PROTEGIDAS, (C) ECOSISTEMAS REGLAMENTADOS. ⁶

⁶ Fuente: [UPME - Energía eléctrica Atlas Capítulo 5: Aspectos sociales, económicos y ambientales del potencial hidroenergético](#)

4.2.6. Resumen

	Condiciones geográficas	Condiciones hidrológicas	Condiciones climáticas	Contexto socioeconómico	Contexto ambiental
(1) Zona Pacífica	Montañosa	Precipitaciones muy altas	Cálido húmedo	Baja densidad poblacional, comunidades indígenas y afrodescendientes, gran cantidad de personas con NBI	Bosques naturales. Áreas protegidas de forma aislada
(2) Tolima	Montañosa	Precipitaciones medias	Cálido seco	Baja densidad poblacional, minorías étnicas no resguardadas, pocas personas con NBI	Pastos y vegetación secundaria
(3) Amazonía y Llanos Orientales	Plana en su mayoría. Montañosa en algunas zonas	Precipitaciones altas	Cálido húmedo	Muy baja densidad poblacional, comunidades indígenas, gran cantidad de personas con NBI	Bosques naturales, pastos y vegetación secundaria. Áreas protegidas de forma aislada
(4) Córdoba, Bolívar, Norte de Santander	Montañosa	Precipitaciones altas	Cálido húmedo	Baja densidad poblacional, minorías étnicas no resguardadas, una cantidad media de personas con NBI	Bosques naturales, pastos y vegetación secundaria. Áreas protegidas de forma aislada
(5) Sierra Nevada de Santa Marta	Montañosa	Precipitaciones medias	Cálido seco	Baja densidad poblacional, una gran proporción de territorios indígenas, una cantidad media de personas con NBI	Bosques naturales, pastos y vegetación secundaria. Áreas protegidas de forma aislada

ILUSTRACIÓN 19: ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. CONTEXTO GEOGRÁFICO, SOCIAL Y AMBIENTAL

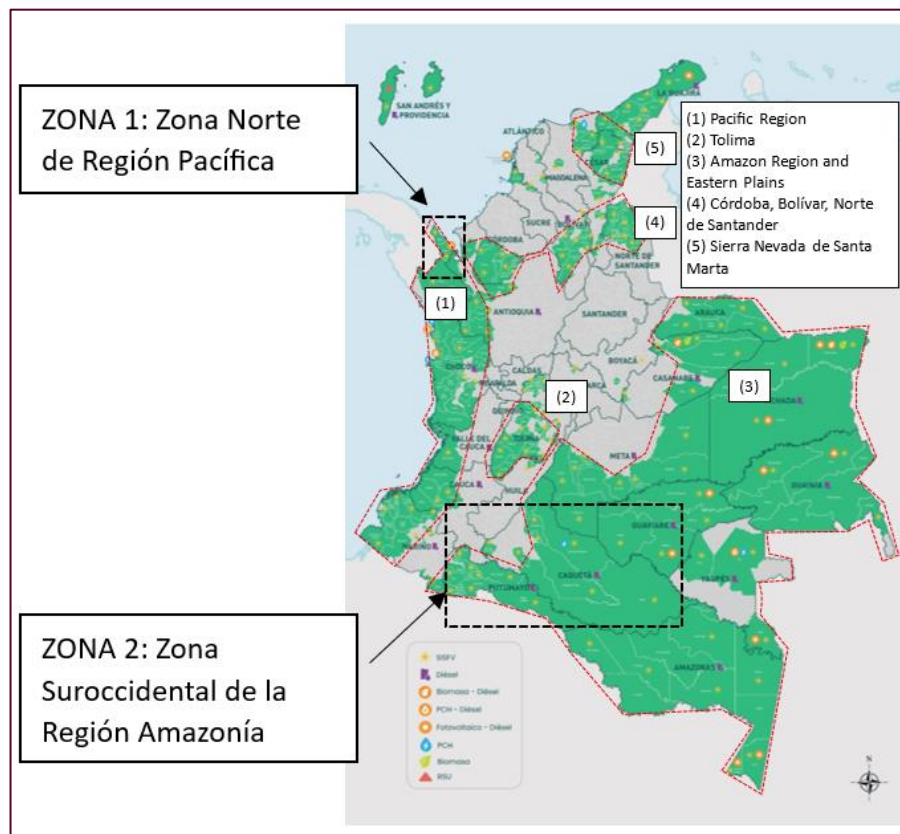
4.3. Casos de estudio

Después de haber analizado exhaustivamente las condiciones geográficas, hidrológicas, climáticas, socioeconómicas y ambientales de las cinco regiones priorizadas en las Zonas No Interconectadas de Colombia, el siguiente paso metodológico consiste en seleccionar casos de estudio específicos que permitan validar en la práctica los criterios técnicos y las metodologías propuestas. Estos casos de estudio no son simplemente ejemplos ilustrativos: son laboratorios reales donde la teoría debe enfrentarse con la complejidad del terreno, donde las cifras de precipitación y evaporación deben traducirse en caudales medibles, y donde las distancias en mapas se convierten en desafíos logísticos tangibles.

La selección de casos de estudio ha sido guiada por un principio fundamental: capturar la máxima diversidad posible de condiciones técnicas y operativas en el menor número de casos. Se han seleccionado dos zonas de estudio que representan extremos contrastantes en múltiples dimensiones: la Zona 1 corresponde a la región Pacífica (municipio de Unguía, Chocó), caracterizada por pluviosidad excepcionalmente alta, topografía moderada, acceso complejo que combina rutas marítimas, fluviales y terrestres, y comunidades afrodescendientes e indígenas con altos índices de necesidades básicas insatisfechas. La Zona 2 representa el piedemonte amazónico-orinocense (municipios del Guaviare, Caquetá y Putumayo), con precipitaciones moderadas, topografía variada que incluye desde planicies hasta zonas montañosas, acceso principalmente terrestre, y territorios con presencia significativa de comunidades indígenas y asentamientos de colonización reciente.

La diversidad entre estos dos casos de estudio es intencional y estratégica. Si las soluciones propuestas funcionan tanto en la húmeda región Pacífica como en el piedemonte amazónico, con sus diferencias radicales en precipitación, topografía, accesibilidad y contexto sociocultural, entonces existirá confianza razonable en que las metodologías son lo suficientemente robustas y adaptables para ser aplicadas en las demás regiones de las ZNI. Cada caso de estudio permitirá, además, evaluar aspectos específicos del ciclo completo de implementación: desde la identificación de sitios potenciales y la delimitación de cuencas hidrográficas, hasta la caracterización detallada con información cartográfica, meteorológica e hidrológica, y la evaluación de costos de transporte de equipos según diferentes medios (terrestre, fluvial, marítimo).

Se proponen las dos siguientes zonas de estudio que representan diferentes condiciones geográficas, hidroclimatológicas y con contextos socioeconómicos y, sobre todo, ambientales diferentes.



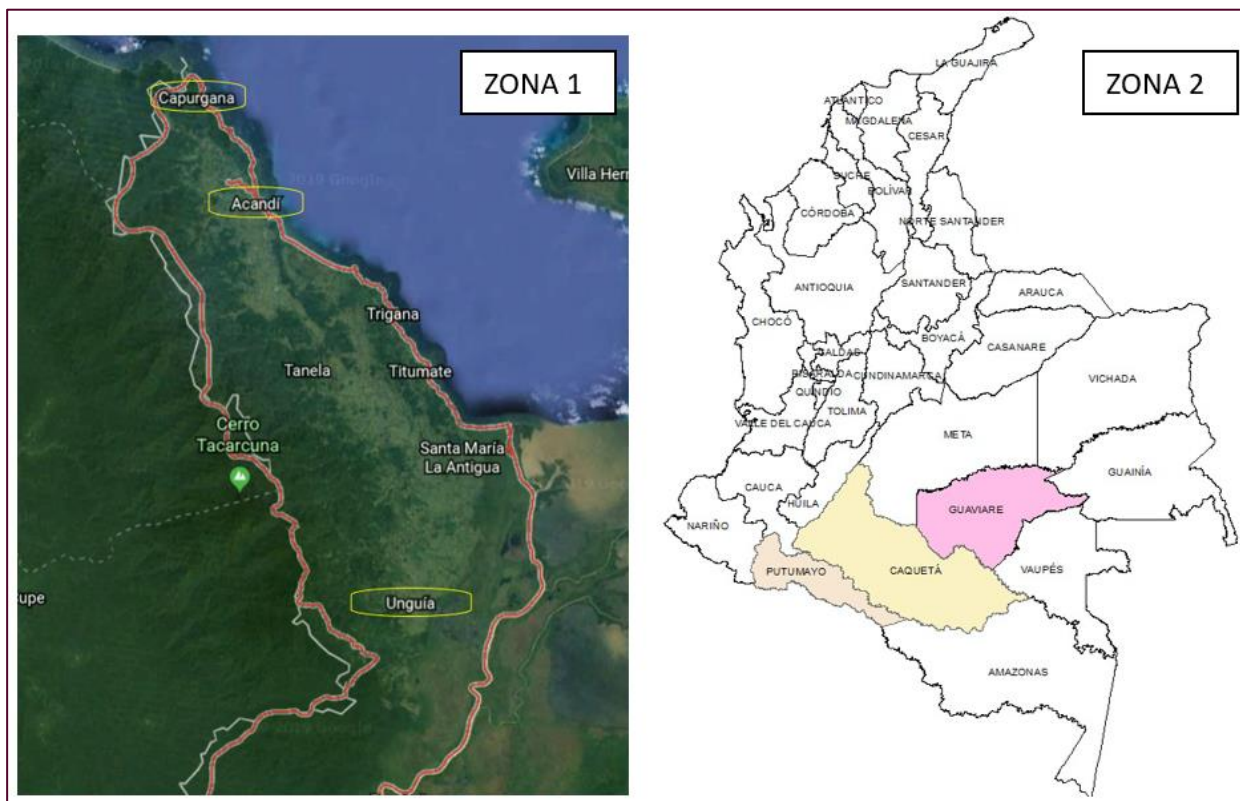


ILUSTRACIÓN 20: ZONAS DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El objetivo principal con la selección de los casos de estudio es considerar la mayor cantidad de variables involucradas en este proyecto. En particular, se han seleccionado estas dos zonas para evaluar tres diferentes medios de transporte de los equipos: terrestre, fluvial y marítimo. La selección de los casos de estudio se ha hecho también en función de la distancia a centros poblados dentro de esas zonas delimitadas en la figura anterior y de buscar proyectos con alta y baja caída.

4.3.1. Caso de estudio de la zona 1

La región Pacífica colombiana representa uno de los territorios más desafiantes y, paradójicamente, más prometedores para el desarrollo de pequeños proyectos hidroeléctricos en las Zonas No Interconectadas. Con precipitaciones que superan los 4,000 mm/año y pueden alcanzar valores cercanos a 9,000 mm/año en algunos sectores, esta región cuenta con una disponibilidad hídrica excepcional que contrasta dramáticamente con su precaria infraestructura de acceso. Los municipios de Unguía y Acandí, ubicados en el extremo norte del departamento del Chocó, cerca de la frontera con Panamá, ejemplifican perfectamente estas contradicciones: abundancia de recurso natural junto con aislamiento geográfico, riqueza cultural y biodiversidad junto con altos índices de pobreza y necesidades básicas insatisfechas.

El Caso de Estudio 1 se ha diseñado para abordar simultáneamente múltiples objetivos de validación metodológica. Por un lado, permitirá evaluar cómo identificar y seleccionar sitios apropiados en territorios con topografía moderada (serranías de baja a mediana altura) pero con altísima disponibilidad hídrica. Por otro lado, este caso proporcionará datos cruciales sobre los costos y la logística del transporte de equipos en una región donde el acceso puede realizarse

por vía marítima desde el puerto de Turbo, por vía fluvial a través del río Atrato y sus afluentes, o mediante una combinación de estas rutas con caminos terrestres precarios. Esta diversidad de opciones de acceso es fundamental para desarrollar modelos de costos que sean aplicables a otras regiones costeras y fluviales de las ZNI.

La metodología de selección del sitio específico dentro de la Zona 1 sigue un proceso sistemático de filtrado progresivo: primero se identifican las poblaciones objetivo, luego se establece un radio de búsqueda de aproximadamente 10 km alrededor de cada población (distancia que equilibra viabilidad técnica con factibilidad económica de líneas de transmisión), posteriormente se identifican las áreas con topografía favorable (presencia de saltos o desniveles aprovechables), y finalmente se delimitan las cuencas hidrográficas específicas que alimentan los sitios potenciales. Este proceso, que se describe detalladamente a continuación, ha resultado en la identificación de 10 cuencas preliminares de interés en el norte del Chocó, de las cuales se seleccionarán las más prometedoras para análisis de pre-factibilidad detallado.

Para definir el Caso de Estudio 1, dentro de la Zona 1, se ha hecho el siguiente análisis.

Considerando un criterio inicial de distancia a cada población de unos 10 km, se han identificado preliminarmente los siguientes sitios para ser evaluados a efectos de identificar un Caso de Estudio en la Zona 1. Se han definido aquellas zonas montañosas en las que puede haber un salto que permita el aprovechamiento del potencial hidroenergético. En las siguientes figuras se resalta la circunferencia de 10 km y el área montañosa sujeta de análisis, ambos en rojo.

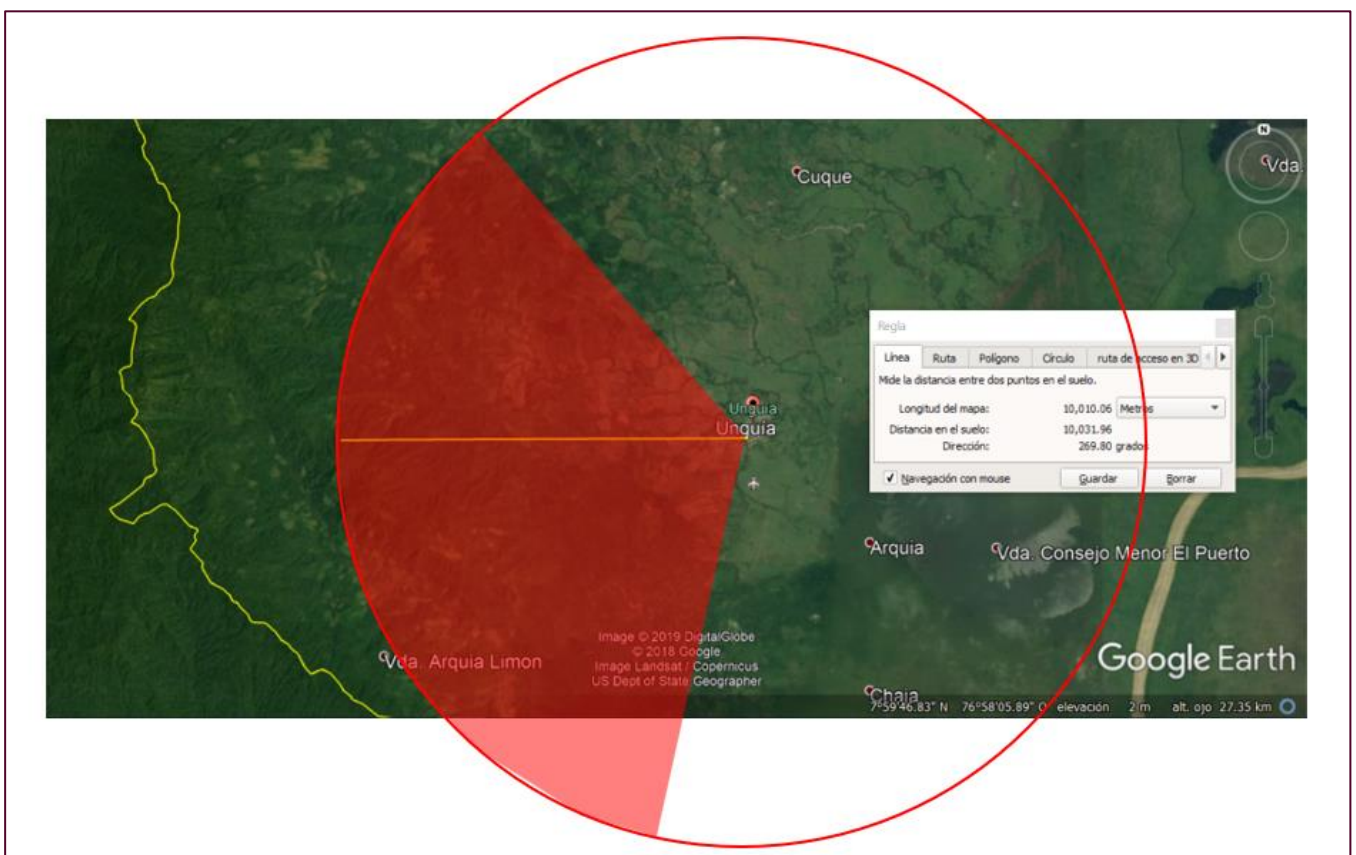


ILUSTRACIÓN 21: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE UNGUÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

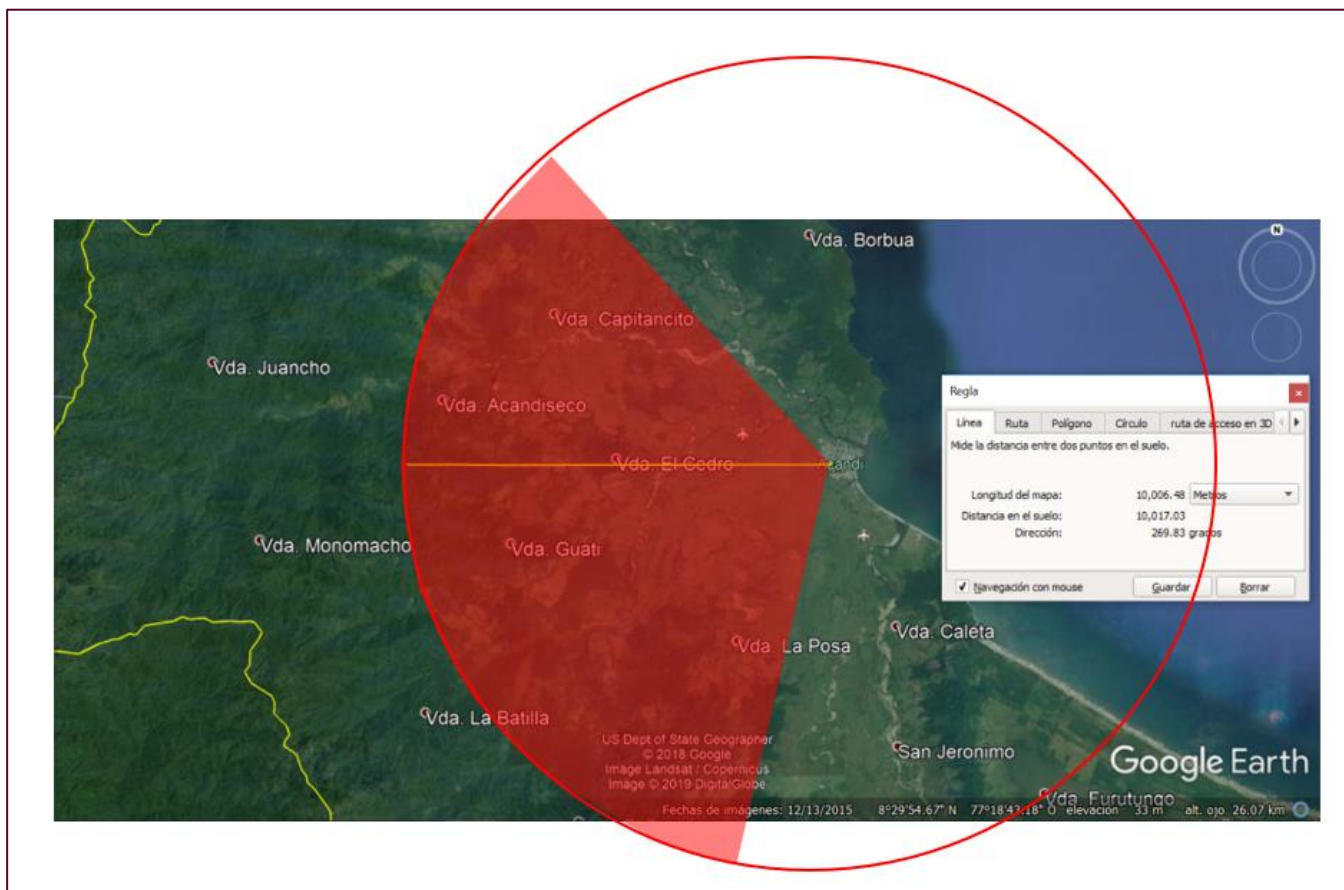


ILUSTRACIÓN 22: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE ACANDÍ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLEEARTH

En esas áreas identificadas se ha procedido a identificar, por el salto existente, las zonas donde pueden plantearse proyectos hidroeléctricos para el abastecimiento de cada una de las poblaciones.

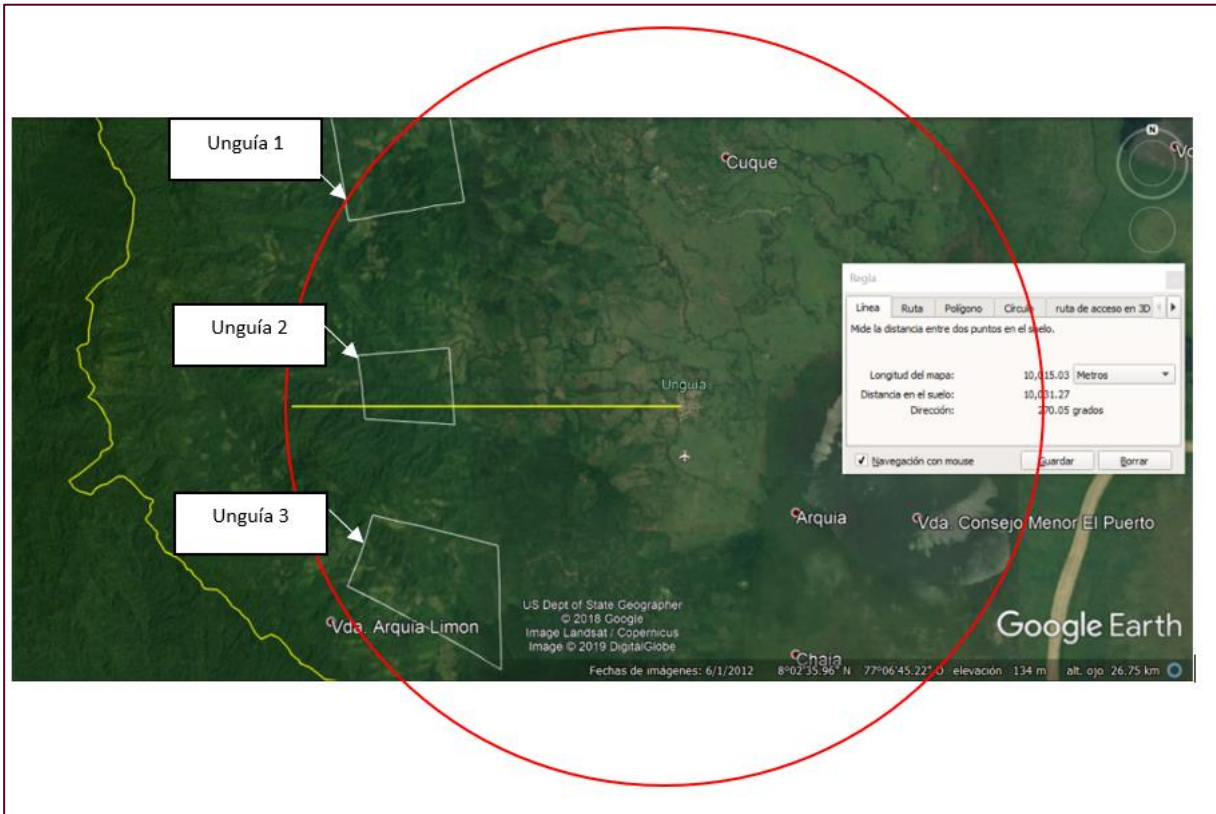


ILUSTRACIÓN 23: LOCALIZACIÓN DE POSIBLES APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS EN UNGUÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

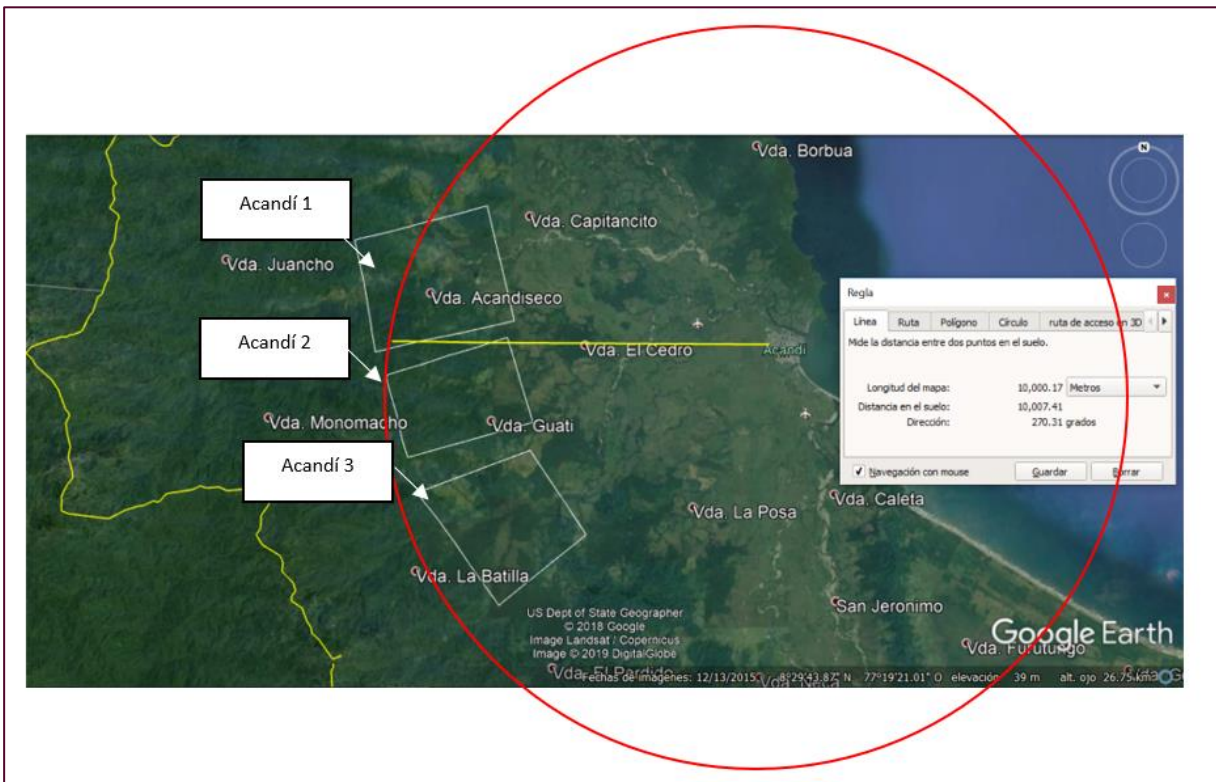


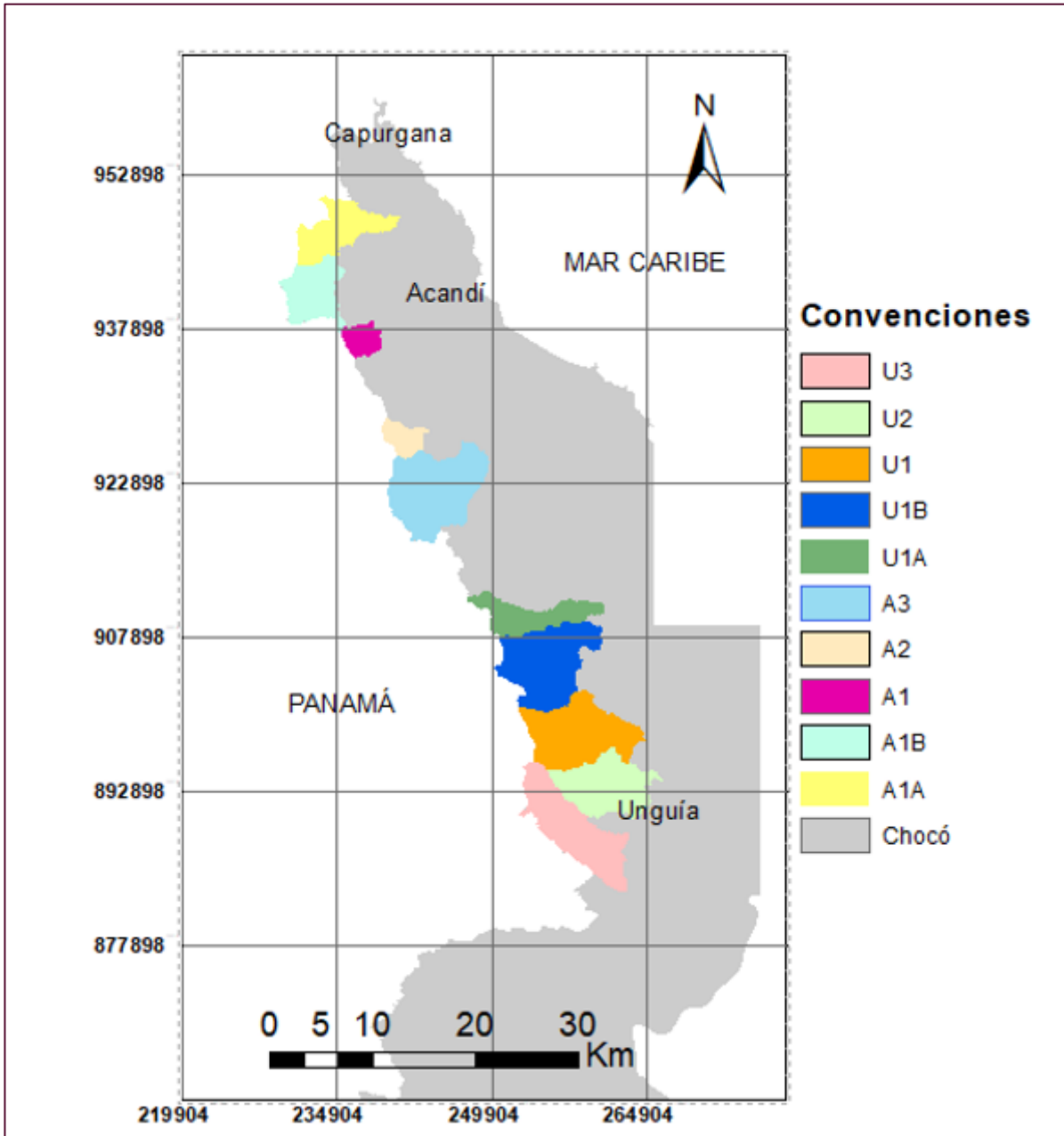
ILUSTRACIÓN 24: LOCALIZACIÓN DE POSIBLES APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS EN ACANDÍ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

Se seleccionaron preliminarmente 6 zonas, sin embargo, posteriormente se identificaron más zonas que cumplen con el criterio inicial, finalizando con 10 zonas de interés a lo largo de la zona norte del Chocó.



ILUSTRACIÓN 25: LOCALIZACIÓN DE POSIBLES APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS EN LA ZONA 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

Una vez seleccionadas las zonas se identificaron las cuencas hidrográficas arrojando un total de 10 posibles cuencas de interés. A continuación, se muestran en un plano.



GRÁFICA 3: DELIMITACIÓN CUENCAS HIDROGRÁFICAS ZONA 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLEEARTH

Acceder al municipio de Unguía se puede por vía terrestre (por caminos), vía fluvial o de forma combinada entre vía marítima y terrestre o vía fluvial y terrestre. Esa combinación permite hacer un análisis muy completo sobre los costes de transporte de los equipos a proponer.

Las cuencas U2 y U3 pueden tener más información, sobre todo de costes, al estar más cerca de la cabecera municipal de Unguía, por lo que se planteará un proyecto en una de esas dos cuencas.

4.3.2. CASO DE ESTUDIO DE LA ZONA 2

Si el Caso de Estudio 1 en la región Pacífica representa el extremo de altísima pluviosidad y complejo acceso multi-modal, el Caso de Estudio 2 en el piedemonte amazónico-orinocense representa un conjunto de condiciones radicalmente diferentes pero igualmente relevantes para las Zonas No Interconectadas de Colombia. Esta región, que abarca municipios de los departamentos de Guaviare, Caquetá y Putumayo, se caracteriza por precipitaciones moderadas (entre 2,500 y 3,500 mm/año), topografía que varía desde planicies aluviales hasta zonas montañosas en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental, acceso predominantemente terrestre aunque frecuentemente precario, y un contexto sociocultural complejo que incluye territorios indígenas ancestrales, zonas de colonización agrícola reciente, y áreas históricamente afectadas por conflictos armados.

La selección de esta zona como segundo caso de estudio responde a varios objetivos estratégicos complementarios. En primer lugar, permite validar que las metodologías funcionan en regiones con disponibilidad hídrica moderada, donde el dimensionamiento cuidadoso de las centrales y la selección apropiada de cuencas se vuelven aún más críticos. En segundo lugar, la Zona 2 ofrece una mayor diversidad topográfica que la Zona 1: mientras que el Pacífico presenta serranías relativamente uniformes, el piedemonte amazónico incluye desde ríos de planicie con mínimo desnivel hasta quebradas de montaña con caídas significativas. Esta variabilidad permite evaluar proyectos de alta, media y baja caída dentro de una misma zona geográfica, proporcionando un espectro completo de configuraciones técnicas posibles.

Adicionalmente, el Caso de Estudio 2 permitirá evaluar aspectos logísticos y de costos completamente diferentes a los del Caso 1. Mientras que en la región Pacífica el transporte de equipos requiere navegación marítima y fluvial, en el piedemonte amazónico el acceso es principalmente terrestre a través de carreteras que, aunque frecuentemente en mal estado, existen y conectan los municipios principales. Esta diferencia fundamental afectará significativamente los costos de implementación y operación, y la experiencia adquirida en ambos casos permitirá desarrollar modelos de costos aplicables a un espectro amplio de situaciones en las ZNI. El análisis se ha focalizado en el municipio de Orito, Putumayo, donde la combinación de topografía favorable, presencia de múltiples cuencas con características diversas, y relativa proximidad a infraestructura existente, proporciona un laboratorio ideal para validación metodológica y desarrollo de casos replicables.

De la misma manera, considerando un criterio inicial de distancia a cada población de unos 10 km, se han identificado preliminarmente los siguientes sitios para ser evaluados a efectos del potencial hidroenergético. Se han definido aquellas zonas montañosas en las que puede haber un salto que permita el aprovechamiento del potencial hidroenergético. En las siguientes figuras se resalta la circunferencia de 10 km en rojo. A diferencia del Caso de Estudio 1, en casi todas las áreas delimitadas en la Zona 2 puede haber algún proyecto hidroeléctrico, por lo que no ha sido necesario diferenciar con un área sombreada en rojo las áreas montañosas.

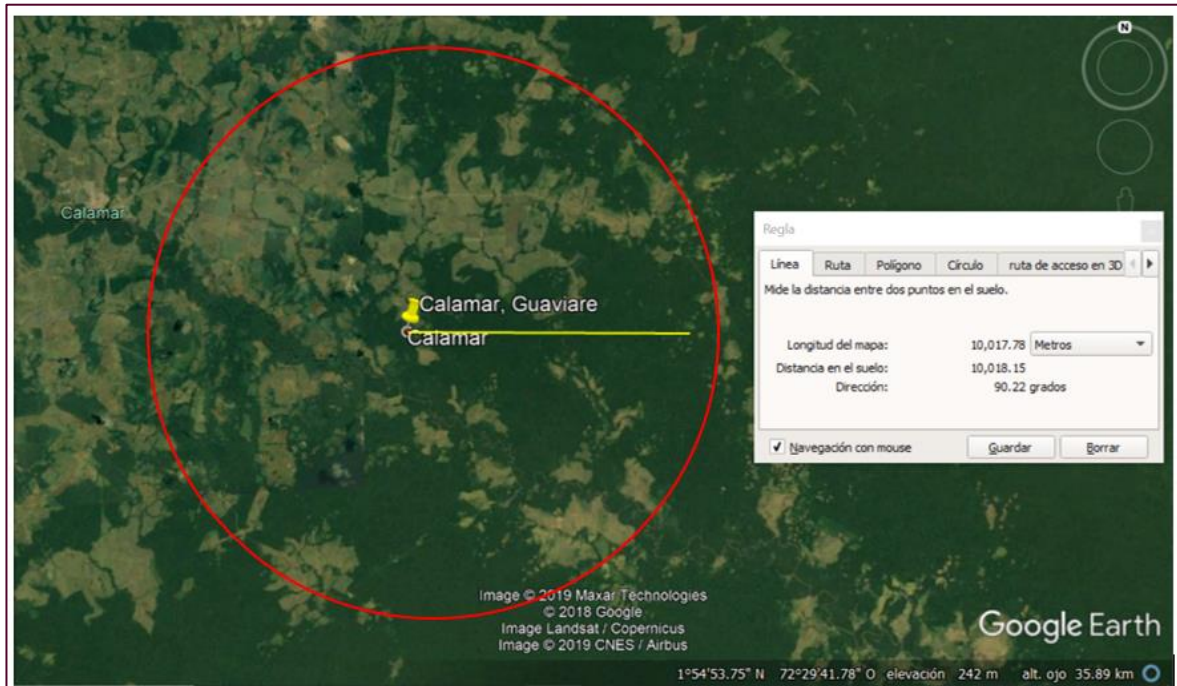


ILUSTRACIÓN 26: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE CALAMAR, GUAVIARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

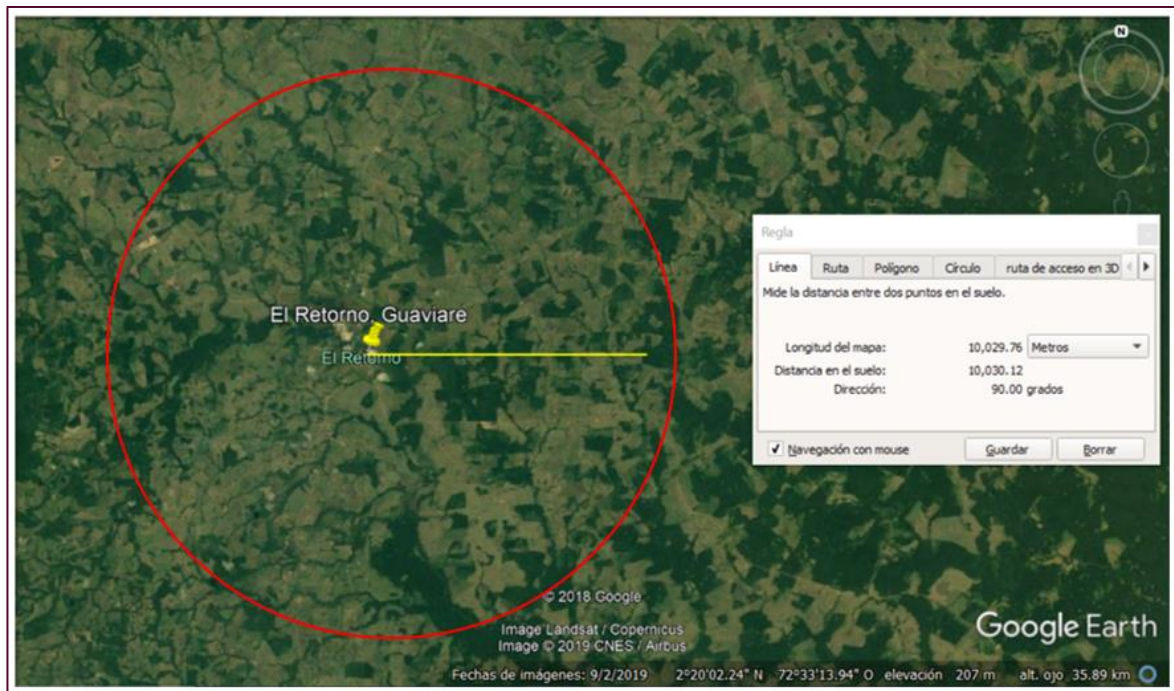


ILUSTRACIÓN 27: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE EL RETORNO, GUAVIARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

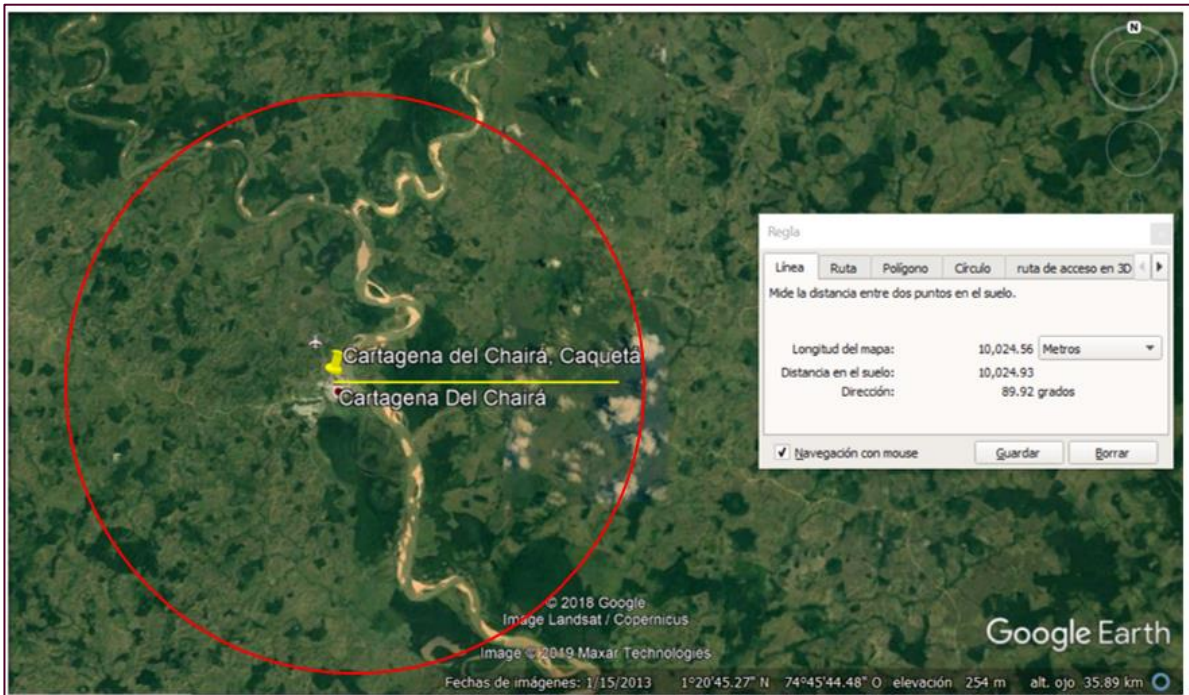


ILUSTRACIÓN 28: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE CARTAGENA DEL CHAIRÁ, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

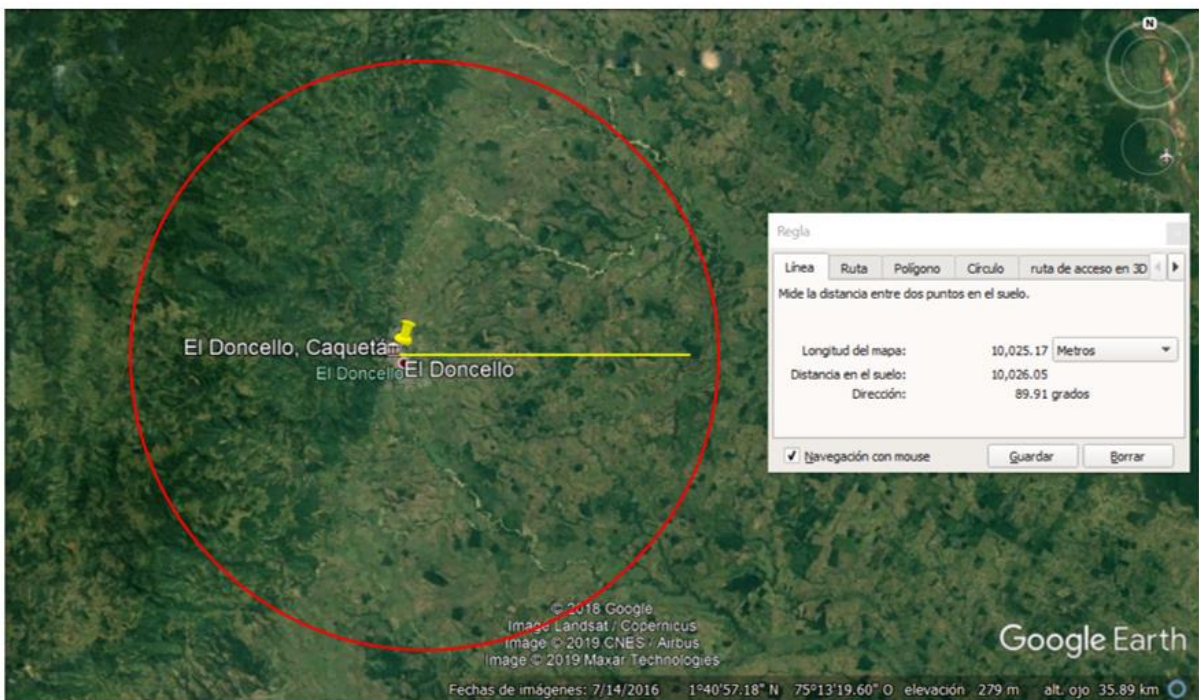


ILUSTRACIÓN 29: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE EL DONCELLO, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

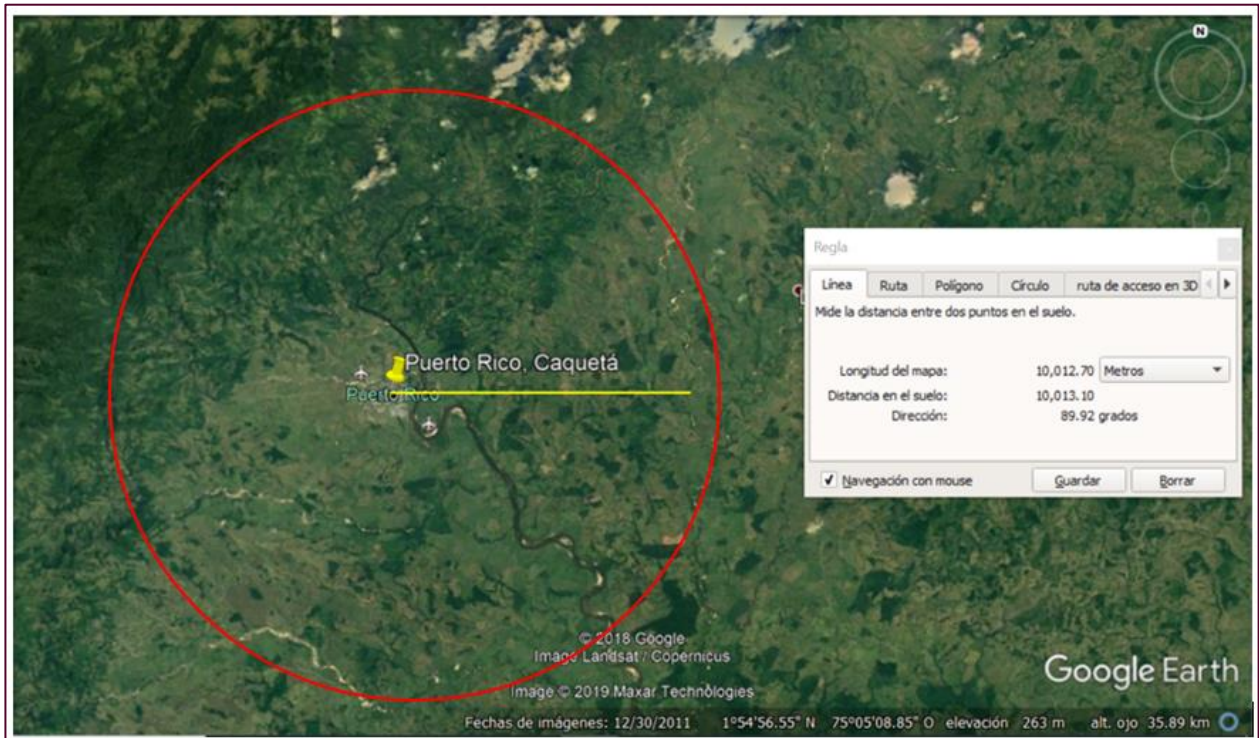


ILUSTRACIÓN 30: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE PUERTO RICO, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

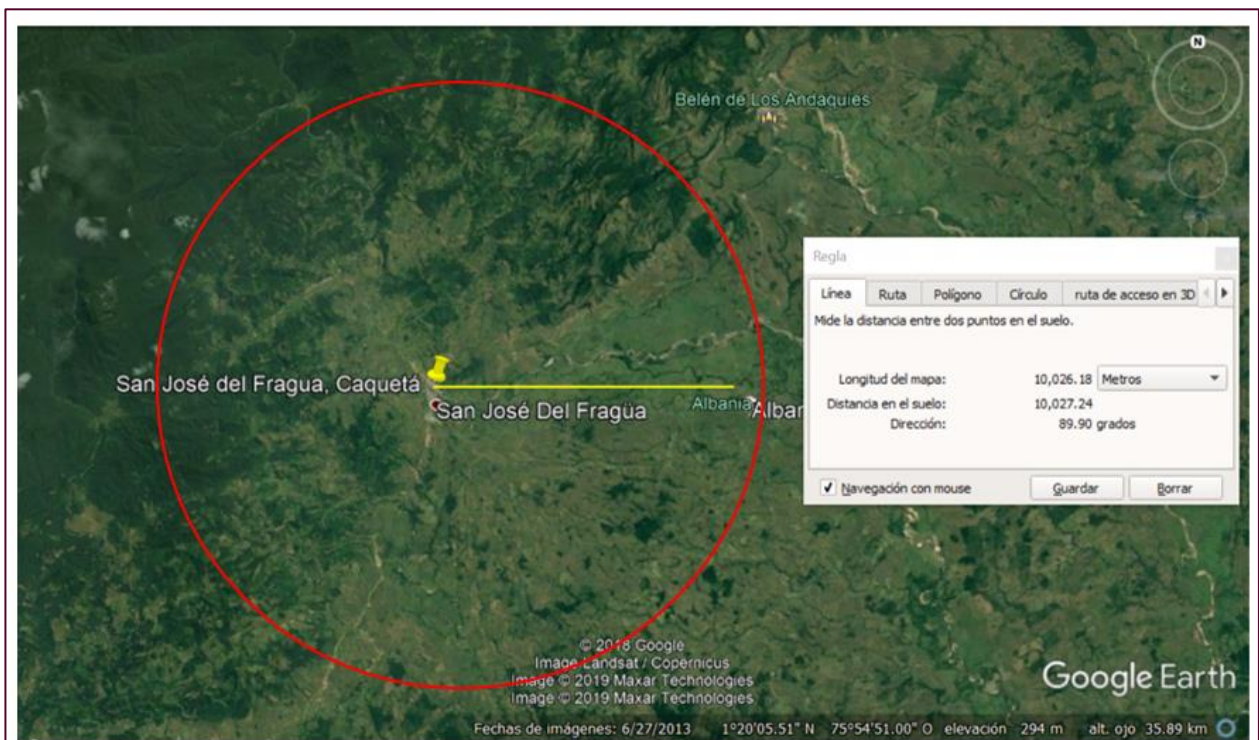


ILUSTRACIÓN 31: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL FRAGUA, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH



ILUSTRACIÓN 32: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE SAN VICENTE DEL CAGUÁN, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

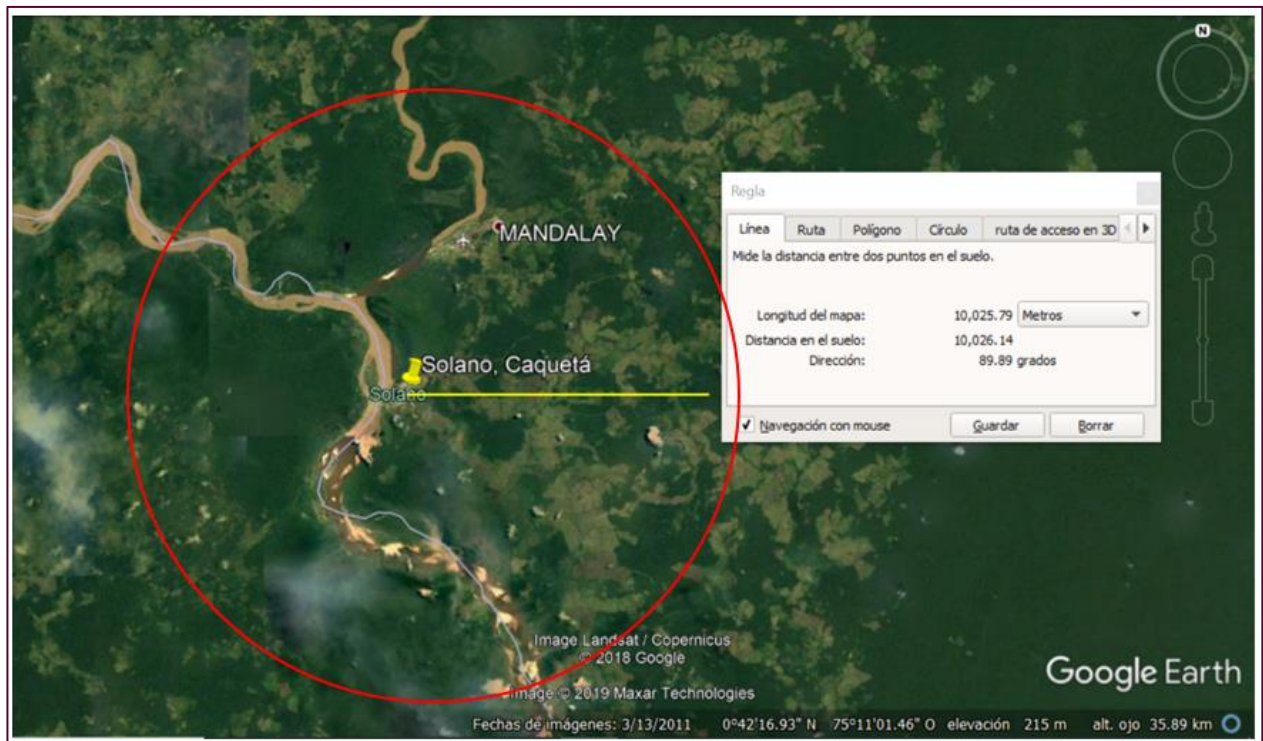


ILUSTRACIÓN 33: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE SOLANO, CAQUETÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

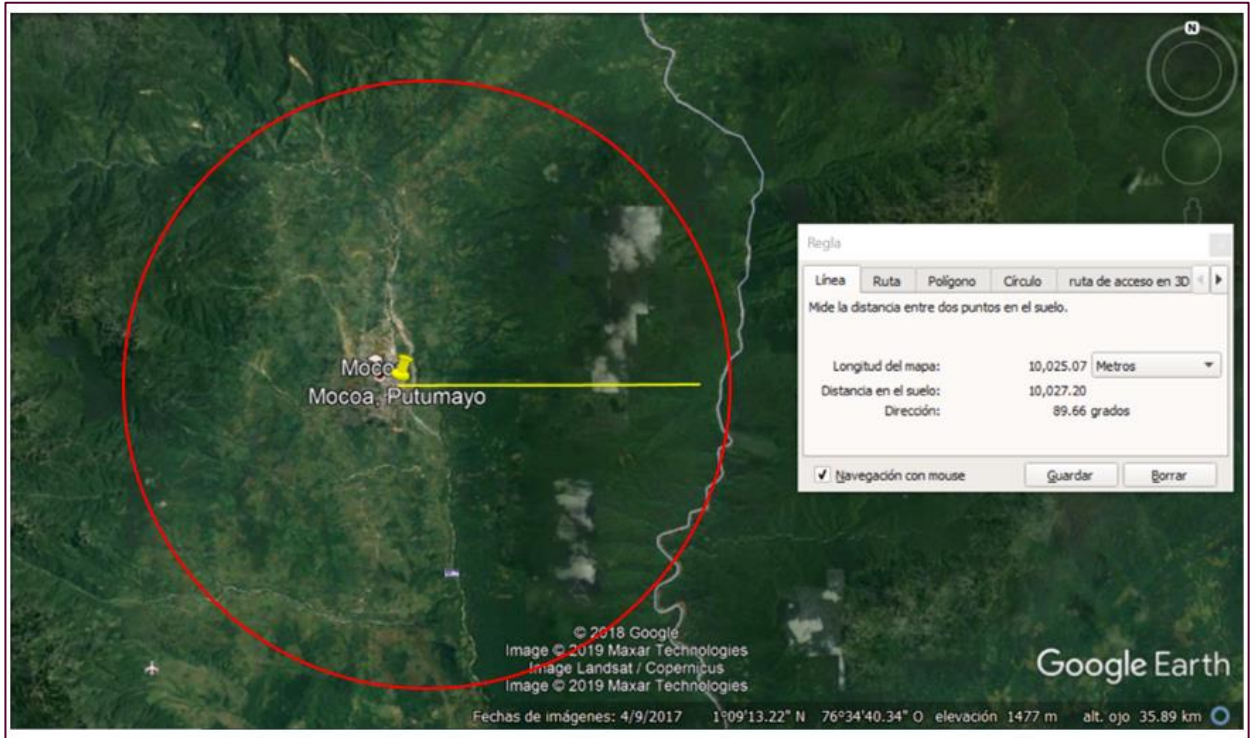


ILUSTRACIÓN 34: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE MOCOJA, PUTUMAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

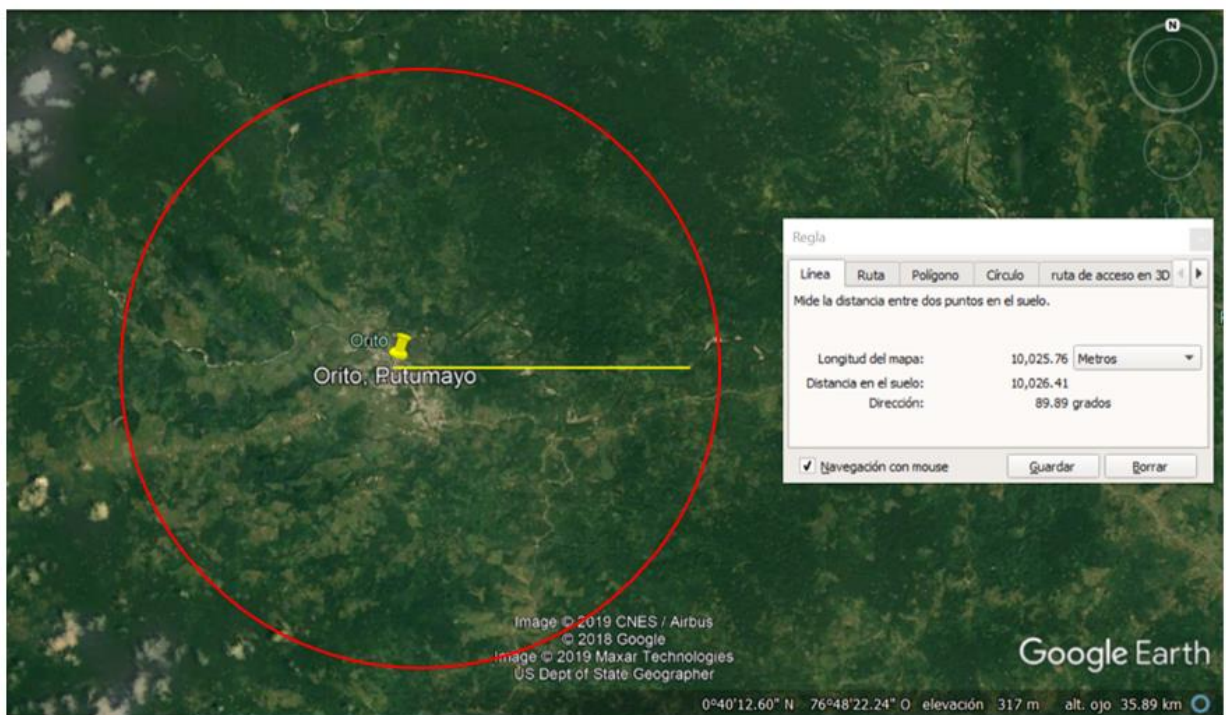


ILUSTRACIÓN 35: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE ORITO, PUTUMAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLE EARTH

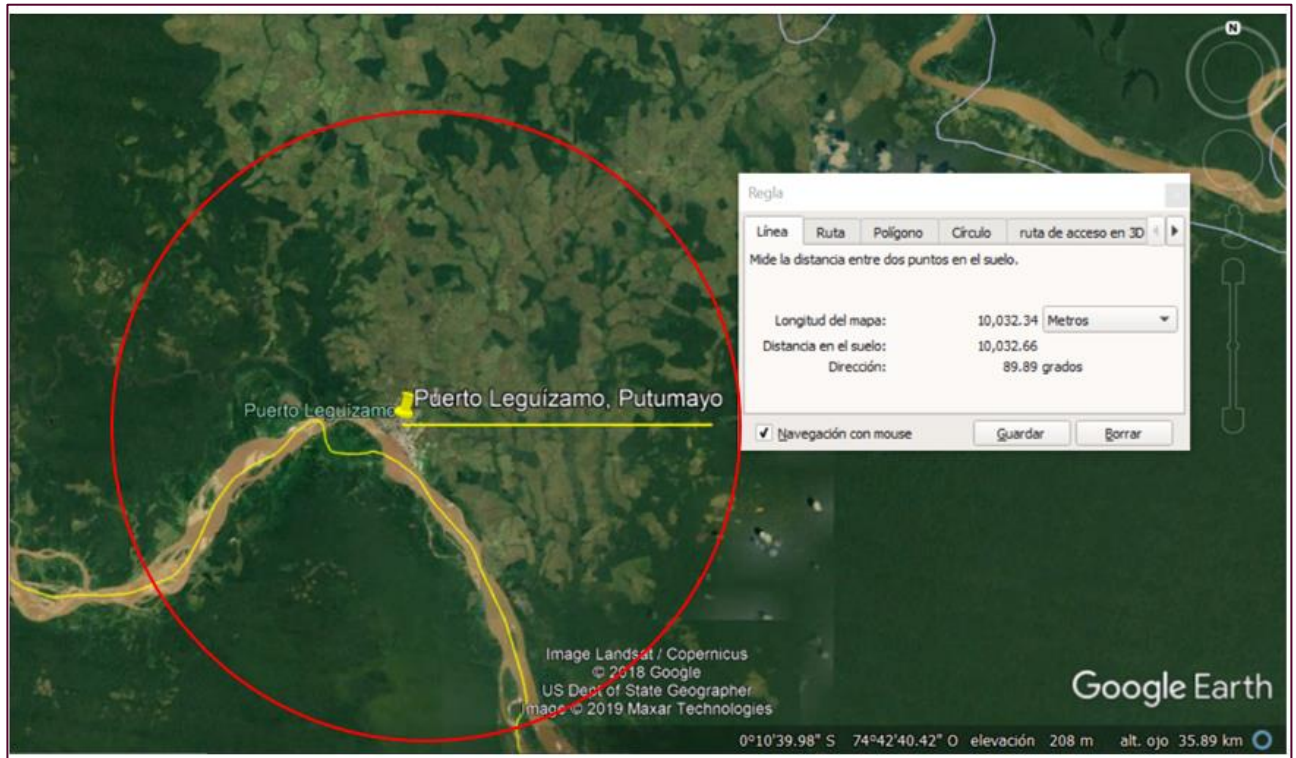


ILUSTRACIÓN 36: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE PUERTO LEGUÍZAMO, PUTUMAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLEEARTH

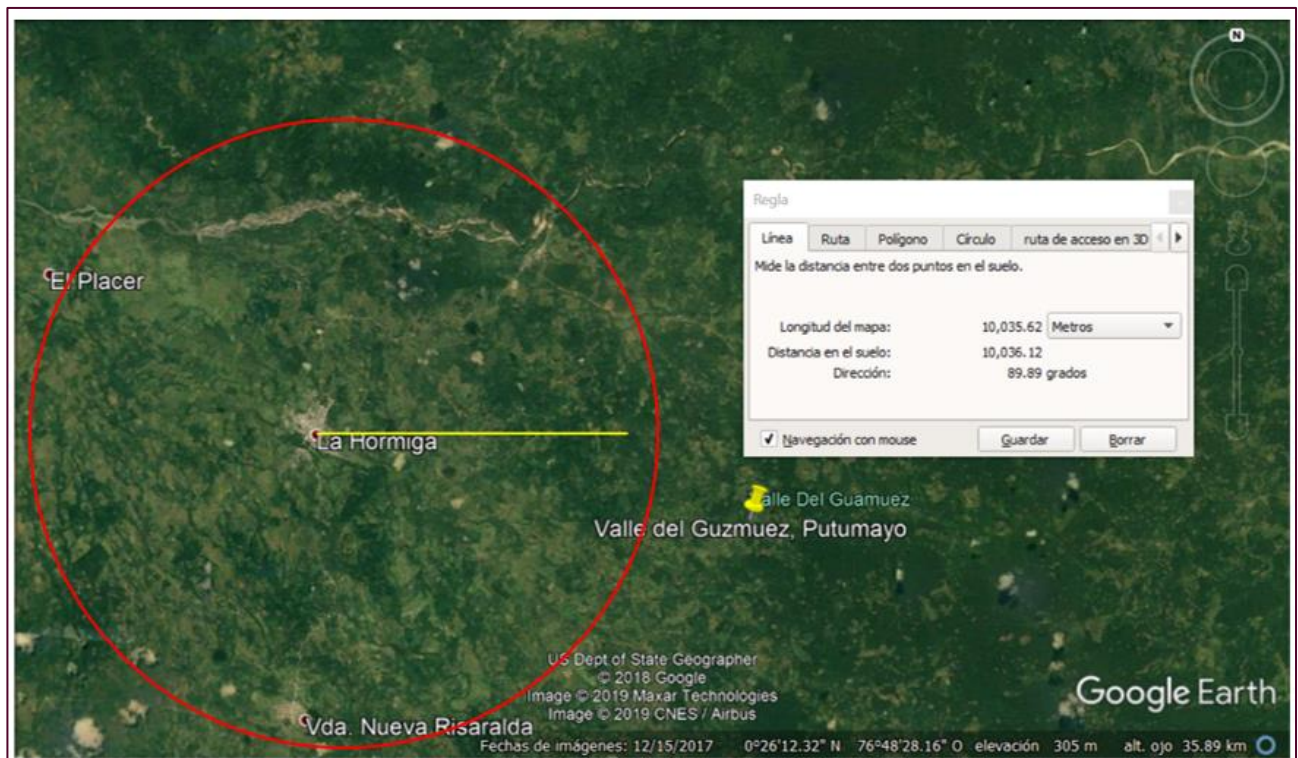


ILUSTRACIÓN 37: ÁREA DE ESTUDIO DE DETALLE PARA EL MUNICIPIO DE VALLE DEL GUZMUEZ, PUTUMAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON GOOGLEEARTH

Como resultado del análisis realizado, se ha focalizado el estudio alrededor de los siguientes municipios:

- El Doncello, Caquetá
- Puerto Rico, Caquetá
- San José del Fragua, Caquetá
- Mocoa, Putumayo
- Orito, Putumayo
- Valle del Guamuez, Putumayo

Proyectos de alta, media y baja caída puede haber, sobre todo, en el municipio de Orito. En él se han identificado 4 cuencas que pueden ser de interés para el Caso de Estudio.

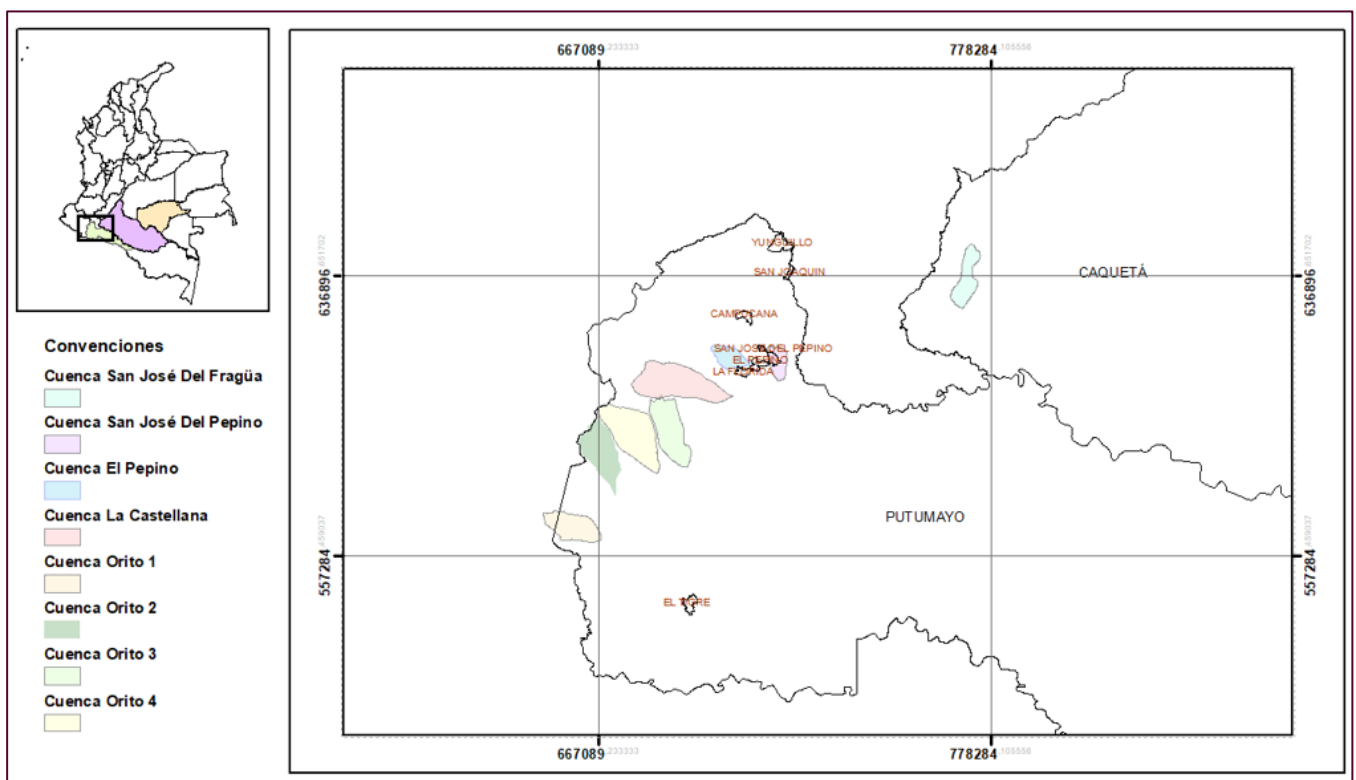


ILUSTRACIÓN 4: DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS IDENTIFICADAS EN LA ZONA 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Las cuencas llamadas Orito 1, Orito 2, Orito 3 y Orito 4 son adecuadas para el análisis que se quiere: tienen en cuenta cauces con pendiente alta, pendiente media y pendiente baja. Por ello se proponen como Caso de Estudio 2.

4.4. Datos e información

Además de la información con la que se contará para el desarrollo del modelo de todas las ZNI, a una escala espacial que permita hacer el análisis de toda ella, en los casos de estudio se profundizará con la siguiente información.

4.4.1. Caso de estudio de la zona 1

Información cartográfica

La siguiente figura muestra la localización de las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, en escala 1:25.000, de la zona de estudio.

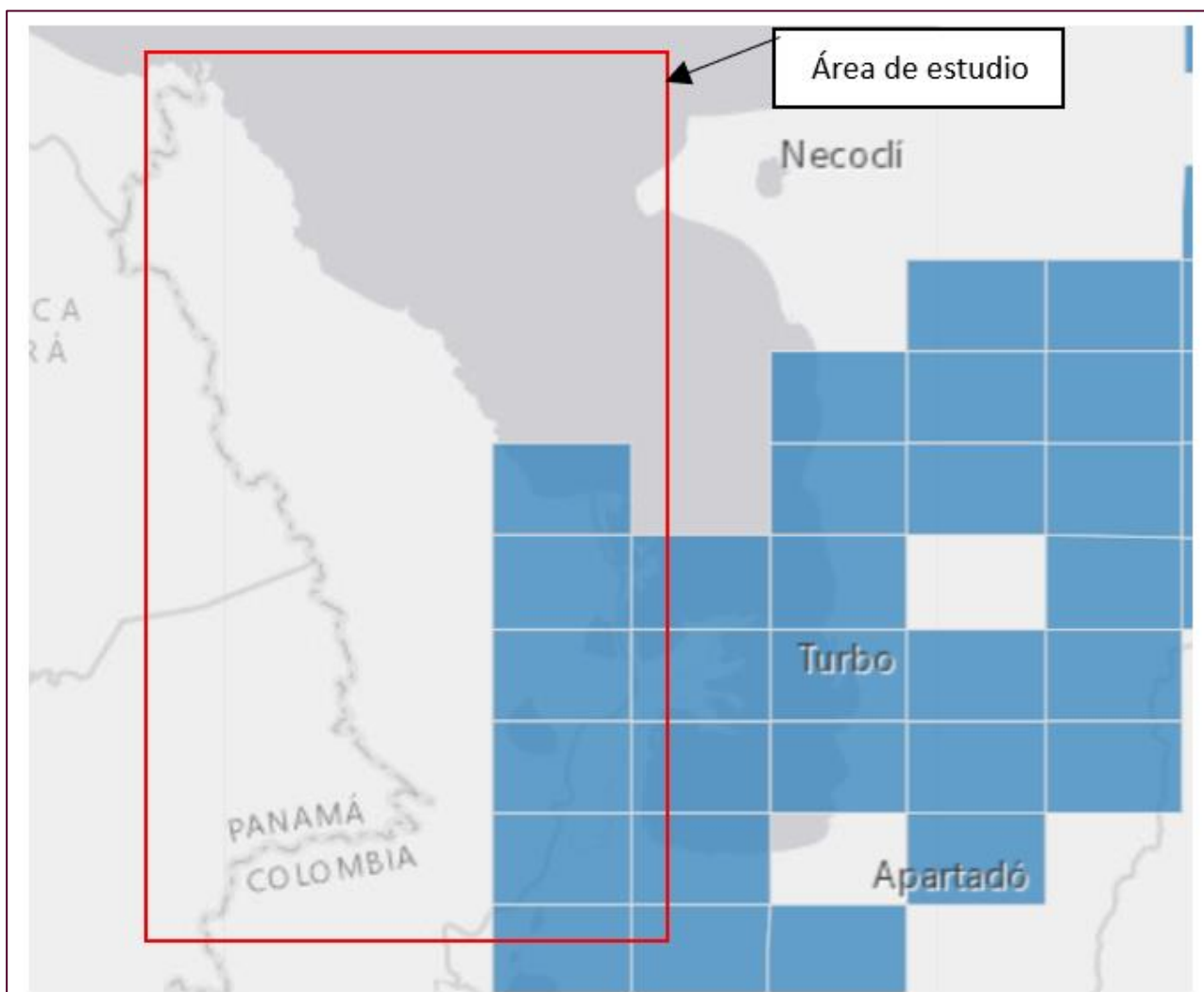


ILUSTRACIÓN 38: PLANCHAS IGAC 1:25.000 DE LA ZONA DE ESTUDIO 1. FUENTE: IGAC

Como se observa, el área de estudio está descubierta de planchas en la escala necesaria para el desarrollo del presente proyecto. Por lo tanto, se utilizará información cartográfica de otras fuentes. En particular, existen modelos digitales de terreno, DEM, de varias fuentes, con resolución espacial de 1 punto cada 12,5 m, cada 30 m o cada 90 m. Las dos primeras dan una aproximación similar a la escala espacial propuesta de 1:25.000. En particular, se pueden obtener de 1) el DEM de CGIAR (USA) (<http://srtm.csi.cgiar.org/>), 2) el DEM del USGS (USA) (https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/); 3) el DEM de la NASA (USA), 4) el DEM de Copernicus (Unión Europea), 5) el DEM de Jaxa (Japón). Muchos de ellos provienen de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM).

Información hidroclimatológica

Se obtendrá información hidrometeorológica recopilada y procesada por El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se han buscado datos de precipitación y caudal con resolución temporal horaria. Por medio de la plataforma en línea (<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-información>) se puede acceder a la información mediante solicitud previa o (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) para descarga libre.

La información solicitada se muestra en la siguiente tabla, allí se muestra el nombre de la estación, su código, parámetro o variable solicitada, resolución temporal, año de inicio y de finalización de los datos.

TABLA 8: ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DE ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

Nombre	Código	Parámetro	Resolución temporal	Año inicio	Año fin
Tanela	11150020	Precipitación	Diaria	1974	2019
Titumate	11150010	Precipitación	Diaria	1974	2019
Capurganá Automática	11155030	Evaporación	Diaria	2007	2019
Capurganá Automática	11155030	Temperatura	Diaria	2007	2019
Capurganá Automática	11155030	Precipitación	Diaria	2007	2019
Capurganá Automática	11155030	Humedad relativa	Diaria	2007	2019
Capurganá Automática	11155030	Rosa de vientos	Multimensual	2007	2019
Capurganá Automática	11155030	Precipitación	Diaria	2007	2019
Unguía	11130010	Precipitación	Diaria	1980	2019

En la tabla anterior se han incluido las estaciones de medición de variables hidrometeorológicas existentes en el área del caso de estudio 1, las cuales registran variables como pluviosidad, viento, evaporación y humedad relativa.

También se utilizará información sobre la precipitación de productos satelitales de la NASA. Para este estudio se utilizará el IMERG, el cual es un producto satelital que hace parte del sistema integrado “GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT” (GPM), especialmente diseñado para la estimación de datos de precipitación y se encuentra disponible en el sitio web de la NASA para descarga libre (<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>) desde marzo del 2014 con

resolución espacial de 0.1° x 0.1° entre 65°N-65°S, resolución temporal de media hora, 3 horas, diaria o mensual y una escala de medición milimétrica. (Huffman et al., 2018; Bolvin et al., 2018; Nelkin et al., 2018). La estimación de la precipitación se logra a través de un algoritmo diseñado para calibrar, unir e interpolar los datos de lluvia.

Información de vías

Se obtendrá de la red nacional de vías del Instituto Nacional de Vías, Invías.

Información social y ambiental

Se obtendrá en de la plataforma Tremarctos Colombia 3.0

(<http://www.tremarctoscolombia.org/>).

4.4.2. Caso de estudio de la zona 2

Las siguientes figuras muestran la localización de las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, en escala 1:25.000, de la Zona de Estudio 2.

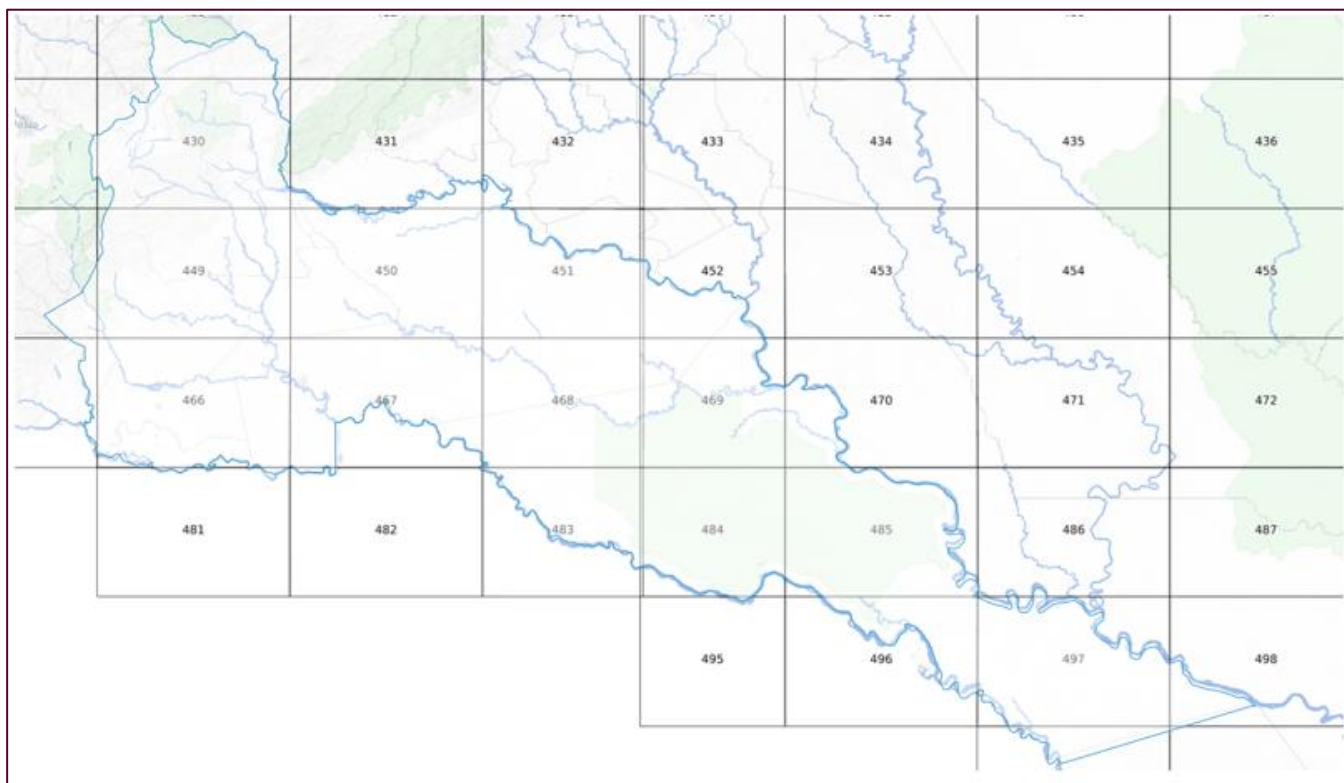


ILUSTRACIÓN 39: PLANCHAS DISPONIBLES PARA EL DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO (EN GRIS CLARO) DE LA ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: IGAC

También se utilizarán las fuentes secundarias cartográficas descritas para la Zona de Estudio 1

• Estaciones pluviométricas

TABLA 9: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoría	Categoría	Estado	Departamen	Municipio	Corriente	Fecha_inst	Fecha_susp
0	-76,817	1,202	2300	MINCHOY [44010040]	44010040	PLUVIOGRAFICA	PG	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	PUTUMAYO	15/11/1977 0:00	
1	-76,981	1,118	2070	BALSAYACO [47010020]	47010020	PLUVIOGRAFICA	PG	ACTIVA	PUTUMAYO	SANTIAGO	PUTUMAYO	15/03/1959 0:00	
2	-73,581	2,355	262	CATALINA LA [32040010]	32040010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/06/1983 0:00	
3	-73,166	2,374	184	ISLA DEL MUERTO	32040020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/06/1983 0:00	
4	-72,867	2,583	177	RAUDAL DOS [32040030]	32040030	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/06/1983 0:00	15/12/1984 0:00
5	-72,633	2,567	250	BOLIVIA LA [32100010]	32100010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/05/1980 0:00	15/01/1990 0:00
6	-71,533	2,867	146	MUCUARE [32100020]	32100020	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/06/1983 0:00	15/12/1983 0:00
7	-70,533	2,800	140	MAPIRIPANA [32150010]	32150010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/06/1983 0:00	15/12/1983 0:00
8	-75,617	1,633	270	PLANTAS FLORENCIA	44030010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	FLORENCIA	HACHA	15/11/1958 0:00	15/09/1973 0:00
9	-75,493	1,489	390	LARANDIA [44030060]	44030060	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	ORTEGUAZA	15/08/1984 0:00	
10	-75,400	1,533	265	MARACAIBO [44030070]	44030070	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	FLORENCIA	SAN PEDRO	15/08/1984 0:00	15/07/2005 0:00
11	-75,508	1,289	260	MILAN [44030080]	44030080	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	MILÁN	ORTEGUAZA	15/08/1984 0:00	
12	-75,967	1,350	560	SAN JOSE DE FRAGUA	44040010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	SAN JOSÉ DEL FRAGUA	FRAGUA	15/06/1968 0:00	15/01/1973 0:00
13	-75,871	1,420	300	BELEN DE ANDAQUÍES	44040020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	BELEN DE LOS ANDAQUÍES	PESCADO	15/03/1990 0:00	
14	-75,400	1,100	250	SAN ANTONIO GETUCH	44050010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	MILÁN	ORTEGUAZA	15/08/1984 0:00	
15	-74,552	-0,115	152	CORDOBA [44100010]	44100010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
16	-73,534	-0,486	139	ESTRECHOS LOS	44120010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
17	-74,289	-0,204	148	UMANCIA [44120020]	44120020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
18	-74,015	-0,339	145	GUAPIRIRA [44130020]	44130020	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	15/10/2000 0:00
19	-73,193	-0,628	137	MONOS LOS [44130040]	44130040	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	LA CHORRERA	CAQUETA	15/04/1984 0:00	28/08/2014 0:00
20	-72,967	-0,617	135	PTO ZABALO [44130050]	44130050	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	15/05/1989 0:00
21	-72,721	-0,591	134	ANGOSTURAS [44130060]	44130060	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	28/08/2014 0:00
22	-72,469	-0,598	132	PTO LAS BRISAS	44130080	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
23	-73,035	-0,525	137	CUEMANI [44140020]	44140020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/05/1989 0:00	
24	-72,145	-0,560	129	AGUAZUL [44150010]	44150010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
25	-75,250	1,967	400	PTO RICO [46030010]	46030010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	GUAYAS	15/07/1960 0:00	15/06/1972 0:00
26	-74,844	1,341	300	CARTAGENA D CHAIRA	46040010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	CAQUETÁ	CARTAGENA DEL CHAIRÁ	GUAYAS	15/09/1984 0:00	
27	-76,667	1,183	579	MOCOÁ [44010010]	44010010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOÁ	MOCOÁ	15/01/1959 0:00	15/11/1979 0:00
28	-76,667	1,083	760	PEPINO EL [44010020]	44010020	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOÁ	CAQUETA	15/10/1963 0:00	28/08/2014 0:00
29	-76,681	1,203	1400	CAMPUCANA [44010030]	44010030	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOÁ	CAQUETA	15/11/1977 0:00	
30	-76,633	1,117	540	FONDO GANADERO	44010050	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOÁ	CAQUETA	15/10/1978 0:00	15/04/1983 0:00

TABLA 10: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

30	-76,633	1,117	540	FONDO GANADERO	44010050	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	15/10/1978 0:00	15/04/1983 0:00
31	-76,441	0,962	500	STA LUCIA [44010080]	44010080	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO GUZMÁN	CAQUETA	15/04/1981 0:00	
32	-76,584	1,281	500	CONDAGUA [44010090]	44010090	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	15/04/1981 0:00	
33	-76,542	1,027	430	PTO LIMON [44010110]	44010110	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/09/1984 0:00	
34	-76,802	1,218	1620	PATAYACO [44010120]	44010120	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	MOCOA	15/07/1997 0:00	
35	-76,645	1,451	701	CASCABEL [44010160]	44010160	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	CASCABEL	15/07/1997 0:00	11/08/2010 0:00
36	-76,900	1,150	2135	SAN ANTONIO [47010010]	47010010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	PUTUMAYO	15/05/1964 0:00	15/03/2002 0:00
37	-76,480	0,474	260	PTO ASIS [47010030]	47010030	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/06/1959 0:00	
38	-76,930	1,134	2100	CHUNGACASPI [47010050]	47010050	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	PUTUMAYO	15/05/1971 0:00	
39	-76,950	1,117	2130	BUENOS AIRES [47010060]	47010060	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/08/1968 0:00	31/03/2008 0:00
40	-76,933	1,150	2070	PUTUMAYO [47010070]	47010070	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/01/1973 0:00	15/04/1989 0:00
41	-77,000	1,150	2075	QUINCHOA [47010080]	47010080	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SANTIAGO	PUTUMAYO	15/07/1976 0:00	15/03/2002 0:00
42	-76,883	1,179	2140	SAN FRANCISCO	47010090	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	PUTUMAYO	15/09/1973 0:00	
43	-76,933	1,167	2065	SAN PABLO [47010100]	47010100	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/05/1974 0:00	15/03/2002 0:00
44	-76,605	0,686	300	PTO CAICEDO [47010110]	47010110	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO CAICEDO	PUTUMAYO	15/10/1978 0:00	
45	-76,567	0,900	320	PTO UMBRIA [47010120]	47010120	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	VILLAGARZÓN	PUTUMAYO	15/10/1978 0:00	15/04/1983 0:00
46	-77,037	1,137	2300	CARRIZAL [47010150]	47010150	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SANTIAGO	PUTUMAYO	15/05/1968 0:00	
47	-76,983	1,183	2280	VICHROY [47010170]	47010170	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	COLÓN	PUTUMAYO	15/08/1972 0:00	15/03/2002 0:00
48	-76,845	1,145	3000	TORRE TV SAN FCO	47010180	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	MOCOA	15/01/1979 0:00	
49	-76,836	0,490	385	PICUDO EL [47010220]	47010220	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	ORITO	GUAMUES	15/11/1985 0:00	
50	-76,927	0,279	500	SAN MIGUEL [47020010]	47020010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	SAN MIGUEL (La Dorada)	SAN MIGUEL	15/04/1981 0:00	
51	-77,100	0,477	500	CHURUYACO [47020020]	47020020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	VALLE DEL GUAMUEZ (La	CHURUYACO	15/04/1981 0:00	
52	-76,817	0,483	500	TIGRE EL [47020030]	47020030	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	VALLE DEL GUAMUEZ (La	GUAMUES	15/04/1981 0:00	15/10/1985 0:00
53	-76,336	0,395	200	ANGOSTURAS [47030010]	47030010	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/04/1981 0:00	
54	-75,630	0,047	195	CONCEPCION [47030020]	47030020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/08/1983 0:00	
55	-76,078	0,338	195	SAN JOAQUIN [47030030]	47030030	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/03/1986 0:00	
56	-74,767	-0,200	147	BASE NAVAL LEGUIZA	47040010	PLUVIOMETRICA	PM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/02/1974 0:00	15/11/1975 0:00
57	-74,387	-0,559	140	REFUGIO EL [47040020]	47040020	PLUVIOMETRICA	PM	ACTIVA	AMAZONAS	PUERTO ALEGRÍA	PUTUMAYO	15/04/1986 0:00	

En este caso de estudio se dispone de un mayor número de estaciones, debido a que su extensión es mayor que la del caso de estudio 1.

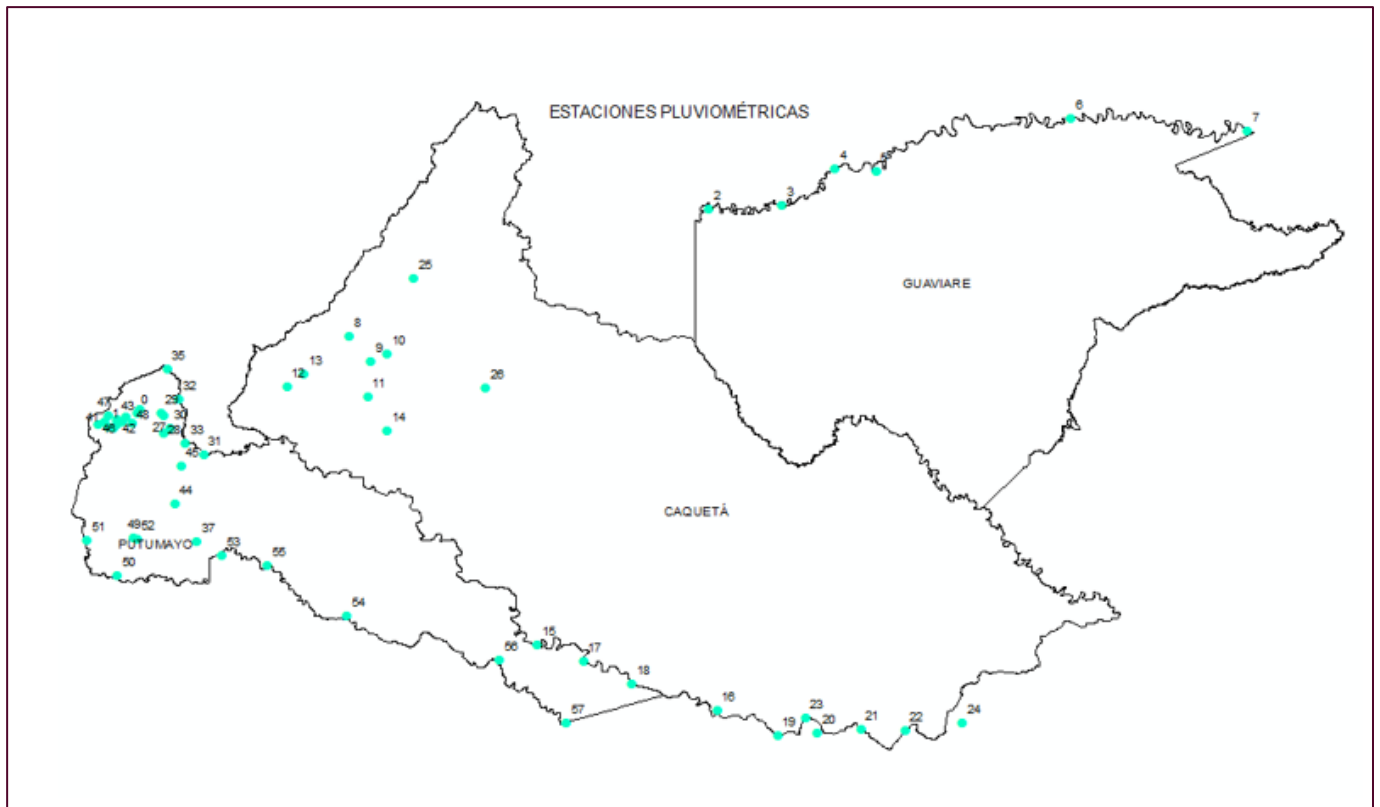


ILUSTRACIÓN 40: UBICACIÓN ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para el análisis, se emplea información meteorológica proveniente de estaciones de medición que registran variables atmosféricas relevantes para la caracterización climática e hidrológica de las cuencas.

En este contexto, las estaciones sinópticas, climatológicas principales, climatológicas ordinarias y agrometeorológicas corresponden a distintos tipos de estaciones meteorológicas destinadas a la medición de múltiples variables atmosféricas, tales como temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, y precipitación. Las diferencias entre estos tipos de estaciones radican principalmente en su propósito operativo y en el nivel de detalle y frecuencia de las mediciones: las estaciones sinópticas están orientadas al pronóstico meteorológico a escala regional y global mediante observaciones en horarios estandarizados; las climatológicas principales permiten un análisis detallado del clima regional; las climatológicas ordinarias registran información climática básica con menor instrumentación; y las estaciones agrometeorológicas integran variables climáticas con observaciones biológicas y de suelo, orientadas a aplicaciones agrícolas.

Para efectos de la identificación y evaluación de pequeñas centrales hidroeléctricas, las variables de mayor relevancia son la precipitación, la temperatura y la humedad relativa, a partir de las cuales se estiman los caudales medios de las cuencas y, en consecuencia, se proyecta la generación de energía en el tiempo. Estas tres variables son medidas en todos los tipos de estaciones mencionados, independientemente de su clasificación, mientras que las restantes variables, que constituyen las principales diferencias entre los tipos de estaciones, no resultan determinantes para este análisis.

Adicionalmente, las estaciones limnimétricas y limnigráficas registran los niveles del agua en los cuerpos hídricos y, mediante ecuaciones de calibración nivel-caudal, dicha información se transforma en caudales. Esta variable constituye la información hidrológica entregada por el IDEAM y es la utilizada directamente para los análisis y cálculos desarrollados en el presente estudio.

- **Estaciones sinópticas**

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoria	Categoría-a	Estado	Departamen	Municipio	Corriente	Fecha_inst	Fecha_susp
0	-76,500	0,500	254	APTO PUERTO ASIS	47015020	SINOPTICA PRINCIPAL	SP	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO ASÁS	PUTUMAYO	15/01/1965 0:00	15/09/1984 0:00
1	-75,236	0,738	219	TRES ESQUINAS	44055010	SINOPTICA PRINCIPAL	SP	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	ORTEGUAZA	15/04/1971 0:00	

TABLA 11: ESTACIONES SINÓPTICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

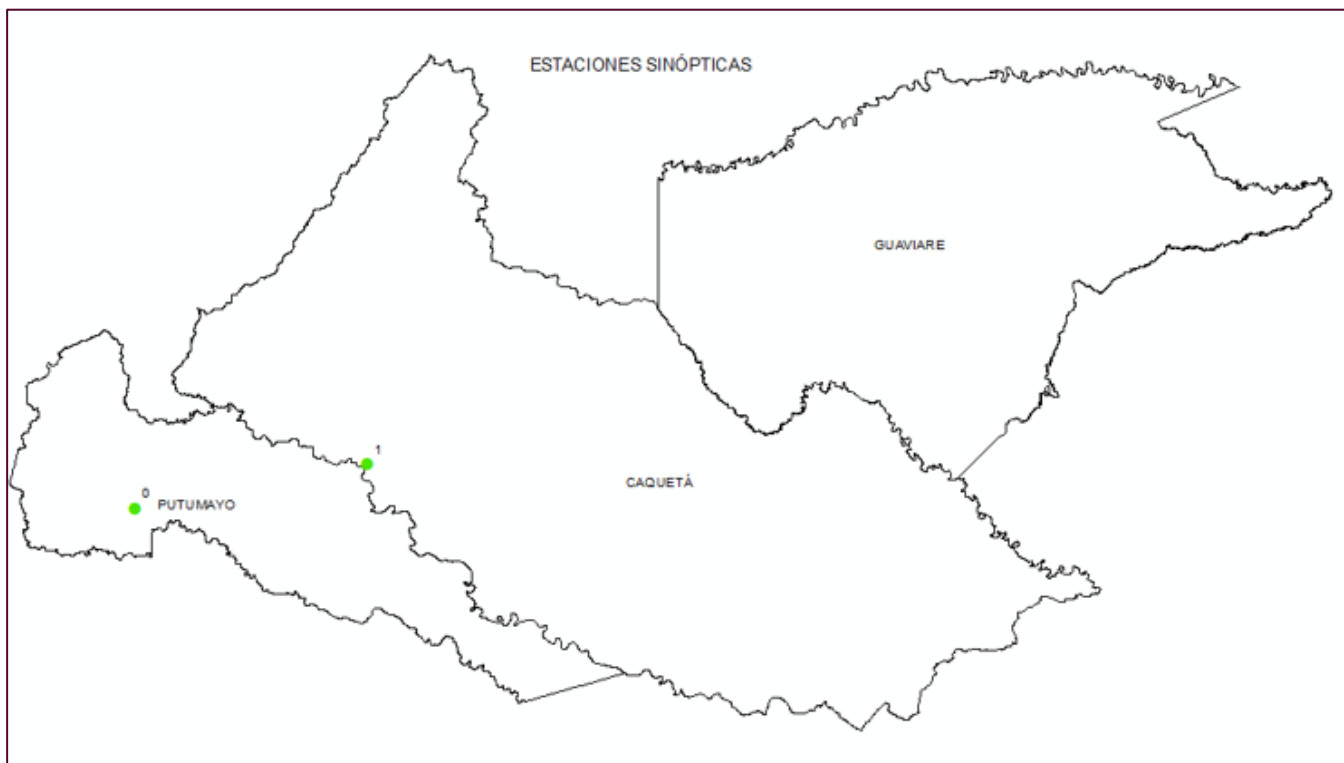


ILUSTRACIÓN 41: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES SINÓPTICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

• Estaciones limnimétricas

TABLA 12: ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoría	Categoría	Estado	Departamen	Municipio	Corriente	Fecha_inst	Fecha_susp
0	-72.814	2.614	1777	BAJO GUAYABERO	32047020	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/07/1980 0:00	20/09/2013 0:00
1	-73.581	2.355	255	CATALINA LA [32047030]	32047030	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/02/1983 0:00	
2	-73.166	2.374	192	ISLA DEL MUERTO	32047040	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/02/1983 0:00	20/09/2013 0:00
3	-71.533	2.867	146	MUCUARE [32107020]	32107020	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/03/1983 0:00	15/12/1985 0:00
4	-72.638	2.573	172	SAN JOSÉ GUAVIARE	32107030	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/04/1988 0:00	
5	-75.508	1.289	260	MILAN [44037010]	44037010	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	MILÁN	ORTEGUAZA	15/05/1988 0:00	
6	-75.667	1.683	550	DIAMANTE EL [44037030]	44037030	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	FLORENCIA	CARA#O	15/06/1963 0:00	15/09/1988 0:00
7	-75.283	1.567	470	BOCATOMA N 1 [44037070]	44037070	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	EL PAUJIL	PAUJIL	15/02/1971 0:00	15/08/1981 0:00
8	-75.283	1.567	470	BOCATOMA N 2 [44037110]	44037110	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	EL PAUJIL	PAUJIL	15/03/1973 0:00	15/10/1977 0:00
9	-75.643	1.650	480	BOCATOMA 1 [44037120]	44037120	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	DEDO	15/08/1970 0:00	
10	-73.534	-0.486	139	ESTRECHOS LOS	44127010	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
11	-74.289	-0.204	148	UMANCIA [44127020]	44127020	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
12	-74.015	-0.339	145	GUAQUIRA [44137020]	44137020	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	20/10/2010 0:00
13	-73.193	-0.628	137	MONOS LOS [44137040]	44137040	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	LA CHORRERA	CAQUETA	15/04/1984 0:00	28/08/2014 0:00
14	-72.967	-0.617	135	PTO ZABALO [44137050]	44137050	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	15/04/1989 0:00
15	-72.721	-0.591	134	ANGOSTURAS [44137060]	44137060	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	15/04/1984 0:00
16	-72.547	-0.697	133	MONOCHOA [44137070]	44137070	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
17	-72.469	-0.598	132	PTO LAS BRISAS	44137080	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
18	-72.382	-0.617	130	ARARACUARA [44147010]	44147010	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/08/1980 0:00	1/01/2011 0:00
19	-72.382	-0.618	137	CUEMANI [44147020]	44147020	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/04/1989 0:00	
20	-72.145	-0.560	129	AGUAZUL [44157050]	44157050	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1984 0:00	1/01/2011 0:00
21	-75.218	1.746	500	ESMERALDA LA [46037010]	46037010	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	ESMERALDA	15/02/1971 0:00	
22	-75.217	1.667	480	BOCATOMA [46037020]	46037020	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	EL DONCELLO	CAGUAN	15/02/1971 0:00	15/03/1971 0:00
23	-75.250	1.783	500	ALTO LA ESMERALDA	46037030	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	LA ESMERALDA	15/06/1973 0:00	15/03/1977 0:00
24	-75.292	1.691	373	DONCELLO [46037040]	46037040	LIMNIMETRICA	LM	ACTIVA	CAQUETÁ	EL DONCELLO	DONCELLO	15/02/1971 0:00	
25	-75.217	1.950	450	PATIO BONITO [46037050]	46037050	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	QDA LAS DAMAS	15/02/1977 0:00	15/07/1983 0:00
26	-76.617	1.133	771	PTE MOCOA [44017020]	44017020	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/11/1977 0:00	15/05/1980 0:00
27	-76.650	1.167	750	PTE PITALITO [44017030]	44017030	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/11/1977 0:00	15/03/1978 0:00
28	-76.645	1.451	701	CASCABEL [44017150]	44017150	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	CASCABEL	15/07/1997 0:00	11/08/2010 0:00
29	-76.900	1.150	2075	PTE CARRETERA	47017030	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	POROTOYACO	15/10/1977 0:00	15/05/1980 0:00
30	-76.967	1.183	2095	COLON [47017040]	47017040	LIMNIMETRICA	LM	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	SIGUINCHICA	15/10/1977 0:00	15/05/1980 0:00

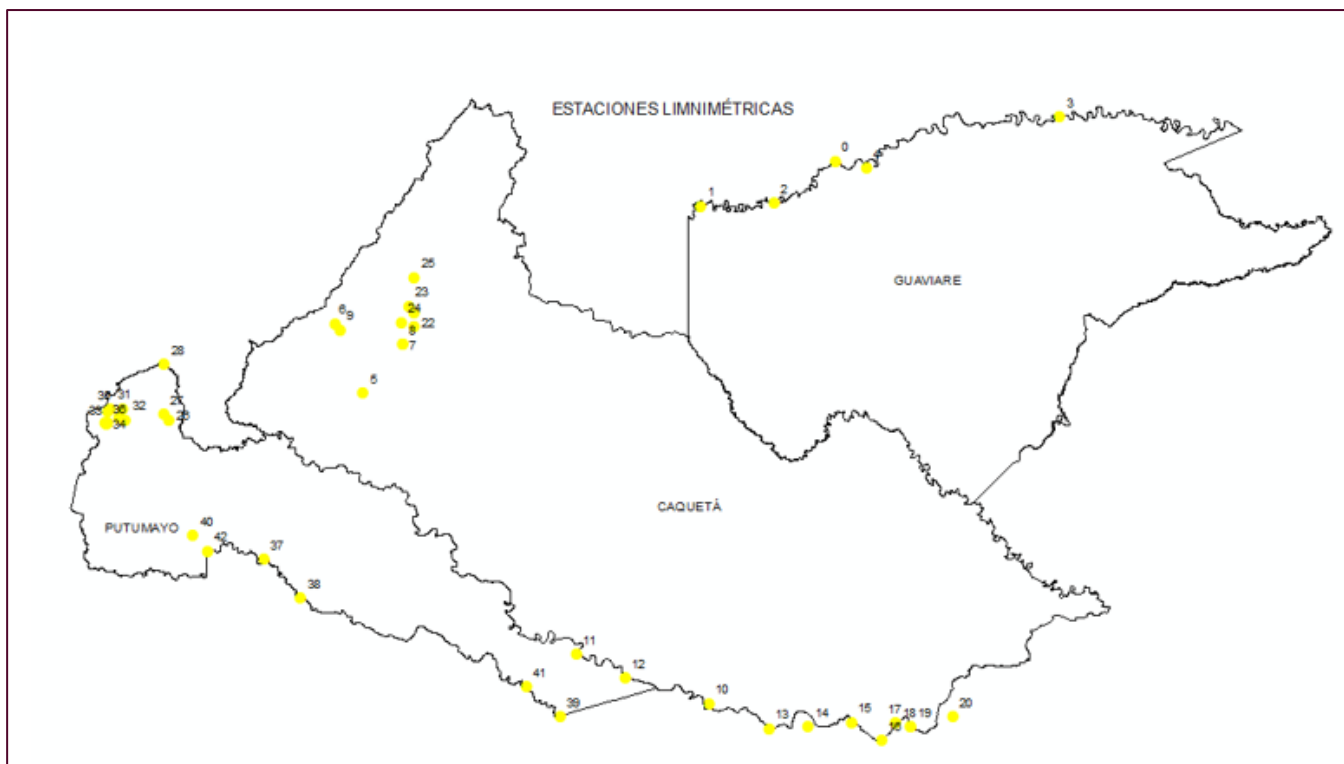


ILUSTRACIÓN 42: UBICACIÓN ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

• Estaciones limnigráficas

TABLA 13: ESTACIONES LIMNIGRÁFICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoría	Categoría	Estado	Departamento	Municipio	Corriente	Fecha_instalacion	Fecha_suspension
0	-72,867	2,583	177	RAUDAL DOS [32047010]	32047010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/07/1980 0:00	
1	-72,751	2,569	175	PTO ARTURO [32107010]	32107010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/11/1978 0:00	
2	-70,533	2,800	121	MAPIRIPANA [32157010]	32157010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/03/1983 0:00	
3	-75,529	1,563	520	VENECIA [44037050]	44037050	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	ORTEGUAZA	15/02/1971 0:00	
4	-75,725	1,497	253	MORELIA [44037080]	44037080	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	MORELIA	BODOQUERO	15/03/1971 0:00	
5	-75,493	1,489	390	LARANDIA [44037090]	44037090	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	ORTEGUAZA	15/03/1971 0:00	
6	-75,482	1,528	236	ITARCA [44037100]	44037100	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	MONTAÑITA	SAN PEDRO	15/03/1971 0:00	
7	-75,633	1,600	480	BOCATOMA 2 [44037130]	44037130	LIMNIGRÁFICA	LG	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	FLORENCIA	DEDO	15/02/1974 0:00	15/10/1977 0:00
8	-74,667	-0,057	153	TAGUA LA [44117010]	44117010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/04/1984 0:00	
9	-72,345	-0,638	123	MERCEDES LAS [44157010]	44157010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	AMAZONAS	SANTANDER (Araracuara)	CAQUETA	15/04/1986 0:00	
11	-74,772	2,112	670	SAN IGNACIO [46017010]	46017010	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	SAN VICENTE DEL CAGUÁN	CAGUAN	15/12/1984 0:00	
12	-75,151	1,918	450	PTO RICO [46037060]	46037060	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	GUAYAS	15/02/1977 0:00	
13	-76,633	1,200	1200	PIEDRA LISA [44017010]	44017010	LIMNIGRÁFICA	LG	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/10/1977 0:00	15/08/1989 0:00
14	-76,336	0,395	200	ANGOSTURAS - PUTUMAYO	44017100	LIMNIGRÁFICA	LG	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/06/1981 0:00	31/03/2008 0:00
15	-76,600	1,400	631	YUNGUILLO [44017130]	44017130	LIMNIGRÁFICA	LG	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	15/07/1997 0:00	15/09/2005 0:00
16	-76,579	0,789	350	JOYA LA [47017150]	47017150	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	VILLAGARZÓN	GUINEO	15/06/1981 0:00	
17	-76,577	0,583	250	PTE TEXAS [47017160]	47017160	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/06/1981 0:00	
18	-76,836	0,490	385	PICUDO EL [47017170]	47017170	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	ORITO	GUAMUES	15/09/1984 0:00	
19	-74,780	-0,200	147	PTO LEGUIZAMO	47047050	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/05/1986 0:00	
20	-75,666	1,725	600	EL ROSARIO AUTOMATICA	44037040	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	CARA#O	15/08/1964 0:00	
21	-75,619	1,621	270	FLORENCIA-HACHA	44037060	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	HACHA	15/02/1971 0:00	
22	-76,661	1,214	723	PIEDRA LISA II [44017120]	44017120	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/07/1997 0:00	
23	-76,985	1,106	1450	EDEN EL [47017070]	47017070	LIMNIGRÁFICA	LG	ACTIVA	PUTUMAYO	SANTIAGO	PUTUMAYO	15/02/1970 0:00	

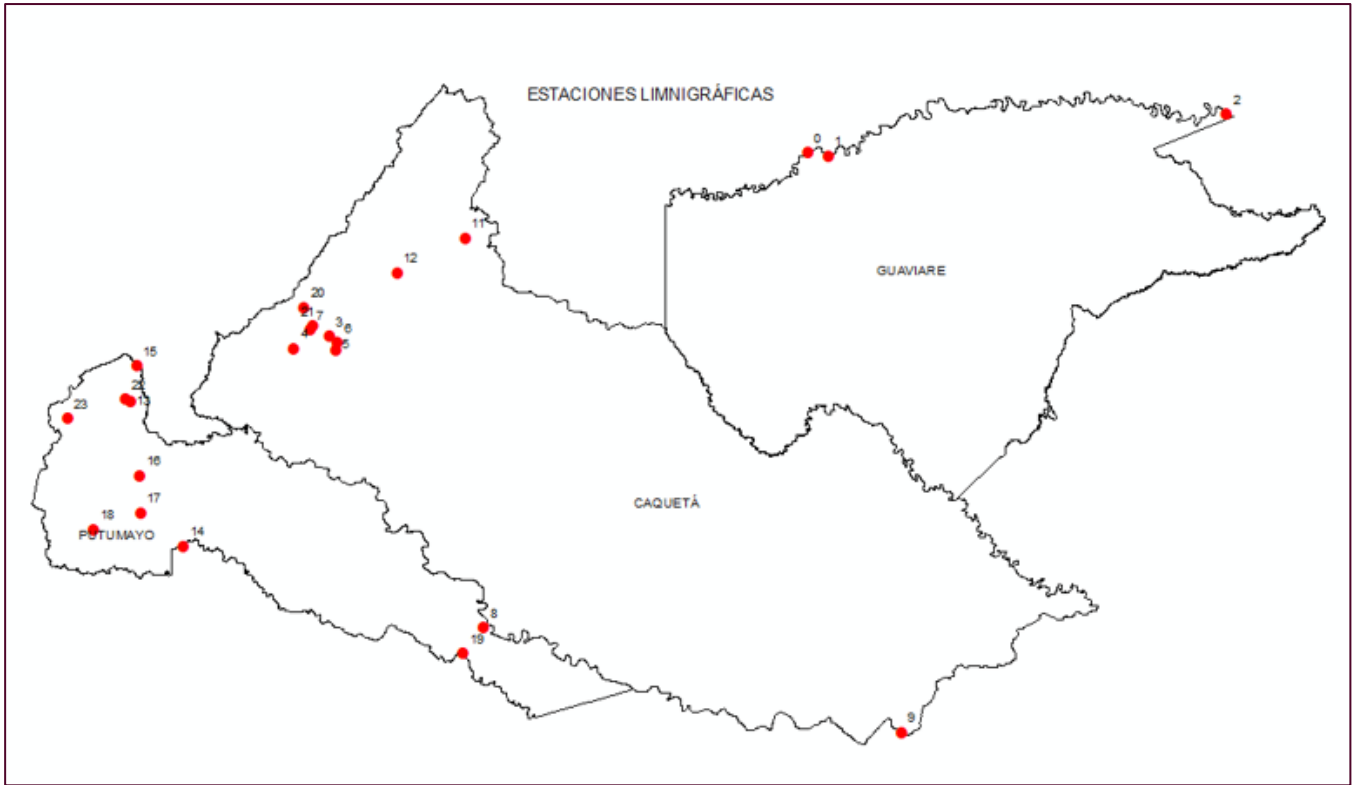


ILUSTRACIÓN 43: UBICACIÓN ESTACIONES LIMNIGRÁFICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

• Estaciones climatológicas

TABLA 14: ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoria	Estado	Departamento	Municipio	Corriente	Fecha_instalacio	Fecha_suspension
0	-72,640	2,373	150	TRUENO EL [31015010]	31015010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	CNO GRANDE	15/05/1982 0:00
1	-72,783	2,583	260	BOCAS DEL ARIARI	32045010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/09/1967 0:00
2	-71,533	2,867	146	MUCUARE [32105060]	32105060	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/12/1983 0:00
3	-72,647	2,553	165	SAN JOSÉ GUAVIARE	32105070	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/11/1983 0:00
4	-70,533	2,800	140	MARIPIPANA [32155010]	32155010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAYABERO	15/12/1983 0:00
5	-75,560	1,589	244	APTO G ARTUNDIAGA	44035020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	HACHA	15/10/1969 0:00
6	-75,962	1,325	320	SAN JOSÉ DE FRAGUA	44045010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	SAN JOSÉ DEL FRAGUA	FRAGUA	15/10/1972 0:00
7	-75,704	1,195	270	VALPARAISO [44045020]	44045020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	VALPARAISO	PESCADO	15/11/1967 0:00
8	-75,808	1,303	300	MONO LA [4404503]	44045030	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	BELÉN DE LOS ANDAQUÍES	PESCADO	15/11/1967 0:00
9	-74,785	1,735	240	STA ROSA CAGUAN	46015020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	SAN VICENTE DEL CAGUÁN	CAGUAN	15/09/1984 0:00
10	-75,163	1,640	270	MAGUIARE [46035010]	46035010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	CAQUETÁ	EL DONCELLO	GUAYAS	15/10/1967 0:00
11	-75,151	1,918	285	PUERTO RICO [46035020]	46035020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	PUERTO RICO	GUAYAS	15/10/1972 0:00
12	-74,417	0,600	200	REMOLINOS D CAGUAN	46045010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	CARTAGENA DEL CHAIRÁ	CAGUAN	15/12/1985 0:00
13	-76,867	1,183	2230	PORVENIR [44015020]	44015020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	PUTUMAYO	15/01/1976 0:00
14	-76,652	1,157	650	MOCOA ACUEDUCTO	44015040	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	15/04/1983 0:00
15	-76,667	1,183	579	MOCOA [44015050]	44015050	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	MOCOA	15/10/1964 0:00
16	-76,933	1,183	2067	MENTA LA [4701501]	47015010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/10/1968 0:00
17	-76,917	1,183	2100	SIBUNDOY [47015030]	47015030	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/10/1957 0:00
18	-76,961	1,198	2100	MICHOACAN [47015040]	47015040	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	PUTUMAYO	COLÓN	PUTUMAYO	15/01/1977 0:00
19	-76,517	0,500	260	PTO ASIS [47015050]	47015050	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/04/1972 0:00
20	-77,000	1,133	2220	SANTIAGO [47015060]	47015060	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	MOCOA	PUTUMAYO	15/10/1968 0:00
21	-76,570	0,839	362	PTO UMBRIA [47015070]	47015070	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	FUERA DE SERV	PUTUMAYO	VILLAGARZÓN	PUTUMAYO	15/04/1983 0:00
22	-76,933	1,168	2067	PRIMAVERA LA [47015090]	47015090	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	SIBUNDOY	PUTUMAYO	15/09/1983 0:00
23	-76,167	0,383	200	PIÑUÑA BLANCA	47035010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	SUSPENDIDA	PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	PUTUMAYO	15/04/1981 0:00
24	-75,851	0,133	190	PTO OSPINA [47035020]	47035020	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/05/1986 0:00
25	-74,776	-0,181	147	PTO LEGUIZAMO	47045010	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	PUTUMAYO	15/11/1973 0:00
26	-70,261	-3,819	82	PARQUE AMACAYACU	48015030	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	CO	ACTIVA	AMAZONAS	LETICIA	AMAZONAS	15/11/1992 0:00
27	-72,783	2,583	210	PTO ARTURO [32105010]	32105010	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	SUSPENDIDA	GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	GUAVIARE	15/10/1985 0:00
28	-75,645	1,733	600	FLORENCIA-DESIZAMIEN	44035040	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	CARAÑO	4/02/2006 0:00
29	-72,382	-0,616	150	ARARACUARA [44135010]	44135010	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	15/03/1979 0:00
31	-72,451	-0,074	250	CHIRIBIQUETE AUTOMATIC	44135030	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	SOLANO	CAQUETA	4/02/2006 0:00
32	-74,763	2,063	300	SAN VICENTE CAGUAN	46015010	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	CAQUETÁ	SAN VICENTE DEL CAGUÁN	CAGUAN	15/01/1963 0:00
33	-74,763	2,063	300	SAN VICENTE DEL CAGUAN	46015030	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	CAQUETÁ	SAN VICENTE DEL CAGUÁN	CAGUAN	30/09/2008 0:00
34	-76,652	1,157	650	ACD TO MOCOA AUTOM	44015060	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	29/03/2006 0:00
35	-76,667	1,083	760	EL PEPINO AUTOMATICA	44015070	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	PUTUMAYO	MOCOA	CAQUETA	11/11/2005 0:00
36	-74,898	-0,174	194	PNN LA PAYA AUTOMATIC	47035030	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	FUERA DE SERV	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAUCAYA	20/09/2007 0:00
38	-70,363	-3,780	158	PTO NARIÑO AUTOM	48015040	CLIMATOLOGICA PRINCIPAL	CP	ACTIVA	AMAZONAS	PUERTO NARIÑO	LORETO YACU	19/07/2005 0:00

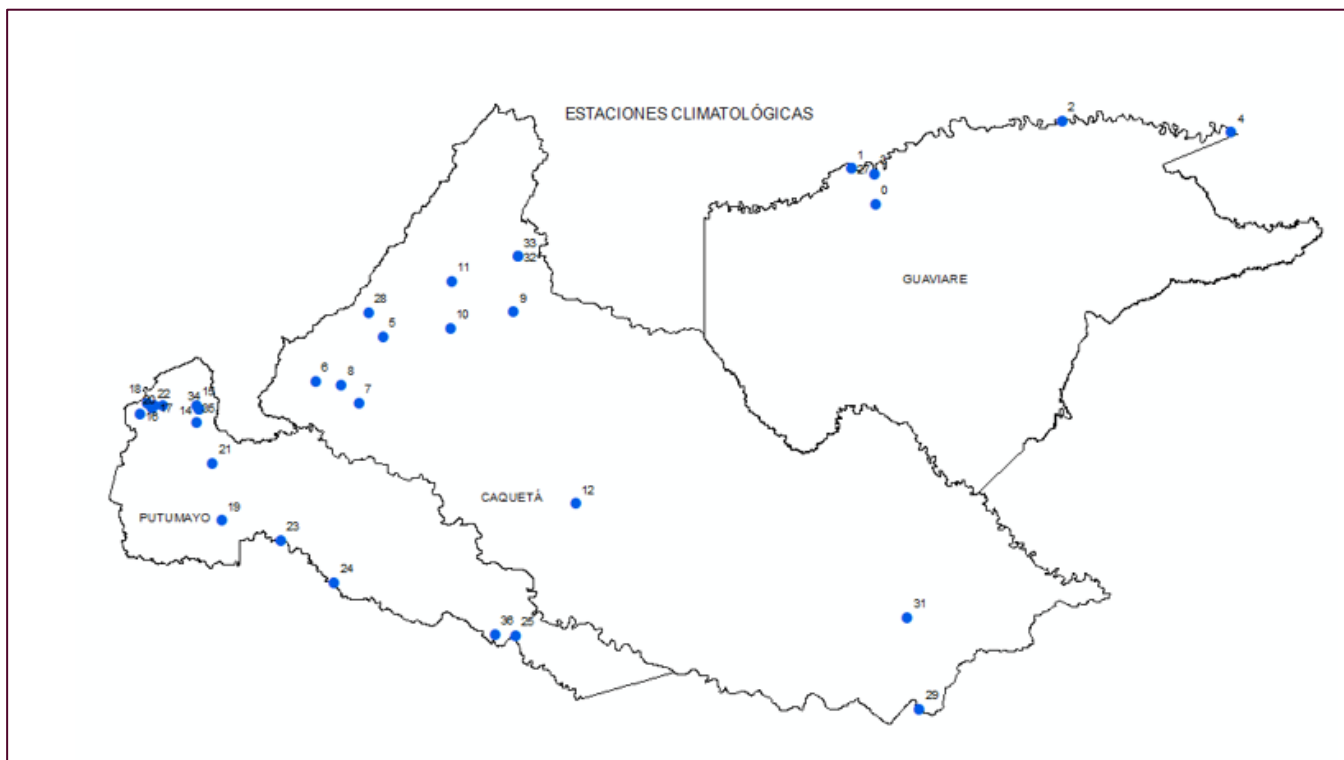


ILUSTRACIÓN 44: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- Estaciones agrometeorológicas

TABLA 15: ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL IDEM

FID	X	Y	Altitud	Nombre	Codigo	Categoría	Categoría-a	Estado	Departamen	Municipio	Corriente	Fecha_instalacion	Fecha_suspension
0	-72,647	2,553	165	SAN JOSE DEL GUAVIARE	32105080	AGROMETEOROLOGICA	AM	ACTIVA	GUAVIARE	SAN JOSÉ	GUAVIARE	26/09/2008 0:00	
1	-75,600	1,617	280	FLORENCIA C A [44035010]	44035010	AGROMETEOROLOGICA	AM	SUSPENDIDA	CAQUETÁ	FLORENCIA	HACHA	15/10/1969 0:00	15/02/1984 0:00
2	-75,661	1,500	280	MACAGUAL [44035030]	44035030	AGROMETEOROLOGICA	AM	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	ORTEGUAZA	15/02/1971 0:00	
3	-75,661	1,500	280	MACAGUAL AUTOMATICA	44035050	AGROMETEOROLOGICA	AM	ACTIVA	CAQUETÁ	FLORENCIA	ORTEGUAZA	10/07/2005 0:00	
4	-74,665	-0,061	153	TAGUA LA [44115020]	44115020	AGROMETEOROLOGICA	AM	ACTIVA	PUTUMAYO	PUERTO LEGUIZAMO	CAQUETA	15/12/1973 0:00	
5	-76,619	1,034	440	VILLAGARZÓN [44015010]	44015010	AGROMETEOROLOGICA	AM	ACTIVA	PUTUMAYO	VILLAGARZÁ	MOCOA	15/08/1964 0:00	

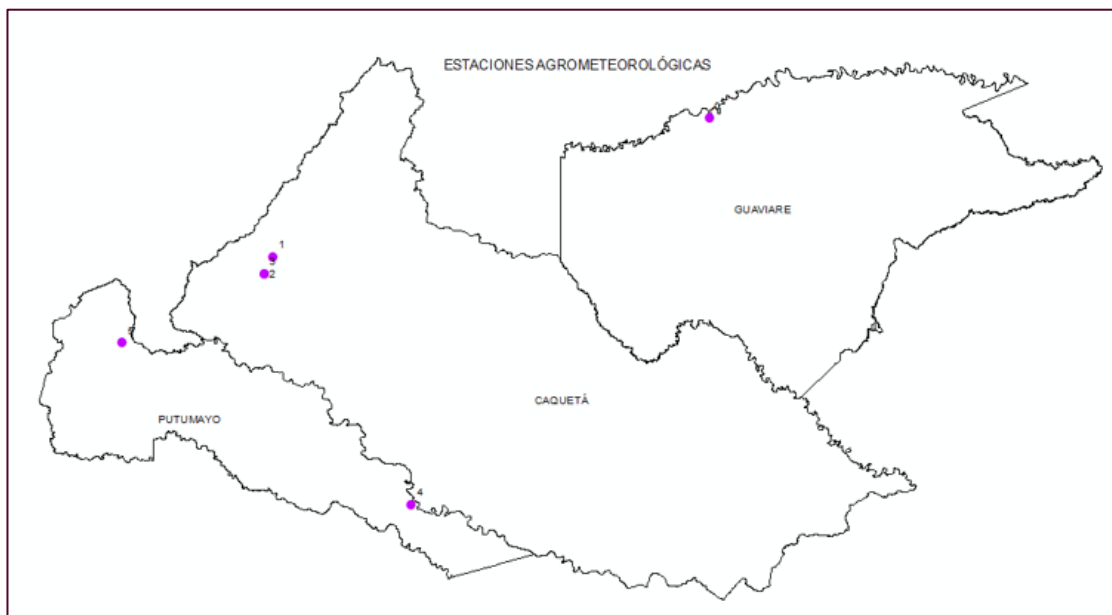


ILUSTRACIÓN 45: UBICACIÓN ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS ZONA DE ESTUDIO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Si fuera necesario, también se utilizarán las fuentes secundarias *meteorológicas* descritas para la Zona de Estudio 1

Información de vías

Se obtendrá de la red nacional de vías del Instituto Nacional de Vías, Invías.

Información social y ambiental

Se obtendrá en de la plataforma Tremarctos Colombia 3.0 (<http://www.tremarctoscolombia.org/>).

Tech for impact