

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO ENERGÉTICO DE RECURSOS
RENOVABLES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA,
UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, SIG - CASOS DE
ESTUDIO

JULIÁN ALONSO ARAQUE DUARTE

FRANCY GINETH BLANCO PATIÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2015

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO ENERGÉTICO DE RECURSOS
RENOVABLES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA,
UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, SIG – CASOS DE
ESTUDIO

JULIÁN ALONSO ARAQUE DUARTE

FRANCY GINETH BLANCO PATIÑO

Trabajo de Grado presentado para optar al título de

Ingeniero Químico

Director:

VIATCHESLAV KAFAROV

Ingeniero Químico Ph. D.

Co – Director:

ANA MARIA ROSSO CERÓN

Ingeniera Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

Después de casi 5 años llenos de infinitas experiencias quiero agradecerle a Dios por todo lo que me ha permitido vivir a través de este tiempo, por la carrera que estudie, por mostrarme su infinito amor y misericordia a través de mis padres, y quiero dedicarle este proyecto a Él porque sin su ayuda esto no hubiese sido posible (Job 9:4).

Deseo dedicar con todo mi corazón este trabajo a mis padres, Jesús Alonso Araque y Sandra Liliana Duarte, quienes me han apoyado incondicionalmente en todos los proyectos que he emprendido, y quienes me han enseñado lo grande que es el amor ágape por un hijo, les debo tanto que nunca les podré devolver todo lo que han hecho por mí.

A mi nona Flor Alba, por su gran amor, paciencia y ayuda hacia mí, quien me ha enseñado el dar sin esperar nada a cambio.

A mi hermano Juan Pablo, por probar mi paciencia y compartir increíbles momentos como hermanos y en familia.

A toda mi familia Duarte, mis tíos, mis tías, mis primos, por ser parte de mis logros, siendo compañía en todo momento y mostrándome su cariño de diferentes formas, haciéndome sentir muy especial en la familia.

A toda mi familia Araque, mis tíos, mis tías, mis primos, mi nona María por estar siempre atentos a mí y ayudarme en todo lo he necesitado en su tiempo, me hacen sentir siempre agradecido y orgulloso de tener una familia linda y unida.

A mis amados amigos de LBD, por la amistad que Dios nos ha permitido tener, su compañía y todos los buenos momentos que hemos vivido.

A Sergio Reyes, por escucharme, aconsejarme sabiamente y apoyarme, gracias a Dios.

A mis amigos de la UIS, porque hicieron parte integral de mi formación profesional, con quienes formé amistades muy importantes y aportaron buenas cosas para mi vida.

Finalmente a Francy, quien ha hecho parte de este logro a través de todos estos años de amistad, quien me ha tenido una paciencia infinita, me ha apoyado en todas las cosas que he realizado y con quien he compartido momentos inolvidables.

Julián Araque

Deseo agradecer a Dios, por permitirme vivir esta experiencia, por darme la paciencia y la fortaleza para continuar día tras día y brindarme una vida tan maravillosa.

Quiero dedicar este trabajo...

A mi madre, Isabel Patiño, por ser quién siempre está para mí, por su cariño, su comprensión, su paciencia y su apoyo incondicional, por dedicar su vida a mi hermano y a mí, para que alcancemos todo lo que hemos soñado.

A mi padre, Javier Blanco, por todo su cariño y porque durante toda mi vida, siempre ha estado apoyándome.

A mi hermano, Sergio Blanco, porque juntos hemos aprendido que la mejor compañía es la familia.

A mi nonita, Alcira Prada, porque no me imagino una vida sin su amor y compañía, y a mi nonito, Eliecer Blanco, quien a pesar de ya no estar conmigo, siempre vive en mi mente y en mi corazón.

A Pru, mi tía Matilde, mi nonita Josefina, quien me acompaña desde el cielo, y a toda mi familia, porque son lo más importante que tengo y siempre han estado brindándome cariño, compañía y apoyo.

A Gisse, Nayis, Luzda, Jised, July, Marlon, Dieguito y a todos mis amigos de la U, porque hicieron de este tiempo una experiencia única, llena de aprendizaje, de sonrisas y de cariño.

A Nathalia, por tantas aventuras juntas, por una amistad verdadera.

A Julián, porque juntos desarrollamos este proyecto, por brindarme la amistad más sincera e incondicional todos estos años, porque hemos vivido experiencias únicas e inolvidables y me ha enseñado cosas invaluable para mi vida.

Finalmente, a Eduardo, por llegar a mi vida cuando menos lo esperaba.

Francy Blanco

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser nuestra guía y fortaleza, por permitirnos vivir esta aventura y alcanzar este logro, porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Química, por brindarnos muchas de las enseñanzas y experiencias necesarias en nuestra formación integral como ingenieros químicos.

Al Doctor Viatcheslav Kafarov, por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto.

A la ingeniera Ana Maria Rosso, por ser nuestra guía en este trabajo, por todas sus enseñanzas, su paciencia y su dedicación.

Al CIDES, por recibimos y brindarnos el apoyo y los recursos necesarios para desarrollar este trabajo.

A nuestros padres, por brindarnos su cariño, su constante apoyo y su compañía incondicional en todo este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. ZONAS NO INTERCONECTADAS	18
1.2. RECURSOS RENOVABLES	18
1.2.1. Energía solar.....	18
1.2.2. Energía Eólica.	19
1.2.3. Energía Hídrica	19
1.2.4. Biomasa	20
1.3. POTENCIAL ENERGÉTICO	20
1.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1. SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	22
2.2. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO ENERGÉTICO	23
2.2.1. Estimación del potencial teórico energético.....	23
2.2.2. Selección de las tecnologías y los equipos.....	29
2.2.3. Consumo específico de energía primaria	29
2.2.4. Determinación del potencial técnico energético.	31
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
3.1. ENERGÍA SOLAR	32

3.2.	ENERGÍA EÓLICA.....	35
3.3.	ENERGÍA HÍDRICA.....	38
3.4.	BIOMASA.....	42
4.	CONCLUSIONES	48
5.	RECOMENDACIONES	50
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelos de datos: Vectorial y Raster	21
Figura 2. Pasos de la metodología seguida en el proyecto.....	22
Figura 3. Restricciones territoriales.	24
Figura 4. Potencial solar teórico energético promedio diario multianual	33
Figura 5. Consumo específico de radiación solar	34
Figura 6. Potencial solar técnico energético promedio diario multianual: Chocó y Meta. ..	34
Figura 7 . Potencial solar técnico energético promedio diario multianual: Putumayo y Nariño	35
Figura 8. Potencial eólico teórico energético promedio diario multianual.	36
Figura 9. Consumo específico de energía primaria eólica	37
Figura 10. Potencial técnico energético del recurso eólico	38
Figura 11. Potencial hídrico teórico energético promedio multianual.....	39
Figura 12. Consumo específico del recurso hídrico.....	40
Figura 13. Potencial técnico hídrico.....	41
Figura 14. Cultivos permanentes y su producción anual por departamento	43
Figura 15. Potencial teórico energético de la biomasa residual agrícola promedio multianual.....	44
Figura 16. Consumo específico del recurso de biomasa	46
Figura 17. Potencial técnico del recurso biomasa: Chocó y Meta	46
Figura 18. Potencial técnico del recurso biomasa: Nariño y Putumayo	47

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los equipos por capacidad instalada	34
Tabla 2. Características de los equipos por capacidad instalada	37
Tabla 3. Parámetros utilizados para el cálculo del consumo específico	40
Tabla 4. Residuos agrícolas utilizados para el consumo específico del recurso de biomasa en los casos de estudio	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Cantidad de usuarios presentes en las zonas no interconectadas	58
Anexo B. RETScreen.....	59
Anexo C. Método de Interpolación de Kriging	60
Anexo D. Metodología para el recurso hídrico.....	61
Anexo E. Mapas de precipitación y evapotranspiración.....	63
Anexo F. Potencial teórico energético de la biomasa residual agrícola	65
Anexo G. Tecnologías y capacidades instaladas por tipo de recurso	70
Anexo H. Mapas de velocidades de viento.....	73
Anexo I. Saltos netos obtenidos en los casos de estudio	74
Anexo J. Validación de los caudales obtenido para el recurso hídrico	76
Anexo K. Equipos seleccionados para el cálculo del potencial técnico energético	79

RESUMEN

TÍTULO: ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO ENERGÉTICO DE RECURSOS RENOVABLES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA, UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, SIG - CASOS DE ESTUDIO*

AUTORES: Julián Alonso Araque Duarte**, Francy Gineth Blanco Patiño.

PALABRAS CLAVES: Biomasa, Hídrica, Solar, Eólica, Potencial energético, Zonas No Interconectadas, ArcGIS.

DESCRIPCIÓN:

La dependencia energética a los combustibles fósiles ha desencadenado gran preocupación, debido a que sus reservas son limitadas y ocasionan graves impactos ambientales. Así, las energías renovables se presentan como una alternativa llamativa frente a esta problemática debido a la disponibilidad de los recursos y el bajo impacto al medio ambiente. Estudios anteriores han evaluado los potenciales energéticos de ciertos recursos a nivel nacional, sin embargo, recomiendan hacer estudios particulares en las áreas de interés con el fin de obtener valores más precisos. Por lo tanto, el presente trabajo evalúa el potencial técnico energético de los recursos: Sol, viento, agua y biomasa residual agrícola, en los municipios con Zonas No Interconectadas (ZNI) de Nariño, Chocó, Putumayo y Meta, siendo estos los departamentos con el mayor número de usuarios de energía eléctrica en Colombia, destacando las opciones viables para suplir lo requerimientos de la misma por medio de energías renovables. Los potenciales se estimaron utilizando las bases de datos de la NASA, el IDEAM, AGRONET y el software ArcGIS, considerando restricciones sociales y ambientales, como la presencia de reservas indígenas, grupos armados y parques naturales. Se determinó la tecnología más adecuada para aprovechar cada una de las fuentes renovables estudiadas, teniendo en cuenta el costo, el rendimiento y la viabilidad en las ZNI, así como un equipo de referencia para cada una. Los resultados muestran que los recursos hídrico, solar y la biomasa pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica en los cuatro departamentos, debido a la abundancia de estos recursos y los altos potenciales obtenidos; por otro lado, el recurso eólico no es el adecuado para ser aprovechado en ninguno de los casos, debido a que las velocidades del viento no son las suficientes para que los aerogeneradores funcionen correctamente.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph D. Viatcheslav Kafarov. Co-directora: Ing. Ana Maria Rosso Cerón. Universidad Industrial de Santander.

ABSTRACT

TITLE: ASSESSMENT THE ENERGY TECHNICAL POTENTIAL OF RENEWABLE SOURCES IN NON-INTERCONNECTED ZONES OF COLOMBIA, USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, GIS - STUDY CASES*

AUTHORS: Julián Alonso Araque Duarte**, Francy Gineth Blanco Patiño.

KEY WORDS: Biomass, hydro, solar, and wind energy potential, Non-interconnected zones of Colombia, ArcGIS.

DESCRIPTION:

Energy dependence to fossil fuels has triggered great concern, because their reserves are limited and cause serious environmental impacts. So, renewable energy is presented as a striking alternative to this problem due to the availability of resources and low environmental impact. Previous studies have evaluated the potential of certain renewable resources at the national level, however, recommend doing studies in areas of interest in order to obtain more precise values. Therefore, this paper evaluates the technical energy potential of renewable resources such as sun, wind, water and agricultural waste biomass in towns with Non-Interconnected Zones (NIZ) of Nariño, Chocó, Putumayo and Meta, which are the departments with the largest number of users of electricity in Colombia; highlighting viable options to know the requirements of power, using renewable energies, The potential is estimated using the databases of NASA, IDEAM, AGRONET and ArcGIS software, considering social and environmental restrictions, such as the presence of indigenous reserves, armed groups and natural parks. The most appropriate technology to use each of renewable sources was determined, considering the cost, performance and viability in isolated zones, as well as a reference machine for each one. The results show that water, solar and biomass resources can be used to generate electricity in the four departments, due to the abundance of these resources and the high potential achieved, on the other hand, the wind resource is not suitable to be taken advantage in any of the cases because wind speeds are not the enough for wind turbines work properly.

* Degree work

**Faculty of physicochemical engineering, Department of Chemical Engineering. Advisor: Ph D. Viatcheslav Kafarov. Co-advisor: Ing. Ana Maria Rosso Cerón. Universidad Industrial de Santander.

INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica es uno de los factores más influyentes en el desarrollo de un país ya que es esencial para las actividades cotidianas como la iluminación, el uso de aparatos eléctricos, el transporte, la educación y el sustento diario, además, del incremento de oportunidades de empleo que conducen a beneficios económicos y sociales [1].

A pesar de esto, a nivel mundial cerca de 1,3 mil millones de personas aún carecen de acceso a la electricidad (87% de los cuales viven en zonas rurales), y aproximadamente, mil millones sólo tienen acceso a fuentes de electricidad poco confiables. En el caso colombiano, aproximadamente 421.000 hogares no tienen servicio de energía eléctrica, el 57% no están conectados al SIN [2], ya que la mayoría de estos hogares se encuentran en ZNI, las cuales cubren casi el 52% del territorio nacional; incluyendo 17 departamentos, 112 municipios y cerca de 1.441 localidades [3].

Estas zonas se caracterizan por tener una baja densidad de población (4%), no tener rutas de acceso adecuadas (carreteras), el sector industrial, el comercio y los servicios públicos son limitados y poco desarrollados, ocasionando que las necesidades básicas de las personas estén insatisfechas [4]. Paradójicamente, estas zonas tienen gran importancia ambiental con una amplia variedad de recursos naturales (agua, energía solar, eólica y biomasa), que pueden ser explotadas para la producción de energía limpia; donde se toma en cuenta el crecimiento demográfico, la industria, la disponibilidad de los recursos energéticos, la alteración del medio ambiente, la cantidad de recursos financieros para la tecnología, el bienestar social y el desarrollo cultural [5].

Por otra parte, la dependencia energética a los combustibles fósiles (en términos de consumo de energía primaria, representado en promedio por un 35% por petróleo, 27% por carbón, 23% por gas natural, y el resto por energías alternativas), ha desencadenado grandes preocupaciones, ya que no son sistemas de energías renovables [6] y sus reservas son limitadas. Además, los combustibles fósiles causan graves impactos ambientales, como

el cambio climático, la contaminación del aire y la lluvia ácida [7]. Los problemas anteriores han producido varios conflictos políticos y económicos que han aumentado la inversión mundial en investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas para la generación de energía limpia.

Por lo tanto, las fuentes de energía renovables son una opción que debería ser considerada para ayudar a las personas de las ZNI, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos naturales en la región y las ventajas inherentes a estas fuentes, como una reducción en el consumo de diésel (que es el más utilizado en estas zonas) y la posibilidad de desarrollar actividades locales productivas en estas comunidades [5].

En este sentido, Colombia tiene un potencial promedio de velocidad de viento de 6 m/s, excepto en la Costa Caribe [8], donde es más alto; una radiación promedio diaria de 4,5 kWh/m² por año[9], siendo las zonas prominentes: La Guajira y el Orinoco; un suministro de agua en términos de rendimiento de 58 l/s por km² [10]; y la biomasa tiene un potencial de 16 GWh/año [11], proveniente de residuos de cultivos agrícolas en todo el territorio nacional y cultivos energéticos, utilizados para producir biocombustibles, electricidad. Por otra parte, los recursos geotérmicos y del océano sólo se han estudiado de forma preliminar [12].

Aunque estos estudios previos han estimado el potencial a nivel nacional [13], es recomendable hacer estudios particulares para cada área de interés con el fin de obtener valores más precisos de los recursos. Sin embargo, en las ZNI no se encuentran bases de datos actualizadas de varios parámetros meteorológicos como: las velocidades del viento, la radiación solar, los caudales de los ríos, entre otros, porque no poseen centros de medición y los pocos existentes carecen de información o están fuera de servicio.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar el potencial técnico energético y el consumo específico de los recursos renovables: solar, eólico, hídrico y biomasa residual agrícola, utilizando los sistemas de información geográfica, ArcGIS, y los modelos matemáticos respectivos, en cuatro casos de estudio con ZNI; definiendo la viabilidad para la generación de energía eléctrica, de cada uno de los recursos, en cada uno de los casos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ZONAS NO INTERCONECTADAS

La definición de Zonas No Interconectadas (ZNI) según la resolución CREG del 2008, en el artículo 2, es: Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Las ZNI se encuentran divididas en 13 grupos, repartidos en todo el territorio nacional, hay 17 departamentos, 5 capitales, 39 cabeceras municipales, 1.441 localidades y muchas zonas rurales, cubriendo el 52% del territorio nacional. Se encuentra aproximadamente 1,5 millones de personas, es decir, alrededor del 4% de la población total del país [14-15].

Estas zonas se caracterizan por tener un difícil acceso, presencia de conflicto armado, prestación de servicios públicos escasa, entre otras [16]. En cuanto al suministro de energía eléctrica en estas zonas corresponde al 96,3% por diésel y el resto por gas licuado de petróleo, leña y en algunos casos pequeñas centrales hidroeléctricas [16-17]. Sin embargo, la cobertura es deficiente, la prestación del servicio es más costosa, en promedio el doble que en el SIN, y con menos horas de prestación del mismo [18].

1.2. RECURSOS RENOVABLES

1.2.1. Energía solar La energía solar es una fuente de energía renovable que transforma la radiación solar en energía térmica o eléctrica. El sol emite 4 mil veces más energía que la que el mundo consume cada año, la intensidad de energía disponible depende de factores como el día, la hora, la ubicación espacial o la altura, por el contrario, la cantidad de energía absorbida por el dispositivo receptor depende de la orientación del mismo [19].

La organización no gubernamental *Greenpeace* estima que para el 2.030, dos tercios de la población podrán utilizar energía eléctrica a partir de energía solar fotovoltaica y el

Consejo Mundial de Energía proyecta que el 70% de energía consumida será suministrada por energía solar [20]. Para aprovechar esta fuente natural de energía se encuentran diversas tecnologías, las cuales son: la fotovoltaica, la fototérmica y la termoeléctrica [21].

1.2.2. Energía Eólica La energía eólica aprovecha la velocidad del viento para generar electricidad, representa la energía más madura y eficiente de todas las fuentes renovables, suministrando actualmente el 2,9% del consumo mundial de electricidad [22]. Ésta contribuye a la reducción del consumo de combustibles fósiles, es inagotable, aporta al desarrollo sostenible y no contamina el ambiente, además, posee una de las huellas hídricas más bajas, lo que contribuye a la conservación de las fuentes hídricas [22].

El equipo utilizado para aprovechar la fuerza del viento es el aerogenerador, el cual absorbe la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica para finalmente convertirla en electricidad [23]. Este equipo necesita de una velocidad de viento superior o igual a 3 m/s para poder funcionar y pueden estar a una altura entre 10 y 50 m [24].

1.2.3. Energía Hídrica La energía hídrica utiliza la energía cinética y potencial de las fuentes naturales de agua como quebradas y ríos, para la obtención de energía mecánica, transformando ésta en energía eléctrica por medio de una turbina que está conectada a un generador [25]. Dos parámetros importantes que afectan la cantidad de energía aprovechada son el caudal y la altura de donde cae el agua.

La energía hidroeléctrica es una energía limpia ya que no genera residuos, no emite gases de efecto invernadero, además es inagotable y permite regular el caudal de los ríos [26]. Pese a esto, las centrales hidroeléctricas son costosas y los embalses utilizados para mantener un caudal constante y aumentar la altura de caída, producen pérdida de suelo, flora y fauna. Sin embargo, las pequeñas centrales hidroeléctricas, se consideran respetuosas con el medio ambiente, pues los impactos generados son pequeños y se pueden minimizar [27].

1.2.4. Biomasa La biomasa se define como todo el material de origen biológico excluyendo aquel que ha sufrido procesos de mineralización [28]. Es una fuente de energía renovable porque su contenido energético procede de la energía solar fijada por las plantas en la fotosíntesis; se considera como una energía alternativa porque las aplicaciones energéticas más comunes de la biomasa no producen emisiones de CO₂ [29], debido a que el carbono liberado en la transformación de la biomasa hace parte de la atmósfera actual a diferencia de los combustibles fósiles que es carbono guardado hace muchos años.

Los productos primarios procedentes de la biomasa se denominan biocombustibles que pueden ser sólidos y gaseosos, con fines térmicos y eléctricos; y líquidos, utilizados como biocombustibles para automoción. La biomasa se puede aprovechar para obtener energía térmica y eléctrica a partir de procesos térmicos, como la combustión, la gasificación y la pirolisis, y biológicos, como la digestión anaerobia [29-30].

1.3. POTENCIAL ENERGÉTICO

El tipo de potencial energético a estudiar es un criterio de gran importancia porque determina el alcance del estudio, así como la metodología y los datos requeridos para el mismo [31]. Una clasificación, ampliamente aceptada, presenta 4 categorías [32]: el potencial teórico, el técnico, el económico y el de mercado. Teniendo en cuenta esta clasificación, el potencial calculado en el presente estudio es el potencial técnico energético de los recursos solar, eólico, hídrico y de biomasa residual agrícola.

El potencial teórico evalúa la energía total disponible de las fuentes renovables, sin tener en cuenta la viabilidad técnica y económica, en esta categoría los potenciales suelen ser muy altos. Por otro lado, el potencial técnico refleja que fracción del potencial teórico se puede aprovechar teniendo en cuenta las formas de aprovechamiento de las fuentes de energía, lo cual incluye las tecnologías de cada fuente y su grado de desarrollo, así como las restricciones territoriales y las restricciones legales.

1.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o GIS por su acrónimo en inglés son *software* que permiten capturar, almacenar, integrar, analizar, y representar cualquier tipo de información geográfica referenciada. Estos permiten resolver problemas de planificación y gestión, siendo una fuerte herramienta para la toma de decisiones [33-34].

La forma como los SIG representan las características espaciales se denomina modelo de datos y existen dos tipos, ver figura 1 [35]: El modelo vectorial que se enfoca en la representación de las entidades y su posicionamiento sobre el espacio, para eso utiliza tres tipo de objetos espaciales: puntos, líneas y polígonos; y el modelo *raster*, que divide el área de estudio en cuadrículas regulares, celdas o píxeles, que constituyen la unidad mínima de información, los cuales permiten representar variables continuas y permiten realizar operaciones de superposición de mapas de una manera más rápida y eficiente.



Figura 1. Modelos de datos: Vectorial y *Raster*. Fuente: [35].

Los SIG son herramientas útiles para determinar los potenciales de los recursos energéticos renovables porque permiten representar características propias de estos como su dispersión geográfica, variables climáticas, elevaciones del terreno entre otras; además de tener en cuenta restricciones territoriales, como espacios no disponibles o lugares donde no es posible desarrollar ciertas tecnologías [36].

En el presente estudio se trabajó con el software arcGIS 10.1, una plataforma de ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), empresa líder a nivel mundial en SIG. La Universidad Industrial de Santander, por medio de la escuela de Geología, cuenta con la licencia de este software y es de libre uso para los estudiantes.

2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para realizar el proyecto de investigación se presenta en la figura 2.

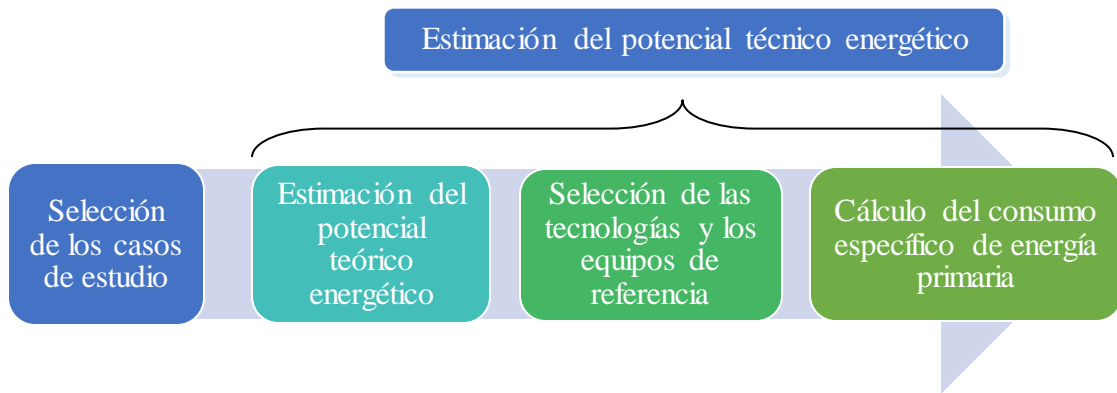


Figura 2. Pasos de la metodología seguida en el proyecto.

2.1. SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Se utilizó la superposición de mapas del software ArcGIS, para escoger los 4 departamentos con ZNI que cumplen con los siguientes requisitos:

- Presentan la mayor cantidad de usuarios en las ZNI (Anexo A).
- La totalidad de su territorio no hace parte de una reserva o parque natural.
- La totalidad de su territorio no tiene presencia de resguardos indígenas.
- No presentan altos índices de conflicto armado.

Se descartaron las zonas que cuentan con parques naturales y resguardos indígenas, por ser zonas protegidas, las cuales no se podrían utilizar para desarrollar proyectos de generación de energía; igualmente, las zonas que presentan conflicto armado porque éste dificulta el desarrollo de actividades en esas zonas.

Los 6 departamentos con la mayor demanda son Chocó, Nariño, San Andrés y Providencia, Putumayo, Caquetá y Meta [37]. De estos, San Andrés y Providencia ocupa el tercer puesto con la mayor cantidad de usuarios, sin embargo, no se tendrá en cuenta para el presente estudio porque posee un índice de cobertura de energía eléctrica del 100% [38].

En la figura 3 se puede observar la superposición de mapas, en la figura 3.a, se muestran los parques naturales del país [39] y en la figura 3.b, los resguardos indígenas [39], con estas dos restricciones los 4 departamentos con la mayor demanda son Chocó, Nariño, Putumayo y Caquetá. Sin embargo, al realizar la superposición del conflicto armado [40], figura 3.c, el departamento de Caquetá presenta conflicto armado en la mayoría de sus municipios, por tal motivo tampoco se va a tener en cuenta en el estudio.

Teniendo en cuenta todas las restricciones nombradas, los 4 casos de estudio que se trabajaron fueron los departamentos de Chocó, Nariño, Putumayo y Meta.

2.2. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO ENERGÉTICO

2.2.1. Estimación del potencial teórico energético

2.2.1.1. Recurso solar Para la estimación del potencial solar teórico se obtuvieron los datos de radiación solar diaria, desde el año 2005 al 2014, de la base de datos de las estaciones meteorológicas de la NASA, a través del *software* RETScreen (Anexo B) [41]. Para este objetivo, solamente se utilizaron los datos de la radiación en superficie horizontal, debido a que Colombia se encuentra ubicado sobre el ecuador y el ángulo de inclinación adecuado para los paneles es cero [16].

Luego de extraer los datos de radiación diarios para cada estación, se realizó un promedio de todos los años para un mismo día, luego se promedió esos días para el potencial mensual y los mensuales para el anual; esto permitió conocer la radiación diaria multianual promedio, la cual sería el potencial solar teórico para cada estación.

Para conocer la variación del potencial solar sobre toda la superficie de los casos de estudio, se utilizó la técnica estocástica de estimación espacial Kriging ordinario (Anexo C) [9] [42], disponible en el *software* arcGIS. Para esto se seleccionaron las estaciones que se encontraron dentro y alrededor de los casos de estudio, junto a los datos de potencial solar

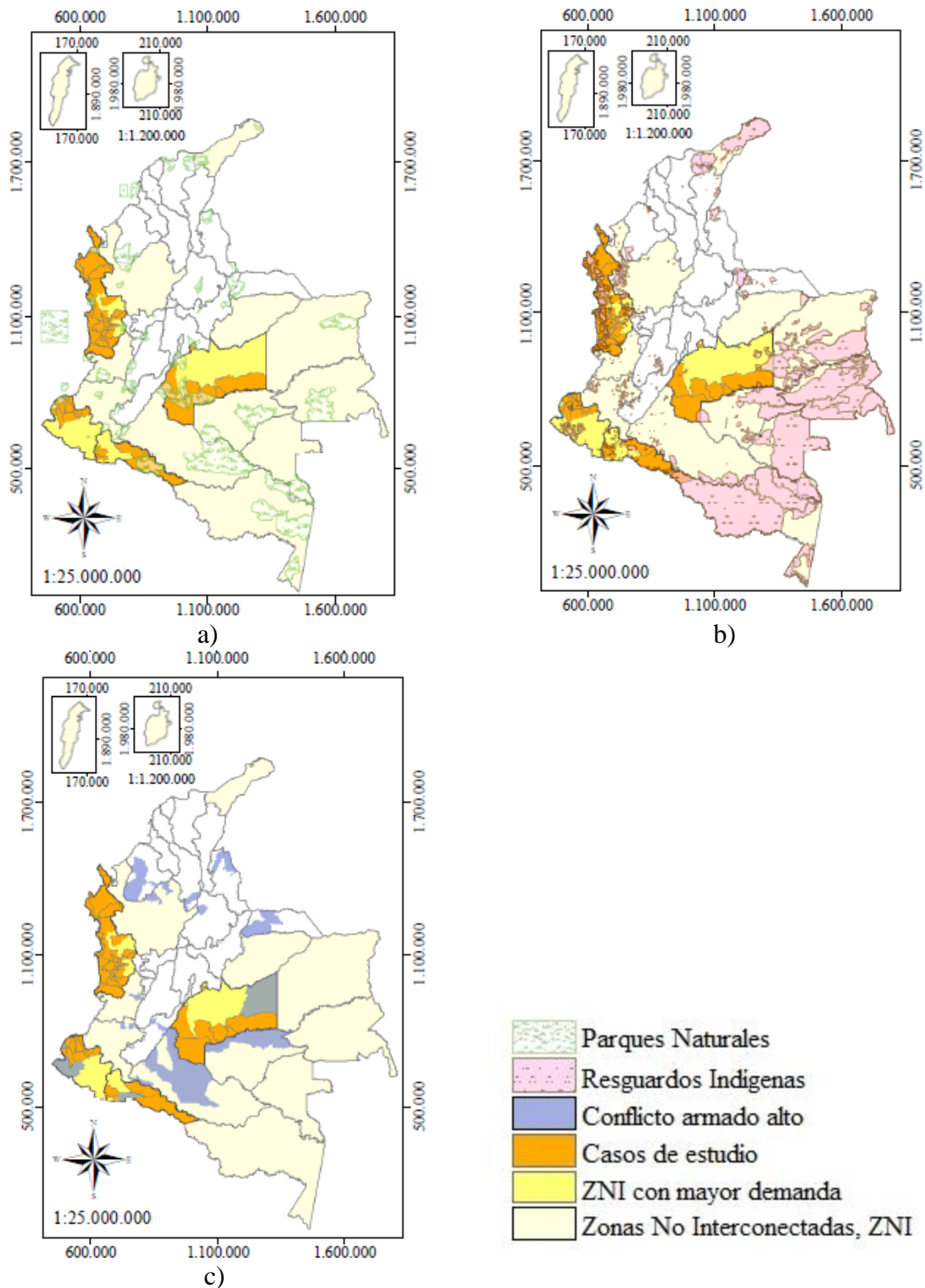


Figura 3. Restricciones territoriales: a) Parques naturales, b) Resguardos indígenas y c) Conflicto armado. Fuente: Modificado de [39-40].

de cada una de ellas, y se georreferenciaron por medio de la latitud, la longitud y la altura sobre el nivel del mar.

2.2.1.2. Recurso eólico El potencial teórico o densidad de potencia se calculó con la ecuación 1. Para estimar este, son necesarios los datos de velocidad y densidad del viento.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n^3 \quad (1)$$

P: Densidad de potencia

ρ : Densidad

A: Área de barrido de las aspas del aerogenerador

V: Velocidad del viento

Cálculo de la velocidad de viento Las velocidades de viento diarias se obtuvieron de bases de datos de estaciones meteorológicas, desde el año 2005 hasta el año 2014, a través del software RETScreen [41] (Anexo B), medidas a una altura de 10 m. La velocidad del viento es mayor a medida que aumenta la altura, por lo tanto, estas velocidades se escalaron a 50 m. El modelo de perfil de Lysen (ecuación 2) fue utilizado para determinar la velocidad a otra altura, a partir de una velocidad conocida [8].

$$V(Z) = V(Z_r) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_r}\right)}{\ln\left(\frac{Z_0}{Z_r}\right)} \quad (2)$$

V (Z): Velocidad del viento a una altura Z $Z_r=10$ m

V (Z_r): Velocidad del viento a 10 m Z_0 =Rugosidad Superficial (0,27 para ZNI

Z: Nueva altura [16])

Luego de calcular las velocidades diarias, medidas a una altura de 50 m, se calcularon las velocidades diarias promedio multianuales.

Cálculo de la densidad del viento Para el cálculo de la densidad del aire se utilizó la ecuación de estado de los gases ideales [8] (ecuación 3).

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3)$$

P: Presión [Pa]

R: Constante universal de los gases [J/(kg

T: Temperatura [K]

K)]

Para obtener un valor de densidad del viento más real, la constante de gases ideales (R), depende de la tensión de vapor del aire, e , según las ecuaciones 4 y 5.

$$R^* = R \left(1 + \frac{3e}{8P} \right) \quad (4)$$

$$e = \exp \left(-\frac{6.763,7}{T} \right) - 4,9283 \ln(T) + 54,23 \quad (5)$$

Para calcular la presión atmosférica y la temperatura del viento, se usaron las ecuaciones que propone el modelo meteorológico de mesoescala MM5 [8], (ecuaciones 6 -7).

$$P_{s0} = P_{00} \left(\frac{P_{00}}{850} \right)^{-\frac{z}{H_{850}}} \quad (6)$$

$$T_0 = T_{s0} + A \ln \left(\frac{P_{s0}}{P_{00}} \right) \quad (7)$$

Donde:

P_{00} : Presión a nivel del mar

Z: Altura con respecto al nivel del mar

T_{s0} : Temperatura de referencia a P_{00}

H_{850} : 1480

A: Medida de tasa de cambio a 50K

Para corregir los valores mensuales de la temperatura así como la presión se utilizaron las regresiones lineales propuestas por el modelo del atlas eólico [8].

El método de interpolación de Kriging ordinario (Anexo C) de ArcGIS [42], se utilizó para estimar los valores de la velocidad del viento y la densidad de energía eólica sobre toda la superficie de los casos de estudio.

2.2.1.3. Recurso Hídrico El potencial hídrico, según la ecuación 8, es una función del caudal de los ríos y la altura del terreno [43].

$$WP = 9,81 * Q * Hn * e \quad (8)$$

Donde:

WP: Potencial [kW]

Q: Caudal de diseño [m³/s]

Hn: Salto neto [m]

e: Eficiencia de la planta

(Anexo C). Asimismo, los caudales de los ríos preseleccionados se calcularon con la herramienta del álgebra de mapas de ArcGIS, en este aspecto vale la pena resaltar que el caudal de diseño se obtuvo al multiplicar los caudales estimados por 1,25, de acuerdo al método propuesto por [43].

Cálculo del salto neto El salto neto (Anexo D.3) se determinó localizando dos puntos sobre cada río (los posibles puntos de ubicación de la toma de agua y de la casa de máquinas), los cuales cumplen con la ecuación 11 [43]:

$$\frac{Lc}{Hn} \leq 25 \quad (11)$$

Donde:

Lc: Longitud de terreno recorrido

Hn: Salto neto o diferencia de altura entre los dos puntos

Eficiencia de la planta La eficiencia de la planta depende del rendimiento de la turbina, la eficiencia del generador y el rendimiento del transformador. El factor de eficiencia para una pequeña central hidroeléctrica moderna tiene un valor de aproximadamente 0,85 [43].

2.2.1.4. Biomasa El potencial energético se obtuvo a partir de datos sobre la biomasa residual agrícola de los 3 cultivos permanentes con mayor producción según [47], entre el año 2009 y 2013, y que además estuvieran presentes en la mayoría de los municipios de cada caso de estudio y de los cuales se encontrara la información requerida para el cálculo del potencial, como el poder calorífico inferior (PCI), la humedad y otros parámetros, en la literatura (Anexo F).

Disponibilidad de los recursos Los residuos agrícolas tienen diferentes usos, como comida y cama para animales, fertilizantes orgánicos, entre otros [48], sin dejar atrás el hecho que es necesario que un porcentaje de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) permanezcan en su lugar de origen para que el suelo esté protegido de la erosión y mantenga un nivel de nutrientes adecuado. De acuerdo con estudios realizados [49], se conoce que recolectar entre un 30% y un 70% de los residuos no afecta de manera significativa la estabilidad del suelo, este porcentaje varía dependiendo del clima, la

demanda de nutrientes y de los tipos de residuos. Para tener en cuenta la variación de los parámetros nombrados anteriormente, en el presente estudio se trabajó con un valor de 30% de los residuos generados, siendo este el escenario más realista [50] para el cálculo del potencial.

Estimación del potencial El potencial energético teórico de un cultivo relaciona, de manera directa, la cantidad de masa del residuo que se produce con la cantidad de energía del mismo. El modelo matemático utilizado (ecuación 12) está basado en estudios realizados por [48] [51-52], donde la masa del residuo generado se puede expresar según la ecuación 13.

$$PE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n Mr(i, j) * PCI(i, j) \quad (12)$$

Donde:

PE: Potencial energético *n*: Tipos de residuos de determinado cultivo
k: Número de cultivos *PCI*: Poder calorífico inferior
Mr: Masa de residuo generada

$$Mr(i, j) = \sum_{i=1}^n A(j) * Y(j) * RPR(i) \quad (13)$$

Donde:

A: Área cultivada
Y: Rendimiento del cultivo

RPR: Relación de la masa de residuo producida por producto principal producido.

2.2.2. Selección de las tecnologías y los equipos Se realizó una revisión de las tecnologías y las capacidades instaladas más utilizadas en las ZNI, por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), para la generación de energía eléctrica [53]. Se eligió una tecnología (Anexo G), un equipo de referencia (anexo K) y una capacidad instalada (Anexo G), para cada tipo de recurso, teniendo en cuenta el grado de desarrollo de las tecnologías en el país, los equipos disponibles en el mercado mundial y el consumo específico de energía primaria.

2.2.3. Consumo específico de energía primaria El consumo específico se define como la cantidad de recurso necesario para generar 1 kWh, por lo tanto a menor consumo específico, mayor eficiencia del sistema. Con el fin de determinar la eficiencia de las

capacidades instaladas de cada tecnología y conocer la más adecuada para cada recurso, se calculó el consumo específico de energía primaria.

Para estimar este consumo (ecuaciones 14 -17), se despejó la variable de la cantidad de recurso, de las ecuaciones de potencial técnico energético, y se realizaron las modificaciones necesarias para obtener unidades de energía, también se tuvieron en cuenta las especificaciones de las tecnologías seleccionadas en el inciso anterior.

2.2.3.1. Consumo específico de radiación solar

$$Rad = \frac{1}{A * \#PFV * n} \quad (14)$$

Donde:

Rad: Radiación solar [KWh/m²/kWh]

A: Área del panel solar

2.2.3.2. Consumo específico de viento

$$v = \sqrt[3]{\frac{2000 * 1}{\rho * A * t}} \quad (15)$$

Donde:

v: Velocidad de viento [m/s/kWh]

t: Tiempo promedio de funcionamiento de

un aerogenerador [horas]

2.2.3.3. Consumo específico del recurso hídrico

$$Q = \frac{1}{9,81 * 1,25 * Hn * e * t} \quad (16)$$

Donde:

t: Tiempo promedio de funcionamiento de una PCH [horas]

2.2.3.4. Consumo específico de biomasa

$$m = \frac{3,6}{Hc * n} \quad (17)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ENERGÍA SOLAR

De acuerdo a los resultados obtenidos para la radiación solar en los casos de estudio, el departamento del Meta posee el mayor potencial teórico con un valor de radiación entre 4,2 y 4,8 kWh/m² (figura 4.b); Chocó le sigue con un potencial teórico de 4,0 a 5,0 kWh/m², siendo 4,0 a 4,2 kWh/m², los valores de radiación más comunes para la mayoría de sus municipios (figura 4.a); para el departamento de Putumayo se determinó un rango que va de 4,0 a 4,6 kWh/m² (figura 4.d). Finalmente, Nariño tiene el menor rango de disponibilidad de radiación solar en todos sus municipios con ZNI, con valores entre 4,0 y 4,4 kWh/m² (figura 4.c).

Con estos valores de radiación es posible aprovechar el recurso solar en los 4 casos de estudio, ya que para la generación de energía eléctrica a partir del sol, el rango ideal para aprovechar este recurso es de 4,0 a 4,5 kWh/m² [9] [54].

Para evaluar el potencial técnico, se utilizó un panel solar fotovoltaico policristalino con una eficiencia del 15,95% y 50 Wp de potencia (Anexo K). Los valores obtenidos al calcular el consumo específico de radiación solar para cada una de las capacidades instaladas reportadas para las ZNI, de acuerdo a la figura 5, muestran que este parámetro es el mismo para todas las zonas de estudio, es decir, solo depende de las condiciones de operación de la tecnología. Sin embargo, se evidencia una mayor eficiencia de la tecnología a medida que aumenta la capacidad instalada, es decir, la cantidad de radiación solar necesaria disminuye, por lo tanto es mejor trabajar con una planta con la máxima capacidad permitida, que varias con capacidades menores.

Al calcular el potencial técnico, teniendo en cuenta la cantidad de energía generada por un solo panel; debido a la baja eficiencia del mismo, este disminuye un 84% con relación al potencial teórico para todos los casos de estudio, obteniéndose potenciales entre 0,39 kWh y 0,49 kWh (figuras 6 y 7).

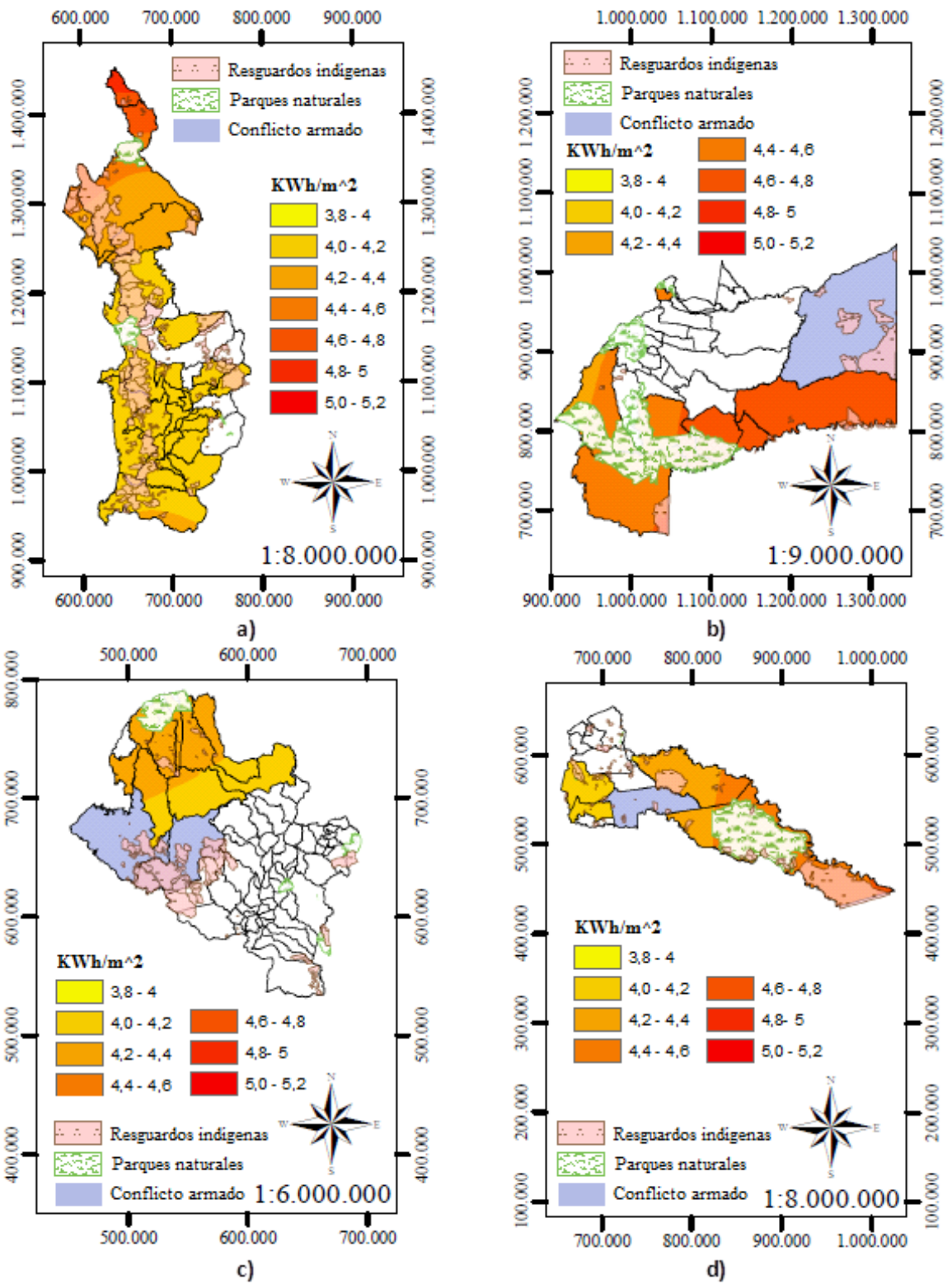


Figura 4. Potencial solar teórico energético promedio diario multianual: a) Chocó; b) Meta; c) Nariño y d) Putumayo.

Tabla 1. Características de los equipos por capacidad instalada

Consumo específico de energía primaria			
Capacidad instalada (kWp)	0,05	0,3	3
Número de paneles	1	6	60
Área (m ²)	0,6	3,6	36

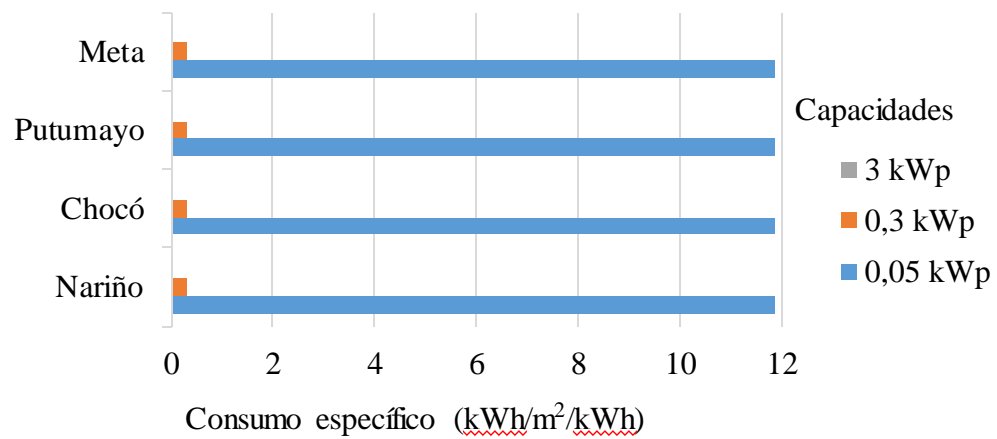


Figura 5. Consumo específico de radiación solar

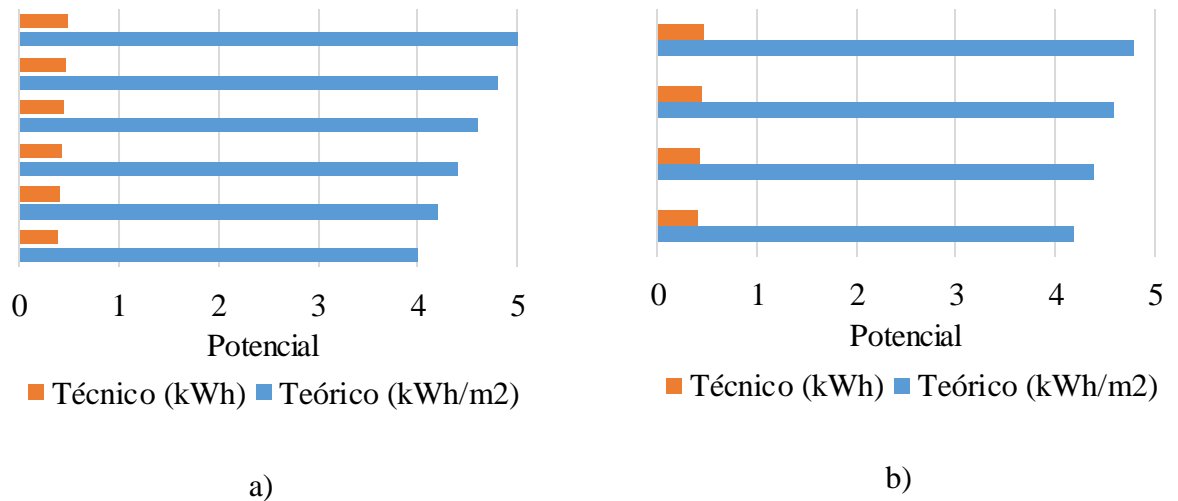


Figura 6. Potencial solar técnico energético promedio diario multianual: a) Chocó y b) Meta.

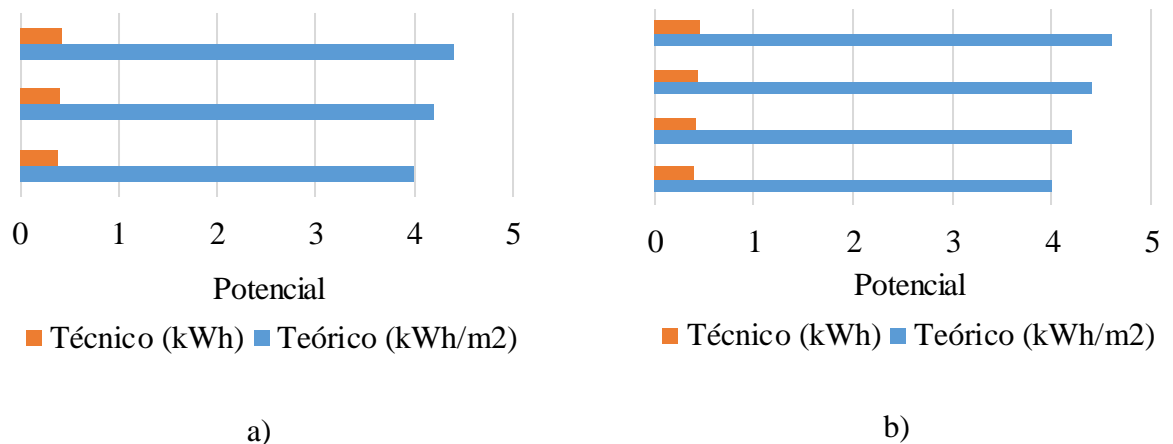


Figura 7. Potencial solar técnico energético promedio diario multianual: a) Putumayo y b). Nariño

3.2. ENERGÍA EÓLICA

De acuerdo a la escala de Beaufort [55], las velocidades de viento encontradas en los casos de estudio (Anexo H) corresponden a una brisa muy débil o débil, entre 1,6 y 5,3 m/s. En el caso de las ZNI de Meta y Putumayo, se obtuvieron las menores velocidades de viento con valores de 1,0 a 3,0 m/s. Según [56 - 57], estas velocidades no son suficientes para que un aerogenerador funcione, porque estos comienzan a girar con velocidades mayores a 3 m/s, sin embargo, el potencial eólico teórico encontrado en Chocó y Nariño presenta valores entre 3 y 60 W/m² y 12 y 60 W/m², respectivamente (figura 8.a -8.b), correspondientes a velocidades de viento entre 2,0 y 4,0 m/s, siendo los municipios de Nariño los que alcanzan las mayores velocidades, entre 3,5 y 4,0 m/s.

El potencial técnico del recurso eólico se calculó para los casos de Chocó y Nariño, debido a que Meta y Putumayo no tienen el suficiente recurso eólico; utilizando los aerogeneradores elegidos en el Anexo K; una densidad del aire de 1,1 kg/m³, calculada junto con el potencial teórico energético y 2.453 horas de trabajo en el año, correspondientes a un rendimiento del sistema eólico del 28% [58], se calculó el consumo específico de viento para cada una de las capacidades instaladas para las ZNI.

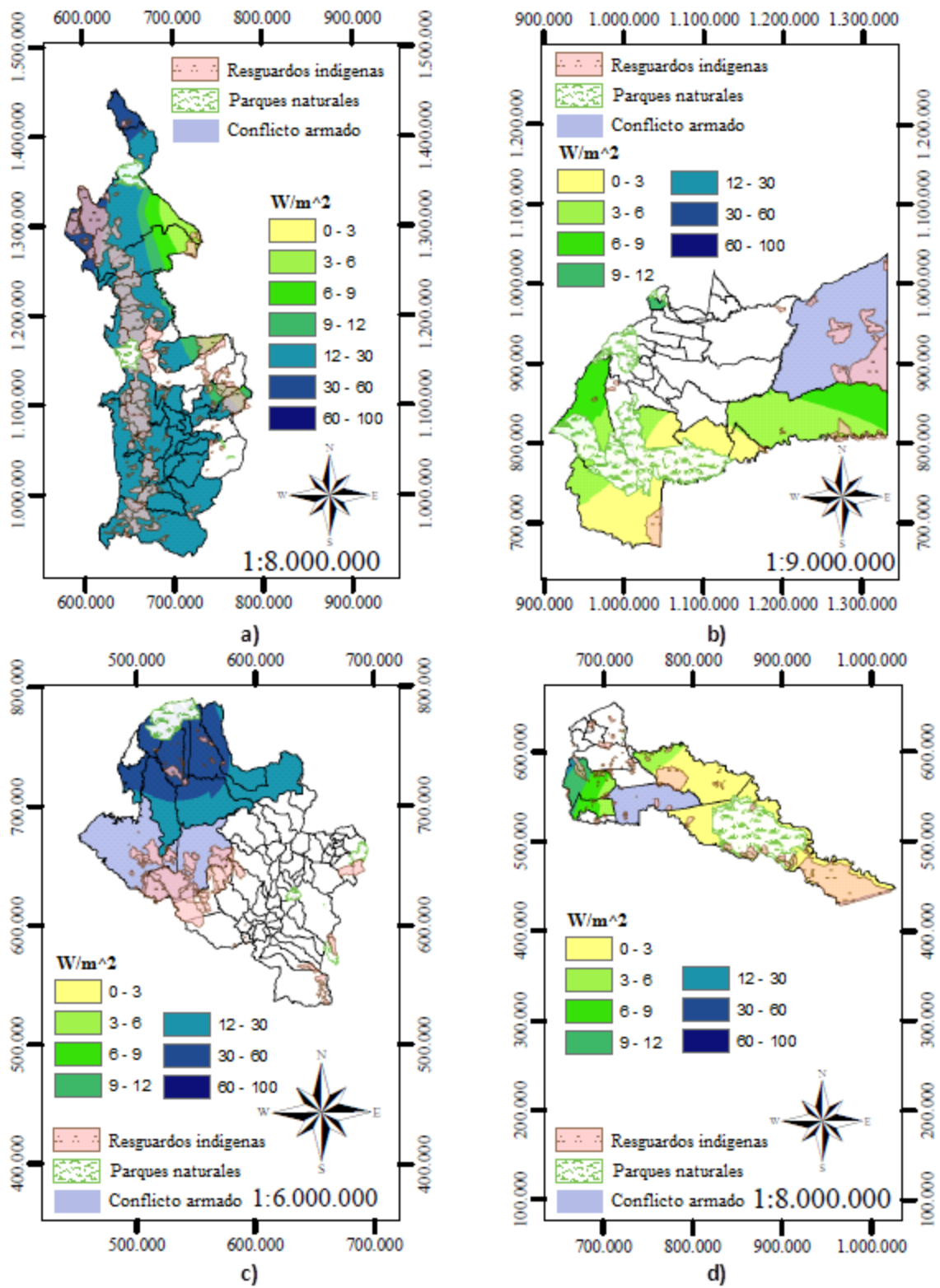


Figura 8. Potencial eólico teórico energético promedio diario multianual: a) Chocó; b) Meta; c) Nariño y d) Putumayo.

En la figura 9 se observa que este parámetro es el mismo para todas las zonas de estudio, dependiendo únicamente del aerogenerador, es importante resaltar que es así porque se trabajó con una densidad promedio para los 4 departamentos y aunque el rendimiento del sistema depende de las velocidades de viento, se trabajaron todas las zonas con el rendimiento conocido para una velocidad media anual de 4 m/s, velocidad encontrada en 2 de los 4 casos de estudio, pues no se conoce un rendimiento para cada una de las otras velocidades. De los resultados se evidencia una mayor eficiencia de la tecnología a medida que aumenta la capacidad instalada, siendo necesaria una menor velocidad de viento y favoreciendo así, la instalación de las capacidades más altas.

Por lo tanto, el potencial técnico se calculó utilizando un aerogenerador de 20 kW, obteniéndose un mayor potencial, entre 0,29 y 1,43 kW, debido al gran área de barrido (figura 10). A pesar de que las velocidades de estas zonas permiten que los aerogeneradores se pongan en marcha, no son las adecuadas para permitir que el aerogenerador funcione a su potencia nominal, impidiendo que se aproveche la máxima potencia que este puede generar y dando como resultado una baja generación de energía eléctrica y un mayor costo de la misma, por lo tanto la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico no es viable para ser aprovechada en ninguno de los casos de estudio.

Tabla 2. Características de los equipos por capacidad instalada

Consumo específico de energía primaria		
Capacidades instaladas (kW)	1,5	20
Área (m ²)	13,2	84,9

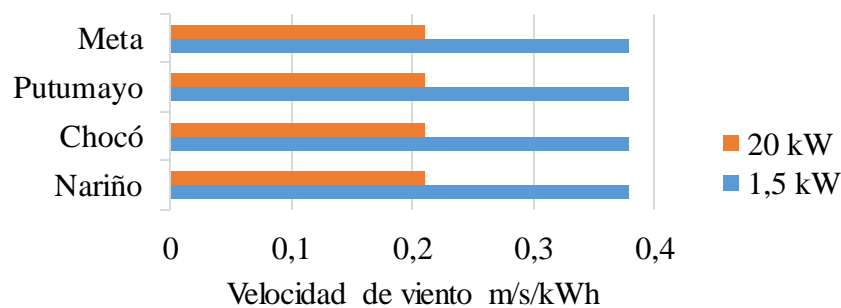


Figura 9. Consumo específico de energía primaria eólica

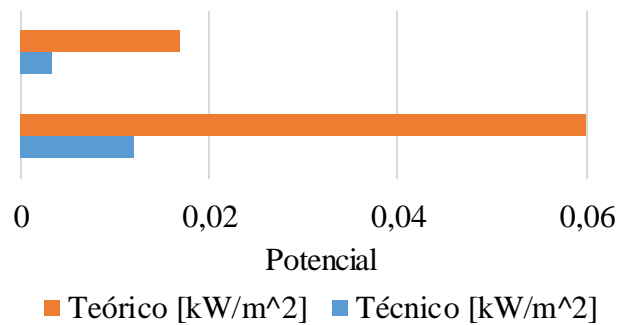


Figura 10. Potencial técnico energético del recurso eólico en Chocó y Nariño

3.3. ENERGÍA HÍDRICA

A partir de la base de datos de [61] se generaron los mapas de precipitación multianual, entre los años 1981 y 2010 (Anexo E-1). En el departamento de Chocó se presenta la mayor cantidad de precipitaciones, alcanzando valores de 8.000 mm/año, por el contrario el departamento de Nariño presenta el menor número de precipitaciones con valores mínimos de 600 mm/año. Asimismo, a partir de los mapas de precipitación se obtuvieron los mapas de evapotranspiración (Anexo E-2), donde los departamentos de Chocó y Nariño presentan los mayores valores, alcanzando los 1.600 mm/año.

Al determinar los salto netos, se encontró que los departamentos de Nariño, Putumayo y Meta tienen saltos menores a 10 m (Anexo I), con excepción del municipio del Calvario, en el Meta, donde se tiene una diferencia de 113 m; en cuanto al departamento de Chocó, se obtuvieron saltos netos que varían entre 10 y 90 m.

Como se observa en la figura 11, en todos los departamentos se obtuvieron potenciales por encima de los 20 MW/año, por esta razón, es posible aprovechar estos caudales para trabajar con PCHs en las zonas estudiadas. Vale aclarar, que aunque el caudal estimado para algunos ríos no es muy grande, las diferencias de alturas hacen que los potenciales varíen en gran manera, ejemplo de esto son los municipios de Medio Atrato y Alto Baudó en el Chocó, los cuales tienen caudales de 900 y 90 m³/s, respectivamente, y poseen un mismo potencial de 28 MW/año debido a la diferencia de altura. Así mismo, es de resaltar que el departamento con el mayor potencial hidroeléctrico es Chocó, alcanzando valores de

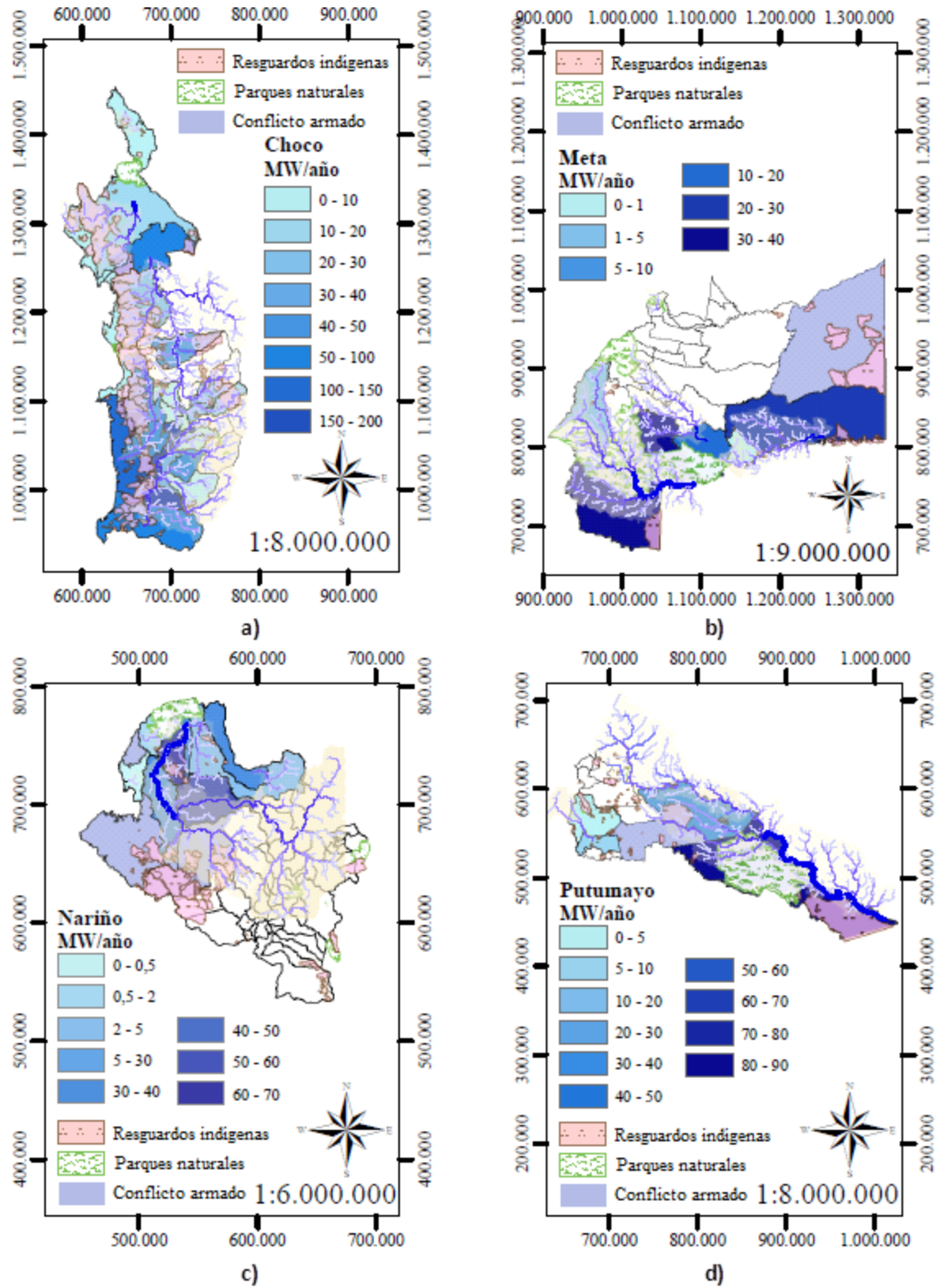


Figura 11. Potencial hídrico teórico energético promedio multianual: a) Chocó, b) Meta, c) Nariño y d) Putumayo.

168 MW/año, por el contrario, Meta presenta los menores valores, con 30 MW/año; y que los ríos destacados son el río Atrato, Baudó y San Juan en Chocó, el río Patía y Telembí en Nariño, el río Caquetá en Putumayo y el río Guaviare en Meta.

Para calcular el potencial técnico se trabajó con las hidroeléctricas a filo de agua como tecnología (Anexo G) y para calcular el consumo específico del recurso hídrico para las capacidades instaladas en las ZNI (Anexo G), se utilizó una altura promedio para cada departamento y la eficiencia correspondiente al tipo de turbina adecuada para cada uno de ellos (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros utilizados para el cálculo del consumo específico

Departamento	Altura (m)	Turbina	Eficiencia
Nariño	19	Kaplan	0,93
Chocó	50	Kaplan	0,93
Putumayo	4,4	Francis	0,92
Meta	7,3	Francis	0,92

En la figura 12 se evidencia que el consumo específico es el mismo para cada una de las capacidades instaladas, sin embargo, varía según la zona de estudio. Por lo tanto, la capacidad a instalar del recurso hídrico, depende de la necesidad y las características de cada zona, se puede concluir que se tendrán mejores eficiencias mientras más altos sean los saltos netos.

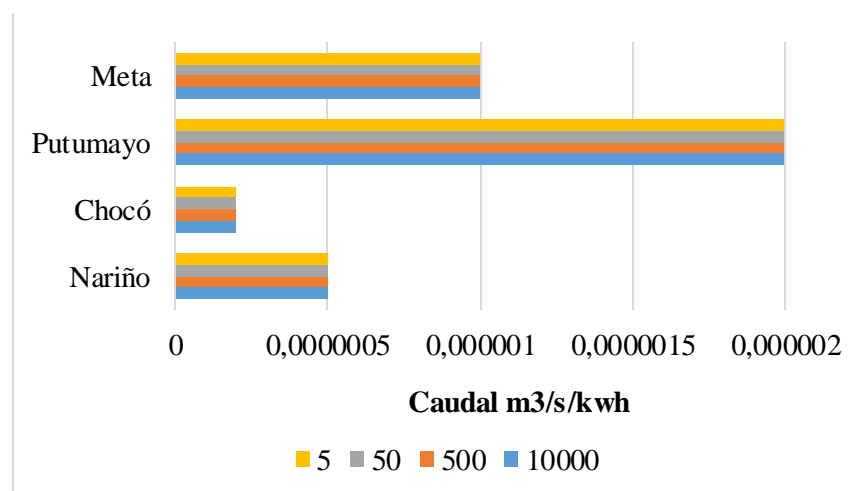


Figura 12. Consumo específico del recurso hídrico.

Por lo tanto, el potencial técnico evaluado (figura 13) es menor al potencial teórico en un 10%, debido a que las eficiencias de las turbinas trabajadas, la Kaplan con un 93% y la Francis con un 92%, no varían mucho entre ellas y no son muy diferentes a la trabajada en el potencial teórico. El mayor valor de potencial técnico obtenido fue de 182 MW y el menor fue de 0,9 MW.

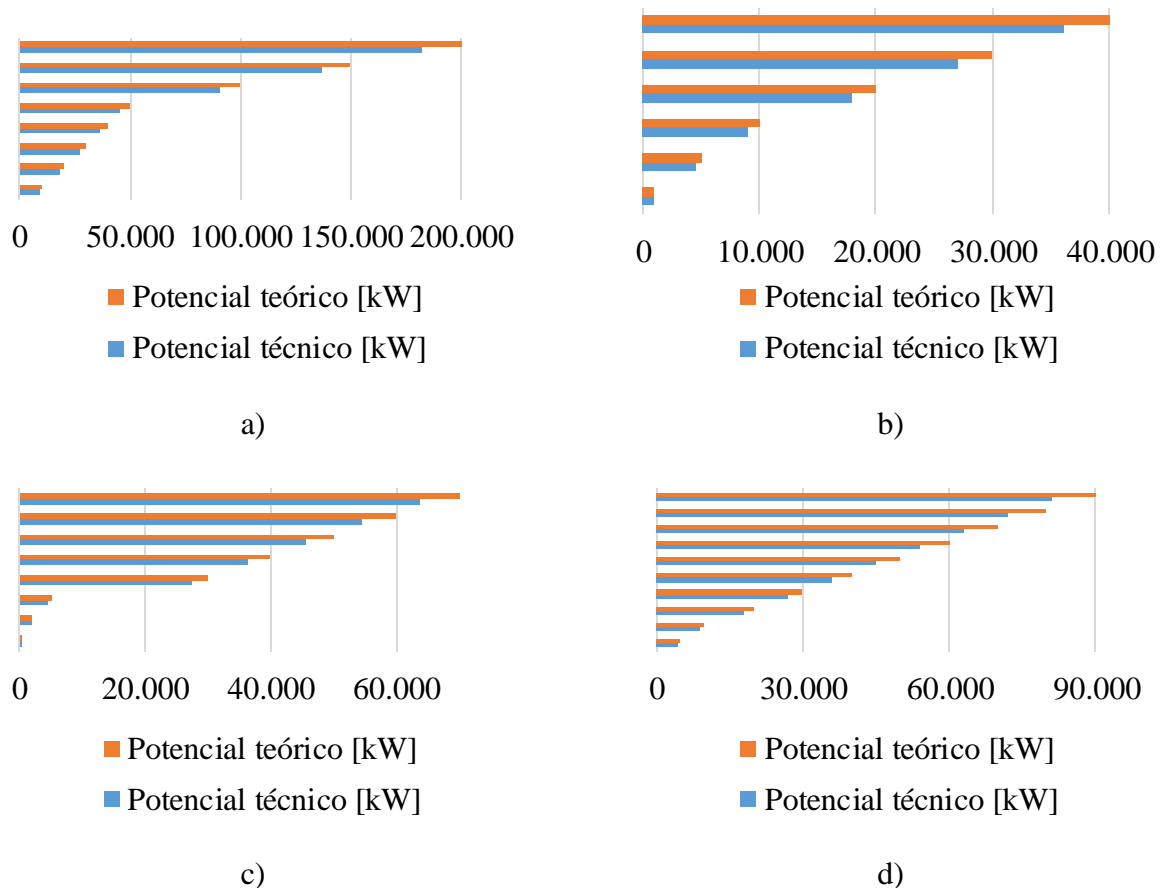


Figura 13. Potencial técnico hídrico: a) Chocó, b) Meta, c) Nariño y d) Putumayo

Por otro lado, para conocer la confiabilidad de los caudales obtenidos en este estudio, se solicitaron los registros de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM presentes en las zonas de estudio, sin embargo, estas no cuentan con los registros de los caudales de los ríos, por lo tanto, la validación de los caudales obtenidos en el presente trabajo se realizó aplicando la metodología al cálculo del caudal del río Nus, en el departamento de

Antioquía, a la altura de la estación Caramanta, la cual presenta un registro de caudal promedio de 16,87 m³/s.

Siguiendo la metodología, se ubicó el punto donde se encuentra la estación Caramanta y se estimó la cuenca del río hasta ese punto y se obtuvo la misma mostrada en [43]. Para el cálculo de los campos de precipitación y evapotranspiración (Anexo J), se utilizaron las estaciones hidrometeorológicas que se encontraron dentro y cerca de los municipios, con los datos de precipitación entre los años 1.981 y 2.010, que emplea el mismo rango de años definido en el presente estudio.

Teniendo los mapas de precipitación, evapotranspiración y la cuenca del río, se utilizó el álgebra de mapas para conocer el caudal en ese punto, obteniéndose un caudal de 23,59 m³/s. Se calculó el error relativo entre el caudal estimado y el caudal registrado en la estación, se obtuvo un error del 39,8%. El error reportado en [43] es del 20,4%; a pesar de ser la misma metodología y la misma cuenca, los errores obtenidos difieren debido al lapso de tiempo trabajado en los datos de precipitación y el lapso de tiempo en el que se midió el caudal del río en la estación; también es importante resaltar, que al realizar la interpolación de los campos de precipitación, se cuenta con un error, que varía dependiendo de la cantidad de puntos que se tengan al momento de realizar la interpolación.

Por lo tanto, debido a que es un error considerable y buscando tener una mejor aproximación a la realidad, se aplicó la corrección a todos los caudales obteniendo los mostrados en el Anexo J.

3.4. BIOMASA

En la figura 14 se muestran los cultivos seleccionados para la estimación del potencial de la biomasa residual agrícola; como se puede observar el cultivo de plátano es el más representativo, puesto que se encuentra presente en los cuatro departamentos y tiene la mayor producción en cada uno de ellos.

Los residuos que se tuvieron en cuenta fueron: para el plátano y el banano: el raquis, el vástago y el fruto de rechazo [51]; para la yuca: la cascara, las hojas, los tallos y la yuca de descarte [58]; para la piña: la cascara, el corazón, la poda y la piña de descarte [59], para la palma de aceite: el cuesco, la fibra y el raquis [51], para la caña panelera: el bagazo y las hojas [51] y finalmente, para el coco: la corteza y la cascara [60] .

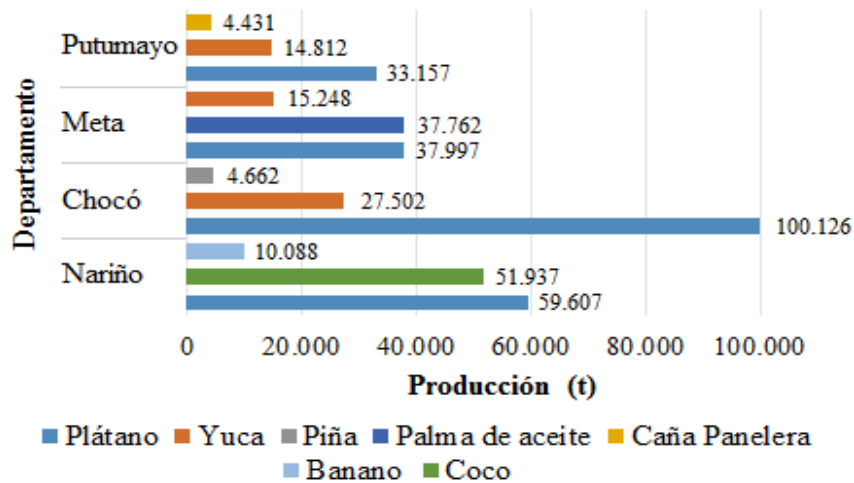


Figura 14. Cultivos permanentes y su producción anual por departamento. Fuente: [47]

Los residuos que se destacan, por masa y potencial generados (Anexo F.1), son: el vástago en el plátano y el banano; los tallos, en la yuca; la poda, en la piña; las hojas y el cogollo, en la caña panelera; el raquis, en la palma de aceite y la corteza, en el coco. De acuerdo a los resultados obtenidos, el potencial del plátano es el más alto, con 1.200 GWh/año, por el contrario, el cultivo de coco es el que menor potencial presenta, con 20 GWh/año, el cual está presente únicamente del departamento de Nariño, (Anexo F.3).

Con respecto a los casos de estudio (Anexo F.2), el departamento de Chocó se destaca por tener el potencial teórico más alto con 733 GWh/año, siendo Riosucio, el municipio que presenta el mayor potencial con valores de 120 GW/año (en la figura 15.a). Por el contrario, el departamento de Nariño (figura 15.c), tiene el menor potencial con 192 GWh/año, siendo el municipio de El Charco el que presenta el mayor potencial con 62 GWh/año.

Conociendo el potencial teórico se calculó el potencial técnico, para esto se utilizó la gasificación como tecnología (Anexo G) y se calculó el consumo específico de biomasa

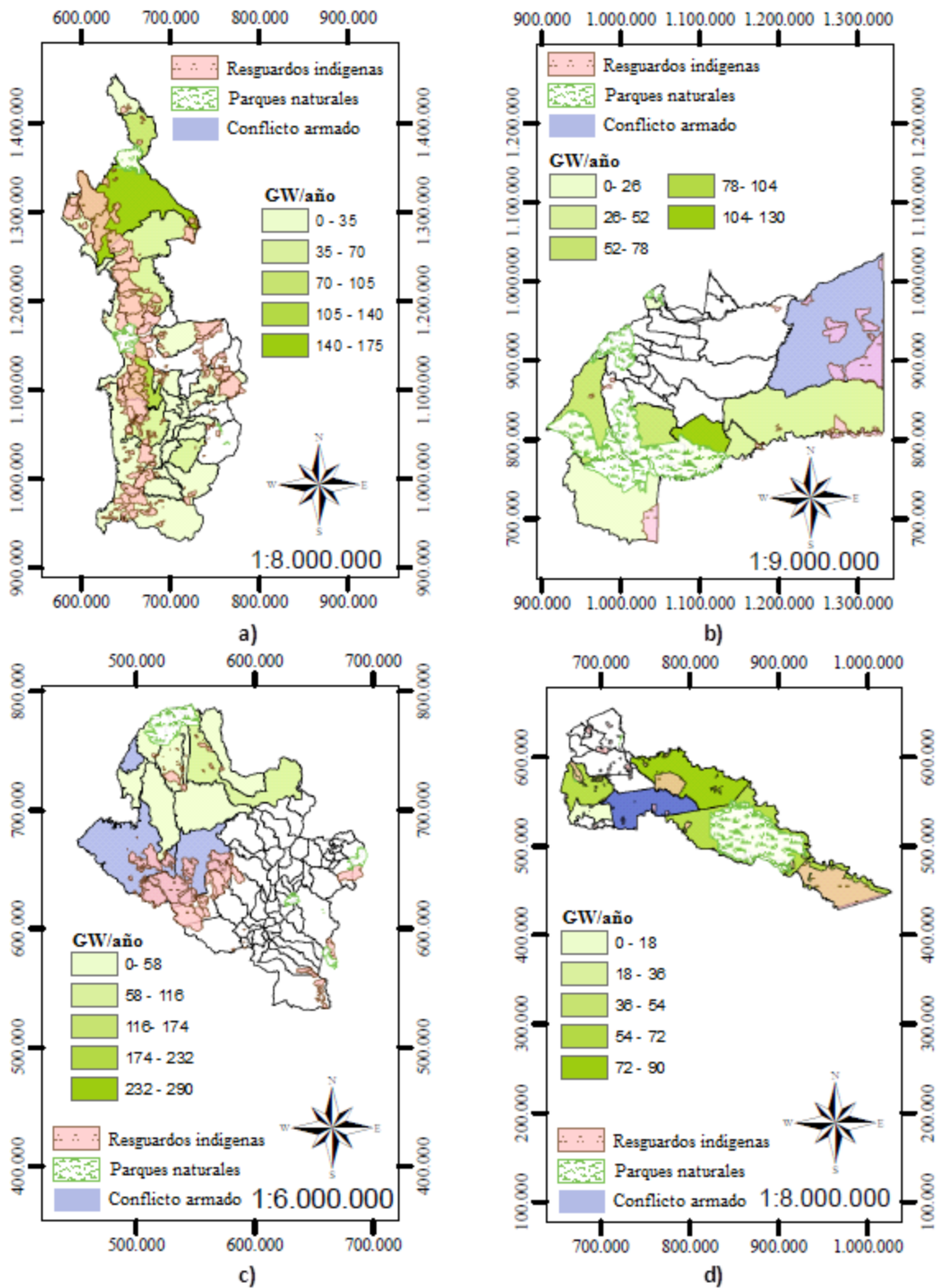


Figura 15. Potencial teórico energético de la biomasa residual agrícola promedio multianual: a) Chocó, b) Meta, c) Nariño y d) Putumayo.

para las capacidades instaladas encontradas en las ZNI, sin embargo, para tener en cuenta el gasificador de lecho fluidizado burbujeante (Anexo K), solo se tuvieron en cuenta, los residuos que poseen una humedad inferior al 40%, (tabla 4), y un motor alternativo de combustión interna con un rendimiento efectivo del 40%. El poder calorífico del gas pobre se estimó como el 70% de la energía de la biomasa que ingresa al gasificador [72].

Tabla 4. Residuos agrícolas utilizados para el consumo específico del recurso de biomasa en los casos de estudio

Departamento	Residuo	Hc (MJ/kg)	% de participación
Chocó	Raquis plátano	5,39	100
Meta	Raquis plátano	5,39	100
Putumayo	Raquis plátano	5,39	64
	Hojas Caña	11,76	35
Nariño	Raquis Plátano	5,39	55
	Raquis Banano	5,39	18
	Corteza Coco	13,02	21
	Cascara Coco	12,67	6

Los resultados obtenidos (figura 16), muestran que el consumo específico de biomasa no depende de la capacidad instalada, por el contrario depende de los cultivos utilizados para realizar la gasificación, de esta manera, se obtuvo que en los departamentos donde se utilizó más de un residuo se obtuvo un menor consumo específico que en los que se utilizó solo uno.

Finalmente, al analizar los resultados obtenidos del potencial técnico, muestran que el potencial teórico se reduce entre un 79% y un 91% (figura 17), porque solo se pueden utilizar los cultivos que poseen una humedad menor o igual al 40%. Los resultados muestran que aunque es posible aprovechar un solo tipo de residuo en el departamento de Chocó, el raquis del plátano, este continúa destacándose como el caso de estudio con el mayor potencial aprovechable, con 83 GWh/año.

Por otro lado, Nariño, que presenta el menor potencial teórico, al evaluar el potencial técnico, deja de tener el menor potencial, con 37 GWh/año, debido a que solo es posible aprovechar 3 tipos de residuos: el raquis del plátano y el banano; y la corteza del coco, caso contrario a Meta, departamento que presenta el menor potencial técnico, con 29 GWh/año, pues solo se puede utilizar el raquis del plátano.

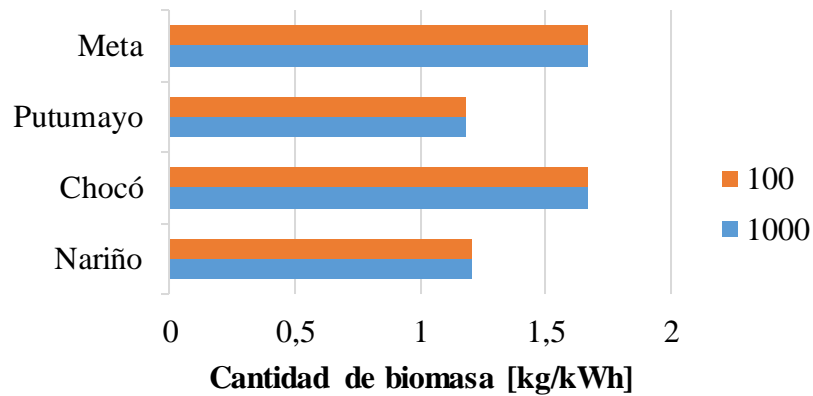


Figura 16. Consumo específico del recurso de biomasa

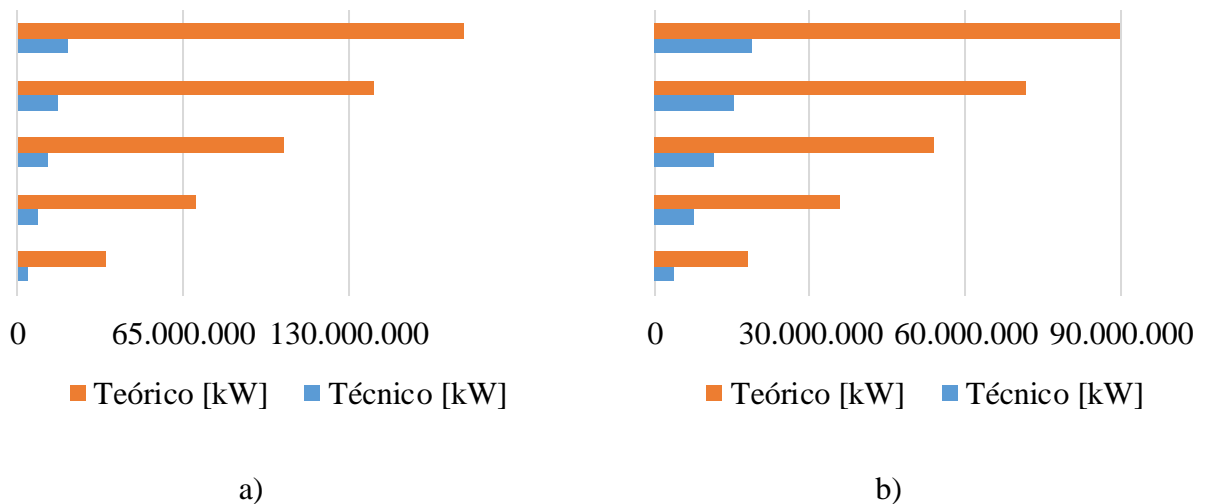


Figura 17. Potencial técnico del recurso biomasa: a) Chocó y b) Meta

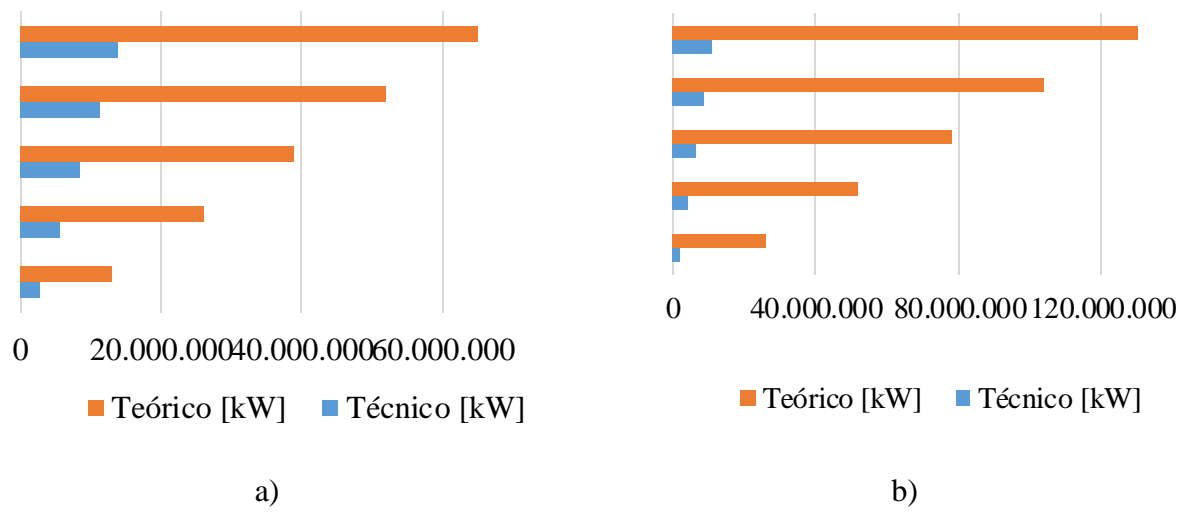


Figura 18. Potencial técnico del recurso biomasa: a) Nariño y b) Putumayo

4. CONCLUSIONES

Aplicando la metodología propuesta en este estudio, la cual incluye el uso de los SIG conjuntamente con la información disponible en bases de datos y mapas, es posible calcular el potencial técnico energético de los recursos solar, hídrico, eólico y de la biomasa residual y seleccionar las soluciones más promisorias para la generación de energía eléctrica en los casos de estudio.

Al evaluar el potencial técnico energético de los recursos renovables: solar, eólico, biomasa residual e hídrico en los cuatro casos de estudio, se puede afirmar que el recurso solar, el hídrico y la biomasa se pueden aprovechar para la generación de energía eléctrica en todos los casos de estudio, debido a la abundancia de estos recursos y los altos potenciales obtenidos, no obstante es importante aclarar que la biomasa presenta un alto potencial teórico pero se ve reducido significativamente al aplicar la gasificación como tecnología, a pesar de ser la mejor opción para la generación de energía eléctrica en las ZNI, sin embargo el potencial obtenido sigue siendo adecuado para ser utilizado.

El recurso eólico no es una alternativa viable para la energización de las zonas de estudio, debido a que las velocidades de viento no son suficientes para poner en funcionamiento los aerogeneradores o no son suficientes para operar de forma eficiente el sistema.

Finalmente, el consumo específico de energía primaria depende específicamente del recurso utilizado, en este sentido para el recurso solar y el eólico, varía con las capacidades instaladas de las plantas, obteniendo un menor consumo con capacidades altas; caso contrario ocurre con el recurso hídrico y la biomasa residual, donde varía según las

características propias de cada recurso como la caída de agua disponible y el tipo de biomasa utilizado, respectivamente.

5. RECOMENDACIONES

Para conocer el potencial técnico energético de la biomasa residual agrícola por medio de la gasificación, se recomienda realizar una simulación del proceso, debido a que el PCI del gas pobre obtenido depende directamente del tipo de biomasa y no se tienen valores estimados en la literatura de cada uno de los residuos utilizados en el estudio.

Las bases de datos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas del IDEAM, presentes en los casos de estudio, no cuentan con las mediciones de la velocidad del viento y los caudales de los ríos, por lo tanto, se recomienda realizar mediciones de los recursos viables en los sitios de estudio para conocer con mayor precisión la cantidad de recursos disponibles.

Se recomienda llevar el potencial técnico, del presente estudio, hasta el potencial de mercado, el cual es una aproximación más real, pues tiene en cuenta los aspectos sociales, ambientales y económicos, así como la competitividad de estas fuentes de energía frente a las energías convencionales.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSEFA, G., FROSTELL, B., Social sustainability and social acceptance in technology assessment: a case study of energy technologies. En: *Technology of Society*, 2007, Vol. 29, pp 63–78.
- [2] UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), *Proyección de demanda de energía en Colombia*, 2013, [Citado en 15 de Octubre de 2014] Disponible en: <http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_Abr_2013.pdf>.
- [3] IPSE (Instituto de planeación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas), ¿Qué son las ZNI?, [Citado en 5 Junio de 2015] Disponible en: <<http://ipse.gov.co/atencion-ciudadano/preguntas-frecuentes-y-respuestas/2-Institucional/3-Qu%C3%A9%20son%20las%20ZNI>>.
- [4] NARVÁEZ, P. C., Conventional and unconventional energy sources: status, perspectives. En: *Engineering, and Research*, 2010, Vol 30, pp 165-173.
- [5] ROSSO, A., KAFAROV, V., Analysis on the Economic Feasibility of Power Generation from Renewable Energy Systems in Non-Interconnected Zones of Colombia, study of cases. En: *Chemical Engineering Transactions*, 2015, Vol. 43.
- [6] JACOBSON, M., DELUCCHI, M., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. En: *Energy Policy*, 2011, Vol. 39, pp 1154-1169.
- [7] ECONOMOU, A., Renewable energy resources and sustainable development in Mykonos (Greece). En: *Renewable Sustainable Energy*, 2010, Vol. 14, pp 1496–1501.
- [8] IDEAM – UPME, *Atlas de viento y energía eólica en Colombia*, 2006, [Citado en 21 de Octubre de 2014] Disponible en: <http://www.upme.gov.co/Atlas_Viento.htm>.
- [9] UPME and IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), *Atlas de Radiación Solar de Colombia*, 2005, [Citado en 5 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/es-CO/Default.aspx>>.
- [10] MARTÍN, R., *Potencial Hídrico, Colombia*, 2003, [Citado en 20 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.sogeocol.edu.co/documentos/06colo.pdf>>.
- [11] TWENERGY, *Biomasa en Colombia: El gran reto para generar energía sustentable*, 2014, [Citado en 15 de Noviembre de 2014] Disponible en: <twenergy.com/energias-renovables/la-biomasa-en-colombia-el-gran-reto-para-generar-energia-sustentable-1140>.
- [12] CORPOEMA (Corporación para la energía y el medio ambiente), *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia*, 2010, Vol. 2, [Citado en 24 de Enero de 2015] Disponible en: <www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf>.

- [13] CORPOEMA (Corporación para la energía y el medio ambiente), Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia, 2010, Vol. 1, [Citado en 30 de Enero de 2015] Disponible en: <http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf>.
- [14] PÉREZ, E., Presentación oficial, IPSE. Disponible en: < <http://www.ipse.gov.co/comunicaciones-ipse/presentacion-oficial>>
- [15] CONPES, Programa de energización para zonas no interconectadas, 2001. Disponible en: < <http://www.upme.gov.co/zni/portals/0/resoluciones/CONPES3108.pdf>>
- [16] ESTEVE, N., Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica, En: Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2011.
- [17] IPSE, Ministerio del Medio Ambiente, Diagnóstico de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Suministro de Energía en Zonas No Interconectadas, 2002.
- [18] FLÓREZ, J., TOBÓN, D., CASTILLO, G., ¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional, Universidad de Antioquia, 2009.
- [19] GSTRIATUM, Energía solar, [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.gstriatum.com/energiasolar/>>.
- [20] TWENERGY, Como se puede utilizar la energía solar, [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://twenergy.com/a/como-se-puede-utilizar-la-energia-solar-1636>>.
- [21] TWENERGY, Energía solar, [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://twenergy.com/energia/energia-solar>>.
- [22] ACCIONA, Energía eólica [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.acciona.com/es/lineas-de-negocio/energia/energia-eolica/>>.
- [23] TWENERGY, Energía eólica [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://twenergy.com/energia/energia-eolica>>.
- [24] EXTERIOR, La energía eólica, [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_eolica.htm>.
- [25] TWENERGY, Energía hidráulica, [Citado en 18 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://twenergy.com/energia/energia-hidraulica>>.
- [26] NEWTON, Energía hidráulica, [Citado en 18 de Marzo de 2015] Disponible en: <http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/hidraulica.htm>.
- [27] TWENERGY, Que es la energía hidráulica, [Citado en 18 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://twenergy.com/a/que-es-la-energia-hidraulica-426>>.
- [28] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Energía de la biomasa, Madrid, 2007.
- [29] CERDÁ, E., Energía obtenida a partir de biomasa. En: Cuadernos económicos de ICE, 2012, 117 - 140.

- [30] CORPOEMA, C. E., PDFNCE (Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia), Bogotá, 2010.
- [31] BATIDZIRAI, B., FAAL, A. P. C., SMEETS E. M. W., Harmonising bioenergy resource potentials -Methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 6598–6630.
- [32] FIGUEROA, J. L., Análisis de alternativas de expansión de la matriz energética de Endesa Chile mediante generación eólica. En: Repositorio académico. Universidad de Chile, 2007.
- [33] CEA, Sistemas de Información Geográfica, tipos y aplicaciones empresariales, 2010, [Citado en 10 de febrero de 2015] Disponible en: < <http://sig.cea.es/SIG>>.
- [34] SI-GEO, MINEDUCACIÓN, [Citado en 10 de febrero de 2015] Disponible en: <<http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>>.
- [35] GRUPO SIG, Fundamentos de sistema de información geográfica. En: Telecentro regional en tecnologías geoespaciales, Unidad 2, Tema 2.
- [36] QUIJANO, R., Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible – MODERGIS – “Estudio de caso Colombia”. Disponible en: Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [37] SIEL, [Citado en 4 de Diciembre de 2014] Disponible en: <<http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturadelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>>.
- [38] UPME, Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013 – 2017. Disponible en: < http://www.siel.gov.co/Siel/Portals/0/Piec/Libro_PIEC.pdf>
- [39] IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), Sistema de información geográfica para la planeación y el ordenamiento territorial, 2010, [Citado en 5 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/>>.
- [40] CERAC, Riesgo por presencia de grupos armados ilegales en Colombia, 2010, p. 230. Disponible en: < http://moe.org.co/home/doc/moe_mre/2011/mre2011/12_armadosilegales.pdf>
- [41] RETScreen, Natural resourcesCanada. [Citado en 10 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.retscreen.net/ang/home.php>>.
- [42] ArcGIS, ArcGISresource center, desktop 10. , 2012, [Citado en 2 de febrero de 2015] Disponible en: <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000>>.
- [43] BRAVO, P., Methodology for determining location and potential small hydro cutting edge water type (under 20 MW power), using Geographic Information Systems. En: CintexJournal, 2014.
- [44] NASA, METI ASTER GDEM. 2011, [Citado en 17 de Noviembre de 2014] Disponible en:<<http://gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp/>>.
- [45] SÁNCHEZ, F. J., Evapotranspiración, Departamento de geología, Universidad de Salamanca, 2010, [Citado en 13 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>>.

- [46] CHAVES, B., JARAMILLO, B., Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. En: Cenicafé, 1998.
- [47] AGRONET, Base agrícola, Ministerio de agricultura 2007-2013, 2014, [Citado en 12 de Noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/Anuario/>> 2014.
- [48] BARUAH, D., DAS, D., HILOIDHARI, M., Bioenergy potential from crop residue biomass in India. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 504–512.
- [49] DONG, J., DAFANG, Z., JINYING, F., KEGE, w., YAOHUAN, H., Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 1377– 1382.
- [50] BILSBORROW, P. E., LYE, E. L., Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium- to large-scale bioenergy production in Nigeria. En: Biomass and Bioenergy, 2013, 66-74.
- [51] CARDONA, M., DUARTE, M., ESCALANTE, H., ORDUZ, J., ZAPATA, H., Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. En: División de Publicaciones - Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [52] BOCCIA, L., FAUGNO, S., OKELLO, C., PINDOZZI, S., Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda. En: Biomass and Bioenergy, 2013, 515-525.
- [53] UPME, Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia, 2005. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/generacion/costos_indicativos_generacion_ee.pdf>
- [54] ECENERGY, [Citado en 14 de Marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.ecenergy.jp/es/japans-fit-scheme/>>.
- [55] CEIBAL, Escala de Beaufort. [Citado en 23 de febrero de 2015] Disponible en: <http://www.ceibal.edu.uy/contenidos/areas_conocimiento/cs_naturales/230709_riesgo_naranja/escala_de_beaufort.html>.
- [56] MUÑOZ, Y., Optimización de recursos energéticos en zonas aisladas mediante estrategias de suministro y consumo. En: Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, 2012, pp. 120.
- [57] Gobierno vasco, Departamento de Industria, Comercio y Turismo, Metodología de emplazamientos de los parques eólicos en la comunidad autónoma del país Vasco. En: Plan Territorial Sectorial de la Energía Eólica de la CAPV, 1 memoria, pp. 157.
- [58] GONZÁLEZ, J., RONDÓN, J., Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola representativa en Santander: “Papa, yuca, mora, papaya, cebolla junca”. En: Escuela de Ingeniería Química, UIS, 2013.
- [59] MENDOZA, C., SOLANO, A., Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. En: Escuela de Ingeniería Química, UIS, 2014.
- [60] KOOPMANS, J., KOPPEJAN, J., Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability. En: Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, 1997.

- [61] IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales), Promedios 81 – 10.xlsx, [Citado en 25 de enero de 2015] Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Promedios+81-10.xlsx/0f4e516b-84ab-4c91-9549-180e62b693ee>>.
- [62] NEOTEO, ASTER GDEM: El mapa topográfico más exacto, [Citado en 5 de abril de 2015] Disponible en: <<http://www.neoteo.com/aster-gdem-el-mapa-topografico-mas-exacto/>>.
- [63] CIVILGEEKS, El modelo de elevación digital global ASTER GDEM: Caracterización y utilidad, [citado en 5 de abril de 2015] Disponible en: <<http://civilgeeks.com/2012/04/10/el-modelo-de-elevacion-digital-global-aster-gdem-caracterizacion-y-utilidad/>>.
- [64] ArcGISResources, Vista general del conjunto de herramientas de Hidrología, [citado en 5 de abril de 2015] Disponible en: <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#na/009z0000004w000000/>>.
- [65] AGUDELO, S., SÁNCHEZ, O., RESTREPO, Y., TOBÓN, D., Optimización de herramientas multiobjetivo para la toma de decisiones de inversión en sistemas aislados sostenibles de energía, En: Grupo de Microeconomía Aplicada y Grupo de Energías Alternativas (GEA), Cap. 2., Universidad de Antioquia.
- [66] ENDESAEDUCA, Centrales de Biomasa, [citado en 5 junio del 2015] Disponible en: <http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa>, 2014.
- [67] KIRKELS, A., VERBONG, G., Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 471-481.
- [68] GÓMEZ, M., Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas. En: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Capítulo 4: Biomasa, gasificación y residuos forestales, tesis doctoral, 2008.
- [69] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Biomasa: Gasificación. En: Ministerio de industria, turismo y comercio, Gobierno de España, 2007.
- [70] DEL VAL GENTO, V., ANTOLÍN, G., Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid, 2009.
- [71] AMARIS, O., MIRANDA, I., Aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual obtenida de la extracción de aceite de palma en Colombia. En: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [72] CORPOEMA, Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables. En: Informe final, Cap. 11, 2012.
- [73] RENOVABLES DEL SUR, Comprar Paneles Solares, ¿Monocristalino o Policristalino? [Citado en 18 de noviembre de 2014] Disponible en: <<http://renovablesdelsur.es/blog/comprar-paneles-solares-%C2%BFmonocristalino-o-policristalino>>, 2011.

- [74] GSTRIATUM, Diferencia entre Celdas Solares Monocristalinas y Policristalinas, [Citado en 18 de noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2013/08/04/diferencia-entre-celdas-solares-monocristalinas-y-policristalinas/>>.
- [75] LIDERS, Paneles solares policristalinos, [Citado en 18 de noviembre de 2014] Disponible en: <<http://lidarsac.jimdo.com/paneles-solares/paneles-policristalinos>>.
- [76] AUTOSOLAR, Panel Solar VICTRON 50W 12V Policristalino, [Citado en 18 de noviembre de 2014] Disponible en: <<http://www.sfe-solar.com/paneles-solares-fotovoltaicos/solarworld/sunmodule-plus-sw-255-poly/>>.
- [77] TUTIENDASOLAR, Aerogenerador ENAIR 24V 1500W con regulador y resistencias, [Citado en 17 de junio de 2015] Disponible en: <<http://www.tutiendasolar.es/Aerogeneradores-24V-Aerogenerador-ENAIR-24V-1500W-con-regulador-y-resistencias-ENAIR.html>>.
- [78] VGENERGY, 20kW Westwind, [Citado en 17 de junio de 2015] Disponible en: <<http://www.vgenergy.co.uk/products-and-services/wind-turbines/small-turbines-0-50kw/20kw-westwind-20kw/>>.
- [79] BASEENERGY, Hidroeléctrica y Mareomotriz, [Citado en 25 de junio de 2015] Disponible en: <<http://www.energiabase.cl/energiabase.html>>.
- [80] AGROWASTE, Gasificación, [citado en 10 de julio de 2015] Disponible en: <<http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACION%20C3%93N.pdf>>, 2013.
- [81] MORENO, C., Estimación de la energía producida por un aerogenerador, [citado en 5 junio de 2015] Disponible en: <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia54/HTML/articulo03.htm>>, CETER, cuba.

BIBLIOGRAFÍA

AGUAYSIG, Calculando caudales medios en ArcGis, [citado en 12 febrero de 2015] Disponible en: <<http://www.aguaysig.com/2011/07/calculando-caudales-medios-en-arcgis.html>>.

AGUAYSIG, Delimitación de cuencas con ArcGIS. Herramienta Hydrology de Spatial Analyst Tools, [citado en 12 febrero de 2015] Disponible en: <<http://www.aguaysig.com/2011/03/delimitacion-de-cuencas-con-arcgis.html>>.

CASTRO, J. F., HERNÁNDEZ O. M., Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía. En: Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2010, Tesis.

CELDAS SOLARES, Celdas solares para paneles fotovoltaicos, [citado en 10 marzo de 2015] Disponible en: <<http://celdassolares.net/>>.

CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), Resolución 160 de 2008, [citado en 13 noviembre de 2014] Disponible en: <http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/GasNatural/docs/resolucion_creg_0160_2008.htm>, 2008.

ENDESAEDUCA, Centrales solares, [citado en 12 marzo de 2015] Disponible en: <http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xii.-las-centrales-solares>.

JANJAI. S., MASIRI, I., Evaluation of wind energy potential over Thailand by using an atmospheric mesoscale model and a GIS approach. En: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 1-10.

PRANDO, R., Energías renovables en la industria de procesos, [citado en 10 mayo de 2015] Disponible en: <<http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/industria/EERR-Solar.pdf>>, 2014.

ANEXOS

Anexo A. Cantidad de usuarios presentes en las zonas no interconectadas

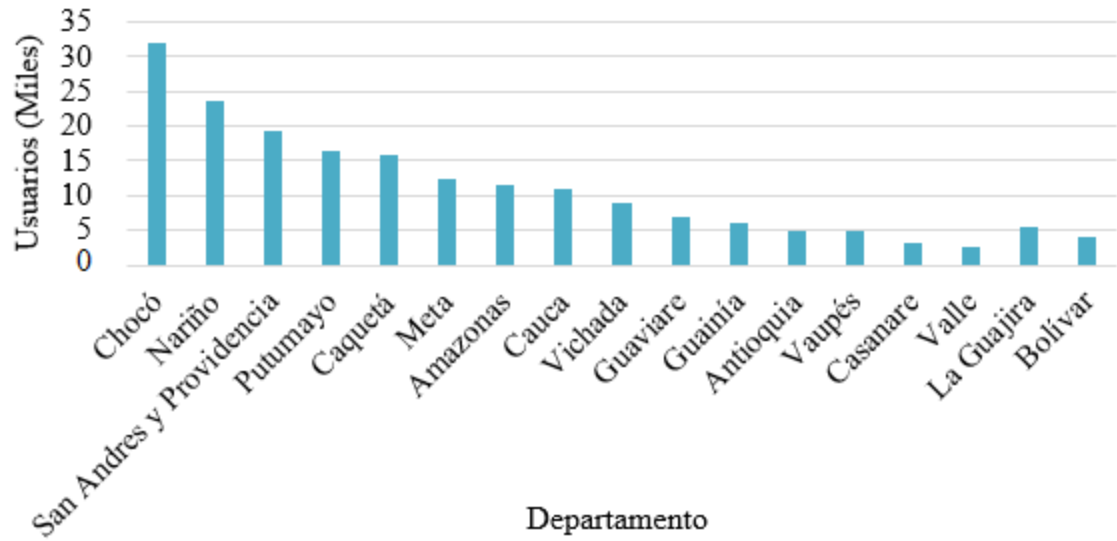


Figura A-1. Número de usuarios, por departamento, en las zonas no interconectadas.
Fuente: [37]

Anexo B. RETScreen

RETScreen es un *software* de energías limpias que permite analizar la viabilidad de proyectos enfocados en energías renovables, eficiencia energética y cogeneración, incluyendo el rendimiento energético. El *software* es administrado y financiado por el Natural ResourcesCanada's y es de libre uso para el público.

Este programa permite reducir los costos y el tiempo empleados en la identificación y evaluación de proyectos energéticos. Es utilizado por más de 425.000 usuarios, está disponible en 35 idiomas y es empleado en más de 600 universidades alrededor del mundo.

Dentro de este *software* se ha integrado una base de datos de productos y proyectos hidrológicos y climatológicos que incluyen 6.700 estaciones terrestres junto con datos satelitales de la NASA, que cubren toda la superficie del planeta, también contiene mapas de recursos energéticos de todo el mundo [41].

Anexo C. Método de Interpolación de Kriging

El método de Kriging es un procedimiento de interpolación geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un grupo de puntos dispersos en un área con valores z . Este modelo estadístico incluye una autocorrelación que relaciona a todos los puntos ubicados, en este caso, los valores de las estaciones meteorológicas; generando así, una superficie de predicción y proporcionando una medida de precisión en las predicciones. Kriging presupone que la distancia entre los puntos guarda una correlación espacial que permite explicar la variación en la superficie, este método ajusta una función matemática a los puntos ubicados en la misma.

Este método permite calcular una predicción de valores en un lugar donde no hay valores, a partir, de los valores conocidos. La fórmula general es la presentada en la ecuación 18 [42].

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (22)$$

Donde:

$Z(S_i)$: Valor medido en la ubicación i

λ_i : Una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

S_0 : Ubicación de la predicción

N : Cantidad de valores medidos

Anexo D. Metodología para el recurso hídrico

1. ASTER GDEM

El ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) o modelo de elevación digital global es un mapa topográfico de la superficie de la tierra, realizado por la NASA y el METI (Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón) por medio de aproximadamente 1,3 millones de imágenes estéreo tomadas por el radiómetro ASTER. El mapa se encuentra disponible, sin costo, al público y se puede obtener de la página web del mismo [62].

En la actualidad es el mapa más completo, los puntos de elevación del terreno fueron medidos cada 30 metros y cubren el 99% del terreno. El mapa esta seccionado en 22.600 placas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y se adquiere en formato *raster* [63].

2. Selección de los ríos de estudio

Los ríos estudiados fueron seleccionados aplicando las herramientas de hidrología, disponibles en arcGIS al ASTER GDEM, de la siguiente manera [64]:

- Se unieron los *raster* que conforman a cada departamento, para tener un *raster* homogéneo, con un solo rango de valores.
- Se rellenaron los sumideros o picos presentes en los DEM, es decir, los errores debido a la resolución de los datos o al redondeo de las elevaciones al valor entero más cercano, para evitar que la red de drenaje obtenida sea discontinua.
- Se estimaron las direcciones de los flujos, estas están determinadas por las diferencias entre las elevaciones de las celdas adyacentes.
- Se estimó la acumulación de los flujos, es decir se localizaron los lugares donde el agua se acumulará con mayor probabilidad, teniendo como resultado la red de drenaje de la cuenca.
- Los flujos resultantes se clasificaron por el método de *Strahle*. La clasificación de arroyos es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes que se unen entre sí. En el método de *Strahler*, se asigna un orden de 1 a todos los flujos sin afluentes y se les conoce como de primer orden. La clasificación de arroyos aumenta cuando los arroyos del mismo orden se intersecan.

- Se transformó la capa *raster* de la clasificación de los arroyos en una capa vector por medio de la capa de dirección de flujo. Esto se realizó para poder apreciar los ríos como líneas y ver la red de drenaje.

3. Estimación del perfil longitudinal de los ríos

Al conocer los ríos a estudiar fue necesario conocer el perfil longitudinal de los mismos, para determinar el posible punto donde se ubicaría la PCH y así estimar el salto neto, parámetro necesario para el cálculo del potencial.

Para conocer el perfil longitudinal, se extrajo el río a estudiar de cada zona en un *shapefile*, y se realizó una interpolación de este, con el *raster* que se obtuvo al hacer el relleno del DEM, con el fin de asignarle los valores de elevaciones correspondientes al río; después de la interpolación por medio de las herramientas de *3D analyst*, se dibujó el perfil longitudinal, se extrajeron los puntos de toda la gráfica y se realizó la búsqueda del punto que cumpliera con la condición dada: La distancia recorrida sobre la diferencia de altura de los dos puntos debía ser menor a 25.

4. Estimación de la cuenca hidrográfica

Conociendo el *raster* de la dirección de los flujos y los puntos donde se realiza la toma del agua para cada río, determinados en el inciso anterior, se estimó la subcuenca de cada río por medio de las herramientas de hidrología. La cuenca obtenida en formato *raster*, se convirtió en formato vectorial para poder ser utilizada en el cálculo del balance hídrico.

Anexo E. Mapas de precipitación y evapotranspiración

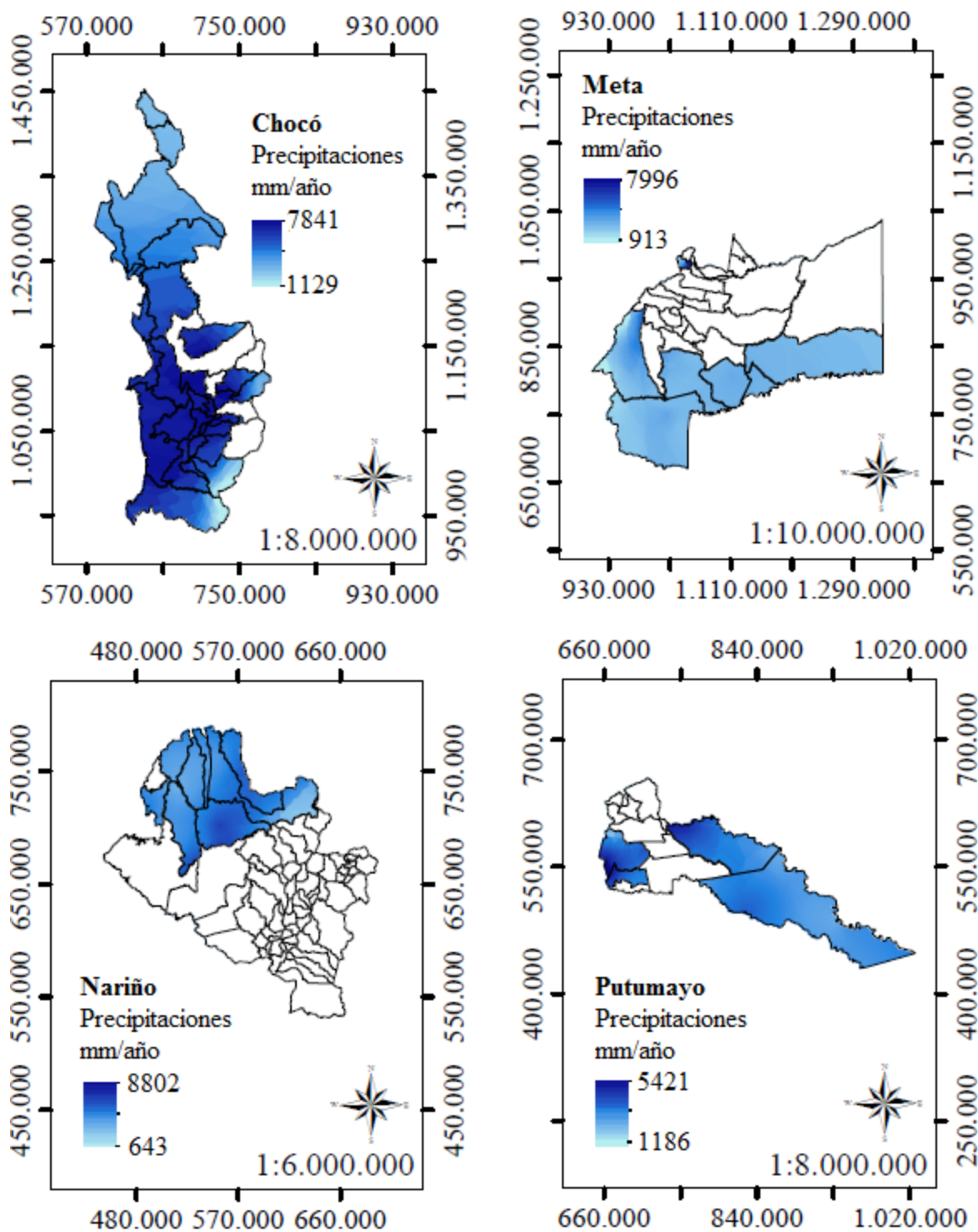


Figura E-1. Precipitaciones promedio multianuales

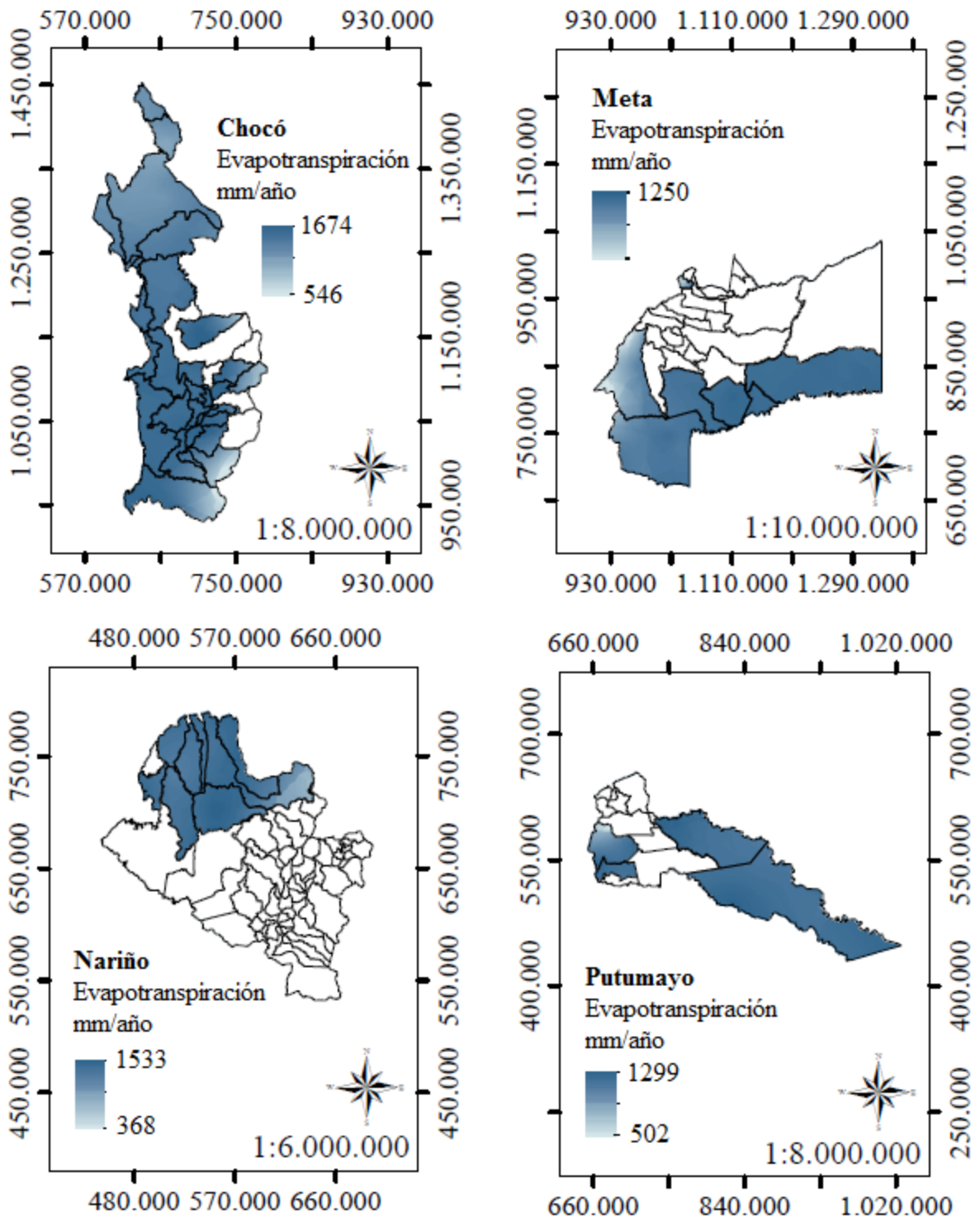


Figura E-2. Evapotranspiraciones promedio multianuales

Anexo F. Potencial teórico energético de la biomasa residual agrícola

Tabla F-1. Factor de residuo y Poder calorífico inferior de cada tipo de residuo

Cultivo	Origen residuo	Tipo residuo	Factor residuo [t residuo/t producto principal]	PCI [MJ/t]
Plátano [51]	RAC	Raquis	1	7.600
		Vástago	5	10.400
	RAI	Plátano de rechazo	0,15	8.500
Yuca [57]	RAI	Cáscara	0,02	13.901,5
	RAC	Yuca de descarte	0,1	14.321,9
		Hojas	0,04	16.577,8
		Tallos	0,24	15.688,1
Piña [58]	RAI	Piña de Descarte	0,02	10.205,1
		Cáscara	0,13	12.704
		Corazón	0,1	13.589,1
	RAC	Poda	3,1	38.059
Palma de aceite [51]	RAI	Cuesco	0,22	16.700
		Fibra	0,63	17.900
		Raquis	1,06	16.800
Caña panelera [51]	RAI	Bagazo	2,53	18.700
	RAC	Hojas - Cogollo	3,75	16.800
Coco [59]	RAC	Corteza	0,42	18.620
	RAI	Cáscara	0,12	18.090
Banano [51]	RAC	Raquis	1	7.600
		Vástago	5	10.400
	RAI	Banano de rechazo	0,15	8.500

RAC: Residuo agrícola de cosecha

RAI: Residuo agroindustrial

Tabla F-2. Potencial energético por departamento

Departamento	Potencial energético [MWh/año]
Nariño	192.374,9
Chocó	732.803,9
Putumayo	224.347,8
Meta	345.136,0

Tabla F-3. Potencial energético total por tipo de cultivo

Cultivo	Potencial energético [MWh/año]
Plátano	1.200.974,9
Palma de aceite	101.193,5
Piña	54.980,3
Caña panelera	45.719,7
Banano	42.634,4
Yuca	29.243,3
Coco	19.916,6

Tabla F-4. Masa de residuos y potencial energético por tipo de cultivo

Departamento	Cultivo	Área cultivada [ha] [47]	Rendimiento [t/ha] [47]	Masa de residuos (t/año)	Potencial energético [MWh/año]
Nariño	Plátano	5.509,6	4,7	47.216,1	129.823,9
	Coco	3.369,9	7,1	3.875,2	19.916,6
	Banano	1.449,0	5,4	15.505,8	42.634,4
Chocó	Plátano	17.701,7	6,0	241.101,2	662.924,7
	Yuca	3.610,1	6,6	3.495,1	14.899,0
	Piña	289	10,7	5.470,9	54.980,3
Putumayo	Plátano	4.378,6	7,0	62.776,5	172.608,3
	Yuca	1.184,2	9,6	1.412,2	6.019,8
	Caña panelera	1.779,3	2,9	9.370,1	45.719,7
Meta	Plátano	3.968,6	10,4	85.692,6	235.618,0
	Palma de aceite	16.677,7	1,2	21.240,0	101.193,5
	Yuca	1.396,6	11,3	1.952,8	8.324,5

Tabla F-5. Masa de residuo y potencial teórico energético por tipo de residuo, de los departamentos de Nariño y Chocó

Departamento	Cultivo	Tipo de residuo	Masa de residuo [t/año]	Potencial energético [MWh/año]
Nariño	Plátano	Raquis	7.677,4	16.208,0
		Vástago	38.387,1	110.896,8
		Plátano de rechazo	1.151,6	2.719,1
	Coco	Corteza del coco	3.014,0	15.589,3
		Cáscara del coco	861,1	4.327,3
	Banano	Raquis	2.521,3	5.322,7
		Vástago	12.606,4	36.418,7
		Banano de rechazo	378,2	893,0
	Chocó	Plátano	Raquis	39.203,4
Vástago			196.017,2	566.276,5
Plátano de rechazo			5.880,5	13.884,7
Yuca		Cáscara	174,8	674,8
		Fruto de descarte	873,8	3.476,1
		Hojas	349,5	1.609,5
		Tallos	2.097,0	9.138,6
Piña		Descarte	32,7	92,6
		Cáscara	212,3	749,2
		Corazón	163,3	616,5
		Poda	5.062,6	53.522,0

Tabla F-6. Masa de residuo y potencial teórico energético por tipo de residuo, de los departamentos de Putumayo y Meta

Departamento	Cultivo	Tipo de residuo	Masa de residuo [t/año]	Potencial energético [MWh/año]
Putumayo	Plátano	Raquis	10.207,6	21.549,5
		Vástago	51.037,8	147.443,7
		Plátano de rechazo	1.531,1	3.615,2
	Yuca	Cáscara	70,6	272,7
		Fruto de descarte	353,0	1.404,5
		Hojas	141,2	650,3
		Tallos	847,3	3.692,4
	Caña panelera	Bagazo	3.774,9	19.608,6
Hojas - Cogollo		5.595,2	26.111,1	
Meta	Plátano	Raquis	13.933,8	29.416,0
		Vástago	69.668,8	201.267,1
		Plátano de rechazo	2.090,1	4.934,9
	Palma de aceite	Cuesco	2.446,5	11.349,1
		Fibra	7.005,9	34.835,0
		Raquis de palma	11.787,6	55.009,4
	Yuca	Cáscara	97,6	377,0
		Fruto de descarte	488,2	1.942,2
		Hojas	195,3	899,3
		Tallos	1.171,7	5.106,0

Anexo G. Tecnologías y capacidades instaladas por tipo de recurso

1. Recurso Solar

La tecnología utilizada para transformar, directamente, la radiación solar en energía eléctrica son los sistemas solares fotovoltaicos. Estos consisten en paneles o celdas solares compuestos por semiconductores, los cuales convierten los fotones en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Esta tecnología es de fácil instalación y operación, no requiere de mantenimiento constante y tiene un mínimo impacto ambiental [64].

1.1. Capacidades instaladas

Las capacidades a instalar utilizando sistemas solares fotovoltaicos, en las zonas no interconectadas, son de pequeña y mediana escala, permitiendo brindar soluciones energéticas para pequeñas comunidades [64 - 65].

Pequeña escala:

- **50 Wp de DC:** Suple la demanda de una vivienda pequeña.
- **300 Wp de DC o AC:** Suple la demanda de una vivienda más grande

Mediana escala:

- **3 kWp de AC:** Suple la demanda de 10 viviendas que cuenten con los servicios básicos.

2. Recurso eólico

Los aerogeneradores son la tecnología utilizada para aprovechar la energía que contiene el viento. Las plantas eólicas más comunes consisten en aerogeneradores de eje horizontal, tripala y orientados a barlovento, esto es, el viento primero pasa por el rotor y luego por la torre [64].

2.1. Capacidades instaladas

Para zonas aisladas se utilizan aerogeneradores pequeños, con una potencia menor a 100 kW, con un generador sincrónico y baterías para almacenar la electricidad generada. En el caso colombiano se presentan las siguientes plantas típicas, cuya potencia se suple con equipos unitarios [64 - 65]:

- **EMCO:** Eólica micro con una potencia nominal de 1,5 kW.
- **EP:** Eólica pequeña con una potencia nominal de 20 kW.

3. Recurso hídrico

Para el aprovechamiento del recurso hídrico se cuenta con dos tipos de regulación de caudales, con o sin embalse. La hidroeléctrica a filo de agua o pasada, consiste en el aprovechamiento de la caída de agua de un río sin necesidad de tener un almacenamiento previo del mismo, operando en función del caudal del río y las variaciones estacionales. Las centrales con potencia menor o igual a 10 MW siempre serán a filo de agua [64].

3.1. Capacidades instaladas

Las capacidades instaladas para generar hidroelectricidad dependen de las condiciones hidrográficas, topológicas y el tipo de aprovechamiento para el cual se requiere para su diseño. Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en las ZNI o aisladas se pueden clasificar así [64 - 65]:

- **Picocentrales:** Capacidad instalada entre 0,5 y 5 kW.
- **Microcentrales:** Capacidad instalada entre 5 y 50 kW.
- **Minicentrales:** Capacidad instalada entre 50 y 500 kW.
- **Pequeñas centrales hidroeléctricas:** Capacidad instalada entre 500 y 10000 kW

4. Recurso biomasa

Para la producción de energía eléctrica a partir de biomasa, se pueden utilizar la combustión o la gasificación, con las cuales se puede obtener potencias de hasta 50 MW [66]. La gasificación, en comparación con la combustión [67 - 71], permite un fácil control y operación en continuo del proceso, se obtiene mayores eficiencias en la producción de energía eléctrica, alcanzando rendimientos entre 30 y 32%, se produce un combustible con menos impurezas que generan un menor impacto al ambiente al quemarse. La atmósfera reductora formada en el proceso evita la formación de dioxinas y furanos, y debido a la alta temperatura de operación, son totalmente destruidos [71].

4.1. Capacidades instaladas

La gasificación es más adecuada que la combustión en capacidades instaladas menores o iguales a 1000 kW [72] y las capacidades aceptadas para miniredes no conectadas a la red son del rango de los 100 kW [30], por lo tanto se van a considerar esas dos capacidades para las zonas aisladas del país.

Anexo H. Mapas de velocidades de viento

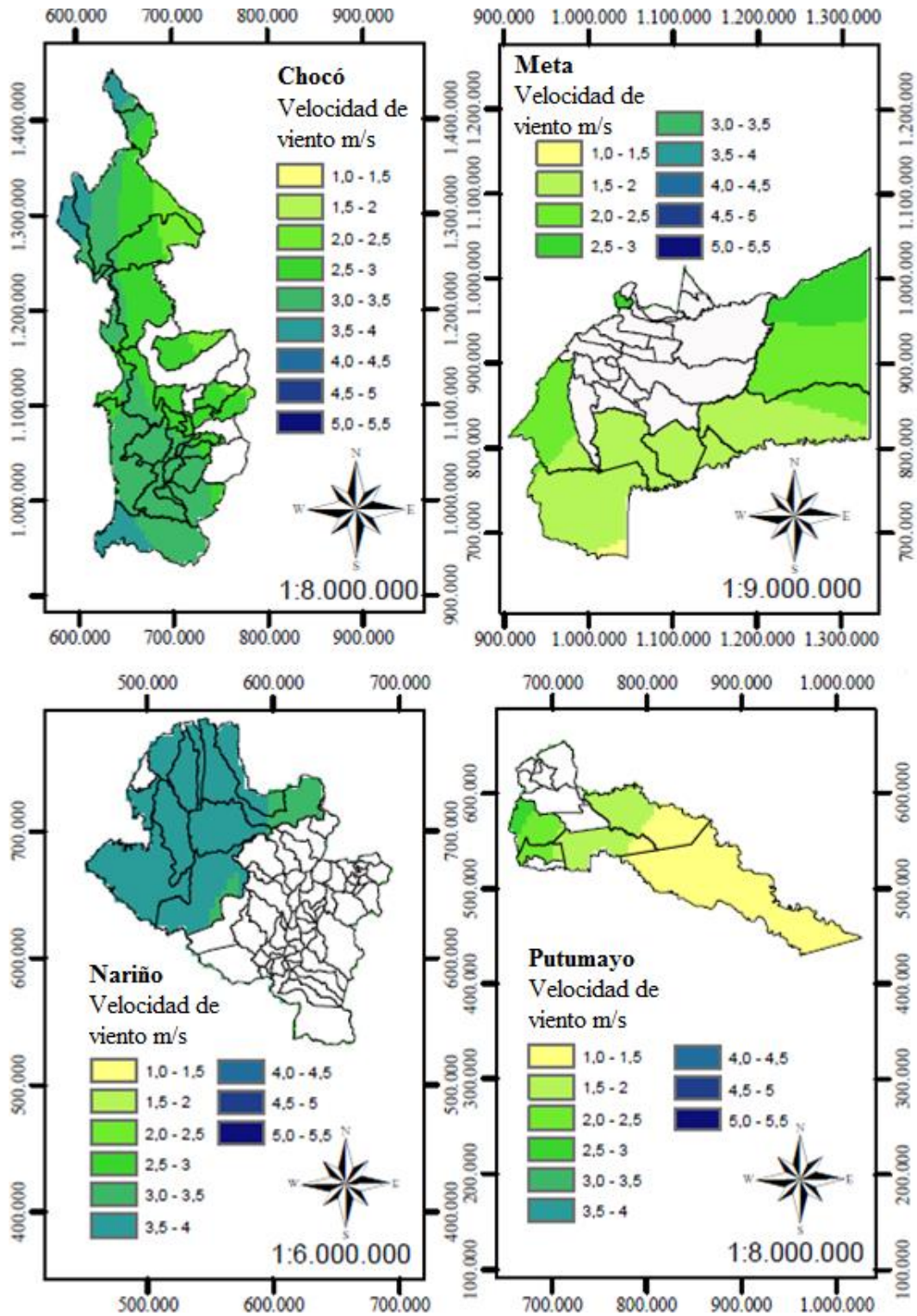


Figura H-1. Velocidades de viento promedio multianuales a 50 m de altura.

Anexo I. Saltos netos obtenidos en los casos de estudio

Tabla I-1. Salto neto en cada municipio del departamento de Chocó

Departamento	Municipio	Salto neto [m]
Chocó	Acandí	4,2
	Alto Baudó	31,8
	Bagadó	94,8
	Bahía Solano	24,6
	Bajo Baudó	17,6
	Bojayá	12
	Cantón de San Pablo	4
	Carmen del Darién	4,5
	Cértegui	22,4
	Condoto	4,2
	Litoral del San Juan	6,7
	Istmina	23
	Juradó	6
	Lloró	29,8
	Medio Atrato	3,25
	Medio Baudó	8,5
	Medio San Juan	5,6
	Nóvita	60
	Nuquí	50
	Río Iró	34,3
	Río Quito	2,5
Riosucio	3,6	
Sipí	14,7	
Unguía	9,44	
Unión Panamericana	5,8	

Tabla I-2. Salto neto en cada municipio del departamento de Nariño

Departamento	Municipio	Salto neto [m]
Nariño	El Charco	1,2
	Francisco Pizarro	3,1
	La Tola	2,4
	Magüí	19
	Mosquera	4
	Olaya Herrera	6,1
	Roberto Payan	3,7
	Santa Bárbara	49,4

Tabla I-3. Salto neto en cada municipio del departamento de Meta

Departamento	Municipio	Salto neto [m]
Meta	El Calvario	113
	Mapiripán	7,3
	La Macarena	7
	La Uribe	2,6
	Puerto Concordia	1,56
	Puerto Rico	4,1
	Vista Hermosa	2,8

Tabla I-4. Salto neto en cada municipio del departamento de Putumayo

Departamento	Municipio	Salto neto [m]
Putumayo	Orito	2,25
	Puerto Guzmán	4,4
	Puerto Leguízamo	7
	Valle del Guamuez	5,6

Anexo J. Validación de los caudales obtenido para el recurso hídrico

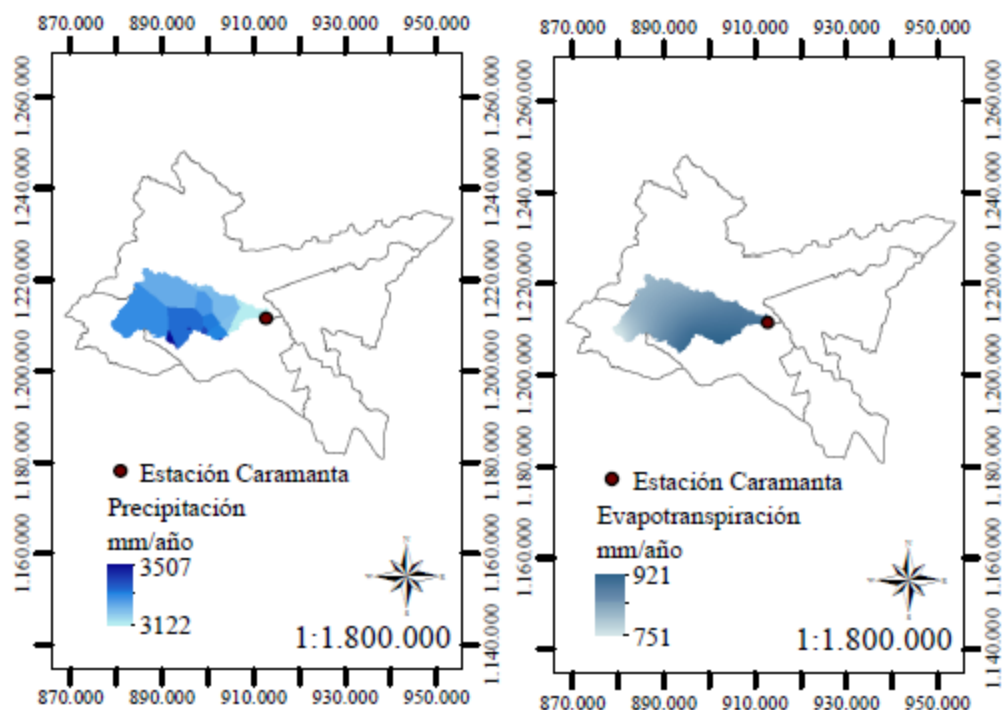


Figura J-1. Campos de precipitación y evapotranspiración en la cuenca del río Nus, a la altura de la estación hidrometeorológica Caramanta.

Tabla J-1. Caudal corregido en cada municipio del departamento de Meta

Departamento	Municipio	Río	Caudal [m ³ /s]
Meta	El Calvario	Río Guatiquía	25,5
	Mapiripán	Río Guaviare	280,8
	La Macarena	Río Guayabero	373,0
	La Uribe	Río Guayabero	112,9
	Puerto Concordia	Río Guayabero	41,1
	Puerto Rico	Río Ariari	307,7
	Vista Hermosa	Río Ariari	747,2

Tabla J-2. Caudal corregido en cada municipio del departamento de Chocó

Departamento	Municipio	Río	Caudal [m³/s]
Chocó	Acandí	Río Perdido	7,3
	Alto Baudó	Río Baudó	87,0
	Bagadó	Río Atrato	13,1
	Bahía Solano	Río Arusí	11,8
	Bajo Baudó	Río Baudó	512,1
	Bojayá	Río Bojayá	116,3
	Cantón de San Pablo	Río Atrato	32,4
	Carmen del Darién	Río Atrato	865,7
	Cértegui	Río Atrato	70,2
	Condoto	Río San Juan	47,6
	Litoral del San Juan	Río San Juan	911,4
	Istmina	Río San Juan	702,6
	Juradó	Río Juradó	32,1
	Lloró	Río Atrato	60,3
	Medio Atrato	Río Atrato	847,7
	Medio Baudó	Río Baudó	439,6
	Medio San Juan	Río San Juan	383,0
	Nóvita	Río San Juan	94,2
	Nuquí	Río Arusí	6,9
	Río Iró	Río San Juan	8,0
	Río Quito	Río Atrato	147,4
	Riosucio	Río Atrato	234,1
	Sipí	Río San Juan	28,3
	Unguía	Río Tanela	6,4
Unión Panamericana	Río Atrato	36,8	

Tabla J-3. Caudal corregido en cada municipio del departamento de Nariño

Departamento	Municipio	Río	Caudal [m³/s]
Nariño	El Charco	Río Patía	173,5
	Francisco Pizarro	Río Curay	9,0
	La Tola	Río Patía	938,3
	Magüí	Río Patía	184,7
	Mosquera	Río Patía viejo	17,4
	Olaya Herrera	Río Patía	772,6
	Roberto Payan	Río Patía	739,5
	Santa Bárbara	Río Iscuandé	51,6

Tabla J-4. Caudal corregido en cada municipio del departamento de Putumayo

Departamento	Municipio	Río	Caudal [m³/s]
Putumayo	Orito	Guamuez	58,2
	Puerto Guzmán	Caquetá	516,4
	Puerto Leguizamo	Caquetá	863,5
	Valle del Guamuez	Guamuez	64,4


Anexo K. Equipos seleccionados para el cálculo del potencial técnico energético

Para calcular el potencial técnico energético y el consumo específico de energía primaria es necesario conocer las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para el aprovechamiento de cada recurso, caso contrario cuando se evaluó el potencial teórico energético. Por lo tanto se eligió un equipo para cada recurso, los cuales se muestran a continuación.

1. Recurso solar

Para el recurso solar se eligió un panel solar fotovoltaico policristalino, tomando en cuenta que posee un menor costo de fabricación que un panel monocristalino y no tiene una diferencia significativa de eficiencia con este [73-75]. En la tabla K-1 se observan las especificaciones del panel seleccionado:

Tabla K-1. Especificaciones del panel solar fotovoltaico utilizado en el estudio.
Fuente: [76].

VICTRON 50W 12V Policristalino	Características	
	Potencia Nominal	50 W
	Voltaje	12 V
	Corriente Cortocircuito	2,85 A
	Eficiencia	15,95 %
	Dimensiones	915 x 670 x 35 mm
	Peso	5,3 kg
	Rigidez	Rígido


2. Recurso eólico

Para el recurso eólico se eligió un aerogenerador para cada capacidad instalada permitida por la UPME (Anexo G), teniendo como parámetro de selección la velocidad mínima de arranque. Siguiendo estos parámetros, los aerogeneradores elegidos fueron:

- Capacidad instalada: 1500 W

Aerogenerador ENAIR 24V 1500W


Tabla K-2. Especificaciones del Aerogenerador ENAIR 24V 1500 W. Fuente: [77].

Hélices	3	 <p>1.5 kw Max. power 2.5 kw</p>
Material	Fibra de vidrio con resinas epoxi	
Diámetro del rotor	4,1 m	
Generador	250 RPM 24 polos imanes de neodimio	
Voltaje	24 V DC	
Velocidad mínima de arranque	2 m/s	
Velocidad nominal	12 m/s	
Peso del generador	120 kg	

- Capacidad instalada: 20 kW

Aerogenerador WestWind 20kW

Tabla K-3. Especificaciones del Aerogenerador WestWind 20kW. Fuente: [78].

Hélices	3	
Material	Fibra de vidrio	
Diámetro del rotor	10,4 m	
Generador	Direct drive	
Voltaje	240 V DC	
Velocidad mínima de arranque	3 m/s	
Velocidad nominal	16 m/s	
Peso del generador	750 kg	

3. Recurso hídrico

La cantidad de energía generada por una pequeña central hidroeléctrica depende del caudal, el salto neto y el tipo de turbina hidráulica, encargada de transformar la energía potencial en mecánica. Con el fin de conocer el tipo de turbina hidráulica a utilizar; en la tabla K-4, se muestran los parámetros para la selección y la clasificación de las mismas.

Tabla K-4. Clasificación de las turbinas hidráulicas. Fuente: Modificado de [65].

	Turbina	Caudal [m³/s]	Salto [m]	Eficiencia
Acción	Pelton	0,05 - 50	30 – 1.800	91
	Turgo	0,025 - 10	15 - 300	85
	Michel Banki	0,025 - 5	1 - 50	82
Reacción	Bomba Rotodinámica	0,05 - 0,25	10 - 250	80
	Francis	1 - 500	2 - 750	92
	Kaplan	1.000	5 - 80	93
	Axiales	6.000	5 - 30	93

En Colombia, dadas las condiciones topográficas, predominan la turbina Pelton y la Francis [22]. Revisando las alturas encontradas (Anexo I), la turbina adecuada para trabajar sería la Francis, figura K-1, debido a que el rango de alturas va desde menos de 10 m, el cual es el promedio de alturas en todos los casos, pero al tener en cuenta los caudales obtenidos (Anexo J), algunos caudales son mayores a los soportados por esta turbina; la turbina Pelton tampoco se puede utilizar porque recibe caudales aún menores a los soportados por la turbina Francis. Por lo tanto, para los casos donde no se puede utilizar la turbina Francis se determinó emplear la turbina Kaplan, figura. K-2, la cual tiene un rango de alturas desde valores menores a 10 m y recibe caudales de 1.000 m³/s.

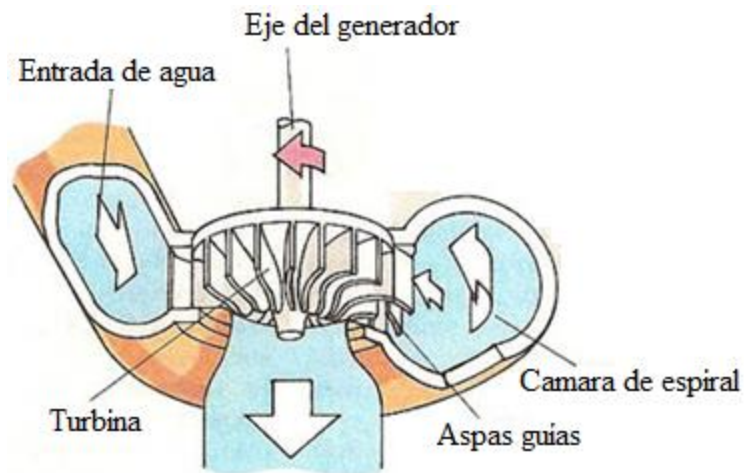


Figura K-1. Turbina Francis. Fuente: [79]

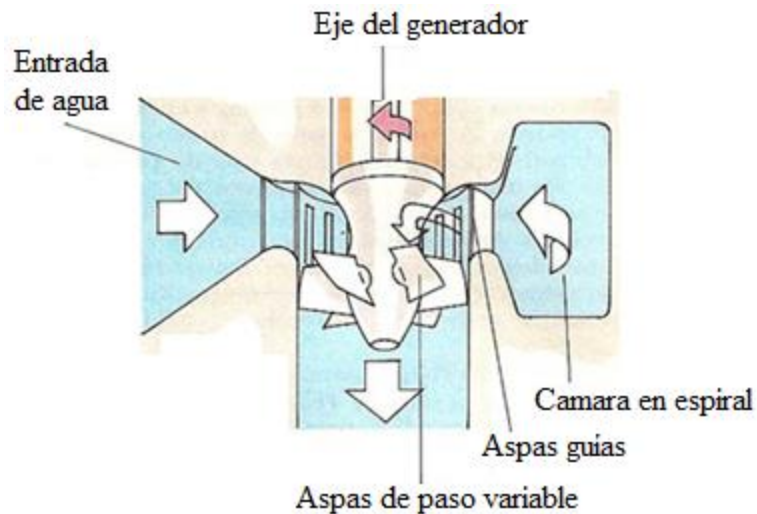


Figura K-2. Turbina Kaplan. Fuente: [79]

4. Recurso de biomasa

El gasificador más apropiado para la generación de electricidad a partir de la biomasa, es el de lecho de fluido burbujeante, en este no se generan variaciones de temperatura, lo que garantiza que no se formen líquidos; tiene una velocidad de fluidización de 1 a 2 m/s; permite un buen contacto de sólido-gas y posee altas velocidades de reacción, además permite que la composición del gas sea similar a lo largo de su producción y permite utilizar diferentes tipos de biomasa. [68] [71]

Los parámetros que tienen mayor influencia en el proceso de gasificación son el tipo de biomasa y el agente gasificante, ya que determinan el poder calorífico del gas obtenido. Para el estudio se eligió como agente gasificante el aire, por ser el más utilizado y no tener costo alguno, este permite obtener un gas denominado gas pobre con un PCI aproximado a la sexta parte del PCI del gas natural [70], es decir 8,2 MJ/kg, o con el 70 – 80% de la energía de entrada al gasificador con la biomasa. Finalmente, la biomasa que generalmente se utiliza en este tipo de gasificadores presentan humedades menores o iguales a un 40% [80].

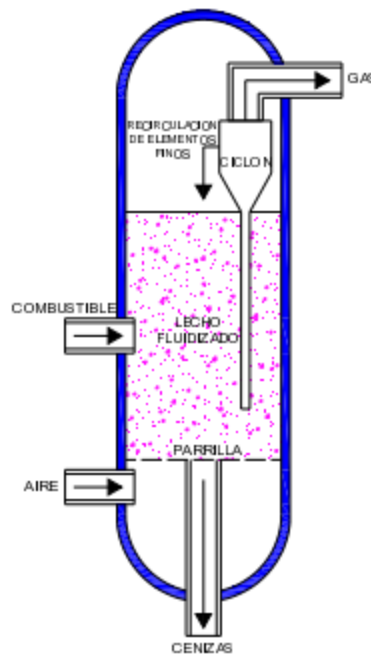


Figura K-3.Gasificador de lecho de fluidizado burbujeante [68]