



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Viabilidad del uso de energías renovables en San Francisco, Cundinamarca bajo la Estrategia Nacional de Transición Energética**

**Annia Arzola de la Peña**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Económica, Instituto de Estudios Ambientales  
Bogotá, Colombia  
2024

# **Viabilidad del uso de energías renovables en San Francisco, Cundinamarca bajo la Estrategia Nacional de Transición Energética**

**Annia Arzola de la Peña**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

Directora:  
Ph.D. Carmenza Castiblanco Rozo

Línea de Investigación:  
Economía y Ambiente

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Económica, Instituto de Estudios Ambientales  
Bogotá, Colombia  
2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Con profundo cariño, deseo expresar mi gratitud a mi amado padre, Nelson Arzola Pina, cuyo legado y amor por la vida han sido la fuente constante de mi inspiración. Como científico comprometido, dedicó una parte considerable de su vida al trabajo de campo, explorando incansablemente los misterios de la naturaleza. Durante muchos años, compartió sus vastos conocimientos como profesor de agronomía, dejando una huella indeleble en las mentes de sus estudiantes. Su inquebrantable compromiso con la protección de nuestro entorno ha dejado una marca imborrable en mi corazón. Esta maestría se erige como un tributo a su memoria.

Agradezco sinceramente a la profesora Carmenza Castiblanco y a los demás profesores del Instituto de Estudios Ambientales - IDEA que han iluminado mi camino durante este posgrado, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento y formación académica. Mi agradecimiento especial al profesional Cesar Villamil, quien dedicó su tiempo y compartió sus valiosos conocimientos para avanzar en los cálculos relacionados con la biomasa. También, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi hermano Nelson Arzola y a toda mi familia, que me ha brindado un apoyo constante en cada uno de mis proyectos.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo y aliento de estas personas excepcionales. A todos ustedes, les estoy agradecido de corazón.

# Resumen

## **Viabilidad del uso de energías renovables en San Francisco, Cundinamarca bajo la Estrategia Nacional de Transición Energética**

El trabajo final de maestría se centra en un análisis de la viabilidad del uso de energías renovables en el municipio de San Francisco, Cundinamarca. Se destacan las problemáticas de la intermitencia, los altos costos de la red eléctrica local, y el uso de leña o energía eléctrica para cocinar como las principales razones para que un alto porcentaje de la población rural del municipio (67%) carezca de una opción tecnológica renovable y limpia para cocción de los alimentos. Se realizaron dos talleres participativos que revelaron las prioridades energéticas de algunos de los habitantes. Se proponen soluciones, incluyendo paneles solares, biomasa y micro hidroeléctricas, opciones que fueron evaluadas. La inclusión de temas tales como: la diversificación de fuentes de energía, la participación ciudadana y la inclusión de proyectos renovables en el Plan de Desarrollo municipal 2024- 2027 son indicadores de la participación de la comunidad que se reflejan en las propuestas entregadas a la Alcaldía a partir del desarrollo del presente trabajo. Se aplicó el análisis multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para evaluar las diferentes alternativas de energías renovables. Además, se utilizó el modelo Waste-to-Energy (WTE) desarrollado por la UPME para realizar los cálculos relacionados con la energía proveniente de la biomasa. El desarrollo del presente trabajo aporta información y análisis en la búsqueda de soluciones energéticas sustentables, dando prioridad a la participación comunitaria, en la planificación del desarrollo energético del municipio de San Francisco.

**Palabras clave: energías renovables, viabilidad, participación ciudadana, Analítico Jerárquico (AHP), transición energética, Modelo WTE (Waste-to-Energy)**

# Abstract

## **Viability of the use of renewable energies in San Francisco, Cundinamarca under the National Energy Transition Strategy.**

The final master's thesis focuses on analyzing the feasibility of using renewable energy in the municipality of San Francisco, Cundinamarca. The analysis highlights intermittency, high costs of the local power grid, and the use of firewood or electricity for cooking as the main reasons why a high percentage of the rural population of the municipality (67%) lacks a renewable and clean technological option for cooking food. Two participatory workshops were held that revealed the energy priorities of some of the inhabitants. Solutions are proposed, including solar panels, biomass, and micro-hydroelectric options, which were evaluated. The inclusion of topics such as the diversification of energy sources, citizen participation, and the inclusion of renewable projects in the 2024-2027 municipal development plan are indicators of the active participation of the community reflected in the proposals delivered to the Mayor's Office from the development of this work. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to evaluate the different renewable energy alternatives. In addition, the Waste-to-Energy (WTE) model developed by UPME was used to perform calculations related to energy from biomass. The development of this work provides information and analysis in the search for sustainable energy solutions, prioritizing community participation, in the planning of the energy development of the municipality of San Francisco.

**Key words: renewable energies, feasibility, citizen participation, Analytic Hierarchical Planning (AHP), energy transition, Waste-to-Energy (WTE) model.**

# Contenido

Resumen.....	IV
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tablas.....	IX
1. Introducción.....	11
1.1 Justificación e importancia del tema .....	12
1.2. Marco teórico.....	14
1.2.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2.2. Objetivos.....	19
2. Metodología .....	19
2.1. Objetivos específicos, actividades a realizar y descripción.....	21
3. Caracterización del territorio .....	28
3.1. Ubicación y delimitación del municipio de San Francisco, Cundinamarca .	28
3.2. Características ecológicas .....	29
3.3. Características socioeconómicas.....	32
3.4. Cobertura de Servicios Domiciliarios en el Municipio de San Francisco .....	32
3.5. Impactos en la Salud y el Ambiente por el Uso de Leña en Hogares sin Gas	34
3.6. Estrategias para la Reducción de Emisiones y Mejora de la Calidad de Vida: Un Enfoque Integral en Cundinamarca .....	35
4. Caracterización de las fuentes renovables: solar, biomasa e hidráulica, en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.....	44
4.1. Caracterización de la Energía Solar en el municipio .....	44
4.2. Caracterización de la hidroenergía en el municipio .....	46
4.3. Caracterización de la biomasa en el municipio.....	50
5. Resultados .....	54
5.1. Informe del Primer Taller de Análisis de Energías Renovables en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca .....	54
5.1.1. Percepciones de los habitantes entrevistados y consultados de San Francisco, Cundinamarca .....	58

<b>5.2. Resultados específicos de la Biomasa aplicando el Modelo Informático para la Estructuración de Proyectos de Conversión de Residuos en Energía (WTE) ....</b>	<b>61</b>
<b>5.3. Aplicación de la evaluación multicriterio en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca .....</b>	<b>75</b>
<b>5.3.1. Percepciones de los habitantes entrevistados y consultados de San Francisco, Cundinamarca .....</b>	<b>76</b>
<b>5.4. Evaluación Multicriterio para la Selección de Energía Renovable en el Municipio: Un Enfoque del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) .....</b>	<b>77</b>
<b>5.5. Análisis de resultados .....</b>	<b>80</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>84</b>
<b>6.1. Conclusiones .....</b>	<b>84</b>
<b>6.2. Recomendaciones .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>88</b>

# Ilustraciones

Ilustración 1 Mapa del municipio de San Francisco, Cundinamarca.....	28
Ilustración 2 Volumen de leña consumido en hogares por departamento, año 2021 .....	37
Ilustración 3 Ruedas Pelton .....	49
Ilustración 4 Rueda Pelton en estado de abandono en la Vereda Arrayán Bajo.....	50
Ilustración 5 Degradación anaeróbica.....	65



## Lista de tablas

Tabla 1: Objetivo específico 1, actividades a realizar y descripción .....	21
Tabla 2 Objetivo específico 2, actividades a realizar y descripción .....	22
Tabla 3 Objetivo específico 3, actividades a realizar y descripción. ....	24
Tabla 4 Objetivo específico 4, actividades a realizar y descripción. ....	25
Tabla 5 Área (Ha) de cuenca .....	30
Tabla 6 Datos del municipio.....	31
Tabla 7 Promedio mensual multianual del acumulado diario de la radiación global [Wh/m <sup>2</sup> por día] en el municipio de San Francisco. ....	31
Tabla 8 Análisis de la Cobertura de Servicios Domiciliarios en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca: Datos del DANE .....	33
Tabla 9 Comparación de la Viabilidad técnica para la sustitución por energético, a nivel de Cundinamarca .....	40
Tabla 10 Cotización para una casa, para autoconsumo.....	45
Tabla 11 Representación de la cantidad de estiércol (toneladas/año) del municipio San Francisco, en relación con el departamento Cundinamarca.....	51
Tabla 12 Representación del municipio de San Francisco en relación con todo el departamento de Cundinamarca.....	51
Tabla 13 Potencial Energético (tj/año) CBNa2010:25 .....	52
Tabla 14 Grupo 1- Necesidades de energía .....	54
Tabla 15 Grupo 2- Necesidades de energía .....	55
Tabla 16 Grupo 3 Necesidades de energía.....	55
Tabla 17 Grupo 4 Necesidades de energía.....	56
Tabla 18 Grupo 5 Necesidades de energía.....	57
Tabla 19 Grupo 6 Necesidades de energía.....	58
Tabla 20 Biomasa residual en cultivos permanentes .....	61
Tabla 21 Cantidad de porcinaza generada por la granja.....	61
Tabla 22 Número de animales y peso.....	62
Tabla 23 Censo nacional bovino 2020 .....	62
Tabla 24 Número de aves en el municipio .....	63
Tabla 25 Cantidad de residuos para cerdos, bovinos y aves .....	63
Tabla 26 Residuos sólidos (toneladas/ año) .....	64
Tabla 27 Datos de entrada al modelo WTE .....	66

Tabla 28 Resultados obtenidos con la aplicación del modelo WTE.....	66
Tabla 29 Infraestructura para la degradación anaeróbica .....	68
Tabla 30 Producción de energía proveniente de biomasa .....	69
Tabla 31 Manejo del Digestato .....	71
Tabla 32 Costos de inversión y operación .....	72
Tabla 33 Ventajas y desventajas de las tecnologías .....	75
Tabla 34 Criterios, indicadores y ponderaciones para el caso de estudio .....	78
Tabla 35 Puntuaciones de rendimiento/ desempeño de criterios .....	78
Tabla 36 Resultados obtenido de la evaluación Multicriterio – Media Ponderada .....	79
Tabla 37 Comparación Paneles solares, Micro centrales hidroeléctricas y Plantas de biogás.....	81

# 1.Introducción

Las actividades humanas desempeñan un papel fundamental en la configuración del futuro climático, subrayando así la importancia de asumir compromisos a todos los niveles para avanzar en la transición energética. Asimismo, es esencial planificar el territorio teniendo en cuenta las necesidades y la accesibilidad de las comunidades a las nuevas alternativas de energía renovable. En este contexto, el presente trabajo tiene entre sus objetivos, caracterizar las fuentes de energías renovables de mayor viabilidad en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.

La población de San Francisco se enfrenta a desafíos significativos, ya que algunos habitantes podrían experimentar problemas de salud o enfrentar costos elevados al recurrir a sustitutos del gas residencial, como leña, cilindros de gas o energía eléctrica. Además, se ven expuestos a cortes de electricidad con frecuencia. En respuesta a estos desafíos, este trabajo se propone identificar metodologías para analizar la viabilidad de las energías renovables, al tiempo que determina los beneficios ambientales (sociales, económicos y biofísicos) de implementar fuentes renovables en el contexto de la transición energética.

La estructura del trabajo se divide en varios capítulos, cada uno abordando aspectos cruciales para comprender y proponer soluciones a los desafíos energéticos identificados: en el primer capítulo se presenta el contexto general de la transición energética y se destaca la relevancia específica de abordar estos desafíos en el municipio de San Francisco. Adicionalmente, se intenta proporcionar una base teórica para comprender los conceptos claves. En el segundo capítulo, se describe la metodología utilizada, desde la revisión bibliográfica hasta la aplicación de entrevistas y modelos informáticos. En el capítulo tres, se explora la realidad socioeconómica y ecológica de San Francisco, identificando los impactos en la salud y el ambiente asociados con el actual uso de leña para la cocción de alimentos. En el cuarto capítulo, se analiza el potencial de la energía solar, hidroenergía y de biomasa en el municipio a partir de la presentación de los resultados, en donde se detallan los hallazgos específicos obtenidos a través de talleres participativos, aplicación del Modelo Informático para la Estructuración de Proyectos de Conversión de Residuos en Energía (WTE), y la Evaluación Multicriterio, revelando percepciones de los habitantes y proponiendo soluciones. Finalmente, en el capítulo cinco, se presentan las conclusiones y

recomendaciones, se identifican las limitaciones en la realización del trabajo y se ofrece orientación para futuras acciones.

Este trabajo se proyecta como un paso significativo hacia la identificación de soluciones energéticas sostenibles para el municipio de San Francisco, Cundinamarca. Destaca la crucial importancia de diversificar las fuentes de energía, fomentar la participación ciudadana y lograr una integración efectiva de proyectos renovables en la planificación del desarrollo municipal. Además de su impacto en San Francisco, la metodología propuesta se visualiza como un modelo susceptible de ser adaptado y aplicado en otros municipios de Colombia.

## **1.1 Justificación e importancia del tema**

En el último informe publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se alerta sobre un aumento de las probabilidades de sobrepasar el nivel de calentamiento global de 1,5 °C en las próximas décadas. En este sentido, es inmediata la necesidad de reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) para evitar escenarios catastróficos de crisis climáticas (Yang et al., 2022).

La transición energética es reconocida como una necesidad inminente a nivel mundial, esencialmente por dos situaciones (Roa et al., 2018).

1- La ciencia ha demostrado que las emisiones de CO<sub>2</sub>, producidas por las energías fósiles, constituyen la causa principal del calentamiento global, y las cumbres mundiales del clima han reafirmado la necesidad y la urgencia de reducir esas emisiones.

2-En los últimos años, las llamadas «leyes del mercado» se están colocando cada vez más del lado de las energías renovables, de tal manera que, ya no son sólo las ciencias del clima y el ambientalismo los que empujan esa transición. El avance permanente en la investigación, las innovaciones tecnológicas y los bajos costos en las energías renovables, principalmente solar y eólica, se reflejan en una mayor producción, difusión y ventas.

El sistema energético emergente (energía sostenible) debe promover un mundo más inclusivo y equitativo, con resiliencia frente a las crisis económicas y medioambientales. Los

gobiernos tienen ahora la oportunidad y la responsabilidad de lograr un cambio duradero (IRENA, 2018).

El presente trabajo se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se relacionan a continuación: ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”, ODS 12 “Producción y consumo responsables” y ODS 13 “Acción por el clima” (Garlet et al., 2022; Unicef & Inda, 2013).

El marco legal colombiano contribuye directamente a la consecución de estos objetivos mediante la promoción de energías renovables. La Ley 2099 de 2021 y el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge) demuestran el compromiso del país con el desarrollo de fuentes no convencionales de energía. Además, el convenio ATN/FM-12825-CO con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) establece incentivos significativos, contribuyendo a la viabilidad económica de proyectos de energías renovables (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

La Ley 1715 de 2014 emerge como un hito en la transformación del sistema energético colombiano. Se destaca cómo esta legislación ha allanado el camino para la implementación de contadores eléctricos bidireccionales, generando un ambiente propicio para la generación distribuida y el autoconsumo de energía. El marco regulatorio del "balance neto" proporciona a los consumidores incentivos para adoptar fuentes de energía renovable, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible de la energía (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2014).

De otra parte, en las zonas rurales de Colombia se evidencian cifras preocupantes en cuanto al uso de biomasa, como la leña, para actividades de cocción y calefacción.

Según un informe de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en el año 2020, aproximadamente el 12,5% de la población total de Colombia, que corresponde a 2,500,000 hogares, utilizaba biomasa como fuente de energía. Estos números resaltan la falta de acceso a gas licuado de petróleo (GLP) y electricidad en muchas viviendas del municipio, ya que únicamente el 82% de la población cuenta con acceso a estas alternativas más seguras. Estas condiciones precarias tienen consecuencias directas en la salud de la comunidad, evidenciadas por las 5.849 muertes registradas en 2015 debido a enfermedades respiratorias relacionadas con la calidad del aire, conocidas como enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación del aire por la combustión de biomasa (CAH). Además, se reportaron 294 muertes de niños en el mismo año por esta

causa. Frente a estos datos preocupantes, es necesario tomar medidas para mejorar el acceso a fuentes de energía más limpias y seguras en el municipio y así proteger la salud y el bienestar de sus habitantes.

El municipio de San Francisco, ubicado en el departamento de Cundinamarca, en Colombia no es ajeno a esta situación, por lo cual encontrar una alternativa energética segura y eficiente es una prioridad. Este municipio es privilegiado porque posee una de las cuencas hidrográficas más abundantes de la región, también, se cultiva café, cítricos, plátano, maíz, la caña panelera, la yuca, el tomate, el aguacate, el frijol y la arveja, cuyos residuos tienen un alto potencial energético para producir biomasa. Los resultados de la investigación y un documento con recomendaciones serán entregados a la Alcaldía del Municipio para que cuenten con este insumo en la elaboración de su Plan de Desarrollo 2024 – 2027.

## **1.2. Marco teórico**

El marco teórico de este trabajo aborda diversas perspectivas relacionadas con la sustentabilidad, las transiciones justas, la transición energética y los aspectos económicos inherentes al sector de las energías renovables. La inclusión de enfoques que van desde la sustentabilidad hasta la transición justa proporciona una base integral para comprender la complejidad de los desafíos y oportunidades en el contexto de las energías renovables (Katsaprakakis, 2024).

El concepto de sustentabilidad abordado en esta propuesta se asocia directamente con los límites biofísicos impuestos por la biosfera a los sistemas socioeconómicos (Johan Rockström, 2009). Como señala Riechmman (2014), los sistemas socioeconómicos que destruyen su base biofísica son insostenibles. Esta perspectiva destaca la necesidad de limitar el uso de recursos para generar bienestar, asegurando que no se sobreexploten las fuentes ni se sobrecarguen los sumideros proporcionados por la ecosfera. Esta definición resalta la conexión intrínseca entre la salud del entorno natural y la viabilidad a largo plazo de los sistemas humanos (Muñoz, 2015).

Por otro lado, Gudynas (2011) ha ampliado este enfoque al abordar cuestiones clave como los límites ecológicos, las formas de valoración ética, las concepciones sobre la apropiación y uso de los recursos naturales en términos económicos, y el papel de la ciencia y la tecnología en el contexto de la sustentabilidad. Esto refuerza la idea de que la

sustentabilidad no solo implica la gestión eficiente de los recursos, sino también la consideración de dimensiones éticas y sociales (Gudynas & Acosta, 2011). El enfoque de Gudynas nos invita a repensar la sustentabilidad como un proceso complejo que requiere transformaciones sociales, económicas y éticas. No se trata solo de gestionar recursos de forma eficiente, sino de cambiar nuestra forma de pensar y actuar en relación con la naturaleza (Gudynas, 2013).

En armonía con la necesidad imperante de abordar la crisis climática y alcanzar la sustentabilidad, se resalta la importancia de la transición energética como un componente clave. Este imperativo se refleja de manera palpable en los Acuerdos de París y la adopción de metas de carbono neutral para 2050, subrayando la urgencia global hacia fuentes de energía más sostenibles (Di Pietro, 2017).

El sector de las energías renovables ha experimentado un significativo desarrollo, impulsado por la necesidad de mitigar el cambio climático y mejorar la seguridad energética. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la crisis energética global puede ser una oportunidad para acelerar la transición hacia una energía más limpia y sostenible. Uno de los aspectos más relevantes de este informe es el análisis de los costos de las energías renovables, que han disminuido rápidamente en la última década. Este análisis se basa en informes como "Renewables 2022" de la AIE y "Renewable Power Generation Costs in 2022" de la Agencia Internacional de Energías Renovables. Estos informes destacan que la energía renovable ha sido la opción más económica para la generación de electricidad en muchos mercados, ahorrando un estimado de USD 521 mil millones en costos de combustible desde el año 2000. Factores como avances tecnológicos, economías de escala y la competencia en el mercado de las energías renovables han desempeñado un papel crucial en la reducción de costos.

La transición hacia fuentes de energía renovable se ha consolidado como una respuesta esencial a los desafíos climáticos y la necesidad de promover un sistema energético más sostenible. Según los informes más recientes de la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), diversas opciones han experimentado notables avances a nivel global. En particular, la energía solar fotovoltaica ha alcanzado niveles notables de competitividad gracias a mejoras continuas en la eficiencia de las células fotovoltaicas y a reducciones significativas en los costos de instalación. La energía solar fotovoltaica (FV) desempeña un papel fundamental en la

consecución de los objetivos climáticos establecidos en el Acuerdo de París (Di Pietro, 2017). Únicamente mediante la rápida implementación de la energía solar FV, se puede lograr reducciones sustanciales en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el sector energético, representando el 21% del potencial total de mitigación de emisiones (El futuro de la energía solar fotovoltaica, 2019). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), en 2023, la capacidad instalada de energía solar a nivel mundial alcanzó la impresionante cifra de 507 GW (Renewable Energy Agency, 2023).

Asimismo, la biomasa, derivada de residuos orgánicos, se ha destacado por su versatilidad, aunque persisten desafíos relacionados con la sostenibilidad de su gestión. La capacidad instalada de energía de biomasa a nivel mundial fue de 121 GW en 2022 (Renewable Energy Agency, 2023). Por último, la energía hidroeléctrica, históricamente estable, ha sido objeto de innovaciones tecnológicas para optimizar su rendimiento y reducir su impacto. Las más recientes innovaciones en esta forma de generación de energía no solo están transformando la eficiencia y capacidad de esta fuente energética históricamente estable, sino que también están afrontando desafíos críticos relacionados con la sostenibilidad y la adaptabilidad. Estas innovaciones comprenden el desarrollo de turbinas hidroeléctricas más eficientes y menos intrusivas, como las turbinas de flujo libre, diseñadas para operar en ríos con corrientes más bajas sin la necesidad de construir grandes presas, logrando así una reducción significativa del impacto ambiental y facilitando una generación de energía más distribuida. Asimismo, el empleo de materiales avanzados y diseños aerodinámicos ha contribuido al incremento de la eficiencia y a la reducción de los costos de mantenimiento (Bory Prevez et al., 2018).

En este contexto de avances tecnológicos y transformaciones en el panorama de las energías renovables, el concepto de transición justa emerge como esencial. Se destaca que no se trata solo de cambiar las fuentes de energía, sino de abordar las injusticias estructurales y las cargas desproporcionadas en diferentes comunidades. La investigación interdisciplinaria y transdisciplinaria se presenta como una herramienta valiosa para abordar esta complejidad, involucrando conocimientos de diversas disciplinas y colaborando estrechamente con la sociedad civil (Bertinat, 2016).

Desde una perspectiva global, se enfatiza la necesidad de reconocer las diversidades en las transiciones justas, evitando un enfoque eurocéntrico. Las transiciones justas deben considerar las desigualdades históricas y las realidades específicas de los países del Sur



Global, y se aboga por una revisión de las epistemologías dominantes relacionadas con los principios clave del desarrollo (de Sousa Santos, 2019; Mesa G, 2019).

Desde una perspectiva más local, los tres grandes objetivos de la política energética colombiana se presentan en concordancia con el Diálogo Social para la Transición Energética Justa. Se enfatiza la importancia de la equidad, gradualidad, participación y conocimiento como principios rectores. Estos principios abogan por la gestión equitativa de recursos, la transición progresiva a fuentes renovables, la participación comunitaria y la colaboración con la academia y la empresa privada (Perspectivas sobre sustentabilidad ambiental, 2023).

Respecto al municipio de San Francisco, este marco teórico proporciona un fundamento sólido para analizar la viabilidad del uso de energías renovables en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, Colombia, considerando aspectos técnicos, éticos, sociales y económicos.

### **1.2.1 Planteamiento del problema**

La energía ocupa un papel fundamental a nivel mundial, desde el siglo XX y hasta la actualidad, el mundo utilizó como fuentes energéticas primarias los combustibles fósiles, es decir, el petróleo, el carbón y el gas natural (IPCC, 2022; REN21, 2023; Ritchie, Hannah; Roser, 2018). Sin embargo, la escasez o disminución de las reservas de petróleo, unido a los efectos sobre el ambiente que han dado lugar cambio climático han generado una tendencia cada vez más creciente y urgente de reemplazar estas energías por fuentes más limpias (Katsaprakakis, 2024).

En relación con el municipio San Francisco, Departamento de Cundinamarca se ha determinado que posee un gran potencial renovable, dadas sus características físicas, ecológicas y su agricultura (Acuerdo Municipal No. 018, de Cundinamarca, 2021) para producir energía solar, energía hidráulica y energía biomasa. Asimismo, se considera privilegiado por poseer una de las cuencas hidrográficas más abundantes de la región que incluye las subcuencas de los ríos Sabaneta, San Miguel, Cañas y la cuenca del río Tabacal que pertenecen a la cuenca principal de río Negro.

Sin embargo, el Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 “San Francisco por el Camino Correcto” presenta un vacío en relación con la transición energética, es decir, carece de

estudios y acciones que posibiliten la dinamización del mercado energético mediante fuentes renovables de energía.

Actualmente, algunos habitantes del municipio padecen afectaciones en la salud o afrontan costos incrementados por utilizar sustitutos al gas residencial como: leña, cilindro de gas o energía eléctrica. Lo anterior responde a que solamente el 33,40% de las viviendas en San Francisco tienen acceso al servicio de gas (DANE, 2018). El porcentaje restante, equivalente al 67%, reemplazan el uso del gas residencial por leña o corriente eléctrica. El uso de la leña afecta la salud al liberar pequeñas partículas nocivas, esta exposición al humo afecta especialmente a mujeres y niños, por ser quienes pasan la mayor parte del tiempo cerca del hogar (CREE, 2023, p.45) simultáneamente, con el uso de la leña se contribuye a la deforestación (Calderón-Caro & Benavides, 2022; Giraldo et al., 2022). En el caso de utilizar la electricidad para cocinar, el precio para el estrato 1<sup>1</sup> es de 271 COP/kWh<sup>2</sup> que equivale a 0,06 USD/ kWh y para los estratos 5 y 6 es de 801 COP/kWh que equivale a 0,17 USD/ kWh (subsidian los estratos 1, 2 y 3), mientras, para el estrato 4 es de 674 COP/kWh que equivale a 0,14 USD/ kWh (ENEL, 2022).

Estos valores, comparados con el precio del gas residencial según la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG, 2023), revelan que la electricidad como sustituto resulta considerablemente más costosa, en consecuencia, se hace necesario explorar y analizar otras alternativas energéticas.

A pesar de que la transición energética es deseable y necesaria, se deberá analizar si están dadas las condiciones biofísicas, económicas, sociales y culturales para avanzar hacia una transición energética justa y sustentable en el municipio.

Siendo la observación, la escucha activa y la igualdad de participación de las mujeres, como actoras prioritarias en esta investigación, se fomentará la participación de los habitantes a través de talleres que se realizarán en el municipio.

---

<sup>1</sup> Estrato: clasificación de los inmuebles residenciales que deben recibir servicios públicos

<sup>2</sup> Unidad de medida: kWh- Un kWh o kilovatio hora es una unidad de medida utilizada para contabilizar el consumo eléctrico realizado en un período de tiempo.

## 1.2.2. Objetivos

### **Objetivo General.**

- Determinar la viabilidad de uso de nuevas fuentes de energía renovables en el municipio de San Francisco, Cundinamarca en el marco de la Estrategia Nacional de Transición Energética.

### ✓ **Objetivos Específicos.**

- Contextualizar la Estrategia Nacional de Transición Energética en el caso particular del municipio de San Francisco, Cundinamarca.
- Identificar las metodologías y los métodos para el análisis de viabilidad en el contexto de la transición energética.
- Caracterizar las fuentes renovables: solar, biomasa e hidráulica, en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.
- Determinar los beneficios ambientales (sociales, económicos y biofísicos) de la implementación de fuentes renovables en el municipio para suplir las necesidades no cubiertas en los hogares.

## 2. Metodología

La pregunta de estudio del proyecto está relacionada con la viabilidad del uso de energías renovables en San Francisco, Cundinamarca bajo la Estrategia Nacional de Transición Energética, como un estudio de caso. Se escogió este municipio dado las características físicas, ecológicas y su agricultura. El enfoque que se utilizará es mixto (cualitativa y cuantitativo).

A continuación, se presenta el estudio en cuatro (4) fases:

Objetivo Específico 1: Contextualizar la Estrategia Nacional de Transición Energética en San Francisco, Cundinamarca.

**Fase 1: Contextualización de la estrategia nacional**

Revisión Documentación

Obtención y síntesis  
Resultados

**\*\*Resultado:\*\*** Información sobre la adaptación de la estrategia nacional

Objetivo Específico 2: Caracterizar las fuentes renovables en el municipio de San Francisco.

**Fase 2: Caracterización de las fuentes renovables**

Análisis información Primaria

Talleres con Partes interesadas

Entrevistas con Funcionarios

Recopilación y Análisis de datos

**\*\*Resultado:\*\*** Caracterización de las fuentes renovables viables

Objetivo Específico 3: Identificar metodologías y métodos para el análisis de viabilidad en la transición energética.

**Fase 3: Identificación de metodologías para el análisis de viabilidad**

Análisis información Secundaria

Revisión de métodos UPME

Evaluación de métodos y alternativas

**\*\*Resultado:\*\*** Metodología adaptada para el análisis de viabilidad

Objetivo Específico 4: Determinar los beneficios ambientales de la implementación de fuentes renovables en San Francisco.

**Fase 4: Determinación de beneficios ambientales**

Identificación Incentivos fiscales

Talleres para criterios evaluación

Entrevistas con funcionarios

Aplicación modelo Waste-to-Energy

Análisis multicriterio mediante AHP

**\*\*Resultado:\*\*** Evaluación de beneficios ambientales de las alternativas

## **2.1. Objetivos específicos, actividades a realizar y descripción**

Para la obtención de los datos se utilizarán las técnicas que se establecen a continuación (Tablas 1,2,3 y 4).

Tabla 1: Objetivo específico 1, actividades a realizar y descripción

<b>Objetivo específico No.1:</b>	
Contextualizar la Estrategia Nacional de Transición Energética en el caso particular del municipio de San Francisco, Cundinamarca.	
<b>Actividades</b>	<b>Descripción</b>
Analizar información secundaria cualitativa y cuantitativa tales como: Ley 2099 de 2021 y Ley 1715 de 2014, artículos, libros y productos resultantes de las investigaciones de bases de datos científicas: Science Direct, Scopus y Scielo.	En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica extensa que posibilitó analizar información secundaria cualitativa y cuantitativa proveniente de diversas fuentes, como la Ley 2099 de 2021 y Ley 1715 de 2014, artículos, libros y productos resultantes de las investigaciones de bases de datos científicas: Science Direct, Scopus y Scielo. Con el fin de identificar, evaluar y sintetizar la evidencia disponible sobre el tema de estudio, se realizó una revisión sistemática de información cualitativa y cuantitativa, que facilitó la organización, el registro y la comparación de los datos obtenidos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2 Objetivo específico 2, actividades a realizar y descripción

<b>Objetivo específico No.2:</b>	
Caracterizar las fuentes renovables: solar, biomasa e hidráulica, en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.	
<b>Actividades</b>	<b>Descripción</b>
Realizar dos (2) talleres buscando analizar las ventajas y desventajas de diversas	Información primaria y secundaria. Se llevaron a cabo dos (2) talleres en la parte urbana del municipio de San

<b>Objetivo específico No.2:</b>	
Caracterizar las fuentes renovables: solar, biomasa e hidráulica, en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.	
<b>Actividades</b>	<b>Descripción</b>
<p>fuentes de energía renovable. Identificar las barreras y desafíos específicos que enfrenta la comunidad en la adopción de energía renovable. Establecer las alternativas, criterios, indicadores y ponderaciones para la Evaluación Multicriterio.</p> <p>Entrevistar a funcionario(s) encargado(s) en la secretaria de Desarrollo Económico Agropecuario y Medio Ambiente del municipio.</p>	<p>Francisco, con la participación de habitantes de diversas veredas, entre ellas: Toriba, Juan de Vera, El Peñón, Arrayán Bajo y Arrayán Alto, San Miguel, así como residentes del centro del municipio. En ambos talleres, se contó con la asistencia de un total de 26 personas.</p> <p>Además, se llevó a cabo una entrevista con una funcionaria de la Alcaldía, quien desempeña un papel relevante en la Secretaría de Desarrollo Económico Agropecuario y Medio Ambiente del municipio. El propósito de estas actividades fue obtener información primaria y secundaria sobre las necesidades, expectativas y percepciones de los participantes en relación con el uso de nuevas alternativas de energía.</p> <p>Las técnicas utilizadas incluyeron la observación directa y entrevistas semiestructuradas. La recopilación de datos se realizó mediante el Método Inductivo, permitiendo la generación de conclusiones a partir de la observación y el análisis de los hechos.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Objetivo específico 3, actividades a realizar y descripción.

<b>Objetivo específico No.3:</b>	
Identificar las metodologías y los métodos para el análisis de viabilidad en el contexto de la transición energética.	
<b>Actividades</b>	<b>Descripción</b>
<p>Analizar información secundaria cualitativa y cuantitativa de artículos, libros y productos resultantes de las investigaciones de bases de datos científicas tales como: Science Direct, Scopus y Scielo.</p> <p>Revisión de literatura y análisis de métodos de la UPME.</p> <p>Evaluar alternativas de energías renovables mediante un análisis multicriterio.</p>	<p>Información secundaria. Método: Revisión de literatura.</p> <p>Se realizará un análisis de los métodos propuestos por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) para evaluar la viabilidad de proyectos en el sector energético. Esta revisión se centrará en identificar las prácticas recomendadas y las herramientas utilizadas por la UPME en el contexto de la transición energética.</p> <p>Se llevará a cabo una evaluación de las alternativas de energías renovables, utilizando un enfoque de análisis multicriterio. Este método permitirá ponderar y comparar diferentes opciones teniendo en cuenta diversos criterios relevantes, tales como la sostenibilidad, la rentabilidad económica y la viabilidad técnica. La información obtenida se utilizará para informar y respaldar las decisiones estratégicas en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.</p>

Fuente: Elaboración propia



Tabla 4 Objetivo específico 4, actividades a realizar y descripción.

<b>Objetivo específico No.4:</b>	
Determinar los beneficios ambientales (sociales, económicos y biofísicos) de la implementación de fuentes renovables en el municipio para suplir las necesidades no cubiertas en los hogares.	
<b>Actividades</b>	<b>Descripción</b>
Identificar los incentivos fiscales para la promoción de las tecnologías renovables. Realizar talleres buscando el establecimiento de alternativas, criterios, indicadores y ponderaciones para la Evaluación Multicriterio. Entrevistar a funcionario(s) encargado(s) en la secretaria de Desarrollo Económico Agropecuario y Medio Ambiente del municipio. Aplicación del modelo Waste-to-Energy (WTE) desarrollado por la UPME. Análisis multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).	Ley 1715 de 2014 marco regulatorio del "balance neto" proporciona a los consumidores incentivos para adoptar fuentes de energía renovable. Aplicación del Modelo Waste-to-Energy (WTE) desarrollado por la UPME para realizar los cálculos relacionados con la energía proveniente de la biomasa. Análisis multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para evaluar las diferentes alternativas de energías renovables.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe el Modelo Informático para la Estructuración de Proyectos de Conversión de Residuos en Energía (WTE):

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) es una entidad de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía de Colombia, regulada por la Ley 143 de 1994 y el Decreto número 1258 de junio 17 de 2013. La UPME tiene como misión planear integralmente el desarrollo minero energético, respaldar la formulación de políticas públicas y coordinar la información sectorial con los actores y partes interesadas.

La UPME ha desarrollado un Modelo Informático para la Estructuración de Proyectos de Conversión de Residuos en Energía (WTE) a Nivel de Viabilidad. El cual constituye una

herramienta muy útil para desarrollar proyectos WTE en Colombia. Este modelo facilita la toma de decisiones informadas sobre la viabilidad y los beneficios potenciales de tales proyectos (Ficha Técnica de Tecnología de Incineración WTE, 2018).

El modelo se basa en un enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida, que abarca los impactos ambientales y económicos de los proyectos WTE durante toda su vida útil. Esto engloba el impacto ambiental de la recogida, transporte y tratamiento de los residuos, así como el de la operación de la planta. El modelo también evalúa las implicaciones económicas del proyecto, incluyendo el costo de construcción y operación de la planta, el transporte de residuos y los ingresos generados por la venta de la energía producida.

Este modelo incluye la cantidad y calidad de los residuos disponibles, el costo de recolección y transporte de estos, el costo de construcción y operación de una planta WTE, la cantidad de energía generada a partir de los residuos, y las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Para utilizar el modelo, se siguen estos pasos:

- Introducir datos sobre el flujo de residuos, incluyendo cantidad y calidad.
- Ingresar datos sobre la tecnología WTE, como el costo de construcción y operación de la planta.
- Ejecutar el modelo para estimar el costo del proyecto, la energía generada a partir de los residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.
- Analizar los resultados del modelo para evaluar la viabilidad del proyecto.

El modelo puede ser aplicado para evaluar proyectos WTE en diversos entornos, como vertederos de residuos sólidos urbanos, instalaciones de tratamiento de residuos industriales, instalaciones de residuos de construcción y demolición, e instalaciones de tratamiento de residuos peligrosos. También puede utilizarse para evaluar diferentes tecnologías de tratamiento térmico de residuos, como la incineración, la gasificación y la pirólisis. En el desarrollo del presente trabajo el modelo fue utilizado para generar información y estimaciones sobre el potencial que representa la biomasa como una alternativa energética renovable para el municipio objeto de estudio.

Asimismo, se describe el Análisis Multicriterio (MCA):

La evaluación multicriterio es un método que permite comparar y seleccionar alternativas de decisión basadas en múltiples criterios, que pueden ser de naturaleza cualitativa o cuantitativa. El enfoque jerárquico es una forma de estructurar el problema de decisión en niveles de objetivos, criterios y subcriterios, que se relacionan entre sí mediante una matriz de pesos.

Para consolidar los resultados de una evaluación multicriterio con un enfoque jerárquico, se pueden seguir los siguientes pasos:

- ✓ Definir el objetivo general del problema y las alternativas de decisión.
- ✓ Identificar los criterios y subcriterios relevantes para evaluar las alternativas, y ordenarlos en una estructura jerárquica.
- ✓ Asignar pesos a los criterios y subcriterios, utilizando algún método de preferencia, como el método de comparación por pares.
- ✓ Calcular los valores de las alternativas para cada criterio y subcriterio, utilizando alguna escala de medición, como la escala numérica o la escala lingüística.
- ✓ Agregar los valores de las alternativas para cada nivel de la jerarquía, multiplicando los valores por los pesos correspondientes, y sumando los resultados.
- ✓ Comparar los valores agregados de las alternativas y seleccionar la que tenga el mayor valor, o la que mejor satisfaga el objetivo general.

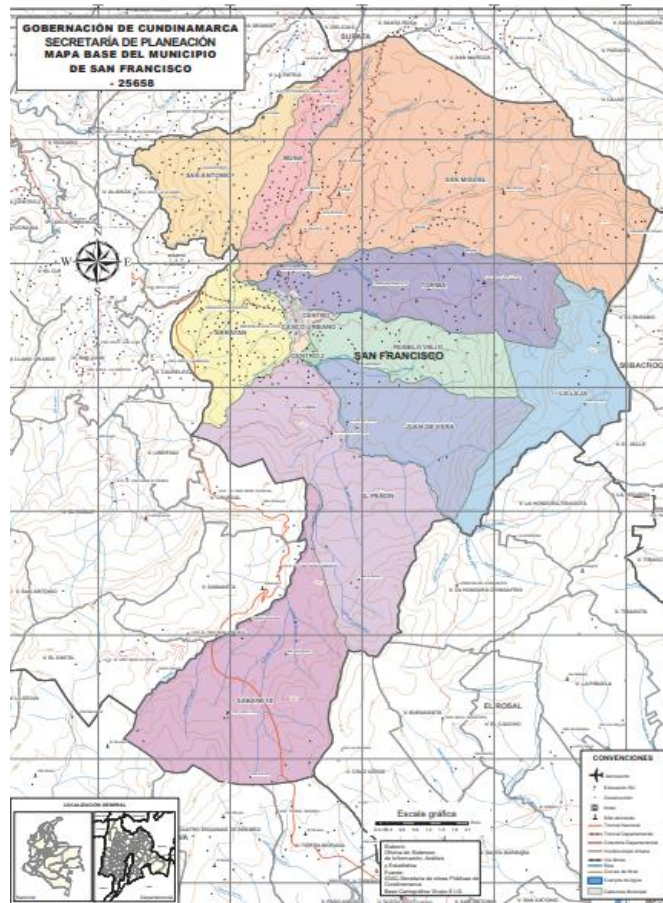
En el marco del presente trabajo, esta técnica de evaluación fue utilizada para analizar las alternativas energéticas renovables susceptibles de ser implementadas en el municipio, teniendo en cuenta diversos criterios.

### 3. Caracterización del territorio

#### 3.1. Ubicación y delimitación del municipio de San Francisco, Cundinamarca

El municipio de San Francisco se encuentra ubicado en el centro del departamento de Cundinamarca. El municipio presenta como divisiones administrativas tradicionales el sector urbano determinado por el perímetro urbano y el sector rural el cual está conformado por once (11) veredas. Su extensión total es de 118 km<sup>2</sup>; la extensión del área urbana es de 0.658 km<sup>2</sup>, la extensión en el área rural es 117 km<sup>2</sup> y la altitud de cabecera municipal 1.520 msnm.

**Ilustración 1 Mapa del municipio de San Francisco, Cundinamarca**



Fuente: Oficina de Sistemas de Información, Análisis y Estadística

## 3.2. Características ecológicas

El municipio es privilegiado porque posee una de las cuencas hidrográficas más abundantes de la región. Está comprendida por las subcuencas de los ríos Sabaneta, San Miguel, cañas y la cuenca del río Tabacal que pertenecen a la cuenca principal de río Negro.

La agricultura se destaca por el Café, asociado íntimamente con los cítricos y el plátano, adicionalmente se encuentran otros cultivos menores como el maíz, la caña panelera, la yuca, el tomate, el aguacate, el frijol y la arveja. La vegetación existente en el territorio municipal está constituida por diversas variedades de plantas propicias de su clima. Cuenta con área de bosque y sotobosque, este último contiene especies de Bambusoide del género Chusquea. En las veredas de Sabaneta y el Peñón se encuentran diferentes tipos de bromelias y orquídeas. Gran parte de sus árboles poseen musgos y líquenes. El municipio, hace parte del corredor de conectividad de tres parques nacionales naturales (PNN) que rodean el distrito (San Francisco Cundinamarca, 2017).

La hidrografía de la jurisdicción de San Francisco cuenta con tres subcuencas y una cuenca principal para el suministro de agua. El municipio hace parte de la cuenca del río Tabacal, y de las subcuencas de los ríos sabaneta, San Miguel y cañas, las cuales pertenecen a la cuenca principal del río Negro.

La subcuenca hidrográfica del río sabaneta, se encuentra ubicada al sur del municipio, sus aguas son recibidas por el río Cañas, esta subcuenta representa un 20% del área municipal. La subcuenca del río cañas, corresponde al 29% del área municipal, se localiza en el centro del municipio, y desemboca en el río Tabacal y por otro lado la subcuenca del río San Miguel corresponde a un 32% del área municipal, estas tres subcuencas presentan problemas como deforestaciones, contaminación por vertimientos (Betancourt & Torres, 2016). En la Tabla 5 se presenta una descripción de las áreas de las cuencas.

**Tabla 5 Área (Ha) de cuenca**

<b>CUENCA</b>	<b>SUBCUENCA</b>	<b>MICROCUENCA</b>	<b>ÁREA (Ha)</b>
<b>RÍO TABACAL</b>	Drenaje Directo Cuenca del río Tabacal	· Quebrada de Agua Clara · Quebrada del Muña · Quebrada Bobal · Quebrada de la Magola · Quebrada el Triángulo · Quebrada del Muña	3.335
	Quebrada Sabaneta	· Quebrada la Laguna · Quebrada Yerbabuena · Quebrada el Consumo · Quebrada de Nubaneta · Quebrada Limones · Quebrada el Peñón	3.885
	Río cañas	· Quebrada Honda · Quebrada del Yaque · Quebrada del Cajón · Quebrada Arrayán · Quebrada Tóriba · Quebrada del Chuscal	5.262
	Río San Miguel	· Río Batan · Quebrada del Negro. · Quebrada la María · Quebrada Grande	5.971

Fuente. CAR y EOT del municipio de San Francisco – Cundinamarca, Acuerdo N. 21 de 1.999

En el contexto de este estudio, se llevó a cabo una solicitud de información al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) con el objetivo de adquirir datos relativos a la radiación solar en el municipio de San Francisco, Cundinamarca. En respuesta a esta petición, se comunicó que el IDEAM carece de sensores de radiación global instalados en dicha localidad.

Ante esta limitación, se obtuvieron los promedios mensuales y anuales de la radiación global acumulada diaria a partir de la estación meteorológica Sabaneta, ubicada en el mismo municipio de San Francisco. Estos datos se generaron mediante la aplicación del modelo Ångström-Prescot, que transforma los registros de brillo solar en radiación solar. Los valores resultantes se expresan en unidades de energía por área, es decir, en Watthoras por metro cuadrado por día ( $Wh/m^2/día$ ).

Estos datos constituyen la información disponible hasta el momento para el análisis de la viabilidad de la energía solar en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.

**Tabla 6 Datos del municipio**

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)
Sabaneta	San Francisco	Cundinamarca	4,90	-74,31	2475

Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM

**Tabla 7 Promedio mensual multianual del acumulado diario de la radiación global [Wh/m<sup>2</sup> por día] en el municipio de San Francisco.**

Mes	Promedio mensual (Wh/m <sup>2</sup> por día)
ENE	4234,9
FEB	4383,8
MAR	4227,5
ABR	4079,4
MAY	4124
JUN	4183,7
JUL	4437,7
AGO	4528,1
SEP	4448,8
OCT	4184,2
NOV	3968
DIC	3961
<b>PROMEDIO ANUAL</b>	4230,1

Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM 2024

En la ciudad de Bogotá, con promedios anuales de radiación global inferiores a los estimados por modelación para San Francisco (4230 Wh/m<sup>2</sup> por día), se han instalado paneles solares en diferentes sitios (centros comerciales, edificios, conjuntos residenciales) con éxito. Bogotá presenta promedios entre 3700 y 4200 Wh/m<sup>2</sup> por día.

### **3.3. Características socioeconómicas**

La economía de San Francisco se basa principalmente en la agricultura y la ganadería. Además, existen actividades relacionadas con la minería y la extracción de materiales como piedra caliza y arena.

A continuación, se presenta un análisis de los indicadores demográficos del municipio en el marco del último censo realizado (DANE, 2018)

- ✓ Porcentaje de hombres y mujeres: El 49% de la población en San Francisco se compone de hombres, mientras que el 50,6% son mujeres. Esto indica que hay una ligera mayoría de mujeres en el municipio.
- ✓ Relación de masculinidad: La relación de masculinidad es de 97,6, lo que significa que hay aproximadamente 97,6 hombres por cada 100 mujeres en San Francisco.
- ✓ Índice demográfico de envejecimiento: El índice demográfico de envejecimiento es de 106,6, lo cual sugiere que la proporción de personas mayores de 59 años es relativamente alta en comparación con la población total del municipio.
- ✓ Relación niños mujer: La relación entre niños y mujeres es de 24,9, lo que significa que hay aproximadamente 24,9 niños menores de 15 años por cada 100 mujeres en San Francisco.

### **3.4. Cobertura de Servicios Domiciliarios en el Municipio de San Francisco**

Se analizan los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) del año 2018, así como los datos comparativos del Censo General (CG) del 2005. En el municipio de San Francisco, Cundinamarca, se censaron 9.644 personas en el CNPV 2018, de las cuales 9.376 estaban en hogares particulares y 268 en lugares especiales de alojamiento-LEA. En el CG 2005, se registraron 8.187 personas en hogares particulares y 96 en LEA.



Estos datos brindan una perspectiva específica sobre la población del municipio de San Francisco y su evolución a lo largo del tiempo.

**Tabla 8 Análisis de la Cobertura de Servicios Domiciliarios en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca: Datos del DANE**

Año	Municipio/ Departamento	Cobertura de Servicios domiciliarios					
		Energía eléctrica	Acueducto	Alcantarillado	Gas**	Recolección de basuras	Internet **
2018	Colombia	96,30%	86,40%	76,60%	67,30%	81,60%	43,80%
	Cundinamarca	98,40%	89,70%	76,80%	69,90%	82,20%	42,30%
	San Francisco	98,00%	78,10%	41,90%	33,40%	51,70%	15,00%
2005	Colombia	93,60%	83,40%	73,10%	40,40%	ND	ND
	Cundinamarca	95,90%	81,00%	65,80%	28,50%	ND	ND
	San Francisco	95,10%	63,30%	32,30%	0,00%	ND	ND

Fuente: Elaboración propia con datos Dane 2018

ND: No disponible

\*\* El denominador no incluye las viviendas en las que no se respondió a esta pregunta, es decir, no incluye “sin información”.

Según los datos del CNPV 2018:

- ✓ Energía eléctrica: el 98,00% de las viviendas en San Francisco cuentan con servicio de energía eléctrica, lo cual indica una alta cobertura en este aspecto.
- ✓ Acueducto: el acceso al servicio de acueducto en San Francisco es del 78,10%. Aunque es un porcentaje significativo, aún hay una proporción considerable de viviendas que no tienen acceso a agua potable.
- ✓ Alcantarillado: la cobertura de alcantarillado en San Francisco es del 41,90%, lo cual muestra una baja cobertura en comparación con otros servicios domiciliarios.

- ✓ Gas: solo el 33,40% de las viviendas en San Francisco tienen acceso al servicio de gas. Esto indica que una parte importante de la población no cuenta con este servicio para sus necesidades de cocción y calefacción.
- ✓ Recolección de basuras: el 51,70% de las viviendas en San Francisco cuentan con el servicio de recolección de basuras, lo cual indica que una proporción considerable de viviendas no tiene una adecuada gestión de residuos.

### **3.5. Impactos en la Salud y el Ambiente por el Uso de Leña en Hogares sin Gas**

El uso de la leña como fuente alternativa de energía para cocinar u otras actividades en los hogares sin cobertura de gas en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, puede tener diversos impactos en la salud humana de sus habitantes (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2021).

- ✓ Problemas respiratorios: la combustión de la leña genera humo y partículas finas que pueden afectar la calidad del aire en los hogares. Estas partículas pueden ser inhaladas y causar irritación en las vías respiratorias, lo que aumenta el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, infecciones y enfermedades pulmonares obstructiva crónica (EPOC). Los niños, los ancianos y las personas con problemas respiratorios preexistentes son especialmente vulnerables a estos efectos.
- ✓ Enfermedades cardiovasculares: la exposición a largo plazo a la contaminación del aire producida por la combustión de la leña se ha relacionado con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, como enfermedad cardíaca, hipertensión arterial y accidente cerebrovascular. Las partículas finas presentes en el humo de la leña pueden ingresar al torrente sanguíneo y contribuir al desarrollo de estas enfermedades.
- ✓ Problemas oculares: el humo generado por la quema de leña puede irritar los ojos y causar ardor, enrojecimiento y picazón. La exposición continua a estos irritantes puede aumentar el riesgo de desarrollar enfermedades oculares, como conjuntivitis y queratitis.

- ✓ Problemas dermatológicos: la exposición a largo plazo al humo de la leña puede afectar la salud de la piel. La presencia de partículas y sustancias químicas en el humo puede causar irritación, sequedad, enrojecimiento y descamación de la piel. Además, el contacto directo con la leña o el manejo de brasas calientes puede provocar quemaduras y lesiones cutáneas.

Para abordar el problema del uso de la leña y promover prácticas más sustentables en la región, se proponen algunos tipos de programas e iniciativas (Estrategia Regional Ambiental Marco (ERAM), 2020):

- ✓ Programas de eficiencia energética: Estos programas pueden incluir incentivos para la adquisición de estufas mejoradas o sistemas de calefacción más eficientes que reduzcan la cantidad de leña necesaria para calentar los hogares.
- ✓ Promoción de energías renovables: Iniciativas que buscan fomentar el uso de energías limpias, como el gas natural o la energía solar, como alternativas al uso de la leña.
- ✓ Educación y concienciación: Campañas dirigidas a informar a la población sobre los impactos negativos del uso de la leña en la salud y el ambiente, y promover cambios en los hábitos de consumo energético.
- ✓ Proyectos de reforestación y conservación de áreas verdes: Iniciativas que buscan aumentar la cobertura vegetal en la región y proteger los recursos naturales.
- ✓ Políticas de gestión sostenible de los recursos naturales: Estrategias gubernamentales para regular y controlar el uso de la leña y promover prácticas sostenibles en el manejo de los bosques y recursos naturales.

### **3.6. Estrategias para la Reducción de Emisiones y Mejora de la Calidad de Vida: Un Enfoque Integral en Cundinamarca**

En el marco de este análisis, se exponen los datos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el departamento de Cundinamarca, según el Inventario departamental de gases efecto invernadero y carbono negro del año 2018. Este estudio revela que Cundinamarca contribuye significativamente, representando el 5% del total nacional de

emisiones de GEI, con un total de 15,614.3 kt CO<sub>2</sub> eq. Los sectores preeminentes en emisiones incluyen Transporte, Agropecuario e Industria. Por otro lado, el departamento absorbe el 2% del total nacional de GEI, registrando -466.5 kt CO<sub>2</sub> eq.

En el ámbito ambiental, el departamento a nivel de país ocupa el tercer lugar en emisiones de GEI debido a la cosecha y extracción de leña para cocinar en hogares rurales, representando el 7% de las emisiones totales (1,095.1 kt CO<sub>2</sub> eq). Además, se reporta un total de 43.8 kt CO<sub>2</sub> eq de emisiones por la generación de metano y óxido nitroso relacionados con incendios forestales en una extensión de 3,6 mil hectáreas.

El sector de Saneamiento, especialmente la disposición final de residuos en rellenos sanitarios, contribuye con 362.3 kt CO<sub>2</sub> eq, donde el Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo es el principal receptor de residuos de 78 municipios de Cundinamarca. Las emisiones de GEI por el tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas son de 215 kt CO<sub>2</sub> eq.

En cuanto al Transporte, Cundinamarca es el segundo departamento en generación de emisiones de GEI en este sector, principalmente por la combustión de transporte terrestre, destacando tracto camiones, camiones, volquetas, buses y motos.

En el sector de Vivienda/Terciario y Residencial, la quema de combustibles en el sector residencial representa el 3% de las emisiones totales del departamento, mientras que en el sector comercial es el 1%.

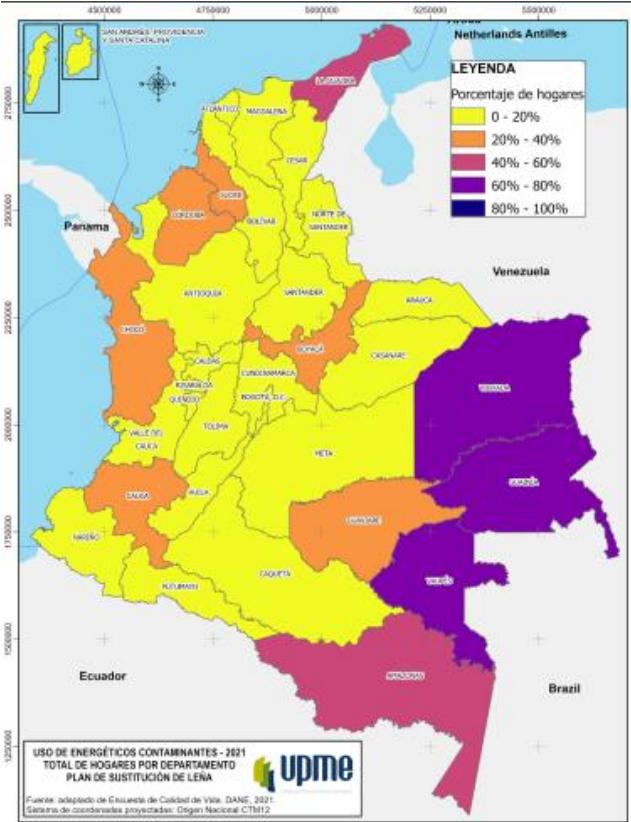
Cundinamarca, junto con Valle del Cauca y Boyacá, es uno de los departamentos con mayores emisiones de Carbono Negro, representando el 35% del total nacional. Además, Antioquia y Meta, debido a sus actividades agrícolas, aportan una cuarta parte de las emisiones del sector agrícola en Colombia.

En general, el parque automotor es el principal factor que define el comportamiento de las emisiones de GEI en el departamento, contribuyendo Cundinamarca, la ciudad de Bogotá D.C. y Antioquia con el 43% del total de emisiones del sector. Asimismo, la aviación civil en Bogotá D.C. es responsable del 33.4% de las emisiones generadas por esta actividad.

Tras analizar las emisiones de gases de efecto invernadero en Cundinamarca, a continuación, se describe el consumo de leña en los hogares, señalando un área crítica que conecta directamente con las preocupaciones ambientales (Encuesta Nacional de Calidad de Vida, 2022).

En dicha Encuesta, se revela el promedio de leña o madera, en kilogramos por día, utilizado en los hogares para cocinar en cada departamento de Colombia. Los departamentos de la zona central, que incluyen a Cundinamarca y Boyacá, y los del suroccidente, que abarcan a Cauca, Valle del Cauca y Nariño, presentan un alto consumo de leña en los hogares. Estos datos subrayan la necesidad de abordar la sustitución de la leña por alternativas más limpias y eficientes en el uso de la energía en estas regiones.

**Ilustración 2 Volumen de leña consumido en hogares por departamento, año 2021**



Fuente: Elaborada a partir de ECV del DANE, 2021

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) ha desarrollado el Plan Nacional de Sustitución de Lena (PNSL) como un documento de orientación técnica. Su objetivo principal es guiar las acciones del sector energético en la progresiva sustitución de combustibles ampliamente utilizados en la cocción de alimentos en los hogares colombianos. Estos combustibles, conocidos como Combustibles de Uso Ineficiente y Altamente Contaminante (CIAC), se consideran perjudiciales tanto para la salud pública como para la calidad del aire debido a sus emisiones de contaminantes criterio y gases de

efecto invernadero. Los CIAC sujetos a sustitución incluyen la leña, la madera, el carbón de leña, el carbón mineral, el petróleo, la gasolina, el kerosene, el alcohol y los materiales de desecho

El PNSL se enfoca en alcanzar la meta de que, para el año 2050, todos los hogares en Colombia dispongan de una fuente de energía limpia y eficiente para cocinar alimentos. Para lograr este objetivo, el PNSL presenta un plan de acción basado en cuatro pilares fundamentales. Estos pilares se desglosan en objetivos y acciones específicas que se iniciarán a corto plazo (2023) y se alcanzarán en el corto plazo (2026), el mediano plazo (2030, en cumplimiento de los compromisos del Acuerdo de París y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible - Agenda 2030) y el largo plazo (2050, coincidiendo con el periodo contemplado en la Estrategia de Carbono Neutralidad a 2050).

Se estima que aproximadamente el 91,51% de los hogares que utilizan Combustibles de Uso Ineficiente y Altamente Contaminantes (CIAC) se encuentran en áreas rurales de Colombia. En estas zonas rurales, alrededor del 40,08% de los hogares todavía emplea CIAC para cocinar, siendo la leña el combustible más comúnmente utilizado (38,01%), seguido por el carbón de leña (0,86%) y el carbón mineral (0,92%).

Colombia registra un consumo anual de alrededor de 5,1 millones de toneladas de leña para la cocción de alimentos, lo que conlleva la emisión anual de aproximadamente 7,9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente debido a su combustión. Estas emisiones están relacionadas principalmente con las condiciones de pobreza multidimensional, especialmente en las áreas rurales, donde el acceso limitado a combustibles gaseosos, prácticas culturales arraigadas y la percepción de costos privados bajos por parte de los hogares en comparación con el costo social más amplio asociado con el uso de CIAC, incluyendo el impacto en la salud, el tiempo invertido en la recolección de leña y la degradación ambiental, contribuyen a esta problemática.

El PNSL utiliza una evaluación multicriterio (EMC) a nivel departamental como punto de partida. Esta evaluación considera tanto la intensidad en el consumo de combustibles contaminantes como las condiciones de infraestructura actuales y futuras que podrían facilitar la expansión de fuentes de energía alternativas para la cocción en áreas rurales de los diferentes departamentos de Colombia.

Como resultado de esta evaluación, se identificaron varias alternativas energéticas que se consideran viables para sustituir los Combustibles de Uso Ineficiente y Altamente Contaminantes (CIAC) en Colombia. Estas alternativas incluyen el gas licuado de petróleo (GLP), el gas natural, la energía eléctrica y el biogás. Cada una de estas opciones se evalúa en función de su idoneidad técnica y de infraestructura para abordar las necesidades de las diferentes regiones del país.

En el análisis de las alternativas para la sustitución de combustibles contaminantes en los municipios de Cundinamarca, se observa que las condiciones de infraestructura vial y de abastecimiento desempeñan un papel crucial en la priorización de las opciones. Este factor ha sido especialmente determinante para el Gas Licuado de Petróleo (GLP) y el gas natural.

Por otro lado, cuando se evalúa el biogás como alternativa de sustitución, se destaca su mayor viabilidad en aquellos departamentos que poseen un potencial significativo de biomasa residual y cuentan con iniciativas respaldadas por empresas consolidadas en la agricultura y la ganadería. Por último, la energía eléctrica se muestra como una opción factible en regiones con un alto potencial fotovoltaico y un mayor porcentaje de áreas rurales conectadas al Sistema Interconectado Nacional.

En el Modelo de decisión para la evaluación de las alternativas - EMC, los criterios son representados por variables, que a su vez son normalizadas en una escala de valores de 1 a 5, y luego se les aplica un peso ponderado asignado por el equipo técnico de la UPME, con lo cual se combinan entre sí mediante una sumatoria. Como resultado, se obtiene una calificación para cada uno de los departamentos, que permite evaluar la viabilidad técnica de sustitución con la alternativa energética analizada en los hogares de las zonas rurales por departamento. Para el caso de Cundinamarca, se presentan los resultados de la evaluación de viabilidad técnica realizada por UPME en la Tabla 9:

**Tabla 9 Comparación de la Viabilidad técnica para la sustitución por energético, a nivel de Cundinamarca**

Alternativas energéticas viables para sustituir los Combustibles de Uso Ineficiente y Altamente Contaminantes (CIAC)	Viabilidad técnica para sustitución energética
GLP	Muy alta (mayor a 4)
Gas Natural	Viable (3.4 a 2.7)
Biogás	Viabilidad alta (4 a 3.4)
Energía Eléctrica	Viabilidad alta (4 a 3.4)

Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)

El GLP tiene una calificación de "Viabilidad muy alta," es importante considerar factores como su dependencia de recursos finitos de petróleo y su impacto ambiental en la producción y el transporte.

El biogás muestra una "Viabilidad alta," lo que respalda su idoneidad como una opción de sustitución en Cundinamarca

Si bien, el GLP tiene una calificación "Viabilidad muy alta", sin embargo, es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Depende de la disponibilidad de petróleo y su precio en el mercado internacional.
- Emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes durante la producción y el transporte.
- Dependencia de recursos finitos de petróleo y su explotación.
- Sujeto a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo.
- Riesgos potenciales asociados al almacenamiento y manejo de GLP.



Según el Plan Nacional de Sustitución de Leña (PNSL), la inversión necesaria para llevar a cabo la sustitución progresiva de los Combustibles de Uso Ineficiente y Altamente Contaminantes (CIAC) utilizados en la cocción de alimentos contempla tres componentes principales:

- Costos Directos: estos comprenden los gastos relacionados con la adquisición de kits domésticos y la instalación de conexiones internas necesarios para la cocción de alimentos. Estos costos están directamente vinculados a la implementación del Plan Nacional de Sustitución de Leña (PNSL).
- Costos de Infraestructura de Abastecimiento: este componente abarca los costos relacionados con la creación y mejora de la infraestructura necesaria para el suministro del energético alternativo utilizado en la sustitución. Es importante destacar que estos costos son considerados indirectos, ya que su financiamiento debe ser coordinado con las proyecciones de expansión de la cobertura energética y los subsidios al consumo, como se establecen en otros planes de desarrollo sectorial.
- Costos Asociados a Subsidios para el Consumo: los posibles subsidios destinados a apoyar el consumo del nuevo energético también se consideran como costos indirectos del PNSL. Estos subsidios deben ser planificados de manera coherente con las proyecciones de ampliación de la cobertura energética y los esquemas de apoyo al consumo que se contemplan en otros instrumentos de planificación del sector.

La gestión adecuada de estos tres componentes financieros es esencial para asegurar el éxito de la implementación del plan de sustitución y garantizar que los hogares tengan acceso a alternativas energéticas limpias y eficientes en la cocción de alimentos.

La implementación del PNSL tiene el potencial de reducir significativamente las externalidades negativas asociadas con el consumo ineficiente de energéticos altamente contaminantes. Esto podría traducirse en beneficios económicos sustanciales, estimados por la UPME en aproximadamente \$198.939 millones de pesos para el año 2026, \$673.220

millones de pesos para el año 2030 y una cifra considerable de cerca de \$1'715.366 millones de pesos para el año 2050. Estos beneficios estarían relacionados con la disminución de emisiones contaminantes, la reducción del tiempo dedicado a la recolección de leña y la potencial reducción de costos asociados a problemas de salud derivados del uso de leña y otros combustibles ineficientes para cocinar.

Para garantizar la disponibilidad de las inversiones necesarias para la implementación exitosa del PNSL, es esencial tomar medidas concretas. Esto incluye fortalecer las fuentes de financiamiento establecidas en el Programa Nacional de Sustitución de Leña, que está respaldado por la Ley 2128 de 2021 y modificada por el artículo 232 de la Ley 2294 de 2023. Estas fuentes de financiamiento son gestionadas por el Ministerio de Minas y Energía y desempeñan un papel crucial en el respaldo financiero necesario para llevar a cabo este importante plan de sustitución.

Para abordar el desafío predominante en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, que radica en que solamente el 33,40% de las viviendas cuenta con acceso al servicio de gas natural, según datos del Censo de 2018, es fundamental considerar las actividades que generan externalidades ambientales negativas. Estas actividades están relacionadas con el uso de la leña en la cocción de alimentos e involucran procesos como la extracción, el consumo, la búsqueda, recolección y transporte de leña, así como la exposición a contaminantes durante el proceso de combustión en las cocinas. En el contexto de esta investigación, se llevará a cabo una comparación de las alternativas energéticas disponibles para el municipio de San Francisco, Cundinamarca, tomando en cuenta las directrices establecidas en el Plan Nacional de Sustitución de Leña.

Durante la entrevista con la ingeniera Paula Orjuela, representante de la Secretaría de Desarrollo Económico Agropecuario y Medio Ambiente del municipio de San Francisco, se exploraron temas cruciales relacionados con la viabilidad de implementar fuentes de energía renovable en la región.

En primer lugar, se destacó el potencial energético significativo del municipio, atribuible en gran parte a la presencia de la subcuenca de los ríos Sabaneta, San Miguel y Cañas. Este hecho resalta una valiosa fuente de agua que podría ser aprovechada para la generación de energía renovable, un enfoque cada vez más crucial en un contexto de creciente necesidad de sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono.

Sin embargo, la entrevista también arrojó luz sobre desafíos y obstáculos actuales. Datos del censo de 2018 revelaron que un considerable 67% de la población del municipio ha optado por reemplazar el gas residencial por fuentes de energía como la leña o la electricidad. Esta elección conlleva importantes implicaciones en términos de salud pública, ya que la combustión de leña libera partículas dañinas en el aire, exponiendo particularmente a mujeres y niños a riesgos para la salud. Esto agrega una dimensión urgente a la búsqueda de soluciones energéticas alternativas, especialmente en lo que respecta a la calidad del aire y la salud de la población.

Además, se discutió el tema de los costos asociados con el reemplazo del gas residencial. Los datos indican que, en muchos casos, los costos de utilizar electricidad como alternativa al gas son considerablemente elevados, lo que crea una barrera financiera significativa para los habitantes del municipio. Por otro lado, la opción de la leña, aunque más asequible en términos de costos directos, tiene un impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente debido a la deforestación que implica.

La entrevista con Paula Orjuela subraya claramente que el municipio de San Francisco se enfrenta a desafíos significativos en términos de acceso a una fuente de energía asequible y sostenible. Por lo tanto, la investigación se enfocará en explorar y comparar alternativas energéticas que aborden estos problemas centrales, con un enfoque particular en la viabilidad de las energías renovables. La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles se presenta como una necesidad urgente, no solo para mejorar la calidad de vida de los habitantes de San Francisco, sino también para preservar los recursos naturales de la región y reducir su impacto ambiental.

Adicionalmente, Paula Orjuela señaló que la Alcaldía de San Francisco ha establecido el reemplazo de las cocinas de leña por alternativas más seguras y sostenibles como una de sus metas prioritarias. Este compromiso de la administración local destaca la importancia de abordar los problemas de salud y medio ambiente asociados con el uso de la leña como fuente de energía y enfatiza la necesidad de una transición hacia fuentes de energía más limpias. En este contexto, la investigación actual se centrará en la comparación de alternativas energéticas que no solo aborden los desafíos de salud pública y medio ambiente, sino que también evalúen la viabilidad económica y técnica de implementar energías renovables en San Francisco.

## **4. Caracterización de las fuentes renovables: solar, biomasa e hidráulica, en el municipio de San Francisco, Cundinamarca.**

### **4.1. Caracterización de la Energía Solar en el municipio**

Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía del sol para generar electricidad. Están formados por células fotovoltaicas que transforman la radiación solar en corriente eléctrica. La eficiencia de los paneles solares depende de varios factores, como la tecnología utilizada, el ángulo de incidencia de la luz y la temperatura. En promedio, los paneles solares tienen una eficiencia del 18-22%, lo que significa que convierten esa proporción de la energía solar que reciben en electricidad. El costo de los paneles solares también varía según el tamaño, la calidad y el tipo de estos, así como de los costos de instalación y mantenimiento. El costo medio de los paneles solares es de unos 1.000-1500 euros por kWp instalado, donde kWp significa kilovatio pico y se refiere a la potencia máxima que puede producir el panel bajo condiciones óptimas. La vida útil de los paneles solares es otro aspecto importante para considerar, ya que determina el tiempo que el panel puede funcionar de manera eficiente. La vida útil de los paneles solares depende de la calidad y el mantenimiento de estos, así como de las condiciones climáticas a las que están expuestos. La vida útil media de los paneles solares es de unos 30-35 años, después de los cuales su rendimiento puede disminuir significativamente.

El sistema de almacenamiento de energía genera un aumento significativo en los costos. Dado que la energía renovable solo está disponible de manera intermitente durante su captación y su almacenamiento para su posterior utilización solo se puede lograr mediante baterías. Estas baterías están diseñadas para suplir la demanda de corriente en momentos en que la captación de energía solar es baja debido a condiciones climáticas adversas, como nubosidad o lluvias, o durante las horas nocturnas cuando no hay disponibilidad de energía solar. Para que el sistema pueda generar la cantidad necesaria de kilovatios (Kv) para satisfacer la demanda, se requiere una amplia área de instalación.

Las características tecnológicas de la energía fotovoltaica que se viene implementado en la zona central del país fueron suministradas por la empresa EcoLED. Entre sus clientes se encuentran instituciones destacadas como la Alcaldía Municipal de Soacha, Alcaldía de Villa de Leyva, Villeta Cundinamarca, Zona Franca Bogotá, Transmilenio, Unidad Nacional para el Riesgo de Desastres, entre otros.

En la Tabla 10 se muestra una cotización para una unidad conformada por 8 paneles solares, inversor de 5kw con comunicación, conexión de 20 metros, caja de protección de fusibles y caja de salida en VAC, tendría un costo de \$38.160.365. En el Anexo 2 se encuentra la Ficha técnica de los paneles solares.

**Tabla 10 Cotización para una casa, para autoconsumo**

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Instalación Fotovoltaica por 1 casa para autoconsumo, incluye:	1	UND	\$ 38.160.365,19	\$ 38.160.365,19
* 8 Paneles solares de 550 W cada uno				
*Inversor de 5kW con comunicación				
*Conexión de 20m hasta tablero de distribución de la casa				
* Caja de protección fusibles en DC				
*Caja de salida en VAC con medidor de energía generada				
<b>No incluye:</b>				
*Interconexión con otra casa				

Fuente: Cotización de ECOLED (empresa de servicios públicos)

**Siendo así, se calcula:**

✓ **Datos de entrada:**

Potencia: 550 W (ó 0.55 kW)

Horas al día: 8 horas de operación

Días al año: 365 d/año

Eficiencia del panel: 22% (porcentaje de la energía solar incidente que el panel puede convertir en electricidad)

✓ **Cálculo:**

Energía:  $0.55 \text{ kW} * 8 \text{ h/día} * 365 \text{ días/año} * 22\% \text{ eficiencia} = 430 \text{ kWh/año}$

✓ **Resultado:**

Si consideramos un hogar promedio en el Municipio de San Francisco con un consumo de 817,01 Kwh/año, y comparamos el uso de la energía solar bajo el escenario utilizado anteriormente (panel solar de 550 W con 22% de eficiencia), podemos concluir que mediante el uso de los paneles solares casi se suple una cantidad considerable de la demanda energética anual del hogar.

La energía producida por el panel solar, estimada en alrededor de 430 kWh/año, evidencia que esta cifra constituye más del 50% del consumo energético anual del hogar. A pesar de que los paneles solares pueden satisfacer una proporción sustancial de las necesidades energéticas, es crucial considerar la viabilidad económica, la cual implica evaluar cuidadosamente aspectos como los costos iniciales y la duración efectiva del sistema.

## **4.2. Caracterización de la hidroenergía en el municipio**

La energía hidroeléctrica ha sido una de las primeras fuentes de producción de electricidad en el país y sigue siendo la más utilizada en la actualidad. Esta fuente aprovecha la energía potencial del agua almacenada en un nivel superior, que se transforma en energía cinética al fluir a un nivel inferior, generando trabajo sin causar grandes efectos contaminantes, y con un recurso renovable como es el agua. Sin embargo, presenta algunas desventajas, como la dependencia de los niveles de agua que se ven afectados por las condiciones

meteorológicas, el alto impacto ecológico en algunos casos, y los altos costos por la necesidad de construir obras civiles como represas y embalses, así como los estudios previos de factibilidad que se realizan para las grandes centrales.

Las centrales hidroeléctricas se clasifican según el tipo de embalse, como las de agua fluyente, de embalse, de bombeo y mareomotrices. También se pueden clasificar según la altura de la fuente o cabeza hidráulica, en pequeñas cuando el salto es menor a 15 metros, medianas cuando el salto está entre 15 y 50 metros, y grandes cuando es superior a 50 metros. Además, se clasifican según la cantidad de energía hidroeléctrica en grandes, con una potencia superior a 10 MW, pequeñas centrales con una potencia entre 0,1 y 0,999 MW, medianas con una potencia entre 1 y 9,99 MW. A su vez, las pequeñas centrales hidroeléctricas se subdividen en pico, micro, mini y pequeña generación, aunque los rangos pueden variar según el país y la organización (Sierra Vargas et al., 2011).

En Colombia, la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG estableció los siguientes intervalos para las pequeñas centrales hidroeléctricas: (0-100 kW) Microcentral, (100-1000 kW) Minicentral, (1000-10000 kW) Pequeña central.

Las micro centrales hidroeléctricas son instalaciones que aprovechan la energía del agua que circula por un río o un canal para generar electricidad. Están compuestas por turbinas que se accionan por la fuerza del agua y que conectan con un generador eléctrico. La eficiencia de las micro centrales hidroeléctricas depende de varios factores, como el caudal, el desnivel y la potencia de las turbinas. En promedio, las micro centrales hidroeléctricas tienen una eficiencia del 70-90%, lo que significa que convierten esa proporción de la energía hidráulica que reciben en electricidad. El costo de las micro centrales hidroeléctricas también varía según el caudal, el desnivel y la potencia de las turbinas, así como de los costos de construcción y operación. El costo medio de las micro centrales hidroeléctricas es de unos 2.000-3.000 euros por kW instalado, donde kW significa kilovatio y se refiere a la potencia eléctrica que puede producir la instalación. La vida útil de las micro centrales hidroeléctricas es otro aspecto importante para considerar, ya que determina el tiempo que la instalación puede funcionar de manera eficiente. La vida útil de las micro centrales hidroeléctricas depende de la calidad y el mantenimiento de las turbinas, así como de las condiciones hidrológicas a las que están sometidas. La vida útil media de las micro centrales hidroeléctricas es de unos 30-40 años, después de los cuales su rendimiento puede disminuir significativamente (Hidroeléctricas pequeñas centrales guía general, 2018).

La turbina Pelton es un tipo de turbina hidráulica de impulso utilizada en centrales hidroeléctricas con gran altura vertical. Fue inventada por Lester Allan Pelton en la década de 1870 y mejorada significativamente por otros inventores más allá de finales de la década de 1800 (Agudelo et al., 1969; Beltrán Prieto et al., 2021; Fernández, 2000).

#### **Funcionamiento de la turbina Pelton:**

- ✓ La turbina Pelton se instala en una central hidráulica y se conecta a un tubo de presión desde una presa de gran altura.
- ✓ El agua entra en una o más boquillas, provocando una aceleración violenta en el flujo de agua.
- ✓ El chorro de agua golpea las palas en forma de cuenco del rotor, lo que provoca la rotación de la turbina y del eje.
- ✓ El eje de la turbina está conectado a un generador que produce energía eléctrica.
- ✓ Las turbinas Pelton tienen una eficiencia del 90% en la conversión de energía hidráulica.

#### **Partes de la turbina Pelton:**

- ✓ Galería de presión: Una tubería que transporta el agua a la turbina desde grandes alturas.
- ✓ Boquilla: Regula la velocidad del flujo de entrada.
- ✓ Rotor y palas: Convierten la fuerza del agua en energía mecánica.
- ✓ Carcasa: Aloja el rotor y está llena de aire a presión atmosférica.
- ✓ Chorro de frenado: Detiene la rueda cuando no está funcionando.

Las turbinas Pelton son ideales para aprovechar grandes saltos hidráulicos con bajo caudal de agua, y su diseño y evaluación requieren consideraciones cuidadosas para maximizar su eficiencia y rentabilidad en la generación de energía hidroeléctrica. La evaluación de turbinas Pelton se centra en aspectos clave como el tamaño de la turbina, que debe adaptarse a las necesidades específicas de la planta, la complejidad del sistema y la necesidad de recursos humanos especializados para el mantenimiento y operación a largo plazo. La eficiencia y rendimiento de la turbina son determinantes para la producción de energía y su valor económico, mientras que los costos de mantenimiento deben considerarse para evaluar la inversión total en proyectos hidroeléctricos. Estos factores son



fundamentales para garantizar la viabilidad y eficacia del proyecto en cuestión (Beltrán Prieto et al., 2021).

Se debe destacar que la experiencia previa con turbinas Pelton de origen chino en San Francisco, Cundinamarca, proporciona un valioso punto de partida para la implementación futura de proyectos hidroeléctricos en la región.

Lo anterior, se base en la presencia de una Rueda Pelton antigua, de tres (3) metros de diámetro, en estado de abandono en la Vereda Arrayán Bajo, que simboliza la existencia de recursos infrautilizados que podrían revitalizarse para contribuir al desarrollo sostenible del municipio. Asimismo, existe una Rueda Pelton en uso en la planta de Siemens. Esta rueda estaba antes en la vereda San Miguel Bajo.

### **Ilustración 3 Ruedas Pelton**



Fuente: REIVAX. Control de velocidad por el deflector de turbinas Pelton en transitorios

En la Ilustración 4, se muestra la foto de la Rueda Pelton, la cual está abandonada en la Vereda Arrayán Bajo. La foto fue tomada por un habitante del municipio, que participó en los talleres realizados en el presente trabajo.

#### **Ilustración 4 Rueda Pelton en estado de abandono en la Vereda Arrayán Bajo.**



**Fuente:** Tomada por Andrés Cabrera

### **4.3. Caracterización de la biomasa en el municipio**

Mediante el análisis de los datos proporcionados, se realizaron cálculos para determinar el porcentaje que representa la cantidad de estiércol generado en el municipio de San Francisco con respecto al total del departamento de Cundinamarca en cada sector específico. Estos porcentajes ofrecen una visión detallada de la contribución relativa de San Francisco en términos de estiércol en comparación con la totalidad de Cundinamarca en los sectores avícola, bovino y porcino.

**Tabla 11 Representación de la cantidad de estiércol (toneladas/año) del municipio San Francisco, en relación con el departamento Cundinamarca**

Sector	Cantidad estiércol [t/año] en Cundinamarca	Cantidad estiércol [t/año] en San Francisco	Porcentaje de representación del municipio
biomasa residual del sector avícola	945.412	<b>46.683</b>	4,94%
biomasa residual del sector bovino	4.824.628	<b>145.242</b>	3,01%
biomasa residual del sector porcino	424.769	<b>4.138</b>	0,97%

Fuente: Elaboración propia con datos Instituto Colombiano Agropecuario- ICA (2008), Inventario Completo de Granjas

A través de la recopilación y evaluación de datos, se busca entender la contribución de San Francisco en comparación con el conjunto total de Cundinamarca en tres áreas clave: biomasa residual de café, biomasa residual de caña de panela, y biomasa residual de plátano. Estos análisis permitirán identificar patrones y tendencias en la producción de residuos.

**Tabla 12 Representación del municipio de San Francisco en relación con todo el departamento de Cundinamarca**

	Cantidad de residuo departamento Cundinamarca [t/año]	Cantidad de residuo municipio San Francisco	Porcentaje de Representación del municipio
biomasa residual de café	151.923	7.161	4.71%
biomasa residual de caña de panela	1.591.993	502	0.03%

	Cantidad de residuo departamento Cundinamarca [t/año]	Cantidad de residuo municipio San Francisco	Porcentaje de Representación del municipio
biomasa residual de plátano	458.377	18.450	4.03%

Fuente: Elaboración propia con datos de Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia

A continuación, se detalla el potencial energético (tj/año) para el municipio de San Francisco, Cundinamarca.

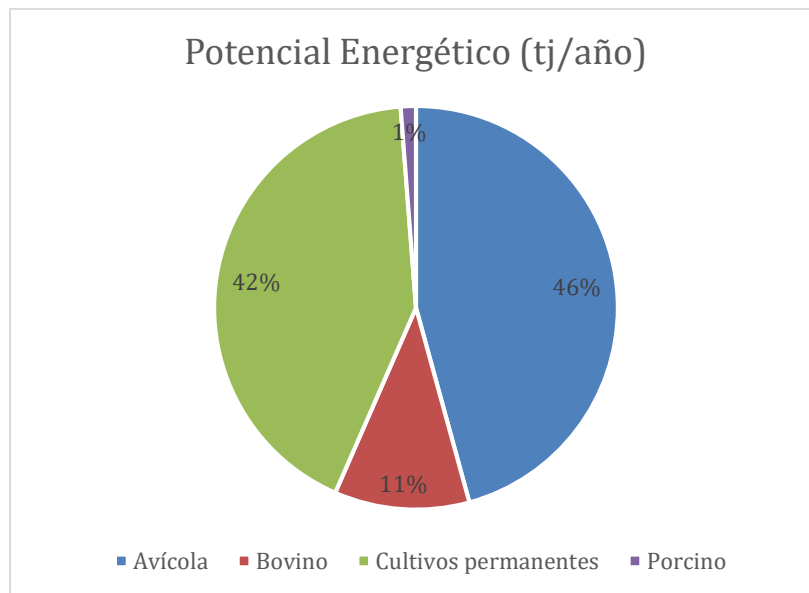
**Tabla 13 Potencial Energético (tj/año) CBNa2010:25**

NOM_DEP	CUNDINAMARCA
NOM_MUN	SAN FRANCISCO
Avícola	91.46
Bovino	21.64
Cultivos permanentes	84.44
Porcino	2.44
BIO_POT	199.98
SHAPE.LEN	66,290.29

Fuente: Elaboración propia con datos de UPME

Con los anteriores datos, se diagrama a continuación para el municipio de san Francisco, Cundinamarca.

**Gráfico 1: Distribución del potencial energético (tj/año)**



Fuente: Elaboración propia con datos de UPME

La Gráfica No. 1 muestra el potencial energético expresado en toneladas por año (tj/año) de cuatro diferentes fuentes: Avícola, Bovino, Cultivos permanentes y Porcino.

**Bovino (46%):** Este segmento representa el mayor potencial energético, con un 46% del total. El ganado bovino puede ser una fuente significativa de energía, ya sea a través de la producción de carne o leche.

**Avícola (42%):** El segmento verde representa el 42% del potencial energético. Esto podría estar relacionado con la cría de aves de corral, como pollos y pavos, que también pueden generar energía.

**Cultivos permanentes (11%):** El segmento rojo corresponde al 11% del potencial energético. Los cultivos permanentes, como árboles frutales o plantas perennes, pueden contribuir a la producción de biomasa y, por lo tanto, a la energía.

**Porcino:** El porcino (cerdos) también puede contribuir al potencial energético.

## 5.Resultados

### 5.1. Informe del Primer Taller de Análisis de Energías Renovables en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca

El primer taller, llevado a cabo el 15 de octubre de 2023, constó de dos partes fundamentales. En la primera se realizó una presentación detallada del proyecto, mientras que la segunda se dedicó a una lluvia de ideas. Durante esta última fase, los participantes fueron organizados en grupos, completaron las tablas 14 a 19 que se presentan a continuación y, posteriormente, compartieron sus hallazgos en una presentación conjunta.

**Tabla 14 Grupo 1- Necesidades de energía**

Necesidades de Energía	Tipo de Energía	Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)	Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo
Internet	Eléctrica	10	Intermitencia en la red
Cocción de Alimentos	Cilindro de gas	10	Falto de suministro y aumento de precio
Electricidad	Electro-hidráulica	10	Cortes frecuentes, hasta 20 veces al día
Sustento para Cultivos	Invernadero	10	Fallas en iluminación – cortes frecuentes
Gas Natural	Sólo zonas urbanas	10	Se agotan las fuentes – petróleo
Combustibles	Gasolina-Diesel- Planta eléctrica	10	Energía No renovable- fósil
Transporte (Público/Privado)	Gasolina-Diesel-Eléctrico	10	Se agotan fuentes fósiles
Iluminación Pública	Eléctrica	10	Fallas con cortes frecuentes
Energía para la Industria Local	Gasolina y eléctrica	10	Fallas en el suministro y agotamiento de las fuentes
Otros (Especificar)			

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del taller realizado en el municipio.

**Tabla 15 Grupo 2- Necesidades de energía**

Necesidades de Energía	Tipo de Energía	Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)	Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo
Internet	Eléctrica	8	Fallas en la electricidad
Cocción de Alimentos	Gas	8	Escases
Electricidad	Enel	10	Daños, tarifas, cortes
Sustento para Cultivos	Agua, lluvia	10	Sequías, daños acueducto
Gas Natural	Sólo zonas urbanas		
Combustibles	Gasolina	10	Escasez, tarifas
Transporte (Público/Privado)	Privado/ Público	10	Tarifas
Iluminación Pública	No tiene	10	Robos y fallas
Energía para la Industria Local	Eléctrica	10	Tarifas, fallas
Otros (Especificar)			

Fuente: Elaboración propia con datos del taller en el municipio

**Tabla 16 Grupo 3 Necesidades de energía**

Necesidades de Energía	Tipo de Energía	Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)	Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo
Internet	Electricidad	10	Cortes sin previo aviso, contaminación
Cocción de Alimentos	Gas	8	
Electricidad	Hidroeléctrica	10	
Sustento para Cultivos	Electricidad	8	
Gas Natural	Sólo zonas urbanas		
Combustibles	Gasolina	10	Incendios masivos
Transporte (Público/Privado)	Gasolina	10	Costos
Iluminación Pública	Eléctrica	10	Inseguridad social

<b>Necesidades de Energía</b>	<b>Tipo de Energía</b>	<b>Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)</b>	<b>Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo</b>
Energía para la Industria Local			
Otros (Especificar)	Solar	10	Oposición a la transición

Fuente: Elaboración propia con datos del taller en el municipio

**Tabla 17 Grupo 4 Necesidades de energía**

<b>Necesidades de Energía</b>	<b>Tipo de Energía</b>	<b>Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)</b>	<b>Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo</b>
Internet	Eléctrica	10	Falta de energía
Cocción de Alimentos	Gas	8	Falla de suministro, aumento de costos
Electricidad	Eléctrica	10	Fallas en el servicio
Sustento para Cultivos	Electricidad	5	Fallas en el servicio
Gas Natural	Sólo zonas urbanas	-	-
Combustibles	Eléctrica	10	Fallas en el servicio
Transporte (Público/Privado)	Gasolina	10	Fallos en el suministro y daño de vías
Iluminación Pública	Eléctrica	5	Costos
Energía para la Industria Local	Gas	10	No suministros de gas propano
Otros (Especificar)	Hidro- energía	10	No suministro/ contaminación

Fuente: Elaboración propia con datos del taller en el municipio



**Tabla 18 Grupo 5 Necesidades de energía**

<b>Necesidades de Energía</b>	<b>Tipo de Energía</b>	<b>Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)</b>	<b>Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo</b>
Internet	Eléctrica	10	Cortes de luz, mala señal, falta redes
Cocción de Alimentos	Gas/ eléctrica	8	Capacidad, costos
Electricidad	Eléctrica	10	Operadores Enel, Codensa, Instalación
Sustento para Cultivos	Agua	5	Tubería, contaminación, manejo de agua
Gas Natural	Cilindro de gas	8	Instalación, capacidad, estructura
Combustibles	Acpm- gasolina	10	Capacidad, costos, sitios de distribución
Transporte (Público/Privado)	Gasolina	10	
Iluminación Pública	Eléctrica/fotovoltaica	8	Vandalismo, capacidad, instalación , operador
Energía para la Industria Local	Electricidad/ gasolina	8	EOT (esquema de orden territorial, capacidad, operador)
Otros (Especificar)	Fotovoltaica	4	Costos, paneles, construcción, capacitación

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 19 Grupo 6 Necesidades de energía**

<b>Necesidades de Energía</b>	<b>Tipo de Energía</b>	<b>Importancia en la Vida Cotidiana (Escala de 1 a 10)</b>	<b>Amenazas o Riesgos en el Corto o Mediano Plazo</b>
Internet	Eléctrica	10	Demanda alta de la red
Cocción de Alimentos	Cilindro de gas	10	Solo empresa de gas en tanque
Electricidad	Enel	10	monopolio
Sustento para Cultivos	Agua	10	
Gas Natural	Sólo zonas urbanas		
Combustibles	No tienen		
Transporte (Público/Privado)	Gasolina	8	Monopolio- gasolina
Iluminación Pública	Empresa privada	3	Monopolio
Energía para la Industria Local	Empresa privada	2	Monopolio- altos costos
Otros (Especificar)			Monopolio

Fuente: Elaboración propia

### **5.1.1. Percepciones de los habitantes entrevistados y consultados de San Francisco, Cundinamarca**

#### **Desafíos en la Red Eléctrica:**

En las conversaciones con los residentes, se destacó la inquietud causada por la intermitencia de la red eléctrica local, lo que ha llevado a un consumo injustificado debido a fallos en la Red de distribución de Enel. Además, se mencionaron episodios de cortes de electricidad significativos y un aumento injustificado en las facturas de electricidad.

Observación: Estos problemas subrayan la urgente necesidad de mejorar la confiabilidad y la calidad del suministro eléctrico en la región.

### **Paneles Solares como Alternativa:**

Los habitantes identificaron los paneles solares como una fuente de energía alternativa viable. Sin embargo, se resaltó que su capacidad de carga alcanza un máximo de 8 horas diarias en condiciones de pleno sol. Se mencionaron ventajas como la garantía de un suministro continuo de energía, costos a mediano plazo más asequibles en comparación con la red eléctrica convencional, menor impacto ambiental y una gestión sencilla del consumo.

Observación: A pesar de las limitaciones en la carga solar, los paneles solares ofrecen beneficios significativos, especialmente en términos de sostenibilidad y control de costos a largo plazo.

### **Biogás y Biomasa como Alternativas:**

El suministro de gas natural está limitado a las áreas urbanas, mientras que, en otras zonas, se atiende la demanda mediante el uso de cilindros de gas propano y electricidad.

Se debatió la viabilidad de la producción de biogás como fuente de energía para cocinar y calentar agua, aunque se planteó la posibilidad de convertirlo en compostaje de manera más eficiente.

Se resaltaron los beneficios, como la gestión eficaz de los desechos orgánicos, costos bajos de consumo de energía, una mejora en la calidad de vida y la versatilidad de la biomasa.

Observación: La elección entre biogás y compostaje podría depender de factores como la disponibilidad de recursos y los objetivos de sostenibilidad a largo plazo.

### **Mini-Hidroeléctricas:**

Se enfatizó la riqueza hídrica del municipio, evidenciada por sus fuentes de agua.

Las micro-hidroeléctricas, en particular, las ruedas Pelton, fueron identificadas como una solución versátil que podría servir para riego, generación de energía doméstica, suministro de agua para animales y necesidades de atención médica.

Observación: Las micro-hidroeléctricas, como las ruedas Pelton, pueden aprovechar de manera eficiente los recursos hídricos locales para atender diversas necesidades energéticas y comunitarias.

### **Desafíos en la Tarifación y el Monopolio:**

Se mencionó la existencia de un monopolio con Enel en el municipio. En el caso de la biomasa, se plantearon dificultades para la contratación de personal para la gestión de los residuos, lo que llevó a considerar los paneles solares como una opción más conveniente.

La complejidad de la tarifación y la presencia de un monopolio plantean desafíos que deben abordarse a nivel regulatorio y estructural para fomentar la adopción de soluciones energéticas alternativas. Es fundamental considerar reformas regulatorias y modelos de negocio que permitan una mayor diversificación de fuentes de energía y proveedores.

EMSERPSAFRA – Casco urbano del municipio de San Francisco:

El municipio cuenta con un área de 66 hectáreas designada como perímetro sanitario. Sin embargo, es imperativo destacar que la carencia de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para el procesamiento de las aguas residuales generadas en el municipio presenta una preocupación ambiental de gran relevancia. En lugar de someterse a un tratamiento adecuado, las aguas residuales son descargadas directamente en cuerpos de agua cercanos. Este enfoque plantea inquietudes ambientales significativas, especialmente considerando que el sistema de alcantarillado del municipio tiene cuatro puntos de vertimiento a lo largo del Río Toriba y el Río Cañas. Esta situación representa un foco de contaminación en estas fuentes hídricas. Por tanto, resulta imprescindible la implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que reduzca al mínimo la carga contaminante vertida en estos cuerpos de agua (P y P Consultoría, 2013).

En el ámbito del casco urbano del municipio de San Francisco, la Empresa de Servicios Públicos de San Francisco S.A.S. E.S.P. (EMSERPSAFRA) ha establecido un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) con fecha de aprobación el 1 de julio de 2014, mediante la Resolución CAR N° 1462, con una vigencia de 10 años. Es importante señalar que el PSMV se enfoca en la proyección de cargas generadas, excluyendo las cargas vertidas. Para establecer la línea de base y considerando el período de vigencia del PSMV hasta el año 2024, se utilizó la información proporcionada por la Dirección de Gestión Ambiental y Empresarial (DESCA). Adicionalmente, se incluyeron las cargas asociadas a la Planta de Beneficio Animal (PBA) de San Francisco, estimadas a partir de datos de tasas retributivas.

## 5.2. Resultados específicos de la Biomasa aplicando el Modelo Informático para la Estructuración de Proyectos de Conversión de Residuos en Energía (WTE)

En la Tabla 20, se relaciona las entradas requeridas por el modelo seleccionado para el municipio de San Francisco, Cundinamarca.

**Tabla 20 Biomasa residual en cultivos permanentes**

Biomasa	Área Sembrada (ha)	Producción (t producto/año)	Cantidad Residuo (t/año)	Potencial Energético (TJ/año)	Nom_Cientifico
Café	1018	1336	7.161,5	69,622143	Coffea Arábica
Caña de Panela	20	80	502,4	4,280456	Saccharum Ofinarum
Plátano	600	3000	18.450	10,535535	Mussa Acuminata

Fuente: Elaboración propia con datos de UPME

La Asociación Porkcolombia es el gremio que representa, desde 1983, a los productores de carne de cerdo del país. Su misión consiste en impulsar y acompañar el proceso de tecnificación en todos los eslabones de la cadena cárnica porcina, así como fomentar el consumo de la carne de cerdo en Colombia. El municipio de San Francisco en Cundinamarca tiene la capacidad de producir 8.536,9 kg/día de porcinaza.

**Tabla 21 Cantidad de porcinaza generada por la granja.**

GRUPO ETARIO	Porcinaza producida (kg/día)
Hembra reemplazo	175,28
Hembra gestante	738

GRUPO ETARIO	Porcinaza producida (kg/día)
Macho reproductor	50,58
Levante	7573
Total	8536,9

Fuente: Elaboración propia con información de la Asociación Porkcolombia

**Tabla 22 Número de animales y peso**

Grupo Etario	No. Animales	Peso Animal kg
Hembra reemplazo	19	200
Hembra gestante	123	200
Marcho Reproductor	10	180
Levante	1.729	70
Total Animales	1.881	

Fuente: Tomado de: Guía Ambiental para el subsector porcícola, 2020.

- Un cerdo de 100 kg excreta aproximadamente 6,17 kg de heces y orina por día (Pérez, 1997)

**Tabla 23 Censo nacional bovino 2020**

Terneras y terneros menos 1 año	Hembras y machos 1 a 2 años	Hembras y machos 2 a 3 años	Hembras y machos mayor de 3 años	Total bovinos 2020
1443	2354	2159	2113	8069

Fuente: Elaborado con datos de ICA, Censo Nacional Bovino 2020

- Una vaca adulta produce 12 boñigas de casi 4 kilos cada una al día, lo que representa aproximadamente 50 kilos de estiércol diarios, 500 kilos en 10 días,

1,500kilos en un mes, 4, 500 kilos en tres meses (La acumulación de estiércol en los pastizales ganaderos, 2023

**Tabla 24 Número de aves en el municipio**

	Abuelas	Engorde	Postura	Reproductoras	Total
Capacidad instalada (unidades de aves)	0	792000	52500	20000	864500

Fuente: Fenavi 2020

- Cada gallina produce 150 g estiércol/ día (García y Lon, 2007)

A continuación, se detallan las entradas para calcular la cantidad de residuos para cerdos, vacas y aves.

**Tabla 25 Cantidad de residuos para cerdos, bovinos y aves**

Animal	Cantidad de residuos	Mes (kilos)	Año (toneladas)	Multiplicación número de bovinos * toneladas al año
Bovinos	50 kilos de estiércol diarios	1,500 kilos	18000 kilos=18 toneladas	8069*18=145.242
Cerdos	6,17 kg diarios	185 kilos	2221 kilos= 2.221 toneladas	1881*2,2=4.138
Aves	0,15 kg diarios	4,5 kilos	54 kilos= 0.054 toneladas	864500* 0.054=46.683

Fuente: Elaboración propia

El Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos es la fuente principal de información estadística relacionada con la gestión de residuos sólidos en el país. Este

informe se basa en los datos generados por el Sistema Único de Información (SUI), así como en registros de inspecciones en el terreno y respuestas a solicitudes oficiales emitidas por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios).

En el Anexo 1 “Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021” de este documento, se presenta una descripción detallada de las fuentes de datos utilizadas, así como la cantidad total de residuos sólidos dispuestos anualmente por municipio.

**Tabla 26 Residuos sólidos (toneladas/ año)**

Cod. Dane	Departamento	Municipio atendido	Fuente de información	Toneladas/ año
25653	Cundinamarca	San Francisco	Reporte SUI	<b>2035,88</b>

Fuente: Elaboración propia con datos del DANE

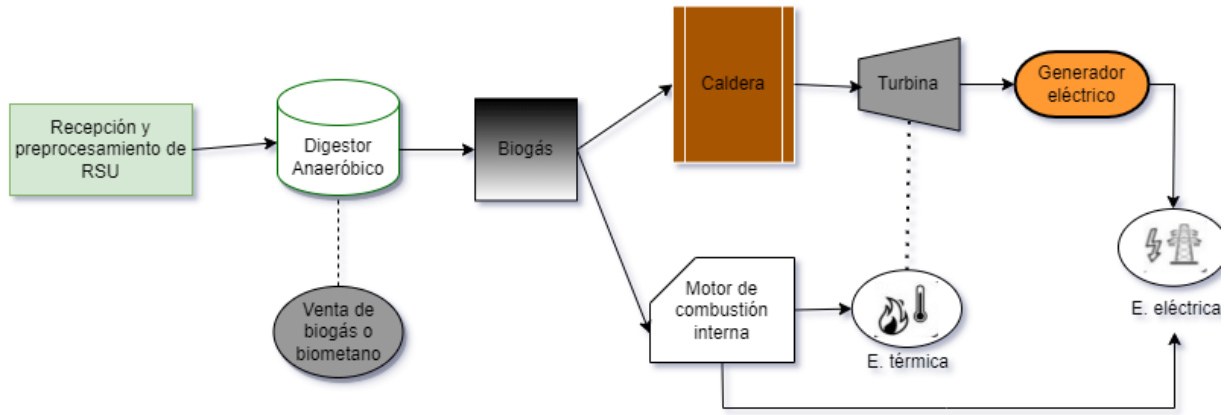
Las tecnologías para la gestión y tratamiento de residuos han adquirido una importancia crucial en la búsqueda de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad y la reducción de residuos, enfoques como la degradación anaeróbica, la incineración y la pirólisis desempeñan un papel fundamental al transformar los desechos en recursos y energía. Estas tecnologías abren nuevas perspectivas para un futuro más limpio y eficiente, marcando una evolución significativa en la manera en que enfrentamos el desafío de los residuos y promoviendo prácticas más responsables con nuestro entorno.

La degradación anaeróbica representa un proceso biológico destinado a descomponer la materia orgánica en ambientes carentes de oxígeno. Este procedimiento inicia con la recolección y pre-tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU), agrícolas y pecuarios, los cuales son posteriormente dirigidos a un digestor anaeróbico. Dentro de este entorno, los microorganismos llevan a cabo la descomposición de la materia en condiciones de ausencia de oxígeno, generando como resultado biogás. Este biogás puede emplearse directamente para la generación de calor o, tras un proceso de limpieza, como combustible en motores o turbinas que producen electricidad. Los elementos de entrada en este proceso comprenden los residuos sólidos urbanos, agrícolas y pecuarios, junto con los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica. Por otro lado, las salidas del proceso incluyen el biogás, con su potencial uso como combustible, y los



residuos sólidos, los cuales pueden aprovecharse como valioso fertilizante (Mata-Alvarez et al., 2000).

### Ilustración 5 Degradación anaeróbica



Fuente: Elaboración propia con información de la UPME

**Selección del Enfoque Anaeróbico:** La elección del proceso anaeróbico para la degradación de residuos se fundamenta en sus notables beneficios ambientales, especialmente en la generación de biogás. Este enfoque está alineado con el propósito central de maximizar la eficiencia en la conversión de biomasa en energía sostenible.

**Optimización del Proceso Anaeróbico:** El modelo implementa una optimización detallada de las condiciones del proceso anaeróbico, asegurando la máxima producción de biogás. La gestión precisa de variables críticas, como la temperatura, el tiempo de retención y la composición de la biomasa, contribuye de manera significativa a la eficiencia general del sistema.

**Parámetros de Aplicación del Modelo:** En la implementación del modelo, se considera que el 20% de los residuos constituye la entrada, con la totalidad de la financiación inicial respaldada por fondos públicos. La tecnología de degradación anaeróbica se emplea como parte integral de este enfoque.

**Detalles Infraestructurales:** Los resultados proporcionan una descripción minuciosa de la infraestructura requerida, desde las bahías de descarga hasta los equipos de homogenización y digestión anaeróbica. Este análisis aborda aspectos clave para la implementación exitosa del proceso.

Este enfoque integral busca equilibrar la consideración de beneficios ambientales con los aspectos financieros del proyecto, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y futuras mejoras en la viabilidad del proceso anaeróbico.

**Tabla 27 Datos de entrada al modelo WTE**

Población urbana DANE 2018	Cantidad Biomasa, ton/año							
	Pecuario			Agrícola			Urbano	
	Avícola	Porcícola	Bovino	Café Pulpa	Plátano	Caña Panelera	RSU	Lodos PTAR
	Estiércol	Estiércol	Estiércol	Pulpa	Fruta Rechazo	Bagazo	RSOU	Lodos
3.385	9.337	828	29.048	1.432	3.690	100	407	0

Fuente: Elaboración propia con datos DANE

A continuación, se explican algunos de los términos utilizados:

Biogás (m<sup>3</sup>/d): Esta columna representa la cantidad de biogás producido por día para cada tipo de biomasa y tecnología específica.

Térmico - PCI (MJ/Kg seco): Este valor indica el contenido de energía térmica por kilogramo de biomasa seca en términos de Poder Calorífico Inferior (PCI). Es una medida de la cantidad de energía térmica que se puede obtener de la biomasa.

**Tabla 28 Resultados obtenidos con la aplicación del modelo WTE**

Cálculo de la cantidad de energía producida por el proyecto									
N	Sector	Biomasa	Tecnología más empleada		Biogás		Térmico - PCI		
			Térmica	Biológica	m <sup>3</sup> biogás / Ton biomasa	m <sup>3</sup> /año	Kcal/Kg seco	MJ/Kg seco	TJ/año
Pecuario									
1	Avícola	Estiércol		X	60	560.196	2.946,5	12,3	-
2	Porcícola	Estiércol		X	40	33.104	5.106,0	21,4	-

<b>Cálculo de la cantidad de energía producida por el proyecto</b>									
3	Bovino	Estiércol		X	40	1.161.937	3.421,3	14,3	-
4	Arroz	Paja *	X	X	73	0,00	3.358,0	14,1	-
5	Banano	Fruta Rechazo		X	4,6	0,00	2.109,7	8,8	-
6	Café Pulpa	Pulpa		X	25	35.804,96	4.357,7	18,2	-
7	Café Mucigalo	Mucilago		X	74	0,00	-	-	-
8	Maíz	Caña **	X	X	55	0,00	3.727,0	15,6	-
9	Palma de Aceite	RFF	X	X	20	0,0	4.094,3	17,1	-
10	Plátano	Fruta Rechazo		X	1,5	5.564	1.920,0	8,0	-
11	Caña de Azúcar	Bagazo **	X		0,17	0,00	4.070,0	17,0	-
12	Caña Panelera	Bagazo	X		0,16	0,00	4.049,0	17,0	1,6
<b>Urbano</b>									
13	RSU	RSOU		X	66	26.862	3.772,0	15,8	-
14	Lodos PTAR ***	Lodo húmedo crudo al 99% de humedad		X	55	0,0	0,00	0,00	-
	<b>Total:</b>					<b>1.823.468</b>			<b>1,6</b>
Fuente: Estimación potencial de conversión a Biogás de la Biomasa en Colombia y su aprovechamiento. UNAL. 2018.									

Fuente: Modelo WTE de la UPME

A continuación, se detalla la infraestructura requerida para la degradación anaeróbica.

**Tabla 29 Infraestructura para la degradación anaeróbica**

**WTE Degradación anaeróbica**  
**WTE Biogás**  
**148**

1	BAHÍA DESCARGUE DE RSOU
2	BAHÍA DESCARGUE DE LAS OTRAS BIOMASAS SOLIDAS
3	FOSO DE RSOU
4	FOSO DE OTRAS BIOMASAS SOLIDAS
5	TRITURACIÓN OTRAS BIOMASAS + CARGUE AL HOMOGENIZADOR
6	ROMPEDORAS DE BOLSAS DE RSOU
7	SEPARACIÓN MAGNÉTICA RSOU
8	CLASIFICACION MANUAL EN BANDA HORIZONTAL RSOU
9	TRITURACIÓN DE ORGÁNICOS RSOU
10	HOMOGENIZACIÓN BIOMASAS (RSOU + OTRAS BIOMASAS)
11	DIGESTION ANAERÓBICA (RSOU + OTRAS BIOMASAS)

Fuente: Modelo WTE de la UPME

En la **Tabla 30** se detalla:

- ✓ Cantidad de Biomasa: Se indica que la cantidad de biomasa utilizada es de 148 toneladas por día en peso húmedo, y su equivalente en volumen es de 422 m<sup>3</sup> por día.
- ✓ Tasa de Generación: La tasa de generación de biogás es de 40 m<sup>3</sup> por tonelada de biomasa seca, dentro del rango típico de 60 a 150 m<sup>3</sup> biogás por tonelada de residuo seco.
- ✓ Generación de Biogás: Se generan 5.844 m<sup>3</sup> de biogás por día, con un contenido de metano del 65%.
- ✓ Poder Calorífico Inferior Biogás: El poder calorífico inferior del biogás es de 5,0 kW/m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.
- ✓ Rendimiento Térmico: El rendimiento térmico es del 35%.

- ✓ Potencial Disponible: El potencial disponible es de 277 kWh, con un factor de disponibilidad del 85%.
- ✓ Electricidad Generada: La electricidad generada es de 5.651 kWh por día.
- ✓ Rendimiento de la Biomasa Seca: El rendimiento en generación eléctrica es de 0,04 MW/ton, dentro del rango típico de 0,05 a 0,30 MW/ton.
- ✓ Potencia del Equipo: La capacidad del equipo de generación eléctrica es de 286 kW o 0,30 MW.

**Tabla 30 Producción de energía proveniente de biomasa**

N	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
			148	
<b>12</b>	<b>PRODUCCION DE ENERGÍA</b>			
12,1	Cantidad Biomasa:	ton/d	148	Peso húmedo
		m <sup>3</sup> /d	422	
12,2	Tasa de generación:	m <sup>3</sup> /ton rs	40	Rango típico 60 a 150 m <sup>3</sup> biogas / ton rs
12,3	Generación biogás:	m <sup>3</sup> /d	5.844	% CH <sub>4</sub> , 65 %
		m <sup>3</sup> /hr	244	24 horas
		m <sup>3</sup> /min	4	25 horas
12,4	Poder calorífico inferior biogás:	kW/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	5,0	
12,5	% CH <sub>4</sub> biogás	%	65%	Contenido de metano en el Biogás
12,6	Rendimiento térmico:	%	35%	
12,7	Potencial disponible:	kWh	277	
12,8	Factor de disponibilidad:		85%	
12,9	Electricidad generada:	KWh/día	5.651	
12,10	Rendimiento de la biomasa seca:	MW/ton	0,04	Rendimiento en generación eléctrica (Rango

				típico es de 0,05 a 0,30 MW/ton)
12,11	Potencia del equipo:	kW	286	Capacidad Equipo de generación eléctrica
		MW	0,30	

Fuente: Modelo WTE de la UPME

En la Tabla 31 se encuentra la siguiente información:

- ✓ Fracción de Digestato: El 97% de la biomasa se convierte en digestato.
- ✓ Producción de Digestato: Se producen 187 m<sup>3</sup> o 187 toneladas de digestato por día.
- ✓ Contenido de Humedad Inicial: La biomasa tiene un contenido de humedad inicial del 95%.
- ✓ Sólidos Secos: Se obtienen 9 toneladas de sólidos secos por día.
- ✓ Tiempo de Retención: El tiempo de retención en el proceso es de 3 días.
- ✓ Volumen del Reactor de Digestato: El reactor de digestato tiene un volumen de 560 m<sup>3</sup>.
- ✓ Contenido de Humedad Final: Se reduce el contenido de humedad al 35% para el tratamiento final.
- ✓ Agua Residual Producida: Se producen 112 m<sup>3</sup> de agua residual orgánica por día para recircular al homogenizador.
- ✓ Densidad de Digestato Deshidratado: La densidad del digestato deshidratado es de 0,6 ton/m<sup>3</sup>.
- ✓ Cantidad de Digestato Deshidratado: Se obtienen 75 toneladas de digestato deshidratado por día, con un volumen de 124 m<sup>3</sup>.

**Tabla 31 Manejo del Digestato**

N	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
			148	
<b>13</b>	<b>MANEJO DEL DIGESTATO</b>			
13,1	Fracción de digestato:	%	97%	
13,2	Producción de digestato:	m <sup>3</sup> /d	187	
		ton/d	187	
13,3	Contenido de Humedad inicial:	%	95%	
		ton/d	177	
13,4	Sólidos secos:	ton/d	9	
13,5	Tiempo de retención:	días	3	
13,6	Volumen del reactor de digestato:	m <sup>3</sup>	560	
13,7	Contenido de humedad final para tratamiento final:	%	35%	
13,8	Cantidad de agua producida residual:	m <sup>3</sup> /d	112	Agua residual orgánica a recircular al homogenizador
13,9	Densidad de digestato deshidratado:	ton/m <sup>3</sup>	0,6	
13,10	Cantidad de digestato deshidratado:	ton/d	75	Con humedad del 35%
		m <sup>3</sup> /d	124	
N	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
			148	
<b>14</b>	<b>VARIOS</b>			
14,1	Número de personas	Personas	16	
14,2	Pretratamiento de residuos	Personas	1	
14,3	Valoración energética	Personas	13	
14,4	Recolección biomasas	Personas	2	Otras biomasas (sin RSOU)

Fuente: Modelo WTE de la UPME

Tabla 32 Costos de inversión y operación

Parámetro	Tecnología	Unidad	Capacidad	Curva de área		Valor	
				a	m	Valor	Unidad
Predio	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	0,670	0,0013	0,9	Has
Parámetro	Tecnología	Capacidad	Valor	Curva de área		Valor	
				a	m	Valor	Unidad
<b>COSTOS DE INVERSIÓN</b>							
Predio	WTE degradación anaeróbica	Has	0,86			86.240,0	Mil \$
Estudios y diseños	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	664.135	117	681.449,5	Mil \$
Preliminares	WTE degradación anaeróbica	Has	0,86	18.574	16.049	\$ 32.415	Mil \$
Obras generales	WTE degradación anaeróbica	Has	0,86	701.087	355.478	\$ 1.007.651	Mil \$
Edificaciones	WTE degradación anaeróbica	Has	0,86	2.630.000	308.772	\$ 2.893.085	Mil \$
Equipos pretratamiento RSU	WTE degradación anaeróbica	ton/d	0	26.400	0,6157	\$31.092	Mil \$
Equipos pretratamiento otras biomásas	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	7.569	0,9429	\$ 835.128	Mil \$
Valoración energética	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	55.705	0,8808	\$4.544.234	Mil \$
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>							
Aspectos generales	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	-548.847	1.382	-\$ 344.252	Mil \$/año



Personal	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	4.487.400	2.727,5	\$ 4.891.070	Mil \$/año
Valoración energética	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148	9.444	0,7391	\$ 379.487	Mil \$/año
Gestión ambiental	WTE degradación anaeróbica	ton/d	148			\$ 25.000,0	Mil \$/año
Inversión inicial (total)						<b>\$10.111.294</b>	
Costos de Operación y mantenimiento (anual)						<b>\$4.951.305</b>	

Fuente: Modelo WTE de la UPME

### Parámetros

Concepto	Unidad	Valor
Tasa de descuento	%	12,0%
Porcentaje de inversión inicial con fuente publica	%	0%
Años de vida útil	#	15
% Costos de gerenciamiento sobre Costos de Op.		3%
Beneficio tributario (Impuesto de Renta)		SI
Impuesto de Renta	%	0%

Porcentaje de inversión inicial con fuente publica	%	100%
--	---	------

Tamaño de la Planta, ton/d:	148	1	1
-----------------------------	-----	---	---

Concepto	WTE Degradación anaeróbica	WTE Incineración	WTE Pirólisis
<b>Resumen Cifras (Millones \$)</b>			
Inversión inicial (total)	10.111	-	-
Inversión reposición (total)	2.090	133.255	3.699
Costos de Operación y mantenimiento (anual)	4.951	87.986	5.469
Costos Administrativos (anual)	253	2.640	164
Ingresos (anual)	935	87.986	1
<b>Indicadores</b>			
Inversión Inicial Millones \$ / Potencia MW	33.704	-	-

O&M Año Mill \$ / Capacidad MW		17.349	90.626	5.633
O&M Año \$ / Venta Energía eléctrica KWH año		2.804	3.713.982	100.194
<b>Resultados Financieros</b>				
TIR		NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
VPN (Mill \$)		-42.691	-720.687	-43.282
R/BC		0,1	0,00	0,00
Payback			20	20

## Conclusiones parciales para la biomasa

- ✓ La elección del proceso anaeróbico es acertada, especialmente por su capacidad para generar biogás y su alineación con la sustentabilidad ambiental.
- ✓ La optimización detallada del proceso, considerando variables críticas como temperatura y tiempo de retención, contribuye positivamente a la eficiencia del sistema.
- ✓ La cantidad de biomasa utilizada (148 ton/día) y la diversidad de fuentes, como residuos urbanos, agrícolas y pecuarios, son esenciales para la sostenibilidad del proceso.
- ✓ La producción de biogás (5.844 m<sup>3</sup>/día) es significativa, mostrando un potencial energético considerable.
- ✓ La generación de electricidad (5.651 kWh/día) es un resultado positivo, aunque se deben considerar aspectos económicos.
- ✓ La producción de digestato y su gestión adecuada son cruciales para la sostenibilidad del proceso. La recirculación al homogenizador es una buena práctica.
- ✓ El proyecto busca equilibrar beneficios ambientales con aspectos financieros, lo cual es fundamental.
- ✓ La capacidad de financiamiento y la participación de fondos públicos pueden tener un impacto significativo en la viabilidad financiera del proyecto.
- ✓ Resultados Financieros: en términos financieros, la TIR y el VPN revelan valores negativos, indicando que, desde una perspectiva financiera, el proceso anaeróbico podría no ser inicialmente rentable. El Payback proyecta que la recuperación de la inversión inicial se lograría en aproximadamente 20 años.

### 5.3. Aplicación de la evaluación multicriterio en el Municipio de San Francisco, Cundinamarca

En el marco de la aplicación de la evaluación multicriterio, el pasado 11 de noviembre de 2023 se desarrolló un taller dirigido al análisis de las diversas fuentes de energía renovable para evaluar su viabilidad en el contexto del municipio de San Francisco, Cundinamarca. Se examinaron ventajas y desventajas asociadas con paneles solares, biomasa, electrohidráulica, biogás y otras formas de generación energética. Se establecieron las alternativas, criterios, indicadores y ponderaciones para la Evaluación Multicriterio, posteriormente, los asistentes diligenciaron la matriz construida.

La metodología utilizada fue la siguiente:

- ✓ Los grupos discutieron las ventajas y desventajas de paneles solares, biomasa y micro hidroeléctricas.
- ✓ Los grupos identificaron las barreras y desafíos específicos que enfrenta la comunidad en la adopción de energía renovable. Esto puede incluir aspectos financieros, regulatorios o técnicos.

**Tabla 33 Ventajas y desventajas de las tecnologías**

	Ventajas	Desventajas
Paneles solares	Producen energía limpia	Viabilidad económica Residuos futuros peligrosos
Produce energía por biodigestión, compostaje	Biomasa	Acopio de material, distribución del gas. Se consideró la importancia de tener una PTAR en el municipio para obtener lodos.
Solución basada en un recurso natural renovable. Suministro continuo del recurso y servicio	Electro Hidráulica	Falta de educación, participación comunitaria. Comunidad anestesiada por la parte política. Falta de visión en las oportunidades.

Fuente: Elaboración propia con datos del taller

- ✓ **Evaluación de la matriz multicriterio:**  
Se establecieron las alternativas, los criterios y ponderaciones para realizar la Evaluación Multicriterio. Posteriormente, los asistentes diligenciaron la Matriz Multicriterio

### **Consideraciones Sociales:**

Los grupos vulnerados son diversos, ya que el deficiente suministro de energía afecta a toda la ruralidad, independientemente del estrato. Las barreras y desafíos identificados se centran en la necesidad de unir a la comunidad.

### **Acciones y Propuestas:**

Es crucial formar, capacitar y educar a la comunidad para aprovechar oportunidades y gestionar recursos económicos a nivel interinstitucional.

Se propone la inclusión de proyectos de energías alternativas en el Plan de Desarrollo y de Inversión municipal para el período 2024-2027, con el objetivo de lograr la autosuficiencia y mejorar la calidad de vida de los habitantes. Estos proyectos incluyen la generación de energía eléctrica diversificada, aprovechamiento de biomasa, tratamiento de residuos sólidos, plantas de tratamiento de agua y programas de reforestación.

#### **5.3.1. Percepciones de los habitantes entrevistados y consultados de San Francisco, Cundinamarca**

El análisis destaca la importancia de diversificar las fuentes de energía en San Francisco, Cundinamarca, para garantizar un suministro sostenible y mejorar la calidad de vida de la comunidad.

Se evidencia una creciente aceptación de la hidroenergía, específicamente a través de las Ruedas Pelton, entre los habitantes del municipio.

Seguido esto, por un interés en presentar al nuevo alcalde que se posesionará en enero de 2024 un proyecto de instalación de paneles solares para el municipio.

Se elaboró un oficio que se entregó a Planeación y a la Alcaldía del municipio el día 22 de noviembre de 2023 con asunto: Contribución ciudadana y propuestas para el Plan de Desarrollo 2024 a 2027: Incluir Proyectos para generación de Energía y otros (Anexo 3).

## **5.4. Evaluación Multicriterio para la Selección de Energía Renovable en el Municipio: Un Enfoque del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

Los análisis de decisión de criterios múltiples (MCDA) constituyen una valiosa familia de métodos para evaluar, ponderar y clasificar soluciones alternativas, considerando múltiples criterios y objetivos predefinidos. Este enfoque se destaca por su idoneidad en la resolución de problemas de decisión complejos que involucran objetivos múltiples y, en ocasiones, contradictorios.

### **Características Principales de los Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA):**

- 1- Adecuación para Problemas Complejos: Los MCDA son especialmente apropiados para abordar problemas de decisión complejos que incluyen múltiples objetivos y criterios que, en algunos casos, pueden entrar en conflicto.
- 2- Incorporación de Participación de Partes Interesadas: Ofrecen un proceso sistemático y estructurado que facilita la participación de las partes interesadas a lo largo del ciclo de decisión.
- 3- Ilustración del Desempeño de Alternativas: Permiten ilustrar el rendimiento de las alternativas en función de criterios compensables, lo que facilita la formulación de decisiones informadas.
- 4- Integración de Información Lógica y Estructurada: Combina información existente de manera lógica y estructurada para respaldar la toma de decisiones en situaciones complejas.

### **El Proceso Analítico Jerárquico (AHP):**

El AHP, basado en una función de preferencia de comparación por pares, se emplea para evaluar alternativas en relación con un conjunto de criterios. Este proceso convierte declaraciones verbales en puntajes de preferencia, proporcionando una herramienta sólida para la toma de decisiones.

### **Caso de Estudio: Energía Renovable en el Municipio San Francisco, Cundinamarca**

**Problema:** Determinar la energía renovable más viable para utilizar en el Municipio.

**Actores:** Habitantes expertos, funcionarios de la alcaldía, académicos.

En este caso, se evaluaron las opciones de biogás, solar, hidráulica y sus combinaciones para determinar la viabilidad de su uso en San Francisco, Cundinamarca. Para ello, 10 habitantes del municipio diligenciaron la matriz, la cual se compone de tres criterios principales: desarrollo social, respeto al ambiente y viabilidad económica, cada uno con un nivel de importancia ponderado. Los indicadores incluyen la aceptación social, el impacto en la calidad de vida, la huella de carbono, el uso del suelo, la seguridad contra incidentes, el valor de inversión inicial y el ahorro a los consumidores.

**Tabla 34 Criterios, indicadores y ponderaciones para el caso de estudio**

Opciones de Alternativas:	Criterios:	Indicadores y Ponderaciones:
Biogás Solar Hidráulica Combinaciones de Solar + Biogás, Solar + Hidráulica, Hidráulica + Biogás	Desarrollo social (0,30) Respeto al ambiente (0,40) Viabilidad económica (0,30)	Aceptación social/facilidad de uso (0,1) Impacto en la calidad de vida (0,2) Huella de carbono (0,14) Uso del suelo (0,1) Seguridad contra incidentes (0,16) Valor inversión inicial (0,12) Ahorro a los consumidores (0,18)

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 35 se presenta la escala del 0 al 10 para realizar la evaluación de los criterios.

**Tabla 35 Puntuaciones de rendimiento/ desempeño de criterios**

	0	10
Aceptación social/facilidad de uso	Extremadamente bajo- En este nivel, el producto podría enfrentar resistencia significativa en la sociedad, y la adopción o uso podría ser percibido como difícil.	Extremadamente alta- En este nivel, el producto experimenta una amplia aceptación social y es fácilmente adoptado o utilizado por la mayoría de las personas.

Impacto en la calidad de vida	El producto no contribuye positivamente a la calidad de vida de los usuarios o incluso puede tener efectos adversos.	En este nivel, el producto tiene un impacto positivo significativo en la calidad de vida de los usuarios, proporcionando mejoras notables en diversos aspectos.
Huella de carbono. Referido al calentamiento global causado por las actividades humanas con la liberación de GEI como el CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , clorofluorocarbonos y otros. Kg CO <sub>2</sub> eq. Por producto.	Una gran huella de carbono- La producción y uso del producto generan una cantidad significativa de emisiones de gases de efecto invernadero.	No deja huella de carbono- El producto tiene un impacto mínimo en el calentamiento global, liberando muy pocas o ninguna emisión de gases de efecto invernadero.
Uso del suelo	Muy alto uso m <sup>2</sup> - Requiere una gran cantidad de espacio para su implementación o uso.	Muy bajo m <sup>2</sup> - Tiene un uso mínimo de espacio, siendo eficiente en términos de ocupación de suelo.
Seguridad contra incidentes	Vulnerable a incidentes y/o consecuencias catastróficas si ocurren incidentes.	Resiliente a los incidentes y el impacto de un incidente es mínimo.
Valor inversión inicial	Muy costosa	Menos costosa/ financiable con recursos existentes
Ahorro a los consumidores	El ahorro NO es significativo para los consumidores	El ahorro es significativo para los consumidores

Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio, se implementó un análisis multicriterio utilizando una escala del 1 al 10, con la participación de 10 residentes de San Francisco, Cundinamarca. Los resultados, expresados en la Tabla 36, proporcionan una media ponderada derivada de criterios específicos.

Tabla 36 Resultados obtenido de la evaluación Multicriterio – Media Ponderada

	Alternativas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1)	Solar	19%	16%	19%	16%	17%	16%	19%	19%	17%	19%
2)	Biogás	15%	17%	15%	17%	16%	17%	15%	15%	18%	15%
3)	Hidráulica	17%	18%	17%	18%	18%	18%	16%	16%	18%	17%

	Alternativas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4)	Solar + Biogas (50-50%)	16%	16%	16%	16%	16%	15%	16%	17%	16%	16%
5)	Solar + Hidráulica (50-50%)	17%	16%	18%	17%	17%	17%	20%	17%	16%	17%
6)	Hidráulica +Biogas (50-50%)	15%	16%	15%	16%	16%	16%	15%	16%	16%	16%

Fuente: Elaboración propia

Nota. Se sustituye los nombres de los habitantes por letras de la A-J

Aquí está la media ponderada para cada alternativa:

- 1- Hidráulica: 17.5%
- 2- Solar: 17.4%
- 3- Solar + Hidráulica (50-50%): 17.1%
- 4- Biogás: 16.3%
- 5- Solar + Biogás (50-50%): 16.1%
- 6- Hidráulica + Biogás (50-50%): 15.8%

Cada alternativa fue sometida a una evaluación detallada en el Taller No. 2, considerando criterios relevantes para el problema abordado. Los resultados indican que la alternativa hidráulica se posiciona como la más viable, seguida de cerca por la alternativa solar. Asimismo, la opción solar + hidráulica (50-50%) se presenta como una alternativa viable, aunque ligeramente menos favorable que las dos primeras. Por otro lado, las alternativas biogás, solar + biogás (50-50%), e hidráulica + biogás (50-50%) exhiben menor viabilidad en comparación con las demás alternativas.

## 5.5. Análisis de resultados

### Talleres y entrevista

El análisis de las percepciones de los habitantes de San Francisco, Cundinamarca, resalta la imperante necesidad de mejorar la confiabilidad y la calidad del suministro eléctrico en la región. Además, se subraya la importancia de abordar las preocupaciones relacionadas con los costos de la electricidad, lo cual representa un desafío significativo para la comunidad.



Las fuentes de energía alternativa, como los paneles solares, el biogás, la biomasa y las micro hidroeléctricas, representan opciones atractivas para satisfacer las necesidades energéticas locales y promover la sostenibilidad.

El análisis destaca que la complejidad en la tarificación y la existencia de un monopolio en el mercado eléctrico plantean desafíos significativos. Estos desafíos necesitan ser abordados mediante reformas regulatorias y modelos de negocio que estimulen la diversificación de fuentes de energía y fomenten la competencia en el mercado local.

Se hace énfasis en la importancia de la creación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para contrarrestar la contaminación de los ríos y proporcionar biomasa para la generación de energías renovables, contribuyendo así a la preservación ambiental y al bienestar de la comunidad. Ver Anexo 4: Registro fotográfico de los talleres realizados.

### Comparación tecnologías

Con los datos recolectados en el *Capítulo 4 Caracterización de las fuentes renovables*, se elaboró una comparación detallada entre las tres tecnologías: paneles solares, micro centrales hidroeléctricas y plantas de biogás (ver tabla 37). Esta evaluación se basó en tres criterios fundamentales: desempeño tecnológico, costos de inversión por kWp instalado y vida útil.

**Tabla 37 Comparación Paneles solares, Micro centrales hidroeléctricas y Plantas de biogás**

Criterio	Paneles solares	Micro centrales hidroeléctricas	Plantas de biogás
Tecnología utilizada o desempeño tecnológico	Convierten la luz solar en electricidad mediante células fotovoltaicas. Tienen una eficiencia media del <b>18-22%</b> .	Convierten la energía del agua que fluye en electricidad mediante turbinas. Tienen una eficiencia media del <b>70-90%</b> .	Convierten la biomasa en biogás mediante procesos de digestión anaeróbica. Tienen una eficiencia media del <b>50-60%</b>

Criterio	Paneles solares	Micro centrales hidroeléctricas	Plantas de biogás
Costos de inversión	Dependen del tamaño, la calidad y el tipo de los paneles, así como de los costos de instalación y mantenimiento. El costo medio es de unos <b>1.000-1.500 euros</b> por kWp instalado.	Dependen del caudal, el desnivel y la potencia de las turbinas, así como de los costos de construcción y operación. El costo medio es de unos <b>2.000-3.000 euros</b> por kW instalado.	Dependen del tipo, la cantidad y la calidad de la biomasa, así como de los costos de construcción y operación. El costo medio es de unos <b>3.000-4.000 euros</b> por kW instalado.
Vida útil	Dependen de la calidad y el mantenimiento de los paneles, así como de las condiciones climáticas. La vida útil media es de unos <b>30-35 años</b> .	Dependen de la calidad y el mantenimiento de las turbinas, así como de las condiciones hidrológicas. La vida útil media es de unos <b>30-40 años</b> .	Dependen de la calidad y el mantenimiento de los digestores, así como de la disponibilidad de la biomasa. La vida útil media es de unos <b>15-20 años</b> .

Fuente: Elaboración propia

Las conclusiones obtenidas de esta comparación fueron:

- ✓ En términos de eficiencia tecnológica, las microcentrales hidroeléctricas superan a las otras dos tecnologías, con una eficiencia media del 70-90%. Por lo tanto, en este criterio, las microcentrales hidroeléctricas son la mejor opción.
- ✓ Si se consideran los costos de inversión, los paneles solares tienen un costo medio de 1.000-1.500 euros por kWp instalado, lo que generalmente los hace más asequibles en comparación con las microcentrales hidroeléctricas (2.000-3.000 euros por kW instalado) y las plantas de biogás (3.000-4.000 euros por kW instalado). Por lo tanto, en términos de costos de inversión, los paneles solares son la mejor opción.
- ✓ En cuanto a la vida útil, tanto los paneles solares como las microcentrales hidroeléctricas tienen una vida útil media similar de 30-40 años, mientras que las plantas de biogás tienen una vida útil media más corta de 15-20 años. En este aspecto, las microcentrales hidroeléctricas y los paneles solares son opciones más duraderas en comparación con las plantas de biogás.

## **Evaluación Multicriterio**

Se combinó información existente de manera lógica y estructurada para respaldar la toma de decisiones en situaciones complejas. En el caso de estudio de energía renovable en el municipio, el AHP se utilizó para evaluar las alternativas en relación con un conjunto de criterios. Los resultados indican que la alternativa más viable es la hidráulica, seguida de cerca por la solar. La alternativa solar + hidráulica (50-50%) también es una opción viable, aunque ligeramente menos que las dos anteriores. Las alternativas biogás, solar + biogás (50-50%), e hidráulica + biogás (50-50%) son las menos viables.

# 6. Conclusiones y recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

Este análisis aborda las complejidades del panorama energético del municipio, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informada y sostenible en la selección de fuentes de energía renovable. En este sentido se llegan a las siguientes conclusiones:

- ✓ En términos de viabilidad de las energías renovables para el municipio de San Francisco, Cundinamarca, es razonable afirmar que existe un potencial significativo que se evidencia con información cuantitativa y cualitativa en los capítulos 4 y 5 del presente Trabajo. Las condiciones biofísicas y sociales son favorables, abarcando opciones como la degradación anaeróbica de biomasa, la hidroenergía (micro centrales hidroeléctricas) y la captación de energía solar.
- ✓ La aplicación del modelo WTE de la UPME permitió tener una visión integral de la planificación, implementación y operación del proyecto de degradación anaeróbica de biomasa. El proyecto de degradación anaeróbica de biomasa muestra un potencial significativo desde el punto de vista ambiental y energético, pero se requiere la exploración de incentivos económicos, colaboraciones público-privadas y programas gubernamentales será crucial para superar los desafíos económicos identificados y garantizar el éxito a largo plazo de las iniciativas de energía renovable en San Francisco, Cundinamarca.
- ✓ Con la aplicación de la Evaluación Multicriterio, se puede concluir que para el municipio; las micro centrales hidroeléctricas podrían ser la opción óptima, seguida por la opción de los paneles solares. La alternativa solar + hidráulica (50-50%) también es una opción viable, aunque ligeramente menos que las dos anteriores.
- ✓ Se requiere diversificar fuentes de energía en el municipio, es decir, fomentar la diversificación de fuentes de energía, con énfasis en hidráulica y solar, para garantizar un suministro sustentable y resiliente. En este contexto, es imperativo dar

seguimiento al oficio presentado en la Alcaldía, persistiendo en las acciones relacionadas con dicho documento. El objetivo es incorporar proyectos de energías alternativas en el Plan de Desarrollo y de Inversión municipal para el período 2024-2027. Este enfoque tiene como finalidad alcanzar la autosuficiencia energética y mejorar la calidad de vida de los residentes.

- ✓ En las metodologías de los proyectos de energías renovables es imprescindible incluir la participación de la comunidad para garantizar que los proyectos sean sustentables en el largo plazo al ser compatibles con las necesidades y prioridades de la comunidad.
- ✓ El 22 de marzo de 2024, se recibió una respuesta de la Secretaría General y de Gobierno de la administración municipal "Dejando Huella por San Francisco 2024-2027". En dicha comunicación, se informa que las peticiones abordadas durante la reunión han sido adecuadamente socializadas y documentadas dentro de la mesa participativa encargada de la elaboración del Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027. Lo anterior, representa un hito significativo en el proceso de participación ciudadana y planificación del desarrollo municipal. En el Anexo No. 5 registran los oficios entregados a la Alcaldía del municipio, la lista de asistencia a la mesa ambiental, y la respuesta recibida dando trámite a las solicitudes de la ciudadanía respecto a diversificar las fuentes de energías.

## 6.2. Recomendaciones

- ✓ **Planta de biogás:** Se destaca la importancia de equilibrar los beneficios ambientales con los aspectos financieros en la evaluación de las alternativas. Para asegurar la sostenibilidad financiera a largo plazo, se sugiere explorar asociaciones público-privadas o programas gubernamentales que permitan la participación de fondos públicos. Además, se recomienda considerar la exploración de formas para mejorar la viabilidad financiera, como buscar fuentes adicionales de financiamiento o identificar áreas donde se puedan reducir costos. Por ejemplo, mediante gestiones efectivas se podría buscar disminuir costos en el predio, los estudios o diseños de la planta de Biogás.

- ✓ **Implementación de PTAR:** Priorizar la implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para mitigar la contaminación de cuerpos de agua.
  
- ✓ **Educación y Capacitación:** Las energías renovables son una tecnología relativamente nueva, por lo que es importante educar a la comunidad sobre los beneficios y las ventajas de las energías renovables. Esto ayudará a promover la aceptación de las energías renovables y facilitará la implementación de proyectos de energías renovables.
  
- ✓ **Compromiso Comunitario:** Se recomienda que el municipio de San Francisco, Cundinamarca, implemente un proceso de participación comunitaria en la planificación y ejecución de proyectos de energías renovables. Este proceso debe incluir consultas públicas, colaboración con organizaciones comunitarias y empoderamiento de la comunidad.
  
- ✓ **Monitoreo Ambiental Continuo: Establecer** sistemas de monitoreo ambiental continuo para evaluar el impacto de las soluciones implementadas y ajustar estrategias según sea necesario.

# Anexos

Anexo 1: Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021

Anexo 2: Ficha técnica de los paneles solares

Anexo 3: Oficio entregado a Planeación y a la Alcaldía del municipio, y soporte de radicado

Anexo 4: Registro fotográfico de los talleres realizados

Anexo 5: Oficios entregados a la Alcaldía del municipio, listado de asistencia y la respuesta recibida en 2024

# Bibliografía

Acuerdo Municipal No. 018, de Cundinamarca. (2021, diciembre 23). <http://www.sanfrancisco-cundinamarca.gov.co/normatividad/acuerdo-18-de-2021>

Agudelo, S., Chica, E., Obando, F., Sierra, N. S. N., Velásquez, L., & Enríquez, W. (1969). Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW. *Ingeniería y Competitividad*, 15(1), 183-193. <https://doi.org/10.25100/iyc.v15i1.2631>.

Bertinat, P. (2016). Transición energética justa. I Pensando la democratización energética. Friedrich-Ebert-Stiftung.

Bory Prevez, H., Martínez García, H., & Vázquez Seisdedos, L. (2018). Comparación entre Rectificador Monofásico con Conmutación Simétrica y Convertidor AC/AC para la Mejora del Factor de Potencia en Microcentrales Hidroeléctricas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(1). <https://doi.org/10.4995/riai.2018.9313>

Calderón-Caro, J., & Benavides, A. M. (2022). Deforestation and fragmentation in the most biodiverse areas in the Western Cordillera of Antioquia (Colombia) | Deforestación y fragmentación en las áreas más biodiversas de la Cordillera Occidental de Antioquia (Colombia). *Biota Colombiana*, 23(1). <https://doi.org/10.21068/2539200X.942>

de Sousa Santos, B. (2019). Introducción a las epistemologías del sur. In *Epistemologías del Sur*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvnp0k5d.4>

Di Pietro, S. (2017). Acuerdo de París. *Cooperativismo & Desarrollo*, 25(111). <https://doi.org/10.16925/co.v25i111.1874>

Duque Márquez, I. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. 1st ed.

Ejecutivo, R. (2021). *Perspectivas de la transición energética mundial camino hacia 1.5°C*. [www.irena.org](http://www.irena.org)

Estrategia Regional Ambiental Marco (ERAM) 2015-2020. (n.d.).

Ficha técnica de tecnología de incineración WTE. (n.d.).

Fossil Fuels; Our world in data Ritchie, Hannah; Roser M. Our world in data

Garlet, V., Vieira Cezar, F., Antonio Beuron, T., Veiga Ávila, L., & Rejane da Rosa Gama Madruga, L. (2022). Objetivos de desarrollo sustentável - ODS. *Journal on Innovation and Sustainability RISUS*, 13(2). <https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i2p14-26>

Giraldo, L. P., Blanco-Libreros, J. F., Chará, J., Fernández, H. R., & Aguirre, N. (2022). Effect of riparian deforestation on coarse particulate organic matter in streams with livestock influence in the Andean region of Colombia | Efecto de la deforestación ribereña sobre la



materia orgánica particulada gruesa en quebradas con influencia ganad. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 607–620. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.2022.49020>

Gudynas, E., & Acosta, A. (2011). El buen vivir más allá del desarrollo. *Quehacer*, 181.

Gudynas. (2013). El malestar Moderno con el Buen Vivir: Reacciones y resistencias frente a una alternativa al desarrollo.

Hydroeléctricas pequeñas centrales guía general. (n.d.). [www.bun-ca.org/areas-de-trabajo/energia-renovable/](http://www.bun-ca.org/areas-de-trabajo/energia-renovable/)

IPCC, 2022: Summary for Policy Makers IPCC (2022)

IRENA. (2018a). Renewable Energy Auctions: Cases from Sub-Saharan Africa. In Irena.

IRENA. (2018b). Transformación energética mundial: hoja de ruta hasta 2050. International Renewable Energy Agency.

Informe de 2015 sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio. (s. f.). UNDP. <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/informe-de-2015-sobre-los-objetivos-de-desarrollo-del-milenio>

Katsaprakakis, D. Al. (2024). Toward a Renewable and Sustainable Energy Pattern in Non-Interconnected Rural Monasteries: A Case Study for the Xenofontos Monastery, Mount Athos. *Sustainability*, 16(5), 2111. <https://doi.org/10.3390/su16052111>

Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74.

Mesa Cuadros, Gregorio (ed.). (2012). Elementos para una teoría de la Justicia Ambiental y el Estado Ambiental de Derecho. Bogotá: Unijus Universidad Nacional de Colombia, pág. 25 a 62.

Ministerio de Minas y Energía. (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia. Ministerio de Minas y Energía, Colombia Banco Interamericano de Desarrollo, BID.

Muñoz, J. R. (2015). RIECHMANN, J., «Un buen encaje en los ecosistemas. Segunda edición (revisada) de Biomímesis». Madrid: Los libros de la Catarata. 2014, 383 pp. *Azafea: Revista de Filosofía*, 16(0).

Perspectivas sobre sustentabilidad ambiental Rosario Rojas-Robles, July Nayibe Franco Quimbay, Kelly Gómez Muñoz, Libro / 2023-11-25.

Renewable Energy Agency, I. (2023). Renewable capacity statistics 2023.

Renewables 2023 Global Status Report Energy Supply Collection REN21 (2023)

Roa, T., Soler, Juan Pablo, & Aristizábal, J. (2018). Transición energética en Colombia: aproximaciones, debates y propuestas. *Ideas Verdes- Análisis Político*, 7.

Sierra Vargas, F. E., Sierra Alarcón, A. F., & Guerrero Fajardo, C. A. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico*, 75. <https://doi.org/10.23850/22565035.22>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. Ministerio Minas y Energía.

UPME. (2019). Plan Energético Nacional 2020-2050: Documento de consulta. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética.

Yang, Y., Javanroodi, K., & Nik, V. M. (2022). Climate Change and Renewable Energy Generation in Europe—Long-Term Impact Assessment on Solar and Wind Energy Using High-Resolution Future Climate Data and Considering Climate Uncertainties. *Energies*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/en15010302>