

**ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES DE
ENERGÍA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA
MEDIANTE EL USO DE LOGICA DIFUSA**

HARVEY AMILCAR MEDINA RINCÓN

LIBARDO ANDRÉS PIMIENTO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2014

**ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES DE
ENERGÍA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA
MEDIANTE EL USO DE LOGICA DIFUSA**

HARVEY AMILCAR MEDINA RINCÓN

LIBARDO ANDRÉS PIMIENTO HERNÁNDEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

Dr.Sc. VIATCHESLAV KAFAROV

Co-director

Ing. ANA MARÍA ROSSO CERÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2014

Dedicatoria

A Dios por darme la fortaleza y la energía de sacar la carrera de profesional adelante y todas mis metas presentes.

A mi madre Rosario Hernández por brindarme las bendiciones y su amor para terminar este logro.

A mi padre Libardo Pimiento por su apoyo económico y sus valiosos consejos

A mi Hermana y todos los miembros de la familia por el apoyo que me brindaron, sus oraciones y su gran energía expresada.

A mi compañero de trabajo de grado Harvey Medina por su apoyo, compromiso y su valioso conocimiento para poder conseguir este logro.

A una mujer en especial que estuvo presente en toda mi carrera y me brindo todo su apoyo y amor en los momentos difíciles que se presentaron.

A todos mis amigos que estuvieron presentes en este logro, linda experiencia y grandes recuerdos.

Gracias

Libardo Andrés Pimiento Hernández

Dedicatoria

Quiero dedicarle este trabajo a Dios que me ha dado la vida y fortaleza para terminar este proyecto de investigación.

Con todo mi cariño y mi amor para mis padres Rosa Nelly y Carlos Roberto que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Gracias a mi familia, que siempre estuvo lista para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Con todo mi cariño esta tesis se las dedico a ustedes: Jhon Fredy, Heberth Alexander y Aura Nelly.

A ti Ingrith Johana por tu paciencia y comprensión, preferiste sacrificar tu tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío. Por tu bondad y sacrificio me inspiraste a ser mejor para tí, ahora puedo decir que esta tesis lleva mucho de tí, gracias por estar siempre a mi lado.

A mi compañero Libardo Andrés por su apoyo, compromiso y su valioso conocimiento para poder conseguir este logro.

Harvey Amílcar Medina Rincón

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1 MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS ZNI	17
1.2 MÉTODO DE DECISIÓN MULTICRITERIO	18
1.2.1 Lógica difusa	18
1.3 TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL	20
1.3.1 Tecnologías para la generación de energía solar	20
1.3.2 Tecnología para la generación de energía eólica.....	21
1.3.3 Tecnologías para la generación de energía a partir de biomasa	22
1.3.4 Tecnologías para la generación de energía hidráulica	24
1.3.5 Tecnología diésel.....	25
1.4 INDICADORES DEL DESARROLLO SUSTENTABLE.....	26
1.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	27
2 METODOLOGÍA	30
2.1 SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	30
2.2 SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD.....	30
2.3 METODOLOGÍA LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS	32
2.4 FORMULACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN.....	36
2.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	36
3 RESULTADOS: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	38
4 CONCLUSIONES.....	45
5 RECOMENDACIONES.....	46
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXOS	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad instalada de plantas diésel en las ZNI de Colombia.	25
Tabla 2. Indicadores ambientales	27
Tabla 3. Cuantificación de los indicadores	29
Tabla 4. Categorías lingüísticas para la desfusificación del criterio tecnológico	34
Tabla 5. Categorías lingüísticas para la desfusificación del criterio tecnológico con sensibilidad	37
Tabla 6. Revisión bibliográfica para paneles fotovoltaicos	54
Tabla 7. Revisión bibliográfica para aerogeneradores	54
Tabla 8. Revisión bibliográfica para PCH's	55
Tabla 9. Revisión bibliográfica para combustión de biomasa	55
Tabla 10. Revisión bibliográfica para plantas diésel	56
Tabla 11. Potencial físico hidroenergético	60
Tabla 12. Mercado de combustible diésel para ZNI	61
Tabla 13. Tendencia de electrodomésticos y consumo de energía	62
Tabla 14. Identificación del número de viviendas sin servicio de energía eléctrica	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas para el análisis de decisión multicriterio	18
Figura 2. Tipos de funciones de pertenecía	19
Figura 3. Clasificación de las tecnologías de energía solar	20
Figura 4. Procesos de transformación de la biomasa	23
Figura 5. Criterios de evaluación	32
Figura 6. Fusificación de las variables de entrada	33
Figura 7. Respuestas de la variable de salida	35
Figura 8. Matriz de decisión.....	36
Figura 9. Respuesta a la variable de salida con sensibilidad.	37
Figura 10. Diagrama de evaluación del criterio tecnológico.....	38
Figura 11. Porcentaje de disponibilidad de oferta (disponibilidad de recursos) más demanda (hogares sin servicio) en las ZNI.....	40
Figura 12. Esquema radial de la evaluación de sustentabilidad ambiental	41
Figura 13. Diagrama de análisis de sensibilidad del criterio tecnológico	43
Figura 14. Esquema radial de la evaluación de sustentabilidad ambiental con sensibilidad.....	44
Figura 15. Potencial de radiación de energía solar mensual año 2004	57
Figura 16. Velocidad del viento año 2005.	58
Figura 17. Potencial energético de biomasa residual de cultivos agrícolas permanentes año 2006.....	59

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Cuantificación de los indicadores	54
Anexo B. Reglas para el criterio tecnológico.	64
Anexo C. Reglas para el criterio tecnológico para análisis de sensibilidad.....	68

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA MEDIANTE EL USO DE LOGICA DIFUSA *

AUTORES: HARVEY AMILCAR MEDINA RINCÓN, LIBARDO ANDRÉS PIMIENTO HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL, ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI), TECNOLOGÍAS RENOVABLES, GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, INDICADORES AMBIENTALES, ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

DESCRIPCIÓN: En la actualidad aproximadamente 1.600.000 personas en Colombia no cuentan con el servicio de electricidad, debido a que viven en zonas apartadas de difícil acceso o por el alto costo de prestación del servicio. La implementación de nuevas tecnologías alternativas renovables para la generación de energía eléctrica *in situ* en países en vía de desarrollo se presenta como una solución para estas personas que carecen de este servicio, sin embargo, tradicionalmente los criterios de decisión tomados en cuenta para la planificación del suministro eléctrico en poblaciones rurales han sido del tipo técnico y económico, dejando en un segundo plano los aspectos ambientales y sociales. Por ende se hace necesario desarrollar una metodología para evaluar la sustentabilidad ambiental que facilite la toma de decisiones y permita la selección de sistemas de suministro eléctrico en las zonas no interconectadas de Colombia, haciendo uso de la lógica difusa que facilita el manejo de información y evaluación de los indicadores ambientales, estos cuantificados a partir de datos de ACV e impacto ambiental encontrados en la literatura, además se tuvo en cuenta la disponibilidad de recursos energéticos en cada región y la demanda de energía eléctrica a satisfacer, con el fin de comparar y elegir la mejor alternativa sustentable desde el punto de vista ambiental. En este estudio la tecnología de pequeñas centrales hidroeléctricas se muestra como primera alternativa en los departamentos de Amazonas, Caquetá, Chocó, Guaviare, Putumayo y Vaupés, mientras que los paneles fotovoltaicos se destacaron en Arauca, Casanare, Guainía, Meta y Vichada.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov, Ingeniero Químico Dr. Sc.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY TECHNOLOGIES OF ELECTRICITY GENERATION FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES TO NON-INTERCONNECTED AREAS IN COLOMBIA THROUGH THE USE OF FUZZY LOGIC*

AUTHORS: HARVEY AMILCAR MEDINA RINCÓN, LIBARDO ANDRÉS PIMIENTO HERNÁNDEZ**

KEY WORDS: ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY, NON-INTERCONNECTED AREAS (ZNI), RENEWABLE TECHNOLOGIES, ELECTRIC POWER GENERATION, ENVIRONMENTAL INDICATORS, LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

DESCRIPTION: Currently approximately 1.600.000 people in Colombia do not have electric service, since they live in remote areas difficult to access or for the high cost of providing the service. The implementation of new renewable alternative technologies for the generation of electric power *in situ* in developing countries is presented as a solution for these people who do not have this service, however, the decision criteria taken into consideration for the planning of the power supply in rural populations have traditionally been of the technical and economic, leaving in the background the environmental and social aspects. Therefore it is necessary to develop a methodology for assessing environmental sustainability that facilitates decision-making and allows the selection of systems of power supply in non-interconnected areas of Colombia, making use of fuzzy logic that facilitates the management of information and evaluation of environmental indicators, these quantified based on LCA and environmental impact data found in the literature, also taking into account the availability of energy resources in each region and the demand for electricity to meet, in order to compare and choose the best sustainable alternative from an environmental point of view. In this study, small hydro technology is shown as the first alternative in the departments of Amazonas, Caquetá, Chocó, Guaviare, Putumayo and Vaupés, while photovoltaic panels stood in Guainia, Meta, Arauca, Casanare and Vichada.

* Undergraduate Project.

** Physiochemical Engineering College. Chemical Engineering School. Director: M.SC. Viatcheslav Kafarov.

INTRODUCCIÓN

La Comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, en 1987 adoptó por unanimidad el documento “Nuestro Futuro Común” o “Informe Brundtland”, el cual, define el desarrollo sustentable como el “*Desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades*”. Además, afirma que se deben tener en cuenta factores sociales, económicos y ambientales [1]. Bajo este concepto, la energía eléctrica ocupa un lugar importante en el desarrollo sustentable, pues es indispensable para potenciar el bienestar social y económico, generar riqueza industrial y comercial y se considera una condición *sine qua non* para aliviar la pobreza, generalizar la protección social y elevar el nivel de vida [2].

En el caso Colombiano, aproximadamente 421.000 hogares no cuentan con servicio de energía eléctrica, de los cuales, el 57% (239.000) no se podrán conectar a través del sistema interconectado nacional - SIN [3] porque en su mayoría, estos hogares se encuentran en zonas no interconectadas ZNI, caracterizadas por su baja densidad poblacional (4% de la población del país) y un área geográfica correspondiente al 66% del territorio nacional [4]. Para estos usuarios se están planteando soluciones de generación *in situ*; a corto plazo, por medio de plantas diésel y a largo plazo, con la implementación de tecnologías que puedan aprovechar los potenciales de recursos renovables que existan en cada zona [3].

Tradicionalmente, los criterios tomados en cuenta para el diseño o planificación de los sistemas de suministro eléctrico de poblaciones rurales o remotas en las ZNI de Colombia, han sido del tipo técnico y económico, dejando en un segundo plano los aspectos sociales y ambientales [5]. En la actualidad, las problemáticas ambientales son la deforestación, la contaminación del agua y la inyección continua e intensiva a la atmósfera de gases causantes del efecto invernadero

(GEI) y otras sustancias contaminantes, que están amenazando la estabilidad climática del planeta [6]. Al dióxido de carbono (CO₂), se le atribuye alrededor del 60% del efecto invernadero, cuyas emisiones mundiales provienen principalmente de la generación de energía eléctrica (25,9%), la industria (19,4%), la silvicultura (17,4%), la agricultura (13,5%), entre otros [7].

Lo anterior, evidencia la necesidad de evaluar y analizar cuáles son las alternativas para la generación de energía eléctrica más sustentables desde el punto de vista ambiental para las ZNI de Colombia, teniendo en cuenta tecnologías que aprovechen los recursos renovables existentes *in situ* para satisfacer las necesidades de estas poblaciones y la demanda potencial a satisfacer, esto comparado con la solución actual de plantas generadoras a partir de combustible diésel.

Asimismo, diversos estudios que han abordado el tema de la evaluación y análisis de sustentabilidad ambiental, hacen uso de tres herramientas básicas: indicadores ambientales, análisis de ciclo de vida (ACV) y métodos de decisión multicriterio [8,9,10]. Los indicadores ambientales incluyen temas como atmósfera, tierra y agua, los cuales ayudan a clasificar y/o valorar temas como el cambio climático, la calidad del aire, agua y tierra [2]. Los estudios de análisis de ciclo de vida son utilizados para cuantificar los indicadores ambientales para cada tecnología, teniendo en cuenta su ciclo de vida de la cuna a la tumba, esto con el objetivo de disminuir cualquier error de apreciación para tomar decisiones en el análisis de las posibles soluciones energéticas que contemplen la sustentabilidad ambiental [10].

Por último, los métodos de decisión multicriterio permiten evaluar en conjunto los indicadores y mostrar los resultados en forma numérica, brindando al tomador de decisiones una visión de las mejores alternativas [5]. La lógica difusa facilita este tipo de análisis puesto que se puede adaptar a un lenguaje cuantitativo a valores cualitativos y la asignación de reglas lógicas que permiten describir cada circunstancia que se puede presentar en cada caso. Además, permite el manejo

de datos imprecisos, es decir, que se mueven dentro de un rango como sucede en estos tipos de análisis [11].

En consecuencia, el objetivo de este trabajo consiste en realizar un análisis de sustentabilidad ambiental de cinco tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en las ZNI, incluyendo las actuales plantas de combustible diésel, por lo cual se realizará la comparación de sustentabilidad desde el punto de vista ambiental para estas tecnologías de generación eléctrica, planteando un método de decisión multicriterio utilizando la lógica difusa, el cual ayudará a determinar la mejor tecnología ambientalmente sustentable para cada ZNI de Colombia analizada en este estudio.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS ZNI

La legislación Colombiana define en la ley 855 de 2003, artículo primero: “*Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por zonas no interconectadas, ZNI, a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional, SIN*”.

Estas zonas poseen características como baja densidad poblacional, dificultad de acceso, gran variedad de recursos naturales y están ubicadas a grandes distancias de centros urbanos, características que dificultan la prestación del servicio a través del SIN y hacen necesaria la generación de energía eléctrica *in situ* [4].

Según la ley 788 de 2002 parágrafo dos del artículo 105 establece que “*son zonas no interconectadas para todos los efectos los departamentos de: Arauca, Casanare, Putumayo, Amazonas, Guaviare, Guainía, Vaupés y Vichada contemplados en el artículo 309 de la constitución nacional, más los departamentos de Chocó, Caquetá y Meta*.”

Lo anterior, no excluye a otras zonas que hacen parte de las ZNI, puesto que se tienen identificadas diversas áreas en 16 departamentos, de los 32 pertenecientes al territorio nacional. Allí se localizan cinco capitales departamentales (Leticia, San José del Guaviare, Mitú, Puerto Carreño y Puerto Inírida), 115 municipios, 44 cabeceras municipales y más de 964 centros poblados rurales de diferentes categorías [4].

1.2 MÉTODO DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Los métodos de decisión multicriterio consisten en el proceso de evaluar dos o más criterios, utilizando herramientas que permitan organizar, sintetizar y comparar información que ayude al tomador de decisiones a elegir entre varias alternativas para dar la mejor solución de un problema [5]. En la Figura 1 se muestran las etapas para realizar un análisis de decisión multicriterio.

Figura 1. Etapas para el análisis de decisión multicriterio

Identificación del problema	<ul style="list-style-type: none">• Consiste en definir claramente el problema al cual se pretende dar solución.
Objetivos	<ul style="list-style-type: none">• Consiste en identificar plenamente las metas que se buscan alcanzar al establecer cada criterio.
Generación de Alternativas	<ul style="list-style-type: none">• Implica la identificación de las alternativas y/o opciones que pudieran resolver el problema.
Modelizar el problema	<ul style="list-style-type: none">• Consiste en la aplicación de métodos matemáticos y/o computacionales que permitan descomponer el problema global en problemas individuales para poder manejar más fácil la información.
Elección de Alternativas	<ul style="list-style-type: none">• consiste en identificar la mejor alternativa bajo el criterio del decisor, generando un ranking de las soluciones propuestas.
Análisis de sensibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Consiste en variar uno o más datos de entrada para observar el efecto que se produce en los datos de salida.

Fuente. Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones.

1.2.1 Lógica difusa

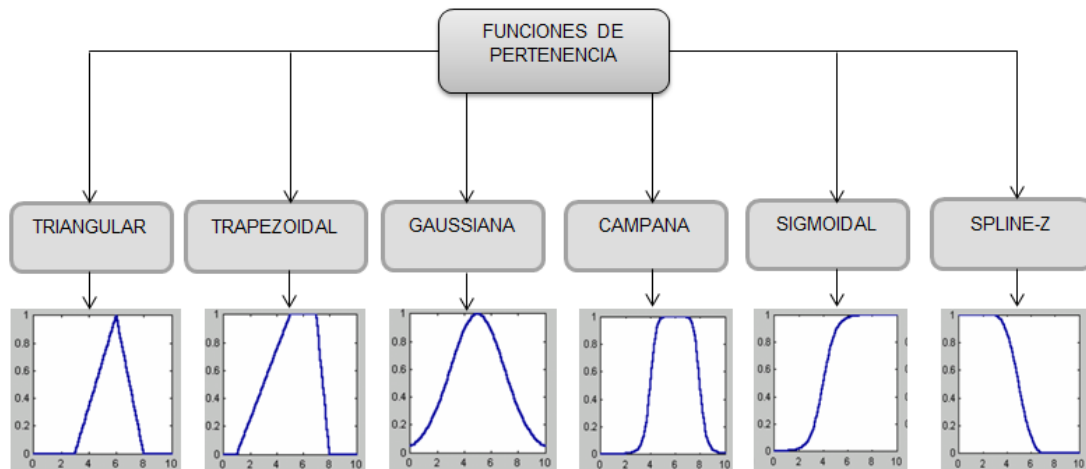
La lógica difusa fue desarrollada inicialmente por el profesor Lofti Zadeh (1965) de la Universidad de Berkeley California y es una técnica mundialmente reconocida para el manejo de información de carácter impreciso [12]. Esta imprecisión es la situación en la que no puede darse un valor exacto para los parámetros del problema, la información no es cuantificable o es incompleta, esto se conoce como conjuntos difusos. Además, soporta valoraciones subjetivas e, incluso,

valoraciones lingüísticas para los parámetros del problema y las incorpora apropiadamente a modelos matemáticos complejos. El proceso para el uso de la lógica difusa consiste básicamente en tres etapas [12]:

- **Fusificación:** Convierte los valores reales (*crisp*) en valores difusos, asignando grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada en relación a los conjuntos difusos definidos previamente, utilizando funciones de pertenencia para asociar los conjuntos difusos.

Las funciones de pertenencia son continuas, las cuales representan las coordenadas difusas del atributo o grado con que pertenece al valor lingüístico asociado, que pueden ser básicamente de los tipos mostrados en la Figura 2; funciones trapezoidales y triangulares; que son funciones lineales por tramos, exponenciales y polinómicas; que son funciones sencillas de calcular y tienen una forma similar a la de las funciones de densidad normal (gaussiana, campana) [12]

Figura 2. Tipos de funciones de pertenencia



Fuente. Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental.

- **Inferencia:** Relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida mediante el uso de reglas lógicas que definirán el sistema, por ejemplo *SI* caso 1 *Y/O* caso 2 *ENTONCES* acción 1.

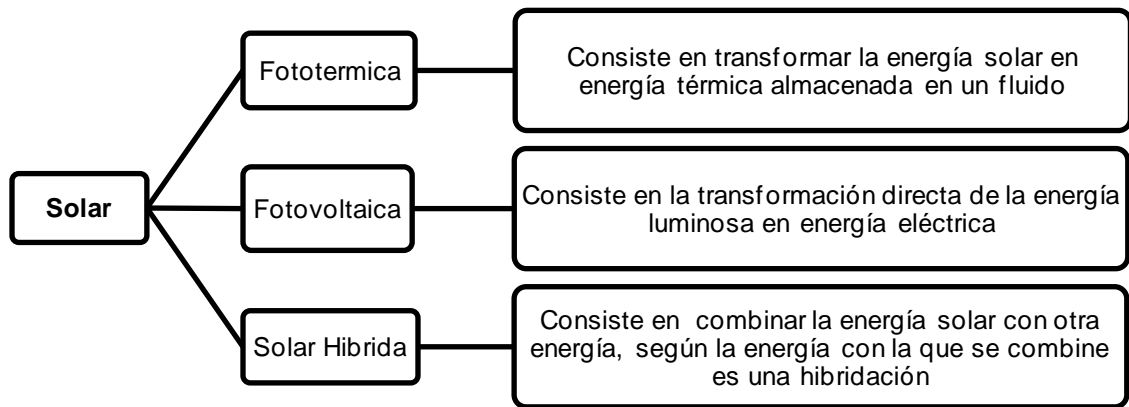
- **Defusificación:** consiste en adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores *crisp*, usando métodos matemáticos simples como el método del centroide, método promedio ponderado y método de membresía del medio máximo.

1.3 TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL

1.3.1 Tecnologías para la generación de energía solar

La energía solar llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioletas) procedentes del sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear [13]. El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas, por conversión térmica de alta temperatura (sistema fototérmico) y por conversión fotovoltaica (sistema fotovoltaico) como se muestra en la Figura 3 [14].

Figura 3. Clasificación de las tecnologías de energía solar



Fuente. Estudio tecnológico, viabilidad energética y económico para la generación eléctrica sostenible a través de la energía solar, con aporte al medio ambiente

Los sistemas fotovoltaicos consisten básicamente en la conversión de la fuente de luz en energía eléctrica por medio de un fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico, el cual se logra mediante paneles con celdas que contienen silicio (un semiconductor que se excita fácilmente con la luz) produciendo así una corriente

continua, después de esto, pasan a un banco de baterías donde son almacenadas y derivadas al inversor donde se transforman en corriente alterna, la misma que es elevada a un nivel de utilización (12 voltios). El número de paneles se colocan dependiendo de la cantidad de energía que se requiera producir [15].

En Colombia, la potencia instalada de energía eléctrica a partir de fuente solar es de 6 MW, de los cuales, el 57% está distribuido para aplicaciones rurales y 43% para torres de comunicación y señalizaciones de tránsito [14]. En el país, se viene utilizando la tecnología de paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica a partir de radiación solar con gran acogida, debido a sus características de sencillez, modularidad, fiabilidad y operatividad, por esto, que se han convertido en una herramienta vital para el acceso a la energía eléctrica, puesto que el sistema presenta un gran campo de aplicaciones para pequeños consumos como fuente de electricidad en el mismo lugar de la demanda [14]. Por estas razones, la tecnología solar escogida para realizar este estudio son los paneles fotovoltaicos.

1.3.2 Tecnología para la generación de energía eólica

El calentamiento del aire de la atmósfera de forma desigual, provoca su circulación entre zonas con temperaturas distintas, la masa del aire que se desplaza lleva consigo una energía cinética que es aprovechable mediante el movimiento de aspas, que a su vez, mueve un generador y produce energía [16].

Los equipos para la producción de electricidad a partir del viento son los aerogeneradores, estos están constituidos por tres elementos principales: la hélice o rotor, la góndola, en la que se encuentra el generador que transforma la energía cinética transmitida por la hélice en eléctrica, y la torre sobre la que se monta el conjunto de hélices y góndolas [17]. Los aerogeneradores se clasifican según su potencia en pequeños (<100 kW) y grandes (>100 kW); los pequeños se emplean en sistemas aislados o miniredes, mientras que los de mayor potencia se emplean en sistemas interconectados a la red [18]. La mayoría de los aerogeneradores comerciales de eje horizontal tiene los siguientes componentes [19]:

- Rotor multi-pala y tren de potencia.
- Cola que orienta el rotor en la dirección del viento
- Alternador o generador conectado al tren de potencia.
- Control que permite regular la carga de las baterías.
- Torre simple, de tubo simple o reticular en unidades de mayor capacidad.

En Colombia, se tienen dos infraestructuras de aerogeneradores, en la Guajira, Jepirachi, que genera 20 megavatios (MW), y Nazaret en Uribí con 200 kW, que es un sistema de producción híbrido que combina fuentes de gas licuado de petróleo (GLP) o diésel con eólica, para un total de 750 kW [19]. Adicionalmente, en el país se distribuyen pequeños aerogeneradores para instalaciones en zonas de difícil acceso y apartadas a la red de distribución, estos sistemas generalmente están diseñados para alimentar pequeñas cargas y emplean baterías como sistemas de almacenamiento de energía que pueden alimentar mini-redes en pequeñas comunidades aisladas, estas tecnologías también pueden emplearse como parte de sistemas híbridos que permiten emplear diferentes equipos de generación y una mayor flexibilidad en la operación [20], por tal razón, la tecnología eólica escogida para este estudio son los aerogeneradores.

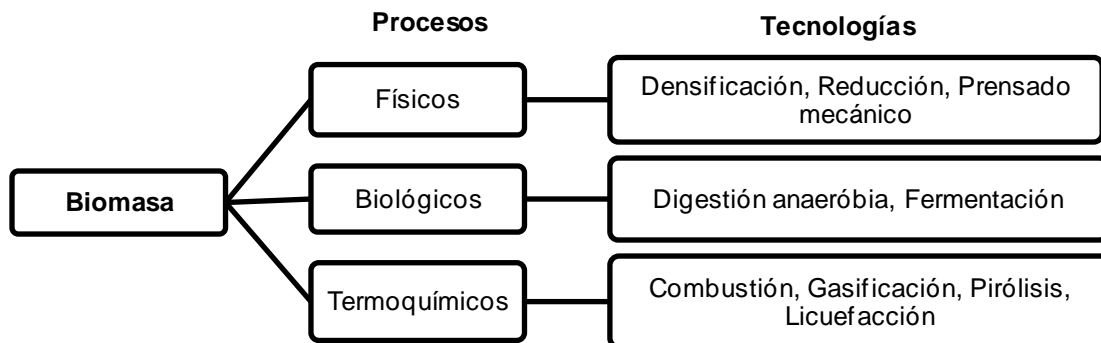
1.3.3 Tecnologías para la generación de energía a partir de biomasa

La biomasa es energía solar almacenada en forma de compuestos químicos en cualquier material proveniente de organismos vivos (plantas y animales) tales como vegetación, bosques, selvas, cultivos acuáticos, residuos agrícolas, desechos animales y desechos urbanos e industriales de tipo orgánico que pueden utilizarse para producir energía [21].

Para la conversión de la energía almacenada en la biomasa, se pueden utilizar tres procesos diferentes: físicos, biológicos y termoquímicos, para los cuales, se han desarrollado diversas tecnologías como lo muestra la Figura 4. Con procesos físicos, se pueden obtener aceites y biomasa de alta densidad como los *pellets*,

los procesos biológicos y termoquímicos dan como productos combustibles líquidos y gaseosos [22].

Figura 4. Procesos de transformación de la biomasa



Fuente. Energías Renovables: Descripción, tecnologías y usos finales.

Para realizar el estudio de sustentabilidad ambiental de la generación de electricidad a partir de biomasa en Colombia, la tecnología a evaluar es la combustión, pues es madura y utilizada comercialmente para procesos de cogeneración en empresas colombianas como Cemex Colombia, Ingenio Providencia S.A, Ingenio Mayagüez S.A, Incauca S.A e Ingenio Risaralda S.A, según el proyecto de extensión denominado “Levantamiento de información y conocimiento de actores, proyectos y potencialidades FNCE-R”, los cuales aprovechan residuos agroindustriales para la generación de electricidad y calor combinados. Estas empresas han aumentado su capacidad de 35 MW en 2009 a 54,9 MW en 2010, lo que representa un aumento de 56,9% en su capacidad y una participación del mercado total (55.965 GWh) del 0,4% al 2010 con una producción de 223 GWh [23].

La tecnología de combustión directa de la biomasa implica un pretratamiento que consiste esencialmente en el secado y la peletización, luego de estos procesos se quema la biomasa en presencia de aire en una caldera, para la producción de vapor de alta presión, el cual, luego se expande en una turbina para la producción de electricidad, el vapor saliente de la turbina es aprovechado en los procesos industriales como energía térmica por medio de intercambiadores de calor [24].

Las plantas de combustión que operan en Colombia, utilizan por lo general biomasa procedente de desechos agrícolas como la cascarilla de arroz y el gabazo de la caña de azúcar que tengan un contenido de humedad inferior al 50%, con capacidades de producción de energía entre 1 a 50 MW, alcanzando en estos procesos temperaturas que pueden llegar alrededor de los 800 – 1.000 °C con eficiencias que puede variar entre el 20% al 40% [25].

1.3.4 Tecnologías para la generación de energía hidráulica

La energía hidráulica aprovecha la energía potencial del agua almacenada en un nivel superior y la energía cinética al fluir al nivel inferior, para generar energía eléctrica a través de una turbina (las más utilizadas en el país son Francis y Pelton). En Colombia el 64,1% de la capacidad efectiva neta del SIN, pertenece a producción por recursos hídricos, con una generación de energía para el año 2010 de 38.088 GWh [23].

Adicionalmente, para las ZNI muchas de las soluciones para satisfacer la demanda de energía han sido pequeñas centrales hidroeléctricas, las cuales, pueden operar como centrales a filo de agua, es decir, que no necesitan de la inundación de terrenos ya que funcionan en base al flujo normal del agua de ríos y canales, aprovechando la energía cinética del agua, además, son tecnologías sencillas, de fácil adaptación e instalación, reducidos costos de operación y mantenimiento y larga vida útil [26]. Es por estas razones que esta tecnología fue escogida para realizar el estudio de sustentabilidad ambiental para este trabajo.

Por otro lado, en Colombia las centrales hidroeléctricas se subdividen según su potencia neta instalada en los intervalos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en: Microcentral (0-100 kW), Minicentral (100-1.000 kW) y pequeña central (1.000-10.000 kW) [19].

1.3.5 Tecnología diésel

El diésel es un combustible derivado del petróleo que se obtiene de la destilación atmosférica entre los 200 y 380 °C y es parecido al gasóleo de calefacción, es utilizado en máquinas diésel y otros equipos de compresión, los cuales son los generadores diésel, son dispositivos sencillos que funcionalmente convierten el combustible diésel en electricidad, en esencia, es la combinación interna de dos aparatos separados que trabajan juntos para producir energía eléctrica [27]. El motor a diésel quema combustible para producir movimiento por el generador, transformándolo en electricidad mediante dispositivos electromagnéticos [28].

El combustible diésel es muy utilizado debido a su capacidad de quemarse sin hacer explosión, se utiliza en lugares donde la red eléctrica falla o no está disponible [29]. En las ZNI de Colombia un 92% del servicio de energía eléctrica se da a partir de plantas diésel, que suma un total de 70.000 kW de potencia instalada, de la cual el 80% utiliza generadores de menos de 100 kW, siendo los departamentos de Amazonas y Chocó las localidades donde existen más plantas instaladas [30].

Tabla 1. Capacidad instalada de plantas diésel en las ZNI de Colombia.

Departamento	Capacidad Instalada [kW]
Casanare	657
Arauca	1.646
Vaupés	2.614
Guaviare	3.013
Putumayo	3.619
Vichada	4.038
Guainía	5.165
Meta	5.220
Caquetá	6.989
Chocó	14.094
Amazonas	21.820

Fuente: Subdirección de planificación energética. IPSE

1.4 INDICADORES DEL DESARROLLO SUSTENTABLE

El desarrollo sustentable se define como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades”; los términos desarrollo sustentable o sostenible no presentan ninguna diferencia en cuanto a su significado, la diferencia radica en su traducción del inglés [31].

La medición del desarrollo sustentable se lleva a cabo a través de indicadores, los cuales son datos cuantitativos que ayudan a clasificar y/o valorar una serie de temas específicos a los cuales estos hacen referencia, proporcionando una visión de los principales problemas y pueden arrojar soluciones valiosas. Para que estos indicadores sean herramientas fiables y útiles, es necesario que cuenten con el respaldo de una base sólida de datos estadísticos, válidos, coherentes, confiables, exactos, completos y recientes [8].

Los indicadores de desarrollo sustentable fueron propuestos por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (UNDESA), para dar cumplimiento a las decisiones tomadas por la Comisión sobre Desarrollo Sustentable (CDS) de las Naciones Unidas y lo solicitado en el capítulo 40 del programa 21, manteniendo un número pequeño de indicadores para facilitar su manejo y emplearlos de manera práctica. Los indicadores de la dimensión ambiental, (ver Tabla 2) tienen como objetivo incrementar el uso de energías renovables, reducir la contaminación del agua y mitigar la producción de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera [2].

Tabla 2. Indicadores ambientales

Indicador	Definición
Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)	Mide las emisiones de los principales gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO ₂), Óxido Nitroso (N ₂ O) y metano (CH ₄) estos gases tienen efecto directo sobre el cambio climático.
Emisiones de Óxidos de nitrógeno (NO_x)	Estos compuestos contribuyen a la contaminación del aire, la deposición ácida y el cambio climático, también puede reaccionar fácilmente con el agua (humedad), compuestos orgánicos volátiles, productos químicos comunes e incluso con el ozono formando una gran variedad de compuestos tóxicos, causando daños a la salud humana.
Emisiones de dióxido de azufre (SO₂)	Es compuesto se asocia con el aumento de síntomas respiratorios y muertes prematuras, adicionalmente puede oxidarse permitiendo la formación de ácido sulfúrico.
Emisiones de material participado (MP)	Estas partículas finas se acumulan en la atmosfera y dispersan la luz, creando condiciones de nebulosas, disminución de la visibilidad y contribución a la bruma regional. También ocasionan daños a la salud humana.
Consumo de agua	Mide la cantidad de agua consumida para la generación de energía eléctrica a la cual se altera sus propiedades fisicoquímicas, y luego no puede ser destinada para consumo humano.
Uso de Suelo	Mide el área necesaria para la instalación y operación de la planta para la generación de energía eléctrica, la cual puede ser utilizada para fines agrícolas o forestales.
Generación de desechos	Cantidad de desechos sólidos producidos por la generación de energía eléctrica
Disponibilidad de recursos	Mide la cantidad y/o el potencial de cada recurso para la generación de energía eléctrica. Esto con el fin de medir la explotación de los recursos naturales
Demanda de energía eléctrica	Mide las necesidades energéticas de cada zona. Tiene relación directa con los demás indicadores, excepto con la disponibilidad de recursos.

Fuente Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías.

1.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La evaluación del ciclo de vida es una metodología que intenta cuantificar sistemáticamente los efectos ambientales de las distintas etapas de ciclo de vida de productos o procesos; extracción de materiales, fabricación, producción, uso, operación y disposición final [32]. Este enfoque se suele utilizar para comparar los impactos ambientales de los diferentes productos que realizan las mismas funciones [33].

Los tipos de ACV son:

- De la puerta a la puerta: Sólo se limita a las entradas/salidas de la etapa de producción
- De la cuna a la puerta: Sólo se limita a las entradas/salidas desde la etapa de extracción hasta la etapa de producción
- De la cuna a la tumba: Sólo se limita a las entradas/salidas desde la etapa de extracción hasta la etapa de disposición final
- De la cuna a la cuna: Se limita igual que el proceso de cuna a la tumba, pero además tiene en cuenta corrientes de salida de la etapa de disposición final, que pueden ser valorados como materias primas o entradas al mismo sistema.

En la

Tabla 3 se muestran los valores máximos y mínimos de los ACV de la cuna a la tumba para cada una de las tecnologías evaluadas. (Para ver en detalle la recopilación de estos valores dirigirse al Anexo A). Las etapas que se tuvieron en cuenta para asignar valor a los indicadores fueron: la extracción de materias primas, proceso de fabricación de componentes, distribución e instalación de la tecnología, funcionamiento, mantenimiento y disposición final.

Las tecnologías de aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y PCH's presentan la mayor contribución de emisiones en el proceso de fabricación, el cual contribuye con cerca del 85% del total, debido a la utilización de combustibles fósiles para diferentes componentes de equipos de la tecnología, el restante en etapas de transporte, mantenimiento, instalación y disposición final. La etapa de funcionamiento no presenta emisiones en ninguna de estas tecnologías. Por el contrario, las tecnologías de combustión de biomasa y generadores diésel tienen los mayores impactos en la etapa de funcionamiento, la cual contribuye con cerca del 80% del total, el restante se encuentra distribuido en las etapas de infraestructura, mantenimiento y disposición total.

Tabla 3. Cuantificación de los indicadores

Indicador	Rango de valores para cada tecnología				
	Panel fotovoltaico	Aerogenerador	PCH's	Combustión de biomasa	Plantas diésel
Emisiones de GEI [gr/kWh]	45-190	9-55,4	9-60	27-310	260-700
Emisiones de NO _x [gr/kWh]	0,17-0,34	0,04-0,31	0,03-0,37	0,05-2,5	0,82-0,9
Emisiones de SO ₂ [gr/kWh]	0,30-0,40	0,03-0,11	0,03-0,07	0,05-2,5	0,23-6,0
Emisiones de MP [gr/kWh]	0,09-0,15	0,04-0,10	0,02-0,10	0,01-0,1	1,28-1,4
Consumo de agua [m ³ /kWh]	0	0-1	0-0,02	1,1-2,1	0
Uso de suelo [m ² /kWh]	16-64	30-60	13-75	3-10	1-9
Generación de desechos [kg/kWh]	0	0	0	1.500-2.220	0
Disponibilidad de recursos	Radiación solar 2,5 - 7,0 [kWh/m ²]	Velocidad del viento 0 - 11 [m/s]	Potencial físico hidro-energético Muy bajo, Bajo, Medio bajo, Medio Alto, Alto	Potencial energético de biomasa residual para cultivos permanentes 0 – 11.000 [TJ/año]	Mercado Combustible diésel para ZNI 2.000 – 900.000 [barriles/mes]
Demanda de energía eléctrica	0 – 3.300 [MWh/año] Demanda servicio de energía eléctrica de viviendas en cabecera municipal que no cuentan con el servicio.				

2 METODOLOGÍA

El análisis de sustentabilidad ambiental de las cinco tecnologías de generación de energía eléctrica seleccionadas para este estudio, se realizó mediante cinco partes fundamentales las cuales están relacionadas con las etapas para el análisis de decisión multicriterio: la selección de las tecnologías de generación de energía eléctrica (generación de alternativas), la elección de los indicadores para la evaluación, el planteamiento de la metodología utilizada en lógica difusa para la evaluación de los indicadores (modelamiento del problema), la formulación de la matriz de decisión (elección de las alternativas), y por último, el análisis de sensibilidad.

2.1 SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para el proceso de selección de las tecnologías a evaluar se utilizó la información recopilada sobre energías renovables del proyecto de extensión: “Levantamiento de información y conocimiento de actores, proyectos y potencialidades en fuentes no convencionales de energías renovables en Colombia” dirigido por el doctor Viatcheslav Kafarov. Adicionalmente, se utilizó información proporcionada por fuentes estatales como la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas en las Zonas no Interconectadas (IPSE), seleccionándose las tecnologías que se están planteando como solución para satisfacer las necesidades energéticas de las ZNI y teniendo en cuenta el mayor grado de madurez.

2.2 SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD

Esta etapa consistió en la selección de las ZNI de Colombia y los indicadores asociados a la dimensión ambiental a evaluar.

Los indicadores en la dimensión ambiental fueron seleccionados del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales UNDESA (ver Tabla 2), los cuales, tienen presentes los temas de atmósfera, suelo y agua. El valor de cada indicador fue cuantificado a partir de fuentes bibliográficas que abordaban los temas de análisis de ciclo de vida (cuna a tumba) e impacto ambiental para las tecnologías a evaluar.

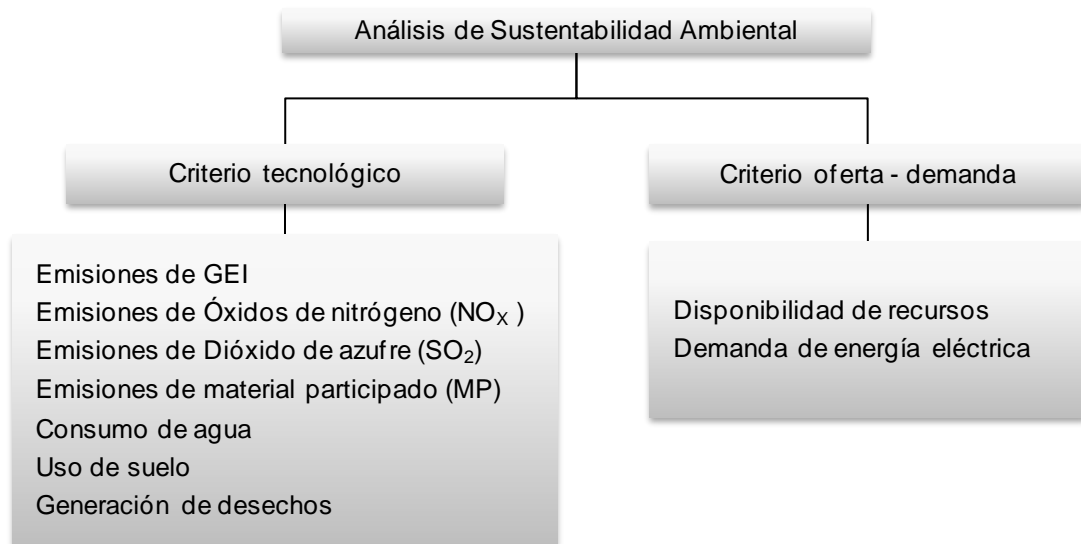
Estos indicadores fueron organizados en un criterio denominado: tecnológico (indicadores ambientales asociados a las tecnologías).

Con relación a la selección de las ZNI de Colombia, se tomaron los departamentos descritos por la ley 788 de 2002 (Amazonas, Arauca, Caquetá, Casanare, Chocó, Guainía, Guaviare, Meta, Putumayo, Vaupés y Vichada), pues son lo que presentan mayor déficit de servicio de energía eléctrica (239.000 hogares), debido a que en estas zonas el servicio de electricidad no es permanente o incluso es nulo, además, su conexión al SIN es prácticamente imposible por su lejanía respecto a las redes de transmisión y las dificultades por la geografía del terreno [23].

Adicionalmente, las ZNI se caracterizan por su gran potencial de recursos energéticos: solar, eólico, hídrico, biomásico y combustible diesel, lo que las hace muy aptas para la implementación de tecnologías que aprovechen dichos recursos.

De acuerdo a lo anterior se estableció el criterio de oferta-demanda (oferta-potencial de recursos función de la ubicación geográfica de las ZNI de Colombia) (demanda - demanda eléctrica en función de los hogares sin el servicio). Este criterio se relaciona con la dimensión ambiental debido a que si hay mayores demandas de energía eléctrica, los valores de los indicadores aumentan, pues estos están dados sobre unidades de energía (ver Figura 5).

Figura 5. Criterios de evaluación



2.3 METODOLOGÍA LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS

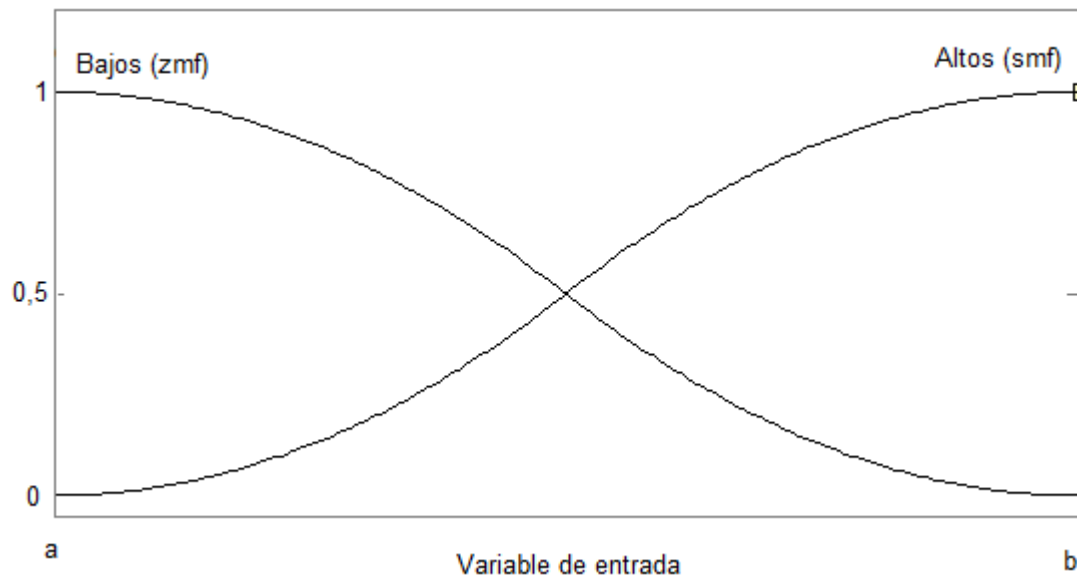
Esta etapa consistió en realizar la evaluación de los criterios, en los cuales se clasificaron los indicadores, haciendo uso del módulo *fuzzy logic* del programa MATLAB Versión 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2, January 29, 2005 con licencia número 251532.

Para el caso del criterio tecnológico, se establecieron como variables de entrada los siete indicadores que componen este criterio y como variable de salida: % de evaluación de la tecnología, la cual indica el grado de impacto sobre el ambiente (a mayor valor menor impacto).

La fusificación de cada variable de entrada consistió en la asignación de dos funciones de pertenencia para cada variable; una para describir los valores bajos de cada indicador y otra los valores altos. Para la descripción de los valores bajos se tomó la función de pertenencia Z-shaped built-in membership, (*zmf*) y para la

descripción de los valores altos la función de pertenencia S-shaped built-in membership, (*smf*) (ver Figura 6).

Figura 6. Fusificación de las variables de entrada



Las dos funciones de pertenencia se definieron a través de dos parámetros: *a* y *b*. El valor de *a* es igual a cero y el valor de *b* es igual al valor máximo del rango designado a cada indicador, estas funciones fueron escogidas porque representan un cambio continuo desde el valor *a* hasta *b* y solo necesitan de dos parámetros para su descripción, evitando el uso de un valor intermedio o un tercer parámetro, que pudiera generar distorsión en los resultados.

A continuación se realizó la inferencia, la cual consiste en la asignación de las reglas que definen el sistema. Para esto, se tuvieron en cuenta todas las posibles combinaciones entre las funciones altas y bajas de cada indicador (el número de combinaciones posibles es 128 y está dado por 2^n base 2 por ser un sistema binario, es decir alto-bajo y *n* es el número de indicadores). Las respuestas del sistema se basaron en el número de indicadores con valores altos de acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 4. Es decir, a mayor cantidad de indicadores con valores altos será menor el valor del criterio tecnológico.

Tabla 4. Categorías lingüísticas para la defusificación del criterio tecnológico

Categorías lingüísticas	Número de indicadores con valores altos
Muy Alta	0-1
Alta	2-3
Baja	4-5
Muy Baja	6-7

A continuación se muestra un ejemplo de la estructura general de las reglas:

Regla 100. *SI* (Emisiones GEI es alto) y (Emisiones NO_x es alto) y (Emisiones de SO₂ es bajo) y (Emisiones de MP es bajo) y (Consumo de agua es bajo) y (Uso de suelos es alto) y (Generación de desechos es alto) entonces (la evaluación de la tecnología es baja). Ver Anexo B.

Asimismo, se estableció la variable de salida evaluación de la tecnología, la cual representa la defusificación de los resultados obtenidos al evaluar las reglas establecidas anteriormente. Para esto, se emplearon cuatro funciones de pertenencias *Triangular-shaped build-in membership (trimf)* para describir las cuatro categorías: Muy baja, Baja, Alta y Muy Alta, distribuidas en un rango de 0 a 100 que representan en porcentaje el valor de la evaluación de la tecnología (ver Figura 7).

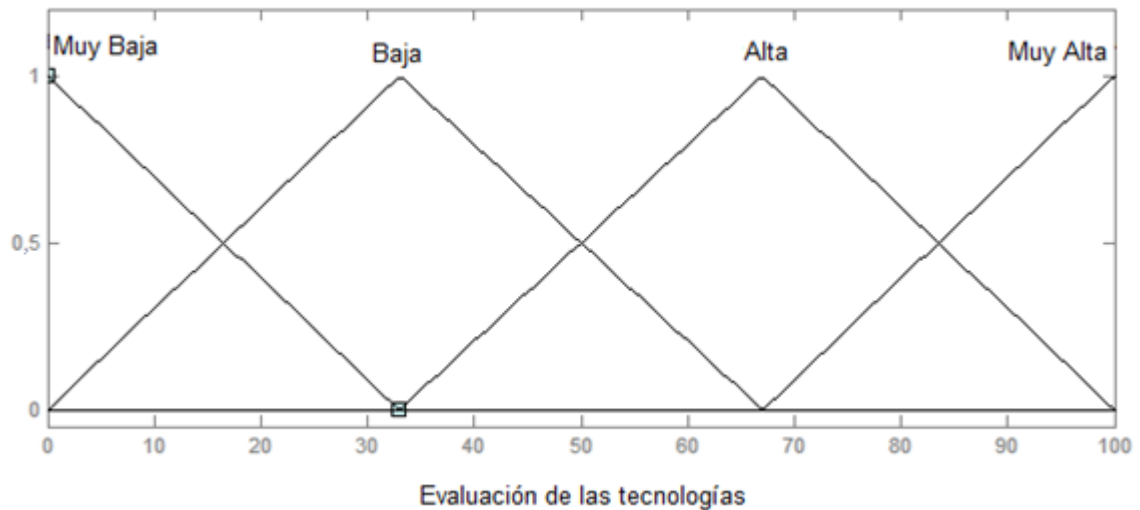
Por último, para realizar la evaluación del criterio tecnológico, se plantearon cien combinaciones para cada alternativa generando números aleatorios a partir de los rangos mostrados en la

Tabla 3 para cada indicador, estas combinaciones fueron evaluadas obteniendo los valores de los rangos de este criterio.

Por otra parte, la metodología planteada para el módulo *fuzzy logic* para el criterio oferta-demanda se compone de los indicadores disponibilidad de los recursos y demanda de energía eléctrica. La fusificación de las variables de entrada emplea las mismas funciones de pertenencia descritas para el criterio tecnológico, y el

rango de cada variable consistió en los valores mínimos y máximos encontrados para cada indicador que componen el criterio oferta-demanda.

Figura 7. Respuestas de la variable de salida



La inferencia para el criterio oferta-demanda utiliza solamente dos reglas lógicas. La primera, hace referencia al peor de los escenarios, tener disponibilidad de recursos bajos y demanda de energía altos dando como respuesta una evaluación del criterio oferta-demanda baja, la segunda representa el mejor escenario, disponibilidad de recursos altos y demandas bajas generan una evaluación del criterio oferta-demanda alta.

La defusificación se representó por la variable de salida "oferta-demanda", a través de la función de pertenencia *zmf* que describe los valores bajos y la función de pertenencia *smf* que describe los valores altos, distribuidos en un rango de 0 a 100.

2.4 FORMULACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

En esta etapa se elaboró la matriz que se muestra en la Figura 8, donde A representa las alternativas, C los criterios y x_{ij} el valor de la evaluación del criterio i para la alternativa j . La matriz permite obtener el valor de sustentabilidad ambiental al multiplicar los valores de la evaluación de los criterios de cada alternativa. Estos valores permiten establecer una clasificación (*ranking*) de las mejores alternativas siendo la mejor la que obtenga el mayor puntaje de la evaluación de sustentabilidad ambiental.

Figura 8. Matriz de decisión

$$\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & A_1 & A_2 & \cdots & A_n \\ \hline C_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ C_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m & x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{array} \end{array}$$

2.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta etapa se determinó el grado de afectación de los valores de sustentabilidad ambiental al eliminar del criterio tecnológico aquellos indicadores que puedan afectar o favorecer algunas de las alternativas. En este caso se excluyeron los indicadores de consumo de agua y generación de desechos, dado que en la mayoría de tecnologías evaluadas su valor es cero.

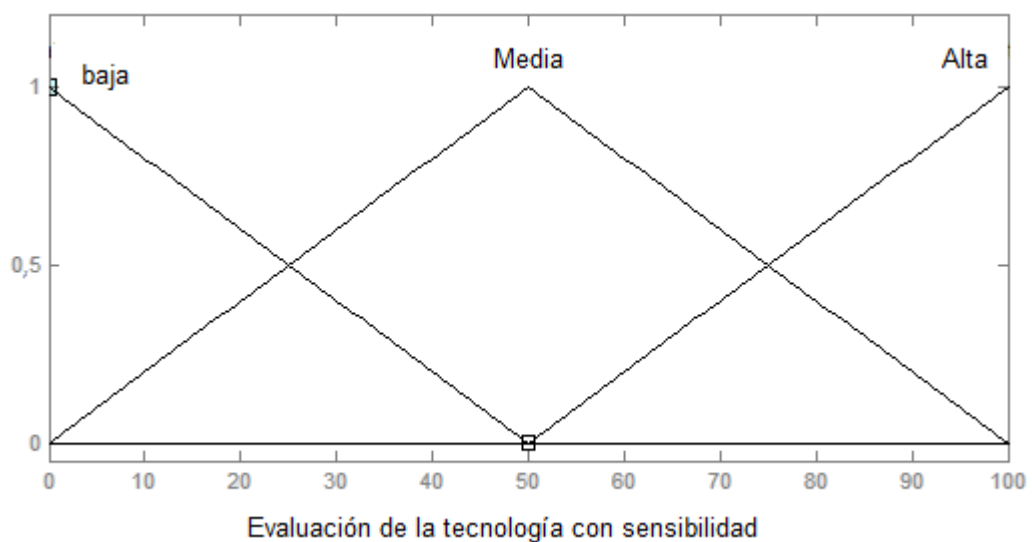
Para realizar el análisis de sensibilidad, la metodología inicialmente planteada para el criterio tecnológico fue modificada, manteniendo la misma fusificación pero disminuyendo el número de variables de entrada a cinco y el número de reglas lógicas 32 combinaciones (ver Anexo C). Como consecuencia de esto el número de categorías de las respuestas del sistema disminuyó como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías lingüísticas para la defusificación del criterio tecnológico con sensibilidad

Categorías lingüísticas	Número de indicadores con valores altos
Alta	0-1
Media	2-3
Baja	4-5

La defusificación mantiene las mismas funciones de pertenencia *trimf* para describir tres categorías: Baja, Media y Alta, distribuidas en un rango de 0 a 100 las cuales representan el porcentaje del valor de la evaluación del criterio tecnológico (ver Figura 9). Finalmente, se procedió a realizar nuevamente la matriz de decisión para obtener los valores de sustentabilidad ambiental, manteniendo los mismos valores para el criterio oferta - demanda.

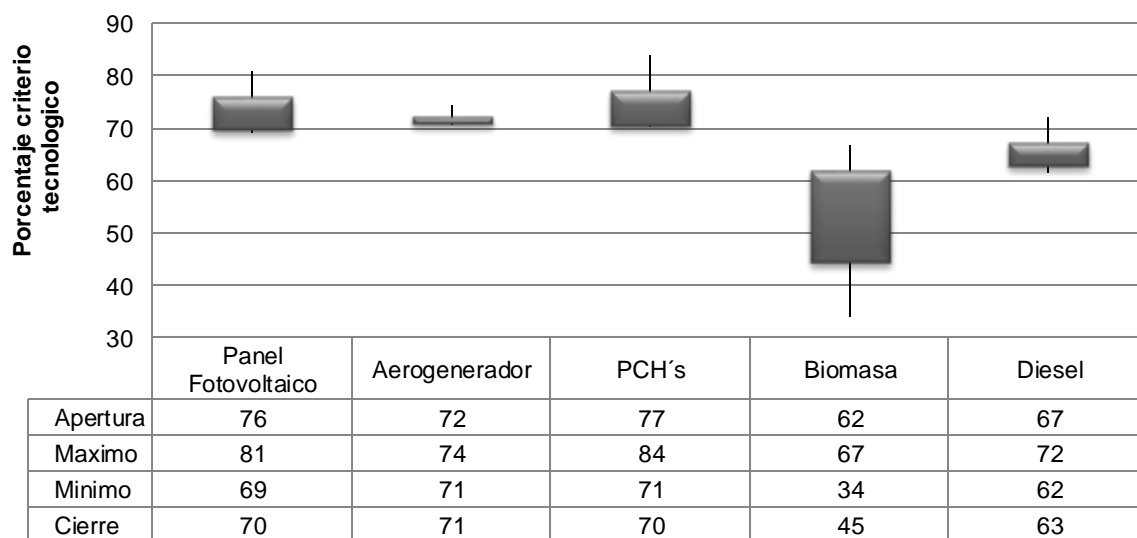
Figura 9. Respuesta a la variable de salida con sensibilidad.



3 RESULTADOS: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En la Figura 10 se muestran los rangos de la evaluación del criterio tecnológico para cada tecnología, siendo los extremos de las líneas los valores máximos y mínimos que se obtuvieron al realizar la evaluación de cien combinaciones. Los diagramas de caja muestran el rango donde se concentra la mayoría de las combinaciones evaluadas (el 68% de los datos). Cabe destacar que la tecnología de aerogeneradores presenta la mayoría de las combinaciones entre un rango del 71% al 72%, lo que implica una pequeña variación en el valor de sus indicadores, mientras que la tecnología de biomasa presenta el mayor rango entre 45% y 62% de la mayoría de sus combinaciones, esto indica una gran dispersión en los valores de sus indicadores.

Figura 10. Diagrama de evaluación del criterio tecnológico



Por otro lado, las tecnologías de PCH's con un promedio de evaluación del criterio tecnológico de 74%, paneles fotovoltaicos de 73% y aerogeneradores de 72% presentan los resultados más altos de este criterio, esto se debe principalmente a los valores bajos de los indicadores de emisiones de GEI, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y material particulado, adicionalmente los indicadores de consumo de agua y generación de desechos son cero para estas tecnologías,

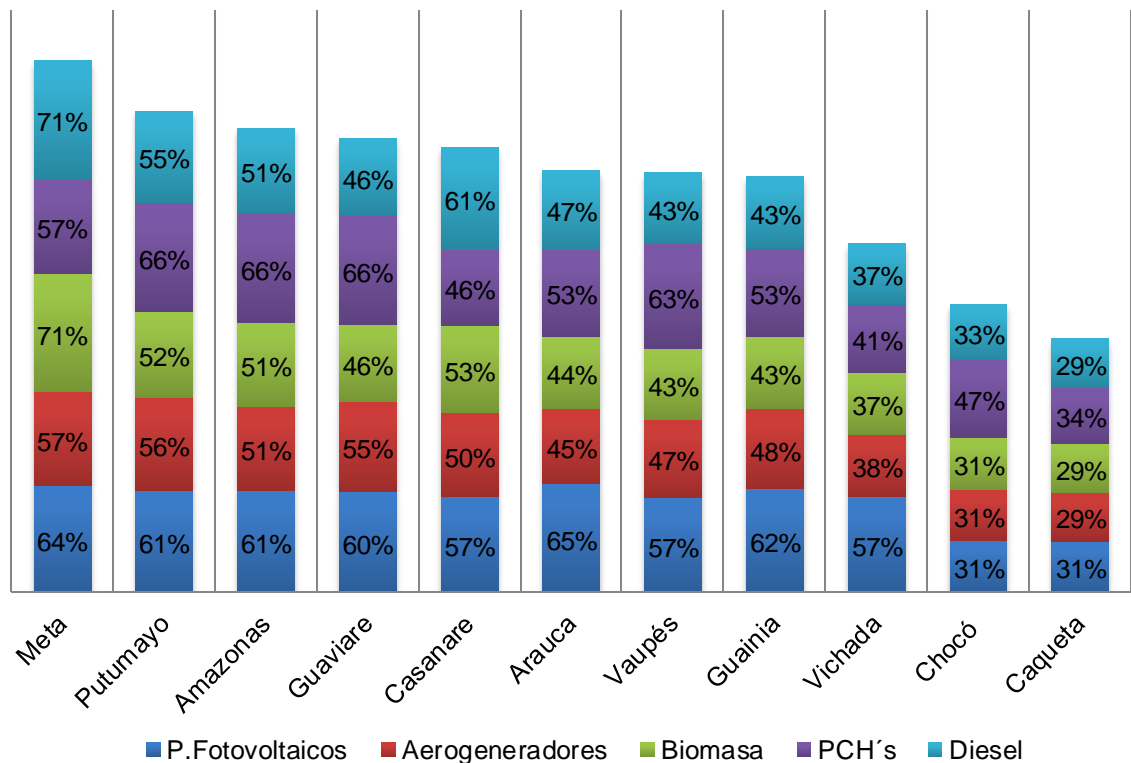
mientras que las plantas de generación diésel presentan un promedio de 65% y las de generación a partir de combustión de biomasa de 53%, debido a que los valores de las emisiones son más altos en ambas tecnologías; es de resaltar que las plantas de biomasa presentan la menor evaluación del criterio debido a que tiene un valor diferente de cero en el indicador generación de desechos.

Los resultados del criterio oferta-demanda se muestran en la

Figura 11, en ella se observa que los departamentos de Meta, Putumayo y Amazonas presentan los mejores escenarios para la implementación de las alternativas evaluadas, dado que la demanda de energía eléctrica es baja y la disponibilidad de recursos es alta, destacándose para el departamento del Meta las tecnologías de plantas de generación a partir de biomasa y plantas de generación diésel, para los departamentos de Putumayo y Amazonas se destaca la tecnología de PCH's. En contraste, los departamentos de Chocó y Caquetá son los que presentan un peor escenario dado que el indicador de disponibilidad de recursos es bajo y la demanda de energía eléctrica es alta, para estos departamentos se destaca la tecnología de PCH's.

Con relación a los paneles fotovoltaicos se presentan como primera alternativa en los departamentos de Arauca y Guainía, mientras que los aerogeneradores no se destacan en ninguno de los departamentos, esto se debe a las bajas velocidades de viento reportadas en cada departamento que hace parte de este estudio.

Figura 11. Porcentaje de disponibilidad de oferta (disponibilidad de recursos) más demanda (hogares sin servicio) en las ZNI.

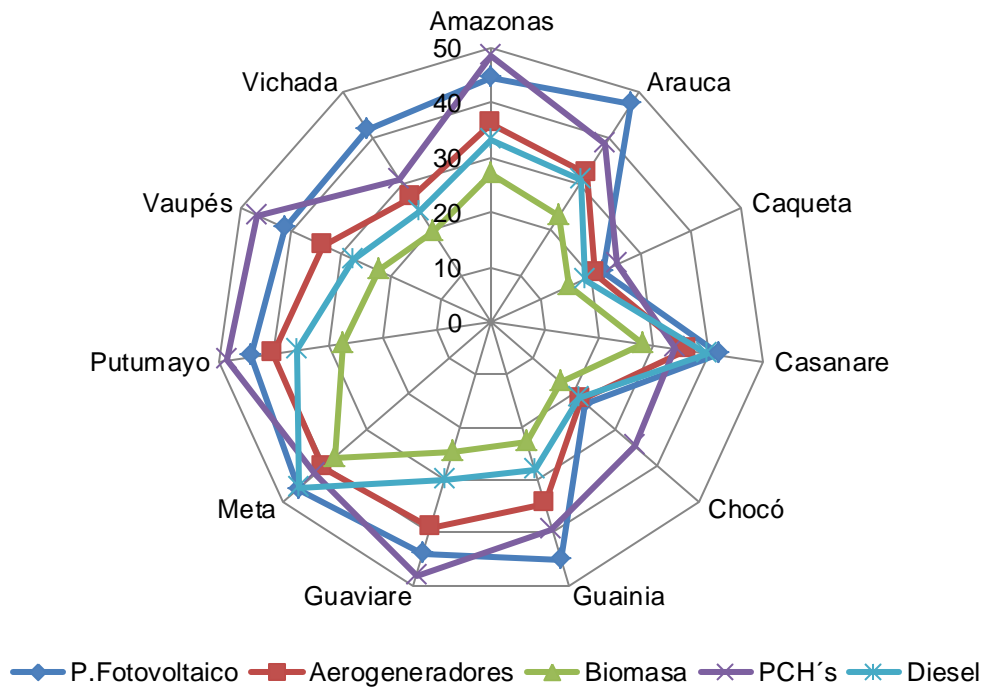


En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 12 se observan los resultados del análisis de sustentabilidad ambiental, la cual se obtuvo a partir de la matriz de decisión. En ella se puede observar que las plantas de combustión de biomasa son las que presentan los valores más bajos de sustentabilidad en todos los departamentos, incluso en aquellos departamentos donde el criterio oferta-demanda para esta tecnología era alto como Meta y Casanare, lo cual se

debe a los altos valores de emisiones (GEI, NO_x, SO₂ y MP), y generación de desechos, también cabe resaltar la falta de disponibilidad de biomasa residual de cultivos agrícolas en estos departamentos exceptuando a Meta y Casanare [34].

Por otra parte, las plantas de generación diésel presentan un mejor comportamiento que las plantas de biomasa incluso destacándose en los departamentos de Meta y Casanare. Esta tecnología sobresale por encima de la biomasa dado que tiene mayor disponibilidad de recursos y su indicador de generación de desechos es cero.

Figura 12. Esquema radial de la evaluación de sustentabilidad ambiental



En cuanto a los aerogeneradores a pesar de tener evaluaciones tecnológicas altas, la ausencia de velocidades de viento superiores a 4 m/s (oferta baja), la muestra como una opción poco atractiva para la mayoría de los departamentos e incluso puede llegar a tener evaluaciones de sustentabilidad ambiental inferiores o iguales a las plantas diésel en algunos departamentos como Arauca, Caquetá y

Meta. Esto quiere decir, que el criterio oferta-demanda es el que tiene mayor influencia para esta tecnología.

Las PCH's se destacan como primera alternativa para los departamentos de Amazonas, Caquetá, Chocó, Guaviare, Putumayo y Vaupés, esta tecnología presenta los valores más bajos de emisiones comparada con las otras alternativas, adicionalmente, el potencial hidro-energético de estos departamentos es el más alto.

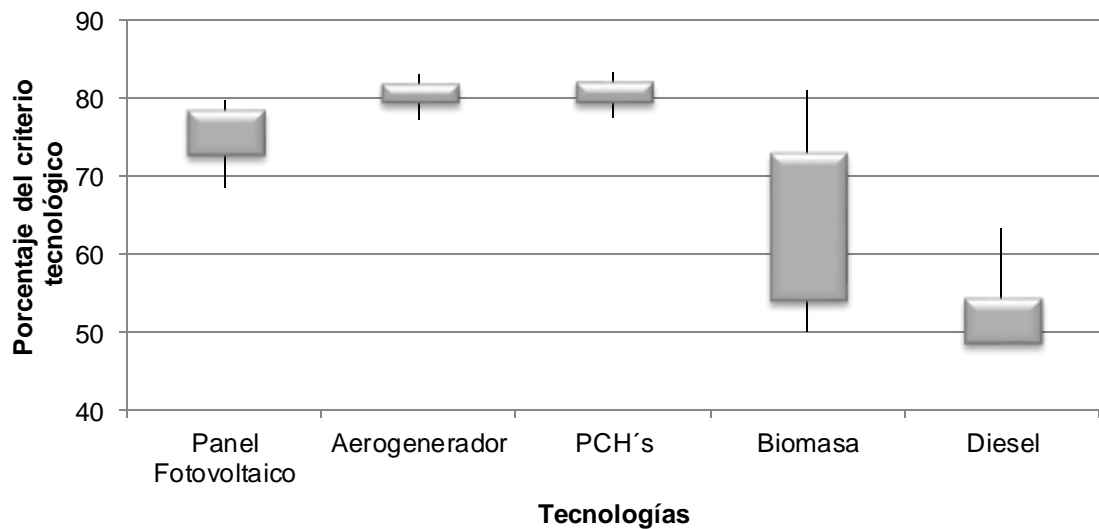
Por último, la alternativa de paneles fotovoltaicos se destaca para los departamentos de Arauca, Casanare, Guainía, Meta y Vichada al presentar los valores más altos de sustentabilidad ambiental siendo el criterio oferta - demanda el que da mayor peso a esta tecnología en estos departamentos.

Cabe resaltar que en el departamento de Caquetá las opciones de PCH's, paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y plantas diésel tienen valores cercanos de evaluación de sustentabilidad ambiental lo cual puede traducirse en la utilización de cualquiera de estas alternativas, mientras que, para el departamento del Chocó la tecnología de más peso son las PCH's superando a cualquiera de las otras alternativas con una evaluación del 35% y para el departamento de Vichada los paneles fotovoltaicos sobresalen sobre las demás tecnologías con una evaluación del 42%.

El resultado del criterio tecnológico, realizando el análisis de sensibilidad se muestra en la Figura 13, en ésta se pudo observar que las alternativas de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y PCH's mantienen las mismas tendencias al realizar la evaluación de este criterio con cinco indicadores, caso contrario ocurre con las plantas de biomasa, que aumentan el valor de su evaluación y desplazan a las plantas diésel a la peor evaluación de este criterio, lo cual se debe principalmente a la eliminación del indicador generación de desechos que afectaba solamente a la tecnología de biomasa.

Al realizar el análisis de sensibilidad, mostrado en la Figura 14, se puede observar que las tecnologías de PCH's, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores mantienen la misma clasificación en cada departamento, pero las plantas de combustibles diésel pasan a tener el peor comportamiento en todos los departamentos debido a que es la tecnología que presenta los valores más altos en emisiones.

Figura 13. Diagrama de análisis de sensibilidad del criterio tecnológico

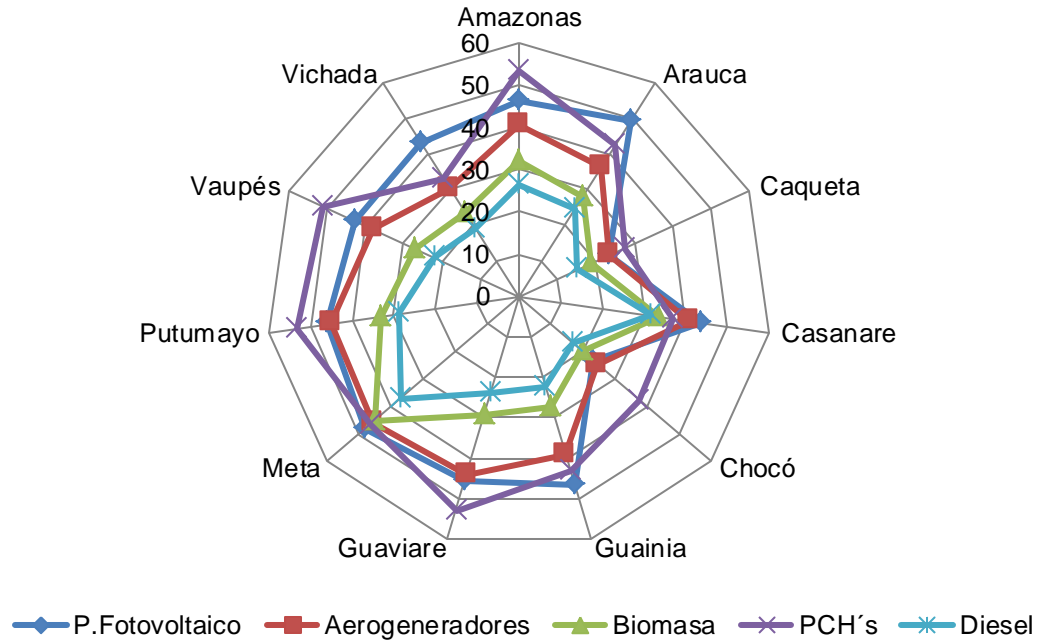


En términos generales, la prestación del servicio de energía eléctrica en las ZNI se favorecerá desde el punto de vista ambiental con la implementación en su orden de PCH's, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, dejando en segundo plano a las plantas de combustión de biomasa y plantas diésel, estas dos últimas presentan comportamientos similares en la evaluación de sustentabilidad ambiental y se ven favorecidas principalmente por el criterio oferta-demanda, lo que se traduce en disponibilidad de recursos altos y demanda de energía eléctrica baja.

Estudios similares hechos para seleccionar la tecnología más sustentable ambientalmente en Italia en 2013 [35] y en Australia en 2009 [36], implementando datos de ACV y facilitando la decisión mediante una herramienta de multicriterio proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) para seleccionar la

mejor alternativa en función de los criterios ambientales, se encontró que las tecnologías renovables tienen los mejores valores, resultando al igual que en este trabajo que las PCH's.

Figura 14. Esquema radial de la evaluación de sustentabilidad ambiental con sensibilidad



4 CONCLUSIONES

Para el abastecimiento del servicio de energía eléctrica en las ZNI teniendo en cuenta el punto de vista ambiental, se consolidan como principales alternativas para la mayoría de los departamentos las tecnologías de PCH's y paneles fotovoltaicos.

En procesos de combustión de biomasa para la generación de energía eléctrica en calderas se producen desechos sólidos, la mayoría cenizas, lo que se traduce en un indicador generación de desechos alto, mostrando esta tecnología como la menos sustentable en comparación con las otras alternativas.

Al excluir el consumo de agua y generación de desechos en los indicadores ambientales en el análisis de sensibilidad, la tecnología de generadores diésel pasó a ser menos sustentable y la combustión de biomasa a obtener mejores resultados, esto se debe a los altos valores de los indicadores de emisiones.

5 RECOMENDACIONES

Para el caso de estudios de evaluaciones de procesos de generación de energía eléctrica en las ZNI de Colombia, se recomienda emplear los resultados obtenidos en este estudio junto con un análisis de sustentabilidad técnico, económico y social para cada tecnología, esto con el propósito de ampliar los criterios para la toma decisiones sobre la implementación de estas alternativas.

Para industrias o empresas que deseen implementar la tecnología de plantas de combustión de biomasa se recomienda buscar una solución ecológica para el tratamiento de los desechos generados, como por ejemplo, la utilización de las cenizas como fertilizantes en actividades agrícolas o la implementación en procesos industriales de producción de acero y hormigón.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, "Our Common Future," Oxford University Press, Oxford, 1987.
- [2] Organización Internacional de Energía Atómica, *Indicadores Energeticos del Desarrollo Sostenible: Directrices y metodologías*. Viena, Austria: OIEA, 2008.
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética. (2012, Octubre) UPME. [Online]. http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/UPME_Simposio_I_PSE_Oct2012.pdf
- [4] Juan Jose Castro Feria and Omar Daniel Hernández Moreno, "Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía.," Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, Tesis de grado 2010.
- [5] Juan Carlos Rojas Zerpa, "Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones," Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Tesis doctoral 2012.
- [6] J Baldasano, "Cambio climático, evidencias e impactos," Universidad Politécnica de Cataluña, Cuenca- Ecuador, Seminario Internacional de Energías Renovables 2007.
- [7] Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), "Third assessment report - climate change 2001," WMO – UNEP, 2001.
- [8] Svatava Janousková, Tomás Hák Bedrich Moldan, "How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets.," *Ecological Indicators*, no. 17, pp. 4-13, 2012.
- [9] Jiang Jiang Wang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, and Jun-Hong Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-marking," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 2263-2278, 2009.
- [10] Gang Liu, "Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 31, pp. 611 - 621, 2014.
- [11] Luis Alberto Garcia Leyton, "Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales," Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Tesis doctoral 2004.
- [12] Patricia Jaramillo and Liliana Vinasco, "Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental," *Gestión y Ambiente*, vol. 8, no. 1, pp. 13-34, 2005.
- [13] Electroguayas Central Térmica Trinitaria Celec, "Estudio Tecnológico, Viabilidad Energética y Económico para la Generación Eléctrica Sostenible a través de la Energía Solar, con Aporte al Medio Ambiente," Celec,

- Electroguayas Central Térmica Trinitaria, Guayaquil,.
- [14] B.J Ruiz and V. Rodríguez Padilla, "Renewable energy sources in the Colombian energy policy," *Energy Policy*, vol. 34, pp. 3684-3690, 2006.
- [15] E. Jadraque, J. Alegre, G. Martínez J. Ordoñez, "Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia Spain," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 2122–2130, 2010.
- [16] International Copper Association, "Energías Renovables para Generación de Electricidad en América Latina: mercado, tecnologías y perspectivas," Latinoamérica, Mercado y tecnologías 2010.
- [17] Begoña Guezuraga, Rudolf Zauner, and Werner Pölz, "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 37, pp. 37-44, Juni0 2011.
- [18] Miguel Hernández. (2012, Noviembre) II Máster Energía Solar y Renovable. Documento.
- [19] CORPOEMA, *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de Energía en Colombia*. Bogotá, Colombia, 2010.
- [20] Rudolf Zauner a, Werner Pölz Begoña Guezuraga a, "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines," *Renewable Energy*, pp. 37-44, 2012.
- [21] Farid Chejne Janna, Carlos Mario Ceballos, Sergio Botero Botero, and Ricardo Quijano, "Tecnologías de conversión y recuperación de energía," Medellín - Colombia, 2007.
- [22] Unidad de Planeación Minero Energetica, "Energías Renovables: Descripción, tecnologías y usos finales," Bogota D.C.,.
- [23] Ministerio de Minas y Energias. (2014, Enero) Ministerio de Minas y Energias. [Online].
http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2011/05-ENERGIA.pdf
- [24] Fatih Dermibas, Mustafa Balat, and Hawa Balat, "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development," *El Servier*, pp. 1746-1760, 2009.
- [25] Peter McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresource Technology*, pp. 47-54, 2002.
- [26] Fabio Emiro Sierra Vargas, Adriana Fernanda Sierra Alarcón, and Carlos Alberto Guerrero Fajardo, "Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.," *Informador Técnico Colombia*, vol. Edicion 75 , pp. 73 - 85 , Enero-Diciembre 2011.
- [27] José Luz Silveira , Joao Andrade Carvalho, and Iraídes Aparecida Castro Villela, "Combined cycle versus one thousand diesel power plants: pollutant emissions, ecological efficiency and economic analysis," *Renewable & sustainable energy reviews*, no. 11, pp. 524-535, 2007.

- [28] Armando Llamas et al., "Tecnologías y combustibles para la generación eléctrica," Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Ponencia 2004.
- [29] Pablo Díaz , Rafael Peña, Carlos Alberto Arias, and Daniel Sandoval, "Estudio de campo de la generación híbrida diesel/renovable para electrificación rural.," Universidad de Alcalá, Cusco, Ponencia 2010.
- [30] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Bases conceptuales para la regulación de la prestación del servicio de electricidad en las zonas no interconectadas," Bogotá, Documento CREG-073 2003.
- [31] Robert W. Kates, Thomas M. Parris, and Anthony A. Leiserowitz, "What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice," *Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 3, no. 47, pp. 8-21, Abril 2005.
- [32] AF Sherwani and JA Usmani, "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14, pp. 540-4, 2010.
- [33] European Environmental Agency, "Life cycle assessment: a guide to approaches, experiences and information sources," 2001.
- [34] Unidad de Planeación Minero Energetica, *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá, Colombia, 2010.
- [35] V. Naddeo, V. Belgiorno D. Scannapieco, "Sustainable power plants: A support tool for the analysis of alternatives," *Land Use Policy*, pp. 478-484, septiembre 2013.
- [36] Annette Evans, Vladimir Strezov, and Tim Evans, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 1082-1088, Marzo 2009.
- [37] Natural Resources Defense Council , "Beneficios Económicos de energías renovables no convencionales en Chile," Asociacion Chilena de energias renovables, Santiago de Chile, Reporte 2013.
- [38] Roberto Turconi, Alessio Boldrin, and Thomas Astrup, "Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 28, pp. 555-565, Septiembre 2012.
- [39] Martin Pehnt, "Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies," *Renewable Energy*, no. 31, pp. 55-71, 2006.
- [40] Andreas Sumper, Mercedes Robledo García, and Roberto Villafáfila Robles, "life cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 15, pp. 3888-3896, 2011.
- [41] Franco Ruzzenenti et al., "Evaluation of the environmental sustainable of a micro CHP system fueled by low-temperature geothermal and solar energy," *Energy Conversion and Management*, no. 78, pp. 611-616, 2014.
- [42] Nesrin Demir and Takif Taskin, "Life cycle assessment of wind turbines in

- Pınarbası, Kayseri," *Journal of Cleaner Production*, no. 54, pp. 253-263, Abril 2013.
- [43] Manfred Lenzen and Jesper Munksgaard, "Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications," *Renewable Energy*, no. 26, pp. 339-362, Junio 2002.
- [44] Hanne Lerche Raadal, Luc Gagnon, and Modah Saur Modahl, "Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3417-3422, Abril 2011.
- [45] Mihály Dombi, István Kuti, and Péter Balogh, "Sustainability assessment of renewable power and heat generation technologies," *Energy Policy*, no. 67, pp. 264-271, 2014.
- [46] Andrew Pascale, Tania Urmee, and Andrew Moore, "Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand," *Renewable Energy*, no. 36, pp. 2799-2808, Mayo 2011.
- [47] Toolseeram Ramjeawon, "Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius," *Journal of Cleaner Production*, no. 16, pp. 1727-1734, Marzo 2008.
- [48] Maylier Pérez Gil, Ana M. Contreras Moya, and Elena Rosa Domínguez, "Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 222-231, Agosto 2013.
- [49] Richard van den Broeka, Tsjalle van den Burgb, and Wim Turkenburg, "Electricity generation from eucalyptus and bagasse by sugar mills in Nicaragua: A comparison with fuel oil electricity generation on the basis of costs, macro-economic impacts and environmental emissions," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, pp. 311-335, Mayo 2000.
- [50] C. Mbohwa, V.M. Thomas L. Mashoko, "Life cycle inventory of electricity cogeneration from bagasse in the South African sugar Industry," *Journal of Cleaner Production*, no. 39, pp. 42-49, 2013.
- [51] Unidad de Planeación Minero Energética, *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá, Colombia, 2005.
- [52] Unidad de Planeación Minero Energética, *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Bogotá, Colombia, 2006.
- [53] Unidad de Planeación Minero Energética. (2014, Enero) SI3EA. [Online]. http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Novena%20sesion/PRESENTA_UPME.pdf
- [54] Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, "Censo General 2005 Nivel Nacional," Bogotá, ISBN: 978-958-624-072-7,.
- [55] Universidad Nacional de Colombia, "Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial y determinación de consumos para equipos domésticos de energía eléctrica y gas," Facultad de Ciencias, Bogotá, Resumen Ejecutivo 2006.

[56] Unidad de Planeación Minero Energética. (2014, Febrero) Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL. [Online]. https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CC0QFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.siel.gov.co%2Fportals%2F0%2Fgeneracion%2FCobertura_Base_2011_PIEC_2012_2016.xls&ei=Py9XU5eFEKrfSATDj4GgCg&usg=AFQjCNH1_hGvX7y5qAqNT_Cno_Px

BIBLIOGRAFIA

Annette Evans, Vladimir Strezov, and Tim Evans, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 1082-1088, Marzo 2009.

B.J Ruiz and V. Rodríguez Padilla, "Renewable energy sources in the Colombian energy policy," *Energy Policy*, vol. 34, pp. 3684-3690, 2006.

Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Bases conceptuales para la regulación de la prestación del servicio de electricidad en las zonas no interconectadas," Bogotá, Documento CREG-073 2003.

CORPOEMA, *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de Energía en Colombia*. Bogotá, Colombia, 2010.

Farid Chejne Janna, Carlos Mario Ceballos, Sergio Botero Botero, and Ricardo Quijano, "Tecnologías de conversión y recuperación de energía," Medellín - Colombia, 2007.

Gang Liu, "Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 31, pp. 611 - 621, 2014.

International Copper Association, "Energías Renovables para Generación de Electricidad en América Latina: mercado, tecnologías y perspectivas," Latinoamérica, Mercado y tecnologías 2010.

J Baldasano, "Cambio climático, evidencias e impactos," Universidad Politécnica de Cataluña, Cuenca- Ecuador, Seminario Internacional de Energías Renovables 2007.

Jiang Jiang Wang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, and Jun-Hong Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-marking," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 2263-2278, 2009.

Juan Carlos Rojas Zerpa, "Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones," Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Tesis doctoral 2012.

Juan Jose Castro Feria and Omar Daniel Hernández Moreno, "Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía.," Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, Tesis de grado 2010.

Luis Alberto Garcia Leyton, "Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales," Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Tesis doctoral 2004.

[Ministerio de Minas y Energías. \(2014, Enero\) Ministerio de Minas y Energías. \[Online\]. http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2011/05-ENERGIA.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2011/05-ENERGIA.pdf)

Organización Internacional de Energía Atómica, *Indicadores Energeticos del Desarrollo Sostenible: Directrices y metodologías*. Viena, Austria: OIEA, 2008.

Patricia Jaramillo and Liliana Vinasco, "Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental," *Gestión y Ambiente*, vol. 8, no. 1, pp. 13-34, 2005.

Robert W. Kates, Thomas M. Parris, and Anthony A. Leiserowitz, "What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice," *Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 3, no. 47, pp. 8-21, Abril 2005.

Svatava Janousková, Tomás Hák Bedrich Moldan, "How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets.," *Ecological Indicators*, no. 17, pp. 4-13, 2012.

Unidad de Planeación Minero Energetica, "Energías Renovables: Descripción, tecnologías y usos finales," Bogota D.C.,.

ANEXOS

Anexo A. Cuantificación de los indicadores

A continuación se muestra en detalle la revisión bibliográfica elaborada para obtener los valores de todos los indicadores utilizados en este estudio para el análisis de sustentabilidad ambiental.

Tabla 6. Revisión bibliográfica para paneles fotovoltaicos

Paneles fotovoltaicos									
Indicadores	Fuentes bibliográficas							Min	Max
	[37]	[38]	[39]	[36]	[40]	[41]	[35]		
Emisiones GEI [gr/kWh]	(-)	190	99	90	45	190	104	45	190
Emisiones SO₂ [gr/kWh]	(-)	0,34	0,28	(-)	(-)	0,29	0,17	0,17	0,34
Emisiones NO_x [gr/kWh]	(-)	0,4	0,34	(-)	(-)	0,4	0,30	0,30	0,4
Emisiones MP [gr/kWh]	(-)	(-)	0,09	(-)	(-)	(-)	0,15	0,09	0,15
Consumo de agua [m³/kWh]	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	0
Uso de suelo [m²/kWh]	45	(-)	64	(-)	16	30	(-)	16	64
Generación de desechos [kg/kWh]	0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	0

(-) No registra

Tabla 7. Revisión bibliográfica para aerogeneradores

Aerogeneradores											
Indicadores	Fuentes bibliográficas									Min	Max
	[42]	[43]	[37]	[44]	[38]	[39]	[36]	[20]	[35]		
Emisiones GEI [gr/kWh]	40,4	48,2	9	55	41	10	25	41	29	9	55,4
Emisiones SO₂ [gr/kWh]	0,13	0,31	0,09	(-)	0,09	0,04	(-)	0,09	(-)	0,04	0,31
Emisiones NO_x [gr/kWh]	(-)	0,06	0,06	(-)	0,11	0,03	(-)	0,11	(-)	0,03	0,11
Emisiones MP [gr/kWh]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,04	0,06	0,10	0,07	0,04	0,10
Consumo de agua [m³/kWh]	(-)	0	(-)	(-)	(-)	(-)	1	(-)	(-)	0	0
Uso de suelo [m²/kWh]	(-)	30	(-)	(-)	55	(-)	45	(-)	60	30	60
Generación de desechos [kg/kWh]	(-)	0	(-)	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	0

(-) No registra

Tabla 8. Revisión bibliográfica para PCH's

PCH's										
Indicadores	Fuentes bibliográficas								Min	Max
	[37]	[45]	[46]	[44]	[38]	[39]	[36]	[45]		
Emisiones GEI [gr/kWh]	(-)	9	52,7	60	20	13	41	18	9	60
Emisiones SO ₂ [gr/kWh]	(-)	0,03	0,37	(-)	0,03	0,03	(-)	(-)	0,03	0,37
Emisiones NO _x [gr/kWh]	(-)	0,07	0,03	(-)	0,06	0,05	(-)	(-)	0,03	0,07
Emisiones MP [gr/kWh]	(-)	(-)	0,02	(-)	(-)	0,03	0,11	0,06	0,02	0,11
Consumo de agua [m ³ /kWh]	0	(-)	(-)	0,02	(-)	(-)	(-)	(-)	0	0,02
Uso de suelo [m ² /kWh]	13	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	75	(-)	13	75
Generación de desechos [kg/kWh]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	0

(-) No registra

Tabla 9. Revisión bibliográfica para combustión de biomasa

Combustión de biomasa										
Indicadores	Fuentes bibliográficas							Min	Max	
	[47]	[48]	[49]	[37]	[50]	[38]	[39]			
Emisiones GEI [gr/kWh]	70	60	310	27	130	54	130	27	310	
Emisiones SO ₂ [gr/kWh]	0,1	0,05	2,5	0,16	0,94	0,07	0,94	0,05	2,5	
Emisiones NO _x [gr/kWh]	0,05	1,60	(-)	2,50	1,70	0,30	1,70	0,05	2,5	
Emisiones MP [gr/kWh]	0,01	0,05	(-)	0,08	(-)	0,10	(-)	0,01	0,1	
Consumo de agua [m ³ /kWh]	2	1,10	2,1	(-)	(-)	(-)	(-)	1,10	2,1	
Uso de suelo [m ² /kWh]	(-)	10	3	(-)	5	4	(-)	3	10	
Generación de desechos [kg/kWh]	2220	(-)	(-)	1500	(-)	2000	(-)	1500	2220	

(-) No registra

Tabla 10. Revisión bibliográfica para plantas diésel

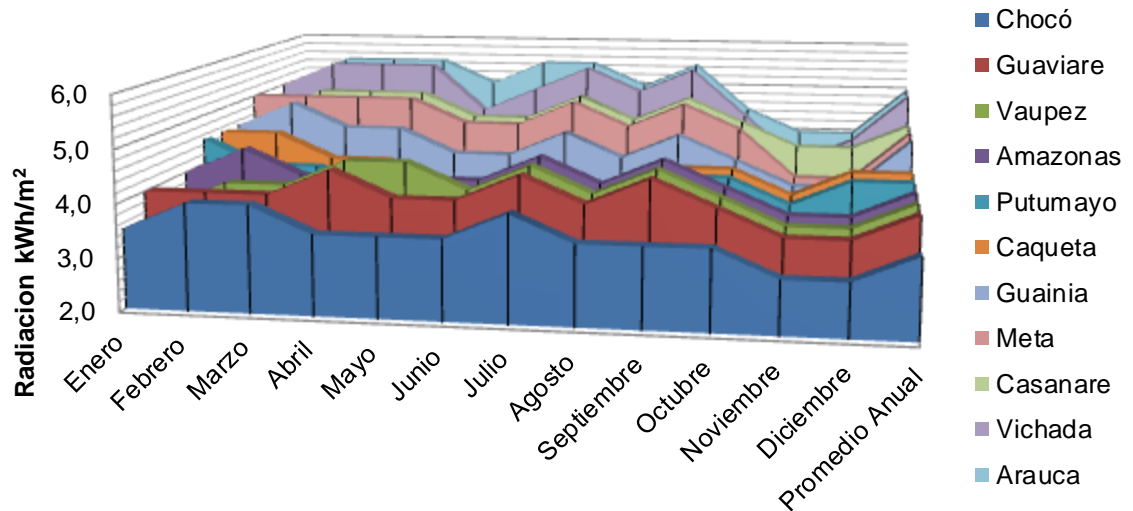
Indicadores	Plantas diésel				
	[27]	[28]	[35]	Min	Max
Emisiones GEI [gr/kWh]	260	560	700	260	700
Emisiones SO ₂ [gr/kWh]	0,82	0,85	0,9	0,82	0,9
Emisiones NO _x [gr/kWh]	0,23	0,5	0,6	0,23	0,6
Emisiones MP [gr/kWh]	1,28	(-)	1,4	1,28	1,4
Consumo de agua [m ³ /kWh]	0	(-)	0	0	0
Uso de suelo [m ² /kWh]	1	(-)	9	1	9
Generación de desechos [kg/kWh]	(-)	(-)	(-)	0	0

(-) No registra

Potencial de radiación solar. El potencial de radiación solar fue tomado de “Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana”, los cuales, son una colección de 13 mapas, uno mensual y uno con el promedio anual que muestran la cantidad de energía de la radiación solar que incide por metro cuadrado sobre la superficie horizontal del territorio colombiano [51].

En base a esta información, se recopilaron los datos de radiación solar reportada mes a mes y el promedio anual para los 11 departamentos de las ZNI, tomando el valor de radiación que presentó mayor tendencia para cada departamento (ver Figura 15), donde se puede observar que los departamentos con mayor potencial de radiación solar son: Arauca y Vichada, seguido de Casanare, Meta y Guaina en contraste, los de menor potencial son Chocó, Guaviare, Vaupés y Amazonas, esto se debe a la presencia de grandes extensiones de zonas selváticas y clima tropical. Adicionalmente los meses donde se presenta una importante disminución de la radiación solar son noviembre y diciembre.

Figura 15. Potencial de radiación de energía solar mensual año 2004

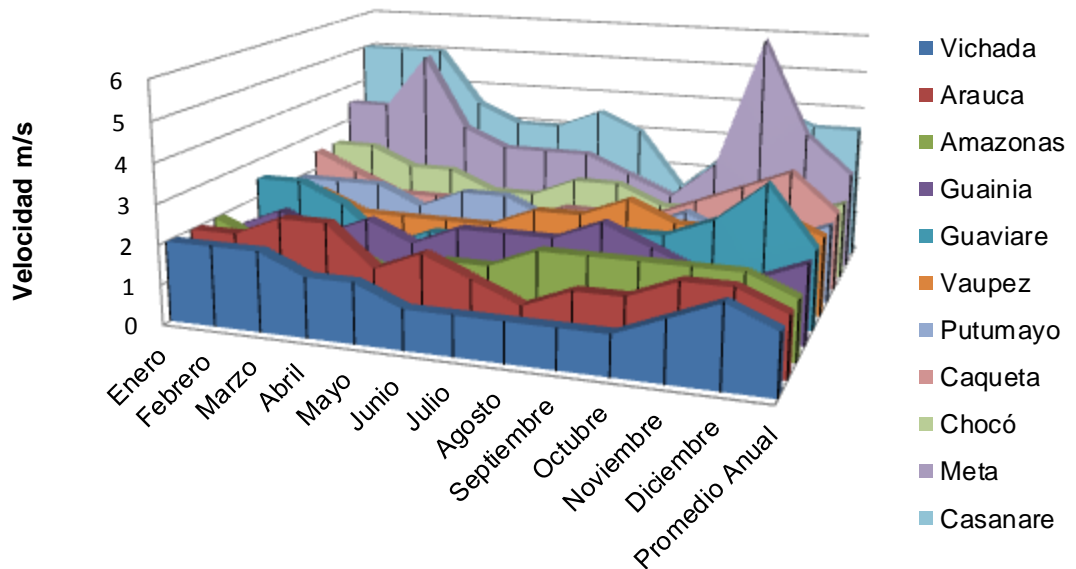


Fuente. Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana

Velocidad del viento. El potencial de energía eólica fue tomado de “Atlas de viento y energía eólica de Colombia”, este estudio mide la velocidad del viento en metros por segundo que alcanza este a 10 metros de altura, como lo indica la norma internacional establecida por la organización meteorológica mundial. El documento expone los resultados obtenidos en trece mapas, (uno mensual y el promedio anual) [52].

La obtención de la información de la velocidad del viento, tuvo en cuenta, para los departamentos de estudio, la mayor tendencia en cada departamento. A partir de esto se puede afirmar que el mayor promedio anual lo alcanza el departamento de Casanare, con un valor de 3,5 m/s, los demás departamentos presentan valores promedio de 2,5 m/s a 1,5 m/s. El departamento de Casanare a pesar de tener un alto promedio, presenta además variaciones en la velocidad del viento en el transcurso del tiempo, teniendo su valor más alto en el mes de noviembre con 4 m/s y su valor más bajo en septiembre con un valor 1,5 m/s.

Figura 16. Velocidad del viento año 2005.



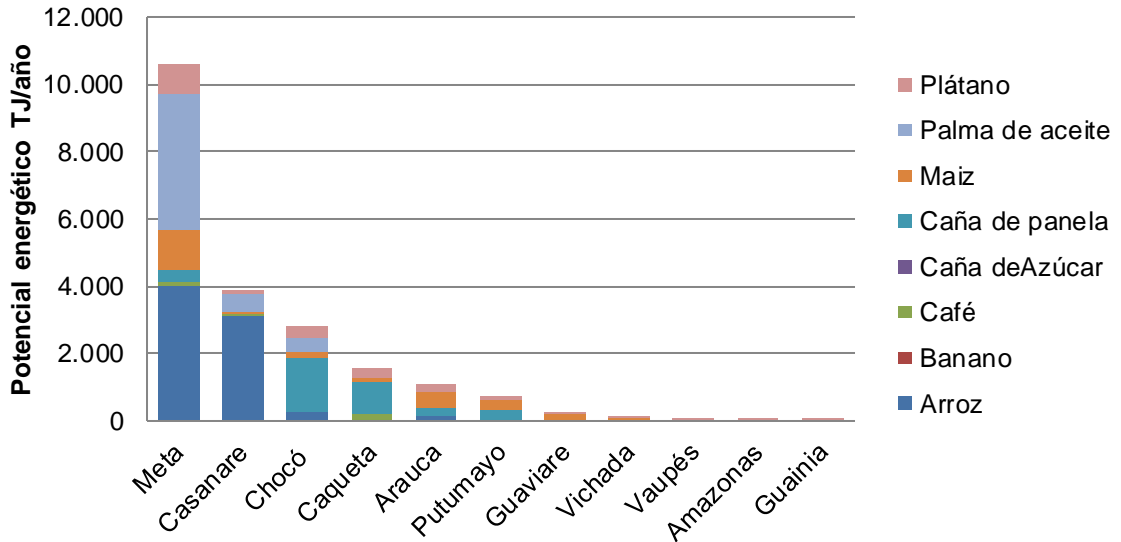
Fuente. Atlas de viento y energía eólica de Colombia

Potencial energético de biomasa residual para cultivos permanentes. La información del potencial energético de biomasa fue tomada de “Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia”, el cual se compone de 52 mapas que comprenden las zonas de producción, área cultivada, cantidad de biomasa residual, el potencial energético y el rendimiento neto de energía, discriminado por cultivos transitorios y permanentes teniendo en cuenta ocho cultivos principales: arroz, maíz, banano, café, caña de azúcar, caña panelera, palma de aceite y plátano. Para el caso de estudio, se analizaron los valores del potencial energético anual de los residuos de cultivos agrícolas permanentes medidos en Tera-Julios año (TJ/año) [34].

De acuerdo con la Figura 17, los departamentos de Meta, Casanare y Chocó presentan un potencial energético atractivo para la implementación de plantas de generación eléctrica a partir de biomasa residual de cultivos permanentes como arroz, palma de aceite y caña de panela. Los departamentos pertenecientes a la

selva del amazonas son los que presentan un menor potencial energético, debido a la ley 2 de 1959 de protección a las reservas forestales.

Figura 17. Potencial energético de biomasa residual de cultivos agrícolas permanentes año 2006



Fuente. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia

Potencial físico hidro-energético. El potencial hidroenergético en Colombia no cuenta con estudios detallados, solo se tienen estimaciones preliminares, las cuales tienen en cuenta dos aspectos para cualificar este potencial; la escorrentía (peso 60%) y la pendiente del terreno (peso 40%). El potencial físico hidroenergético lo clasifican como alto, medio alto, medio bajo, bajo y muy bajo. Según esta clasificación (ver Tabla 11), los departamentos de Guainía, Meta, Casanare, Vichada y Arauca clasifican cualitativamente como de bajo potencial, mientras que los departamentos de Guaviare, Vaupés, Amazonas, Putumayo, Caquetá están cualificados en nivel medio bajo y el departamento del Chocó presentan clasificación medio alta [53]. En general, la mayor parte de los llanos orientales presenta una clasificación de medio bajo a bajo, mientras que las zonas de las cordilleras presentan potenciales medio alto, a alto.

Tabla 11. Potencial físico hidroenergético

Departamento	Potencial físico hidroenergético
Guainía	Baja
Meta	Baja
Casanare	Baja
Vichada	Baja
Arauca	Baja
Guaviare	Medio Bajo
Vaupés	Medio Bajo
Amazonas	Medio Bajo
Putumayo	Medio Bajo
Caquetá	Medio Bajo
Chocó	Medio Alto

Fuente. Unidad de planeación minero energética (2014, Enero) SI3EA. [Online]

Potencial para plantas diésel. El electrocombustible definido en la resolución No 181191 de 2002 del ministerio de minas y energía como ACPM (Aceite Combustible Para Motores) y el cual el principal utilizado es el Diésel, sólo puede ser utilizado por electrificadoras, empresas de energía eléctrica, asociaciones de usuarios, comités de energía, juntas administradoras de energía eléctrica o entes prestadores del servicio autorizados y aprobados por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas, o quien haga sus veces, y en los volúmenes que el Instituto autorice, de acuerdo con la capacidad instalada de los grupos electrógenos, el número de usuarios atendidos y la generación diaria. Es por esto que el potencial de diésel es suministrado por la empresa Colombiana Ecopetrol, a través de los distribuidores mayoristas, suministra electrocombustible a electrificadoras ubicadas en algunos de los municipios de Antioquia, Caquetá, Cauca, Chocó, Guainía, Guaviare, Meta, Nariño, Putumayo, Valle, Vaupés y Vichada.

El alto costo del combustible en las ZNI está afectado principalmente por el valor del transporte hasta el lugar de consumo aunque el electrocombustible está exento del pago del impuesto global y la sobretasa, cuando éste sea usado en generación eléctrica en las ZNI. El suministro del combustible es en barriles y se tiene datos encontrados por fuente de Ecopetrol de barriles por mes (Tabla

12Tabla 12). Los mayores departamento que solicitan son meta con 888.862 Barriles/mes, seguido de Casanare y Choco.

Tabla 12. Mercado de combustible diésel para ZNI

Departamento	Combustible diésel [Barriles/mes]
Amazonas	22.691
Arauca	159.450
Caquetá	135.740
Casanare	488.144
Choco	323.501
Guainía	4.186
Guaviare	36.326
Meta	886.862
Putumayo	137.678
Vaupés	2.116
Vichada	12.898

Fuente. Planificación Energética

Demanda de energía eléctrica en ZNI. La demanda de energía eléctrica se establece solo al sector residencial, pues en las zonas de estudio, la existencia de grandes industrias es prácticamente nulo y sus actividades económicas están basadas principalmente en servicios para atender las necesidades del turismo y actividades económicas primarias como la agricultura, la ganadería, la explotación minera, entre otras [4], a esto se le suman los bajos niveles de ingresos por persona y la presencia de grupos étnicos, indígenas, afrocolombianos, afrodescendientes que hacen presencia en algunas zonas [54].

La demanda de energía en las ZNI se calcula a partir del consumo promedio mensual por hogar para los estratos uno, dos y tres, teniendo en cuenta electrodomésticos de uso común en la mayoría del territorio nacional, esto con el fin de garantizar igualdad de oportunidades de desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida.

Tabla 13. Tendencia de electrodomésticos y consumo de energía

Electrodoméstico	% tendencia electrodoméstico	Consumo kWh/mes/hogar
Iluminación	100%	30,1
Televisor	99%	8,7
Nevera	91%	47,0
Plancha	90%	9,2
Licuadaora	93%	1,5
Total		96,4

Fuente. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial y determinación de consumos para equipos domésticos de energía eléctrica y gas

El promedio de consumo de energía para el sector residencial de los estratos uno, dos y tres es aproximadamente 96,4 kWh/mes/hogar. Estos datos tienen en cuenta las características más comunes para los electrodomésticos: para iluminación, tres tipos de bombillas (Incandescentes, LFC's, Fluorescentes) con potencias entre 60W a 100W. Para televisores el tamaño, siendo el más común de 15 a 21 pulgadas, igualmente el tamaño para neveras de 9 a 12 pies cúbicos, para planchas con potencias de 1000W o menos y licuadoras de potencia menor a 450W [55].

Por consiguiente, para los 11 departamentos que hacen parte de este estudio, se identificaron la cantidad de viviendas sin servicio de energía eléctrica tanto en cabecera municipal como en áreas rurales (ver Tabla 14). Estos datos fueron calculados a partir de la información reportada en Unidad de Planeación Minero Energética, en el Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL [56]

Tabla 14. Identificación del número de viviendas sin servicio de energía eléctrica

Departamento	Viviendas CM	Viviendas Resto	VSS Cabecera Municipal	VSS Resto	Demanda VSS en CM [MWh/año]	Demanda VSS en resto [MWh/año]
Amazonas	4.972	9.316	0	2.682	0	3.103
Arauca	33.072	25.536	615	6.124	711	7.084
Caquetá	66.316	40.683	2.839	12.251	3.284	14.172
Casanare	59.181	23.978	2.624	4.551	3.035	5.265
Chocó	65.779	60.336	2.262	17.533	2.617	20.282
Guainía	2.808	5.894	579	2.122	670	2.455
Guaviare	10.110	12.979	318	5.286	368	6.115
Meta	167.173	62.307	318	18.390	368	21.274
Putumayo	33.453	51.571	137	19.073	158	22.064
Vaupés	2.451	4.358	635	1.388	735	1.606
Vichada	5.394	7.094	1.160	2.253	1.342	2.606

VSS: Viviendas sin servicio de energía eléctrica

Resto: Sector rural

CM: Cabecera municipal

Fuente. Unidad de Planeación Minero Energética. (2014, Febrero) Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL. [Online].

Anexo B. Reglas para el criterio tecnológico.

	Emisiones GEI	Emisiones Nox	Emisiones de SO2	Emisiones MP	Consumo de Agua	Uso de Suelo	Generación de desechos	Criterio tecnológico
1	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alta
2	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Muy Alta
3	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Muy Alta
4	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alta
5	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Muy Alta
6	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alta
7	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alta
8	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alta
9	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alta
10	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alta
11	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alta
12	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alta
13	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alta
14	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alta
15	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alta
16	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Baja
17	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alta
18	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
19	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
20	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alta
21	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
22	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alta
23	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alta
24	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
25	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
26	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alta
27	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alta
28	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
29	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alta
30	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
31	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
32	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Baja
33	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alta
34	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
35	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
36	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alta

37	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
38	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alta
39	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alta
40	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
41	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
42	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alta
43	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alta
44	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
45	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alta
46	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
47	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
48	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Baja
49	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
50	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
51	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
52	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Baja
53	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
54	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Baja
55	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Baja
56	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
57	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
58	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Baja
59	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Baja
60	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
61	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Baja
62	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
63	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
64	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy Baja
65	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alta
66	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
67	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
68	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alta
69	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
70	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alta
71	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alta
72	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
73	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
74	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alta
75	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alta
76	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
77	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alta

78	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
79	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
80	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Baja
81	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
82	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
83	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
84	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Baja
85	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
86	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Baja
87	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Baja
88	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
89	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
90	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Baja
91	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Baja
92	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
93	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Baja
94	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
95	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
96	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy Baja
97	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
98	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alta
99	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alta
100	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Baja
101	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alta
102	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Baja
103	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Baja
104	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Baja
105	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
106	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Baja
107	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Baja
108	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Baja
109	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Baja
110	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Baja
111	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Baja
112	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy Baja
113	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alta
114	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Baja
115	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Baja
116	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Baja
117	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Baja
118	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Baja

119	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Baja
120	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Muy Baja
121	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Baja
122	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Baja
123	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Baja
124	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Muy Baja
125	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Baja
126	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Muy Baja
127	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Muy Baja
128	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy Baja

Anexo C. Reglas para el criterio tecnológico para análisis de sensibilidad.

	Emisiones GEI	Emisiones NOx	Emisiones de SO₂	Emisiones MP	Uso de Suelo	Criterio tecnológico
1	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Alto
2	Baja	Baja	Baja	Baja	Alto	Alto
3	Baja	Baja	Baja	Alto	Baja	Alto
4	Baja	Baja	Baja	Alto	Alto	Medio
5	Baja	Baja	Alto	Baja	Baja	Alto
6	Baja	Baja	Alto	Baja	Alto	Medio
7	Baja	Baja	Alto	Alto	Baja	Medio
8	Baja	Baja	Alto	Alto	Alto	Medio
9	Baja	Alto	Baja	Baja	Baja	Alto
10	Baja	Alto	Baja	Baja	Alto	Medio
11	Baja	Alto	Baja	Alto	Baja	Medio
12	Baja	Alto	Baja	Alto	Alto	Medio
13	Baja	Alto	Alto	Baja	Baja	Medio
14	Baja	Alto	Alto	Baja	Alto	Medio
15	Baja	Alto	Alto	Alto	Baja	Medio
16	Baja	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo
17	Alto	Baja	Baja	Baja	Baja	Alto
18	Alto	Baja	Baja	Baja	Alto	Medio
19	Alto	Baja	Baja	Alto	Baja	Medio
20	Alto	Baja	Baja	Alto	Alto	Medio
21	Alto	Baja	Alto	Baja	Baja	Medio
22	Alto	Baja	Alto	Baja	Alto	Medio
23	Alto	Baja	Alto	Alto	Baja	Medio
24	Alto	Baja	Alto	Alto	Alto	Bajo
25	Alto	Alto	Baja	Baja	Baja	Medio
26	Alto	Alto	Baja	Baja	Alto	Medio
27	Alto	Alto	Baja	Alto	Baja	Medio
28	Alto	Alto	Baja	Alto	Alto	Bajo
29	Alto	Alto	Alto	Baja	Baja	Medio
30	Alto	Alto	Alto	Baja	Alto	Bajo
31	Alto	Alto	Alto	Alto	Baja	Bajo
32	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo