



Emplazamiento Sustentable de Sistemas de Microgeneración Solar Fotovoltaica en Colombia

Andrés Felipe Medina Gamba

Universidad ECCI
Maestría en Ingeniería con Énfasis en Mecánica
Bogotá, Colombia
2020

Emplazamiento Sustentable de Sistemas de Microgeneración Solar Fotovoltaica en Colombia

Andrés Felipe Medina Gamba

Tesis de grado presentado como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería

Director:

Ph.D. Juan Sebastián Solís-Chaves

Línea de Investigación:

Energía y Transporte

Grupo de Investigación

en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía "GIATME"

Universidad ECCI

Maestría en Ingeniería con Énfasis en Mecánica

Bogotá DC, Colombia

2020

Dedicatoria

A la vida, al destino que permitió unir mis grandes esfuerzos con el profesor Juan Sebastián, quien fue mi tutor en esta etapa de aprendizaje, a mi esposa por su apoyo incondicional, a mis hijos que son el motor para seguir cada día con más ánimo, a mis padres que son mi primer pilar de la vida y en último a mis abuelos que me brindaron todo su conocimiento y experiencia en la vida.

Agradecimientos

Primero que todo doy gracias a Dios que fue el que permitió culminar este trabajo, mi familia que es un apoyo incondicional y mi director de proyecto de grado que creyó en mí y fue mi guía para poder cumplir esta meta.

Resumen

Dada la necesidad de realizar un proyecto que permita dar respuesta a la búsqueda del posible emplazamiento de sistemas de micro-generación solar fotovoltaica (SFV) desde el enfoque del Desarrollo Sustentable en Colombia, es que se propone este trabajo de tesis de maestría. En él se detalla la forma para identificar los municipios de Colombia idóneos para dichas instalaciones. Por medio de un Software libre para el procesamiento de Información Geográfica -QGIS en este caso-, a la aplicación de encuestas y a la utilización de métodos estadísticos multivariados, se logra establecer un valor de idoneidad, para cada municipio colombiano. Estos emplazamientos más aptos, serían escogidos para instalar sistemas de micro-generación de energía, basados en un recurso renovable -como la radiación solar- y aprovechados por la comunidad beneficiada desde la perspectiva del Desarrollo Sustentable. Los municipios identificados como idóneos, se establecieron considerando los tres Ejes o Pilares de la Sustentabilidad, los cuales abarcan aspectos Sociales, Económicos y Ambientales. Así, se tuvo en cuenta, Sistemas de Información Geográfica Oficiales sobre los Parques Naturales Nacionales, la presencia o no de redes de distribución de Energía Eléctrica, el Índice de Desarrollo Humano etc., en conjunto con la Radiación Solar Multianual, considerada como recurso renovable dentro del eje ambiental. Esto permite responder –sustentándose en un procesamiento estadístico multivariado–, cuáles serán los municipios idóneos para el emplazamiento de Sistemas de Micro-Generación SFV en Colombia. Brindando además, una alternativa de decisión que pueda ser usada en emprendimientos privados y en Programas Nacionales de Energización con fuentes renovables. La metodología y la simulación implementada en esta Tesis puede llegar a ser considerada, como una alternativa válida en el análisis de prefactibilidad para este tipo de proyectos energéticos. Este proyecto, por tanto, incluye la identificación de los mapas de Información que estén acordes a los Ejes de la Sustentabilidad, para luego aplicar el Análisis Estadístico Multivariado y obtener así un Plano de Idoneidad, que brinde la lista de municipios idóneos para estos emplazamientos. Para comparar los resultados, se consideraron tres escenarios posibles, con los que se probará el método de cálculo de la idoneidad: El primero de ellos, considera encuestas realizadas a la Comunidad ECCI; el segundo, otorga una importancia relativa mayor al Desarrollo Sostenible, y en el tercero de ellos, se prioriza el aspecto Económico, sobre los otros dos ejes sustentables. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los mapas y tablas de estos escenarios.

Palabras clave: Energía solar, micro generación, fuentes no convencionales de energías renovable (FNCER), medio ambiente, desarrollo sustentable.

Abstract

Given the need for a project to respond to the search for the possible location of solar micro-generation photovoltaic (SFV) from the perspective of Sustainable Development in Colombia, it is that this work of master's thesis is proposed. It details how to identify the ideal Colombian municipalities for this type of facility. By means of free Software for the processing of Geographic Information -QGIS in this case-, the application of surveys and the use of multivariate statistical methods, it is possible to establish a suitability value for each Colombian municipalities. These most suitable sites would be chosen to install these micro-generation energy systems based on a renewable resource -such as solar radiation is-. These could be used by communities from the perspective of Sustainable Development. The municipalities identified as suitable were established considering the three Axes or Pillars of Sustainability, which cover Social, Economic, and Environmental aspects. Thus, official geographic information on national natural parks, the presence or absence of electrical energy distribution networks, the human development index, etc., were taken into account, in conjunction with multi-year solar radiation within the environmental axis. This allows answering, based on multivariate statistical processing, which will be the ideal municipalities for the location of SFV Micro-Generation Systems in Colombia. Also providing an alternative decision that can be used in private enterprises and in National Energization Programs with renewable sources. The methodology and simulation implemented in this work can be considered as a valid alternative in the pre-feasibility analysis in these types of energy projects. Therefore, in this work are included the identification of the information maps that are in accordance with the Sustainability Axes, in order to apply the Multivariate Statistical Analysis and thus obtain a suitability plan, which also provides the list of ideal municipalities for these locations. To compare the results, three possible scenarios were considered, with which the suitability calculation method will be tested: The first one considers surveys carried out to the ECCI Community; the second, gives greater relative importance to Sustainable Development, and in the third, the Economic aspect is prioritized over the other two sustainable axes. Finally, the conclusions obtained from the maps and tables of these scenarios are presented.

Keywords: Solar energy, microgeneration, non-conventional renewable energy sources, environment, sustainable development.

Declaración

Me permito afirmar que he realizado la presente tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en la propia tesis. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá, D.C., 04.12.2020

Andrés Felipe Medina Gamba

Lista de Símbolos, Siglas y Acrónimos

Se presenta a continuación las siglas, símbolos, unidades del SI y acrónimos usados a lo largo de este trabajo de maestría en las Tablas siguientes:

Lista de Símbolos y Unidades

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	Metro cuadrado m^2
W	Potencia	Vatios
J	Trabajo	Joules
$nu\ m$	Nanómetros	metros
V	Diferencia de potencial	Voltios
q	Carga del electrón	Coulombs
k	Constante de Boltzmann	J/K
T	Temperatura absoluta	Kelvin
Ho	Radiación solar en el limite superior de la atmósfera	$W*hora/m^2$
H	Radiación en la superficie terrestre	$W * hora/m^2$
n	Brillo solar en la superficie	Horas/mes
N	Duración astronómica del día	Horas/mes
μ_i	Normalización de los datos	
χ_i	Valor a ser normalizado	
χ_{min}	Valor mínimo de los criterios	
χ_{max}	Valor máximo de los criterios	
W_j	Peso normalizado para el atributo j	
r_j	Posición de rango del atributo	
n	Número de atributos	
r	Valor consolidado	
N	Total de encuestas	
a_{ij}	Escala tomada por el tomador de decisiones	
p	Valor a ser normalizado	
C_i	Índice de consistencia	
λ	Valor principal del vector Eigen	
w	Vector de Eigen	
C_R	Tasa de consistencia	
C_I	Índice de consistencia	
R_I	Índice de consistencia aleatoria	
S	Valor final del criterio	
c_j	Valor del criterio de exclusión	
k	Número de criterios de exclusión	

Lista de Siglas y Acrónimos

Las siglas, abreviaturas y acrónimos usados se detallan en la tabla:

Siglas	Nombre
CMMAD	Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
CENICAFE	Centro Nacional de Investigación de Café.
FEDEARROZ	Federación Nacional de Arroceros.
CARs	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
DAMAs	Departamentos Administrativos del Medio Ambiente.
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNIs.
CENICAÑA	Centro de Investigaciones del Gremio Productor de la Caña de Azúcar.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
HIMAT	Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuaciones de Tierras.
INEA	Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas.
OMM	Organización Mundial de Meteorología.
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética.
STN	Sistemas de Transmisión Nacional.
SFV	Sistema Solares Fotovoltaicos.
FNCRE	Fuentes No Convencionales de Energías Renovables.
ZNI	Zona No Interconectada.
DAS	Desarrollo Municipal.
ENE	Porcentaje de Nivel Energético Municipal.
PNN	Parques Naturales Nacionales.
WLC	Método de Combinación Lineal Ponderada.
AHP	Proceso de Análisis Jerárquico.
DANE	Departamento administrativo nacional de estadística.
PIs	Planos de información.
EMAS	Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales.
SINAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
1. Motivaciones para la realización de esta Tesis	1
1.1. Introducción y marco regulatorio.	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. La energía solar y la Sustentabilidad	5
2.1. Definiciones básicas	5
2.1.1. El Sol	5
2.1.2. Tipos básicos de energía solar	7
2.1.3. Helio química.	8
2.1.4. Helio térmica.	8
2.1.5. Helio eléctrica.	8
2.2. Espectro electromagnético y radiación solar	8
2.2.1. Espectro electromagnético	8
2.2.2. Radiación solar y sus tipos	10
2.3. Atmósfera terrestre y brillo solar	12
2.3.1. Atmósfera	12
2.3.2. Brillo Solar	13
2.3.3. Distribución de la Radiación Solar	13
2.4. Caracterización y medida del recurso solar en el país	19
2.4.1. Instrumentos de captación y medida	19
2.5. Desarrollo sustentable y sustentabilidad	23
2.5.1. Eje económico	25
2.5.2. Eje ambiental	26
2.5.3. Eje social	26
3. Los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica	27
3.1. Componentes de los Sistemas de Generación de Energía SFV	28
3.1.1. Paneles Solares	28

3.1.2. Reguladores	30
3.1.3. Inversor de CA	31
3.1.4. Baterías	32
3.2. Sistemas SFV aislados y conectados a la red	33
3.2.1. Sistemas aislados	33
3.2.2. Sistemas conectados a la red	34
4. Los sistemas de información geográfica y el desarrollo sustentable	35
4.1. Planos de información	35
4.1.1. Zonas No Interconectadas	35
4.1.2. Parques Nacionales Naturales	38
4.1.3. Radiación Solar	40
4.1.4. Índice de Desarrollo Humano	42
4.1.5. Cobertura de Energía en Colombia	44
4.1.6. División Política Municipal (Nivel 3) de Colombia	46
4.2. Escenarios de idoneidad por medio del desarrollo sustentable	47
4.2.1. Primer Escenario: Encuestas Realizadas a la Comunidad ECCI	47
4.2.2. Segundo Escenario: Perspectiva de Desarrollo Sustentable	47
4.2.3. Tercer Escenario: Perspectiva de Liberalismo Económico	47
5. El modelo multicriterio aplicado a la idoneidad	48
5.1. Técnica Rank Sum	49
5.2. Análisis jerárquico (AHP)	51
5.3. Método de combinación lineal ponderada (WLC)	55
6. Resultados obtenidos	57
6.1. Matriz global de la importancia relativa de los criterios	57
6.2. Aplicación del método de la media ponderada ordenada (WLC)	59
7. Conclusiones	66
A. Anexo A: Resultados Completos de los Municipios Idóneos de Acuerdo con los Escenarios Planteados	67
B. Anexo B: Preguntas realizadas a la Comunidad ECCI para el Primer Escenario de Idoneidad	70
Bibliografía	74

1. Motivaciones para la realización de esta Tesis

1.1. Introducción y marco regulatorio.

La presente investigación tiene como motivación analizar estadísticamente la viabilidad en la instalación de sistemas de micro-generación solar fotovoltaica (SFV) en Colombia, tomando como base mapas oficiales de Radiación Solar del año 2005 y priorizando la instalación de este tipo de sistemas en regiones apartadas de los grandes centros urbanos del país como son las zonas no interconectadas (ZNI) o regiones cercanas al sistema de transmisión nacional (STN) pero de difícil acceso, dada su topografía agreste.

En Colombia, las fuentes renovables de energía, han comenzado a despertar interés, debido a la preocupación al cambio climático. Las Energías renovables buscan mejorar las condiciones de vida de las personas que habitan regiones apartadas, sin acceso a la energía eléctrica proveniente del STN y que deben utilizar combustibles fósiles para solventar la falta de electricidad. Por lo tanto, existen diferentes métodos para la obtención de energía limpia, basadas en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como los sistemas eólicos o los fotovoltaicos, es así que se basa este estudio en la importancia que tiene la radiación solar y los ejes de la Sustentabilidad, teniendo como principal motivación resolver los ODS (Objetivos del Desarrollo Sustentable). Lo aquí propuesto logra cumplir de los 17 ODS propuestos por la ONU [1], los siguientes:

1. Educación de calidad.
2. Energía asequible y no contaminante.
3. Trabajo decente y crecimiento económico.
4. Reducción de las desigualdades.
5. Ciudades y comunidad sostenible.
6. Acción por el clima.

En este trabajo, el análisis estará enfocado en los sistemas aislados de la red, teniendo como población objetivo las instalaciones ganaderas, las casas de campo o los sistemas de iluminación casera etc. y motivando el cumplimiento de lo dictado por la ley 1715 de 2014 por la

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), que expresa «*la viabilidad de desarrollar proyectos de energía solar como una fuente de auto generación para los niveles socio-económicos 1,2 y 3 como una alternativa de subsidio para los usuarios*» [2], imponiéndose además una potencia límite, que va desde los 10 *kW* hasta los 1000 *kW* [3]. Se hará además, una breve descripción sobre el modelamiento y la medida de la radiación solar y las entidades que se encargan de esto en nuestro país.

Conociendo los tipos de radiación solar que entran en la atmósfera y aprovechando el espectro electromagnético, es posible determinar que tipo de energía solar puede ser la más viable en la obtención de energía eléctrica (solar fotovoltaica o solar térmica, banda infrarroja (IR) y los fotones), dicha energía se mide por medio de dos instrumentos, los cuales pueden tomar tres rangos de radiación y traducirlos en una determinada cantidad de energía. Con esto se obtienen los planos de radiación multianual que se utilizan en esta Tesis, y que en conjunto con otros planos de información (PIs) adicionales, determinan las posibles regiones idóneas para realizar instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos.

Luego de obtener la información, con base en los planos, se debe conocer la normatividad que rige en Colombia y saber qué disposiciones ya tiene el Gobierno para este tipo de proyectos, todo esto con el fin de analizar la factibilidad de proyectos de este tipo. Considérese en primer lugar la ley 02 de 1959, que dicta las normas sobre la Economía Forestal de la Nación y la conservación de Recursos Naturales Renovables; en segundo lugar, el decreto 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente; la Constitución Política de Colombia en el Título 2, Capítulo 2 Artículo 63, que dicta que los Parques Nacionales Naturales son inalienables, imprescindibles e inembargables,[4]; la Ley 09 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y en el Título II Artículo 5 Punto 19, que dicta por la protección del patrimonio natural y la diversidad biótica de la Nación [5]; el Decreto 1076 de 2015 el cual dicta la Reglamentación Única del Sector Ambiente y del Desarrollo Sostenible, con el fin de mejorar el impacto social, ambiental y económico en la nación.

Mediante el decreto 1076 de 2015, se puede definir los ejes de la sustentabilidad para Colombia, dado que dicho decreto dicta el impacto social, ambiental y económico, con esto se puede dar definición a los planos de información por el ordenamiento territorial que presenta el país [6].

Se usará como herramienta de análisis de viabilidad o de factibilidad, la estadística multivariada, usando un primer método, conocido como la técnica de *Rank Sum* o Sumas Ponderadas, en el cual la idea es otorgar la importancia relativa entre diferentes escalas [7], para luego proceder a dar una jerarquía a los PIs, mediante la normalización de ciertos criterios, esto se realiza por medio del método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) [8], y por último se aplican Reglas de Decisión combinando los métodos anteriores, obteniéndose como resultado final, un valor numérico que permite clasificar los resultados. A este método se le conoce como *Método de Combinación Lineal Ponderada* (ó *Weighted Linear Combination –WLC*), por su nombre en inglés [9]. Partiendo de los varios Planos de Información (PIs), como el plano de

Zonas No Interconectadas (ZNI), el de Radiación Solar Multianual, el de la Cobertura de Energía, el de Parques Nacionales Naturales (PNN), el de Porcentaje de Desarrollo Humano (IDH) y apoyándose en un plano complementario con la División Municipal de Colombia, se logra abarcar los tres ejes fundamentales de la sustentabilidad (el eje ambiental, el eje económico y el eje social) y se realiza un análisis jerárquico multicriterio, el cual dará como resultado los municipios idóneos para el posible montaje de un sistema de micro-generación SFV sin conexión a la red.

Para ello se consideran tres escenarios de análisis, los cuales se presentan bajo tres condiciones:

1. Se realiza una encuesta a la comunidad ECCI, con la cual se obtienen las prioridades relativas de cada plano de información, siendo la prioridad relativa, la escala que se le da a las respuestas de las encuestas, utilizando el método (AHP). Se denomina a este escenario, «Opinión de la Comunidad».
2. Bajo el conocimiento de los Ejes de la Sustentabilidad, se crea un escenario denominado, «Escenario Sustentable», en el cual la prioridad es dar mayor peso relativo a las ZNI y a los Parques Nacionales Naturales (PNN), que son los PIs del eje Ambiental.
3. El último escenario es el denominado «Escenario Neoliberal» o del «Liberalismo Económico», en el que el mayor peso relativo lo tienen el recurso energético renovable (la Radiación Solar Multianual) y la Cobertura Energética.

Actualmente, en Colombia se realizan estudios para la implementación de parques solares, dichos estudios están a cargo de grandes empresas que tienen una estructura económica y tecnológica fuerte, estas empresas ya han construido parques solares en departamentos como Cesar, donde se instaló una planta de energía con una capacidad de 86,2 MW [10], en el Meta, donde se instaló un parque solar el cual esperan generar energía para alrededor de 23000 familias [11]. La decisión para la construcción de estos parques solares es brindar energía al sector industrial y en algunos casos a la comunidad en general.

En relación a esto, se propone en esta tesis realizar un análisis desde los ODS, dando un apoyo con los escenarios de simulación ya descritos, con el fin de optimizar la selección de las regiones idóneas para instalar instalaciones solares FV, redundando en beneficios económicos a la comunidad, generando una menor huella de carbono y mejorando la calidad de vida de las personas que aprovecharán esos posibles nuevos proyectos energéticos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Identificar los municipios de Colombia idóneos para la instalación de sistemas de micro-generación SFV desde la perspectiva del Desarrollo Sustentable.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento de la información necesaria para el análisis estadístico multivariado que determina la idoneidad de los escenarios propuestos Colombia, enfocándose en zonas no interconectadas y/o regiones apartadas.
- Plantear escenarios de simulación que evidencien las ventajas del enfoque del desarrollo sustentable vs el enfoque del liberalismo económico para la determinación de la idoneidad de posibles escenarios de análisis.
- Aplicar las técnicas de análisis multivariado WLC y AHP con el apoyo del software QGIS a los planos de información disponibles.
- Obtener los mapas de emplazamiento idóneo para los escenarios considerados por medio del calculador del Software QGIS.

2. La energía solar y la Sustentabilidad

Para la generación de energía existen fuentes que provienen de recursos no renovables, tales como los combustibles derivados del petróleo, el carbón mineral y el gas natural, entre otros. Existen además proyectos que utilizan las FNCER, en las que a excepción de la Energía Geotérmica, la mayoría de ellas usan como fuente primaria la energía proveniente del sol. Con los Sistemas de Generación de Energía basados en FNCER se logra disminuir el impacto que producen los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y se mejora la calidad de vida de un lugar o región específica. Las comunidades que resultan clasificadas como idóneas en este trabajo, son las que, generalmente, no tienen acceso a la electricidad que brindan las empresas distribuidoras, o están cercanas a un PNN, y que sin embargo cuentan con una radiación solar suficiente para poder aprovechar este tipo de energía.

Al realizar un estudio de ingeniería sobre cualquier tipo de energía renovable, se debe caracterizar la medida de todos los aspectos que hacen parte de las FNCER. Es decir, se debe contar con lo que se conoce como la caracterización y la medida del recurso renovable disponible en el lugar específico del proyecto. Es por eso que en este capítulo se describirán los equipos del sistema de generación para la medida del recurso solar, dado que el sol emite energía que cuando atraviesa la capa de ozono se divide en ondas electromagnéticas y debido a estas es que se puede aprovechar la energía solar y con esto lograr caracterizar y medir la radiación y el brillo solar, logrando obtener características únicas para realizar instalaciones de parque solares fotovoltaicos para garantizar a la población energía más limpia y poder obtener energía para bombas de riego para cultivos, iluminación artificial o simplemente para medios de entretenimiento ocio que mejoran la calidad de vida de las comunidades [12].

2.1. Definiciones básicas

2.1.1. El Sol

El sol es la estrella roja fuente primaria de casi toda la energía en la tierra. En el caso de nuestro sol, este es una esfera de gas incandescente, que genera energía a través de reacciones termonucleares. Su estructura física se presenta en la Figura 2-1 [13]. La vida sobre el planeta debe su existencia a la energía emanada de su superficie.

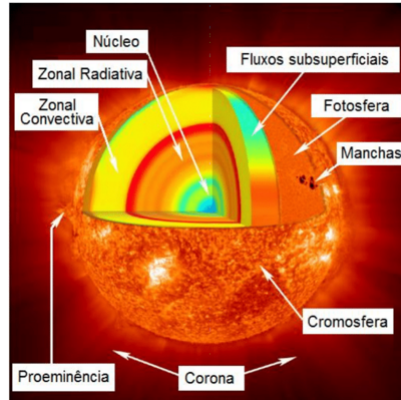


Figura 2-1.: Estructura Física del Sol [13].

Su energía se puede utilizar para usos de agricultura, se puede aprovechar las plantas para el proceso de fotosíntesis y así lograr obtener los frutos que brindan las plantas. También sirve para que algunas especies de animales puedan migrar hacia otras regiones del mundo y por miles de años el humano lo ha utilizado como punto de referencia en la navegación de navíos o como un calendario, para la medida del paso del tiempo y del cambio de ciclos naturales. Los movimientos más importantes del Sol se ilustran en las figuras 2-2 y 2-3.

La energía solar se puede clasificar como calor (ondas electromagnéticas) y como luz (fotones) [14].

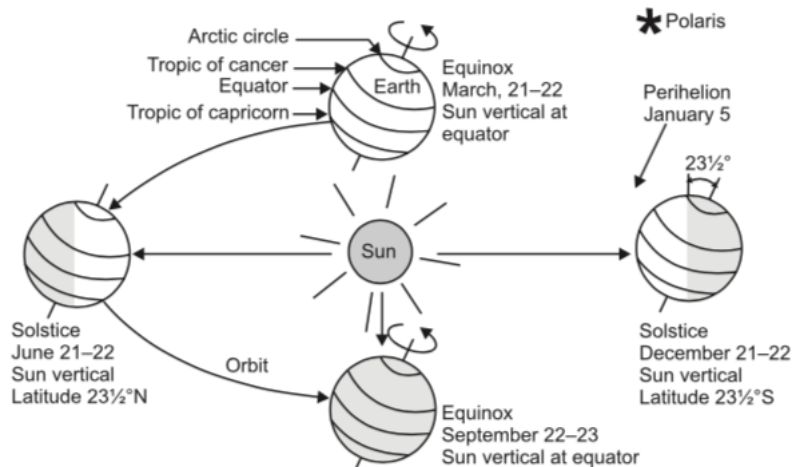


Figura 2-2.: Solsticios y Equinoccios del Sol respecto a la Tierra [15].

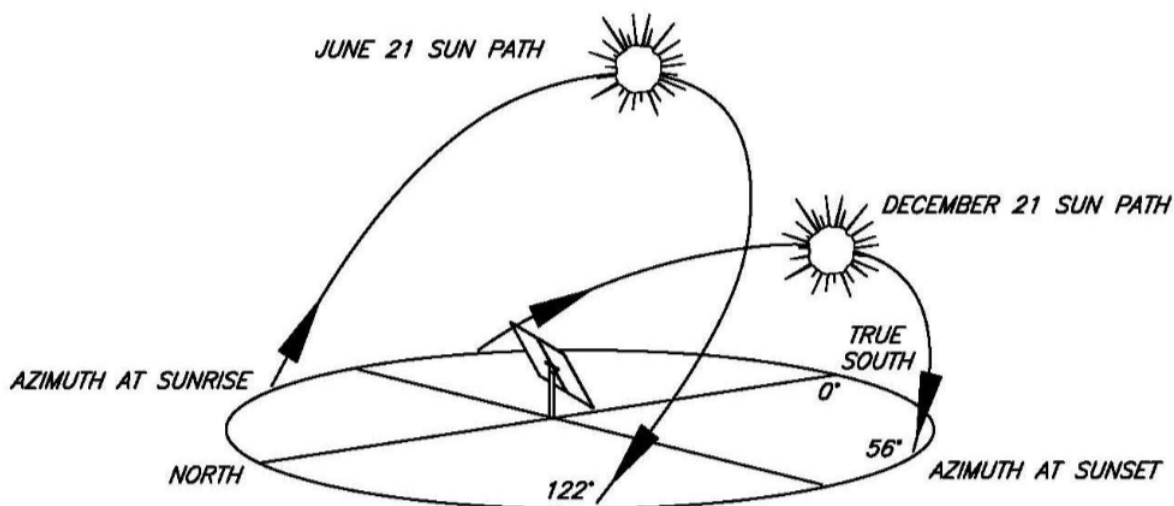


Figura 2-3.: Posición relativa del Sol durante Verano e Invierno [15].

2.1.2. Tipos básicos de energía solar

Donde se tiene el calor que es la sensación térmica que experimenta cualquier cuerpo y por las propiedades térmicas de cada material, se produce un efecto fotovoltaico el cual es aprovechado por los cuerpos para generar energía. Sabiendo que alrededor del 30 % de la energía solar es reflejada por la atmósfera, se puede aprovechar el porcentaje restante de la energía producida por el sol, donde con la ayuda de equipos mecánicos se puede hacer cambios en las propiedades de dicha energía y con ello obteniendo distintas energías renovables; así se logra tener el movimiento de la masa de aire, ya que el aire se calienta y llega a una parte alta y rápidamente lo sustituye un aire más frío, es así cómo se logra la generación de vientos y a esto se le llama energía eólica. También se tiene que aquella energía la toman las plantas para realizar su crecimiento y generación de frutas, luego estas sirven a diferentes seres vivos como alimento, este proceso se conoce como energía de biomasa. Cuando el agua del mar se evapora y en su proceso natural vuelve a caer de forma sólida o líquida, con esto logra liberar algo de energía potencial, dado que están situadas a distintas alturas, se transforman en energía cinética al precipitarse hacia zonas más bajas, bajo estas condiciones se puede llamar a esta energía como hidráulica. Por último, se tiene que la fuerza gravitacional, producida tanto por la luna como por el sol y además de los vientos, generan las mareas y olas del mar, llamándola energía del mar [16].

Cuando la incidencia solar ingresar a la atmósfera produce tres tipos básicos de energía, los cuales son aprovechados por diferentes componentes tanto naturales como artificiales de la tierra y se dividen en tres tipos como lo muestra la Figura 2-4.

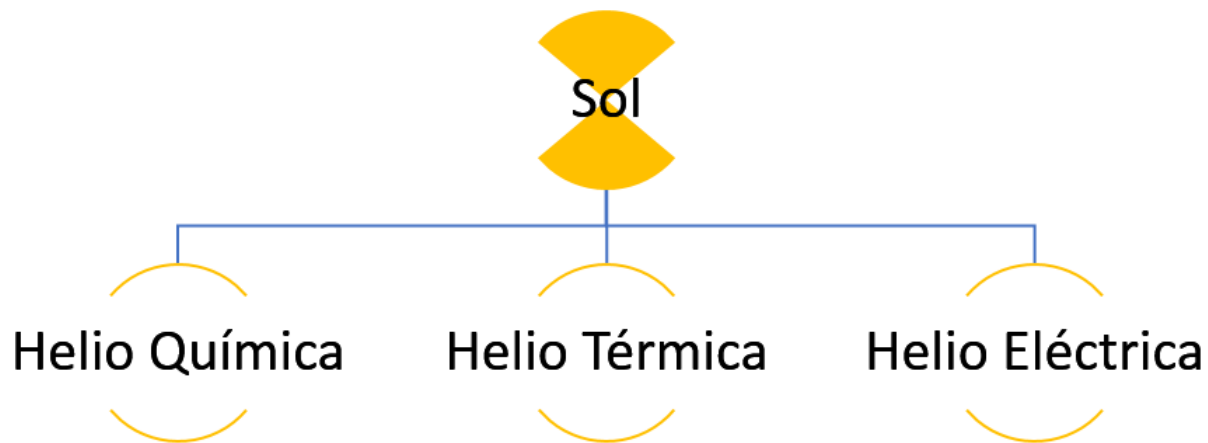


Figura 2-4.: Tipos Básicos de Energía Solar.

2.1.3. Helio química.

Es el proceso por el medio del cual se genera vida en la tierra, ya que este proceso permite generar el CO_2 en O_2 , siendo el proceso que mantiene la vida en el suelo.

2.1.4. Helio térmica.

Es el que permite la mayor parte de la energía térmica en la atmósfera, siendo este proceso el que mayor proporción de energía brinda para la calefacción solar de agua y calefacción de edificios [14].

2.1.5. Helio eléctrica.

Es la capacidad que tiene los fotones con el fin de producir electricidad, siendo utilizados en semiconductores.

2.2. Espectro electromagnético y radiación solar

2.2.1. Espectro electromagnético

La luz y la radiación forman parte de un rango que se denomina espectro electromagnético, el cual no posee un límite inferior o superior, en donde se puede encontrar la irradiancia espectral (eje Y) y la longitud de onda (eje X), como se ve en la figura 2-5, pasando así por los rayos gamma, los rayos x, la radiación ultravioleta, la radiación infrarroja, las microondas y las ondas de radio [17].

Es la forma de clasificar una onda electromagnética en función de su frecuencia o en su longitud de onda; esta se puede clasificar desde los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, el espectro visible, la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio (FM y AM), como se muestra en la figura 2-6.

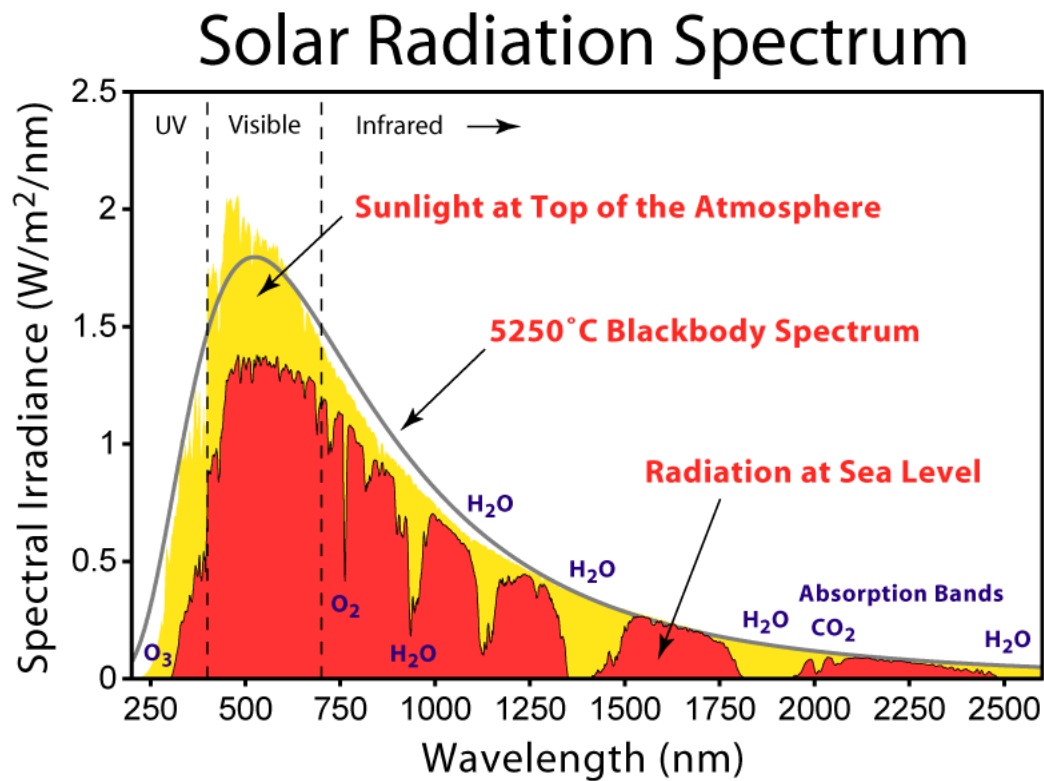


Figura 2-5.: Curvas de Radiación Solar al Nivel del Mar y en el Borde de la Atmósfera [13], [15].

En la figura 2-5 se distinguen tres curvas de espectro EM, el de la luz solar en la cima de la atmósfera, de color amarillo, la radiación de cuerpo negro a 5250 °C y la radiación a nivel del mar que es formada por parte de la masa de aire que se mantiene dentro de la capa atmosférica en la que se pueden observar las diferentes bandas de absorción. También se debe tener en cuenta la importancia que tiene cada material, pues en su superficie se refleja con respecto a la radiación incidente sobre ellos. Este fenómeno se llama *Albedo* [18].

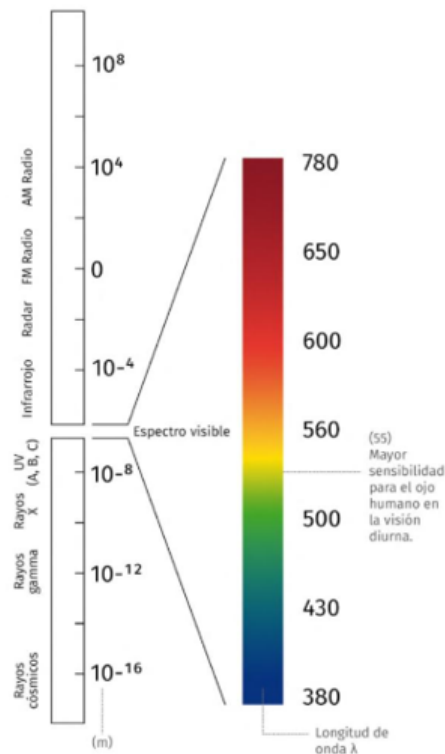


Figura 2-6.: Bandas de Energía del Espectro electromagnético [18].

Este espectro electromagnético, luego de pasar por la atmósfera es posible aprovecharlo como energía limpia o renovable, ya sea como electricidad (por medio del efecto fotoeléctrico, o como calor, es decir, energía solar térmica).

2.2.2. Radiación solar y sus tipos

Esta procede de un plano perpendicular a la dirección de propagación de rayos solares que traspasan la atmósfera terrestre, esto recibe el nombre de constante solar y corresponde a $1.367 W/m^2$.

Es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas, esta energía determina los procesos atmosféricos y el clima [19].

Cuando el rayo solar ingresa a la atmósfera los rayos incidentes ingresan de manera perpendicular y mediante receptores se les puede cambiar de dirección teniendo que la radiación solar se puede dividir en radiación solar directa y radiación solar indirecta, Como se observa en la figura 2-7

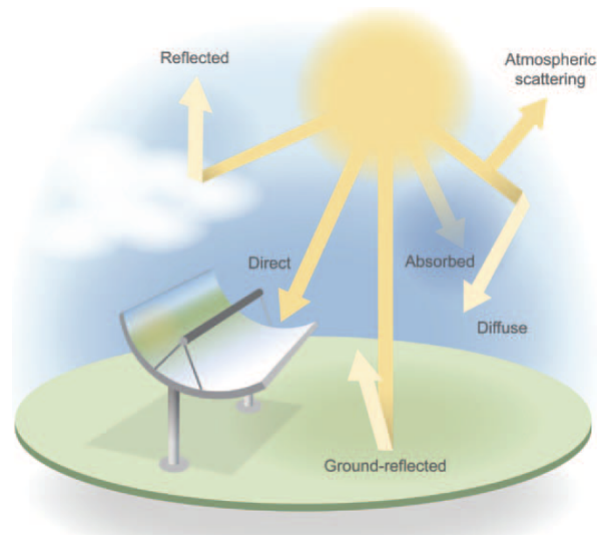


Figura 2-7.: Tipos de Radiación solar. [15].

¿Qué es la radiación solar directa?

La organización mundial de meteorología (OMM), la define como la cantidad de la radiación producida por el sol y un espacio anular estrecho del cielo, donde se puede medir con un pirheliómetro [15].

¿Qué es la radiación solar indirecta o difusa?

Considerada como la radiación cuasi paralela desde el sol, esto incluye la radiación reflejada o que se dispersa por las nubes [15].

¿Qué es la radiación reflejada?

Se considera como la cantidad de radiación que se refleja al espacio exterior, esto sucede cuando se choca con las capas atmosféricas, suele reflejar alrededor del 4%. [14]

¿Qué es la dispersión atmosférica?

Es la cantidad de radiación solar que choca y rebota antes de ingresar a la atmósfera.

¿Qué es la radiación absorbida? Es toda aquella radiación que es adsorbida por algún cuerpo, la cual la toman las plantas, animales o la superficie terrestre.

¿Qué es la radiación reflejada por el terreno?

Este tipo de radiación también se conoce como albedo, donde se caracteriza por el tipo de superficie, ya que algunas superficies pueden llegar a reflejar, conociendo que las superficies claras tienen mayor valor de albedo con respecto a las superficies oscuras.

Cuando se realizar la medición de la potencia que proviene de la radiación solar se obtiene como unidades, la energía dada sobre el área. En la Tabla 2-1 se pueden observar las unidades de medición para la radiación solar.

Unidad de medición	Siglas
Caloría/centímetro ² * <i>minuto</i>	Cal/cm ² * <i>min</i>
Watts/metro ²	W/m ²
joules/m ² *día	J/m ² * <i>día</i>
Langley/día	Langley/día
Caloría/centímetro ²	Cal/cm ²
Joules/centímetro ²	J/cm ²

Tabla 2-1.: Unidades de medida de la radiación solar [13].

A continuación, se muestra la cantidad de radiación que llega a la parte extra terrestre de la tierra según la figura 2-8. La cantidad de energía que ingresa a la atmósfera no suele ser constante ya que la órbita del sol con respecto a la tierra es de manera elíptica, teniendo que en temporada de enero el sol está más cercano a la tierra y que por el mes de junio se aleja según la órbita terrestre, finalizando así en el mes de diciembre nuevamente estando cerca de la tierra [14].

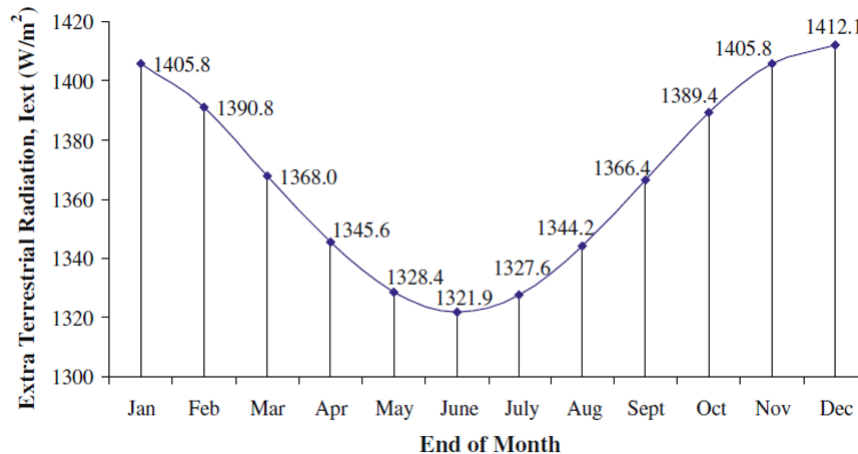


Figura 2-8.: Radiación extraterrestre [14].

2.3. Atmósfera terrestre y brillo solar

2.3.1. Atmósfera

Es parte vital en cuanto al estudio de la división que produce la atmósfera al ingresar los rayos que provienen de sol, esto se presenta en la Figura 2-9, la atmósfera es aquella capa que protege a la tierra de la radiación de la tierra y además evita que los gases generados en la parte interna de la tierra salgan, con esto creando gases de invernadero. La atmósfera

tiene dos propiedades, transmite una onda de radiación corta ($0,23 - 2,26nm$), provenientes del sol y la segunda es, la radiación de la longitud de onda larga se comporta de manera opaca siendo esta de ($> 2,26nm$), la región entre el sol y la tierra se conoce como “región extraterrestre” [14].

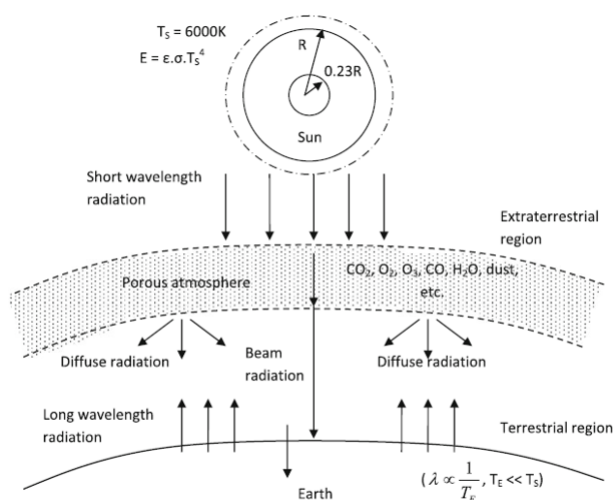


Ilustración 4 Vista de la atmósfera entre el sol y la tierra [2]

Figura 2-9.: Vista de la atmósfera entre el sol y la tierra [14].

2.3.2. Brillo Solar

Consiste en la luz que se capta, respecto a la cantidad de luz que se puede obtener, desde el amanecer hasta el atardecer. Es la cantidad de insolación que se recibe en un área cualquiera, siendo uno de los factores más importante para la determinación de la caracterización climática de cualquier zona. Las distribuciones de los valores de insolación están relacionadas en forma inversa con otros elementos como la nubosidad y la precipitación en una región [20].

Para la medición del brillo solar se usa el heliógrafo Campbell-Sokes, el cual consiste en una esfera de vidrio, el cual es un lente convergente, en donde se concentran los rayos solares [21].

2.3.3. Distribución de la Radiación Solar

En el mundo

En algunas regiones del mundo se tiene que la radiación solar es mayor, o que cambia de acuerdo a la estación del año que se esté. Se puede hacer observar en la figura 2-10, que mediante imágenes de satélites meteorológicos (en este caso, desde el año 1990 hasta el

2004), siendo esta la medida anual de irradiancia, dada en Vatios (W) sobre metros cuadrado (m^2)(W/m^2), en donde se puede observar mediante la escala de colores los valores que toma la misma, siendo de color rojo oscuro el valor más alto (280-290) y bajando hasta llegar al color blanco de valor (0-10) [22].

También se puede determinar visualmente que, sobre la región del paralelo del Ecuador, están los valores más altos, pasando sobre las corrientes marinas y disminuyendo en las áreas del continente que toman un valor menor.

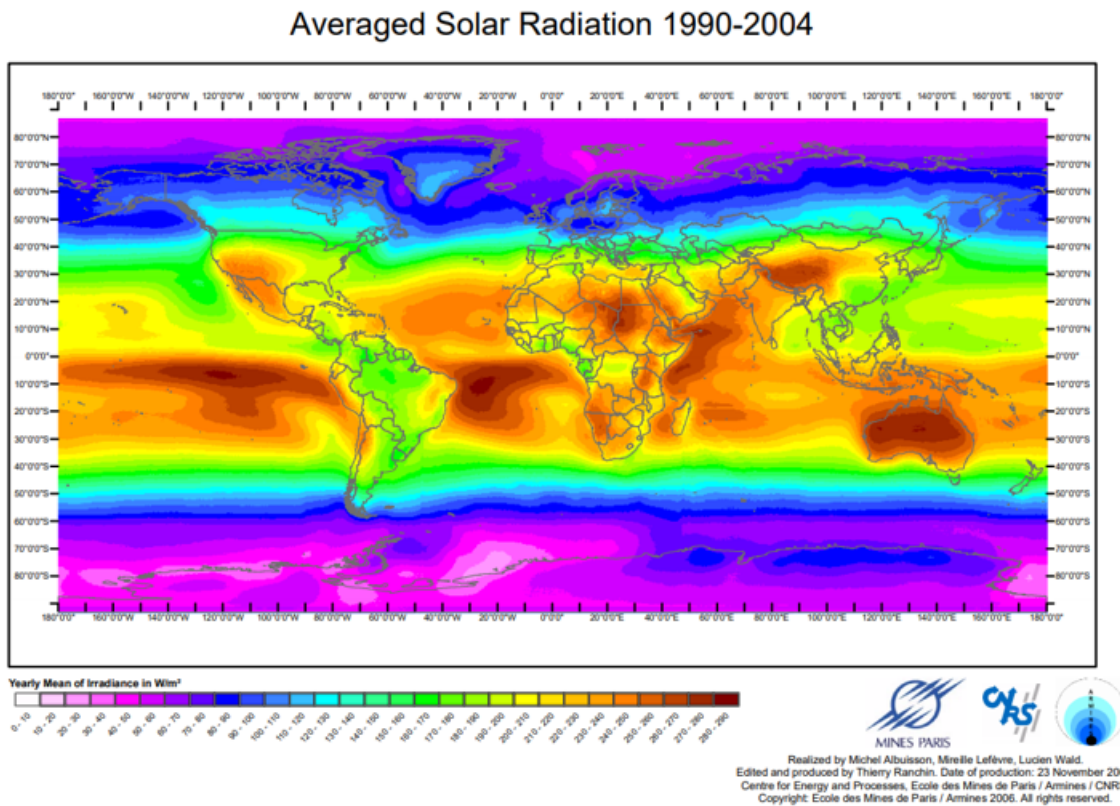


Figura 2-10.: Radiación solar en el mundo [22].

En Colombia

La medida de la distribución de la radiación solar en Colombia presenta una serie de mapas que permiten conocer cuáles son las características de los diferentes tipos de radiaciones que se presentan, estos planos de información permiten determinar en qué periodo de tiempo (meses del año) se tiene una alta tasa de radiación y qué regiones del país se presenta con más intensidad.

Estos mapas fueron creados en el año de 1993 por los institutos de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) y el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), contando con la colaboración del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Centro de Investigaciones del Gremio Productor de la Caña de Azúcar (CENICAÑA), Centro Nacional de Investigación de Café (CENICAFE), Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CARs), Departamentos Administrativos del Medio Ambiente (DAMAs), Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) [23]. Estos mapas contienen una cantidad y una calidad de la información mayor respecto a propuestas o versiones previas, logrando con ello una mejor cobertura sobre la totalidad de la extensión geográfica colombiana, con el fin de contar con una herramienta efectiva para el análisis en la consideración de los nuevos proyectos energéticos con FNCER.

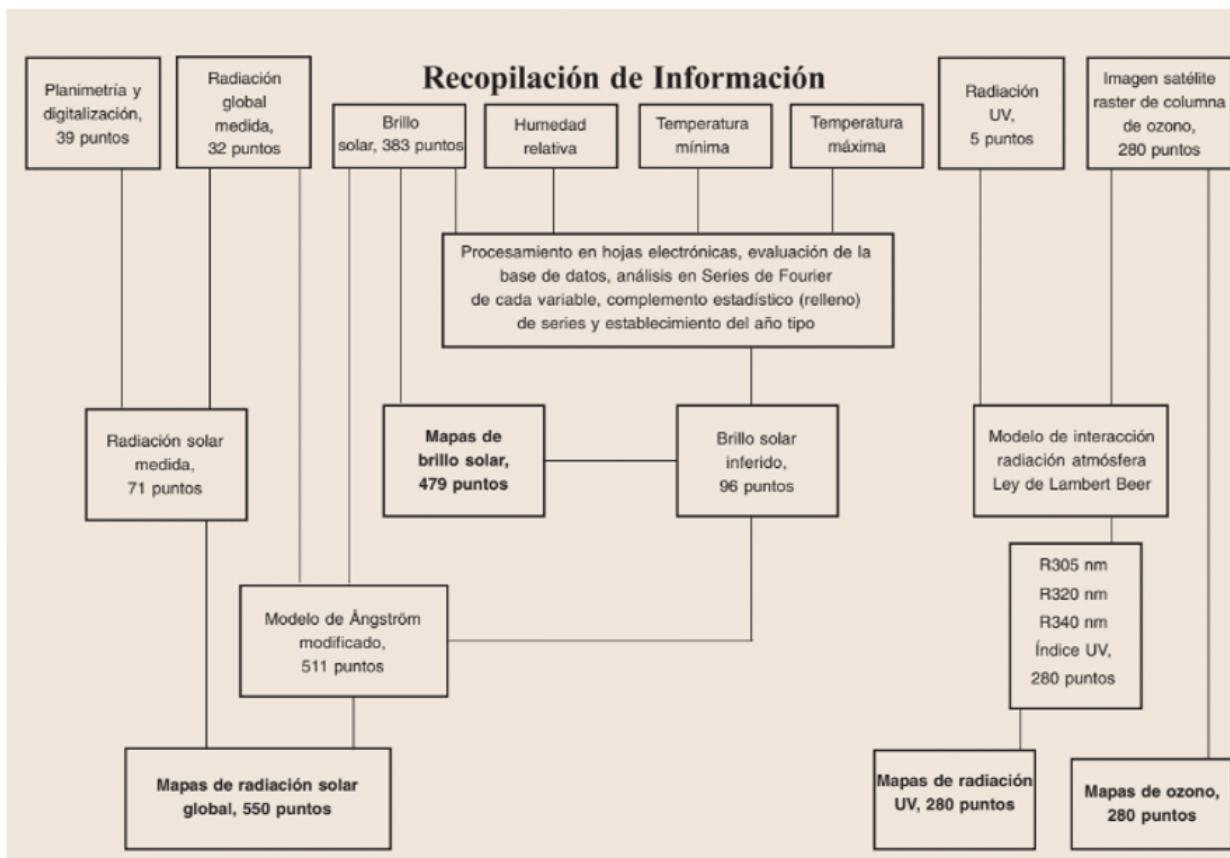


Figura 2-11.: Flujograma de Obtención de la información para la Creación del Mapa de la Radiación Solar en Colombia. Tomada de [23].

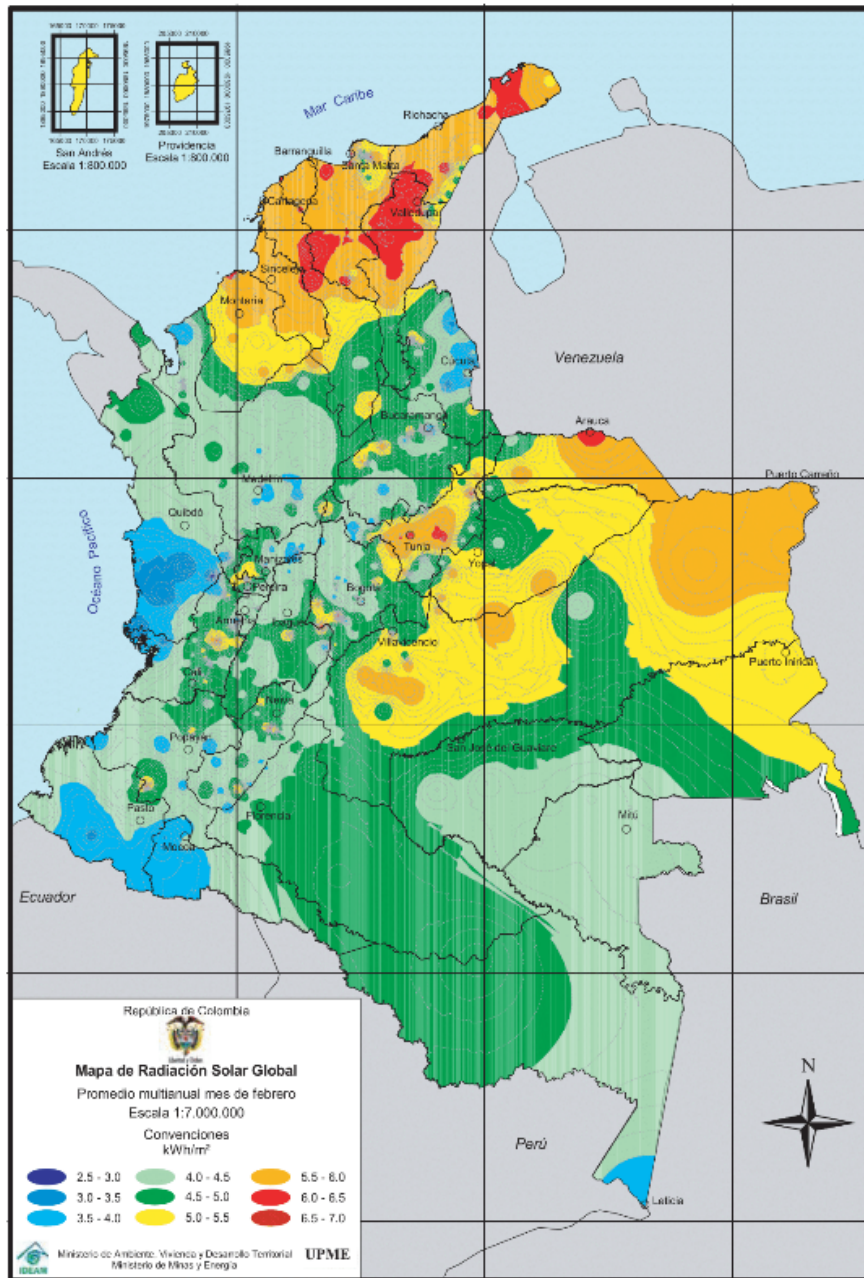


Figura 2-12.: Mapa de Radiación Solar Colombiano [23].

En la figura 2-12 se puede ver a manera de ejemplo como es el mapa de radiación solar, que está constituido por 12 mensuales y uno adicional que presenta el promedio multianual para el valor de radiación solar incidente en el país. Este atlas muestra los promedios diarios para el mes de febrero, en él se observa que las regiones de mayor índice de radiación son las de color rojo con un valor de $6,5$ a $7,0 kWh/m^2$, como por ejemplo en los departamentos de Valledupar o Arauca; caso contrario son las regiones marcadas con un color azul oscuro, que indica que la radiación es baja, con valores entre $2,5$ a $3,0 kWh/m^2$, como por ejemplo en el departamento del Chocó, estas alteraciones en los valores de la radiación se presentan debido a factores geográficos y climáticos locales, tales como cadenas montañosas o zonas desérticas, así mismo regiones con alta nubosidad y un índice de lluvias alto durante toda la época del año.

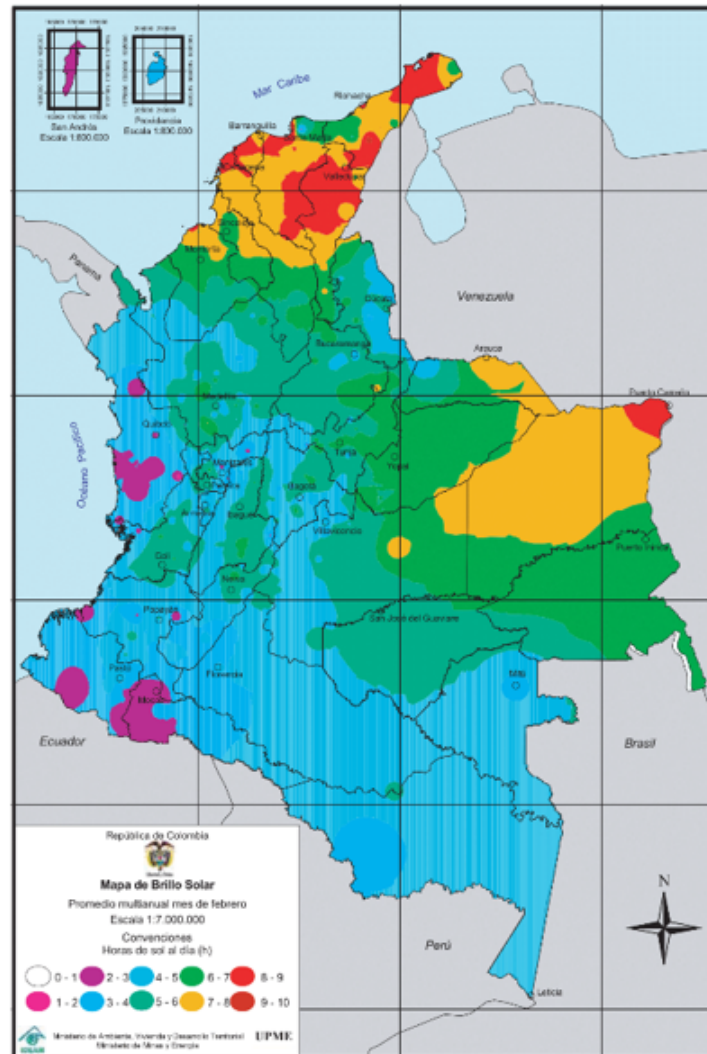


Figura 2-13.: Mapa de Brillo Solar en Colombia [23].

En la figura 2-13 se puede observar un mapa de brillo solar que, de forma semejante al anterior, se presenta un valor para cada mes del año y uno adicional con el promedio multianual. Este mapa de brillo solar indica cuál es la cantidad de horas a la que está sometida cada región al sol directamente, en él se puede observar que el color blanco indica un intervalo de 0 a 1 horas y las regiones con color marrón con un periodo de 9 a 10 horas de luz solar, observando que para el mes de febrero el mayor brillo solar se presenta en puerto Carreño y Valledupar, por ejemplo. Así mismo, se puede observar que donde hay menos brillo solar es en la región Amazónica, siendo altamente influenciado por factores como la nubosidad o las altas lluvias que se pueden presentar en las regiones. Teniendo en base un mapa de radiación solar multianual figura 2-14, donde se puede observar cuales son las regiones en Colombia en las que se presenta mayor radiación, dado que mensualmente desde el IDEAM se genera un plano de información y mediante modelos estadísticos se obtiene un plano final.

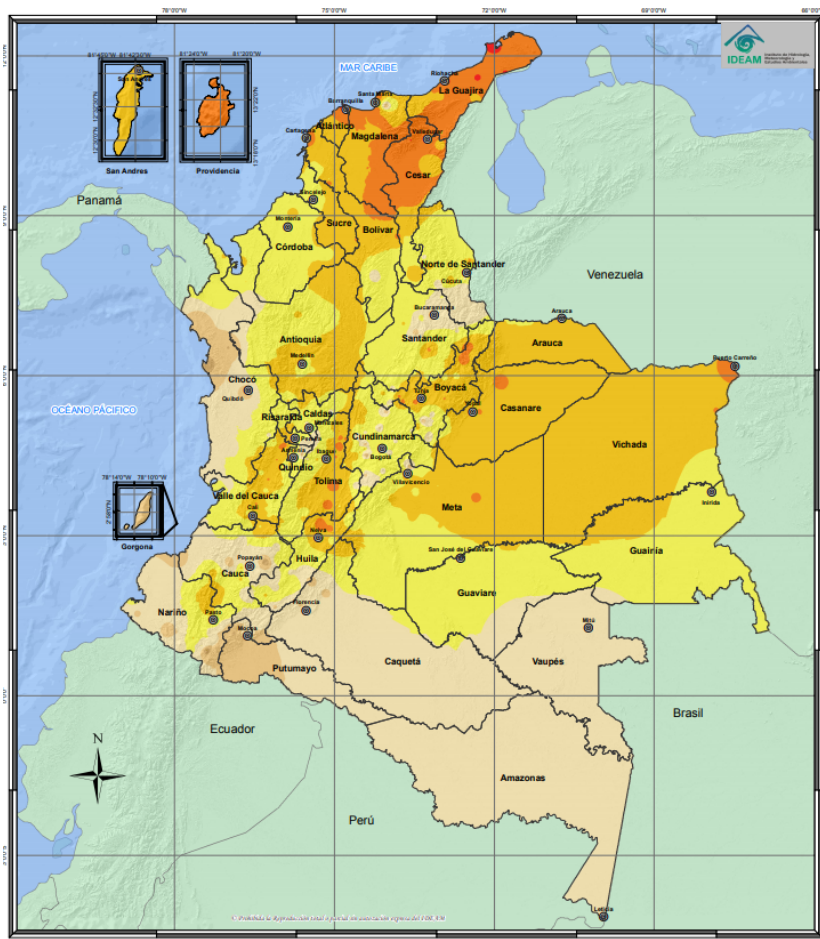


Figura 2-14.: Mapa de Radiación Solar Multianual para Colombia [24].

2.4. Caracterización y medida del recurso solar en el país

2.4.1. Instrumentos de captación y medida

La radiación solar está compuesta por 3 rangos ultravioleta, donde se puede observar la longitud de onda desde 0.3 a 0.4 μm , visibles desde 0.4 a 0.7 μm e infrarrojos que están desde 0.7 a 5 μm . donde los instrumentos de radiación solar la cantidad de potencia que incide por una unidad de superficie. [23]

Los instrumentos que acá se toman como referencia están certificados por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), donde se debe tener presente el tipo de componente radiométrico que miden, el campo de visión, la respuesta espectral y el tipo de uso que se le asigne, como se puede observar en la tabla 2-2 [23].

Tipo de instrumento	Parámetro de medida	Empleo Principal	Ángulo de visión (sr)
Pirheliometro de incidencia normal	Radiación directa	Patrón secundario para calibración y red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Pirheliometro absoluto	Radiación directa	Patrón primario	5×10^{-3}
Pirheliometro con filtros	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	Patrón de calibración y red de medidas	1×10^{-3} a 1×10^{-2}
Piranómetro	Radiación global, Radiación celeste y radiación reflejada	Red de medidas	2π
Piranómetro Espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha	Red de medidas	2π
Pirgeometro	Radiación de onda larga descendente y ascendente	Red de medidas	2π

Tabla 2-2.: Instrumentos de medición de la radiación solar [23].

Caracterización del recurso en Colombia

Dada la información del IDEAM, donde esta es la entidad oficial a nivel nacional encargada de hacer el seguimiento y control con respecto a la medición de las variables meteorológicas, más exactamente en la distribución de la radiación solar, teniendo en cuenta que existen otras entidades que han colaborado para recolectar la información del recurso solar. Algunas de estas entidades son el CENICAÑA, CENICAFE, CAR, IPSE Y FEDEARROZ. [23]

El IDEAM cuenta con dos tipos de instrumentos de medida: el primero es el Piranómetro, según la figura 2-15 y 2-16. El segundo es el Actinógrafo, según la figura 2-17 y 2-18.

Los Actinógrafos generan información de radiación global acumulada diaria y los Piranómetros tienen una frecuencia de lectura en minutos, esa es la razón de por qué el IDEAM ha desmontado los Actinógrafos y solo trabaja actualmente con los Piranómetros [23].

El IDEAM, para presentar los resultados de los mapas de información, maneja dos tipos de estaciones, las convencionales y las automáticas. En las estaciones convencionales se valida la información de radiación global a nivel diario de alrededor de 60 Actinógrafos, teniéndose en cuenta 40 de los mismos, los Actinógrafos se encuentran distribuidos en el territorio Colombiano según la Figura 2-18 [23]:

Los piranómetros son instrumentos cuyo sensor termoeléctrico o una termopila, la cual está protegida por una cúpula de vidrio, permite convertir la radiación solar en una señal eléctrica de voltaje [23].

El actinógrafo es un instrumento que funciona por un sensor termomecánico, el cual está protegido por una cúpula de vidrio, en donde se conforma por un arreglo bimetalico de dos superficies, la cual puede registrar valores de la radiación solar incidente, mediante el trazo de una gráfica en un tambor [23].



Figura 2-15.: Piranómetro Blanco y Negro Eppley [23].



Figura 2-16.: Piranómetro espectral de precisión Eppley [23].

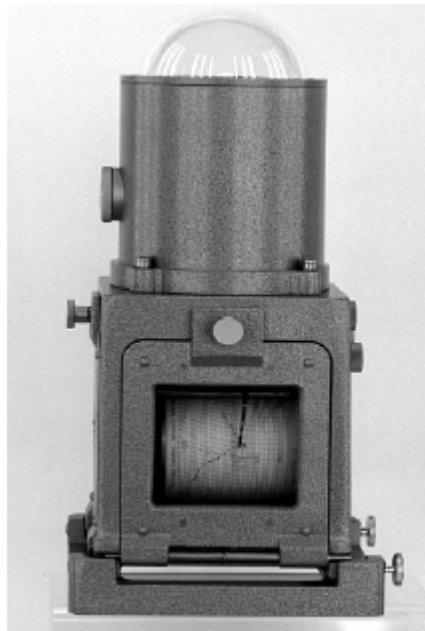


Figura 2-17.: Actinógrafo Fuess [23].

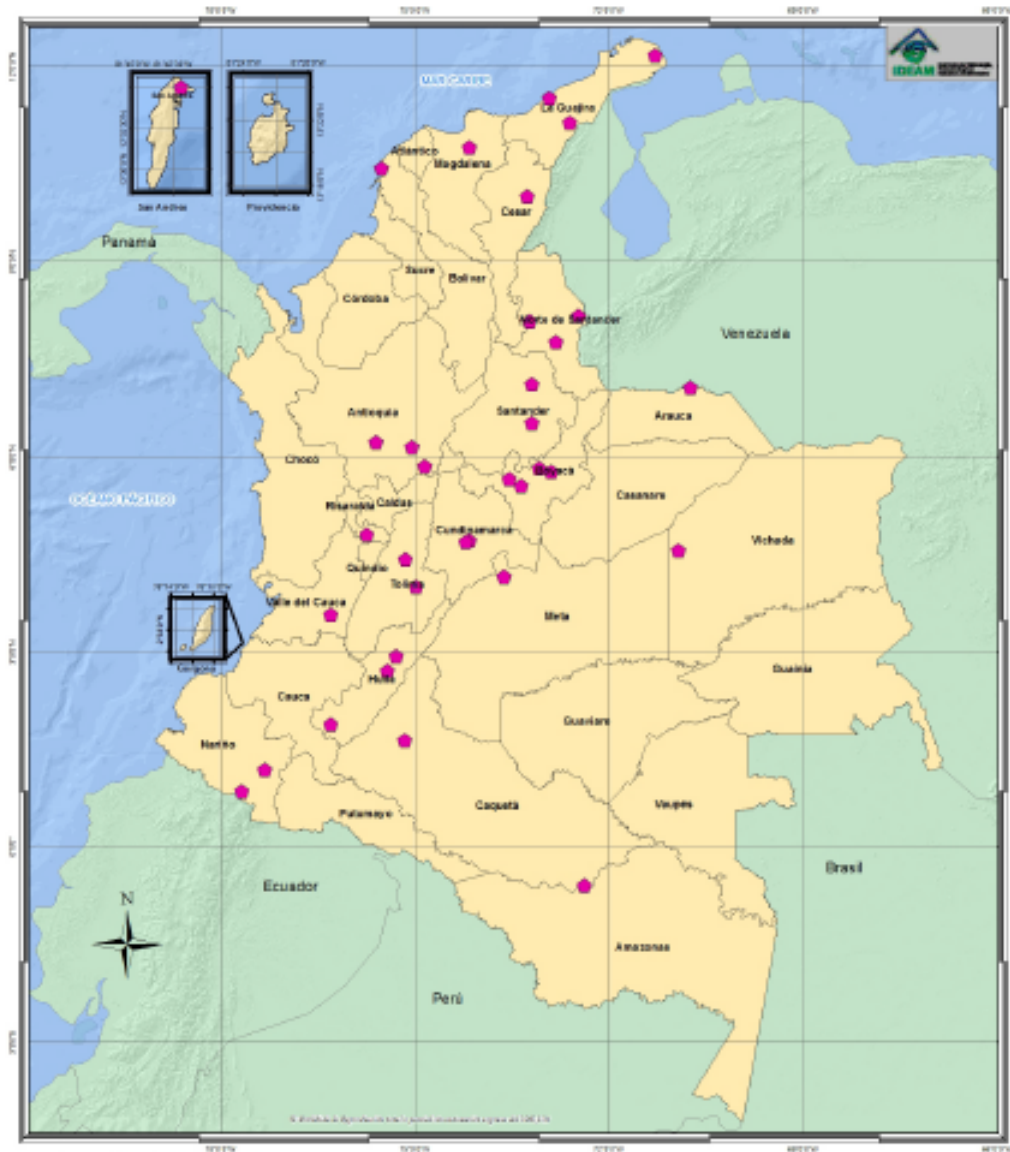


Figura 2-18.: Actinógrafos de estaciones convencionales [23].

Estaciones de medida

En las estaciones automáticas se tomó como referencia alrededor de 160 Piranómetro que hacen parte de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales (EMAS) del IDEAM, como se puede observar en la figura, 2-19 , con estas primeras estaciones se realizó un diagnóstico y una validación de la información horaria, tomándose solamente 110 Piranómetros del total disponible, esto se realizó entre los años 2014 y 2015, se realizó además, una calibración de los sensores y el IDEAM decidió seleccionar 90 sensores para la realización de los planos de información, ya que la cobertura con estos 90 sensores es de alrededor del 95 %.

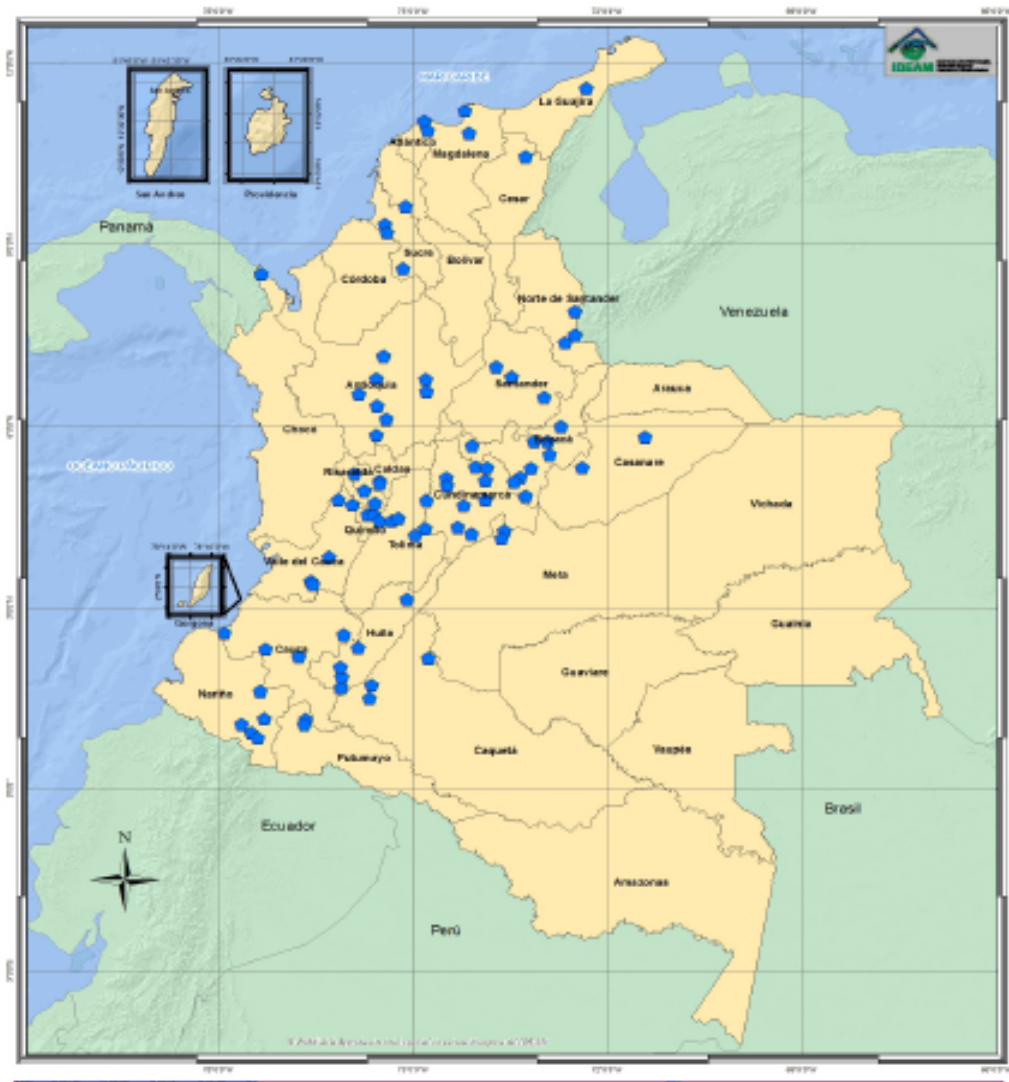


Figura 2-19.: Ubicación de los piranómetros de las EMAS [23].

2.5. Desarrollo sustentable y sustentabilidad

Los ejes del desarrollo sustentable en la actualidad son protagonistas si se desea brindar un mejor futuro a cada uno de los habitantes del mundo, existen regiones de lo que se conoce como el primer mundo, en las cuales existen aplicaciones de FNCER que son utilizados por grandes sectores de la producción, es por eso que en los países con menos desarrollo tecnológico o industrial se debe enfocar más y más en el conocimiento de los tres ejes sustentables y con eso lograr desarrollar nuevas maneras de transmitir energía a regiones, en donde no existe cobertura de energía, con esto logrando fortificar las necesidades básicas de cada persona en el país.

En la idea del desarrollo sustentable, es necesario tomar acciones de mejora en donde con

nuestro compromiso y nuestras buenas practicas, con esto asegurando que el futuro de las nuevas generaciones va ser mejor y no tan degradable como se puede pronosticar o como un estado final. Teniendo claro alguno de estos principios básicos:

- El consumo de recursos debe minimizarse.
- Los ciclos de consumo de materiales no renovables deberían cerrarse.
- Los materiales renovables y las fuentes de energía deberían recibir preferencia.
- Se debe cooperar con el bien común y no al bien privado. [25]

Siguiendo los lineamientos dados por las naciones unidas, es de prioridad por cada persona cumplir con los 17 objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con ello lograr que los países puedan formular nuevas metodologías para obtener un mejor Desarrollo Sostenible.

Objetivos del desarrollo sostenible:

1. fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidad sostenible.
12. Producción y consumo responsable.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.

17. Alianzas para lograr los objetivos. [1]

Con estos lineamientos dados por las Naciones Unidas (ONU), se debe tener en conocimiento de la importancia de los tres ejes de la sustentabilidad, dado que estos ejes son el pilar fundamental para lograr cumplir con los 17 ODS, Donde el primer eje contempla el crecimiento económico y desarrollo sostenible, el segundo eje contempla la equidad social como fin del desarrollo sostenible y el tercer eje considera la dimensión ambiental como condición para el desarrollo sostenible, gráficamente esto está representado por la Figura 2-20.



Figura 2-20.: Ejes Sustentables [26].

La sustentabilidad a través de los años ha sufrido varios cambios, pero de todas estas definiciones se tiene la idea del desarrollo de los sistemas socio ecológicos, en donde su objetivo primordial es cambiar la configuración de los ejes del desarrollo sustentable [26].

Dicho desarrollo que propone la sustentabilidad, puede darse al desarrollo de un individuo, dado que se puede llegar a alcanzar un equilibrio en las partes de un organismo, todo esto dado y respetando las condiciones ambientales que posee cualquier ser vivo, tanto animal como vegetal, en donde su enfoque es la disminución de la generación de procesos de degradación del ecosistema [27].

2.5.1. Eje económico

Para las actuales generaciones y para las generaciones futuras, es primordial velar por el crecimiento de la calidad de vida, teniendo claro que toda persona es fundamental para el crecimiento económico, teniendo la claridad de que se trata de cuestiones locales y cuestiones mundiales.

2.5.2. Eje ambiental

Siendo un proceso que reconoce valores y que quiere aclarar y fomentar nuevos principios, en cuanto las relaciones que se debe tener por el ser humano, su cultura y la importancia de la naturaleza [28], es por eso que se tiene una suma importancia dejar para las generaciones futuras un medio ambiente sostenible, dado que las cuestiones ambientales nos afectan a todos, asegurando que las comunidades puedan tener una mejor calidad del aire y agua potable para el 100 % de la población.

2.5.3. Eje social

Para cada una de las personas deben contar por lo menos con los servicios básicos para poder vivir, así como lo son los servicios públicos o simplemente la educación para todos, dado que en países del tercer mundo es más difícil se debe optar por tener diferentes acciones de igualdad tanto para los hombres como para las mujeres.

Para lograr que estos tres ejes se cumplan debemos ser sustentable, dado que cuando se combina las necesidades económicas con las características sociales y se promueve el mejoramiento ambiental, se puede lograr entender el gran impacto que se tiene para mejorar la calidad de vida, todo esto unido con políticas de manejo responsable para lograr un equilibrio de las necesidades sociales y lograr un crecimiento económico [29].

3. Los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica

Cuando la radiación que proviene del sol, ingresa en la capa terrestre, se aprovecha, al transformarse y utilizarse en distintos tipos de energía, el caso que nos ocupa es lo que se conoce como el efecto fotoeléctrico, en el que fotones incidentes sobre un material fotosensible producen una corriente eléctrica de naturaleza continua (CC), y que puede conectarse luego a una serie de baterías para almacenar dicha energía y disponer de ella en el momento requerido. Si se necesita inyectar esta energía en la red o utilizarla con aparatos que funcionen con corriente alterna (CA), se puede hacer uso de un inversor de carga, el que permite la potencia, corriente y tensión necesarias según el diseño. Este sistema de generación de energía se presenta en la Figura **3-1**. La Energía Solar Fotovoltaica (SFV) es una tecnología que convierte la luz solar en electricidad, detectando que cuando la luz se dirige sobre un lado de una célula de una batería, puede cambiar la corriente generada por ella [30].

Esta energía que es producida del sol y mediante el efecto fotovoltaico generan un cambio de tensión, el cual se presenta en las células solares creando energía, la cual es genera, para luego pasa por un controlador o inversor de carga y se almacena en una serie de baterías, las cuales se arreglan según el diseño o la aplicación final que se tenga, así que puede llegar a realizarse la distribución a la red.

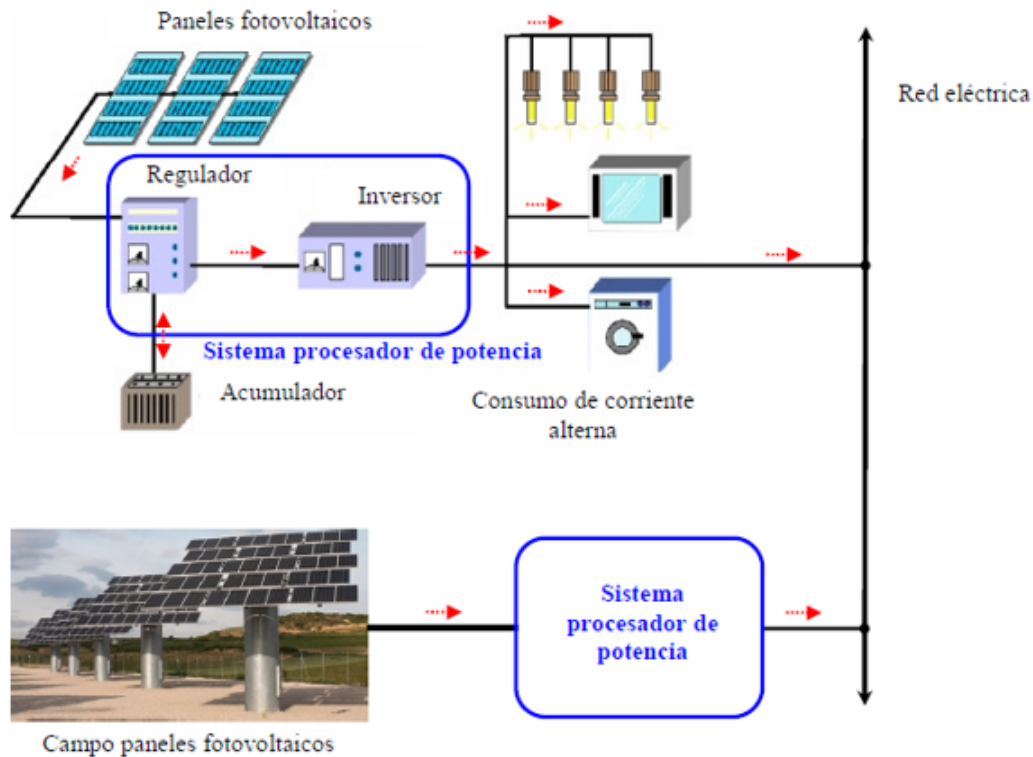


Figura 3-1.: Sistema solar fotovoltaico, con sus componentes para le procesamiento de potencia [31].

Los sistemas de generación SFV pueden por tanto estar conectados a la red u operar de manera aislada. Sin embargo para efectos de este trabajo, esa clasificación es irrelevante, pues lo que se busca es conocer el nivel de irradiación de un lugar idóneo para después sí dimensionar técnica y económicamente el sistema de energía SFV. No obstante, para claridad del lector, se realiza una descripción de los componentes que hacen parte de los sistemas de generación de energía limpia.

3.1. Componentes de los Sistemas de Generación de Energía SFV

3.1.1. Paneles Solares

Son dispositivos que transforman la energía que proviene del sol en energía eléctrica, están basadas en un efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un material que es semiconductor de doble capa, gracias a esto se produce un diferencial de voltaje entre las capas [32].

Estas celdas están fabricadas por silicio cristalino, teniendo también otra cantidad de materiales como telurio de cadmio (CdTe), diselenurio de cobre indio y galio (CIGS) e hidróxido de silicio amorfo (SiH) [13].

Estas células están compuestas por una capa de material tipo n (electrón libre) y otra de mayor espesor tipo p (Hueco disponible), en la unión de esas capas que se forma el campo eléctrico, apoyadas por un conductor donde se conecta la capa negativa a la positiva, realizando un flujo de electrones, el paso de energía es de la capa p a la capa n , por tal motivo siempre que esta capa esté iluminada por el sol habrá generación de corriente y esta será proporcional a la intensidad de la luz que llegue a ella [33].



Figura 3-2.: unión de las capas [33].

La diferencia de potencial o tensión en la unión pn , en función de la temperatura se da por la ecuación 3-1:

$$V_0(T) \cong \frac{k * T}{q} * \ln \left(\frac{N_d * N_a}{n_i^2} \right) [13] \quad (3-1)$$

Donde:

1. $V_0 (T)$: diferencia de potencial o tensión
2. n_i : concentración de portadores intrínsecos del material.
3. N_d : Concentración del dopante tipo n.
4. N_a : Concentración del dopante tipo p.
5. q : carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19} C$).
6. k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} J/K$).

7. T : temperatura absoluta (K).

Con esto se hace referencia de la eficiencia de las celdas de acuerdo a los materiales con los cuales se construyen dichas celdas.

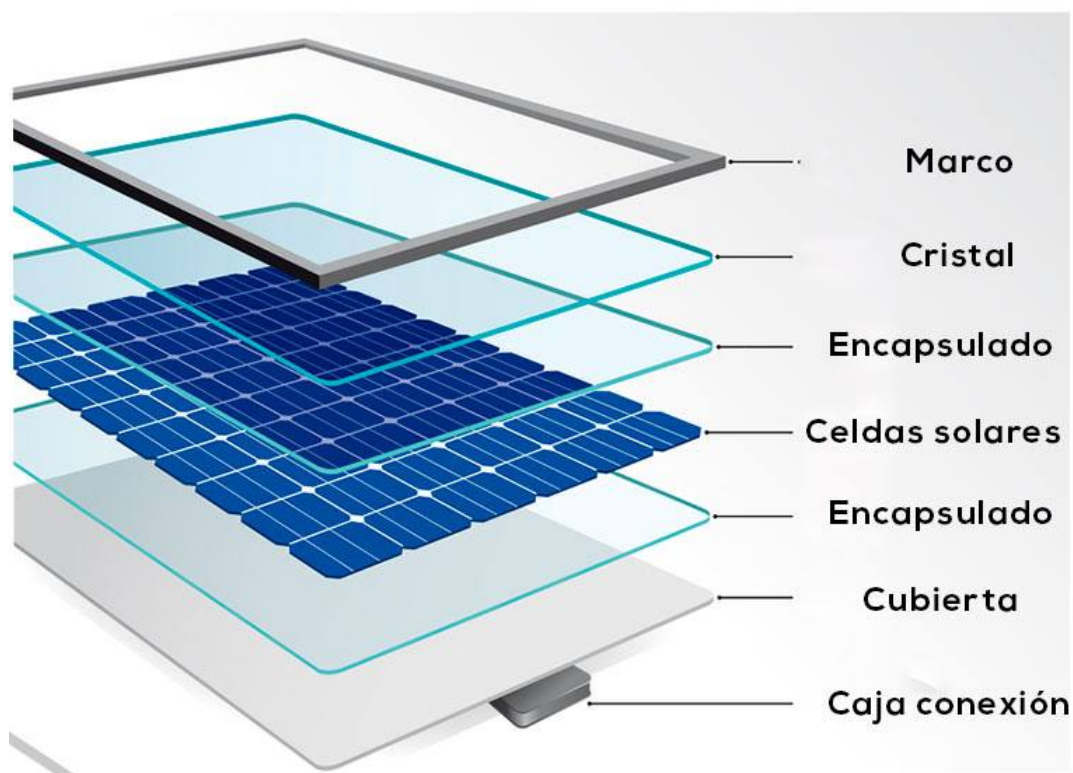


Figura 3-3.: Panel solar [34].

3.1.2. Reguladores

Son dispositivos que se encargan de prestar un proceso óptimo de carga de la batería, con el cual su objetivo principal es evitar la sobrecarga y la sobre descarga que se pueda llegar a tener en el sistema, así mismo prestando un servicio de satisfacer los consumos que se puedan presentar como de la vida útil de la batería. En algunos casos estos reguladores prestan otro tipo de servicios, ya que pueden monitorizar la temperatura de las baterías [35].

En el caso que se tenga una sobre carga el regulador pone el generador fotovoltaico en un circuito abierto, con esto se puede evitar el paso de corriente hacia la batería, en el caso de sobre descarga el regulador corta todo el suministro a los consumos. Los reguladores se seleccionan en función de la tensión del sistema y de la corriente, presentando las siguientes funciones:

1. Prevenir la sobrecarga de la batería.

2. Prevenir la sobre descarga de la batería.
3. Brindar funciones de control del consumo.
4. Brindar información del estado del sistema a los usuarios u operarios.
5. Servir como mecanismo de control para otros generadores de energía [35].

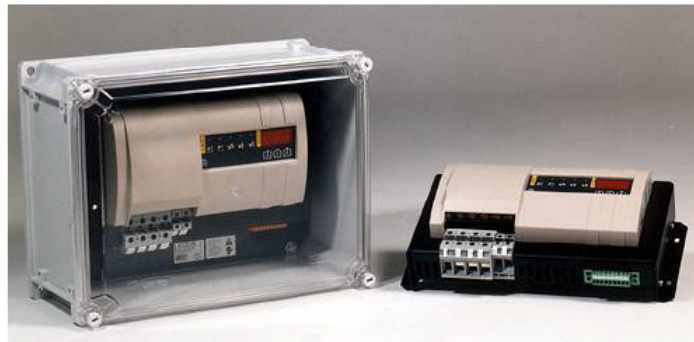


Figura 3-4.: regulador de carga [35].

3.1.3. Inversor de CA

Los sistemas fotovoltaicos generan corriente continua y es necesario que esa corriente que se está generando sea una corriente alterna, es por esto que se tiene la necesidad de contar con un dispositivo como el inversor, dado que este es el encargado de cambiar de tipo de corriente. En sistemas no conectados a la red el inversor está conectado a una batería y en sistemas conectados el inversor está conectado al generador fotovoltaico.

Dentro de sus funciones se encuentran:

1. Inversor CC/CA.
2. Modulación de la onda alterna de salida.
3. Regulación del valor eficaz de la tensión de salida [35].

Los inversores se pueden clasificar de acuerdo a la función de la forma de la onda de la tensión de salida:

1. De onda cuadrada.
2. De onda modificada.
3. De onda sinusoidal.[35]



Figura 3-5.: inversor fotovoltaico [35].

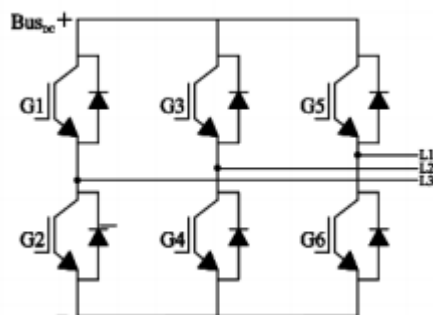


Figura 3-6.: puente inversor [36].

3.1.4. Baterías

Son los dispositivos que permiten almacenar toda la energía que se ha captado de la radiación solar. La mayoría de las baterías que se encuentran en el mercado son de Plomo-ácido ($Pb - a$), también se encuentran baterías de Plomo-Calcio ($Pb - Ca$) y de Plomo-Antimonio ($Pb - Sb$), en donde las primeras necesitan de poco mantenimiento y tienen menor auto descarga, mientras las segundas se deterioran menos en el ciclado diario y presentan mejores prestaciones para los niveles bajos de carga [35].

Si se tiene una serie de baterías en paralelo se suma la capacidad de sus elementos, con esto se tiene que la capacidad necesaria se debe calcular en función de los consumos y al número de días de la autonomía del sistema que se tenga conectado.

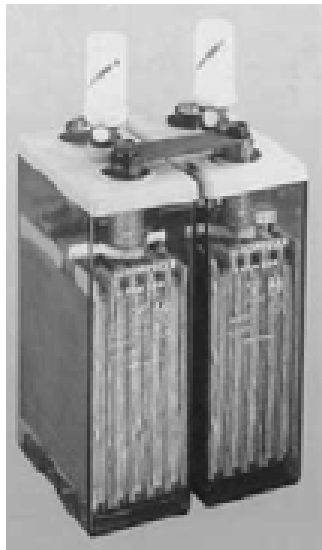


Figura 3-7.: Ejemplo de batería [35].

3.2. Sistemas SFV aislados y conectados a la red

La luz del sol es un consumible que se puede adoptar para todo tipo de energía solar consumible (CSP), con esto también debemos conocer la calidad de energía producida y que confiabilidad nos da este combustible, con esto debemos tener en cuenta tres aspectos en el momento de su implementación que son, la selección del sitio, cual es la producción de energía y el rendimiento temporal y estrategia operativa [15].

La energía solar brinda una serie de opciones de aplicación esto con el fin de lograr buscar en cuál de ellas se podría dar solución y dejar de utilizar fuentes derivadas del petróleo. Esto implica que se puede tener un sistema de suministro de energía eléctrica en un amplio rango de potencia [33].

Con relación a las aplicaciones se puede tener dos sistemas, el sistema aislado a la red y el sistema conectado a la red.

3.2.1. Sistemas aislados

En estos tipos de sistemas se tiene una generación de energía, la cual no tiene ningún tipo de conexión o de generación por medio de la red habitual, así se puede obtener una gran cantidad de energía de manera renovable.

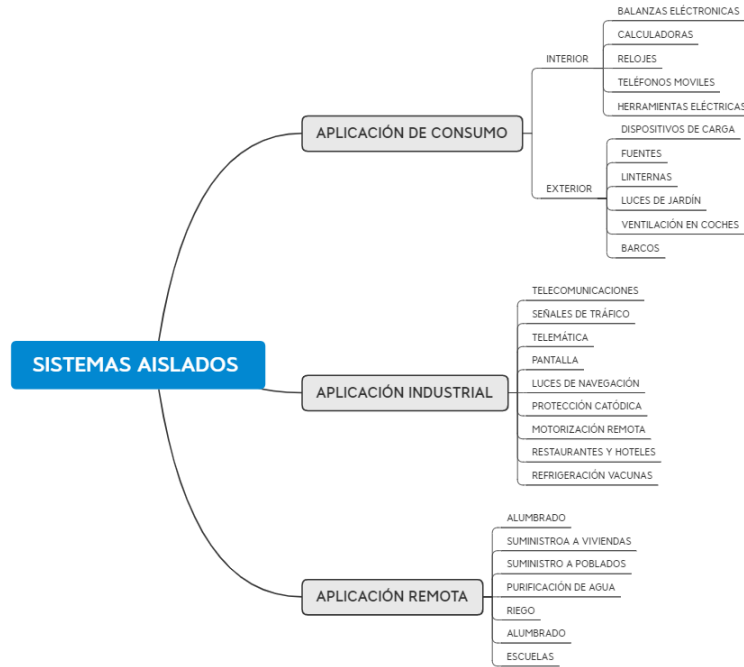


Figura 3-8.: Sistemas aislados a la red [33].

3.2.2. Sistemas conectados a la red

Toma energía de la fuente (solar) y con esto la almacena, para luego poder ser llevada por una red de CA o de CC que la traslada de acuerdo a donde la demanda así lo exija. Microrredes de Energía.

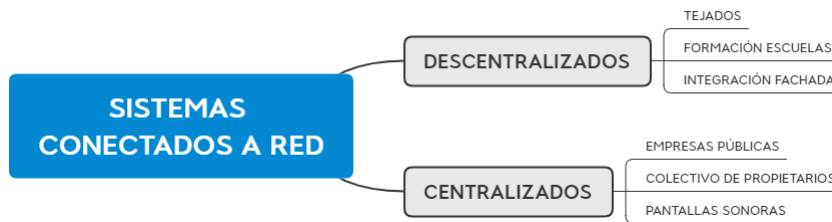


Figura 3-9.: Sistemas conectados a la red [33].

4. Los sistemas de información geográfica y el desarrollo sustentable

Dada la naturaleza de la investigación realizada en esta tesis y la importancia del resultado obtenido para las energías renovables y el desarrollo sustentable, se van a utilizar una serie de planos de información oficiales, emitidos por diferentes Instituciones Públicas, por ejemplo: Ubicación de las ZNIs, suministrado y tomado del UPME, ubicación y delimitación de PNN, suministrado y adoptado del Sistema Nacional de Parques Nacionales Naturales, planos de Radiación Solar Multianual, suministrado y tomado del IDEAM, plano de la Cobertura de Energía Eléctrica suministrado y tomado de la UPME, plano del Índice de Desarrollo Humano suministrado y tomado del DANE, todos esto en concordancia con los Ejes de Sustentabilidad.

Estos Planos de Información (PIs) permiten hacer el análisis mediante dos herramientas distintas, la primera el uso del software QGIS, con el cual se puede hacer una procesamiento vectorial en diferentes capas, unificando la proyección de los PIs y obtener así un único plano de información final y la segunda, son las herramientas de análisis de modelo multivariado, método por el cual tomamos las mejores características de los PIs, características tales como, la alta radiación que se puede tener en algún área o le necesidad de brindar conexión de energía a los habitantes de algún sector, obteniendo un resultado numérico, esto con el fin de lograr obtener como resultado la idoneidad en cada municipio una vez se ha aplicado el método de estadística multivariado a los campos de información geográfica que se obtiene de cada PI. Una descripción de los mismos es lo que se presenta en este capítulo.

4.1. Planos de información

4.1.1. Zonas No Interconectadas

En este plano de información se tiene dos únicos valores, los cuales indican si una región del país tiene conexión a la red eléctrica nacional (STN) o no, en la figura **4-1**, se observa la situación anterior en donde se ve de color marrón los corregimientos que no poseen cobertura energética, que son denominadas como Zonas No Interconectadas (ZNI). Este PI esta basado en el informe de rendición de cuentas 2016-2017 del IPSE, donde aclaran que las ZNI son aproximadamente el 52 % del territorio colombiano, en dicho porcentaje se observa que la parte insular de Colombia (San Andrés y providencia), cuatro capitales departamentales

(Amazonas, Vichada, Guainía y Vaupés), 17 departamentos, 97 municipios, 37 cabeceras municipales y 1728 localidades [37]. Así mismo en dicho informe se define las principales características para ser ZNI:

1. Nivel de necesidades básicas insatisfechas superior al 77 %.
2. Zonas de baja densidad poblacional.
3. Bajo nivel de consumo promedio.
4. Baja capacidad de pago por parte de los usuarios.
5. Bajo nivel de recaudo de la cartera de las empresas.
6. Altos costos de prestación de servicios de energía eléctrica.
7. Altos niveles de pérdidas.
8. Bajo nivel de micromedición.
9. Presencia en las ZNI de zonas de fronteras y áreas de consolidación, zonas costeras e insulares y áreas biodiversas y territorios colectivos de comunidades étnicas nacionales [37].

Este PI es de gran importancia dado que ayuda a fomentar el crecimiento económico de las regiones y pretende mejorar las calidad de vida de la sociedad.

En color beige se observan los municipios que tienen cobertura de energía eléctrica por medio del STN. El mapa considera ZNIs con y sin telemetría.

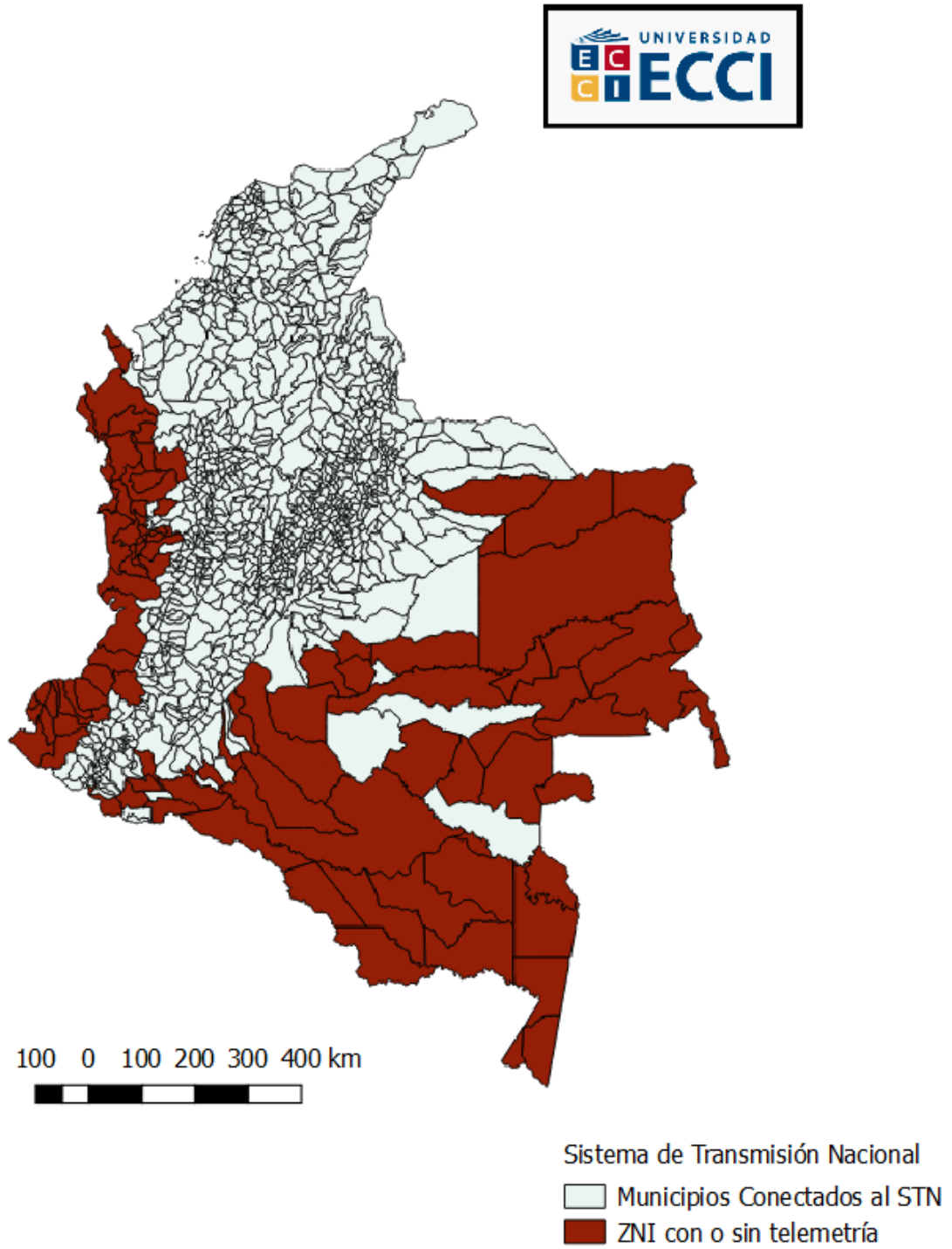


Figura 4-1.: Plano de Información de Zonas No Interconectadas [38].

4.1.2. Parques Nacionales Naturales

Para la creación de este PI, se tiene en cuenta la información registrada por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), en cual esta compuesto por 58 áreas con una extensión de 14254142,56 hectáreas, estando conformado por 42 Parques Nacionales Naturales, 12 Santuarios de Fauna y Flora, 2 Reservas Nacionales Naturales, 1 Vía Parque y 1 Área Natural Única [39], este PI sirve para fortalecer el eje ambiental a tener en esta tesis.

En la creación de este PI se tiene como información importante, por supuesto indispensable del registro realizado por la entidad PARQUES NATURALES DE COLOMBIA, creada a nivel nacional sin personería jurídica y con autonomía administrativa y financiera según los términos del artículo 67 de la Ley 489 de 1998. Siendo esta entidad la encargada de la administración y manejo del sistema de parques nacionales naturales y el sistema nacional de áreas protegidas; teniendo una reestructuración en el 2011 mediante el Decreto 3572 de 2011 y se creó como una unidad administrativa especial. De toda la información depositada por esta entidad es relevante para la investigación los siguientes atributos:

1. NOMBRE: Hace referencia al nombre que se le dio al parque natural.
2. CATEGORÍA: Se caracteriza según las características que presente el territorio.
3. TERRITORIO: es la ubicación donde se encuentra el parque o reserva.
4. HECTAREAS: Es el área que ocupa el parque a trabajar.
5. CENTROIX Y CENTROIDY: Es el referenciación por coordenadas sobre el territorio nacional.
6. PERÍMETRO: es la relación con respecto al área que ocupa el parque.

En la figura 4-2 se puede observar el PI de acuerdo a la ubicación de los PNN, en el cual se puede interpretar que de color beige se observa que es un PNN y de color marrón se observa que no es un PNN.

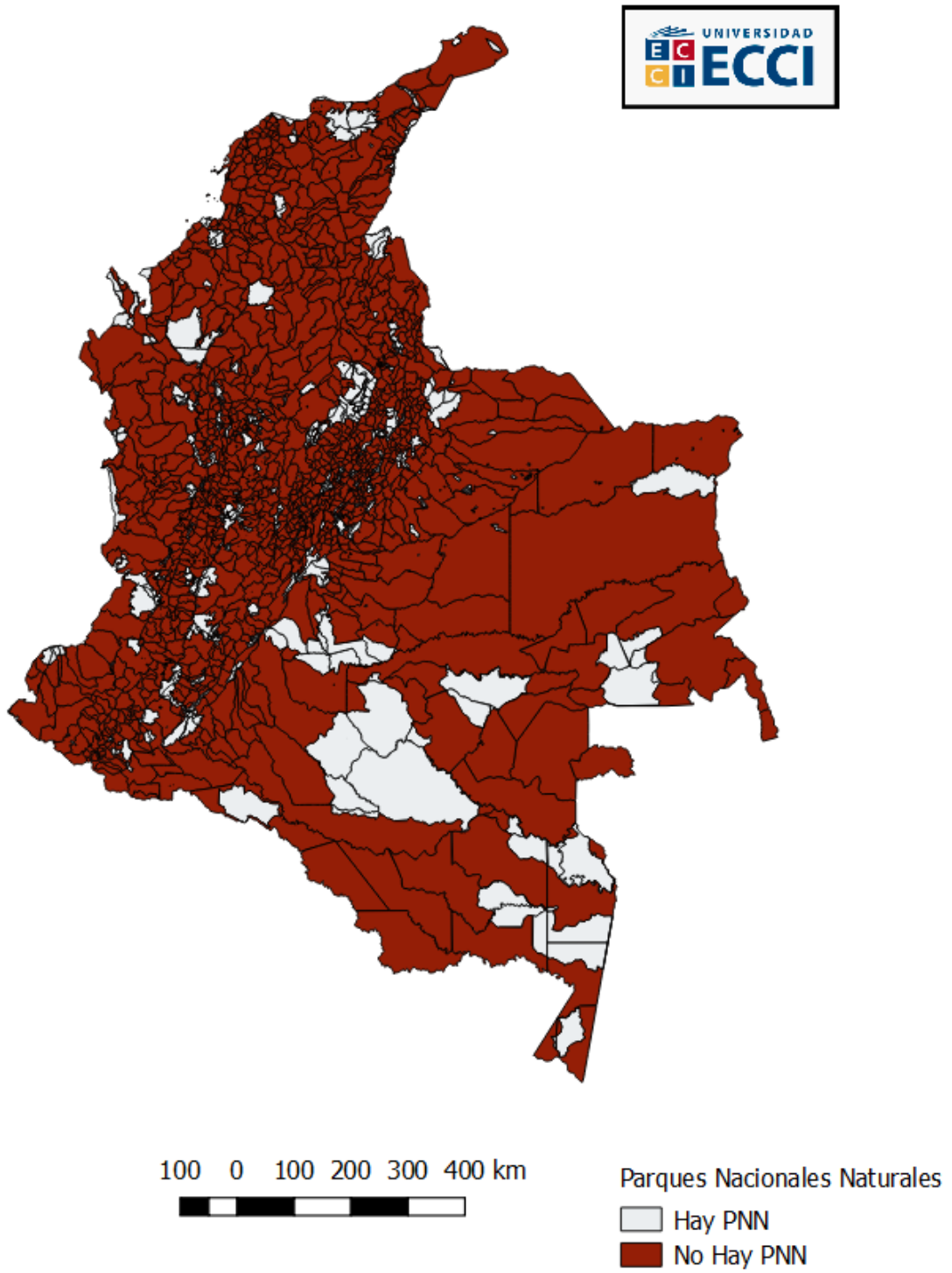


Figura 4-2.: Plano de Información de Parques Nacionales Naturales [39].

4.1.3. Radiación Solar

El mapa de radiación solar, es construido por medio de modelos de predicción de radiación solar, de los promedios mensuales de las distintas mediciones hechas por medio de los Piranómetros que están a cargo del el IDEAM, CENICAÑA, CENICAFE, CAR, IPSE Y FEDEARROZ, con este PI se apunta al eje económico, todo con el fin de mejorar la calidad de vida de la sociedad.

Estos modelos son contemplados como empíricos debido a su aproximación por medio de métodos, el método seleccionado en la creación del mapa de Colombia es Angstrom-Prescott, debido a su gran apoyo en proyectos similares a nivel internacional, donde fundamenta en las radiaciones solares calculada en el límite superior de la atmósfera (H_0) y la medida en la superficie terrestre (H) expresada en (Wh/m^2), definiendo las horas de brillo solar medida en la superficie (n) y la duración astronómica del día (N) medido en horas [24].

De acuerdo a la información suministrada por parte del IDEAM se obtiene un plano de información, véase figura **4-3**, a este plano lo acompaña una tabla de información, véase tabla **4-1**, los cuales representan cuatro valores que son:

1. ID: este es un numero codificado para la identificación de un espacio geográfico en específico en todo el territorio colombiano.
2. GRIDCODE: Es el código de cuadrícula, escala de ubicación respecto al mapa.
3. RANGO: Es el rango de la radiación solar en ese punto respectivamente.
4. RULEID: Es el valor entero del punto de valoración específico de la ubicación brindada.

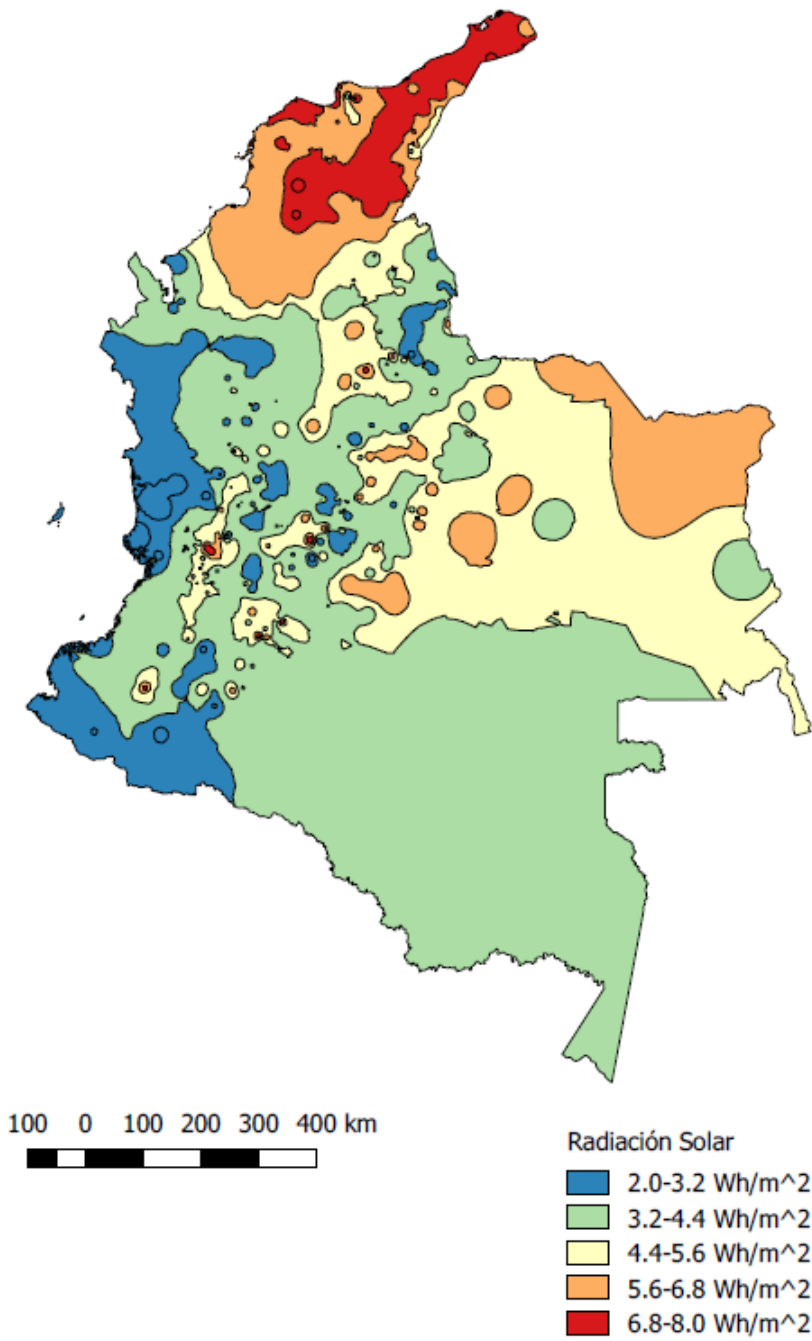


Figura 4-3.: Promedio multianual de radiación solar [24].

ID	GRIDCORE	RANGO	RULEID
39	7	5.5-6.0 kWh/m ²	7
28	5	4.5-5.0 kWh/m ²	5
27	4	4.0-4.5 kWh/m ²	4
23	7	5.5-6.0 kWh/m ²	7

Tabla 4-1.: Información del plano de la radiación solar [24].

Para realizar la normalización del plano de información se tomo la columna de rango, dado que es la que brinda la información precisa de la cantidad de radiación solar que se tiene para las regiones.

4.1.4. Índice de Desarrollo Humano

Para la realización de este mapa se tiene en cuenta la información recolectada por el departamento nacional de planeación (DNP), de la cual mide el impacto social respecto a la evolución del departamento; para ello maneja una serie de criterios de decisión por medio de indicadores, de los cuales se establecen la viabilidad e impacto de proyectos. Para este caso la evaluación se caracteriza por 3 indicadores que exponen si el desarrollo generado es incipiente, es igual a 1, si es intermedio, es igual a 2 o si es robusto es igual a 3. De allí nace la caracterización principal de este mapa, todo esto apuntando a mejorar el eje sustentable social. Lo anteriormente mencionado se complementa con información adicional, como se evidencia a continuación:

1. ID ESPACIAL: este es un numero codificado para la identificación de un espacio geográfico en específico en todo el territorio colombiano.
2. ÁREA OFICIAL: hace referencia al área total del territorio que se está revisando.
3. ENTIDAD TERRITORIAL: hace alusión a la discriminación de qué tipo de territorio se está trabajando dependiendo de la organización territorial discriminada por el gobierno.
4. CÓDIGO DEPARTAMENTO: este número hace referencia a la codificación asignada por el DANE para estandarizar e identificar regiones enteras para la realización de proyectos.
5. VALOR: hace referencia al resultado de la operación de la fórmula de cobertura bruta de educación.
6. RANGO: es la ubicación entre datos específicos para generar un contexto de datos similares.

En la figura 4-4 se puede observar el porcentaje en escala de colores que se tiene para el desarrollo humano. Para el resto de regiones que no se observan en el mapa, se debe indicar que el DANE no tiene la información precisa para poder generar el plano de información correspondiente.

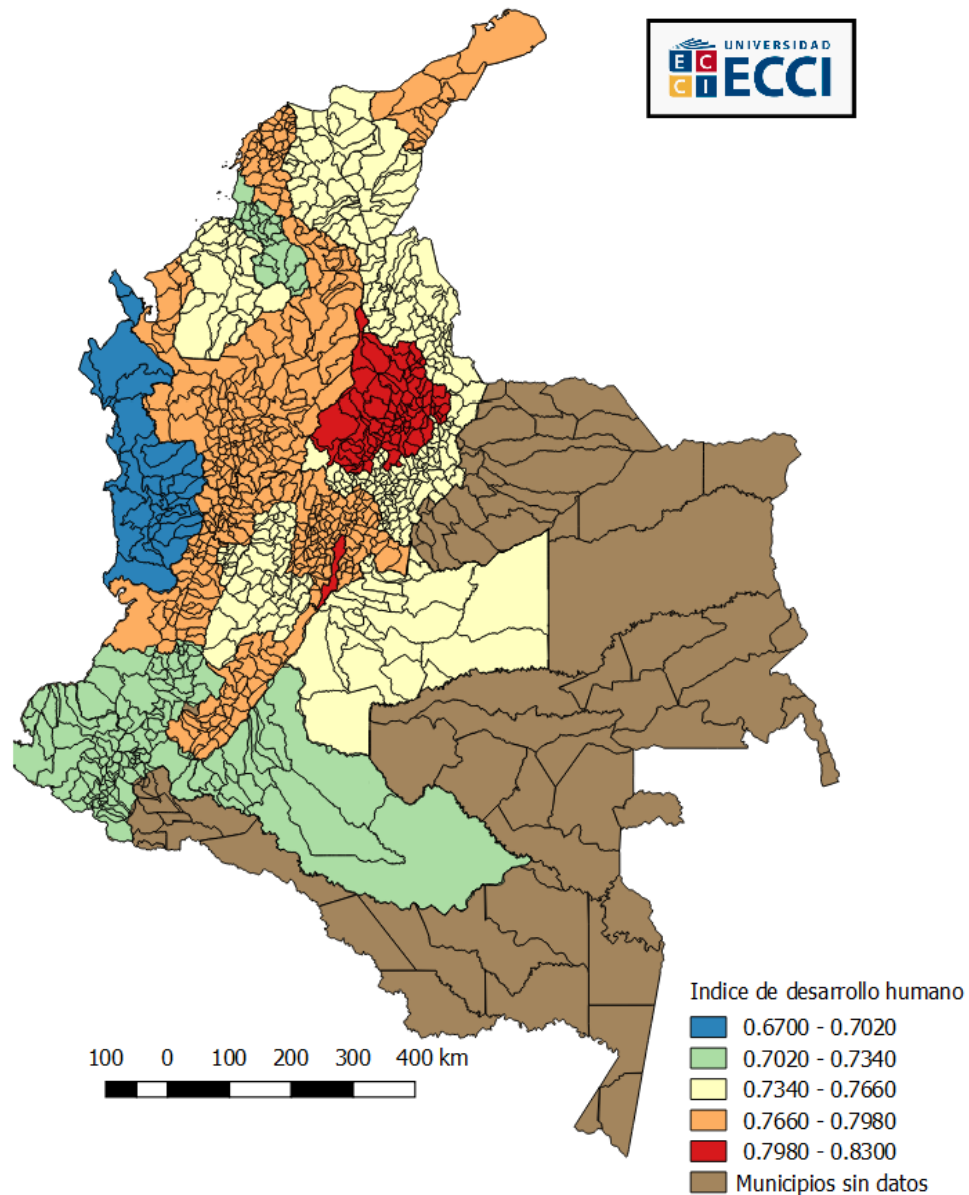


Figura 4-4.: Plano de Información del Índice de Desarrollo Humano [40].

4.1.5. Cobertura de Energía en Colombia

El mapa de cobertura rural de energía fue realizado con la información brindada por los operadores de red contratados para el estudio, el instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas (IPSE), validación de la información por entes territoriales y el departamento administrativo nacional de estadística (DANE), se debe indicar que el IPSE no tiene la información precisa para poder generar el plano de información correspondiente. De estos insumos se realizó el cálculo respectivo por medio de la siguiente ecuación 4-1:

$$IC_{ij} = \frac{U_{ij}}{V_{ij}} * 100\% \quad (4-1)$$

Donde:

1. U : usuarios del servicio de energía eléctrica.
2. V : viviendas
3. i : periodo de análisis.
4. j : municipio, departamento, región.

Y así se puede obtener un plano de información con el porcentaje de acuerdo a la cobertura que se tiene ruralmente, véase figura 4-5, a este plano lo acompaña una tabla de información, véase tabla 4-2, los cuales representan cuatro valores que son:

1. ID ESPACIAL: este es un numero codificado para la identificación de un espacio geográfico en específico en todo el territorio colombiano.
2. ÁREA OFICIAL: hace referencia al área total del territorio que se está revisando.
3. ENTIDAD TERRITORIAL: hace alusión a la discriminación de qué tipo de territorio se está trabajando dependiendo de la organización territorial discriminada por el gobierno.
4. CÓDIGO DEPARTAMENTO: este número hace referencia a la codificación asignada por el DANE para estandarizar e identificar regiones enteras para la realización de proyectos.
5. VALOR: hace referencia al resultado de la operación de la fórmula de índice de cobertura.
6. RANGO: es la ubicación entre datos específicos para generar un contexto de datos similares.

ID ESPACIAL	ÁREA OFICIAL	ENTIDAD TERRITORIAL	CÓDIGO DEL DEPARTAMENTO	VALOR	RANGO
91536	13350	Corregimiento de Amazonas	91	41.86	20.1-50
91001	5829	Cap. Depto.	91	21.05	20.1-50
91430	1443	Corregimiento de Amazonas	91	21.95	20.1-50
95015	16200	Cabecera municipal	91	26.44	20.1-50

Tabla 4-2.: Información del plano de la cobertura energética municipal.

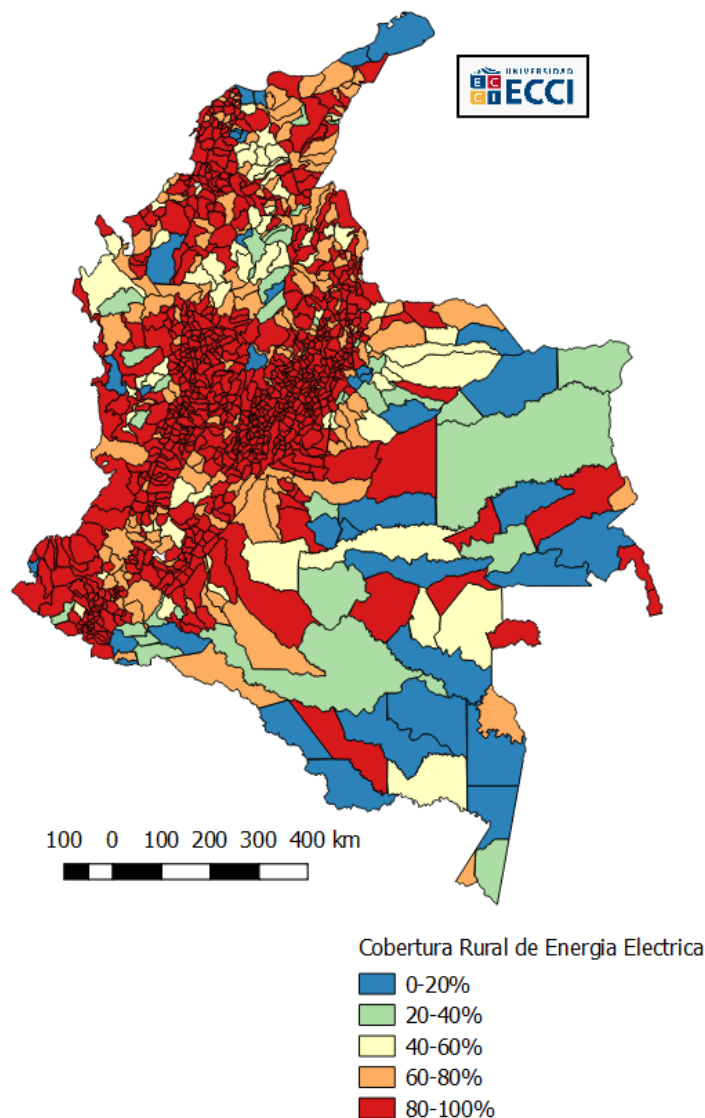


Figura 4-5.: Plano de Información de Cobertura Energética [41].

4.1.6. División Política Municipal (Nivel 3) de Colombia

Este PI es necesario utilizarlo, dado que existen otros planos que no cuentan con la información necesaria para relacionar entre sí, de él fue necesario tomar el código y el nombre de cada municipio, el fin de este PI es realizar una unión con todos los otros PI y así obtener la información que es requerida para cada municipio.



Figura 4-6.: Plano de información nivel 3 Colombia [42].

4.2. Escenarios de idoneidad por medio del desarrollo sustentable

4.2.1. Primer Escenario: Encuestas Realizadas a la Comunidad ECCI

Este escenario está definido por la metodología AHP y en lugar de contar con la opinión de expertos en el área de energías renovables y desarrollo sustentable, se considera la opinión de la comunidad, en la matriz global final, la cual será mostrada en el anexo B tabla **B-2**.

4.2.2. Segundo Escenario: Perspectiva de Desarrollo Sustentable

Según la Comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo (CMMAD) se define el Desarrollo Sustentable como aquel que satisface las necesidades del presente sin menoscabar la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades [43]

Este «Escenario de Desarrollo Sustentable» se basa en los tres ejes de la sustentabilidad (eje social, económico y ambiental). Se decide dar valores relativos mayores al desarrollo departamental, pues es el PI que relaciona el eje social, luego se toma los Parques nacionales naturales, eje ambiental, dado que la prioridad es fortalecer aquellos aspectos sociales de la comunidad, logrando mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región seleccionada como idónea.

A este escenario según lo planteado en la tabla **5-1**, se le aplica el cálculo del Rank-sum y así se obtienen dichos pesos finales.

4.2.3. Tercer Escenario: Perspectiva de Liberalismo Económico

La política energética constituye una especificación sectorial de la política socio-económica, teniendo en cuenta la importancia de la energía como elemento para mejorar la calidad de vida y atendiendo a la fuerte interacción con el medio ambiente, la política energética desempeña un rol de especial importancia dentro del desarrollo social [43].

Este escenario toma como nombre «escenario de liberalismo económico», según la tabla **5-2**, dada la definición anterior se le da la mayor importancia a la radiación solar, como fuente de energía, luego se tiene la cobertura energética, dado que es acá a donde se quiere ayudar a la población.

Este escenario según lo planteado en la tabla **5-2**, Se hace la aplicación de la técnica estadística del Rank Sum y con ello se puede obtener los pesos relativos para cada plano de información y con estos pesos se hace la aplicación de la técnica WLC para poder obtener resultados finales.

5. El modelo multicriterio aplicado a la idoneidad

Un análisis multicriterio es un instrumento que apoya a la toma de decisiones, para poder realizar una comparación entre distinta información, pero basándose en una evaluación de un conjunto de datos. Los métodos de Toma de Decisiones pueden ser clasificados de manera individual o en un grupo [44].

A partir de la estructuración del modelo, es necesario definir los objetivos para poder dar solución a la pregunta planteada en un principio, con esto se tiene la necesidad de utilizar técnicas de decisión multicriterio para la solución [9].

La toma de decisiones implica realizar comparaciones de acuerdo a las necesidades que se les pueda aplicar a los criterios, todo esto para poder aplicar una jerarquización y establecer la prioridad entre ellos [45].

Para poder dar la jerarquía se debe tener la claridad de los problemas de decisión, siguiendo la siguiente estructura:

1. Conocer los elementos que van a ser evaluados, entre ellos tenemos:
 - Objetivos.
 - Criterios.
 - Actores.
 - Juicios de valor.
 - Conocimiento experimental.
 - Intuición.
 - Alternativas.
2. Se debe llevar el proceso de acuerdo al tomador de decisiones
 - Jerarquización.
 - Priorización.
 - Selección.
3. Por ultimo, se obtienen los resultados necesarios y poder tomar una decisión.

Esta técnica indica que se deben de seguir ciertos pasos, se debe tener en cuenta los siguiente:

1. Definir bien los criterios con sus respectivas restricciones.
2. Definir los tipos de variables.
3. Modelamiento de las preferencias.
4. Definir si se usan modelos determinísticos.
5. Definir los métodos de agregación [45].

5.1. Técnica Rank Sum

Para llevar a cabo el análisis multivariado y de acuerdo a las técnicas de análisis se debe primero generar la importancia relativa que existen entre los objetivos o criterios que se tiene en cada plano de información, donde se realiza una evaluación entre cada plano y se define cuál de los criterios posee un mayor valor numérico con respecto a otro de su propio intervalo, por tanto se debe realizar como primer paso la normalización de los criterios y así obtener su peso en una nueva escala, esta normalización se basa de dos maneras, la primera es de manera creciente ecuación 5-1 , dado que toma el 1 como el valor de más importancia y como segunda es de manera decreciente ecuación 5-2, dado que toma el 1 como el valor de menos importancia [44].

$$\mu_i = \left(\frac{x_i - x_{max}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (5-1)$$

$$\mu_i = \left(\frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (5-2)$$

Donde:

- μ : Normalización.
- x_i : Valor a ser normalizado.
- x_{min} : Valor mínimo de los criterios.
- x_{max} : Valor máximo de los criterios.

Para el análisis multivariado se va a aplicar la metodología Rank-sum y con esto dar pesos a los planos de información, también se va a tener un escenario dado mediante el uso de encuestas, a continuación, se hace la descripción de los tres escenarios planteados para lograr el análisis multivariado:

- El primer escenario es obtenido mediante la selección de personas con conocimientos en el tema de las energías renovables, física, matemáticas e ingeniería mecánica.
- El segundo escenario se realizó bajo el eje sustentable del desarrollo sustentable.
- El tercer escenario se realizó bajo el eje sustentable del liberalismo económico.

El método Rank-sum es aquel que permite dar un orden a los criterios, para ello se debe dar una jerarquía o un peso relativo a cada plano de información donde el valor numérico 1 es el criterio más importante, 2 es el segundo criterio de importancia y así hasta tener un valor numérico de 5 donde es el criterio menos importante, esto de acuerdo al valor tomado por los dos ejes sustentables. Para poder dar la jerarquía se debe utilizar la ecuación 5-3, y teniendo que la suma de los pesos normalizados debe ser igual a 1.

$$W_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum_k (n - r_k + 1)} \quad (5-3)$$

Donde:

- W_j : Peso normalizado para el atributo j.
- r_j : Posición de rango del atributo.
- n : Número de atributos.

Utilizando la ecuación 5-3 obtenemos la Tabla **5-1** para el escenario del desarrollo sustentable y la Tabla **5-2** para el escenario liberalismo económico.

Desarrollo sustentable	Categoría	Peso
Radiación solar	3	0.200
Zona no interconectada	1	0.333
Desarrollo Dept.	4	0.133
Cobertura energética	5	0.067
Parques Nacionales	2	0.267
Total		1

Tabla 5-1.: Escenario considerando el Desarrollo Sustentable.

Desarrollo sustentable	Categoría	Peso
Radiación solar	1	0.333
Zona no interconectada	4	0.133
Desarrollo Dept.	3	0.200
Cobertura energética	2	0.267
Parques Nacionales	5	0.067
Total		1

Tabla 5-2.: Escenario considerando el Liberalismo Económico.

5.2. Análisis jerárquico (AHP)

El proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchy Process), que fue desarrollado por Thomas L. Saaty, el cual fue diseñado con el fin de resolver problemas de criterio múltiple, el resultado del AHP es dar una jerarquía con prioridades donde se evidencia la preferencia global para cada una de las alternativas de la decisión. El AHP se basa en:

- Dar una estructura del modelo.
- Priorizar los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluar los elementos mediante asignaciones de pesos.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Da un análisis de sensibilidad [46].

Para poder realizar este el proceso AHP, es necesario realizar una encuesta, según la Tabla 5-3 (se puede observar la encuesta completa en el anexo B), con expertos en distintas áreas. Con esto dar el concepto de cuál de los factores de los planos de información tiene un peso más alto o más bajo que otro, esto con el fin de lograr crear una matriz $n \times n$ y poder aplicar el método AHP [47].

	Radiación solar	ZNI	Desarrollo Dept.	Cobertura energética	PNN
Radiación solar					
ZNI					
Desarrollo Dept.					
Cobertura energética					
PNN					

Tabla 5-3.: Matriz de Aplicación de la Encuesta.

Los criterios para obtener la información idónea de cada PI los podemos observar en la Tabla 5-4.

Eje Sustentable	Criterio	Parámetro
Ambiental	Radiación solar	$>4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$
	PNN	No es parque
Social	Desarrollo humano	Bajo %
Económico	Cobertura energética	No hay
	ZNI	No hay conexión

Tabla 5-4.: Criterios Idóneos de los PIs.

Normalización de Criterios

Para los parámetros anteriores se tiene en cuenta que la radiación solar debe tener un valor mayor a $4,5 \text{ kWh}/\text{m}^2$, Para los parques nacionales naturales debe estar fuera de los mismos dado que no se puede hacer una conexión en estos sitios, Desarrollo humano se utiliza donde el porcentaje sea bajo, Cobertura de energía se toman aquellos municipios que no cuentan con una conexión eléctrica y las zonas no interconectadas donde el STN no hace presencia. Dado los criterios más relevantes y dados los planos de información, se normalizan para obtener la siguiente información:

Criterio	Escala normalizada	Descripción	Tipo de normalización
Radiación solar	0	Baja radiación	Creciente
	1	Alta radiación	
PNN	0	Es PNN	Decreciente (discreta)
	1	No es PNN	
Desarrollo humano	0	Bajo %	Creciente
	1	Alto %	
Cobertura energética	0	Si hay cobertura	Decreciente
	1	No hay cobertura	
ZNI	0	No es ZNI	Decreciente (discreta)
	1	Si es ZNI	

Tabla 5-5.: Normalización de los Criterios de los PIs

El paso siguiente es aplicar la encuesta, esta es aplicada a 25 personas, que de acuerdo a sus estudios realizados son capaces de tomar decisiones frente a los características antes mencionadas en la Tabla 5-5, para la aplicación de esta encuesta se toma la tabla de escala de importancia relativa, la cual es dada y adoptada por [8], según la Tabla 5-6.

Menos importante				Igual	Más importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
Absoluta	Muy grande	Grande	Pequeña	Igual	Pequeña	Grande	Muy grande	Absoluta

Tabla 5-6.: Escala de Importancia Relativa de los Criterios [8].

Al aplicar esta escala de importancia relativa, se obtiene un total de 25 respuestas, con estas respuestas ahora se aplica la ecuación 5-4, esto con el fin de obtener una única matriz global, y de la ecuación 5-5, se utiliza para calcular la razón entre el valor de la matriz global y la adición de la columna consolidada para obtener una matriz normalizada. [44]

$$r = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ln(a_{ij}) \right] = \left(\prod_{i=1}^N a^{ij} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (5-4)$$

Donde:

- r : Valor consolidado.
- N : total de encuestas.
- a_{ij} : Escala tomada por el tomador de decisiones.

$$p = \frac{r}{\sum_{i=1}^N r} \quad (5-5)$$

Donde:

- p : valor a ser normalizado.
- r : valor consolidado.

Luego de normalizar la matriz global se procede a identificar el peso relativo que tiene cada uno de los criterios de los planos de información, este cálculo se hace con la ecuación 5-6, llamada vector prioridad o vector Eigen.

$$w = \frac{\sum p}{n} \quad (5-6)$$

Donde:

- w : Vector de Eigen.
- p : Valor normalizado.
- n : Total de criterios.

Luego de obtener estos pesos relativos, se debe verificar el índice de consistencia de las opiniones de las personas encuestadas, según la ecuación 5-7.

$$C_I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5-7)$$

Donde:

- C_I : Índice de consistencia.
- λ : Valor principal del vector Eigen
- n : Total de criterios.

Para calcular el vector principal de Eigen se debe utilizar la ecuación 5-8, en la cual se realiza la suma de los productos del vector prioridad con la suma de las columnas de la matriz consolidada.

$$\lambda_{max} = \sum \left(w * \sum r \right) \quad (5-8)$$

Donde:

- λ_{max} : Valor principal del vector Eigen.

- w : Vector de Eigen.
- r : Valor consolidado.

Según [8], se propone el uso de la ecuación 5-9 para calcular la tasa de consistencia, logrando verificar la adecuación del valor de consistencia y el índice aleatorio R_I , el cual se toma de acuerdo a la dimensión de la matriz, según la Tabla 5-7, siendo una condición necesaria para obtener el resultado real, tomando como nombre tasa de consistencia C_R y que debe estar por debajo del 10% [8].

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (5-9)$$

- C_R : Tasa de consistencia.
- C_I : Índice de consistencia.
- R_I : Índice de consistencia aleatoria.

Dimensión de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.5	0.9	1.1	1.3	1.4	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6

Tabla 5-7.: Índice de consistencia aleatoria [8].

De esta forma y de comprobar que la tasa de consistencia es inferior al 10%, es posible seguir trabajando con los métodos de análisis multicriterio, como lo es el método de combinación lineal ponderada (WLC).

5.3. Método de combinación lineal ponderada (WLC)

Luego de que los criterios fueron normalizados en una escala de cero a uno, se pueden agregar de acuerdo con una regla de decisión, utilizando el método combinación lineal ponderada (Weighted Linear Combination –WLC) [9].

Este método permite agregar las distintas variables de los planos de información para el análisis multicriterio, dichas variables son sometidas al método de compensación (WLC) logrando unificar por medio de un equilibrio a todos los criterios.

Es necesario utilizar la ecuación 5-10, en donde se suman los valores obtenidos de la multiplicación de los criterios de la normalización y su respectivo peso relativo [44].

$$S = \sum_{i=1}^n W_i * X_i * \prod_{j=1}^k c_j \quad (5-10)$$

Donde:

- S : Valor Final del Criterio o Idoneidad del Criterio.
- W_i : Peso Normalizado del Criterio.
- n : Número de Criterios.
- X_i : Valor a ser normalizado.
- c_j : Valor del Criterio de Exclusión.
- k : Número de Criterios de Exclusión.

Al realizar este análisis, se puede realizar una compensación entre aquellos criterios, que no tenían un valor numérico alto, u ejemplo de ellos se observa en la Tabla 5-8, donde se puede observar que en el municipio de *Puerto Leguizamo*, se tiene una radiación solar baja, pero también se observa que su valor de cobertura energética es alto, por tanto al realizar el proceso estadístico se tiene que su resultado de WLC es un valor alto y se puede determinar que es un municipio idóneo.

MUNICIPIO IDONEO	Radiación Solar	ZNI	Desarrollo DPTA	Cobertura Enegetica	PNN	Resultado del WLC
Puerto Leguizamo	0.21429	0.73073	1	0.8767	1	0.7986869
Vista Hermosa	0.64286	0.76	1	0.4945	1	0.8627835

Tabla 5-8.: Importancia del análisis

6. Resultados obtenidos

6.1. Matriz global de la importancia relativa de los criterios

La matriz global es obtenida bajo la aplicación de la metodología AHP, la cual se describe en el capítulo 5.1, esta matriz está dada bajo el concepto de que por cada plano de información se debe tener 5 respuestas, es por tanto que se realizaron 25 encuestas, las cuales fueron realizadas a personas relacionadas con el sector de la ingeniería, con bastantes conocimientos en relación a las energías renovables [44].

En la Tabla 6-1, se observa la matriz global generada dados los 5 criterios estudiados.

	Radiación solar	ZNI	Desarrollo Dept.	Cobertura energética	PNN
Radiación solar		1.27	1.52	1.71	1.01
ZNI	0.79		1.30	3.98	0.70
Desarrollo Dept.	0.66	0.77		5.59	1.16
Cobertura energética	0.58	0.25	0.18		0.73
PNN	0.99	1.43	0.86	1.37	

Tabla 6-1.: Matriz Global de Importancia Relativa de los PIs.

En la Tabla **6-2** se observa la matriz global normalizada, teniendo en cuenta que la suma de sus columnas debe ser igual a 1, con esta matriz se obtienen los vectores de Eigen, de acuerdo con (5-5).

	Radiación solar	ZNI	Desarrollo DPTA	Cobertura energética	PNN
Radiación solar	0.25	0.27	0.31	0.13	0.22
ZNI	0.20	0.21	0.27	0.29	0.15
Desarrollo DPT	0.16	0.16	0.21	0.41	0.25
Cobertura energética	0.15	0.05	0.04	0.07	0.16
PNN	0.25	0.30	0.18	0.10	0.22
Sumatoria	1	1	1	1	1

Tabla 6-2.: Matriz Global Normalizada.

De acuerdo a la Tabla **6-3**, cada uno de los planos de información presenta su correspondiente vector Eigen, de acuerdo con (5-6):

Plano de Información (PI)	Vector Eigen (W)
Radiación solar	0.235
ZNI	0.224
Desarrollo Departamental	0.239
Cobertura energética	0.094
Parque Natural Nacional	0.209
Sumatoria	1

Tabla 6-3.: Valor Eigen para cada Plano de Información – PI.

Para realizar la comprobación de los pesos realizados en el vector Eigen, es necesario realizar el cálculo de la tasa de consistencia CR (ecuación (5-9)), obteniéndose el siguiente resultado resumido en la Tabla 6-4.

Criterios	Radiación solar	ZNI	Desarrollo Departamental	Cobertura energética	PNN
Matriz global	4.02	4.75	4.86	13.64	4.59
Vector Eigen	0.235	0.224	0.239	0.094	0.209
Valor principal vector Eigen(λ)	5.39				
Índice de consistencia(C_I)	0.099				
Tasa de consistencia(C_R)	0.089				

Tabla 6-4.: Resultados Aplicación del Método WLC, Obtención del Índice y de la Tasa de Consistencia.

El valor de la tasa de consistencia está en un valor de 8,9 %, esto indica que la relación que se obtuvo de las encuestas frente a los 5 planos de información está bien dada y bien entendida por los expertos que hicieron parte de dicha encuesta, pues el C_R es ¡al 10 %, de acuerdo con [8].

6.2. Aplicación del método de la media ponderada ordenada (WLC)

Para los escenarios de desarrollo sustentable y de liberalismo económico, se utilizó la técnica de combinación lineal ponderada WLC, en las tablas 5-1 y 5-2 se observa la jerarquización que se obtuvo según los pesos relativos. Luego de la aplicación del método WLC se utilizó el software QGIS, con esto se realizó la relación de los mapas y con ello permitiendo obtener los resultados que más adelante se van a mostrar, para tomar el mejor municipio dentro de estos escenarios se tiene que entre más cercano a 1 este su valor final e WLC es mejor su alternativa, con esto se tomaron los valores que estuvieran desde 0,75 y superiores para ser los más adecuados.

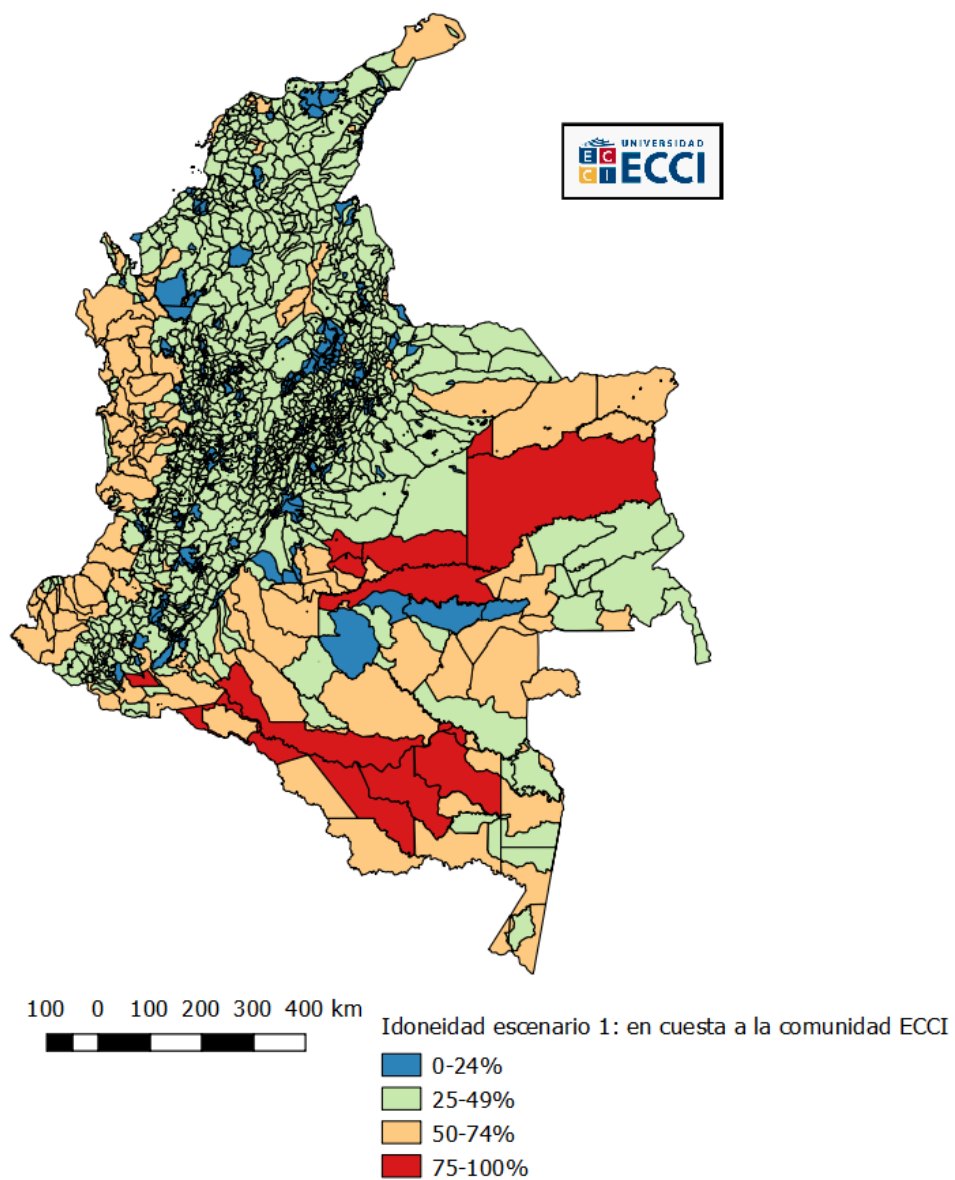


Figura 6-1.: WLC del Escenario 01 (Escenario de las Encuestas a la Comunidad ECCI).

En la Figura 6-1 se observa el resultado de la aplicación de la técnica de WLC para el escenario de las encuestas.

Se puede ver que de color amarillo se han resaltado los municipios que están por debajo del 0,75 y que serían los menos aptos y resaltados en color rojo, se encuentran los municipios que están por encima de 0,75 y que serían los municipios más aptos para las posibles instalaciones de microgeneración SFV.

En la Tabla **6-5** se observar los nombres de dichos municipios idóneos:

Nombre Municipio	WLC (S)
Puerto lleras	0.841
Vista hermosa	0.812
La macarena	0.778
Cumaribo	0.773
Mapiripan	0.773
Puerto rico	0.773
San José del Guaviare	0.773
Solano	0.773
La Chorrera	0.773
La victoria	0.769
Miriti-parana	0.769
Puerto Santander	0.769
Santa Rosalía	0.754

Tabla 6-5.: Resultados para el escenario 1: Encuesta a la comunidad ECCI

Para el primer escenario se observa que hay 13 municipios viables para la instalación de un parque solar fotovoltaico, evidenciando que las dos regiones son la parte alta de la Amazonia y una parte de los llanos orientales.

En la figura **6-2** se observa el resultado de la aplicación de la técnica de WLC para el escenario que considera la perspectiva del Desarrollo Sustentable:

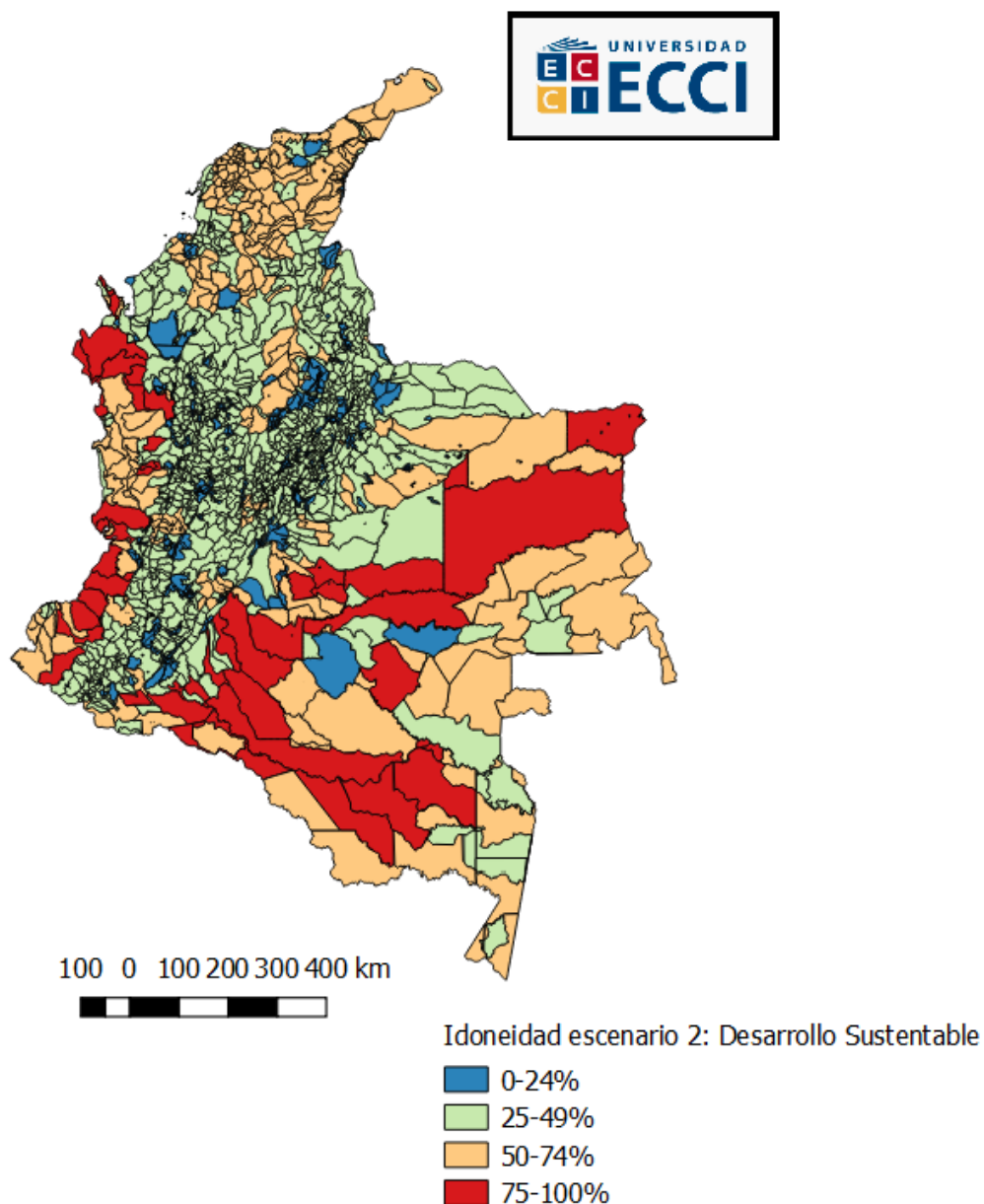


Figura 6-2.: WLC para el escenario 02 (o del Desarrollo Sustentable) .

En la Tabla 6-6 se observa los nombres de dichos municipios, en color amarillo resaltan los municipios que están por debajo del 0,75 y que serían los menos aptos y en color rojo se visualizan los municipios que están por encima de 0,75 y que serían los municipios más idóneos para las posibles instalaciones de parques solares, así:

Nombre Municipio	WLC (Idoneidad S)
Puerto Lleras	0.883
Vista Hermosa	0.862
La Macarena	0.834
Solano	0.827
La Chorrera	0.827
Cumaribo	0.826
Mapiripán	0.826
Puerto Rico	0.826
San José del Guaviare	0.826
La Victoria	0.824

Tabla 6-6.: Resultados para el escenario 2 (o del Desarrollo Sustentable).

Para el escenario 2, se puede observar que cuarenta y tres municipios tienen la mayor influencia para hacer una instalación de parque solares fotovoltaicos para el nivel de micro-generación.

En la figura 6-2 se observa el resultado de la aplicación de la técnica de WLC para el escenario 3 o del liberalismo económico:

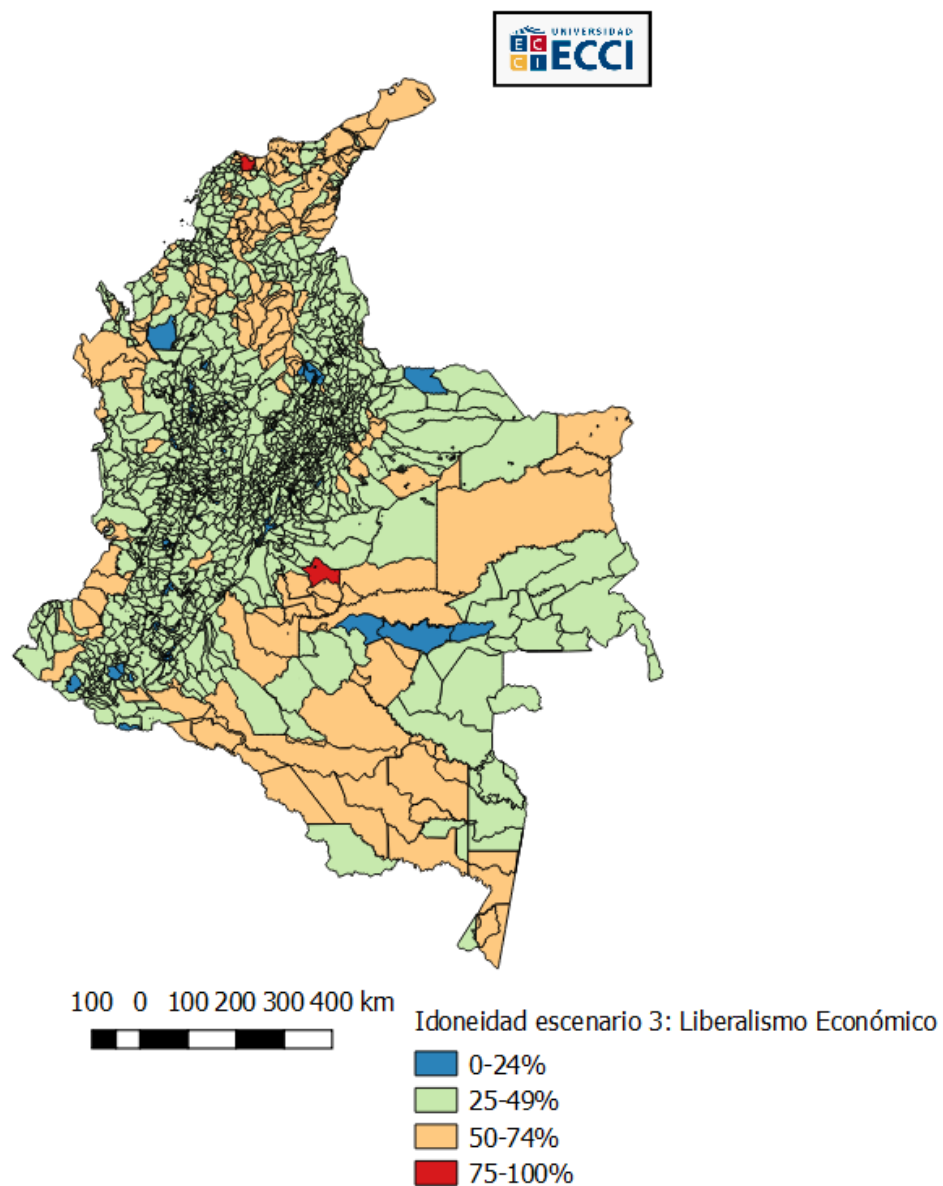


Figura 6-3.: Idoneidad para el Escenario 03 (o del Liberalismo Económico).

En la Tabla 6-7 se observan los nombres de dichos municipios, donde, en color amarillo están los municipios que se hallan por debajo de 0,75 y que serían los menos aptos y en color rojo se aprecian los municipios que están por encima de 0,75 y que serían los municipios más idóneos para las posibles instalaciones de sistemas de micro-generación solar FV.

Nombre municipio	(Idoneidad S)
Puerto Lleras	0.780
Sitionuevo	0.752

Tabla 6-7.: Resultados para el escenario 3, en el que se da preponderancia al Liberalismo Económico.

Para el escenario 03, se puede observar que solo dos municipios tienen la mayor influencia para hacer una instalación sustentable de sistemas de micro-generación solar fotovoltaica.

7. Conclusiones

Por medio del análisis realizado en este trabajo, es posible evidenciar que se encontró que para los 1122 municipios de Colombia, el escenario #2 (también llamado como el Escenario que considera la perspectiva del Desarrollo Sustentable) se alcanza un 3,83 % de municipios idóneos, en comparación con escenario #1 (o Escenario que pregunta a la comunidad ECCI) y que obtiene apenas un 1,16 % de municipios idóneos. Por último, en el escenario #3 (o escenario que resalta la tendencia del Liberalismo Económico) se alcanza apenas un 0,19 % de idoneidad. Por lo tanto, el escenario que refleja mejor la aplicación del método de estadística multivariada y el método de WLC para la búsqueda de una idoneidad a partir de unos criterios con pesos relativos, y que sería interesante adoptar como una Política de Estado para Colombia, respecto a la posible instalación de parques de micro-generación solar fotovoltaica, es el escenario #2. Puede observarse que en el mapa de resultados (ver Figura 6-2) los municipios idóneos se encuentran mayormente ubicados en el litoral pacífico, lo que es indicativo adecuado respecto de la esfera o eje social del Desarrollo Sustentable y de su tratamiento estadístico.

Es de vital importancia además, contar con el plano de información completo para el Índice de Desarrollo Humano (IDH), dado que con el plano disponible se está perdiendo el 10,42 % de los municipios Colombia, pues no se tiene la información detallada del IDH, como es el caso de *Puerto Carreño*, en el *Vichada*, municipio que cuenta con una radiación solar alta ($> 4,5Wh/m^2$) y que sin embargo no resultó lo suficientemente idóneo después de aplicar el análisis estadístico multicriterio, dada la ausencia de este índice, afectando los pesos relativos y la importancia de los criterios seleccionados como PI's.

Una mayor cantidad de criterios y de PI's pueden ser incluidos en una etapa posterior de esta investigación con el objetivo de validar nuevamente los escenarios considerados, siempre y cuando se respeten los ejes de la *Sustentabilidad Fuerte* y se cuente con la información a nivel municipal. Esta primera aproximación aquí presentada, pretende servir de base a estudios posteriores y con mayor rigurosidad, en los que puedan ser considerados otros métodos multivariados que por alcance, no fueron incluidos en esta investigación. Como paso siguiente sería interesante evaluar la radiación del municipio idóneo del Escenario #02, para realizar la simulación técnico económica del Sistema SFV que se implantaría en dicho municipio. Trabajos de naturaleza semejante están desarrollándose en el Semillero de Investigación en Fluidos y Energía, actualmente.

A. Anexo A: Resultados Completos de los Municipios Idóneos de Acuerdo con los Escenarios Planteados

Para el escenario 1: encuesta a la Comunidad ECCI, se encuentran los siguientes municipios.

MUNICIPIO	IDONEIDAD (<i>S</i>)
Puerto Lleras	0.840521325
Vista Hermosa	0.811544092
La Macarena	0.777991337
Cumaribo	0.773415817
Mapiripan	0.773415817
Puerto Rico	0.773415817
San José del Guaviare	0.773415817
Solano	0.773012544
La Chorrera	0.772806833
La Victoria	0.768505598
Miriti-Parana	0.768505598
Puerto Santander	0.768505598
Santa Rosalia	0.754331424

Para el escenario 2: o Escenario de Desarrollo Sustentable. se obtuvieron los siguientes municipios idóneos para la instalación de sistemas de micro-generación SFV:

MUNICIPIO	IDONEIDAD (<i>S</i>)
Puerto Lleras	0.8835468
Vista Hermosa	0.8627835
La Macarena	0.8342115
Solano	0.8272569
La Chorrera	0.8271095
Cumaribo	0.8264028
Mapiripan	0.8264028
Puerto Rico	0.8264028

MUNICIPIO	IDONEIDAD (S)
San José del Guaviare	0.8264028
La Victoria	0.8240275
Miriti-PArana	0.8240275
Puerto Santander	0.8240275
Santa Rosalia	0.8127281
Miraflores	0.8072842
El Charco	0.806604
San Vicente del Caguan	0.80241
Puerto Leguizamo	0.7986869
Unguia	0.7954054
Buenaventura	0.789496
Lopez	0.789496
Currillo	0.7847442
Villa Garzón	0.7845733
Puerto Carreño	0.7840882
Barbacoas	0.7835817
Lloro	0.7827205
Puerto Guzmán	0.7815751
Bahía Solano	0.78128
Urrao	0.7771077
Puerto Rico	0.773838
Carmen del Darien	0.7737364
Murindo	0.7737364
Vigia del Fuerte	0.7737364
Cartagena del Chaira	0.768518
La Montañita	0.768518
Valparaiso	0.768518
Riosucio	0.7668354
Guapi	0.7648988
Timbiqui	0.7648988
Acandi	0.7622197
Jurado	0.761716
Condoto	0.7548083
Rio Iro	0.7548083
El Litoral del San Juan	0.750675

Para el escenario 3, también llamado Escenario del Liberalismo Económico, se encuentran los siguientes municipios:

MUNICIPIO	IDONEIDAD (<i>S</i>)
Puerto Lleras	0.780728133
Sitio Nuevo	0.7520481

B. Anexo B: Preguntas realizadas a la Comunidad ECCL para el Primer Escenario de Idoneidad

Esta encuesta esta diseñada para establecer el nivel de importancia de los criterios utilizados en la investigación de la micro-generación de energía eléctrica en Colombia; para ello tenga en cuenta lo siguiente:

1. Radiación solar: Es la cantidad de energía utilizada para poder producir energía solar, Zonas no interconectadas (ZNI): zonas de Colombia en las que no se tiene conexión eléctrica, Desarrollo Municipal: Es la capacidad que tiene el municipio para gestionar proyectos de desarrollo, Cobertura energética: es la cantidad de energía que se tiene en una área determinada, Parques nacionales naturales: espacio geográfico en donde se encuentra ubicado un parque nacional natural.
2. Utilice la tabla **B-1** de valores, teniendo en cuenta los siguientes rangos:

Menos importante				Igual	Más importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
Absoluta	Muy grande	Grande	Pequeña	Igual	Pequeña	Grande	Muy grande	Absoluta

Tabla B-1.: Escala de importancia relativa [8].

3. Metodología: Dele valor a la importancia que tiene el factor de la fila Vs al factor de la columna teniendo en cuenta los pesos anteriormente expuestos en la tabla **B-1**.

	Radiación solar	ZNI	Desarrollo Dept.	Cobertura energética	PNN
Radiación solar					
ZNI					
Desarrollo Dept.					
Cobertura energética					
PNN					

Tabla B-2.: Matriz de encuestas aplicadas.

Nota: Tenga en cuenta que se debe dar valor a la parte superior de la tabla **B-2** ya que la parte inferior es el valor inverso respectivamente.

Para la solución de dicha encuesta, se realizó las siguientes preguntas comparativas:

1. ¿Qué tan importante es la radiación solar en las zonas no interconectadas?.
2. ¿Qué tan importante es la radiación solar en el desarrollo departamental?.
3. ¿Qué tan importante es la radiación solar para la cobertura energética?.
4. ¿Qué tan importante es la radiación solar en los parques nacionales naturales?.
5. ¿Qué tanta relevancia tiene las zonas no interconectadas en el desarrollo departamental?.
6. ¿Qué tanta relevancia tiene las zonas no interconectadas con la cobertura energética?.
7. ¿Qué tanta relevancia tiene las zonas no interconectadas en los parques nacionales naturales?.
8. ¿Qué tan importante es el desarrollo departamental para tener cobertura energética?.
9. ¿Qué tan importante es el desarrollo departamental en los parques nacionales naturales?.
10. ¿Qué tanta relevancia tiene la cobertura energética en los parques nacionales naturales?.

Resultados Tabulares de las Encuestas:

Encuestado 1

	1	2	3	4	5
1	1	9	1/3	5	3
2	1/9	1	9	1/7	1
3	3	1/9	1	9	7
4	1/5	7	1/9	1	1/7
5	1/3	1	1/7	7	1

Encuestado 2

	1	2	3	4	5
1	1	1/9	3	9	1/3
2	9	1	1/7	5	1/3
3	1/3	7	1	9	1/9
4	1/9	1/5	1/9	1	7
5	3	3	9	1/7	1

Encuestado 3

	1	2	3	4	5
1	1	5	5	3	1/9
2	1/5	1	9	7	1/9
3	1/5	1/9	1	3	1/5
4	1/3	1/7	1/3	1	1
5	9	9	5	1	1

Encuestado 4

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	1/7	3	5
2	5	1	1/7	1/3	7
3	7	7	1	3	7
4	1/3	3	1/3	1	1
5	1/5	1/7	1/7	1	1

Encuestado 5

	1	2	3	4	5
1	1	5	7	3	7
2	1/5	1	3	3	5
3	1/7	1/3	1	1	9
4	1/3	1/3	1	1	5
5	1/7	1/5	1/9	1/5	1

Encuestado 6

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	7	1	1
2	5	1	5	7	1/3
3	1/7	1/5	1	5	1/3
4	1	1/7	1/5	1	1/3
5	1	3	3	3	1

Encuestado 7

	1	2	3	4	5
1	1	5	1/7	1/7	3
2	1/5	1	1/5	5	5
3	7	5	1	5	1
4	7	1/5	1/5	1	1/3
5	1/3	1/5	1	3	1

Encuestado 8

	1	2	3	4	5
1	1	1/9	9	7	5
2	9	1	7	9	5
3	1/9	1/7	1	9	1/7
4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	1/5	1/5	7	1	1

Encuestado 9

	1	2	3	4	5
1	1	9	3	1/3	1/9
2	1/9	1	1/3	9	1/9
3	1/3	3	1	9	7
4	3	1/9	1/9	1	1
5	9	9	1/7	1	1

Encuestado 10

	1	2	3	4	5
1	1	5	1/3	3	1/9
2	1/5	1	3	7	5
3	3	1/3	1	3	3
4	1/3	1/7	1/3	1	1/7
5	9	1/5	1/3	7	1

Encuestado 11

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	3	1/9	9
2	5	1	9	1/5	1/5
3	1/3	1/9	1	1/9	1
4	9	5	9	1	5
5	1/9	5	1	1/5	1

Encuestado 12

	1	2	3	4	5
1	1	3	1/5	7	1/9
2	1/3	1	1/7	9	1/9
3	5	7	1	9	1/9
4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	9	9	9	1	1

Encuestado 13

	1	2	3	4	5
1	1	9	1/7	7	7
2	1/9	1	9	9	9
3	7	1/9	1	9	7
4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	1/7	1/9	1/7	1	1

Encuestado 14

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	7	3	1/9
2	5	1	1/9	9	1/3
3	1/7	9	1	9	1/9
4	1/3	1/9	1/9	1	1/3
5	9	3	9	3	1

Encuestado 15

	1	2	3	4	5
1	1	7	5	5	9
2	1/7	1	7	7	3
3	1/5	1/7	1	5	3
4	1/5	1/7	1/5	1	3
5	1/9	1/3	1/3	1/3	1

Encuestado 16					
	1	2	3	4	5
1	1	7	3	9	7
2	1/7	1	1/7	5	5
3	1/3	7	1	7	5
4	1/9	1/5	1/7	1	3
5	1/7	1/5	1/5	1/3	1

Encuestado 17					
	1	2	3	4	5
1	1	1/9	1/5	9	1/7
2	9	1	9	7	1/7
3	5	1/9	1	9	1/5
4	1/9	1/7	1/9	1	1/9
5	7	7	5	9	1

Encuestado 18					
	1	2	3	4	5
1	1	1/5	9	9	1/7
2	5	1	1/7	7	1/7
3	1/9	7	1	9	1/5
4	1/9	1/7	1/9	1	1/9
5	7	7	5	9	1

Encuestado 19					
	1	2	3	4	5
1	1	1/5	9	1/3	5
2	5	1	9	5	7
3	1/9	1/9	1	9	5
4	3	1/5	1/9	1	9
5	1/5	1/7	1/5	1/9	1

Encuestado 20					
	1	2	3	4	5
1	1	7	1/5	1/7	1/9
2	1/7	1	1/7	5	1/7
3	5	7	1	9	1/9
4	7	1/5	1/9	1	1/9
5	9	7	9	9	1

Encuestado 21					
	1	2	3	4	5
1	1	7	9	3	9
2	1/7	1	1/9	5	5
3	1/9	9	1	9	3
4	1/3	1/5	1/9	1	3
5	1/9	1/5	1/3	1/3	1

Encuestado 22					
	1	2	3	4	5
1	1	1/7	1/9	1/5	1/9
2	7	1	9	5	1/7
3	9	1/9	1	9	9
4	5	1/5	1/9	1	1/7
5	9	7	1/9	7	1

Encuestado 23					
	1	2	3	4	5
1	1	9	9	9	9
2	1/9	1	9	9	1/9
3	1/9	1/9	1	9	1/9
4	1/9	1/9	1/9	1	5
5	1/9	9	9	1/5	1

Encuestado 24					
	1	2	3	4	5
1	1	1/9	1/3	1/3	1/3
2	9	1	7	7	1/9
3	3	1/7	1	9	5
4	3	1/7	1/9	1	1/9
5	3	9	1/5	9	1

Encuestado 25					
	1	2	3	4	5
1	1	9	9	1/9	1
2	1/9	1	1/7	1	1/9
3	1/9	7	1	9	9
4	9	1	1/9	1	1/9
5	1	9	1/9	9	1

Tabla B-4.: Resultados Tabulares de las Encuestas realizadas a la Comunidad ECCI.

Bibliografía

- [1] CEPAL, NU, “Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para américa latina y el caribe,” 2018.
- [2] UPME, “Ley 1715 de 2014,” *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*, 2014.
- [3] P. Arango Arbeláez, P. Maya Ruiz, *et al.*, *Esquema de micro-generación hidroeléctrica a escala municipal. Caso Jardín, Antioquia*. PhD thesis, Universidad EIA, 2015.
- [4] Constitución Política De Colombia, “Constitución política de Colombia,” *Bogotá, Colombia: Leyer*, 1991.
- [5] Ley General Ambiental de Colombia, “Ley 99 de 1993,” *Diario Oficial*, vol. 41, 1993.
- [6] F. PUBLICA, “Decreto 1076 de 2015.[en línea]. bogotá:[citado 10 octubre, 2019].”
- [7] A. Sharpe and M. McIntosh, “Research methods, statistics and evidence-based practice,” *Companion to Psychiatric Studies E-Book*, p. 157, 2010.
- [8] T. L. Saaty and K. P. Kearns, *Analytical planning: The organization of system*, vol. 7. Elsevier, 2014.
- [9] K. L. Zambon, Carneiro, A. A. de França M, Silva, A. N. R. da, Negri, and J. Cesari, “Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG,” *Pesquisa Operacional*, vol. 25, no. 2, pp. 183–199, 2005.
- [10] ENEL, “Parque solar en el Cesar.” url<https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/inauguran-el-parque-solar-mas-grande-de-colombia-528264>.
- [11] Trina Solar and Matrix Renewables, “Parque solar en el Meta.” url<https://www.dinero.com/empresas/articulo/nuevo-parque-solar-comienza-su-operacion-en-el-meta/299726>.
- [12] J. Duran and E. Godfrin, “Aprovechamiento de la energía solar en la argentina y en el mundo,” *Boletín energético*, vol. 16, p. 44p, 2004.
- [13] J. T. Pinho and M. A. Galdino, “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos,” *Rio de Janeiro*, vol. 1, pp. 47–499, 2014.

-
- [14] G. Tiwari, A. Tiwari, *et al.*, “Handbook of solar energy,” *Singapore: Springer*, 2017.
- [15] M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, C. A. Gueymard, D. Myers, *et al.*, “Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications,” 2015.
- [16] F. Jarabo, C. Pérez, N. Elórtegui, J. Fernández, and J. Macías, “El libro de las energías renovables,” *Colección Era Solar. Madrid*, 1991.
- [17] B. Fontal *et al.*, “El electromagnético y sus aplicaciones,” *Escuela de La Ingeniería*, vol. 1, p. 24, 2005.
- [18] D. L. Covarrubias, *Manual práctico de iluminación*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura, Diseño y . . . , 2018.
- [19] IDEAM, “Radiación solar.” url <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.
- [20] G. Bernal, M. Rosero, M. Cadena, J. Montealegre, and F. Sanabria, “Estudio de la caracterización climática de bogotá y cuenca alta del río tunjuelo,” *Colombia, Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM-Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE*, 2007.
- [21] O. Guzmán, J. Baldión, O. Simbaqueva, H. Zapata, and C. CHACON, “Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana,” 2015.
- [22] A. L. T. Nunes, “Estudo do dimensionamento de sistema fotovoltaico aplicado em métodos de elevação artificial,” B.S. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- [23] UPME, IDEAM and others, *Atlas de Radiación solar de Colombia*. 2019.
- [24] H. Benavides, O. Simbaqueva, and H. Zapata, “Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de colombia,” *Bogotá DC, Colombia.: Atlas IDEAM*. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>, 2017.
- [25] K. Mulder, *Desarrollo sostenible para ingenieros*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2007.
- [26] A. Calvente, “El concepto moderno de sustentabilidad,” *Universidad Abierta Interamericana*, vol. 3, 2007.
- [27] M. Achkar and G. A. del Territorio, “Indicadores de sustentabilidad,” tech. rep., 2005.

- [28] B. Rengifo, L. Quitiaquez, and F. Mora, “La educación ambiental una estrategia pedagógica que contribuye a la solución de la problemática ambiental en Colombia,” *XII Coloquio internacional de Geocrítica*, vol. 16, 2012.
- [29] C. R. Orozco, “El desarrollo sustentable: Nuevo paradigma para la administración pública,” 2003.
- [30] Z. Li, S. Rahman, R. Vega, and B. Dong, “A hierarchical approach using machine learning methods in solar photovoltaic energy production forecasting,” *Energies*, vol. 9, no. 1, p. 55, 2016.
- [31] J. Chavarría Roé, “Diseño e implementación de un inversor multinivel para sistemas fotovoltaicos conectados a red,” Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [32] E. Delgadillo Trujillo, *Diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial por medio de generación distribuida*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura, Diseño y
- [33] Colegio oficial de ingenieros de telecomunicaciones, “Energía solar fotovoltaica,” tech. rep.
- [34] Paneles solares KDS Energy, “Panel solar.” url <https://es-la.facebook.com/PanelesSolaresKDS/posts/conoce-las-partes-que-componen-un-panel-solar-cada-una-es-imprescindible-para-su/1859390450796883/>.
- [35] M. A. Abella, “Sistemas fotovoltaicos,” *SAPT Publicaciones Técnicas, SL*, 2005.
- [36] ResearchGate, “Inversor trifásico.” url https://www.researchgate.net/figure/Inversor-Trifasico-de-Puente-Completo-en-Conmutacion-SPWM_fig1_299307352.
- [37] SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS, “Zonas no interconectadas—zoni diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica,” 2017.
- [38] UPME, “Zonas no interconectadas.” url <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>, 2019.
- [39] PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA, “Parques nacionales naturales.” url <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/servicio-al-ciudadano/datos-abiertos/>, 2017.
- [40] DANE, “Índice de desarrollo humano.” url <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-geovisores/>, 2018.
- [41] UPME, “Cobertura de energía en Colombia.” url <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>, 2019.

-
- [42] Instituto geográfico Agustín Codazzi, “Nivel municipal de Colombia.” [urlhttps://geoportal.igac.gov.co/contenido/mapas-nacionales](https://geoportal.igac.gov.co/contenido/mapas-nacionales), 2012.
- [43] CEPAL, NU and others, *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: guía para la formulación de políticas energéticas*. Cepal, 2003.
- [44] C. de Lima, “Análise multicritério e aplicação de sig para localização de potencial eólico, visando o desenvolvimento sustentável,” B.S. thesis, Universidade Federal do ABC, 2017.
- [45] J. F. Pacheco and E. Contreras, “Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos,” 2008.
- [46] T. Hurtado and G. Bruno, “El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores,” *Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa)*, Universidad Nacional de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP de Investigación Operativa., Lima, 2005.
- [47] K. Teknomo, “Analytic hierarchy process (AHP) tutorial,” *Revoledu. com*, pp. 1–22, 2006.