Actualización georreferenciación de zonas de mayor potencial solar para la generación de energía fotovoltaica en la región central RAP-E



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Acreditación Institucional de Alta Calidad

Autor

Luis Fernando Gallo Loaiza

Tutor

Andrés Escobar Diaz

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Ingeniería Topográfica

Bogotá, Colombia

Marzo de 2024

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 3
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 7
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 8
2.2 FORMULACION DEL PROBLEMA 9
2.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA 9
3. OBJETIVOS 10
3.1 OBJETIVO GENERAL 10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10
4. MARCO DE REFERENCIA 11
4.1 marco conceptual 11
4.1.1 Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia 11
4.2 Marco teórico 18
4.2.1 El sol 18
4.2.2 Radiación Solar: Proceso y Composición 21
4.2.3 Radiación Incidente sobre la Superficie Terrestre 23
Radiación Global (H): 26
4.2.4 Energía solar 27
4.2.5 Energía solar Fotovoltaica 28
4.2.6 Modelos de negocios con energía solar 29
4.2.7 Panorama internacional 32
4.2.8 Panorama nacional 46
5. ESTADO DEL ARTE 76
5.1 PANORAMA REGION CENTRAL RAP-E 76

5.1.1 Registros de proyectos FV en la región Central RAP-E 76
5.1.2 Capacidad de generación de energía solar fotovoltaica..... 81
6. METODOLOGIA..... 93
6.1 POTENCIAL SOLAR FV EN LA REGIÓN CENTRAL 93
6.1.1 Bogotá DC..... 101
6.1.2 Cundinamarca 104
6.1.3 Tolima..... 108
6.1.4 Meta 112
6.1.5 Boyacá 116
6.1.6 Huila 120
6.2 Brillo solar región central RAP-E..... 124
7. RESULTADOS 131
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 170
9. BIBLIOGRAFIA..... 171

1. INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de energía global genera importantes interrogantes acerca de la seguridad y la sostenibilidad de la suministración de energía. Elementos como el incremento de aparatos electrónicos, la automatización de diversas áreas de producción y la transformación de transportes hacia sistemas más eficientes han aumentado la

necesidad de energía. A la vez, la reducción de las reservas de combustibles fósiles y el aumento de la preocupación por los impactos ambientales de su utilización resaltan la apremiante necesidad de cambiar a fuentes de energía más limpias y sustentables.

En este contexto, las energías alternativas han emergido como una medida fundamental para frenar el calentamiento global, disminuir la dependencia de fuentes no renovables y estimular el desarrollo sostenible. La energía solar fotovoltaica, en particular, se ha convertido en una de las fuentes de energía más esperanzadoras debido a su carácter abundancia y la capacidad que tiene de adecuarse a diferentes categorías y territorios. Este tipo de energía ofrece una solución factible no sólo para las grandes obras de energía, sino también para las pequeñas aplicaciones en comunidades apartadas que no pertenecen a las zonas no interconectadas del país (ZNI)

Colombia, con su privilegiada ubicación geográfica cerca del ecuador, tiene un posicionamiento en el terreno que le proporciona una ventaja geográfica dado que puede recibir una elevada dosis de radiación solar durante todo el año por las ausencia de estaciones. Específicamente, la región central de la RAP-E (Área Administrativa y de Planificación Especial) contiene la mayor parte de la población y los negocios de la nación, por lo que es una zona fundamental para el desarrollo de proyectos de energías limpias. A pesar de ello, para lograr un planeamiento eficaz y perdurable de estos trabajos, es fundamental tener información precisa y actualizada de la distribución espacial del potencial solar en la zona.

Este proyecto surgió debido a la necesidad de actualizar la información acerca de las zonas con mayor potencial solar fotovoltaico presentes en la región central del RAP-E. Inicialmente este proyecto fue realizado por el ingeniero Ángel Ocasiones en el año 2019 como proyecto de grado de su título de Ingeniero Catastral pero la región Central RAP-E ha aumentado su tamaño agregando al departamento del Huila lo que hace necesario la actualización de la información espacial de las zonas de mayor potencial solar. Tener información georreferenciada permitirá identificar áreas más apropiadas para la generación de energía fotovoltaica. Se aspira que esta actualización contribuya a la planeación y el

desarrollo de nuevos proyectos de energía renovable en su fase de prefactibilidad y así atender de manera sustentable la necesidad de energía de la región promoviendo la utilización de métodos limpios y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

La puesta en marcha de sistemas de energía alternativa en la zona no sólo tendrá el objetivo de proveer de energía a las zonas urbanizadas e industriales, sino que además dará energía a las zonas rurales que no están interconectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Otro aspecto importante que contiene el trabajo en cuestión es el régimen legal y legislativo que supervisa el desarrollo de proyectos de energía solar en Colombia, así como las barreras e incentivos que existen para su implementación. A partir de la entrada en vigencia de la Ley 1715 de 2014, que promulga el modo en que las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) se integrarán al sistema de energía nacional, se han establecido procedimientos para facilitar el desarrollo de proyectos de este tipo, sin embargo, aún persisten dificultades en el ámbito de la inversión, la financiación y la carencia de infraestructura adecuada en ciertas zonas.

Sobre la base de la metodología, este estudio se apoyará en geoprocesos realizados sobre los planos de radiación y brillo solar encontrados en el Atlas de radiación solar ultravioleta y ozono de Colombia del año 2017, con el fin de identificar las zonas de mayor capacidad solar. Se recogerán datos de diferentes fuentes, tanto nacionales como internacionales, relacionados con la magnitud de la radiación solar que cae sobre el planeta, junto a la información geográfica de la radiación solar, como la topografía, el uso del suelo y las infraestructuras presentes.

Dicha información será mostrada en forma de gráficos y mapas, esto facilitará la investigación por parte de los diferentes participantes en el interés de desarrollar proyectos de energía solar en el territorio. Además, se aspira que este análisis se vuelva a utilizar como punto de partida para nuevos estudios científicos y proyectos de transformación en el área de las energías limpias.

La reciente actualización de la georreferenciación de las zonas de mayor capacidad solar en la región central de RAP-E es una etapa fundamental para conseguir un desarrollo de

energía sostenible, que no se restrinja únicamente al crecimiento económico de la zona, sino que además tenga una influencia positiva en la calidad de vida de los habitantes y contribuya a la preservación del ecosistema.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Desde el año 2020 cuando se realizó la primera versión de la Georreferenciación de zonas de mayor potencial solar para la generación de energía fotovoltaica en la región Central RAP-E por parte del ingeniero Ángel Ocaciones hasta la actualidad la región central RAP-E ha aumentado su extensión pasando de 156781 Km^2 cuando se realizó el trabajo de Ángel Ocaciones a 171953 Km^2 en el año 2025. Este aumento se debe a que se añadió al departamento del Huila a la región, generando a su vez que crezca la cantidad de población y consumo energético aumenten sobre ella.

Según datos obtenidos del Sistema Único de Información de públicos domiciliarios la región central consume alrededor de 1716 GWh por año, siendo la zona del país que más consume energía teniendo en cuenta las industrias, cultivos y población que se encuentran allí, además que la región en conjunto genera el 39% del PIB nacional.

Esta situación genera la necesidad de obtener las zonas más viables para la implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica tanto en la construcción de granjas solares hasta techos fotovoltaicos para viviendas, centros comerciales o industrias tratando de contribuir a la generación de energías limpias reduciendo las toneladas de CO_2 generado por fuentes energéticas de combustibles fósiles.

El propósito de esta monografía es identificar y actualizar las zonas con mayor potencial de energía solar en la región central RAP-E y que puedan ser presentadas a través de un geovisor donde cualquier usuario pueda subir elementos cartográficos en formato KML o SHP del área donde se pretende realizar un proyecto solar fotovoltaico y pueda obtener una visión preliminar de cuanta radiación solar recae en dicha área.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La región central RAP-E se encuentra constituida por los departamentos de Bogotá DC, Boyacá, Cundinamarca, Meta, Huila y Tolima y constituye la zona más rica del país, teniendo un consumo energético superior a los 1700 GWh por año

La región central de RAP-E se encuentra constituida por los departamentos de Bogotá DC, Boyacá, Cundinamarca, Meta, Huila y Tolima y es una de las zonas más importantes de la nación colombiana en términos de producción económica, industrial y de población, esto con un consumo energético superior a 1700 GWh por año. En este contexto, la transformación hacia fuentes de energía alternativa, como es el caso de la solar fotovoltaica, se considera como una opción fundamental para diversificar la fuente de energía de la región y apoyar la sustentabilidad del medio ambiente. A pesar de ello, para maximizar la utilización de estos recursos, es necesario poseer información georreferenciada actualizada que posibilite ubicar con exactitud las zonas de mayor capacidad solar.

El geovisor diseñado por el estudiante Ángel Ocasiones en el año 2020 fruto del convenio número 080 entre la U.D. y la RAP-E incluye las áreas de radiación georreferenciadas dentro de los departamentos que para ese año conformaban la región central RAP-E correspondientes a Bogotá DC, Boyacá, Cundinamarca, Meta y Tolima. Sin embargo, en el trascurso del año 2020 se dio la adhesión del departamento del Huila cambiando el contexto energético y ambiental de la zona desde su creación, además que la información que se encuentra en la plataforma ser actualizada urgentemente con el fin de reflejar con mayor exactitud las condiciones de energía solar conociendo que capacidad aporta el departamento del Huila y que cambios ha tenido la superficie de los departamentos que ya se encontraban dentro de la región central RAP-E.

En consecuencia, se hace importante la identificación que información se encuentra actualmente sobre el tema, recopilando los documentos, políticas y estrategias en temas asociados con Matriz Energética, Energía y Eficiencia Energética, Demanda Energética, Desarrollos Alternativos de Energía, Potencial Energético, Zonas Conectadas y No Contactadas al Sistema Interconectado Nacional – SIN, zonificación de la población sin

acceso a energía, desarrollo potencial en generación electica y FNCER dentro del área de la región central RAP-E. Con la información encontrada se tiene como finalidad determinar el Potencial Solar para la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos, siendo esta una de las FNCER que mayores beneficios ambientales, energéticos y sociales se espera traigan a la Región Central RAP-E.

Teniendo en cuenta lo anterior se ve la necesidad de actualizar y mejorar la plataforma del Geovisor con información precisa, oportuna y estructurada sobre el potencial solar, el contexto energético, y el manejo de recursos naturales en la Región Central RAP-E. Esto es esencial para facilitar el diseño, análisis y evaluación de futuros proyectos de energía fotovoltaica, permitiendo la optimización de los recursos disponibles y asegurando que la planificación energética sea eficiente, sostenible y en línea con las necesidades actuales de la región.

2.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál es el potencial solar actual de la región central RAP-E?

2.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el área actual de la región central RAP-E?

¿Qué documentos brindan información oficial geográfica de radiación solar sobre la región central RAP-E?

¿Qué proyectos a nivel internacional, nacional y en la región central RAP-E se han venido desarrollando?

¿Qué métodos de financiamiento se pueden hallar para la generación de energía solar fotovoltaica?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Actualizar y desarrollar la plataforma del Geovisor construido en el anterior convenio 080 entre la Universidad Distrital y la RAP-E, pero actualizando información de contexto energético, ambiental, manejo de aguas y tierras.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener información actualizada sobre los potenciales energéticos ubicados sobre la región Central (RAP-E)
- Georreferenciar las actualizaciones de las zonas energéticas, ambiental, manejo de aguas y tierras.
- Dar a conocer los resultados mediante la actualización del Geovisor construido en el anterior convenio 080 que se encuentra en la web como datos abiertos espaciales teniendo en cuenta los principios para su publicación.
- Documentar el proceso de actualización y recopilación de información y socialización de resultados

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO CONCEPTUAL

El presente trabajo se basa en la actualización de la georreferenciación de zonas de mayor potencial solar para la generación de energía fotovoltaica realizado en su primera versión por el estudiante Ángel Ocaciones como trabajo de pregrado donde su investigación indica las zonas con mayor potencial solar con porcentajes y cálculo de áreas de dichas zonas viéndose reflejada a través de un geovisor donde se detalla las áreas de radiación junto a información geográfica que alimenta la cartografía básica de la región central RAP-E.

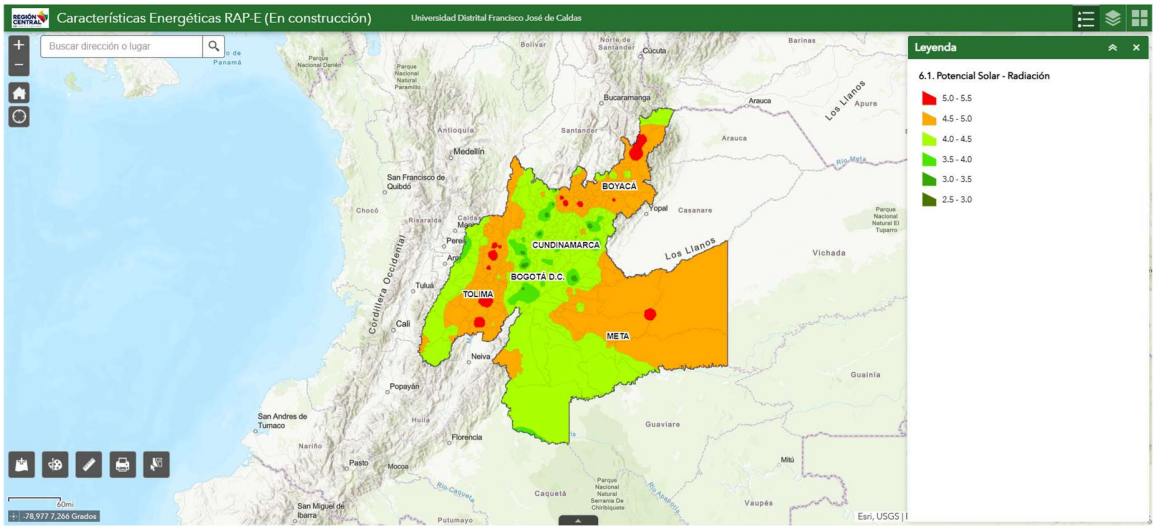


Ilustración 1 Geovisor zonas de mayor potencial solar. (Ocaciones, 2020)

Esta información fue adquirida del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia del 2017 ya que este documento registra la información más detallada con respecto a investigaciones relacionadas sobre radiación solar en el país.

4.1.1 Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia

Con el fin de obtener datos confiables y poder definir el potencial solar de la región central RAPE, se tuvo en cuenta la información consignada en el Atlas de Radiación Solar,

Ultravioleta y Ozono de Colombia del año 2017 que fue diseñado y publicado por el IDEAM y la UPME donde se evidencia de forma espacial y temporal la distribución del potencial solar para la generación de energía. Debido que la información mostrada en el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia del año 2017 es cuantificable se generaron datos, tablas mapas y salidas graficas donde se relacionan la distribución promedio mensual y anual de la radiación solar global horizontal, brillo solar, cantidad de días por mes sin brillo solar, columna total de ozono y radiación ultravioleta sobre una superficie plana por metro cuadrado, los resultados del estudio se presentan en datos, análisis, mejorando su resolución espacial y temporal respecto al Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia del año 2005. (IDEAM, UPME, 2017)

Para realizar la medición de la radiación solar en el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia del año 2017 se utilizaron los siguientes elementos y metodología:

Actividades preliminares

De las primeras actividades realizadas para la medición de la radiación solar en Colombia fue la calibración de los equipos de medición. Dichas calibraciones se iniciaron a partir del convenio entre el IDEAM y la Fundación Universitaria Los Libertadores en el año 2012 para la realización de la primera jornada de calibración de instrumentos radiométricos en la ciudad de Bogotá. Para esta calibración se usó un pirheliómetro de Cavidad Absoluta el cual fue calibrado en el Centro Mundial de Radiación de Davos en Suiza dejando como conclusión la necesidad de calibrar todos los sensores de radiación global y ultravioleta del IDEAM, para garantizar la confiabilidad de los datos. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

En el 2013 se realiza la segunda jornada de calibración de equipos radiométricos con la participación de 25 funcionarios de diferentes entidades tales como: Cenicaña, Cenicafé, CAR, Universidades Distrital, Córdoba, del Tolima, Fundación Universitaria Los Libertadores y el IDEAM. En esta jornada, se calibraron algunos piranómetros que se han utilizado como patrones secundarios para calibrar en terreno los sensores de las estaciones automáticas satelitales, que el IDEAM ha instalado en el país desde el año 2005. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017).

De estas 2 jornadas se define la metodología para realizar la actualización del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia acordando las siguientes etapas:

1. Evaluación de información meteorológica
2. Modelación
3. Especialización de la información
4. Resultados finales



Ilustración 2 Metodología Atlas (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Evaluación y procesamiento de la información meteorológica

Se realizo un diagnóstico sobre las entidades que poseían sensores de radiación global y así poder definir que se información se va a solicitar, revisar y validar. Al tiempo se consultó sobre sus programas de calibración y mantenimiento de sensores de radiación. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Este diagnóstico conllevo los siguientes pasos:

- Se revisaron las gráficas de 65 actinógrafos que tenía activos el IDEAM en el 2005, (año en que el IDEAM inicio el desmantelamiento de su red de actinógrafos) de los cuales se tuvieron en cuenta 46 actinógrafos con el fin de realizar la comparación de resultados entre el Atlas de 2005 y su actualización de 2017. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

- Se valido la información horaria de 160 piranómetros del IDEAM, de los cuales se calibraron 105 piranómetros entre los años 2014 a 2015. Después de analizar los resultados se tuvieron en cuenta 96 piranómetros. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

- Se tuvo en cuenta la información de 4 estaciones SUTRON que estuvieron activas entre 1998 al 2003 (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

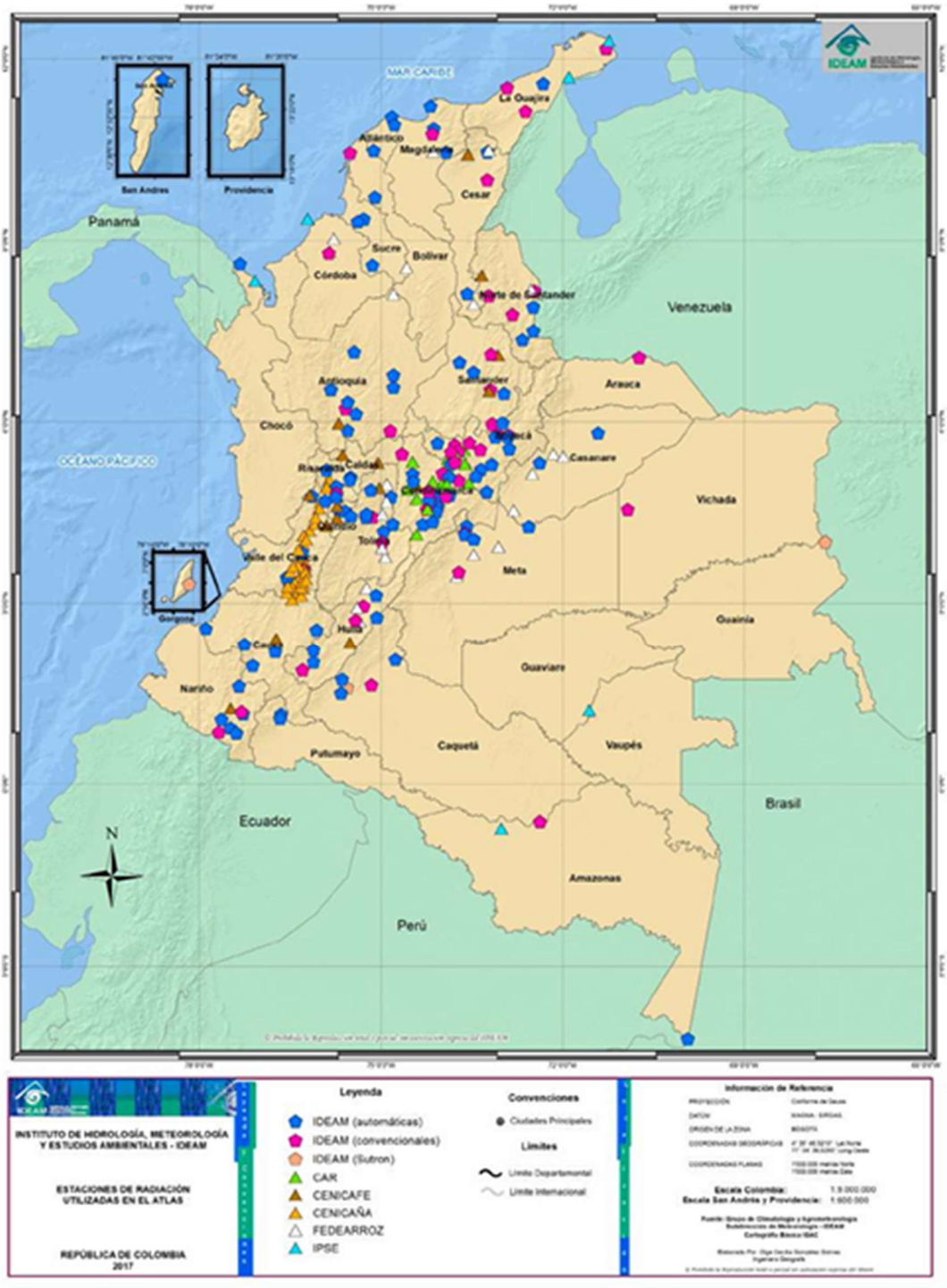
- Se valido la información de 104 sensores de otras entidades tales como CENICAÑA, FEDEARROZ, IPSE y CENICAFE, de los cuales se tuvieron en cuenta 91 para ser incluidos en el Atlas. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Sensores				
Tipo de sensor	**Tiempo de captura**	**Evaluados**	**Seleccionados**	**Propiedad**
Actinógrafos	Información diaria	65	46	IDEAM
		17	91	Cenicaña
Piranómetros	Información horaria	28		Cenicafe
		15		Fedearroz
		10		CAR
		160	96	IDEAM
SUTRON		9	4	IDEAM

Tabla 1 Selección de sensores para generación Atlas. Elaboración propia (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Como resultado se escogieron 240 sensores donde se obtuvieron los promedios horarios de irradiación global horizontal para cada mes y los promedios mensuales de la irradiación global acumulada diaria, recibida en superficie. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Teniendo definidos los promedios mensuales de la irradiación global horizontal de las 240 estaciones, estos se complementaron con los resultados de la modelación de cerca de 340 sensores de brillo solar. Inicialmente se contó con 501 sensores de brillo solar pero finalmente se tomaron los resultados de 340 ya que los demás se encontraban en municipios o ciudades donde también había medición de radiación global. A estos 340 se le aplico el modelo que convierte datos de brillo solar a irradiación. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)



Mapa 1 Sensores de radiación utilizados en el Atlas. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Brillo solar

Se validó la información de 607 sensores de brillo solar que hacen parte de la red del IDEAM, escogiendo 501 para elaborar los mapas de brillo. Se utilizó información para cada sensor, desde su instalación hasta el 31 de diciembre de 2016 o hasta que se suspendió su operación. Validados los datos de las 501 estaciones escogidas, se calculó el número de días sin brillo solar, el cual es importante para los diseños de equipos que involucren el confort necesario ante situaciones de épocas con baja o nula disponibilidad de radiación solar. En este caso se contabilizan y promedian los días del mes en los cuales las horas de brillo solar estuvieron entre 0,0 y 0,5 horas de Sol al día (hSd). (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Modelamiento

Por medio del modelamiento se generaron promedios mensuales de irradiación global horizontal (Wh/m2) a partir de datos de brillo solar y también se generaron los promedios mensuales para elaborar los mapas del comportamiento de la radiación ultravioleta en el país. Estos tipos de modelamiento llamados “empíricos” se basan en el brillo solar, la nubosidad y otras variables meteorológicas y se escogió el modelo Ångström-Prescott debido que muy citado en trabajos similares en el ámbito internacional cuya correlación se fundamenta en: la relación de las radiaciones solares, la calculada en el límite superior de la atmosfera (Ho) y la medida en superficie terrestre (H), expresadas en (Wh/m²); las horas de brillo solar medidas en superficie (n) y la duración astronómica del día solar (N) medidos en horas y cuya igualdad matemática es (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017):

$$H/Ho = (a + b(n/N))$$

Ecuación 1 Modelo Ångström-Prescott, relación radiaciones (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Con el fin de obtener un mayor cubrimiento de datos de radiación solar global en el país, se elaboraron ecuaciones lineales en las estaciones que miden radiación solar y brillo al tiempo en zonas representativas del país las cuales fueron llamadas estaciones piloto. A

estas estaciones se les aplico el modelo de Ångström-Prescott y sus constantes a y b a las estaciones con medidas de brillo solar, que se encuentran dentro de la zona de influencia. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Representación gráfica y cartográfica de los datos

Los mapas que representan la irradiación global horizontal, el brillo solar y el número de días sin brillo solar, se realizaron mediante varios pasos de análisis y clasificación espacial como son: interpolación, reclasificación, generación del mapa en formato ráster y conversión a formato vector, utilizando las herramientas de análisis de información geográfica propias del ArcGIS. El sistema de referencia oficial que se utiliza es Magna Sirgas; el sistema de coordenadas es geográfico. Los métodos de interpolación empleados para este caso corresponden al IDW (ponderación por distancia), utilizado en la irradiación global horizontal, el brillo solar, número de días sin brillo solar. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017).

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 El sol

El Sol, el astro que está más próximo a nosotros, es el eje del sistema solar y un objeto que atrae enormemente la atención debido a la manera en que impacta sobre todos los planetas del sistema. Con una edad aproximadamente de 6.5 mil millones de años, se creó a partir de una nube interestelar de gas y polvo que surgió desde el interior de una colisión entre estrellas. Tiene el 99.8% del peso corporal total del sistema solar, siendo 333,000 veces más masivo que la Tierra. Su radio es aproximadamente 109 veces el de nuestro planeta, esto implica que sería necesario adquirir un número mayor a un millón de Planetas para completar el volumen del Sol. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

La parte principal del Sol está compuesta por hidrógeno (74.9%) y helio (23.8%), además de otros componentes como oxígeno, carbono, neón y hierro que tienen una cantidad menor. Su distanciamiento de la Tierra es de 150 mil millones de kilómetros (8 minutos luz), de modo que es posible observar alteraciones en su superficie con un pequeño retraso. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

El Sol está estructurado en capas que varían en temperatura, densidad y composición. En el núcleo, donde las temperaturas alcanzan los 15.7 millones de grados Kelvin, ocurren las reacciones nucleares que convierten el hidrógeno en helio, liberando una inmensa cantidad de energía. Esta energía, a través de procesos de absorción y reemisión, tarda millones de años en llegar a la superficie solar y salir al espacio. Las capas principales del Sol incluyen: (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- El Núcleo es la región más interna, donde la fusión nuclear transforma el hidrógeno en helio, liberando energía en forma de luz y calor. Aunque el núcleo representa solo el 1.5% del volumen solar, contiene casi la mitad de su masa. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- En la zona radiactiva la energía se transfiere principalmente por radiación, disminuyendo en temperatura desde los 7,000,000 K hasta los 2,000,000 K al acercarse a la zona convectiva. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- La zona convectiva Es la capa externa donde el transporte de energía ocurre principalmente por convección. Las columnas de gas caliente suben hacia la superficie y luego vuelven a descender, formando fenómenos como la granulación solar. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- La fotósfera es la capa visible del Sol, con una temperatura de aproximadamente 5800 K, lo que le otorga su característico color amarillo. En ella se observan fenómenos como las manchas solares, gránulos y fáculas, todos relacionados con la actividad magnética del Sol. Las manchas solares son regiones frías y oscuras que indican áreas de fuerte actividad magnética. Estas manchas pueden tener tamaños gigantes, superando varias veces el tamaño de la Tierra. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- Encima de la fotósfera se encuentra la cromósfera, una capa más caliente y dinámica donde se observan espículas, protuberancias y filamentos. Estos fenómenos indican la constante actividad magnética y de plasma que caracteriza a nuestra estrella. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

- La corona es la capa más externa de la atmósfera solar, visible solo durante los eclipses solares totales. Con temperaturas que alcanzan hasta 1,000,000 K, la corona es el origen de los vientos solares y de las eyecciones de masa coronal (EMC), explosiones de plasma que viajan por el espacio y pueden afectar directamente la Tierra. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

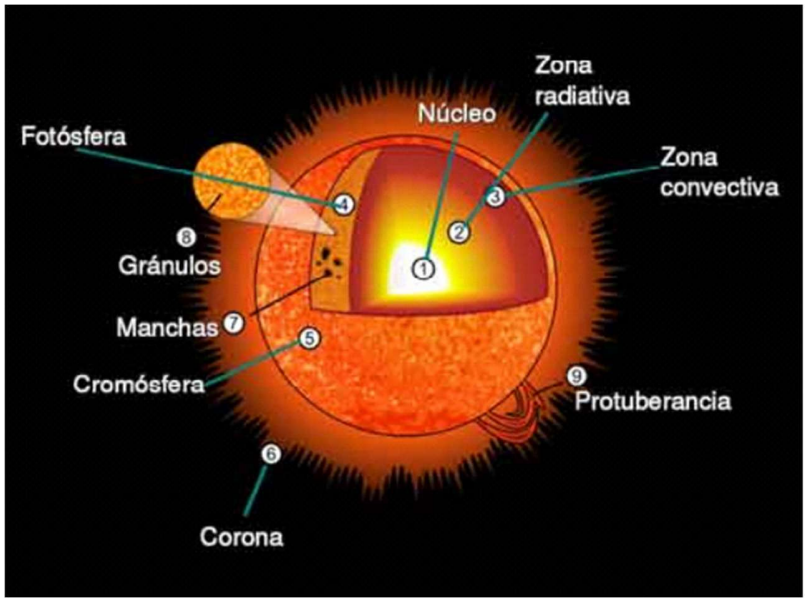


Ilustración 3. – Estructura del Sol.
Fuente: (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

4.2.2 Radiación Solar: Proceso y Composición

La radiación solar es uno de los escenarios sensibles del equilibrio energético del planeta. El flujo es enviado por el sol en una especie de onda electromagnética. Es esencialmente el proceso a través del cual nuestro planeta alcanza un equilibrio energético y, por lo tanto, proporciona condiciones para la vida al impulsar el clima, la fotosíntesis, la circulación atmosférica, etc. Un amplio rango de longitudes de onda varía desde la radiación ultravioleta a la luz visible hasta la radiación infrarroja, que solo representa una fracción ínfima en los espectros. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

El Sol, como una estrella de tipo espectral G, crea energía en su núcleo mediante un proceso nuclear llamado fusión. En este proceso, el helio se forma por la fusión de núcleos de hidrógeno con una enorme cantidad de energía liberada en forma de radiación electromagnética. Esta energía en el núcleo se propaga luego hacia el exterior a través de varias capas del núcleo, primero a través de la zona radiativa y luego a través de la zona convectiva. Por último, la energía es emitida desde el Sol en forma de radiación desde su capa más externa, la fotosfera. (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

Tras ser emitida por el Sol, la radiación viaja a través del espacio. Tarda alrededor de 8 minutos y 20 segundos en llegar a la Tierra, recorriendo casi 150 millones de kilómetros. Esta radiación se emite en todas direcciones, pero solo un pequeño porcentaje de ella llega a la Tierra. Incide directamente tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La radiación ultravioleta (UV) es un componente de la radiación solar que tiene importantes efectos en el medio ambiente y la salud humana. Esta radiación se clasifica principalmente en tres tipos: UV-A, UV-B y UV-C, según su longitud de onda, y cada tipo afecta de manera diferente los sistemas biológicos y los materiales expuestos a ella.

- **UV-A (320-400 nm):** Es la forma más común de radiación UV que llega a la superficie terrestre, constituyendo aproximadamente el 95% de la UV que penetra la atmósfera terrestre. Aunque tiene la menor energía entre los tres tipos, la UV-A penetra más profundamente en la piel, llegando a las capas subyacentes de la dermis. Es conocida por causar bronceado y también contribuye al envejecimiento

prematuro y la formación de arrugas a largo plazo. Además, puede degradar materiales como plásticos, pinturas y otros objetos expuestos a la luz solar durante periodos prolongados. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

UV-B (280-320 nm): Es menos prevalente que la UV-A, la UV-B compone aproximadamente el 5% de la radiación UV que nos alcanza. Es más energética que la UV-A y se absorbe principalmente en la capa superficial de la piel, la epidermis. Esta banda es la principal responsable de causar quemaduras solares y tiene un papel significativo en el desarrollo de cáncer de piel, incluyendo melanoma y carcinomas. Además, la UV-B es esencial para la producción de vitamina D en la piel, un proceso crucial para la salud ósea y la regulación del sistema inmunitario. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

- **UV-C (100-280 nm):** Es la más dañina de las radiaciones UV debido a su alta energía, pero, afortunadamente, es completamente absorbida por la capa de ozono y el oxígeno en la atmósfera y no llega a la superficie de la Tierra. La UV-C tiene un potencial germicida y es utilizada artificialmente en lámparas UV para la esterilización de aire y superficies en ambientes médicos y comerciales, gracias a su capacidad para destruir el ADN y ARN de microorganismos. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

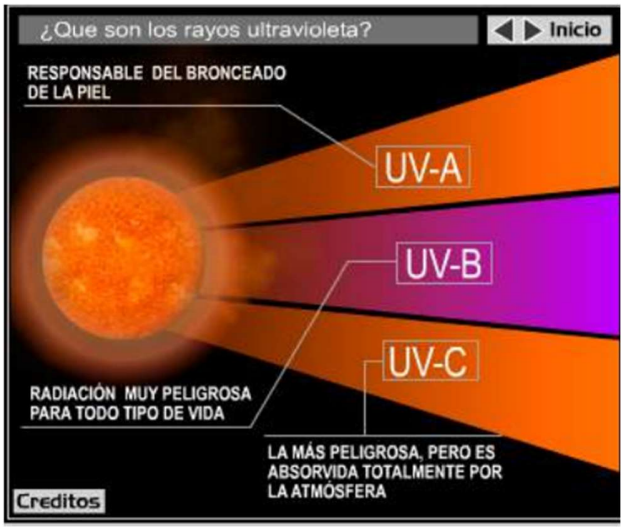


Ilustración 4. Clasificación de los Rayos Ultravioleta del Sol: Efectos y Absorción Atmosférica
Fuente: (Blanco-Cano & Kajdic, 2009)

4.2.3 Radiación Incidente sobre la Superficie Terrestre

La radiación solar es la principal fuente de energía para todos los procesos que ocurren en el sistema Tierra-atmósfera, y la mayor parte de esta energía llega a la superficie terrestre en forma de radiación directa y radiación difusa. La radiación incidente sobre la superficie terrestre es un factor clave que determina no solo el clima y las condiciones atmosféricas, sino también el aprovechamiento de la energía solar para aplicaciones humanas como la generación de electricidad, el calentamiento de agua y aire, y el desarrollo de tecnologías solares. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La cantidad de energía solar que llega a la Tierra es inmensa. Se estima que la radiación solar incidente global es de unos 173,000 Tera vatios, de los cuales el 30% es reflejado al espacio exterior y el 70% restante es absorbido por la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos. Solo una fracción mínima es utilizada por la biosfera para procesos como la fotosíntesis. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

A nivel global, las regiones entre los 15° y 30° de latitud reciben la mayor cantidad de radiación solar, con valores que oscilan entre 2,500 y 2,600 kWh/m² por año. En regiones ecuatoriales como Colombia, se registran valores de radiación global horizontal que varían entre 5.5 y 6.0 kWh/m² por día, mientras que, en las regiones más polares, los valores descienden a alrededor de 1.3 kWh/m² por día. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta, que es en su mayoría radiación visible. Al llegar a la atmósfera terrestre, parte de esta radiación es dispersada, reflejada o absorbida por los gases y partículas presentes. La energía que finalmente alcanza la superficie terrestre se clasifica en 3 tipos principalmente.

Radiación Directa (Hb):

Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada por la atmósfera. Esta forma de radiación depende directamente de la posición del Sol en el cielo y de la claridad atmosférica, ya que las partículas presentes en la atmósfera pueden influir en su intensidad. Es fundamental para aplicaciones como la energía solar concentrada, donde la eficiencia depende de recibir rayos solares directos. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

El cálculo de la radiación directa se basa en la relación geométrica entre la intensidad de los rayos solares y el ángulo de incidencia respecto a una superficie. La ecuación que se utiliza para determinar la radiación directa (Hb) sobre una superficie horizontal es la siguiente:

Ecuación 2 Calculo radiación directa. Fuente (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

$$Hb = I' = I * \sin(h)$$

Donde:

I' es la componente vertical de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal.

I es la intensidad de la radiación directa sobre una superficie normal a los rayos solares.

h es la altura del Sol sobre el horizonte.

Esta fórmula muestra que la intensidad de la radiación directa depende del ángulo de elevación solar, siendo máxima cuando el Sol está en el cenit (es decir, cuando los rayos solares son perpendiculares a la superficie terrestre). Este fenómeno explica por qué la radiación directa es más intensa cerca del mediodía en zonas de baja latitud, como las cercanas al ecuador. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

En condiciones óptimas, la radiación solar directa a nivel del mar y en un día despejado puede alcanzar valores de hasta 1,000 W/m². Sin embargo, este valor puede disminuir en función de la altitud, las condiciones atmosféricas, y la ubicación geográfica. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Radiación Difusa (Hd):

Esta forma de radiación solar es la que ha sido dispersada en diferentes direcciones por las moléculas y partículas en la atmósfera antes de llegar a la superficie. Aunque la radiación difusa es menos intensa que la directa, sigue siendo una fuente importante de energía, especialmente en días nublados o parcialmente nublados. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

El cálculo de la radiación difusa es más complejo que el de la radiación directa, ya que depende de múltiples factores atmosféricos. Se estima mediante ecuaciones empíricas o utilizando modelos de simulación que consideran las características locales de la atmósfera y la nubosidad. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Los valores típicos de la radiación difusa diaria pueden variar entre 300 y 5,500 Wh/m² por día, dependiendo de la cantidad de nubosidad y la transparencia atmosférica. Durante los días nublados, la radiación difusa puede llegar a representar la totalidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre. En zonas cercanas al ecuador, como Colombia, la radiación difusa puede ser significativa, incluso en días con nubosidad parcial, debido a la

intensa radiación solar global y la alta dispersión atmosférica. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Radiación Global (H):

Es la suma de todas las radiaciones solares que llegan a la superficie terrestre. Se compone de la radiación directa proveniente del Sol sin desviaciones, y de la radiación difusa que ha sido dispersada por moléculas en la atmósfera y nubes. Se mide sobre una superficie horizontal y en un ángulo de 180 grados. Este parámetro es esencial para calcular la cantidad total de energía solar que puede ser aprovechada en un determinado lugar y durante un periodo específico. La radiación global se mide comúnmente en vatios-hora por metro cuadrado (Wh/m²) y es clave en el diseño de sistemas solares fotovoltaicos y térmicos. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

El cálculo de la radiación global se expresa como:

Ecuación 3 Calculo radiación horizontal. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

$$Hb = I' = I * \sin(h)$$

Donde:

- **H** es la radiación global.
- **Hb** es la radiación directa.
- **Hd** es la radiación difusa.

El aporte de cada componente varía dependiendo de la posición del Sol (altura solar), la transparencia de la atmósfera, la presencia de nubes y aerosoles, y la hora del día. Para determinar la radiación solar en un día completo, se suman los valores horarios obtenidos a lo largo del día. La radiación global diaria, dependiendo de las condiciones atmosféricas, puede oscilar entre 1 a 35 MJ/m² (equivalente a 300 a 9500 Wh/m²). (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La radiación solar global diaria acumulada varía ampliamente según la ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas. En regiones como Colombia, los promedios diarios de radiación global pueden superar los 4000 Wh/m² por día en muchas áreas, llegando a valores máximos de 7000 Wh/m² en zonas de alta radiación. Sin embargo, estos valores pueden disminuir hasta los 1000 Wh/m² en días de alta nubosidad. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

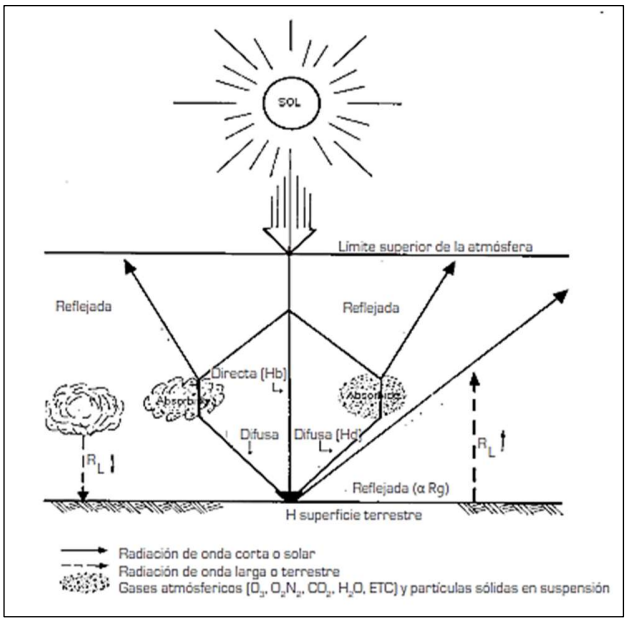


Ilustración 5. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.
Fuente: (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

4.2.4 Energía solar

La energía solar es una de las principales fuentes de energía renovable disponible en la Tierra, originada por la radiación que emite el Sol. Esta energía se distribuye en forma de ondas electromagnéticas, principalmente radiación de onda corta, y es capturada por la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos. El Sol es el motor que impulsa la mayor parte de los procesos atmosféricos y climáticos, y más del 99% de la energía que llega al sistema Tierra-atmósfera proviene de esta fuente. La energía solar no solo es crucial para

la vida en la Tierra, sino que también representa una alternativa clave para reducir el uso de combustibles fósiles, que generan emisiones contaminantes y contribuyen al cambio climático. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Colombia, por su ubicación geográfica en la zona ecuatorial, goza de una gran disponibilidad de energía solar durante todo el año, lo que ofrece un alto potencial para su aprovechamiento. Esta disponibilidad, sin embargo, presenta variaciones espaciales y temporales según la región y la época del año. En el contexto de la diversificación energética y el desarrollo sostenible, el país ha comenzado a implementar proyectos de energía solar, con la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en varias regiones. Hasta 1996, por ejemplo, el país había instalado más de 2.054 kWp en módulos fotovoltaicos, que representaban un ahorro energético importante. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Para aprovechar de manera eficiente el recurso solar disponible en Colombia, es fundamental conocer las tecnologías solares que permiten transformar la radiación solar en energía útil. Estas tecnologías se dividen en dos grandes categorías: tecnologías solares activas y pasivas, que diferencian según si utilizan mecanismos o dispositivos tecnológicos para captar y transformar la energía, y dentro de las activas, destacan las tecnologías térmicas y fotovoltaicas. Cada una de estas tecnologías juega un papel esencial en el aprovechamiento de la energía solar, ofreciendo distintas soluciones para la generación de electricidad, calor y otros usos energéticos en diversas aplicaciones. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

4.2.5 Energía solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica (FV) representa una tecnología crucial en la transición hacia fuentes renovables de energía. Utiliza materiales semiconductores que transforman la energía de los fotones de la radiación solar directamente en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Este fenómeno ocurre cuando fotones de luz solar inciden sobre una celda solar, liberando electrones de sus átomos y generando flujo eléctrico. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Las celdas fotovoltaicas se ensamblan en módulos, y estos módulos pueden agruparse en arreglos para aumentar la potencia eléctrica generada. Estos sistemas se escalan desde aplicaciones pequeñas, como calculadoras solares, hasta grandes instalaciones de centrales eléctricas conectadas a la red, con capacidades que varían desde kilovatios hasta varios megavatios. En zonas con radiación solar adecuada, estas instalaciones pueden proveer energía a comunidades enteras, haciendo posible un abastecimiento energético más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

4.2.6 Modelos de negocios con energía solar

El avance tecnológico de la industria de la energía solar ha aumentado significativamente en los últimos años, junto con un movimiento global general hacia fuentes de energía sostenibles. A continuación, analizamos los modelos de negocios en lo que respecta al sector solar para permitir una instalación y funcionamiento efectivos de los sistemas de energía solar. Estos modelos generalmente están localizados para adaptarse a los requisitos particulares del mercado, así como a las regulaciones estatales específicas. A continuación, se presenta un análisis de algunos modelos de negocios populares en Colombia en el contexto de la legislación de energía renovable, como la Ley 1715 de 2014, por la cual se incentiva el uso de fuentes de energía renovables en el país. (Rios, 2018).

EPC (Engineering, Procurement, and Construction)

El modelo EPC es un enfoque de contrato llave en mano en el que el contratista es responsable de todas las etapas del proyecto, desde el diseño y la adquisición de componentes hasta la construcción e instalación. Este modelo transfiere la responsabilidad del rendimiento del sistema solar al contratista EPC, minimizando así el riesgo para el cliente. Es ideal para los clientes que desean una solución completa sin entrar activamente en los detalles técnicos o administrativos del proceso. (Rios, 2018)

PPA (Power Purchase Agreement)

El siguiente es un contrato de compra de energía en el que el desarrollador instalará y mantendrá el sistema solar en la propiedad del cliente, y el cliente comprará la energía generada a un precio acordado durante un período prolongado. Este modelo es muy bueno

para aquellas entidades que buscan asegurarse un suministro de energía a largo plazo a tarifas competitivas a cambio de no tener que hacer grandes inversiones iniciales. (Rios, 2018)

Renting

El modelo de leasing implica el alquiler del sistema solar. En este caso, el cliente paga una tarifa de alquiler mensual por el sistema, independientemente de la energía producida. Este modelo es flexible y es ideal para aquellas empresas que no desean inmovilizar su capital en activos, pero que desean aprovechar la energía solar. (Rios, 2018)

Leasing

Similar al alquiler, el leasing permite a un cliente utilizar un sistema solar a cambio de un pago mensual durante un período prolongado. Una vez finalizado el plazo del contrato, en muchos casos, existe una opción de compra disponible para el arrendatario; esto le permite al cliente adquirir el sistema a un pequeño costo residual. Este modelo resulta atractivo para las personas interesadas en ser propietarios del sistema y obtener beneficios fiscales y de depreciación. (Rios, 2018)

Estos modelos de negocio impulsan la adopción de la energía solar en todos los sectores y permiten que los actores económicos converjan en la búsqueda de bienes públicos ambientales. La elección de un modelo adecuado permite a las empresas optimizar sus ganancias económicas y, al mismo tiempo, contribuir positivamente a la preservación de su medio ambiente.

Tabla 2 Aspectos generales de las modalidades de negocio de energía solar. (Rios, 2018)

Modelo de Negocio	Descripción	Duración del Acuerdo	Pagos	Beneficios y Características Adicionales
EPC	Contrato "llave en mano" ofrecido por una empresa de ingeniería que se encarga del diseño, compra de materiales, instalación, construcción y puesta	No especificado	Precio acordado por capacidad instalada (USD/kWp) que incluye todos los costos.	Fecha de funcionamiento acordada; el contratista entrega el sistema

	en marcha del proyecto.			funcionando completamente.
PPA	Acuerdo entre un generador de energía solar y un cliente, donde el primero instala la infraestructura en la propiedad del segundo y este último paga por la energía consumida o generada.	5 a 25 años	La tarifa por la energía es acordada y generalmente más baja que el costo de la red eléctrica.	La cantidad de energía consumida o generada determina el pago; ventajas fiscales por la Ley 1715 si el arrendador está bien, y el arrendatario se beneficia de la energía a tarifas reducidas.
Renting	Acuerdo de arrendamiento entre un cliente y un arrendador, donde el arrendador instala la infraestructura solar y recibe pagos fijos del cliente.	1 a 25 años	Alquiler mensual del sistema solar, independientemente de la producción de energía.	Beneficios de la Ley 1715; no se necesita financiación inicial y el arrendatario puede beneficiarse de la energía sin asumir los costos de propiedad.
Leasing	Acuerdo financiero donde una entidad adquiere el sistema solar y lo arrienda al cliente, quien paga cuotas mensuales y puede optar por comprar el sistema al final del período de leasing.	8 a 120 meses	Cuota mensual, con posibilidad de compra al final del contrato.	Posibilidad de financiación del 100% del sistema; bajo la Ley 1715, el arrendador recibe beneficios fiscales y el arrendatario puede decidir

				comprar el sistema.

4.2.7 Panorama internacional

Distribución a nivel mundial de la irradiación global horizontal

La irradiación global horizontal (IGH) es uno de los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de energía solar a nivel mundial, ya que es la cantidad total de radiación directa y difusa recibida en la superficie de la Tierra en un plano horizontal. Esta radiación se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m²) y constituye la base sobre la que se captura la cantidad de energía solar disponible para ser aprovechada en un área determinada, tal como se aplica a situaciones como las aplicaciones de energía fotovoltaica y térmica. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La distribución de la IGH a nivel mundial no es uniforme, con fuertes diferencias de latitud y estación. Las regiones cercanas al ecuador reciben mayor radiación solar porque los rayos del sol son más casi paralelos, pero se recibe una cantidad mínima en los polos, especialmente durante el invierno polar, cuando es casi nula. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Las zonas con mayor IGH se encuentran entre los 15° y 30° de latitud, en regiones áridas como el Sahara, Arabia, y el desierto de Atacama, donde la radiación puede alcanzar entre 2.500 y 2.600 kWh/m² por año. Estas regiones se caracterizan por su baja nubosidad, lo que permite una mayor penetración de la radiación solar. En contraste, las áreas cercanas a los polos, como las islas del Ártico, presentan los niveles más bajos de IGH, con un promedio de aproximadamente 480 kWh/m² por año. La media global de IGH se estima en alrededor de 4,0 kWh/m² por día. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

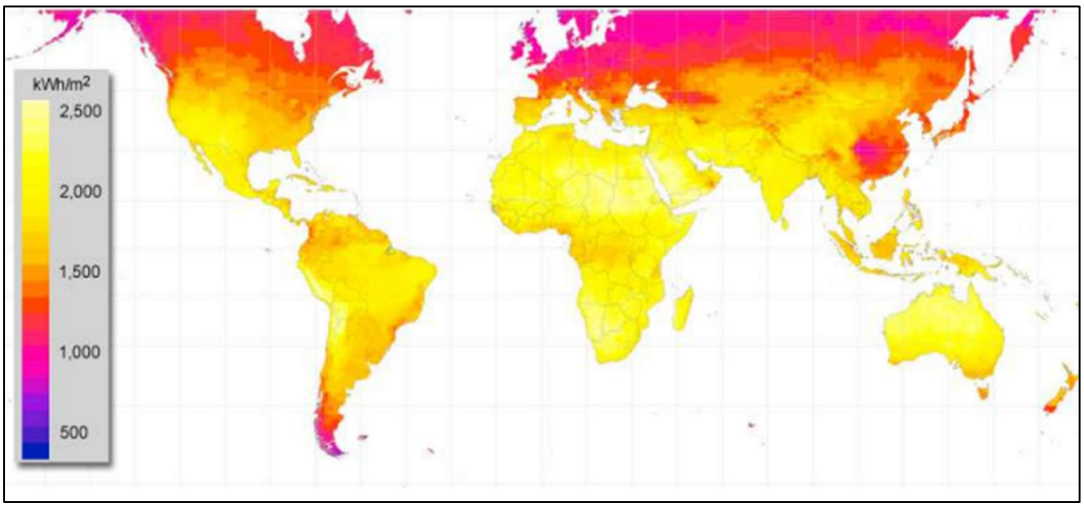


Ilustración 6. Registro de la irradiación global horizontal media recibida en superficie Fuente (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Estos patrones de irradiación solar son esenciales para la planificación de sistemas de energía solar, ya que permiten identificar las regiones con mayor potencial para la captación de energía solar, así como para evaluar los períodos más adecuados del año para la producción de energía (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Energía Solar Fotovoltaica en el mundo

La energía solar fotovoltaica ha crecido enormemente en las últimas décadas y se ha posicionado como una de las principales fuentes de energía renovable a nivel mundial. Este auge está impulsado por un aumento en el apetito general por fuentes de energía sostenibles, así como por la reducción de los costos tecnológicos y la promoción de políticas de apoyo. En términos sencillos, la energía solar fotovoltaica se basa en el uso de semiconductores que convierten directamente la luz solar en electricidad a través de un proceso conocido como efecto fotovoltaico; es este proceso el que ha hecho posible desde pequeñas calculadoras solares hasta enormes granjas solares con potencial para generar cientos de megavatios. (SolarPower Europe , 2024)

La capacidad instalada de energía solar fotovoltaica a nivel mundial ha experimentado un crecimiento sostenido. Los datos acumulados del Atlas de Radiación Solar y de varios

informes globales indican que los países líderes en el mercado, como China, Estados Unidos y Alemania, con varios miles de megavatios instalados. En Europa, España e Italia también han seguido un camino hacia países pioneros en la adopción de tecnologías. Esta capacidad instalada adicional en energía fotovoltaica se ha triplicado en los últimos veinte años, impulsada principalmente por la mejora en la eficiencia de las células solares y los costos de fabricación. (SolarPower Europe , 2024)

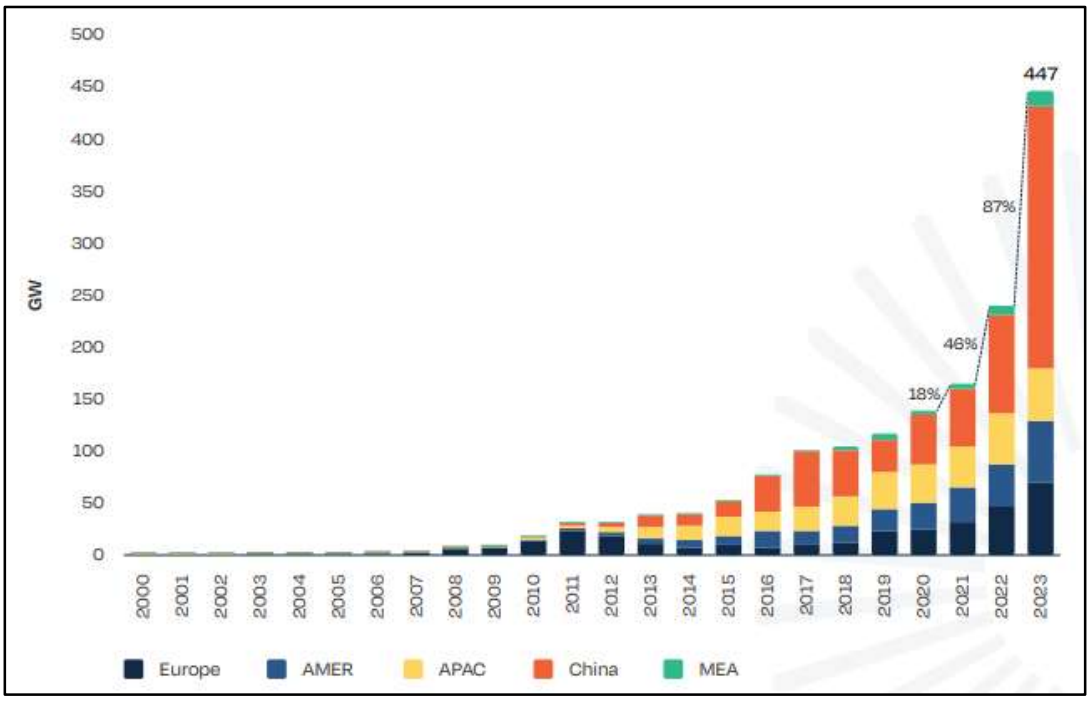


Ilustración 7. capacidad instalada anual de energía solar fotovoltaica 2000-2023. Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

- **China**

La transición energética global tiene un pilar fundamental en la forma de China, que ahora es el líder inigualable en energía fotovoltaica. Un récord de 253 GW de nueva capacidad fotovoltaica en 2023 Esto representó un asombroso aumento interanual del 167%. Este aumento significa que China es responsable del 57% de toda la nueva capacidad solar instalada a nivel mundial, más del doble de la cantidad de los otros nueve principales mercados solares combinados. (SolarPower Europe , 2024)

China no solo es líder mundial en la fabricación de paneles solares y componentes, sino que también es la razón por la que reina en la capacidad de instalaciones solares. Las cadenas de suministro de paneles solares están fuertemente centradas en China, lo que hace que suministren una parte considerable tanto para uso doméstico como para otros países del mundo. El país representó alrededor del 80% de la producción total mundial de paneles solares en 2023. (SolarPower Europe , 2024)

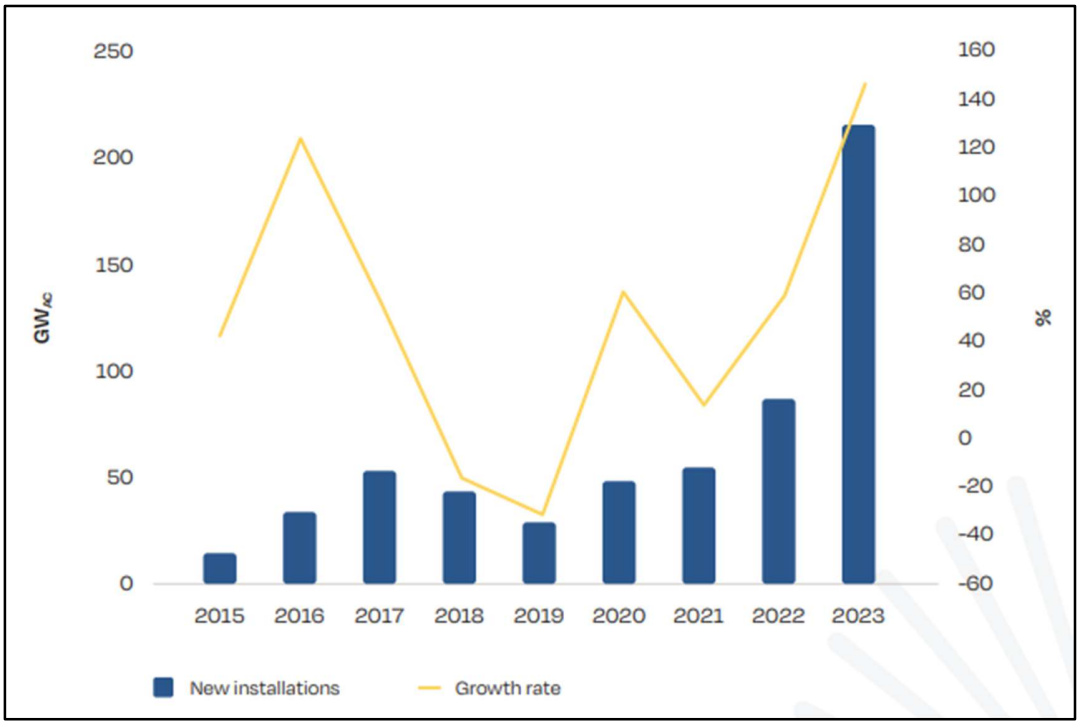


Ilustración 8. comparación de la capacidad fotovoltaica solar recientemente instalada entre 2015 y 2023. Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

La rápida disminución de los costos de los paneles solares ha sido uno de los impulsores de la expansión de la energía solar en China. En 2023, los precios de los módulos solares cayeron casi un 50%, lo que permitió instalar grandes cantidades, tanto a nivel residencial como en plantas a gran escala. Además, el gobierno chino ha introducido políticas sólidas para apoyar su crecimiento, a saber, incentivos financieros, exenciones fiscales y programas de subastas que priorizan la energía renovable. (SolarPower Europe , 2024)

- **Estados Unidos**:

Estados Unidos es uno de los mercados fotovoltaicos más grandes y de mayor crecimiento del mundo y ocupa un lugar como país líder en la transición global hacia las energías renovables. Con una tendencia de crecimiento de su nueva capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en un 48%, el país alcanzó un total anual de 32,4 GW en 2023. De este modo, Estados Unidos se convirtió en el segundo mercado más grande del mundo en términos de capacidad de energía solar acumulada, después de China. (SolarPower Europe , 2024)

El crecimiento de la energía fotovoltaica en Estados Unidos es el resultado de la combinación de un buen apoyo de las políticas públicas, la caída de los costos de la tecnología y la creciente demanda corporativa y de los consumidores de soluciones energéticas sostenibles. Uno de los grandes pasos más recientes fue la entrada en vigor de la Ley de Inversión y Empleo en Infraestructura (IRA) en 2022, que, incluyendo créditos fiscales, componentes solares de fabricación local y grandes proyectos, permite hacer que los proyectos de energía solar sean económicamente atractivos. (SolarPower Europe , 2024)

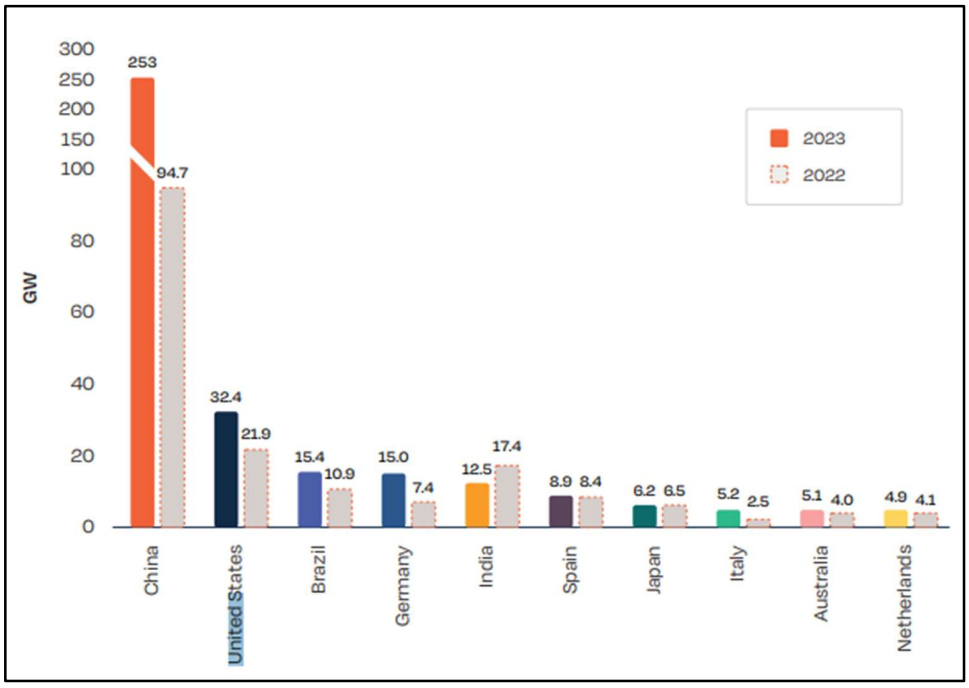


Ilustración 9. los 10 mercados principales de energía solar fotovoltaica 2022-2023. Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

En Estados Unidos, se prevé que el mercado solar siga creciendo en los próximos años, con hasta 40 GW de nueva capacidad para 2024. La energía solar tendrá un papel importante en la estrategia de descarbonización del país, ya que tiene objetivos ambiciosos para que las fuentes de energía limpia alcancen el 100% de la generación eléctrica para 2035. Los otros factores que impulsan la absorción de mayores proporciones de energía solar en la combinación energética nacional son la expansión del almacenamiento de energía y la mejora de la infraestructura de la red. (SolarPower Europe , 2024)

- **Alemania**:

Alemania ha sido uno de los líderes mundiales en términos de energía solar fotovoltaica a un ritmo gigantesco en los últimos años. Para el año 2023, el país instaló 15 GW de nueva capacidad solar, duplicando las cifras del año anterior. Este crecimiento del 104% permitió a Alemania ocupar el cuarto lugar en el ranking mundial, detrás de China, Estados Unidos e India. El mercado de energía solar alemán ha mostrado un gran nivel de madurez donde

tanto el segmento de instalaciones de parques solares en tejados como en grandes superficies están equilibrados. (SolarPower Europe , 2024)

Este incremento ha sido propulsado por una secuencia de transformaciones en reformas regulatorias y políticas favorables, como es el caso de la Ley de Energías Renovables (EEG), que fue actualizada en el 2022 y que llegó en el 2023. Esta investigación contempló aumentos en las tarifas de alimentación (FITs) para novedosos sistemas de energía solar en techos, la supresión de disminuciones en las tarifas de alimentación y una reducción del impuesto al valor agregado (IVA) en las instalaciones solares. Estas acciones han generado que la energía solar sea más popular y accesible para los hogares y las compañías, esto ha contribuido a que se incremente significativamente la cantidad de instalaciones. (SolarPower Europe , 2024)

Alemania ha definido objetivos ambiciosos en relación a la utilización de energías limpias. El gobierno de Alemania ha proclamado que su meta es que la generación de energía alternativa sea el 80% de la electricidad para el 2030, y tiene como objetivo específico conseguir los 215 Gigavatios de capacidad solar para esa fecha. Además, Alemania se encuentra en búsqueda de una transformación total a una fuente eléctrica totalmente renovable para 2035, resaltando la importancia que tendrá la energía solar en la misma. (SolarPower Europe , 2024)

- **India**

El desarrollo de la energía solar en India se distribuye entre proyectos de gran escala y techos solares conectados a la red. De los 81.8 GW totales, 64.4 GW provienen de instalaciones a escala industrial, mientras que los sistemas de techos solares conectados a la red contribuyen con 11.9 GW. Además, los proyectos híbridos que integran componentes solares han agregado 2.6 GW a la capacidad del país (SolarPower Europe , 2024)

Una de las iniciativas más destacadas es el desarrollo de los Parques Solares Ultra Mega, lanzados en 2014. Estos proyectos se han expandido significativamente, con una capacidad total que se espera alcance los 40 GW para 2025-2026. Actualmente, el gobierno ha

aprobado 50 parques solares distribuidos en 12 estados, con una capacidad total de 37.5 GW, de los cuales 10.4 GW ya están operativos (SolarPower Europe , 2024)



Ilustración 10. los Parques Solares Ultra.
Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

El Gobierno de la India lanzó en 2024 el esquema del cual se otorga un subsidio del 40% para instalar un panel solar en el techo de una vivienda, denominado "PM Surya Ghar: Muft Bijli Yojana". Esto cubriría a 10 millones de hogares y crearía una capacidad adicional de 30 GW en los próximos 3 años, lo que se traduciría en un ahorro anual de gastos para el gobierno de 9 mil millones de dólares. (SolarPower Europe , 2024)

- **Brasil**

Tras haber sido uno de los mercados de energía solar fotovoltaica de más rápido crecimiento en América Latina, en los últimos años el país instalo 12,3 GWAC de nueva capacidad solar en 2023, con una base instalada total de 37,9 GWAC, superando las proyecciones del gobierno. De hecho, esto ha convertido a Brasil en el tercer mercado más grande a nivel mundial en términos de capacidad agregada y el sexto a nivel mundial en términos de capacidad total acumulada. (SolarPower Europe , 2024)

El mercado brasileño se divide en dos segmentos principales: generación distribuida y generación centralizada. El segmento de generación distribuida se refiere a sistemas de

pequeña y mediana escala, incluida la solar, hasta una capacidad igual o inferior a 5 MW, que están cubiertos por el programa nacional de medición neta. Este otorga créditos a los propietarios de sistemas solares por el exceso de energía que se inyecta de nuevo a la red. Para el año 2023, de la nueva capacidad instalada, 8,3 GWAC provinieron de la generación distribuida, lo que muestra una tendencia cada vez mayor de adopción de la energía solar por parte de los hogares y las pequeñas empresas comerciales. (SolarPower Europe , 2024)

Por el contrario, la generación centralizada está compuesta por plantas solares a gran escala de más de 5 MW. Estas suministran su energía a través de subastas de mercado a nivel del gobierno federal, que están reguladas, o mediante acuerdos bilaterales en el mercado libre de electricidad. La generación central aumentó un 47,5% para alcanzar los 4,1 GW en 2023. (SolarPower Europe , 2024)

Si bien el crecimiento sostenido es algo de lo que glorificarse, Brasil todavía tiene muchos problemas, especialmente en términos de infraestructura de transmisión. La ausencia de infraestructura adecuada en algunas áreas ha impedido el desarrollo de nuevos proyectos solares a gran escala. Los proyectos de generación distribuida también han encontrado obstáculos regulatorios, ya que, bajo la justificación de la preocupación por el flujo de energía inverso, las empresas de distribución eléctrica se abstuvieron de conectar nuevos sistemas solares. (SolarPower Europe , 2024)

Sin embargo, el potencial de energía solar en Brasil es enorme. Las proyecciones presentadas por la Asociación Brasileña de Energía Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), afirman que para 2028, el país podría alcanzar entre 62,1 GWAC (escenario conservador) y 77,4 GWAC (escenario optimista) de capacidad solar fotovoltaica. Será necesario mejorar las políticas públicas, los programas de incentivos y la infraestructura de transmisión en todo el país si el país quiere liberar este potencial. (SolarPower Europe , 2024)

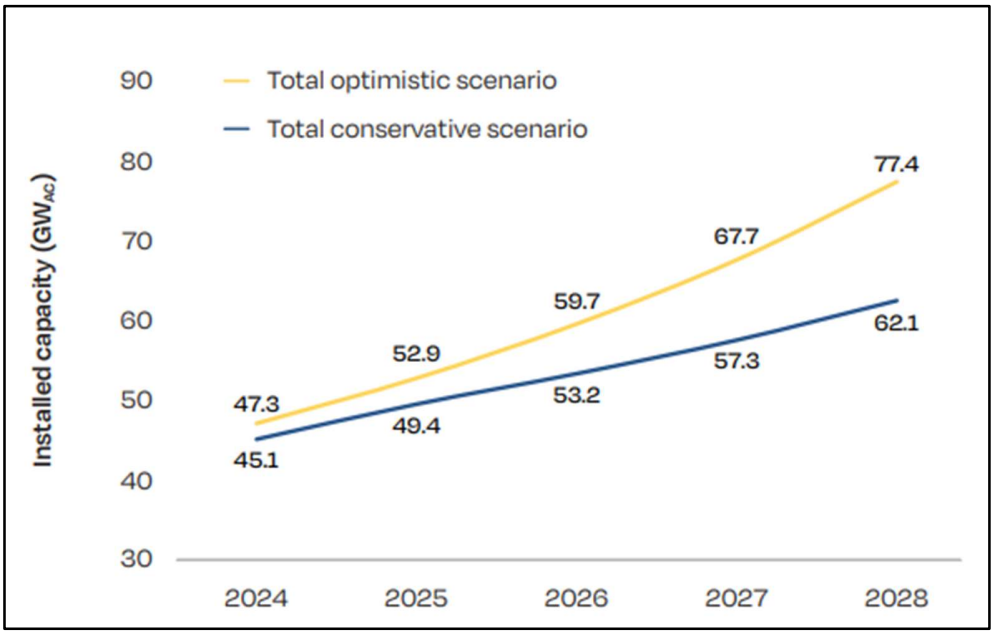


Ilustración 11. pronóstico de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Brasil, Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

- **España**

España ha sido uno de los actores más importantes en el sector de la energía solar fotovoltaica a nivel mundial. El país ha experimentado un crecimiento significativo en la capacidad instalada de energía solar en los últimos años, impulsado tanto por grandes parques solares como por instalaciones en techos de hogares y empresas. En 2023, España añadió 8.9 GW de nueva capacidad solar, lo que representa un 43% menos que el año anterior, debido a problemas regulatorios y desafíos en la conexión a la red. (SolarPower Europe , 2024)

El mercado fotovoltaico en España está constituido por una mezcla de proyectos a gran escala, como parques solares y sistemas de generación distribuida en tejados residenciales y comerciales. Este último, especialmente porque se vio muy afectado por un cambio de incentivos gubernamentales, experimentó una disminución en la instalación de sistemas en tejados en 2023. Sin embargo, esto no impide que las instalaciones de parques solares a gran escala sean uno de los principales impulsores del crecimiento de la expansión del sector. (SolarPower Europe , 2024)

Para España, muchos desafíos acompañan el desarrollo de su mercado solar fotovoltaico. Las barreras regulatorias han ralentizado la construcción de nuevos proyectos, junto con la congestión en la red de transmisión y los problemas con las solicitudes de permisos. La volatilidad del precio de la electricidad y la necesidad urgente de mejorar la infraestructura de la red para una alta penetración de energías renovables son desafíos que no son menos importantes para el crecimiento futuro. (SolarPower Europe , 2024)

Una de las tendencias más interesantes en el sector solar español es la creciente adopción de tecnologías flotantes y de agricultura fotovoltaica que combinan la producción de energía solar con la actividad agrícola. Una tendencia clave en la evolución de los proyectos solares a gran escala es el creciente énfasis en la sostenibilidad y la eficiencia del uso del suelo. (SolarPower Europe , 2024)

Si bien España está en camino de cumplir los objetivos de descarbonización, la energía solar ocuparía un lugar más destacado en la combinación energética del país. Más allá de los objetivos, el gobierno también ha establecido objetivos ambiciosos específicamente para aumentar la participación de las energías renovables en la generación de electricidad para lograr la neutralidad de carbono para 2050. (SolarPower Europe , 2024)

- **Italia**

Italia es ahora el mercado solar de más rápido crecimiento en Europa. Instaló 5,2 GW de nueva capacidad fotovoltaica en 2023, un 111% más que el año anterior, cuando había instalado 2,5 GW. Eso llevó a Italia nuevamente al top 10 mundial, en el octavo lugar en capacidad instalada. El mercado solar en Italia ha recibido un impulso adicional por la crisis energética y el plan de incentivos fiscales "Superbonus", cuyo período final provocó un notable crecimiento del 79% en el segmento residencial. (SolarPower Europe , 2024)

El mercado solar italiano se compone de un cóctel de instalaciones residenciales, comerciales e industriales (C&I) y proyectos a gran escala. El segmento C&I representó aproximadamente el 46% de la capacidad instalada en 2023. Además, diciembre de 2023 resultó ser un mes pico para los proyectos de parques solares más grandes de más de 1 MW, con instalaciones de 362 MW, muy por encima del promedio mensual de 72 MW de enero a noviembre (SolarPower Europe , 2024)

El crecimiento de la energía fotovoltaica en Italia no solo está liderado por el segmento residencial a través de soluciones como la energía fotovoltaica agrícola y los proyectos solares flotantes. Si bien garantizan un uso óptimo de la tierra y el suministro de energía sin obstaculizar las actividades agrícolas, algo bastante importante para un país con limitaciones territoriales, estas soluciones permiten la generación de energía con tecnología limpia y, al mismo tiempo, brindan valor agregado al sector primario (SolarPower Europe , 2024)

- **Australia**

Australia ha emergido como uno de los líderes mundiales en energía solar fotovoltaica, especialmente en el segmento residencial. En 2023, el país instaló 4.6 GW de capacidad solar fotovoltaica, de los cuales 3.17 GW provinieron de sistemas residenciales, lo que refuerza su posición como el país con mayor porcentaje de hogares con paneles solares en el mundo. Aproximadamente un tercio de los hogares australianos ahora generan su propia energía con techos solares. (SolarPower Europe , 2024)

Aunque 2023 representó el primer año de crecimiento reducido desde 2013, Australia sigue siendo una potencia en energía solar. La energía renovable generó el 39% de la electricidad del país en 2023, un aumento con respecto al 36% del año anterior. A pesar de esta cifra impresionante, el segmento de proyectos solares a gran escala ha enfrentado una desaceleración debido a retrasos en los procesos de aprobación y a la congestión en las redes de transmisión. (SolarPower Europe , 2024)

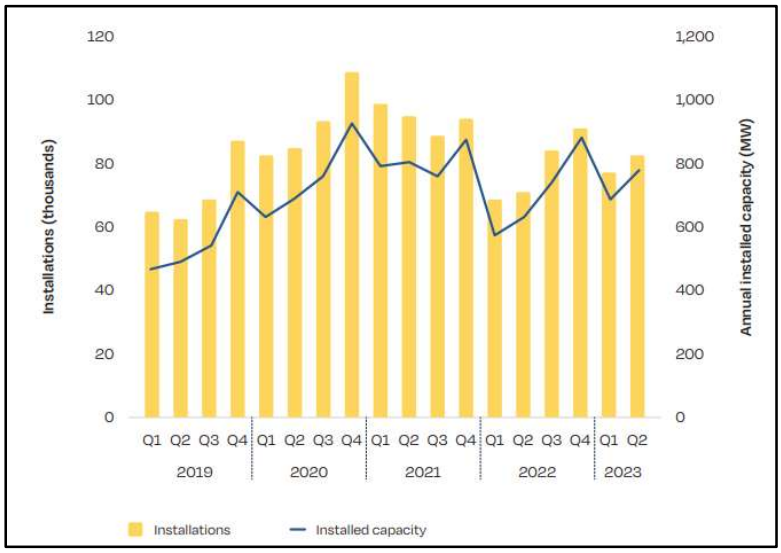


ilustración 12. instalaciones de energía solar fotovoltaica a pequeña escala en Australia 2019-2023. Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

En territorio australiano, el congestionamiento en la red eléctrica, que afecta el desarrollo de proyectos de energía solar en gran escala. A pesar de ello, el gobierno ha hecho políticas fundamentales para estimular la inversión en proyectos de energía renovable. El gobierno federal comunicaba el Plan de Inversión en Capacidad en 2023 con el fin de incorporar 23 Gigawatts de nueva capacidad renovable además de otros 9 Gigawatts de capacidad para ser utilizada. Se aspira que esto genere una importante influencia de liberación de la expansión en la esfera de los proyectos solares de gran escala. (SolarPower Europe , 2024)

- **Japón**

La nación japonesa ha venido liderando el ámbito de la generación de energía solar en todo el mundo, debido a su supremacía en el área de la industria de la energía solar. La tasa de crecimiento solar en Japón ha disminuido ligeramente en los últimos años a causa a la reducción en las tarifas de alimentación (FIT) y la falta de disponibilidad de terrenos para proyectos de gran escala. durante el 2022 se instaló 6,7 GW en forma de energía renovable, la nación incorporó aproximadamente 6,2 GW en forma de nueva capacidad solar fotovoltaica durante 2023. (SolarPower Europe , 2024)

La industria solar de Japón está en sus comienzos de la madurez y modificando significativamente su enfoque en proyectos de tamaño reducido, en particular en los techos de edificios residenciales y comerciales. Este nuevo estímulo ha sido en gran medida fruto de transformaciones en las prácticas energéticas. Por ejemplo, la ciudad de Tokio aprobó una ley que mandaría a poner paneles solares en la totalidad de los nuevos edificios a partir de 2025, esto puede generar un gran incremento en la industria de techos de las urbanizaciones . (SolarPower Europe , 2024)

Los contratos de compra de energía (PPA) pasaron a primer plano, permitiendo a las empresas y a los particulares adoptar soluciones solares sin grandes inversiones iniciales y fomentando así el crecimiento del mercado comercial y residencial. Un modelo alternativo que ha ganado popularidad, ya que los consumidores pueden beneficiarse de la energía solar sin tener que comprar los sistemas directamente. (SolarPower Europe , 2024)

Japón siempre se ha enfrentado a un desafío único en la escasez de terrenos donde se pudieran crear grandes proyectos fotovoltaicos. Esto ha llevado al país a desarrollar otras soluciones innovadoras, como proyectos solares flotantes sobre masas de agua como lagos y represas. Otra limitación que frena el crecimiento de la energía solar en Japón es la capacidad de la red eléctrica: hasta que no pueda absorber más energía eólica y solar, el país solo podrá expandirse hasta cierto punto. (SolarPower Europe , 2024)

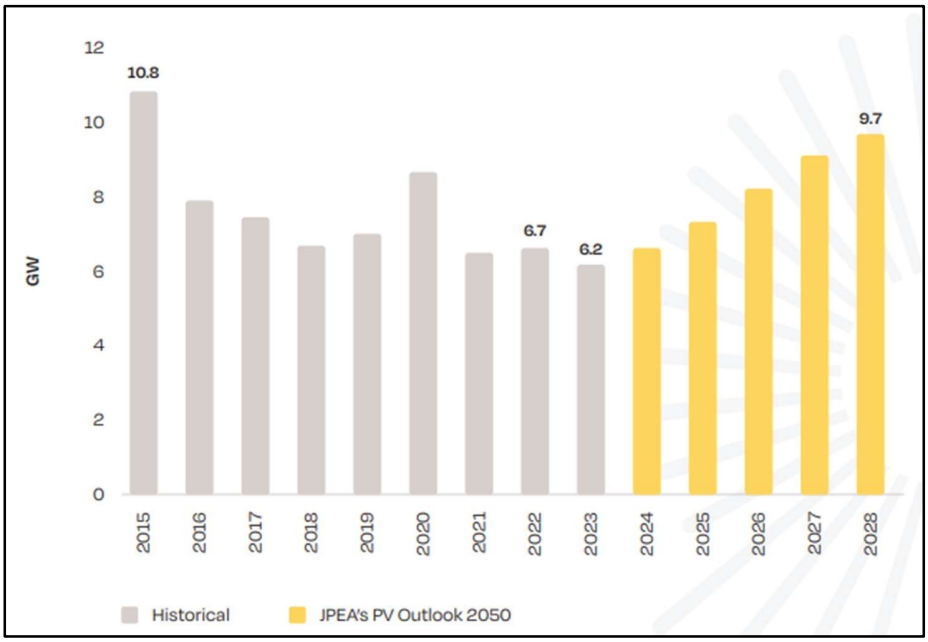


Ilustración 13. escenarios del mercado de energía solar fotovoltaica japonés 2024-2028
Fuente: (SolarPower Europe , 2024)

A pesar de estos obstáculos, el país sigue comprometido con sus objetivos de descarbonización y busca aumentar significativamente su capacidad solar en los próximos años. Para 2030, se estima que Japón podría alcanzar entre 130 y 147 GW de capacidad instalada de energía solar, un componente crucial de su estrategia para reducir las emisiones de carbono y depender menos de la energía nuclear y los combustibles fósiles. (SolarPower Europe , 2024)

4.2.8 Panorama nacional

Colombia, debido a su ubicación privilegiada cerca del ecuador, recibe una irradiación de sol equitativamente a lo largo del año, esto tiene un gran potencial en el uso de la energía solar. En la nación hay lugares con elevadas dosis de irradiación, como en La Guajira, donde la dosis de irradiación horizontal del planeta es la más alta, y llega a ser de 6,0 kWh/m²/día. Otras zonas, como los Llanos Orientales y la Región Andina, también presentan un alto grado de radiación, la cual se ve afectada principalmente por la elevación y la nubosidad. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

En el ámbito de la infraestructura, el país colombiano ha creado un sistema nacional de medición de la radiación del planeta, el cual se encuentra distribuido de manera correcta por todo el país y permite observar y evaluar esta fuente de energía. Estas estaciones son operadas como parte de programas de diferentes entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), así como de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Se ha puesto en marcha una red de medición del brillo solar, que ofrece datos complementarios de la disponibilidad de energía solar. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017).

La energía solar tiene muchos usos en el país colombiano, desde la producción de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos, hasta la utilización en la agricultura para el secado de tierras o en el calentamiento de edificaciones. Las legislaciones públicas, como es el caso de la Ley 1715 de 2014, que incentiva la utilización de energías limpias, han sido determinantes para promover la inversión y el desarrollo de proyectos de energía solar en el país. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Distribución espacial y temporal de la irradiación global horizontal en Colombia

Colombia, debido a su ubicación geográfica en la zona ecuatorial, presenta una distribución especial de la irradiación global horizontal que varía significativamente a lo largo del territorio y el tiempo. En general, las zonas ubicadas a mayor altitud y cercanas al ecuador reciben una mayor cantidad de irradiación solar durante todo el año, lo que es característico en regiones como la Guajira, gran parte de la región Andina, y áreas de los Llanos Orientales. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

El país tiene un rango de irradiación que va desde los 3.5 hasta los 6.5 kWh/m²/día. Las regiones con mayor irradiación se encuentran en la costa Caribe, particularmente en la península de la Guajira, donde se pueden alcanzar niveles cercanos a los 6.5 kWh/m²/día. Otras áreas con alta irradiación incluyen algunas zonas del altiplano Cundiboyacense y los Llanos Orientales. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Por otro lado, las zonas con menor irradiación se concentran en las áreas selváticas de la Amazonía y las partes más altas de la cordillera, debido a la mayor nubosidad y a los altos niveles de precipitación en estas áreas. En estas regiones, la irradiación global horizontal

puede llegar a ser tan baja como 3.5 kWh/m²/día. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Temporalmente, Colombia presenta una variabilidad anual relativamente baja en la irradiación global, lo que significa que el recurso solar es bastante constante a lo largo del año, a diferencia de otros países donde las estaciones marcan una diferencia más pronunciada. Esto convierte a Colombia en un lugar privilegiado para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica, ya que la variabilidad estacional es mínima, lo que favorece una producción energética más estable. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Durante el primer semestre del año, se observa que las regiones más cercanas al ecuador reciben una irradiación más uniforme. En contraste, durante el segundo semestre, debido a la influencia de la temporada de lluvias, se presentan pequeñas reducciones en la irradiación en zonas como el suroccidente del país. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

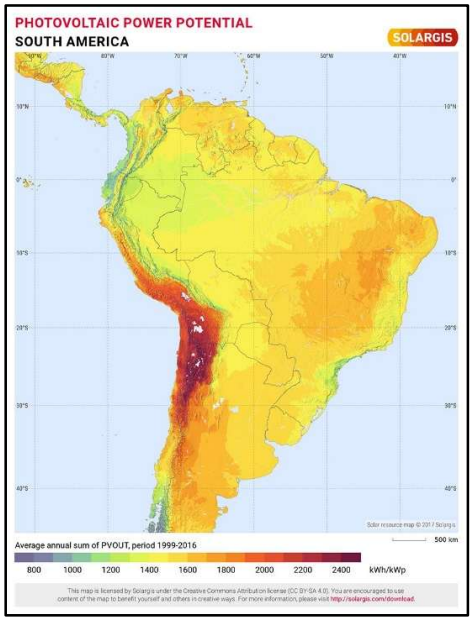


Ilustración 14. Mapas de recursos solares de Sudamérica.
Fuente: (dsisolar, 2018)

El potencial de la energía solar en Colombia es considerable, y la irradiación global horizontal juega un papel crucial para su aprovechamiento en sistemas fotovoltaicos. Las áreas con alta irradiación, como la Guajira y parte del Magdalena Medio, tienen un potencial muy alto para proyectos a gran escala, mientras que las zonas urbanas, especialmente en el altiplano, pueden beneficiarse de la instalación de techos solares para autogeneración. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Distribución espacial y temporal del brillo solar en Colombia

La irradiancia solar sobre el país presenta patrones distintos entre regiones. Los lugares con mayor irradiancia, como las regiones del Caribe y la Orinoquía, tienen un mayor potencial para el uso de fuentes de energía solar que los lugares con menor irradiancia, como las regiones del Pacífico y la Amazonía, que tienen valores sustancialmente más bajos debido a un clima mayormente nublado y patrones de lluvia. Además, el comportamiento temporal de la insolación muestra un comportamiento bimodal para las áreas del Caribe y la región Andina; los picos ocurren en el primer y último trimestre del año. Para las otras áreas, es monomodal: por lo tanto, para la Región del Pacífico, será a mediados del año donde brille el máximo. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

A continuación, se muestra un cuadro detallado que clasifica las zonas de Colombia en función de su promedio de horas de sol por día, los meses con mayor y menor cantidad de horas de sol, el comportamiento temporal del brillo solar y ciertas cifras importantes que resaltan la capacidad solar de cada territorio. Esta información es importante para la planeación de proyectos de energía renovable y agricultura que dependan de la energía solar. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Región	Nivel de Radiación	Meses Altos	Meses Bajos	Promedio (kWh/m²/día)	Comportamiento
Caribe	7 - 9 horas de Sol por día	Enero, Marzo, Agosto	Mayo, Octubre	5.5 - 6.0	Bimodal
Andina	5 - 7 horas de Sol por día	Enero, Agosto	Abril, Noviembre	3.5 - 5.5	Bimodal

Orinoquía	6 - 8 horas de Sol por día	Diciembre, Enero	Mayo, Octubre	4.5 - 5.0	Monomodal, con menor variación que otras
Pacífica	2 - 4 horas de Sol por día	Julio, Agosto	Enero, Octubre	3.0 - 3.5	Monomodal norte /Bimodal en el resto
Amazonía	3 - 5 horas de Sol por día	Julio, Agosto	Enero, Diciembre	4.0 - 5.0	Monomodal

Ilustración 15. Comportamiento de la Radiación Solar Global por Regiones
Fuente: (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

También, el siguiente mapa indica la distribución en el espacio de la media diaria de la irradiación en Colombia, resaltando los sectores con mayor o menor cantidad de luz solar. Las zonas más oscuras representan los sectores que tienen mayor propagación, en tanto que las más claras representan los sectores que no hay mucha luz. Este mapa es un complemento fundamental para esclarecer las distinciones en la región del resplandor del sol en tierras colombianas. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

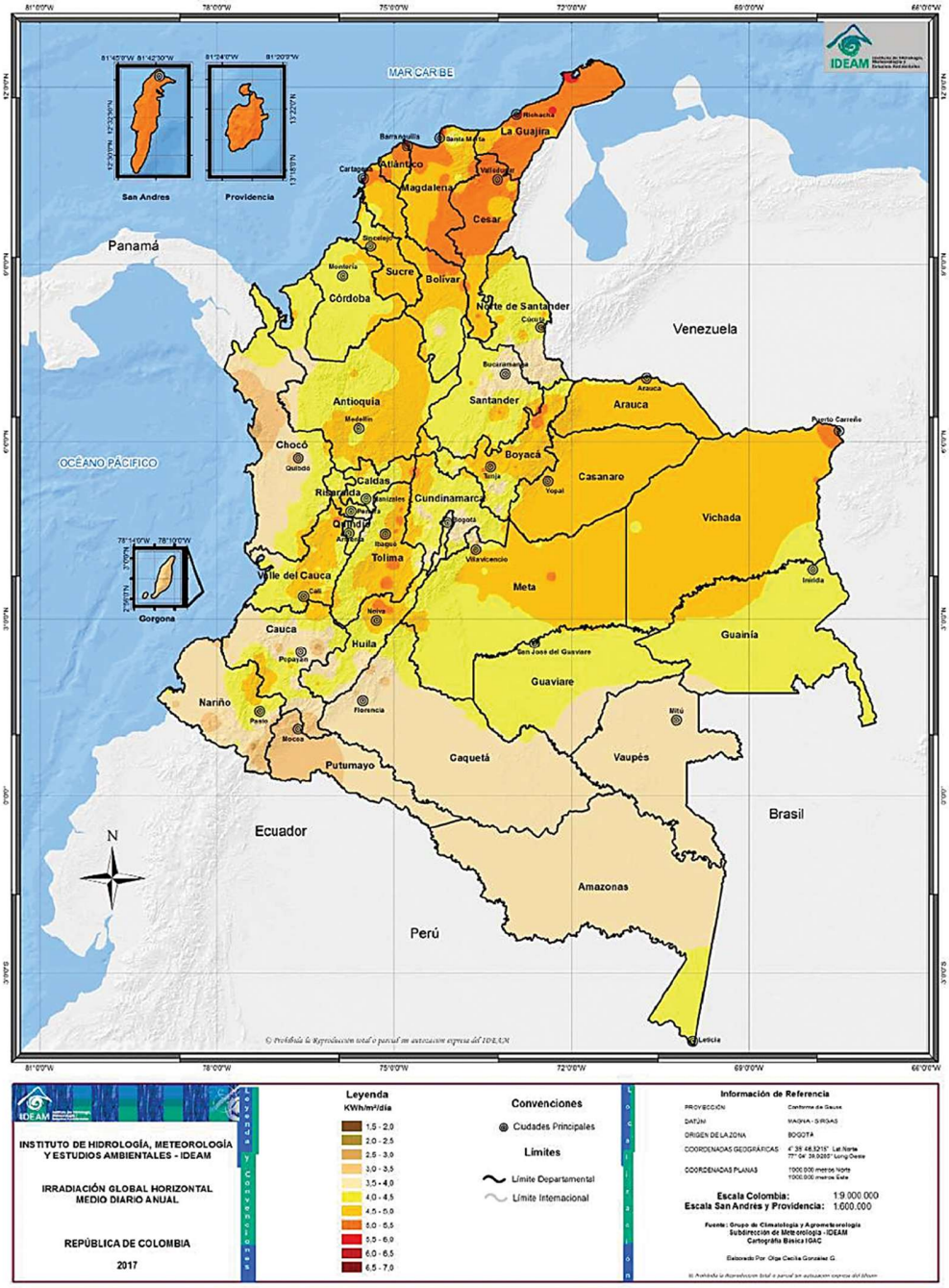


Ilustración 16. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal, durante el día, promedio anual multianual (kWh/m2 por día).
Fuente: (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La distribución espacial y temporal de la luz solar en Colombia presenta una gran variabilidad en sus diferentes regiones debido a todos los factores antes mencionados (geográficos, topográficos y climáticos) que determinan las horas de luz solar directa que recibirá un determinado lugar. En un sistema de monitoreo muy efectivo, se identifican los patrones de luz solar sobre su territorio para Colombia con datos de más de 500 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país. Estos datos se vuelven vitales para conocer la distribución y el uso que se hace de los recursos solares, ya sea en proyectos energéticos o en actividades productivas como la agricultura. En términos de distribución espacial, las regiones del Caribe y la Orinoquía destacan por tener los mayores valores de brillo solar, con promedios entre 6 y 9 horas de sol por día (hSd). Dentro de estas zonas, áreas como La Guajira presentan los niveles más altos, alcanzando hasta 8,4 hSd en municipios como Uribia. En contraste, la región Pacífica, debido a su alta nubosidad y mayor incidencia de precipitaciones, tiene los valores más bajos, con promedios de entre 2 y 4 hSd. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Para una mayor comprensión de la diversidad de la tierra y el lapso de tiempo de la iluminación solar en el país colombiano, es necesario examinar la distribución de grados de temperatura promedio de la iluminación solar diariamente. en la ilustración 15 destaca las zonas de mayor y menor resplandor solar, con cifras exactas para cada zona. Esta herramienta es irremplazable para hallar los sectores con más capacidad de energía solar y con respecto a hacer proyectos que están vinculados a la iluminación solar directa en diferentes partes del territorio nacional. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

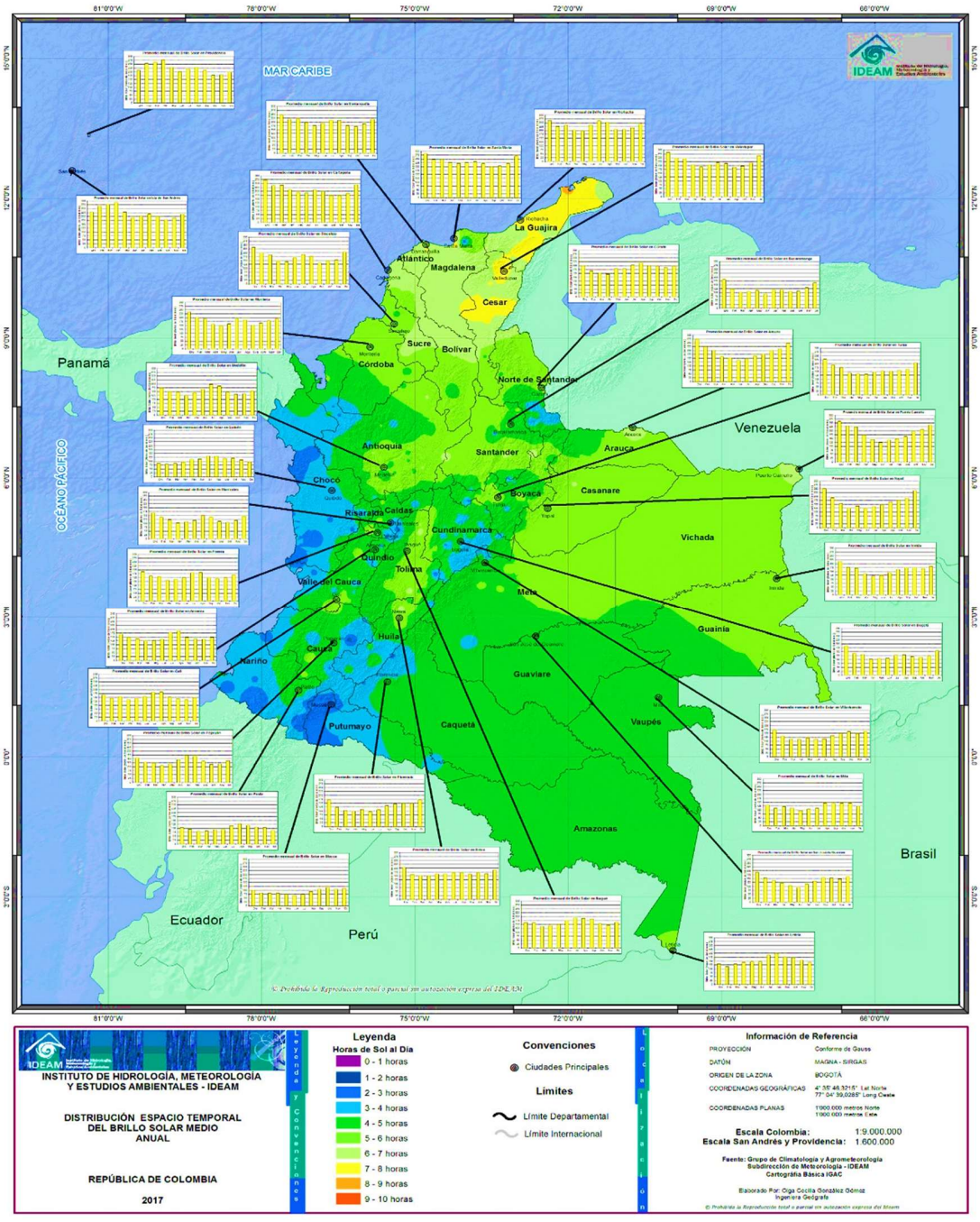


Ilustración 17. Promedio anual multianual de horas de Sol al día con histogramas de las principales ciudades del país.
Fuente: (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

Capacidad Instalada de generación energética en Colombia - Año 2023

En 2023, Colombia sigue apostando por una oferta energética más limpia y sostenible diversificando la matriz energética con fuentes renovables. El país aumenta su capacidad instalada de producción de energía con fuentes de bioenergía hidroeléctrica, solar y eólica, al tiempo que diversifica las fuentes de bioenergía. Todas estas iniciativas son parte de un esfuerzo nacional por reducir la carga de los combustibles fósiles y trabajar hacia la mitigación del cambio climático en sintonía con los objetivos globales de desarrollo sostenible.

La siguiente tabla muestra las capacidades instaladas desglosadas por tipo de energía a nivel de país para el año 2023, lo que refleja el peso relativo de cada una dentro de la matriz energética nacional.

Tipo de Energía	Capacidad en MW (2023)
Hidroeléctrica	13211
Solar Fotovoltaica	676
Energía Eólica	18
Bioenergía	353
Biocombustibles sólidos y residuos renovables	343
Bagazo	338
Otros biocombustibles sólidos	6
Biogás	9

Tabla 3.matriz energética de Colombia 2023
Fuente: (IRENA, 2024)

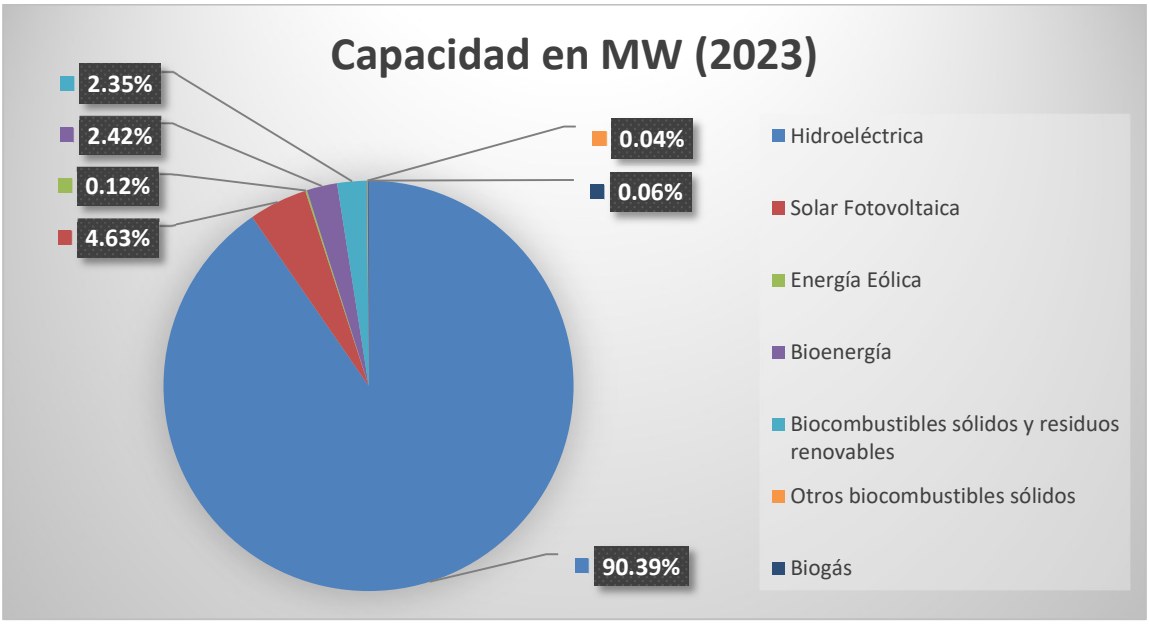


Ilustración 18. Capacidad Instalada de Generación en Colombia Año 2023
Fuente: Propia

Registro de proyectos FV en Colombia

Dentro del desarrollo de las fuentes de energía renovables en la matriz eléctrica colombiana, la energía solar fotovoltaica se destaca como la más relevante debido a su viabilidad y eficiencia. Ante la necesidad de más energías renovables en la matriz energética de Colombia, los proyectos solares han ganado protagonismo. Todo esto ha traído consigo una mayor competitividad de la tecnología fotovoltaica, políticas de incentivos y la necesidad de resiliencia energética en diferentes partes del país.

El registro de proyectos fotovoltaicos no solo evidencia el fenómeno de creciente adopción de esta tecnología en Colombia, sino el compromiso de los sectores público y privado por aumentar la participación de fuentes limpias en la generación eléctrica. La siguiente figura muestra la evolución y distribución en el tiempo de estos proyectos, reflejando el dinamismo del sector fotovoltaico en el contexto energético colombiano.

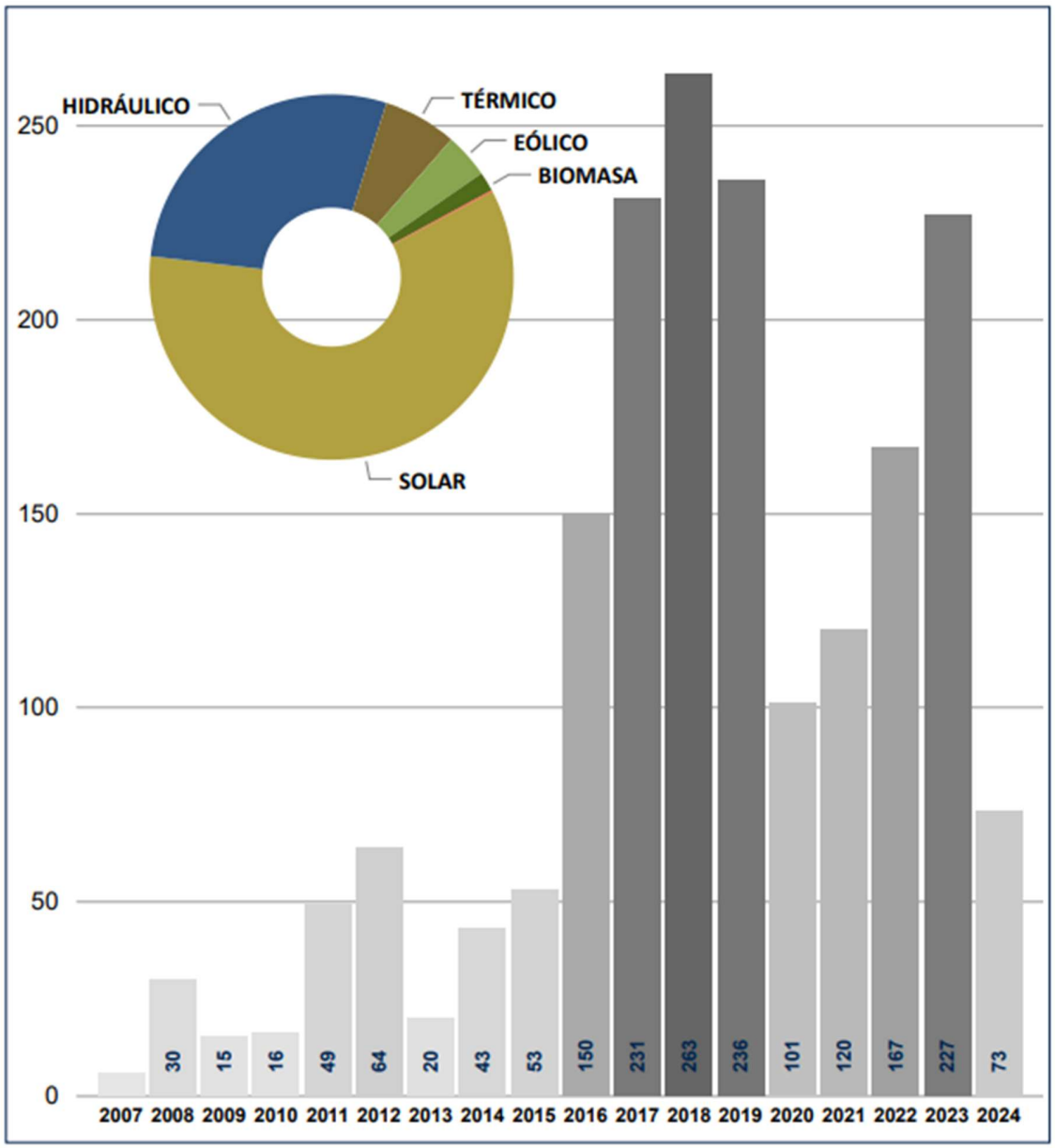


Ilustración 19. Proyectos Solares FV Registrados en los últimos años, fecha de actualización julio de 2024. Fuente: (UPME, 2024)

Fase de proyectos solares FV

Los proyectos solares FV sigue una metodología que clasifica los proyectos en diferentes fases de avance desde el inicio del programa hasta su finalización. Este método permite un control estricto sobre el estado de cada proyecto para favorecer la supervisión y la

optimización de recursos hacia el proceso de transición energética del país. El grado de madurez del proyecto se sincroniza con cada una de las fases, lo que por sí mismo indica que el proyecto ha alcanzado un nivel particular. Los indicadores van desde la preparación técnica y financiera hasta la conexión final al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

En la ilustración 18 se indica la distribución de los proyectos solares fotovoltaicos actuales en Colombia por su fase de desarrollo dentro de los años 2022, 2023 y 2024.

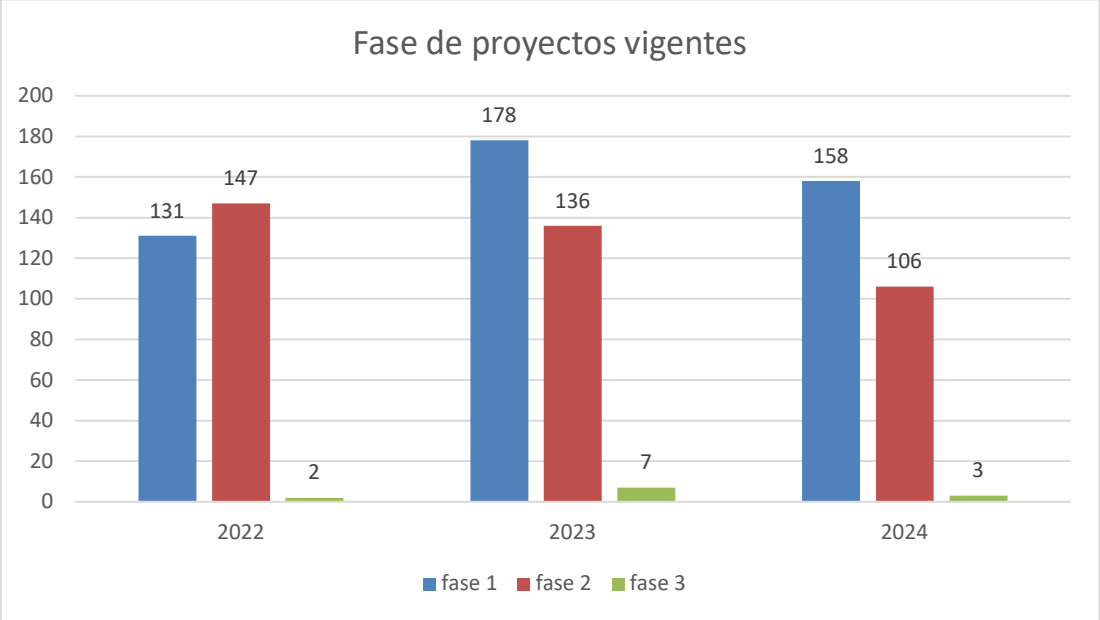


Ilustración 20. Fase de proyectos vigentes
Fuente: (UPME, 2024)

El número de proyectos es más alto en todos los años durante la Fase 1, alcanzando un máximo de 178 en 2023 para reflejar un fuerte crecimiento en la planificación de iniciativas. La Fase 2, que comprende proyectos en etapas avanzadas de permisos y financiamiento, se mantiene estable con una pequeña disminución en 2024 (106 proyectos). Por último, la Fase 3 agrupa los proyectos más listos, para conexión o en construcción. Es la menos representada; sin embargo, hay un repunte en 2023 con 7 proyectos que indica un movimiento hacia la implementación final de estos proyectos solares en el país.

Entrada En Operación

Los proyectos energéticos en Colombia reflejan los pasos que está dando el país en materia de progreso y desarrollo de infraestructura, especialmente en la generación de electricidad para la nación. Debido a que estos proyectos tardan varios años en implementarse en su totalidad, es un proceso que continuará con la creación de otros proyectos similares para satisfacer una demanda cada vez mayor de energía y al mismo tiempo poder cumplir con los objetivos de sostenibilidad.

El cronograma de operación refleja la diversidad de fuentes de energía y también el compromiso del país con la ampliación de su matriz energética. Dos gráficos, que se pueden ver en la ilustración 19 a continuación, muestran por un lado el número de proyectos que se espera que entren en operación cada año y por otro lado la capacidad total de generación proyectada para esos años. Estos datos brindan información sobre la tendencia de crecimiento y el impacto que se puede esperar de estos proyectos en el futuro de la energía de Colombia.

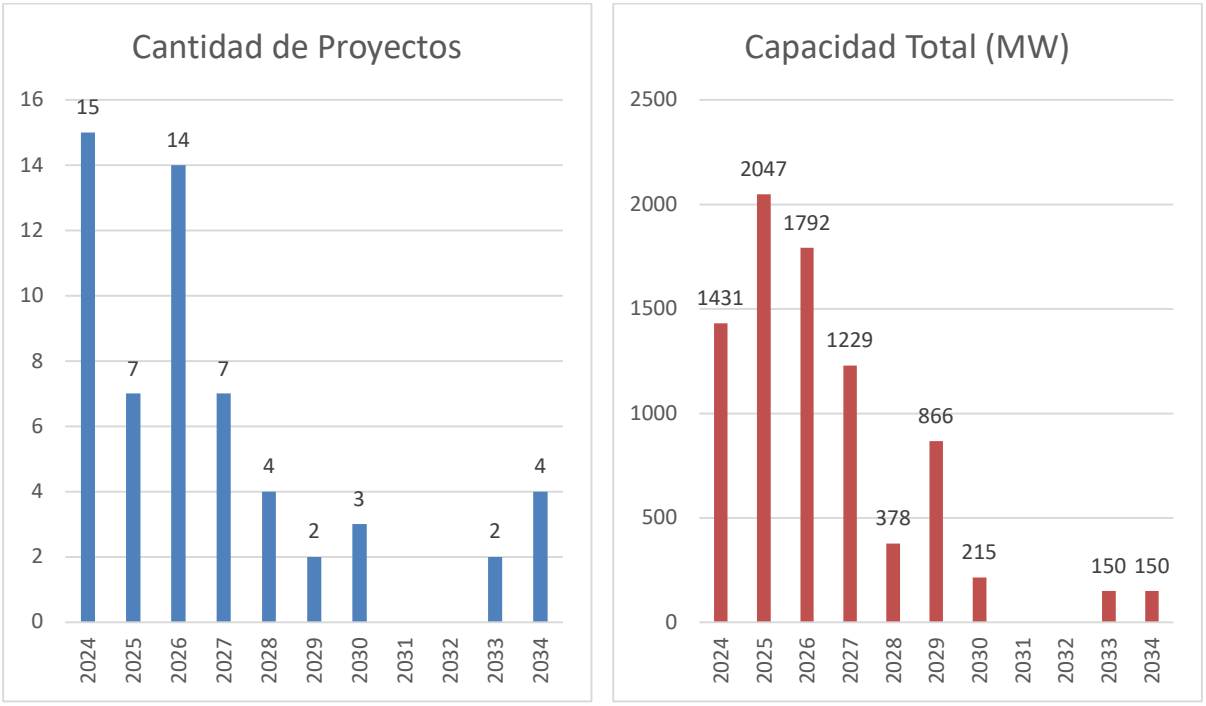


Ilustración 21. Entrada en Operación de sistemas FV.
Fuente: (UPME, 2024)

Proyectos Fotovoltaicos, Capacidad de Generación

El país colombiano ha experimentado un aumentado significativamente de la ejecución de proyectos de energía renovable, volviéndose a manos de una de las principales fuentes de energía alternativa en la nación. La habilidad de creación de estos proyectos varía significativamente entre las regiones, habiendo una mayor concentración en ciertas zonas, esto evidencia el uso del potencial solar. Luego, se observa en la tabla 20 la capacidad de creación de energía solar por sector.

Aparte de la habilidad de creación, el número de proyectos en marcha actualmente por cada departamento es una medida fundamental para determinar el progreso de la energía solar en el país colombiano. La siguiente tabla exhibe la distribución de proyectos de energía renovable por región, y señala la evolución de la popularización de esta tecnología en diferentes zonas de la nación.

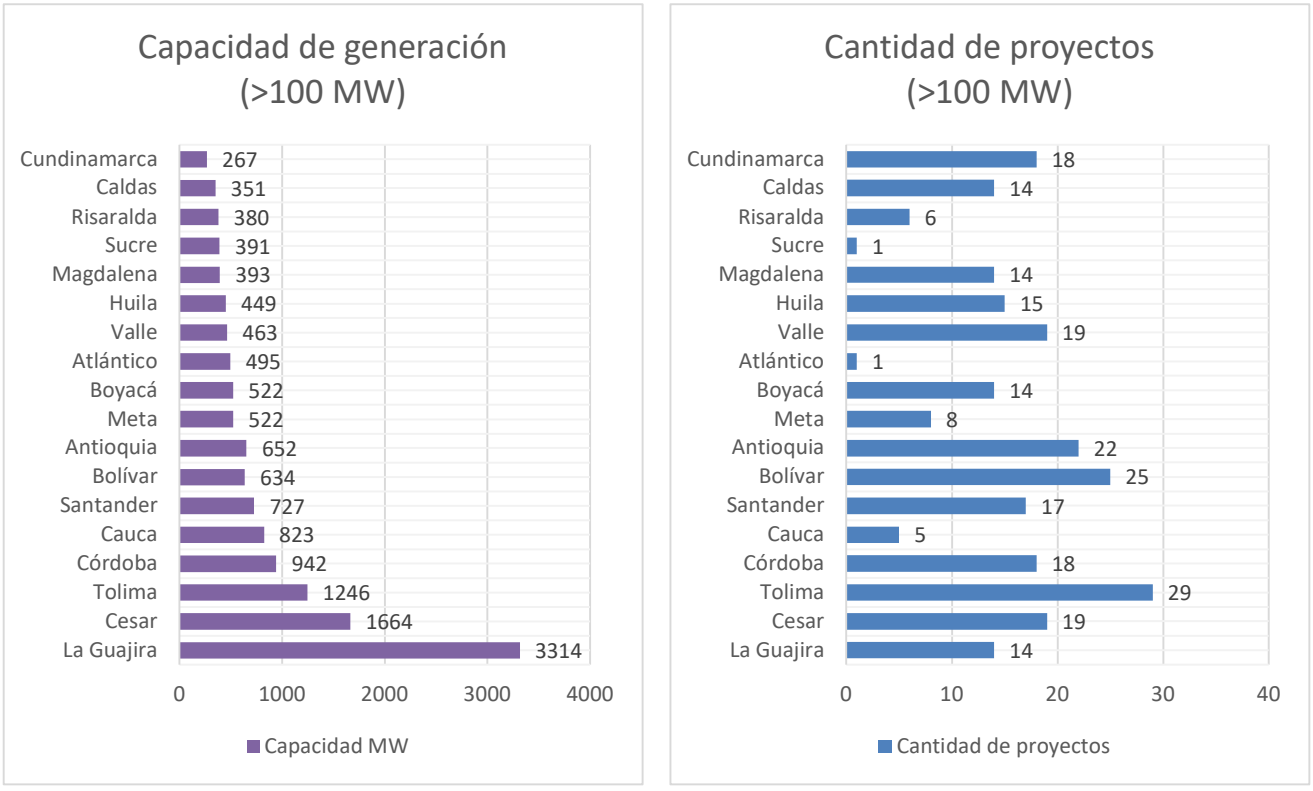


Ilustración 22. Proyectos Registrados Mayores a 100 MW, Julio de 2024
Fuente: (UPME, 2024)

Además de integrarse con la perspectiva mundial relacionada con la puesta en marcha de proyectos de energía, también destaca aquellos proyectos con instalaciones cuya capacidad instalada no supera los 100 MW. Si bien su contribución por proyecto puede parecer algo pequeña al compararla con proyectos de mayor tamaño, estos proyectos juegan un papel muy importante en regiones escasamente pobladas o menos industrializadas. Estos contribuyen a la diversificación simultánea de la matriz energética y mejoran el acceso a la energía en diferentes regiones del país.

En la ilustración 21 se ilustra la capacidad de generación por departamento, así como el número de proyectos en operación, donde la capacidad no supera los 100 MW. Casanare es el departamento con más proyectos seguido de Norte de Santander. Estos datos permiten ver cómo los departamentos menos representados en los grandes proyectos energéticos también están avanzando en la implementación de energías renovables, pero en menor escala, lo que contribuye a un desarrollo más equilibrado y sostenible en todo el país.

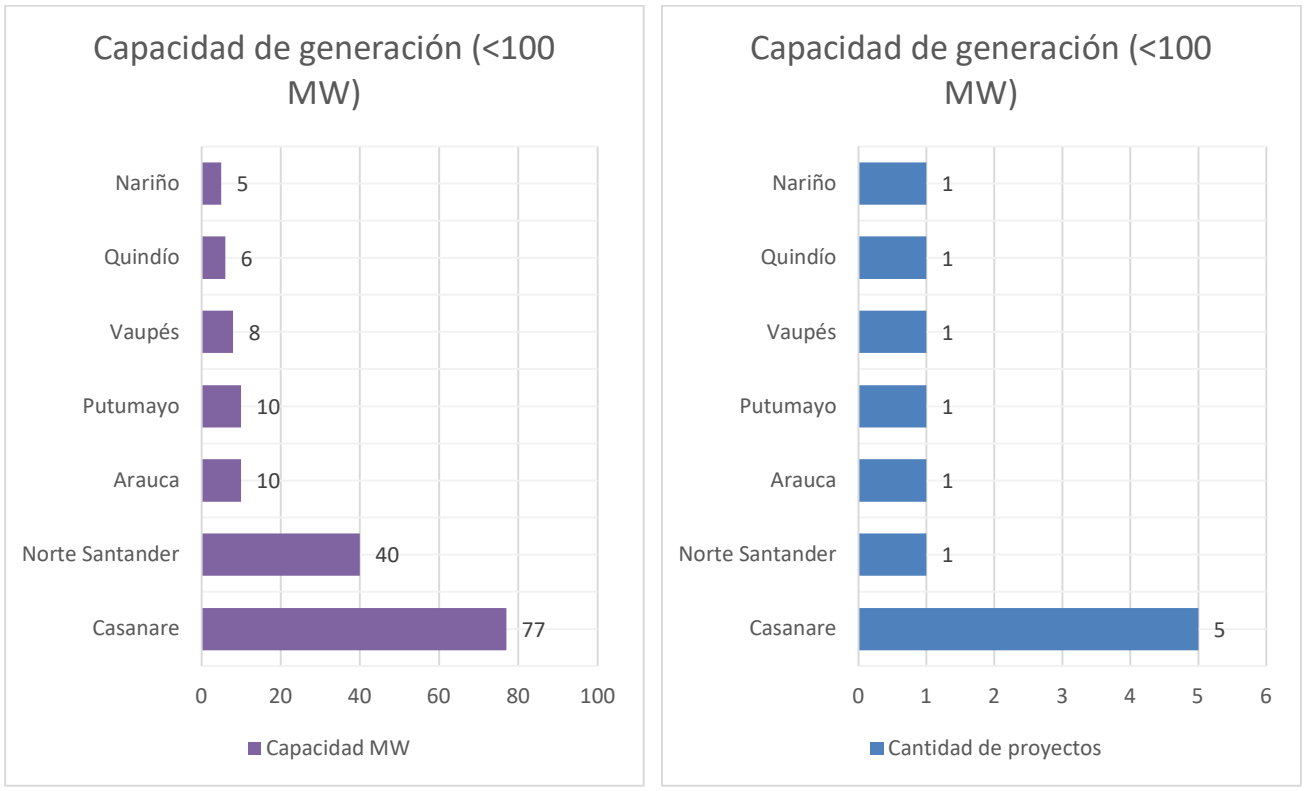


Ilustración 23. Proyectos con capacidad Menor a 100 MW.
Fuente: (UPME, 2024)

Barreras en la implementación de Sistemas FV

El despliegue de sistemas fotovoltaicos en Colombia, aunque optimista, está plagado de un conjunto de barreras que impiden su ampliación y avance. La ley que habla de la promoción del uso de fuentes de energía renovables no convencionales es la Ley 1715 de 2014, la cual ha enumerado los impedimentos que se deben eliminar para que los sistemas fotovoltaicos se integren de manera más asidua a la matriz energética del país. En la siguiente tabla se describen las principales barreras para la implementación de estos sistemas, las cuales abarcan aspectos técnicos, económicos, regulatorios, administrativos y de mercado.

Tipo de Barrera	Descripción
Técnicas	Exigencias técnicas rigurosas para conectar sistemas FV a la red eléctrica, lo que dificulta la integración de nuevas tecnologías.
Económicas	Altos costos iniciales para la instalación y mantenimiento de los sistemas FV, lo que afecta su competitividad frente a fuentes de energía tradicionales.
Regulatorias	Falta de un marco normativo claro y actualizado para regular la autogeneración y distribución de energía FV, así como la conexión a la red.
Administrativas	Procesos burocráticos lentos y complejos para obtener los permisos y licencias necesarios para la implementación de proyectos FV.
Mercado	La dominancia de fuentes de energía convencionales dificulta la integración de fuentes renovables como la energía solar en el mercado energético.
Financieras	Dificultades para acceder a financiamiento y crédito para proyectos de pequeña y mediana escala, especialmente en áreas rurales o remotas.

Ilustración 24. Principales barreras para las FNCER en Colombia.
Fuente: propia

Proyectos Relevantes en Funcionamiento

En Colombia ya se encuentran en marcha 38 proyectos de energía solar en el territorio nacional, los cuales serán muy importantes en la diversificación y transformación de la matriz energética mediante la incorporación de fuentes renovables. Estos proyectos están motivados principalmente por la creciente demanda de fuentes de energía limpia y además juegan un papel fundamental en la generación eléctrica sostenible. A continuación, se presentan algunos de los proyectos que más megavatios generan, por su capacidad instalada o por su impacto en la matriz energética del país

Parque Solar La Loma:	Características	Detalles
	**Ubicación**	La Loma, Cesar
	Cantidad de Paneles	400
	Capacidad Instalada	187 MW
	Capacidad de Generación Anual	420 GWh/año
	Impacto	600,000 personas beneficiadas
	Inversión (USD)	126 millones
	Emisiones CO2 Evitadas	200,000 toneladas/año
	Área Utilizada (Ha)	387
	Empresa Inversionista	Enel Green Power
	Entrada en operación	Febrero de 2024

Tabla 4. Características parque solar la Loma, Cesar
Fuente: (minenergia, 2024) (enelgreenpower, Parque solar La Loma, Colombia, s.f.)

Parque el paso solar:	Características	Detalles
	**Ubicación**	El Paso, Cesar
	Cantidad de Paneles	250
	Capacidad Instalada	86,02 MW
	Capacidad de Generación Anual	176 GW/Año
	Impacto	102,000 hogares beneficiados
	Inversión (USD)	70 millones (Año 2019)
	Emisiones CO2 Evitadas	100,000 toneladas/año
	Área Utilizada (Ha)	210
	Empresa Inversionista	Enel Green Power Colombia EGPC
	Entrada en operación	Abril de 2019

Tabla 5. Características parque solar la Loma, Cesar
Fuente: (enelgreenpower, 2019)

Parque Solar San Fernando:	Características	Detalles
	**Ubicación**	Castilla La Nueva, Meta
	Cantidad de Paneles	114
	Capacidad Instalada	61 MW
	Capacidad de Generación Anual	No disponible
	Impacto	Abastecimiento para 93,000 habitantes
	Inversión (USD)	40 millones
	Emisiones CO2 Evitadas	508,000 toneladas durante 15 años
	Área Utilizada (Ha)	57
	Empresa Inversionista	AES Colombia, Ecopetrol, Cenit
	Entrada en operación	oct-21

Tabla 6. Características Parque Solar San Fernando, Meta
Fuente: (ecopetrol, 2021) (revista semana , 2021)

Parque Solar Dulima	Características	Detalles
	**Ubicación**	Flandes, Tolima
	Cantidad de Paneles	51,732
	Capacidad Instalada	19.9 MW
	Capacidad de Generación Anual	No disponible
	Impacto	Evita la emisión de 23,957 toneladas de CO2 al año
	Inversión (USD)	No disponible
	Emisiones CO2 Evitadas	23,957 toneladas/año
	Área Utilizada (Ha)	No disponible
	Empresa Inversionista	Celsia
	Entrada en operación	2023

Tabla 7. Características Parque Solar Dulima, Tolima
Fuente: (ectricol, s.f.)

A continuación, se encuentran las principales granjas solares en tierras colombianas. En el apartado anterior se limitó a especificar las más importantes, aquellas que resaltan por su capacidad instalada, su importancia en el ámbito de la energía solar de la nación y su efecto en la reducción de las emisiones de CO2. Estas iniciativas constituyen un complemento indirecto con el propósito de aumentar la capacidad de energía alternativa en el ámbito de la transformación energética de Colombia.



BALANCE DE GRANJAS SOLARES EN COLOMBIA

Proyecto	Promotor	Capacidad	Departamentos
Autog Celsia Solar Yumbo	Celsia	9,8 MW	Valle del Cauca
Bayunca 1	Egal	3 MW	Bolívar
Bosques Solares de los Llanos 1	Trina	19,9 MW	Meta
Bosques Solares de los Llanos 2		19,9 MW	
Bosques Solares de los Llanos 3		19,9 MW	
Bosques Solares de los Llanos 4		19,9 MW	
Bosques Solares de los Llanos 5		17,9 MW	
Buga 1	Celsia	9,9 MW	Valle del Cauca
Cabrestero	Parex	3 MW	Casanare
Carmelo	Celsia	9,9 MW	Valle del Cauca
Celsia Solar Bolívar		8 MW	Bolívar
Celsia Solar Espinal		9,9 MW	Tolima
Cerritos	Grenergy	9,9 MW	
Delphi Helios	Ebsa	16 MW	Meta
Dulima	Celsia	19,9 MW	Tolima
El Paso Solar	Enel	67 MW	César
Flandes	Celsia	19,9 MW	Tolima
GR Parque Solar Tucanes	Grenergy	9,9 MW	Bolívar
Granja Solar Energía de Pereira	Empresa de Energía de Pereira S.A. ESP	5 MW	Risaralda
La Loma Solar	Enel	170 MW	César
La Medina	Grenergy	9,9 MW	Tolima
La Paila	Celsia	9,9 MW	Valle del Cauca
La Sierpe Solar	Aages	19,9 MW	Sucre
Llanos 34	Geopark	9,9 MW	Casanare
Los Caballeros	Grenergy	9,9 MW	Tolima
Melgar	Celsia	9,9 MW	
Palmira 3		9,9 MW	Valle del Cauca
Parque Fotovoltaico Montelíbano Solar	Grenergy	9,9 MW	Córdoba
Pétalo de Córdoba	GreenYellow	9,9 MW	
Puerto de Cartagena	Puerto de Cartagena	2,2 MW	Bolívar
San Felipe	Celsia	9,9 MW	Tolima
San Fernando	ECP	61 MW	Meta
Sincé	Termotasajero Dos	19,9 MW	Sucre
Sol de Inírida	Celsia	2,2 MW	Guainía
Solar Castilla ECP	ECP	20 MW	Meta
Termotasajero Dos Solar	Termotasajero Dos	4 MW	Norte de Santander
Tuluá	Celsia	13,3 MW	Valle del Cauca
Yuma		9,9 MW	Tolima

Fuente: Ministerio de Minas y Energía Gráfico: LR-GR-ER

Ilustración 25. Balance de granjas solares en Colombia fuente: (la republica, 2023)

Techos solares en funcionamiento

Techo solar empresa Lafayette	Características	Detalles
	**Ubicación**	Bogotá, Colombia
	Cantidad de Paneles	2,800 paneles instalados
	Capacidad de Generación Anual	10% del consumo energético de la empresa
	Impacto	Reducción de 2,800 toneladas de CO2
	Emisiones CO2 Evitadas	2.7% reducción de huella de carbono
	Área Utilizada (Ha)	80,000 m² de techo disponible
	Empresa Inversionista	Lafayette
	Entrada en operación	2022

Tabla 8. características techo solar empresa Lafayette
Fuentes: (GacetaRegional, 2022), (Redacción Cromos, 2022)

Techo Solar de Racafé	Características	Detalles
	**Ubicación**	Neiva – Palermo, Huila
	Cantidad de Paneles	452
	Capacidad Instalada	122.04 kWp
	Capacidad de Generación Anual	170,591 kWh/año
	Impacto	Atenderá el 27% de la demanda energética de la trilladora
	Emisiones CO2 Evitadas	62.6 toneladas/año
	Empresa Inversionista	Celsia, Racafé
	Entrada en operación	2018

Tabla 9. Características Techo Solar de Racafé
Fuente: (Celsia, 2018)

Techo Solar del Centro Comercial La Reserva	Características	Detalles
	**Ubicación**	Envigado, Antioquia
	Cantidad de Paneles	96 módulos
	Capacidad Instalada	30.72 kWp
	Capacidad de Generación Anual	50% del consumo de zonas comunes
	Impacto	Reducción de 16.18 toneladas de CO2/año
	Emisiones CO2 Evitadas	16.18 toneladas/año
	Empresa Inversionista	Celsia
	Entrada en operación	mar-17

Tabla 10. características Techo Solar del Centro Comercial La Reserva
Fuente: (Celsia, 2017) (LA Network Ciudades, 2017)

Techo Solar del Centro de Distribución Logístico Internacional del Grupo Puerto de Cartagena	Características	Detalles
	**Ubicación**	Cartagena, Colombia
	Cantidad de Paneles	6.000
	Capacidad Instalada	2.2 MW
	Capacidad de Generación Anual	10% del consumo energético anual del puerto
	Impacto	Evita la emisión de 1,101 toneladas de CO2/año
	Emisiones CO2 Evitadas	1,101 toneladas/año
	Empresa Inversionista	Celsia, Grupo Puerto de Cartagena
	Entrada en operación	2021

Tabla 11. características Techo Solar del Centro de Distribución Logístico Internacional del Grupo Puerto de Cartagena
Fuente: (SectorElectricidad, 2021)

Techo Solar de Mercacentro	Características	Detalles
	**Ubicación**	Ibagué, Tolima
	Cantidad de Paneles	360
	Capacidad Instalada	122 kWp
	Capacidad de Generación Anual	140,000 kWh/año
	Impacto	Cubre el 20% del consumo energético del supermercado
	Inversión (USD)	No disponible
	Emisiones CO2 Evitadas	53 toneladas/año
	Área Utilizada (Ha)	No disponible
	Empresa Inversionista	Celsia
	Entrada en operación	2020

Tabla 12. Características Techo Solar de Mercacentro
Fuente: (Guzmán, 2020)

No sólo la imposición de techos solares en Colombia se ha dado en los últimos años, sino que existen varios proyectos en operación que sobresalen por la cantidad de energía limpia que pueden producir y, por ende, su efecto positivo en la disminución de emisiones de CO2. Estos proyectos se han desarrollado en diferentes sectores comercial, educativo, industrial, lo que contribuye a diversificar la matriz energética del país como se muestra arriba.

A continuación, se resumen otros proyectos de techos solares en operación en Colombia, se detallan las principales características de cada uno de ellos, incluyendo ubicación, capacidad instalada y su contribución al consumo energético. Este conjunto de proyectos refleja el compromiso, de diferentes actores dentro del sector energético, de promover el

uso de fuentes de energía renovables y fomentar el desarrollo sostenible dentro del territorio colombiano.

Nombre del Proyecto	Ciudad	Departamento	Capacidad (kWp)
Alkosto Cali	Cali	Valle del Cauca	118
Éxito Barranquilla	Barranquilla	Atlántico	500
Bosi Medellín	Medellín	Antioquia	92
Incolmotos, Girardota	Girardota	Antioquia	35
Centro Comercial El Tesoro	Medellín	Antioquia	500
Parque La Reserva Mall	Medellín	Antioquia	30.72
Mall Plaza El Castillo	Cartagena	Bolívar	850.5
Universidad Autónoma de Occidente	Cali	Valle del Cauca	442
Tecnoglass	Barranquilla	Atlántico	2,47
Centro Comercial Viva Wajira	Riohacha	Guajira	400
Centro de Convenciones Cartagena de Indias	Cartagena	Bolívar	444.14
Techo Fábrica Nacional de Chocolates	Rionegro	Antioquia	142.94
Colegio Colombo Británico	Envigado	Antioquia	55
Centro Comercial Viva Envigado	Medellín	Antioquia	587
Primer Techo Solar en Tuluá	Tuluá	Valle del Cauca	130

Tabla 13. Techos solares en Colombia

El problema de investigación se contextualiza a partir de los antecedentes, es decir, teniendo en cuenta el conocimiento previamente construido que forma parte de una estructura teórica ya existente. La investigación del estado del arte o antecedentes no pueden ser parte de los objetivos. Esta sección está compuesta por un marco teórico, un marco conceptual, y de manera opcional, un marco legal, un marco espacial y un marco temporal. Debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Debe tener en cuenta el conocimiento previamente construido.
- Debe estar sustentado en el conocimiento científico.
- Debe tener en cuenta la observación, descripción y explicación de la realidad que se investiga.
- No debe ser ni muy extenso ni muy corto.
- Debe estar debidamente referenciado (Según lo reglamentado por la Universidad Distrital).

La sección de antecedentes, el marco teórico o estado del arte tiene dos aspectos diferentes. Por una parte, permite ubicar el tema objeto de la monografía dentro del conjunto de las teorías existentes, con el propósito de precisar en cual corriente de pensamiento se inscribe. Por otra parte, es una descripción detallada de cada uno de los elementos de la teoría que serán directamente utilizados en el desarrollo de la monografía.

Lo constituye la presentación de postulados según autores e investigadores que hacen referencia al problema investigado y que dan una visión completa de las formulaciones teóricas. Es el espacio adecuado para mencionar las relaciones existentes entre las variables dependientes e independientes de la monografía.

No debe entenderse este marco solamente como una revisión bibliográfica exhaustiva, sino más bien como el reconocimiento de la plataforma teórica que permitirá interpretar las bases argumentativas con las que se podrá resolver el problema y su aplicación con base en las variables de la monografía.

Adicionalmente, dentro de la misma sección se incluye un marco conceptual cuya función es definir el significado de los términos (lenguaje técnico) que van a emplearse con mayor frecuencia y sobre los cuales convergen las fases del conocimiento científico. Con base en la teoría presentada y el enfoque individual del investigador, éste define y delimita

conceptualmente los términos que pueden aparecer involucrados en las variables de la monografía (síntomas y causas del problema), en los objetivos planteados o en el marco teórico.

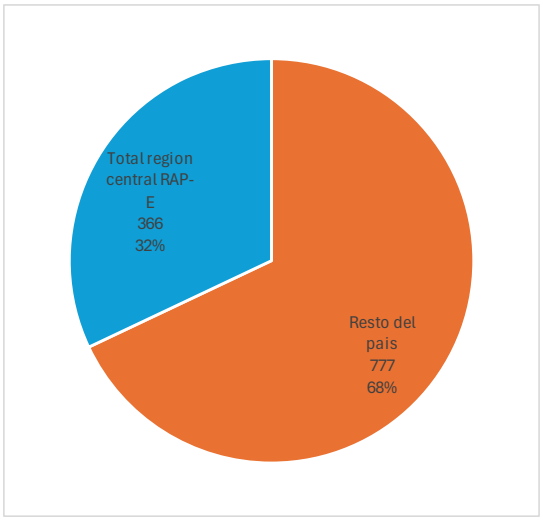
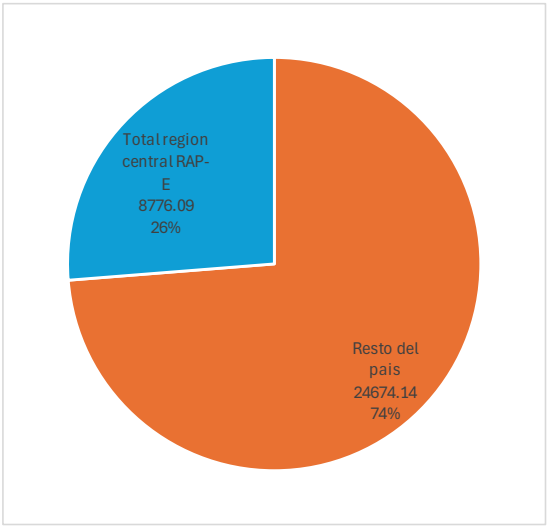
De forma opcional, se puede incluir un marco legal, un marco espacial y un marco temporal. El marco legal tiene como función hacer una recopilación de todas las normas legales relacionadas con el tema principal del proyecto y con los términos que se ven con mayor frecuencia, y sobre los cuales convergen las fases del conocimiento. Incorpora conocimientos previos útiles para el proceso y ayuda a prevenir errores que se han cometido en otros proyectos.

El marco espacial tiene un ámbito de referencia sobre la cual se ha de construir conocimiento; este puede identificarse como un grupo social, una organización, una región geográfica (continente, país, región, provincia). El propósito del marco espacial es definir este ámbito de conocimiento para la monografía. Por su parte, el marco temporal permite comprender la necesidad de definir «el tiempo» dentro del cual se enmarca la monografía propuesta. Significa la importancia de determinar cuál es el espacio en el tiempo al cual ha de corresponder la información que sirve de referencia al investigador.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1 PANORAMA REGION CENTRAL RAP-E

A partir del año 2023 hasta lo corrido del 2025 se han registrado 366 proyectos de energía solar FV en la región central RAP-E, que representan el 32% del total nacional registrados ante la UPME. En cuanto a la capacidad registrada en la Región Central suma un total de 8.8 GW aproximadamente y representa el 26.24 % de la energía solar total a nivel nacional que alcanza los 33,4 GW.

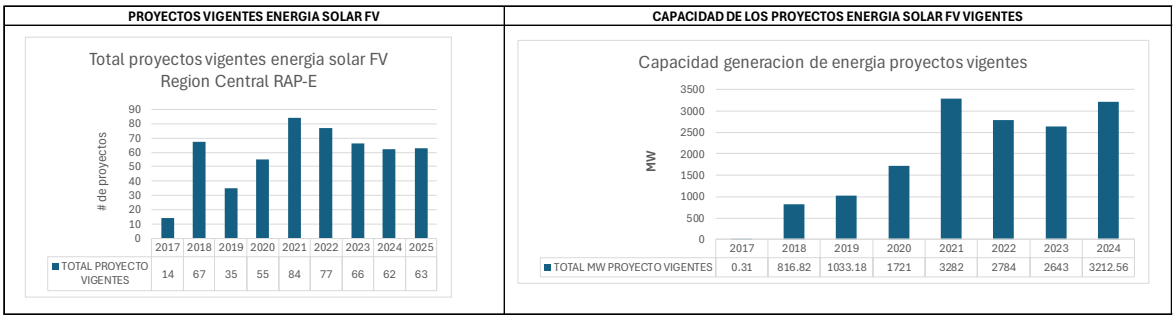
CANTIDAD DE PROYECTOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA REGISTRADA ENTRE 2023-2025		CAPACIDAD DE GENERACION EN MW DE PROYECTOS REGISTRADOS ANTE LA UPME ENTRE 2023-2025	
			
Total de proyectos a nivel nacional	1143	Capacidad registrada a nivel nacional (MW)	33450.23

Grafica 1 Cantidad de proyectos y generación de energía solar FV registrados en la UPME. Elaboración propia. (UPME, 2025)

5.1.1 Registros de proyectos FV en la región Central RAP-E

De los 1.143 proyectos presentados en la UPME a nivel nacional se encuentran en vigencia solo 193 se encuentran vigentes, de los cuales el 39% (75 proyectos) iniciaron su vigencia en 2023. En el 2024 entraron en vigencia 112 proyectos equivalentes al 58%. De estos 193

en vigencia 62 se encuentran sobre la Región Central tomando de esta manera el 33% de los proyectos vigentes.



Grafica 2 Cantidad de proyectos y generación de energía solar FV sobre la Región Central RAP-E. Elaboración propia. (UPME, 2025)

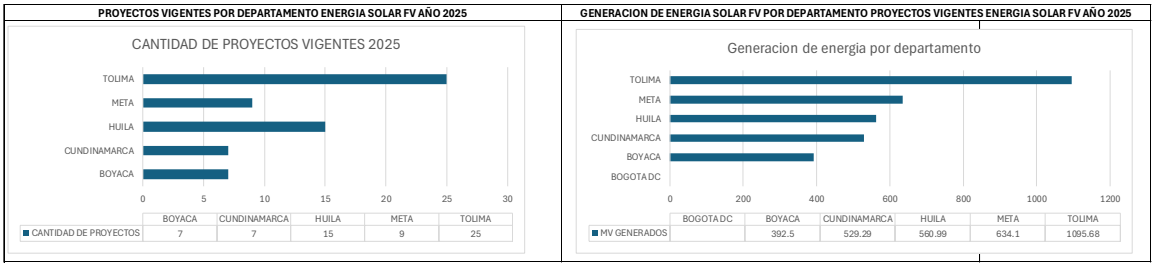
Revisando la información de la cantidad y generación de energía dentro de la región RAP-E (UPME, 2025) desde el año 2017 hasta el año pasado, se evidencia que dentro de la región en el periodo 2017 a 2020 se tuvieron proyectos relacionados con la energía solar Fotovoltaica con menor capacidad de generación de energía llegando a un máximo de generar 1.721 MW en 2020. Desde el 2021 al 2024 se han mantenido en el territorio más de 60 proyectos por año, alcanzando su pico en el 2021 con 84 proyectos y una generación de energía de 3.782 MW. Para el año 2024 se tuvo en repunte en cantidad de energía generada con un total de 3.212,56 MW con respecto a los años 2022 y 2023.

Proyectos registrados por Departamento

Para febrero de 2025 la Región Central RAP-E cuenta con 62 proyectos donde el Tolima lidera la cantidad de proyectos vigentes con 25 proyectos y un 40% del total encontrado en la región central. Lo sigue Huila con 15 proyectos, Meta con 9, y Boyacá y Cundinamarca con 7 cada uno. Bogotá DC no tiene proyectos de energía solar fotovoltaica. La ciudad con más proyectos es Ibagué, con 7.

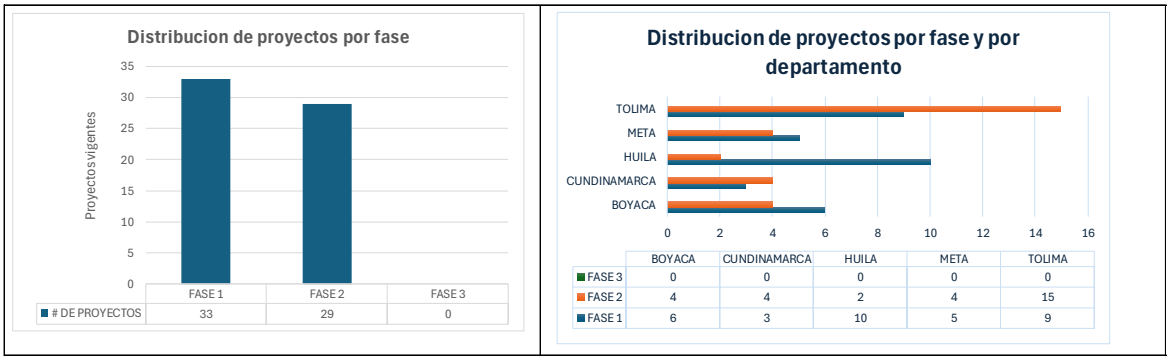
La Región Central posee una capacidad total de sus proyectos solares vigentes de 3.212,56 MW donde el Tolima es el departamento que más energía solar aporta en la región Central

con 1.095,68 MW equivalente al 34% de la energía producida, le sigue el departamento del Meta con 634.1 MW (20%), Huila produce 560,99 MW (17%), sigue Cundinamarca con 529,29 MW (16%) y finaliza Boyacá con 392.5 MW (13%) de la energía solar de la Región Central. Bogotá DC no genera energía solar FV. La ciudad que más energía solar produce en la Región Central es Villavicencio con 549.5 MV sumando la capacidad de sus proyectos.



Grafica 3 Proyectos Vigentes en la Región Central por Departamento. Elaboración Propia.

Fase de los Proyectos Vigentes



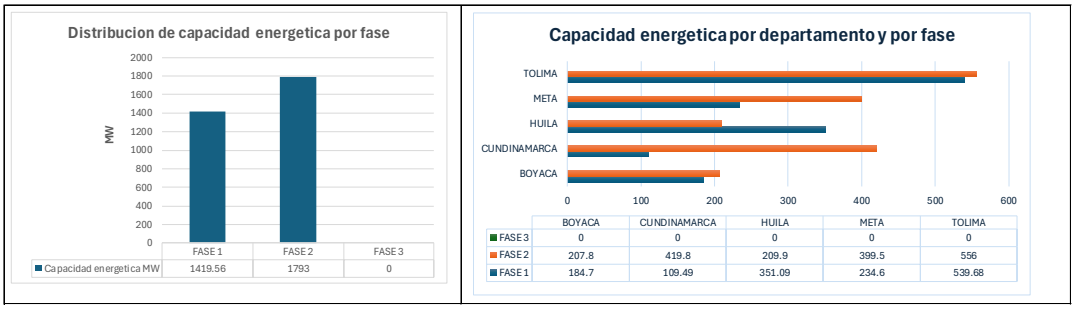
Grafica 4 Distribución de proyectos por fase y departamento. Elaboración propia.

Los proyectos energéticos vigentes en la UPME son clasificados en 3 fases para diagnosticar su avance. La fase 1 hace referencia a la prefactibilidad del proyecto donde se realiza análisis técnico – económico de las alternativas de inversión para el desarrollo de un proyecto energético (UPME, 2018). La fase 2 comprende la factibilidad del proyecto donde se perfecciona y precisa la mejor alternativa identificada en la etapa de prefactibilidad y se tienen estudios más profundos y completos con respecto a la etapa anterior (UPME, 2018). La fase 3 corresponde a la ingeniería de detalle donde se permite la ejecución del proyecto (UPME, 2018).

Después de esta breve descripción de las fases de registro de los proyectos energéticos ante la UPME, se evidencia que con corte a febrero de 2025 la región central cuenta 33 proyectos en fase 1 y 29 proyectos en fase 2. La mayor parte de los proyectos en fase 1 se encuentran en Huila con 10 proyectos, seguidos por Tolima, con 9 proyectos; posteriormente está Boyacá con 6 proyectos, el Meta con 5, y finaliza Cundinamarca con 3 proyectos

Los proyectos en fase 2 son liderados por el Tolima, con 15 proyectos, equivalentes al 45% de los proyectos en esta fase, lo siguen los departamentos de Meta, Boyacá y Cundinamarca con 4 proyectos cada uno y termina la lista el departamento de Huila con 2 proyectos.

La región central no cuenta con proyectos en fase 3 y Bogotá DC no posee proyectos de energía solar actualmente.



Grafica 5 Distribución de capacidad energética por fase y departamento. Elaboración propia.

En cuanto a capacidad de generación energética la fase 1 cuenta con 1.419,56 MW y 1.793 MW en fase 2. La fase 1 es liderada por el departamento del Tolima con 539,68 MW con 38% de la capacidad energética, continua el Huila con 351,09 MW y 25%, sigue el Meta con 234,6 MW y 17%, en cuarto lugar, se encuentra Boyacá con 184,7 MW y 13% de la capacidad energética. Finalizando el listado se encuentra Cundinamarca con 109,49 MW y 4% de la capacidad energética.

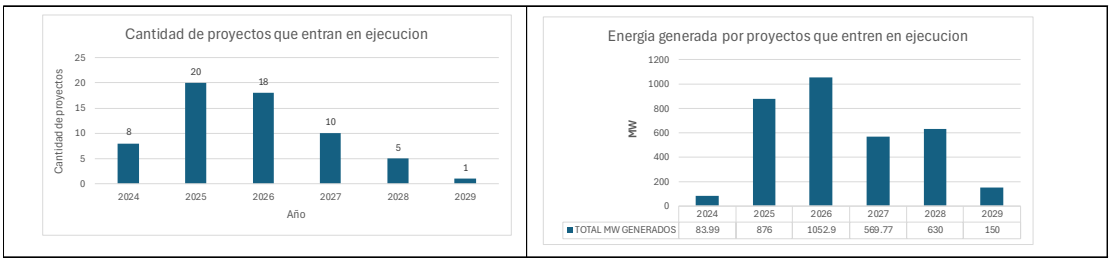
Con respecto a la fase 2 Tolima lidera nuevamente con 556 MW y 31% de la capacidad energética en esta fase, continua el departamento de Cundinamarca con 419,8 MW con

23%, sigue el departamento del Meta con 399,5 MW y 22%. En cuarto y quinto lugar se encuentran los departamentos de Huila y Boyacá con 209,9 MW y 207,8 MW.

Entrada en Operación

Los 62 proyectos vigentes en la Región Central RAP-E registrados en la UPME tienen una fecha estimada para su entrada en operación, con base en este dato para el año 2025 entraran en operación 20 proyectos siendo aproximadamente el 33% de los proyectos vigentes y el año en que más proyectos iniciaran a generar energía. Para el 2026 entraran en operación 18 proyectos con 29% de los proyectos vigentes, para el 2027 entraran en operación 10 proyectos, en el 2028 operaran 5 proyectos y para el 2029 se tiene previsto 1 proyecto a la fecha. En el 2024 entraron en operación 8 proyectos correspondientes al 13% aproximadamente de los proyectos vigentes.

De los proyectos de energía solar vigentes se plantea que al entrar en operación en su totalidad en el año 2029 generen 3.362,66 MW. Teniendo en cuenta lo anterior el año 2026 será el año donde se producirá más energía de los proyectos vigentes con 1.052,9 MW con 31% de la energía total generada, lo sigue el año 2025 donde se generaran 876 MW y un 26% de energía, en tercer lugar se encuentra el año 2028 con 630 MW y un valor cercano al 19%, en cuarto lugar se encuentra el año 2027 con 569,77 MW y 17%, en quinto lugar está el año 2029 con 150 MW y sexto lugar se ubicó el año 2024 donde ya se encuentran generando 83,99 MW correspondiente al 2% con respecto a la energía total proyectada.



Grafica 6 Entrada en operación de proyectos de energía solar en la Región Central RAP-E. Elaboración propia.

Los años 2025 y 2026 serán los años donde entraran en ejecución la mayor cantidad de proyectos vigentes y donde se generará la mayor cantidad de energía sobre la Región

Central con 38 proyectos que equivalen al 61% de los proyectos vigentes en la actualidad proporcionando 1.928,9 MW, teniendo en cuenta que durante el trascurso del año se añadan nuevas iniciativas que aumenten esta capacidad.

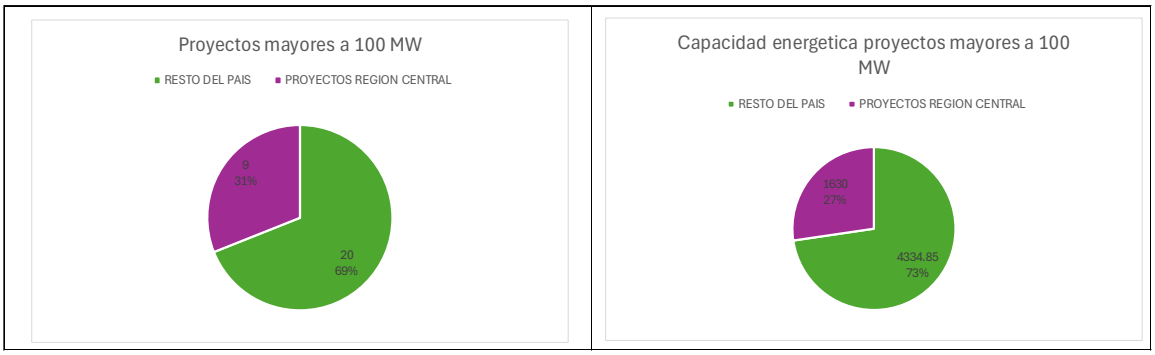
El año 2029 es el año en que se tienen contados menos proyectos que entren en operación con 1 proyecto que producirá 150 MW, pero en contraste con el 2024 donde entraron en operación 8 proyectos, pero con una cantidad de generación menor de energía correspondiente a 83,29 MW en comparación con los otros años, aunque en los próximos 4 años se espera que se sumen más proyectos que eleven esta cifra.

5.1.2 Capacidad de generación de energía solar fotovoltaica

La UPME clasifica los proyectos energéticos según su capacidad de generación y se dividen en proyectos superiores a 100 MW, proyectos entre 50 MW – 100 MW, entre 20 MW – 50 MW, entre 10 MW – 20 MW, entre 1 MW – 10 MW y menores a 1 MW. En la región central se encuentran proyectos en todas las capacidades de generación excepto en las inferiores a 1MW de energía.

Proyectos con capacidades superiores a 100 MW

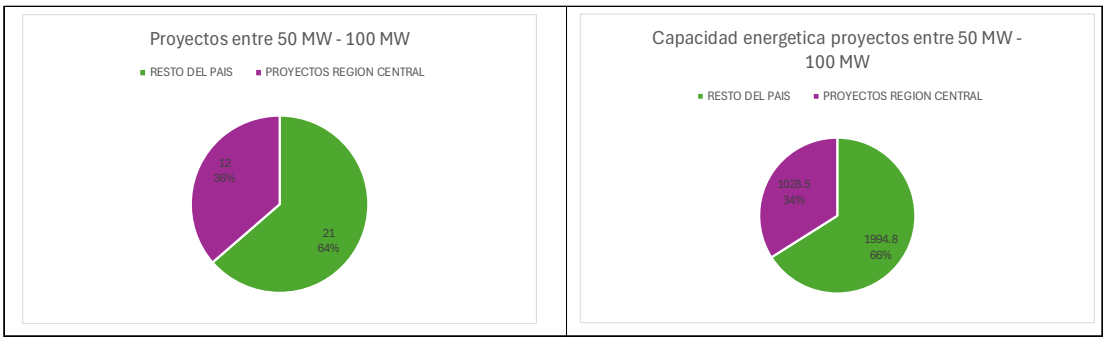
En la Región Central RAP-E hay 9 proyectos vigentes que superan los 100 MW por proyecto con capacidad de generar energía conjuntamente de 1630 MW que corresponden al 27% de la capacidad nacional registrada para proyectos de esta envergadura. La mayor cantidad de proyectos de este amperaje se encuentran en el departamento del Tolima con 3 proyectos, con la mayor capacidad de generar energía sobre la Región Central con un valor de 480 MW. Es importante mencionar que el proyecto que producirá más energía en este rango se encuentra en el departamento de Cundinamarca con el proyecto SOLAR PUERTA DE ORO que se ubica en el municipio de Guaduas con una capacidad energética de 300 MW y entrará en funcionamiento en el 2025.



Grafica 7 Proyectos superiores a 100 MW en la Región Central RAP-E. Elaboración propia.

Proyectos con capacidades entre 50 MW a 100 MW

En la Región Central RAP-E hay 12 proyectos vigentes que se encuentran en este rango de capacidad energética y que en conjunto llegan a 1.028,5 MW que corresponden al 34% de la capacidad nacional registrada para proyectos de este nivel. La mayor cantidad de proyectos de este amperaje se encuentran en el departamento del Tolima con 5 proyectos, que a su vez posee la mayor capacidad de generar energía sobre la Región Central con un valor de 439 MW, casi duplicando la capacidad energética del departamento del Meta con una generación de 239,5 MW. Es importante mencionar que los proyectos que producirán más energía en este rango se encuentran en los departamentos de Cundinamarca y Tolima con los proyectos BARZALOSA ubicado en el municipio de Nariño – Cundinamarca, HELIOS NUEVA ESPERANZA 100 MW ubicado en Soacha – Cundinamarca, además de los proyectos GUADERO y AES SOLAR 3 localizados en Armero Guayabal – Tolima cada uno con una capacidad energética de 100 MW y entraran en funcionamiento en los años 2026 y 2027.



Grafica 8 Proyectos entre 50 MW a 100 MW en la Región Central RAP-E. Elaboración propia.

Proyectos con capacidades menores a 50 MW

Se agruparon los proyectos vigentes menores a 50 MW sobre la Región Central RAP-E encontrando en su totalidad 41 proyectos vigentes con capacidad de producir 604,16 MW correspondiendo al 32% de la capacidad nacional registrada para proyectos de este nivel. La mayor cantidad de proyectos de este amperaje se encuentran en el departamento del Tolima con 18 proyectos, que a su vez posee la mayor capacidad de generar energía sobre la Región Central con un valor de 251.68 MW. Los proyectos se encuentran en los departamentos de Huila, Meta y Tolima con los proyectos PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO TOLIMA NORTE ubicado en el municipio de Armero Guayabal – Tolima, HELIOS HUILA 1 ubicado en Neiva – Huila y el PROYECTO EL DANUBIO en Villavicencio – Meta. Los proyectos mencionados entraran en funcionamiento en los años 2025, 2026 y 2029.



Grafica 9 Proyectos menores a 50 MW. Elaboración propia.

Proyectos Relevantes en Funcionamiento la Región Central RAP-E

La Región Central aporta más del 39% del PIB (Guerrero Albarracin & Castaño Camacho, 2023) y concentra la mayor cantidad de población de país, por ende se halla la necesidad de que la Región Central este en constante búsqueda de alternativas energéticas, sobre todo con el gran impulso que ha dado el gobierno del cambio a la agricultura en las diferentes regiones y la cantidad de industrias que se encuentran dentro, sumado al empuje dado por los países árabes para la creación de Inteligencia Artificial en el país aumentaran en un futuro próximo el consumo energético de la región. Para menguar esta situación la generación Solar Fotovoltaica viene dando pasos agigantados en la Región Central debido a la posibilidad de instalar paneles solares fotovoltaicos en cualquier zona de la región central aprovechando su gran recurso solar presente durante todo el año y la capacidad de dicho sistema de producir energía por más de 25 años realizando mantenimientos básicos para su correcto funcionamiento. A continuación, se relacionan algunos de los proyectos que ya se encuentran funcionando o que están en construcción dentro de la Región Central, los cuales se clasifican en granjas (Grandes extensiones de Tierra) y techos solares (Cubiertas de construcciones desde el nivel industrial hasta el residencial).

- Granjas solares

Las granjas solares son instalaciones a gran escala donde diversos paneles solares se distribuyen a lo largo de un área para la captación de los rayos del sol, que más tarde se convierte en energía eléctrica utilizable. (Autosolar, 2024)

La finalidad de una granja solar es producir electricidad sobre un terreno como un “agricultor” pero en lugar de cultivar plantas se cultivan paneles solares que producen energía la cual luego será vendida a empresas de servicio públicos que suministran electricidad a la red (Autosolar, 2024). En la región central RAP-E las granjas solares más importantes en operación son las siguientes:

Parque San Fernando Solar			
		Es el parque solar mas grande dentro de la Region Central RAP-E. Este parque entro en funcionamiento en el 2021. Realizado por Ecopetrol y AES Colombia en el municipio de Castilla La Nueva es utilizado para el consumo de las instalaciones de Ecopetrol en los departamentos de Meta y Casanare con la capacidad de cubrir el consumo de 93000 habitantes	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Meta	**Empresas**	Ecopetrol - AES Colombia
Municipio	Castilla La Nueva	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	508000
Cantidad paneles	114000	**Area Utilizada (Ha)**	57
Capacidad instalada	61 MWp	**Entrada en operación**	Octubre de 2021
Capacidad generacion año		**Impacto**	Consumo de energia para 93000 habitantes
Inversion (USD)	40 millones		

Tabla 14 Características parque solar San Fernando. Elaboración propia. (Ecopetrol, 2021)

Parque Solar Jeques			
		Es el primer proyecto en la región que aporta energía limpia al Sistema Interconectado Nacional (SIN), fortaleciendo la presencia de energías renovables en Cundinamarca. El parque cuenta con 19.278 paneles solares bifaciales y tecnología tracker, que optimizan la captación de energía a lo largo del día.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Cundinamarca	**Empresas**	GreenYellow Colombia
Municipio	Cucunuba	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	10742
Cantidad paneles	19278	**Area Utilizada (Ha)**	57
Capacidad instalada	9.9 MWp	**Entrada en operación**	Febrero de 2025
Capacidad generacion año	21.79 GWh	**Impacto**	Consumo de energia para 145000 hogares
Inversion (USD)	10 millones		

Tabla 15 Características parque solar Jeques. Elaboración propia. (Urrea, 2025)

Parque Solar Vasconia			
		Es un parque solar desarrollado para la transportadora de hidrocarburos Oleoducto Central (Ocensa), donde se cubrira el 25,5% de las operaciones conjuntas de Ocensa y el Oleoducto de Colombia (ODC).	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Boyaca	**Empresas**	GreenYellow Colombia
Municipio	Puerto Boyaaca	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	7900
Cantidad paneles	12300	**Area Utilizada (Ha)**	18
Capacidad instalada	7 MWp	**Entrada en operación**	Diciembre de 2024
Capacidad generacion año	15 GWh	**Impacto**	Cubrira el 25.5% de gasrto energetico de Ocensa y el Oleoducto de Colombia (ODC)
Inversion (USD)	10 millones		

Tabla 16 Características parque solar Vasconia. Elaboración propia. (Greenyellow, 2024)

Parques Solares Cerritos, La Medina y los Caballeros			
		Son parques desarrollados para apoyar el suministro de energia de 40000 familias ubicadas en los municipios de San Sebastian de Mariquita y Armero - Guayabal	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Tolima	**Empresas**	Grenergy
Municipio	Mariquita, Armero - Guayabal	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	27000
Cantidad paneles	23744	**Area Utilizada (Ha)**	-
Capacidad instalada	29.7 MWp	**Entrada en operación**	Febrero de 2023
Capacidad generacion año	69 GWh	**Impacto**	Cubrira la energia de 40000 familias ubicadas en Mariquita y Armero - Guayabal
Inversion (USD)	30 millones		

Tabla 17 Características parques solares Cerrito, La Medina y Los Caballeros. Elaboración propia. (Ministerio de Minas y Energia, 2023)

Parques Solar Las brisas			
		Este parque solar suministrara energia a todos los proyectos que tiene Ecopetrol en el departamento del Huila	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Huila	**Empresas**	Ecopetrol, AES Colombia
Municipio	Aipe	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	216000
Cantidad paneles	49000	**Area Utilizada (Ha)**	21
Capacidad instalada	26 MWp	**Entrada en operación**	Enero de 2023
Capacidad generacion año	69 GWh	**Impacto**	Cubrira la energia de los proyectos de Ecopetrol en el Huila
Inversion (USD)	30 millones		

Tabla 18 Características parque solar Las Brisas. Elaboración propia. (Ecopetrol, 2023)

- **Techos solares**

Los techos solares son aquellos que cuentan con algún elemento fotovoltaico, ya sean paneles solares, o cubiertas elaboradas a base de losetas o tejas fotovoltaicas (Alubuild, 2024). Dentro de la Región Central RAP-E diferentes industrias y entidades utilizan los techos solares como fuente primordial de energía para la ejecución de sus operaciones. En la Región Central RAP-E se destacan las siguientes:

Techos solares residenciales de Celsia en el departamento del Tolima			
		Son 73 viviendas ubicadas en los municipios como Melgar, Carmen de Apicalá, Flandes, Honda, Purificación, Lérida, Ortega e Ibagué.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Tolima	**Empresas**	Celsia
Municipio	Melgar, Carmen de Apicalá, Flandes, Honda, Purificación,	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	395
Cantidad paneles	De acuerdo al area del techo	**Area Utilizada (Ha)**	Sin informacion
Capacidad instalada	Sin informacion	**Entrada en operación**	2019-2023
Capacidad generacion año	785000 KWp	**Impacto**	Cubre el consumo energetico de 73 viviendas residenciales
Inversion (USD)	Sin informacion		

Tabla 19 Techos solares residenciales de Celsia en el departamento del Tolima. Elaboración propia. (Celsia, 2023)

Techos solares planta Racafe			
		Techo solar que suministra energia a la planta de café Racafe en Palermo - Huila cubriendo un 27% del consumo energetico	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Huila	**Empresa**	Celsia
Municipio	Palermo	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	62.6
Cantidad paneles	452	**Area Utilizada (Ha)**	Sin informacion
Capacidad instalada	Sin informacion	**Entrada en operación**	2018
Capacidad generacion año	170591 kWh/año	**Impacto**	Es equivalente a la siembra de 3470 arboles
Inversion (USD)	Sin informacion		

Tabla 20 Techos solares planta Racafe. Elaboración propia. (La Republica, 2018)

Techos solares aeropuerto El Dorado			
		Es la terminal aérea con la instalación fotovoltaica más grande de América Latina. Genera la energía anualmente equivalente a la consumida por 1.500 hogares. Evita emisiones de CO2 equivalentes al oxigeno emitido por 76.000 árboles maduros.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Bogota DC	**Empresa**	Celsia, Odinsa, El dorado
Municipio	Bogota DC	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	1375
Cantidad paneles	10369	**Area Utilizada (Ha)**	2.7
Capacidad instalada	2800 kWp	**Entrada en operación**	Mayo de 2019
Capacidad generacion año	3800000 kWh/Año	**Impacto**	Equivale al 12% del consumo del aeropuerto
Inversion (USD)	4 millones		

Tabla 21 Techos solares aeropuerto El Dorado. Elaboración propia. (Celsia, 2017)

Planta de comestibles Italo			
		Comestibles ITALO y CODENSA, Compañía del Grupo Enel en Colombia, desarrollaron el proyecto de energía solar más grande de Bogotá. El sistema fotovoltaico se compone de 1.080 paneles solares ubicados en el techo de la fábrica de ITALO y tendrá capacidad para generar 490 MWh de energía al año, equivalente al consumo mensual de 3.300 hogares.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Bogota DC	**Empresa**	Comestibles Italo SA, Codensa
Municipio	Bogota DC	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	5000
Cantidad paneles	1080	**Area Utilizada (Ha)**	0.25
Capacidad instalada	351 kWp	**Entrada en operación**	17 de abril de 2018
Capacidad generacion año	490 MWh	**Impacto**	Equivale al 13% del consumo de la planta
Inversion (USD)	300000		

Tabla 22. Proyecto fotovoltaico planta de comestibles Italo. (Enel, 2018)

Premium Outlet Arauco			
		Construcción de una planta fotovoltaica de 120 paneles solares que abastecen las zonas comunes del centro comercial en un 20% construidos sobre 2596 m^2 del techo de la edificación del centro comercial.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Cundinamarca	**Empresa**	Greenyellow
Municipio	Sopo	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	213
Cantidad paneles	120	**Area Utilizada (Ha)**	0.26
Capacidad instalada	54 kWp	**Entrada en operación**	Enero de 2022
Capacidad generacion año	60644 MWh	**Impacto**	Equivale al 20% del consumo del centro comercial
Inversion (USD)	Sin informacion		

Tabla 23 Instalación fotovoltaica Premium Outlet Arauco. Elaboración propia. (Greenyellow, 2022)

Centro comercial Paseo Villa del Rio.			
		El Centro Comercial Paseo Villa del Río, ubicado en Bogotá, ha puesto en marcha un gran proyecto de autogeneración solar donde el 24% de la energía utilizada en el centro comercial proviene de fuentes 100% limpias.	
CARACTERISTICAS			
Departamento	Bogota DC	**Empresa**	Greenyellow
Municipio	Bogota DC	**CO2 evitadas (Ton/Año)**	271
Cantidad paneles	658	**Area Utilizada (Ha)**	0.36
Capacidad instalada	382 kWp	**Entrada en operación**	Enero de 2022
Capacidad generacion año	583 MWh	**Impacto**	Equivale al 24% del consumo del centro comercial
Inversion (USD)	Sin informacion		

Tabla 24 Techo solar Centro Comercial Villa del Rio. Elaboración propia. (Greenyellow, 2022)

Proyectos Solares como Solución Energética

- **Proyectos FAZNI**

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas – IPSE es la entidad encargada del manejo de los fondos FAZNI que tienen como destinación la financiación de planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética en las zonas no interconectadas (ZNI) (IPSE, 2025).

En la Región Central se encuentran 36 proyectos FAZNI donde 72.22% de los proyectos de encuentran en el departamento del Meta vinculados con la generación de nuevos proyectos de energía solar fotovoltaicos y la ampliación de proyectos existentes que benefician a más de 2000 usuarios pertenecientes a los municipios de El Castillo, Puerto Gaitán, La Macarena, Mapiripan, Puerto Rico y Uribe (IPSE, 2025).

En Boyacá se encuentran 4 proyectos en el municipio de Puerto Boyacá destinados a la construcción e instalación de sistemas solares fotovoltaicos. Los departamentos de Huila, Tolima y Cundinamarca poseen cada uno de a 2 proyectos con el fin de implementar proyectos Fotovoltaicos en zonas no interconectadas en los municipios de Ubalá, Colombia, Oropapa e Ibagué. (IPSE, 2025).

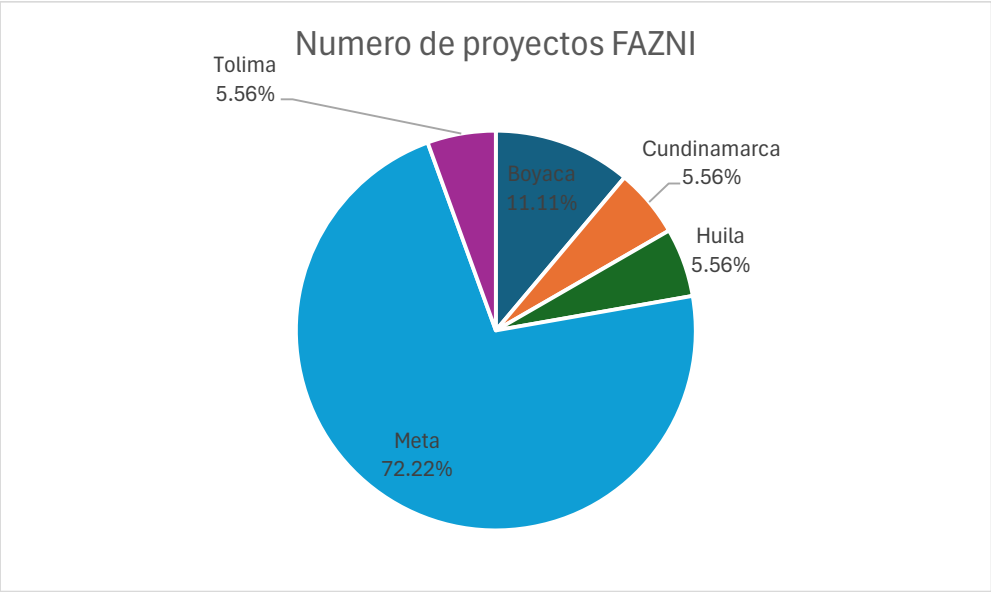


Ilustración 25 Distribución de proyectos FAZNI sobre la región Central. Elaboración propia. (IPSE, 2025)

- Financiamiento por parte FNA para mejoras en viviendas para soluciones solares

El Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y el Fondo Nacional del Ahorro han firmado un memorando de entendimiento que facilitará la financiación de mejoramiento de vivienda con soluciones de energía renovable, especialmente tecnologías fotovoltaicas donde se incluirá la posibilidad de financiar la

adquisición e instalación de paneles solares, contribuyendo al ahorro en costos de la energía y al desarrollo sostenible del país. (Ministerio de Minas y Energia, 2024)

¿Qué incluye este acuerdo?

1. Créditos para mejoramiento de vivienda: Los usuarios podrán financiar la adquisición e instalación de sistemas solares fotovoltaicos, con rango estimado de inversión de entre 10 y 20 millones de pesos. (Ministerio de Minas y Energia, 2024)

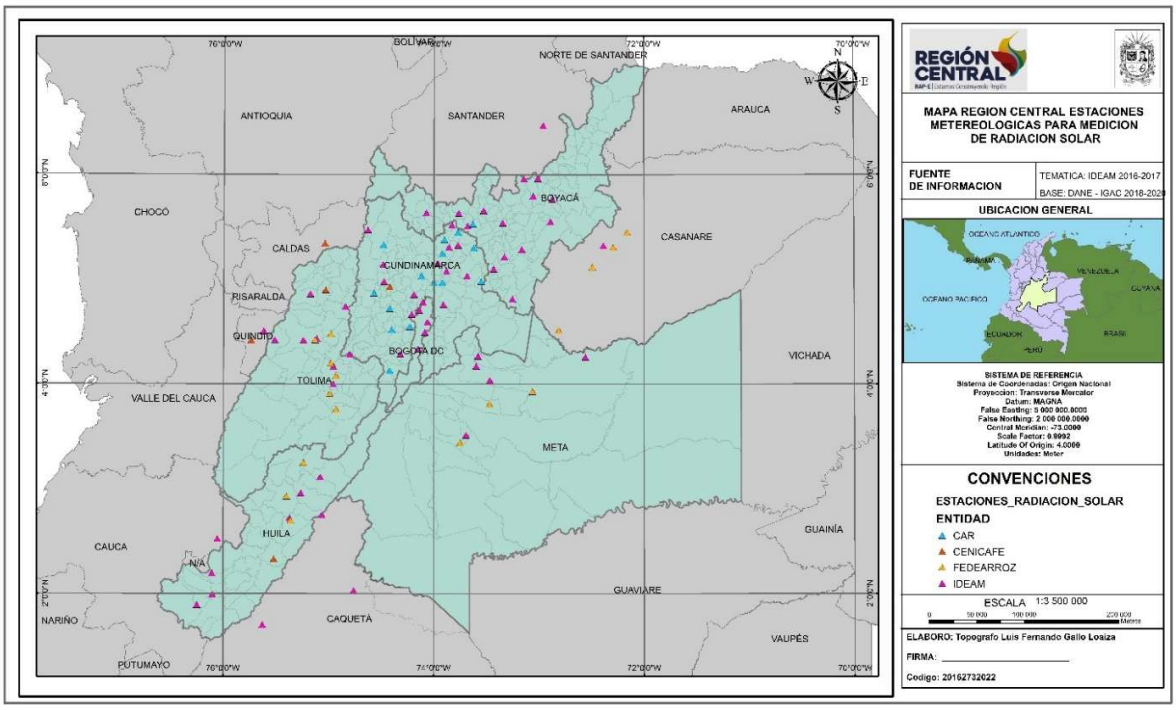
2. Población beneficiada: Se priorizará a los usuarios residenciales de estratos 1, 2 y 3. (Ministerio de Minas y Energia, 2024)

3. Condiciones de financiación: Los créditos pueden ser para afiliados con cesantías o con ahorros voluntarios, lo cual abre la posibilidad para todos los interesados. Las tasas de interés están diseñadas para ser más favorables para las familias con ingresos más bajos, comenzando con tasas desde el 10% efectivo anual para aquellos hogares con ingresos de hasta 2 Salarios Mínimos Legales Vigentes (SMLV). (Ministerio de Minas y Energia, 2024)

6. METODOLOGIA

6.1 POTENCIAL SOLAR FV EN LA REGIÓN CENTRAL

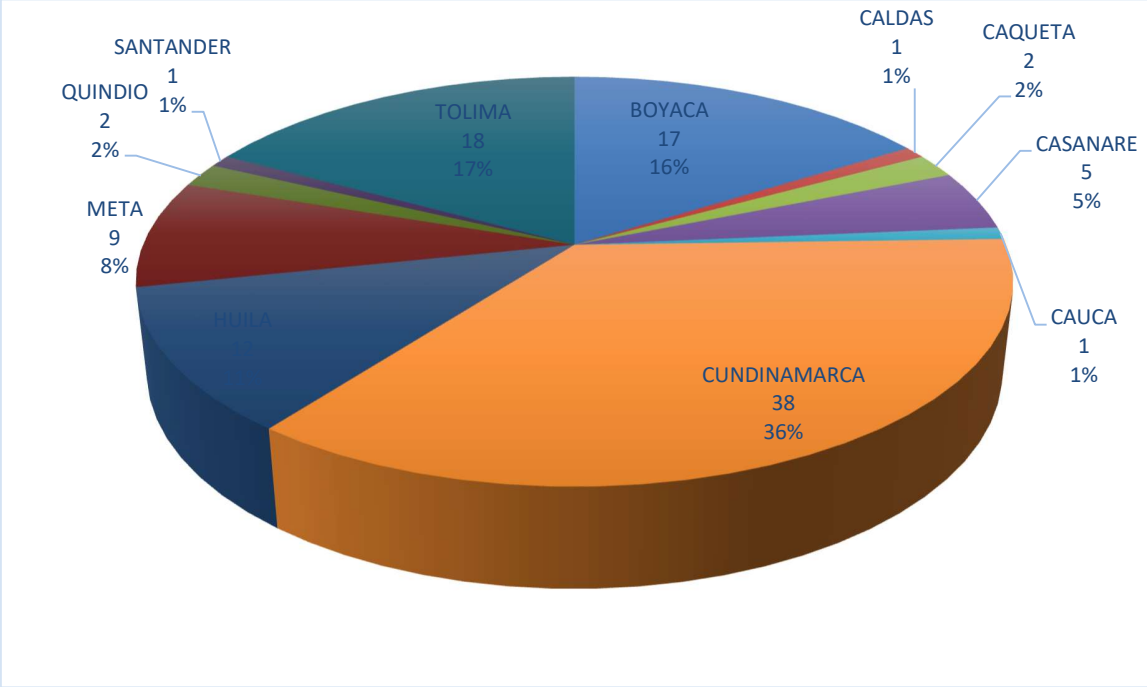
Con base en las mediciones hechas por el IDEAM y la UPME sobre radiación solar y brillo consignadas en el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia del año 2017 y modelados cartográficamente en formato Raster, se procedió a georreferenciar estos planos en sistema de coordenadas de Origen Nacional a través del software Arcmap con el fin de construir entidades de las capas de radiación y otros elementos hallados de tal manera que se puedan identificar las zonas con mayor potencial solar fotovoltaico en la región Central RAPE teniendo en cuenta los siguientes elementos:



Mapa 2 Mapa Estaciones meteorológicas para medición de radiación solar región Central RAPE. Elaboración propia. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La ubicación y distribución de las estaciones meteorológicas que capturan la información la radiación y brillo solar sobre la Región Central RAP-E tiene una enorme relevancia para

tener niveles de confiabilidad adecuados para la estimación del mayor potencial fotovoltaico en la zona. En el mapa 2 se evidencia las localizaciones de las estaciones meteorológicas dentro de la Región Central RAP-E y las entidades a cargo de cada una de ellas. Es importante resaltar que se han tenido en cuenta algunas estaciones que se encuentran fuera de la Región Central RAP-E debido a su proximidad al área de estudio y su influencia dentro de las mediciones de radiación solar dentro de la zona.

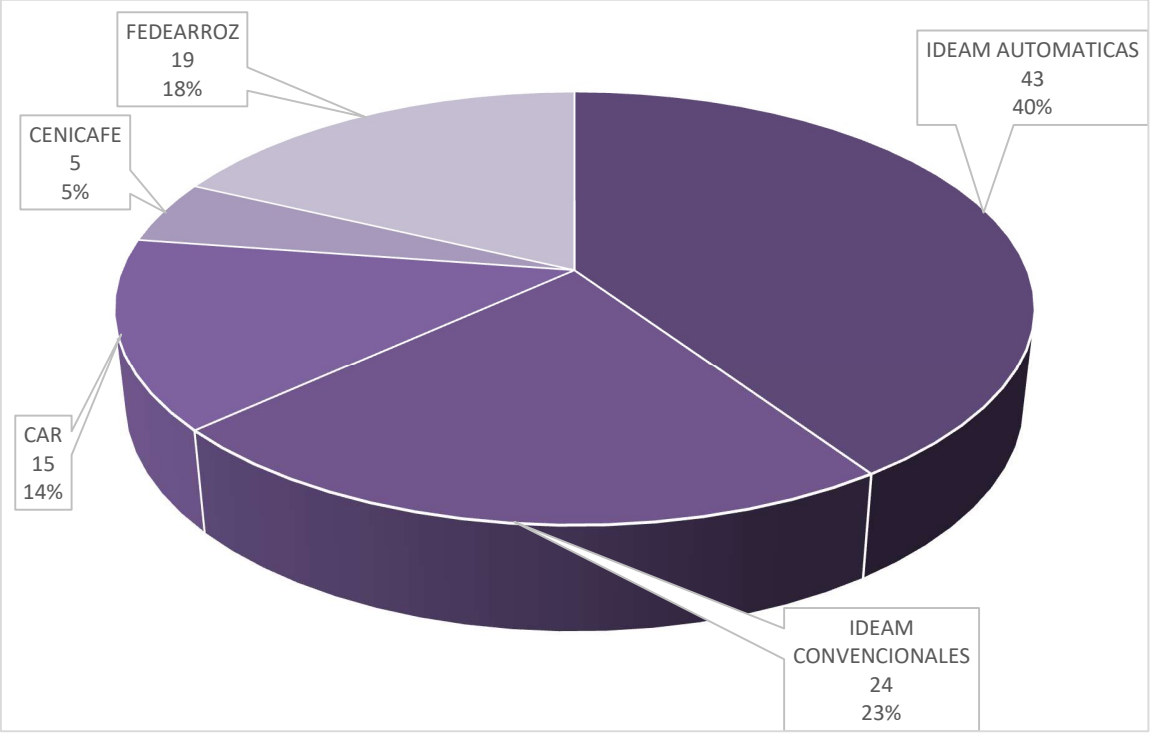


Grafica 10 Estaciones utilizadas por departamento. Elaboración propia.

La Región Central RAP-E cuenta con 106 estaciones donde Cundinamarca y Bogotá DC poseen en conjunto la mayor cantidad de estaciones con un valor de 38 estaciones. Esto se debe a que el IDEAM y la CAR cuentan con gran número de estaciones en esta zona asumiendo el 36% de estaciones que se encuentran en la Región Central RAP-E.

Los siguen los departamentos del Tolima y Boyacá con 17% y 16% respectivamente. El departamento del Huila posee 11% de las estaciones y finalmente el departamento del Meta posee 8% de las estaciones utilizadas. Se incluyo las estaciones perimetrales que se

encuentran en los departamentos de Cauca, Casanare, Caquetá, Caldas, Santander y Quindío porque a partir de la información de estas estaciones se pudo obtener los registros de radiación solar de las zonas limítrofes de la región RAP-E. Estas estaciones perimetrales suman conforman un 12% del total de estaciones utilizadas. Es importante mencionar que el sur y centro del Meta, el suroccidente del Tolima y el suroriente del Huila cuentan con poca o nula cantidad de estaciones meteorológicas (ver mapa 2).



Grafica 11 Estaciones por entidad. Elaboración propia.

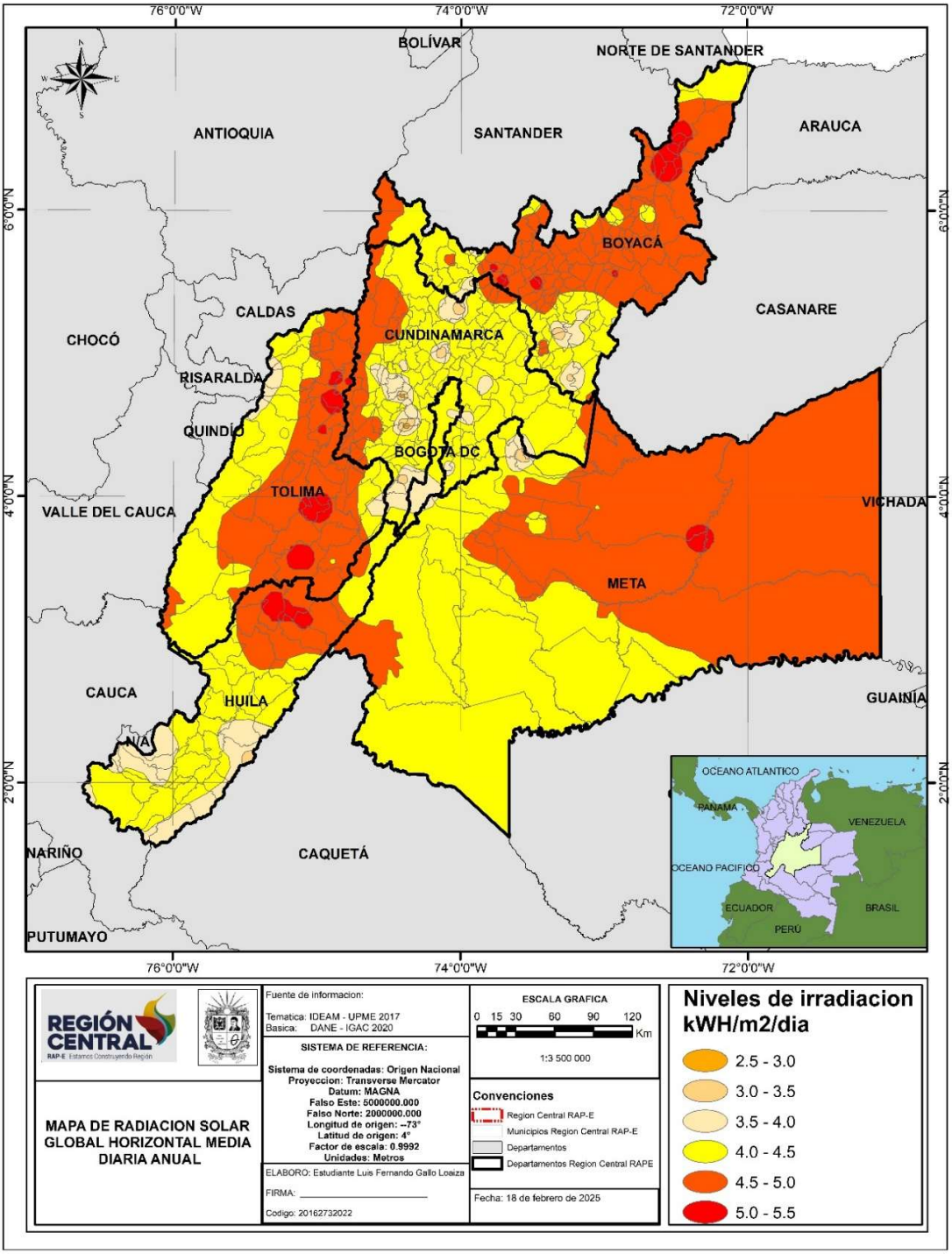
Teniendo en cuenta las estaciones que se encuentran dentro de la Región Central RAP-E y las estaciones perimetrales se evidencia que por entidades la mayor cantidad de sensores pertenecen al IDEAM con un 23% para sus estaciones convencionales y 40% para sus estaciones automáticas, lo sigue FEDEARROZ con un 18%, luego continua la CAR con 14% y finaliza CENICAFE con 5% como se observa en la gráfica 2.

SENSORES UTILIZADOS PARA LA MEDICION DE RADIACION SOLAR SOBRE LA REGION CENTRAL RAP-E						
DEPARTAMENTOS / ENTIDADES	IDEAM AUTOMATICAS	IDEAM CONVENCIONALES	CAR	CENICAFE	FEDEARROZ	ESTACIONES TOTALES
BOYACA	9	7	1		-	17
CALDAS	-	-	-	1	-	1
CAQUETA	2	-	-	-	-	2
CASANARE	1	-	-	-	4	5
CAUCA	1	-	-	-	-	1
CUNDINAMARCA	13	10	14	1	-	38
HUILA	5	3	-	1	3	12
META	4	2	-	-	3	9
QUINDIO	1	-	-	1	-	2
SANTANDER	1	-	-	-	-	1
TOLIMA	6	2	-	1	9	18
ESTACIONES TOTALES	43	24	15	5	19	106

Tabla 26 Sensores utilizados para la medición de radiación sobre la Región Central RAP-E. Elaboración propia.

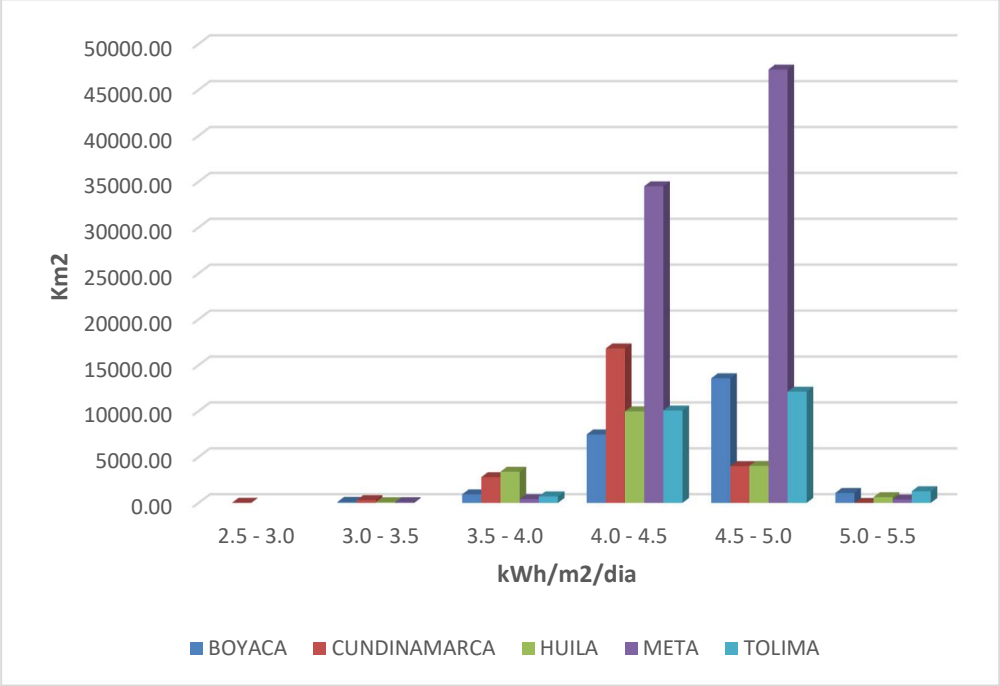
Las estaciones perimetrales a la Región Central RAP-E utilizadas para la determinación de la radiación solar se encuentran repartidas de la siguiente manera:

Por el Norte las estaciones más próximas a la Región Central se encuentran 2 estaciones, 1 estación del IDEAM Automática ubicada en Santander y otra en el departamento de Caldas de propiedad de CENICAFÉ. Por el límite oriental de la Región Central RAP-E se encuentran 5 estaciones en el departamento de Casanare, 1 estación automática del IDEAM y 4 de FEDEARROZ. Por el occidente se encuentran los dispositivos más próximos se encuentran en Quindío con una estación automática del IDEAM y otra estación correspondiente a CENICAFE y el departamento del Cauca con una estación automática del IDEAM. Al sur los dispositivos más próximos se localizan en el departamento del Caquetá con dos estaciones automáticas del IDEAM.



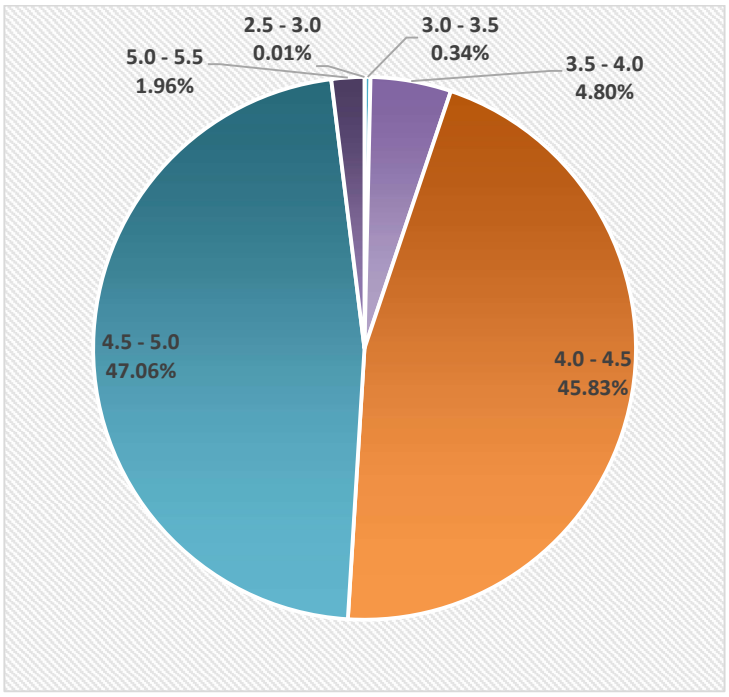
Mapa 3 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual región Central RAP-E. Elaboración propia. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017)

La radiación solar global emitida sobre una superficie es un recurso indispensable para definir el potencial solar FV aprovechable para la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos. Basados en este concepto se realizó la estimación de los niveles de radiación solar global horizontal recibida sobre el área de la Región Central RAP-E obteniendo los siguientes resultados por departamento:



Grafica 12 Distribución de áreas por departamento de radiación solar global horizontal región Central RAP-E. Elaboración propia.

Al desglosar la cantidad de radiación solar en porcentaje de área total de la Región Central RAP-E se evidencia que la región central se encuentra en la mayoría de su territorio en 2 niveles de HDMA correspondiente a 4.0 - 4.5 kWh/m2/día con un 45.83% y 4.5 – 5.0 kWh/m2/día con un 47.06% índices superiores al promedio mundial de 4.0 kWh/m2/día. Un 7.11% del territorio viene repartido entre los niveles 2.5 – 3.0, 3.0 – 3.5, 3.5 – 4.0 y 5.0 – 5.5 como se evidencia en la siguiente gráfica:



Grafica 13 Porcentaje de radiación por área de la región Central RAP-E. Elaboración propia.

De los rangos nacionales de radiación establecidos en el Atlas de Radiación Solar la superficie de la Región Central RAP-E posee 6 de estos rangos siendo el más inferior de estos de 2.5 a 3.0 kWh/m2/día hasta un máximo de 5.0 a 5.5 kWh/m2/día, ubicando a la Región Central en un rango intermedio en comparación con los niveles registrados a nivel nacional donde se pueden evidenciar máximos de 7.0 kWh/m2 en zonas del departamento de la Guajira y el registro mínimo es de 1.5 kWh/m2 en zonas de alta montaña en la región Andina y parte del Chocó.

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	3367.08	1.96%
Muy alto	4.5 - 5.0	80946.77	47.06%
Alto	4.0 - 4.5	78820.65	45.83%
Medio	3.5 - 4.0	8248.87	4.80%
Bajo	3.0 - 3.5	586.19	0.34%
Muy bajo	2.5 - 3.0	24.88	0.01%

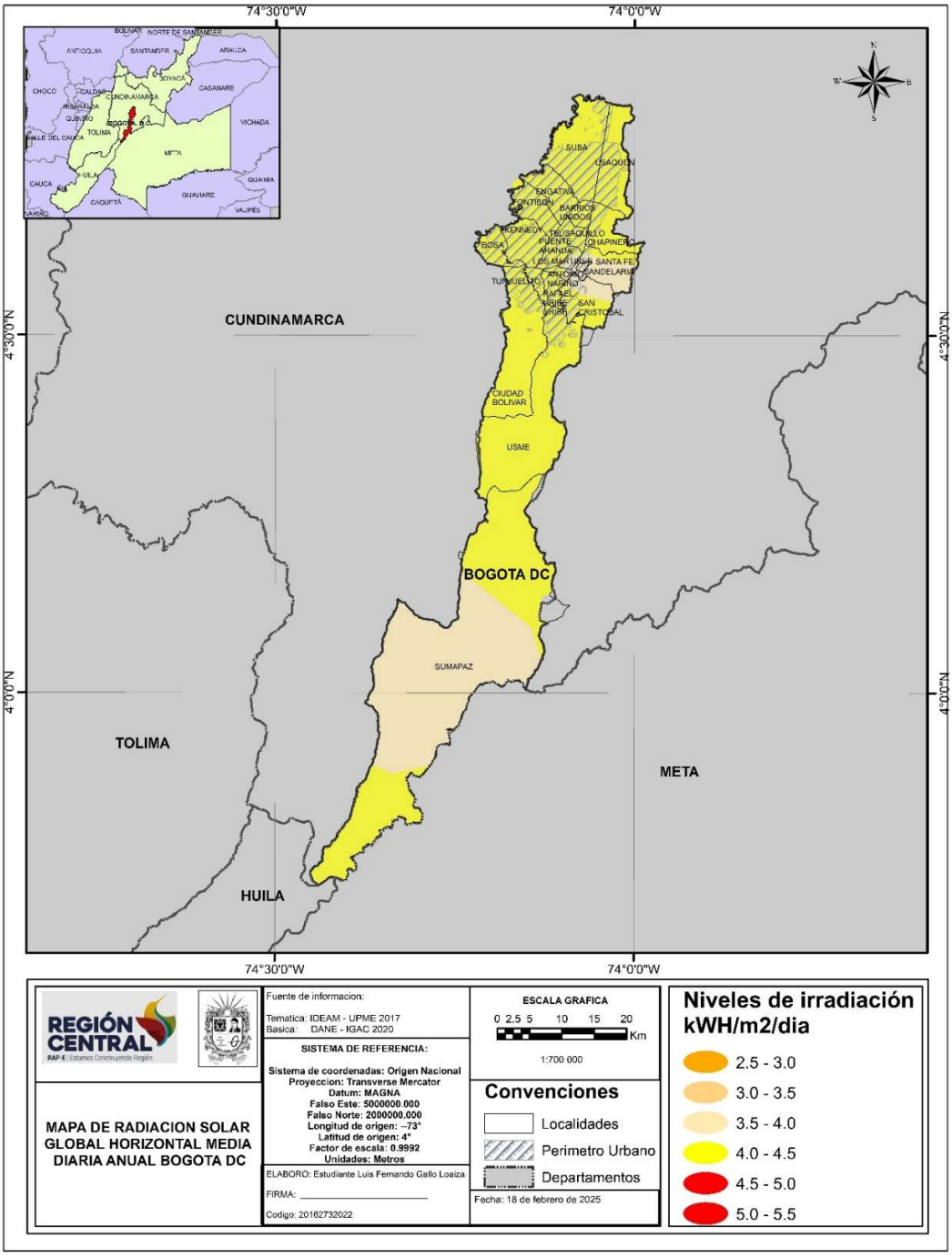
Tabla 27. Nivel de Radiación Solar HMDA que incide en la Superficie de la Región Central. Elaboración propia

En 1,96% del total de la superficie de la región central, incide un nivel máximo de radiación, en zonas de los departamentos de Tolima, Boyacá y Huila. Luego un 47.06% de la superficie recibe una radiación Muy Alta, donde el departamento del Meta aporta el 27.45% del área total de la región central en este nivel de radiación, lo siguen las áreas de los departamentos de Boyacá, Tolima, Huila finalizando con Cundinamarca. Con respecto al nivel alto de radiación se evidencia que el 45.83% del área total de la región central se encuentra inmersa, donde el 20.06% del área total en este nivel pertenece al Meta, seguidos por Cundinamarca con 9.79% de área. Lo siguen Tolima, Huila finalizando con el área de Boyacá. Ya en el rango Medio se evidencia que la mayor área en este nivel la constituye el departamento del Huila con 1.98% del área total de la región central. Para el nivel bajo se posee un 0.34% del área total de la región central y un 0.01% para el nivel muy bajo que se ubica en el departamento de Cundinamarca.

DISTRIBUCION PORCENTUAL POR DEPARTAMENTOS AREAS DE RADIACION SOLAR GLOBAL HORIZONTAL MEDIA DIARIA ANUAL REGION CENTRAL RAPE						
DEPARTAMENTOS / Kwh/m2/dia	2.5 - 3.0 MUY BAJO	3.0 - 3.5 BAJO	3.5 - 4.0 MEDIO	4.0 - 4.5 ALTO	4.5 - 5.0 MUY ALTO	5.0 - 5.5 MAXIMO
BOYACA	0.00%	0.07%	0.54%	4.34%	7.89%	0.63%
CUNDINAMARCA	0.01%	0.18%	1.63%	9.79%	2.33%	0.00%
HUILA	0.00%	0.05%	1.98%	5.80%	2.34%	0.37%
META	0.00%	0.05%	0.24%	20.06%	27.45%	0.21%
TOLIMA	0.00%	0.00%	0.41%	5.85%	7.05%	0.74%

Tabla 28 Distribución porcentual por departamentos áreas de radiación solar global horizontal media diaria anual región central RAP-E. Elaboración propia.

6.1.1 Bogotá DC



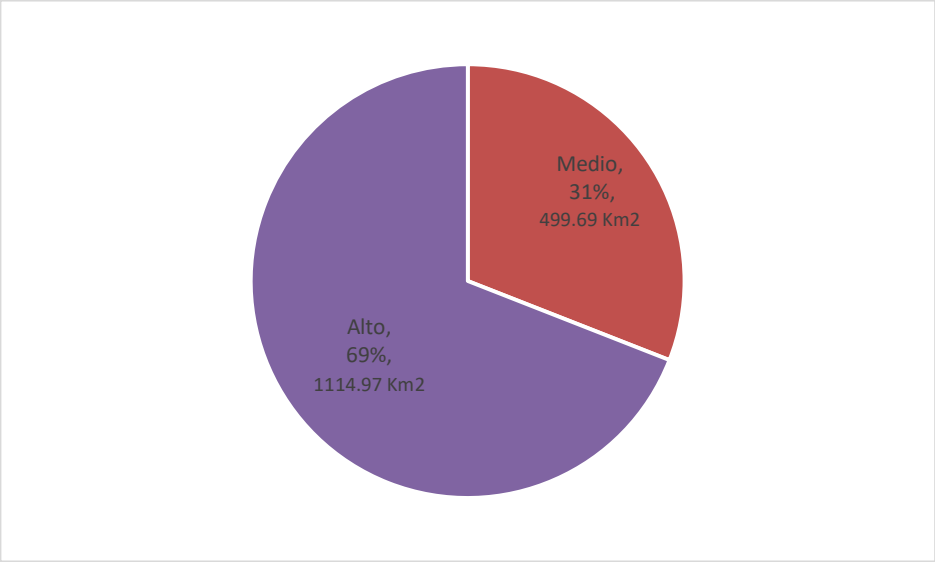
Mapa 4 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual Bogotá DC. Elaboración propia.

Con base en el anterior mapa (mapa 4) se calculó el área total y los índices de radiación de la ciudad de Bogotá DC obteniendo los siguientes resultados:

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2
Muy alto	4.5 - 5.0	499.69
Alto	4.0 - 4.5	1114.97

Tabla 29. Niveles y áreas de radiación Bogotá DC. Elaboración propia.

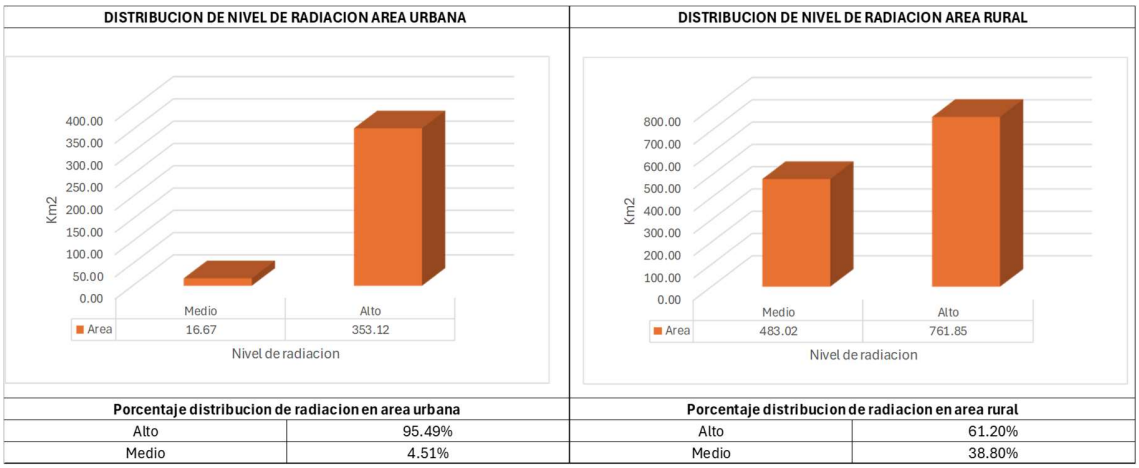
La ciudad de Bogotá D.C. presenta 2 rangos de radiación, donde el 69% del área total recibe una radiación solar alto. El 31% restante del área recibe un nivel medio de radiación como se muestra en la siguiente grafica. Las zonas donde se encuentra un nivel medio de radiación en Bogotá se encuentran en las localidades de la Candelaria y Santa Fe próximas a los cerros orientales y en el páramo del Sumapaz. El resto de área bogotana se encuentra en nivel de radiación alto correspondiente a las zonas planas de la capital.



Grafica 14 Proporción de radiación recibida sobre Bogotá DC. Elaboración propia.

Al revisar los niveles de radiación encontrados en el perímetro urbano de Bogotá de evidencia que esta zona cuenta con un área de 369.79 Km2 y posee 2 niveles de radiación donde el nivel alto conforma el 95.49% y el nivel medio cuenta con 4.51% del área urbana.

Para la zona rural de Bogotá que posee un área de 1244.87 Km2 se muestra que también presenta los mismos niveles de radiación que la zona urbana con un 61.20% de área en nivel alto y 38.80% de área en nivel medio como se indica en la siguiente gráfica:

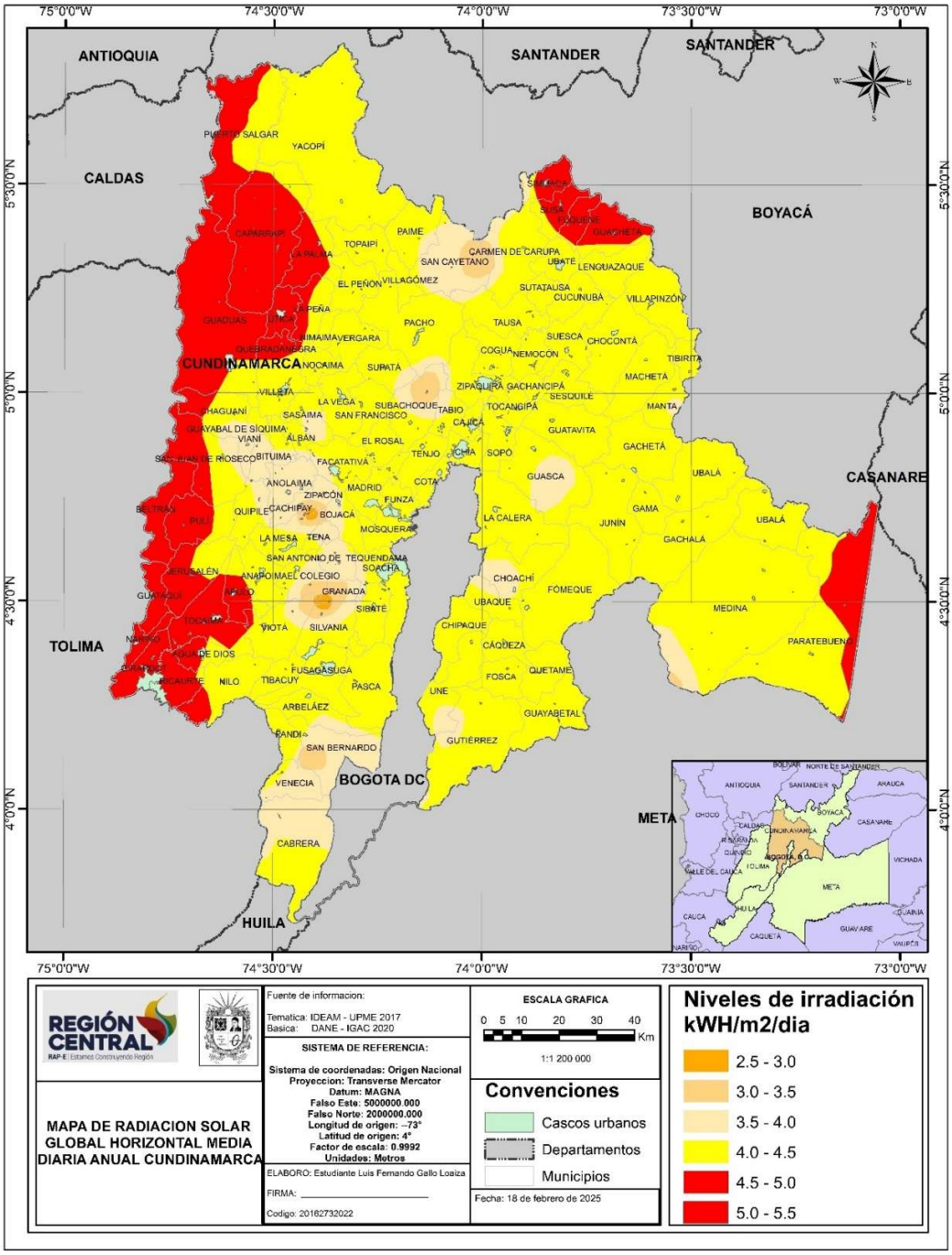


Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Alto	95.49%
Medio	4.51%

Porcentaje distribucion de radiacion en area rural	
Alto	61.20%
Medio	38.80%

Grafica 15 Distribución de nivel de radiación área urbana y rural de Bogotá DC. Elaboración propia.

6.1.2 Cundinamarca



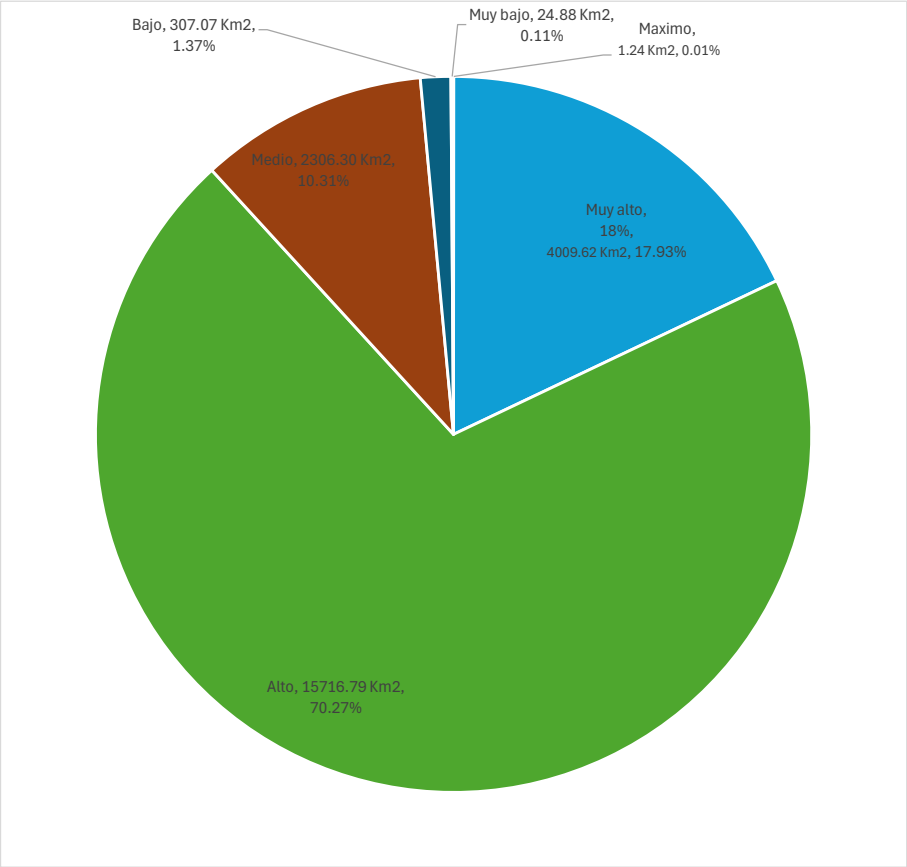
Mapa 5 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual Cundinamarca. Elaboración propia.

Con base en el anterior mapa (mapa 5) se calculó el área total y los índices de radiación del departamento de Cundinamarca obteniendo los siguientes resultados:

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	1.24	0.01%
Muy alto	4.5 - 5.0	4009.62	17.93%
Alto	4.0 - 4.5	15716.79	70.27%
Medio	3.5 - 4.0	2306.30	10.31%
Bajo	3.0 - 3.5	307.07	1.37%
Muy bajo	2.5 - 3.0	24.88	0.11%

Tabla 30. Niveles y áreas de radiación Cundinamarca. Elaboración propia.

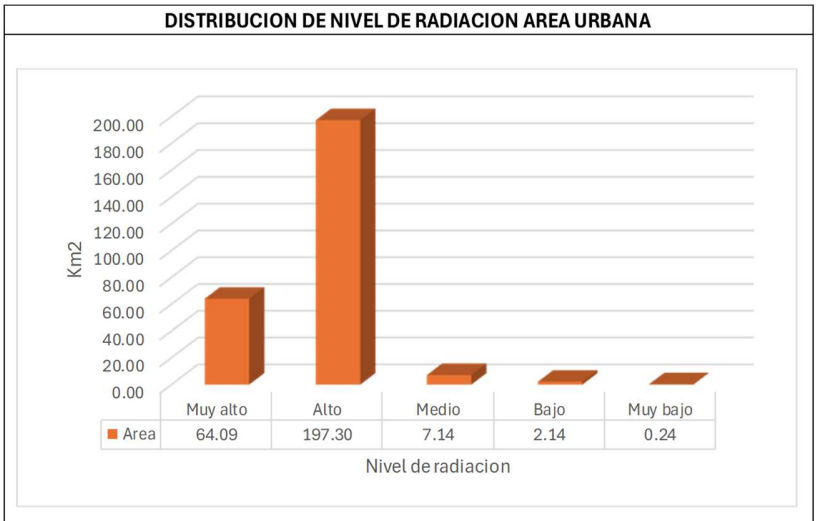
El departamento de Cundinamarca presenta 6 rangos de radiación, donde el 70.27% del área total recibe una radiación solar alto. El 17.93% corresponde a un nivel muy alto de radiación, continua el nivel medio con un 10.31%, finalizan los índices de radiación el nivel bajo con 1.37%, muy bajo con 0.11% y máximo con 0.01%. El centro, sur y norte del departamento se encuentra dentro del nivel alto; la zona occidental colindante con el Tolima y Caldas, parte de la zona norte colindante con Boyacá y la zona oriental colindante con el Meta se encuentran en rango muy alto. Parte del área rural de los municipios de Albán, Anapoima, Anolaima, Arbeláez, Bituima, Bojacá, Cabrera, Cachipay, Carmen De Carupa, Chaguaní, Choachí, El Colegio, Facatativá, Granada, Guasca, Guayabal De Síquima, Gutiérrez, La Calera, La Mesa, La Vega, Manta, Medina, Pacho, Paime, Pandi, Pasca, Quipile, San Antonio De Tequendama, San Bernardo, San Cayetano, San Juan De Rioseco, Sasaima, Sibaté, Silvania, Simijaca, Soacha, Subachoque, Supatá, Tabio, Tausa, Tena, Ubaque, Une, Venecia, Vianí, Viotá, Zipacón, Zipaquirá reciben sobre su superficie los niveles medio y bajo de radiación, estas zonas se caracterizan por tener una topografía montañosa. El nivel muy bajo de radiación se encuentra en pequeñas áreas de los municipios de Bojacá, El Colegio, Granada, La Mesa, Silvania, Viotá y Zipacón mientras que el nivel máximo de radiación se encuentra en zona rural de los municipios de Fuquene y Susa colindantes con el departamento de Boyacá.



Grafica 16 Proporción de radiación recibida sobre Cundinamarca. Elaboración propia.

Al revisar los niveles de radiación encontrados en los cascos urbanos de Cundinamarca se evidencia que esta zona cuenta con un área de 270.90 Km2 superior al 70% del área del perímetro urbano de Bogotá DC. Los cascos urbanos cundinamarqueses poseen 5 niveles de radiación desde el nivel muy bajo hasta el nivel muy alto donde el nivel alto se encuentra en el 72.83% de los cascos urbanos, seguido por el nivel muy alto con un 23.66%. El restante 3.5 % se encuentran con niveles de radiación muy bajo, bajo y medio. El casco urbano del municipio de Soacha es el de mayor área del departamento con un área total de

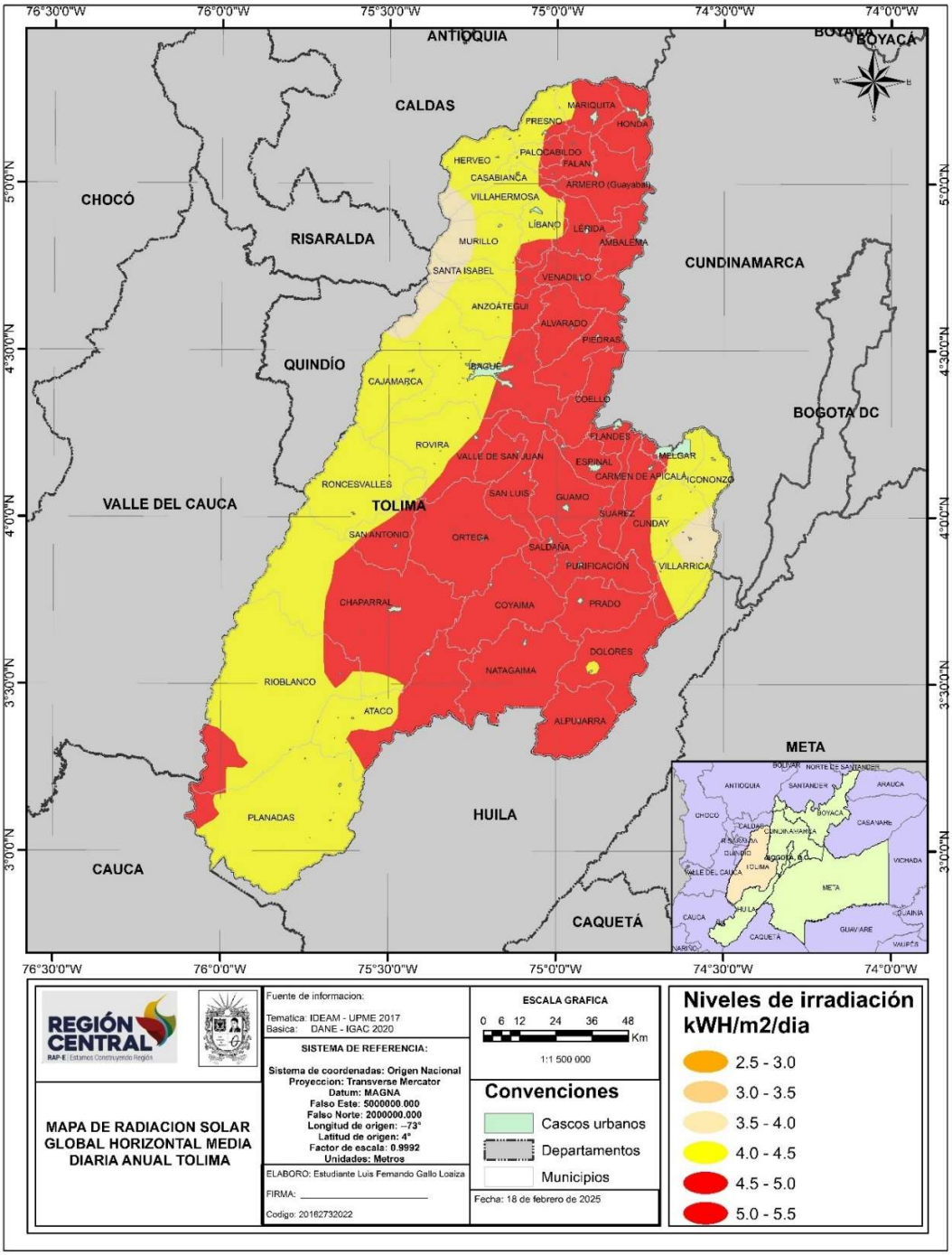
sus zonas urbanas de 27.02 Km2 ubicado en una zona de radiación de nivel alto y en el nivel muy alto con 20.41 Km2 se encuentra Girardot con la mayor extensión en zona urbana.



Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Muy alto	23.66%
Alto	72.83%
Medio	2.64%
Bajo	0.79%
Muy bajo	0.09%

Grafica 17 Distribución de nivel de radiación área urbana de Cundinamarca. Elaboración propia.

6.1.3 Tolima



Mapa 6 Mapa de radiación solar global media diaria anual Tolima. Elaboración propia.

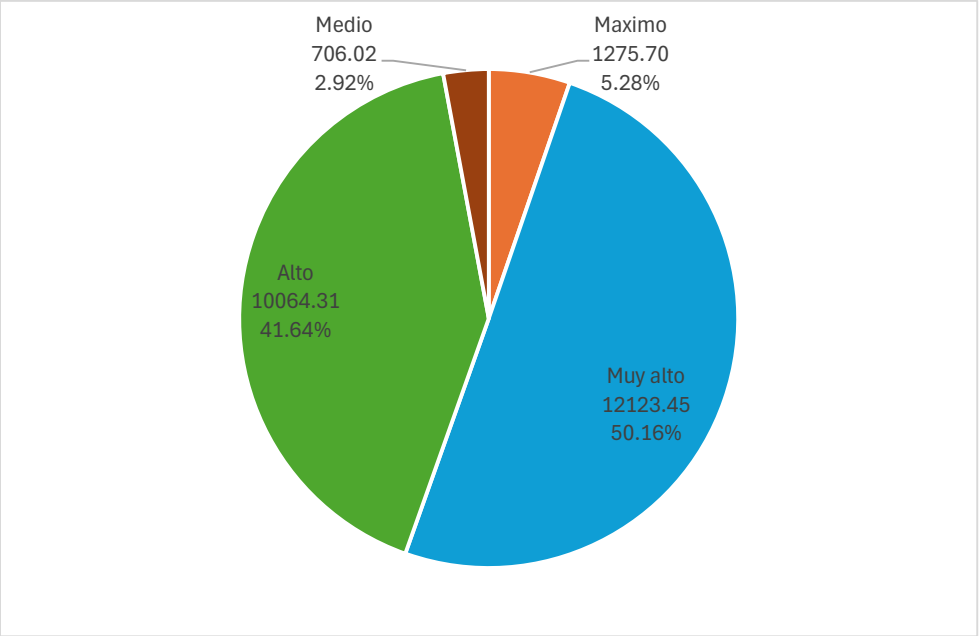
Con base en el anterior mapa (mapa 6) se calculó el área total y los índices de radiación del departamento del Tolima obteniendo los siguientes resultados:

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	1275.70	5.28%
Muy alto	4.5 - 5.0	12123.45	50.16%
Alto	4.0 - 4.5	10064.31	41.64%
Medio	3.5 - 4.0	706.02	2.92%

Tabla 31. Niveles y áreas de radiación del Tolima. Elaboración propia.

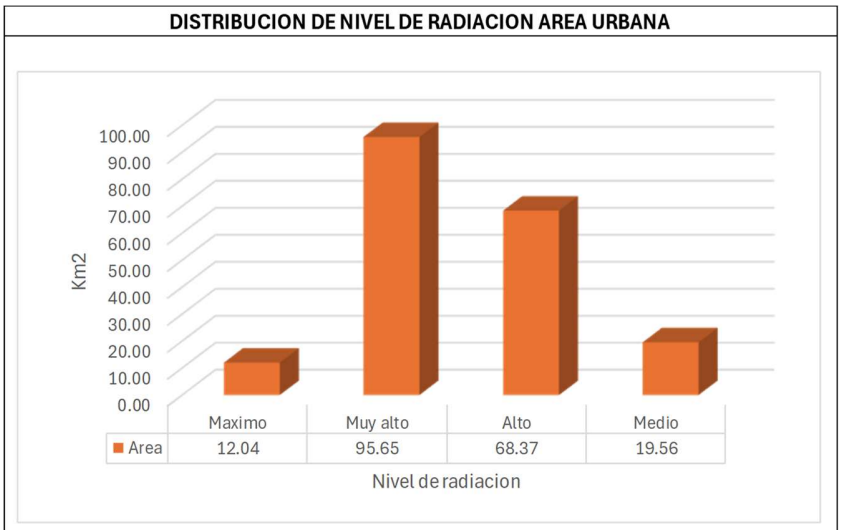
El departamento de Tolima presenta 4 rangos de radiación, donde el 50.16% del área total recibe una radiación solar muy alto. Esta zona se encuentra en el área central del departamento atravesándolo de norte a sur y en la zona suroccidental colindando con los departamentos del Cauca y Valle del Cauca. En esta área se encuentran inmersas áreas pertenecientes a los municipios de Alpujarra, Alvarado, Ambalema, Anzoátegui, Armero (Guayabal), Ataco, Carmen De Apicalá, Casabianca, Chaparral, Coello, Coyaima, Cunday, Dolores, Espinal, Falan, Flandes, Fresno, Guamo, Honda, Ibagué, Lérida, Líbano, Mariquita, Melgar, Murillo, Natagaima, Ortega, Palocabildo, Piedras, Planadas, Prado, Purificación, Rioblanco, Rovira, Saldaña, San Antonio, San Luis, Santa Isabel, Suárez, Valle De San Juan, Venadillo, Villahermosa, Villarrica, Flandes, Melgar. El 41.64% corresponde a un nivel alto de radiación donde su zona de influencia se encuentra en el occidente y parte oriental del departamento encontrándose sobre los municipios de Anzoátegui, Ataco, Cajamarca, Carmen De Apicalá, Casabianca, Chaparral, Cunday, Dolores, Falan, Fresno, Herveo, Ibagué, Icononzo, Lérida, Líbano, Mariquita, Melgar, Murillo, Palocabildo, Planadas, Rioblanco, Roncesvalles, Rovira, San Antonio, Santa Isabel, Villahermosa, Villarrica, Ibagué, Flandes, Melgar. El nivel máximo cuenta con un 5.28% del territorio tolimense ubicándose en los municipios de Alvarado, Ambalema, Coyaima, Guamo, Lérida, Natagaima, Ortega, Piedras, Purificación, Saldaña, San Luis, Venadillo. Finalmente, con un 2.92% de territorio se encuentra el nivel medio de radiación ubicado principalmente en los

municipios de Anzoátegui, Cajamarca, Casabianca, Cunday, Herveo, Ibagué, Icononzo, Murillo, Santa Isabel, Villahermosa, Villarrica.



Grafica 18 Proporción de radiación recibida sobre el departamento del Tolima. Elaboración propia.

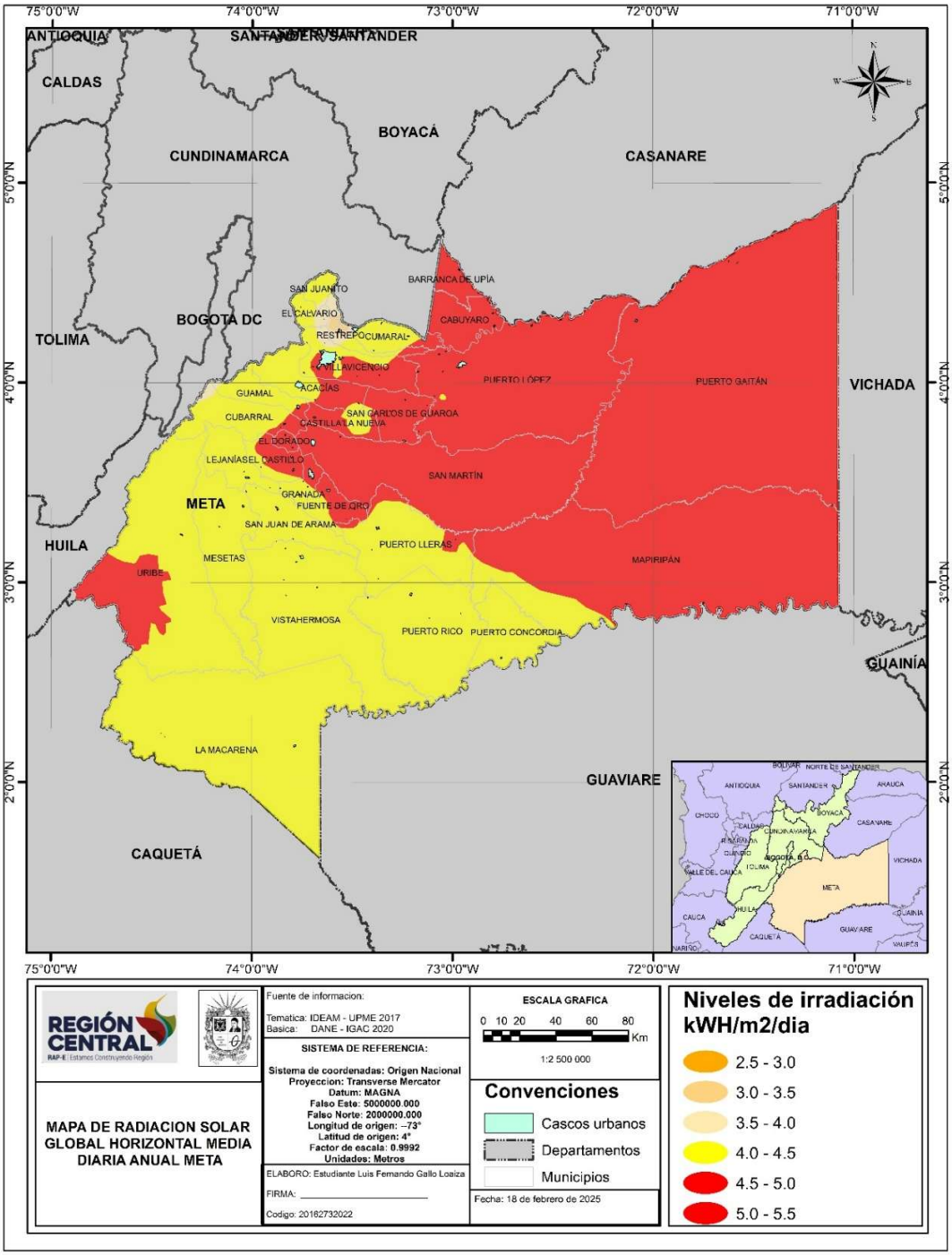
Al revisar los niveles de radiación encontrados en los cascos urbanos del Tolima se evidencia que esta zona cuenta con un área de 195.61 Km2. Los cascos urbanos del Tolima poseen 4 niveles de radiación desde el nivel medio hasta el nivel máximo. El nivel predominante en los cascos urbanos corresponde al nivel muy alto con 95.65 km2 donde las ciudades con la mayor área son Ibagué y Melgar con 13.58 Km2 y 12.37 Km2 respectivamente. El siguiente nivel de radiación encontrado en las zonas urbanas corresponde al nivel alto localizado en 68.37 Km2 con 31.56 Km2 para la ciudad de Ibagué y 22.80 Km2 para el municipio de Melgar. El tercer nivel de radiación en el área del Tolima corresponde al nivel medio donde el 10.00% del área de los cascos urbanos y finalmente se encuentra el nivel máximo con un 6.15% del área urbana.



Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Maximo	6.15%
Muy alto	48.90%
Alto	34.95%
Medio	10.00%

Grafica 19 Porcentaje de distribución de radiación en área urbana del Tolima. Elaboración propia.

6.1.4 Meta



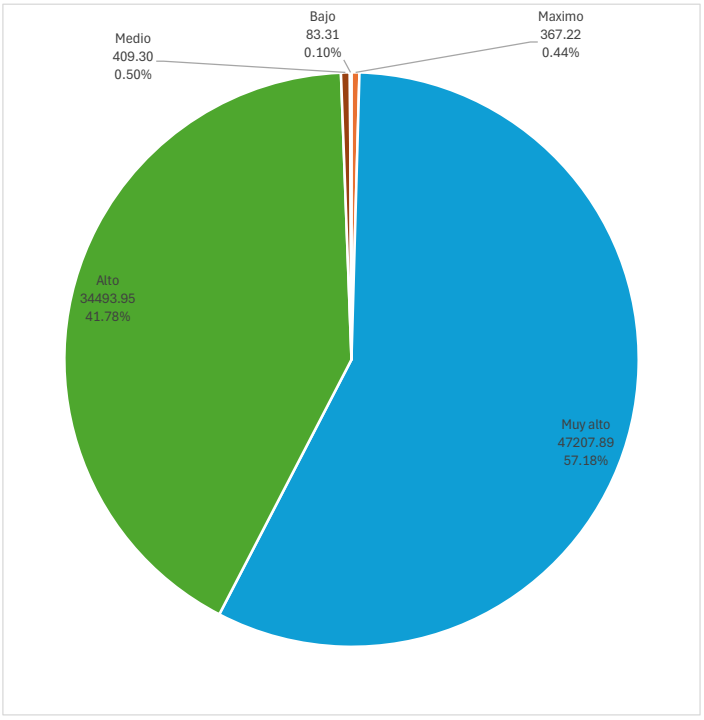
Mapa 7 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual Meta. Elaboración propia.

Con base en el anterior mapa (mapa 7) se calculó el área total y los índices de radiación del departamento del Meta obteniendo los siguientes resultados:

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	367.22	0.44%
Muy alto	4.5 - 5.0	47207.89	57.18%
Alto	4.0 - 4.5	34493.95	41.78%
Medio	3.5 - 4.0	409.30	0.50%
Bajo	3.0 - 3.5	83.31	0.10%

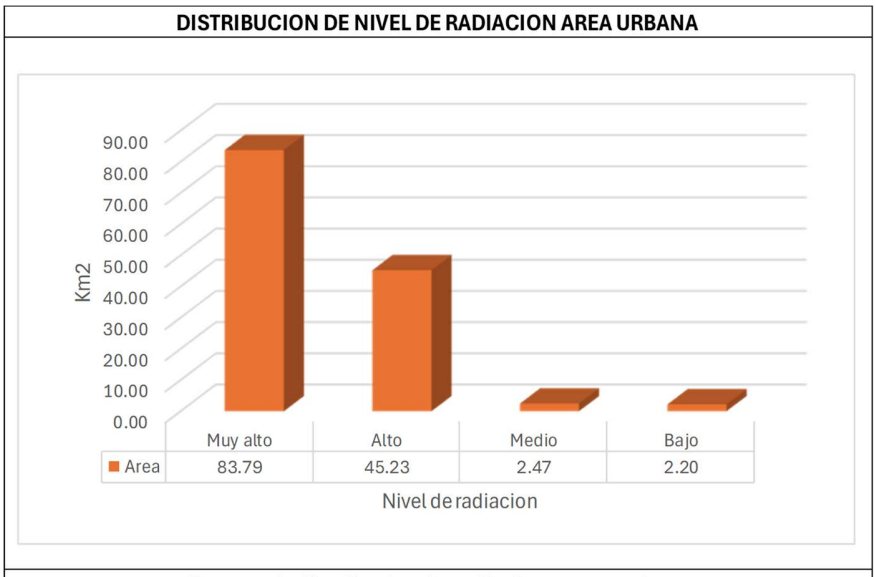
Tabla 32. Niveles y áreas de radiación del Meta. Elaboración propia.

El departamento del Meta presenta 5 rangos de radiación, donde el 57.18% del área total recibe una radiación solar muy alto. Esta zona se encuentra en el centro y oriente del departamento con una zona más reducida en la occidental colindante con el departamento del Caquetá. En esta área se encuentran inmersas áreas pertenecientes a los municipios de Acacías, Barranca De Upía, Cabuyaro, Castilla La Nueva, Cubarral, Cumaral, El Castillo, El Dorado, Fuente De Oro, Granada, Guamal, Mapiripán, Puerto Gaitán, Puerto Lleras, Puerto López, Restrepo, San Carlos De Guaroa, San Martín, Uribe, Villavicencio, Puerto Lleras, San Martín, Uribe. El 41.78% corresponde a un nivel alto de radiación donde su zona de influencia se encuentra en el occidente del departamento encontrándose sobre los municipios de Acacías, Cabuyaro, Castilla La Nueva, Cubarral, Cumaral, El Calvario, El Castillo, Fuente De Oro, Granada, Guamal, La Macarena, Lejanías, Mapiripán, Mesetas, Puerto Concordia, Puerto Lleras, Puerto López, Puerto Rico, Restrepo, San Carlos De Guaroa, San Juan De Arama, San Juanito, San Martín, Uribe, Villavicencio, Vistahermosa, Puerto Lleras, San Martín, Uribe. Y un área inferior al 2% es repartida entre los niveles máximo, medio y bajo respectivamente.



Grafica 20 Proporción de radiación recibida sobre el departamento del Meta. Elaboración propia.

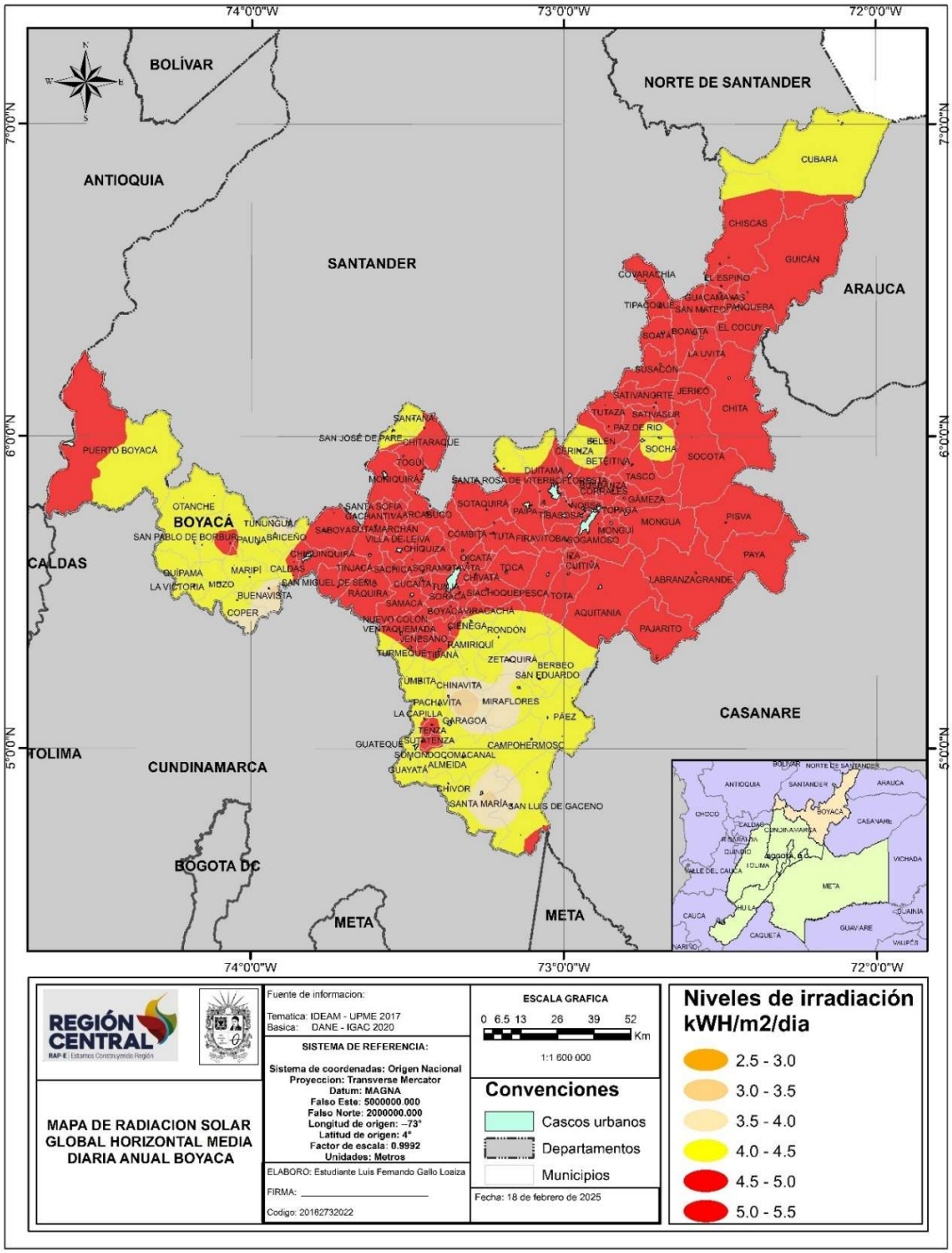
Al revisar los niveles de radiación encontrados en los cascos urbanos del Meta se evidencia que esta zona cuenta con un área de 133.69 Km2. Los cascos urbanos del Meta poseen 4 niveles de radiación desde el nivel bajo hasta el nivel muy alto. El nivel predominante en los cascos urbanos corresponde al nivel muy alto con 83.79 km2 donde la ciudad con la mayor área es Villavicencio con 42.13 Km2. El siguiente nivel de radiación encontrado en las zonas urbanas corresponde al nivel alto localizado en 45.23 Km2 donde las ciudades con mayor extensión en este nivel son Villavicencio con 17.21 Km2 y 11.12 Km2 para el municipio de Acacias. El restante 3.5% del área urbana se encuentra repartido en los niveles medio y bajo.



Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Maximo	62.68%
Muy alto	33.83%
Alto	1.85%
Medio	1.65%

Grafica 21 Porcentaje de distribución de radiación en área urbana del Meta. Elaboración propia.

6.1.5 Boyacá



Mapa 8 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual Boyacá. Elaboración propia.

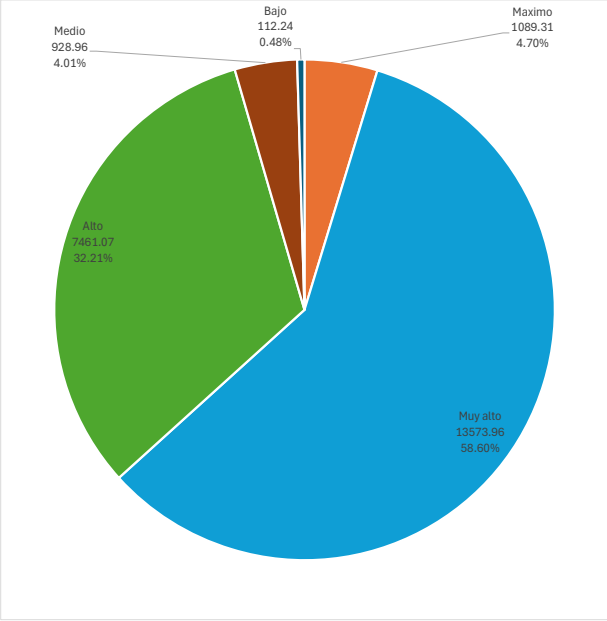
Con base en el anterior mapa (mapa 7) se calculó el área total y los índices de radiación del departamento del Meta obteniendo los siguientes resultados:

NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	1089.31	4.70%
Muy alto	4.5 - 5.0	13573.96	58.60%
Alto	4.0 - 4.5	7461.07	32.21%
Medio	3.5 - 4.0	928.96	4.01%
Bajo	3.0 - 3.5	112.24	0.48%

Grafica 22 Niveles y áreas de radiación del Boyacá. Elaboración propia.

El departamento de Boyacá presenta 5 rangos de radiación, donde el 58.60% del área total recibe una radiación solar muy alto. Esta zona se encuentra en el centro y oriente del departamento con una zona más reducida en la occidental colindante con el departamento de Antioquia. En esta área se encuentran inmersas áreas pertenecientes a los municipios de Aquitania, Arcabuco, Belén, Betéitiva, Boavita, Boyacá, Briceño, Busbanzá, Caldas, Cerinza, Chiquinquirá, Chíquiza, Chiscas, Chita, Chitaraque, Chivatá, Ciénega, Cómbita, Corrales, Covarachía, Cubará, Cucaita, Cuítiva, Duitama, El Cocuy, Firavitoba, Floresta, Gachantivá, Gámeza, Guicán, Iza, Jenesano, Jericó, La Uvita, Labranzagrande, Mongua, Monguí, Moniquirá, Motavita, Nobsa, Nuevo Colón, Oicatá, Paipa, Pajarito, Panqueba, Paya, Paz De Rio, Pesca, Pisva, Puerto Boyacá, Ramiriquí, Ráquira, Rondón, Saboyá, Sáchica, Samacá, San José De Pare, San Luis De Gaceno, San Mateo, San Miguel De Sema, Santa Rosa De Viterbo, Santa Sofía, Santana, Sativanorte, Sativasur, Siachoque, Soatá, Socha, Socotá, Sogamoso, Sora, Soracá, Sotaquirá, Susacón, Sutamarchán, Tasco, Tibaná, Tibasosa, Tinjacá, Tipacoque, Toca, Togüí, Tópaga, Tota, Tunja, Turmequé, Tuta, Tutazá, Úmbita, Ventaquemada, Villa De Leiva, Viracachá, Aquitania, Cerinza, Garagoa, Guateque, La Capilla, Maripí, Pauna, San Luis De Gaceno, San Pablo De Borbur, Somondoco, Sutatenza, Tenza. El 32.21% corresponde a un nivel alto de radiación donde su zona de influencia se encuentra en el sur, occidente y partes del norte del departamento encontrándose sobre los municipios de Almeida, Aquitania, Belén, Berbeo, Betéitiva, Briceño, Buenavista, Caldas, Campohermoso, Cerinza, Chinavita, Chiquinquirá, Chiscas,

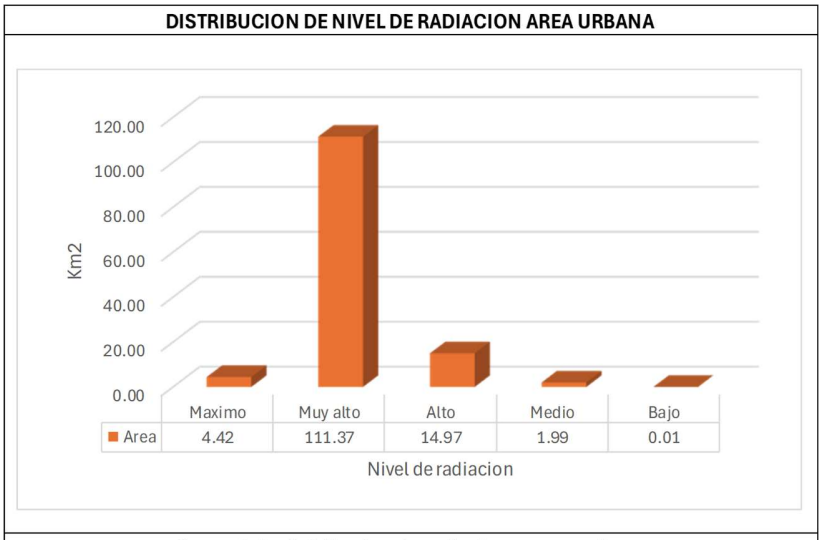
Chitaraque, Chivor, Ciénega, Coper, Cubará, Duitama, Floresta, Garagoa, Guateque, Guayatá, Jenesano, La Capilla, La Victoria, Macanal, Maripí, Miraflores, Moniquirá, Muzo, Nuevo Colón, Otanche, Pachavita, Páez, Paipa, Pauna, Paz De Rio, Pesca, Puerto Boyacá, Quípama, Ramiriquí, Rondón, Saboyá, San Eduardo, San José De Pare, San Luis De Gaceno, San Pablo De Borbur, Santa María, Santa Rosa De Viterbo, Santana, Sativasur, Siachoque, Socha, Socotá, Somondoco, Sutatenza, Tasco, Tenza, Tibaná, Tota, Tununguá, Turmequé, Úmbita, Ventaquemada, Viracachá, Zetaquirá, Aquitania, Cerinza, Garagoa, Guateque, La Capilla, Maripí, Pauna, San Luis De Gaceno, San Pablo De Borbur, Somondoco, Sutatenza, Tenza. Y un área inferior al 9% es repartida entre los niveles máximo, medio y bajo respectivamente.



Grafica 23 Proporción de radiación recibida sobre el departamento de Boyacá. Elaboración propia

Al revisar los niveles de radiación encontrados en los cascos urbanos de Boyacá se evidencia que esta zona cuenta con un área de 128.34 Km2. Los cascos urbanos de Boyacá poseen 5 niveles de radiación desde el nivel bajo hasta el nivel máximo.

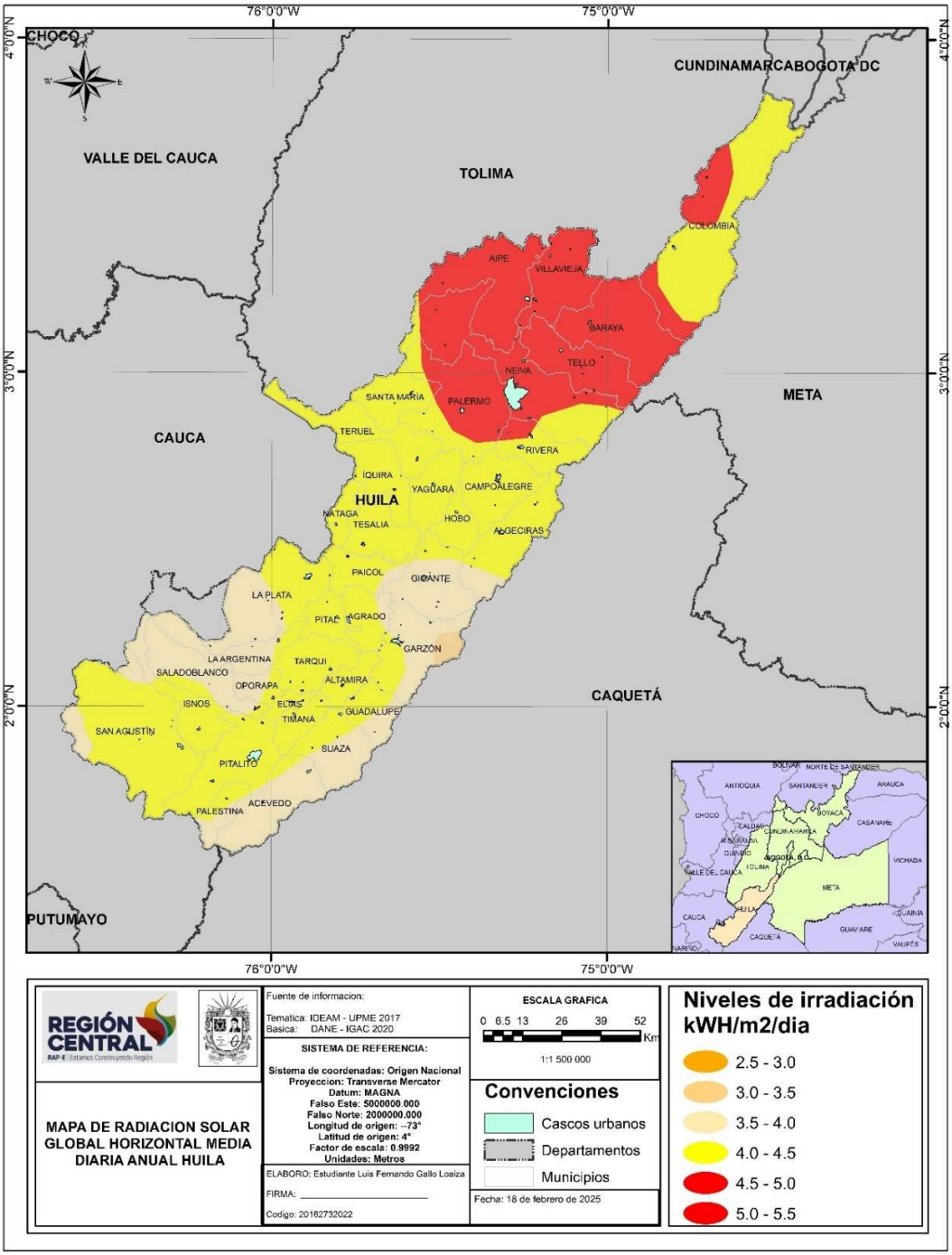
El nivel predominante en los cascos urbanos corresponde al nivel muy alto con 111.37 km2 donde las ciudades con mayor área son Tunja con 21.48 Km2, Sogamoso con 20.55 Km 2 y Duitama con 13.72 Km2 El siguiente nivel de radiación encontrado en las zonas urbanas corresponde al nivel alto localizado en 14.97 Km2. El restante 1.6 % del área urbana se encuentra repartido en los niveles máximo, medio y bajo.



Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Maximo	0.02%
Muy alto	86.77%
Alto	11.67%
Medio	1.55%
Bajo	0.01%

Grafica 24 Porcentaje de distribución de radiación en área urbana de Boyacá. Elaboración propia.

6.1.6 Huila



Mapa 9 Mapa de radiación solar global horizontal media diaria anual Huila. Elaboración propia.

Con base en el anterior mapa (mapa 8) se calculó el área total y los índices de radiación del departamento del Meta obteniendo los siguientes resultados:

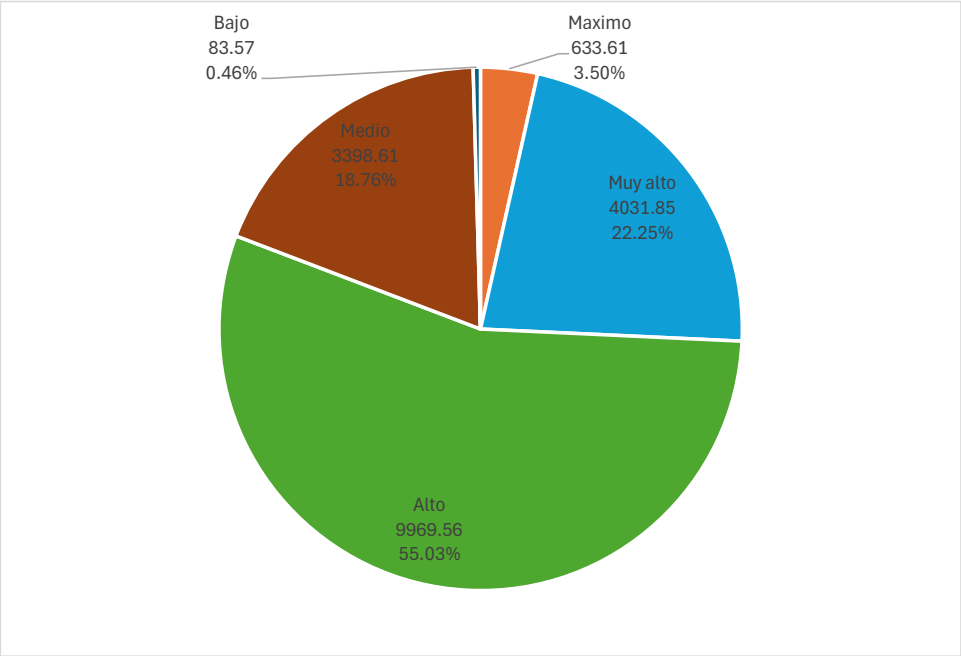
NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE ÁREA
Máximo	5.0 - 5.5	633.61	3.50%
Muy alto	4.5 - 5.0	4031.85	22.25%
Alto	4.0 - 4.5	9969.56	55.03%
Medio	3.5 - 4.0	3398.61	18.76%
Bajo	3.0 - 3.5	83.57	0.46%

Grafica 25 Niveles y áreas de radiación del Huila. Elaboración propia.

El departamento de Huila presenta 5 rangos de radiación, donde el 55.03% del área total recibe una radiación solar alto. Esta zona se encuentra en el centro y sur del departamento con una zona más reducida al norte colindante con el departamento de Meta. En esta área se encuentran inmersas áreas pertenecientes a los municipios de Palestina, Acevedo, Pitalito, Suaza, Timaná, Elías, Guadalupe, Oporapa, Altamira, San Agustín, Tarqui, Saladoblanco, Isnos, La Argentina, Garzón, Pital, Agrado, Paicol, La Plata, Gigante, Tesalia, Hobo, Nátaga, Algeciras, Yaguará, Campoalegre, Íquira, Rivera, Teruel, Santa María, Palermo, Neiva, Aipe y Colombia.

El 22.25% corresponde al nivel muy alto de radiación concentrado en el norte del departamento encontrándose sobre los municipios de Rivera, Santa María, Palermo, Tello, Neiva, Baraya, Aipe, Villa vieja y Colombia.

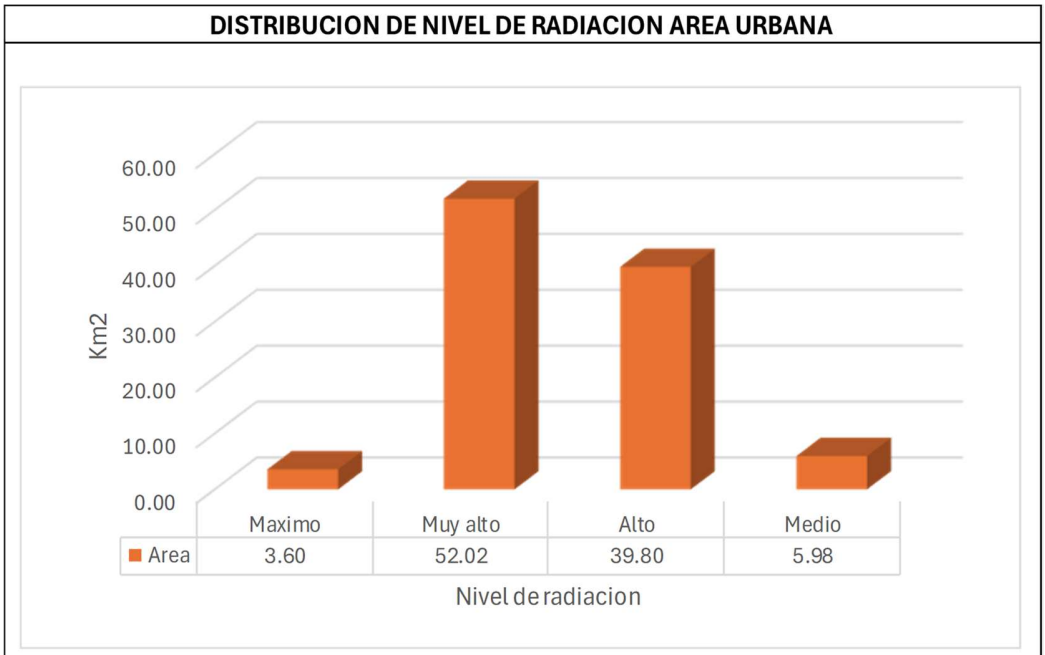
En tercer lugar, en cuanto a nivel de radiación se encuentra el nivel medio con un 18.76% de territorio y se encuentra principalmente en el suroriente y suroccidente del departamento colindando con los departamentos de Caquetá y Cauca. De esta zona hace parte los municipios de Palestina, Acevedo, Pitalito, Suaza, Guadalupe, San Agustín, Garzón, Agrado, Paicol, Gigante, Algeciras, Oporapa, Tarqui, Saladoblanco, Isnos, La Argentina y La Plata. Finalmente, el 3.96% del territorio es repartida entre los niveles máximo y bajo.



Grafica 26 Proporción de radiación recibida sobre el departamento de Huila. Elaboración propia

Al revisar los niveles de radiación encontrados en los cascos urbanos de Huila se evidencia que esta zona cuenta con un área de 97.81 Km2. Los cascos urbanos de Huila poseen 4 niveles de radiación desde el nivel medio hasta el nivel máximo. El nivel predominante en los cascos urbanos corresponde al nivel muy alto con 52.02 km2 donde la ciudad con mayor área es Neiva con 47.06 Km2.

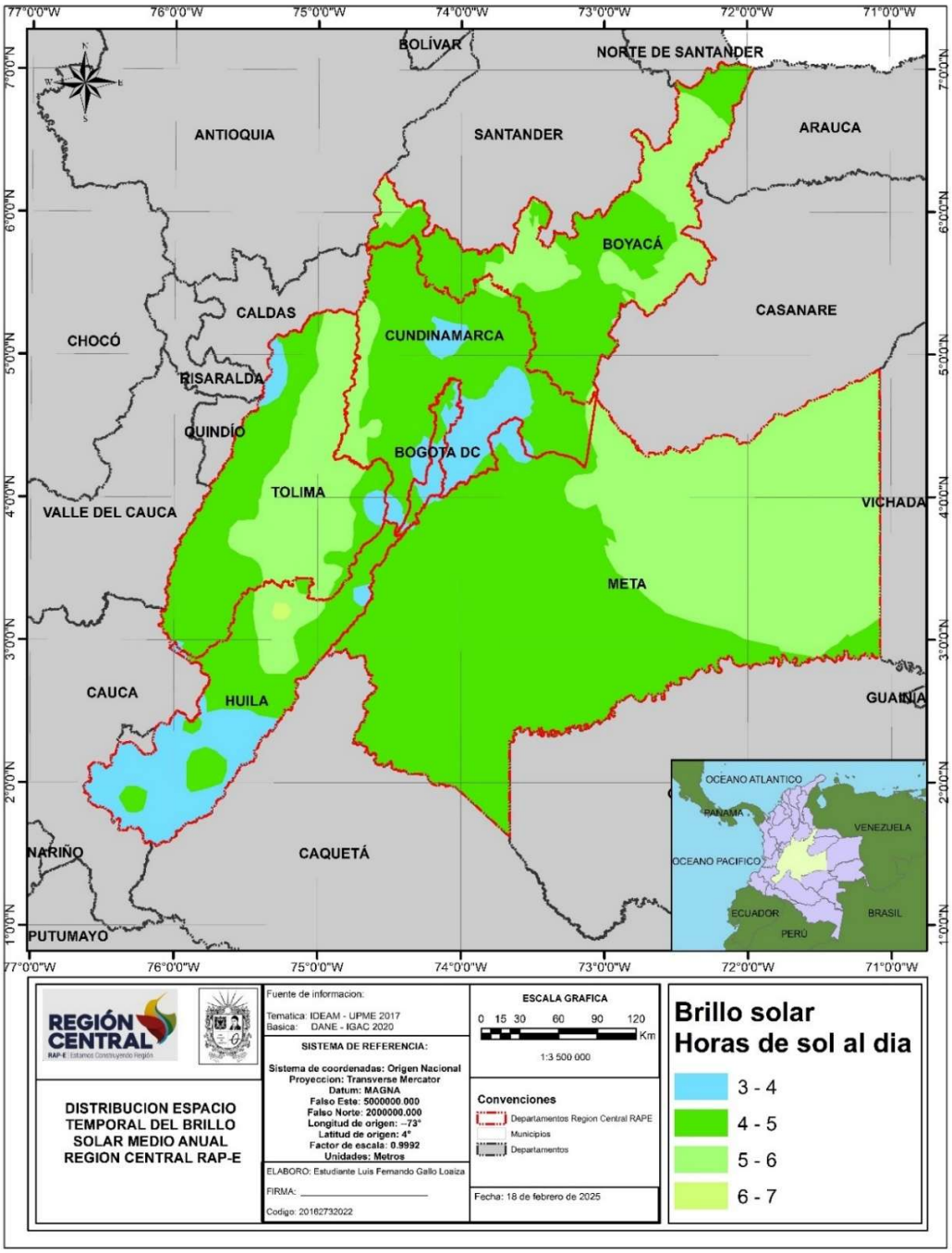
El siguiente nivel de radiación encontrado en las zonas urbanas corresponde al nivel alto localizado en 39.80 Km2 donde el municipio con mayor área es Pitalito con 10.78 Km2. El restante 6.3 % del área urbana se encuentra repartido en los niveles máximo y medio.



Porcentaje distribucion de radiacion en area urbana	
Maximo	0.02%
Muy alto	53.19%
Alto	40.70%
Medio	6.11%

Grafica 27 Porcentaje de distribución de radiación en área urbana de Huila. Elaboración propia.

6.2 BRILLO SOLAR REGIÓN CENTRAL RAP-E



Mapa 10. Distribución espacio temporal del brillo solar medio anual región central RAP-E. Elaboración propia.

Otro indicador para calcular la radiación solar es a través de las horas de Sol efectivo (brillo solar o insolación) y se refiere a la cantidad de tiempo en que la superficie terrestre es irradiada por la radiación solar directa. (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017). Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial) la duración de la insolación correspondiente a un periodo determinado se define como la suma de los subperiodos durante los cuales la irradiancia solar directa supera los 120 W/m2 (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017). En el atlas de radiación solar se tomó la información de sensores de brillo de cada estación desde su instalación hasta el 31 de diciembre de 2016 o hasta que dejó de funcionar si fue antes de esta fecha (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017).

Con base en los datos horario de brillo solar se puede conocer en que periodos del año se tienen mayor cantidad de horas de sol para ser aprovechado por equipos fotovoltaicos y que temporadas hay menor cantidad de horas diarias de sol siendo necesario la implementación de dispositivos generadores de energía complementarios (gas, carbón, plantas termoeléctricas) que suplan el consumo en temporadas de invierno.

Para la Región Central RAP-E que se ubica sobre la región Andina se presenta un comportamiento bimodal, los mayores promedios se dan en enero y febrero, seguidos de una disminución hasta un mínimo en abril y mayo y de un incremento hasta julio y agosto. Posteriormente, se registra una disminución hasta un segundo mínimo en octubre y noviembre, finalizando con un incremento para llegar nuevamente a los máximos de enero (BALLESTEROS, FONSECA, & LESMES, 2017).

La Región Central cuenta con cuatro intervalos de brillo solar, donde el más bajo es de 3 a 4 horas y el más alto se encuentra entre 6 a 7 horas diarias, estos 4 niveles se encuentran en la zona media de intervalos horarios de brillo solar en el país ya que existen 3 niveles por encima y por debajo.

NIVEL DE hSd	RANGOS DE HORAS DIARIAS DE SOL (hSd)	ÁREA TOTAL KM2	PORCENTAJE DE AREA
Alto - Inferior	6 - 7	162.47	0.09%
Medio Superior	5 - 6	60001.00	34.89%
Medio - Inferior	4 - 5	96877.31	56.33%
Bajo - Superior	3 - 4	14953.66	8.69%

Tabla 33. Horas diarias de sol sobre la superficie RAP-E. Elaboración propia.

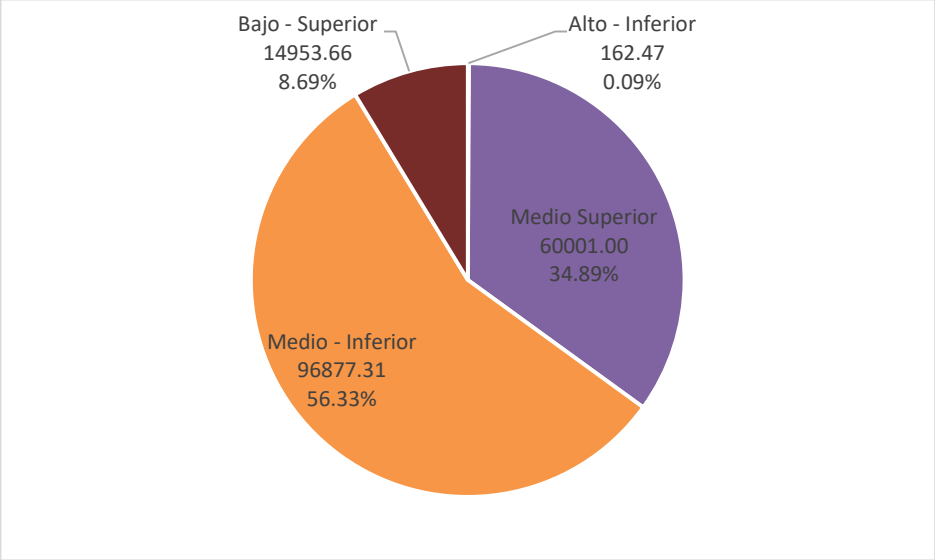
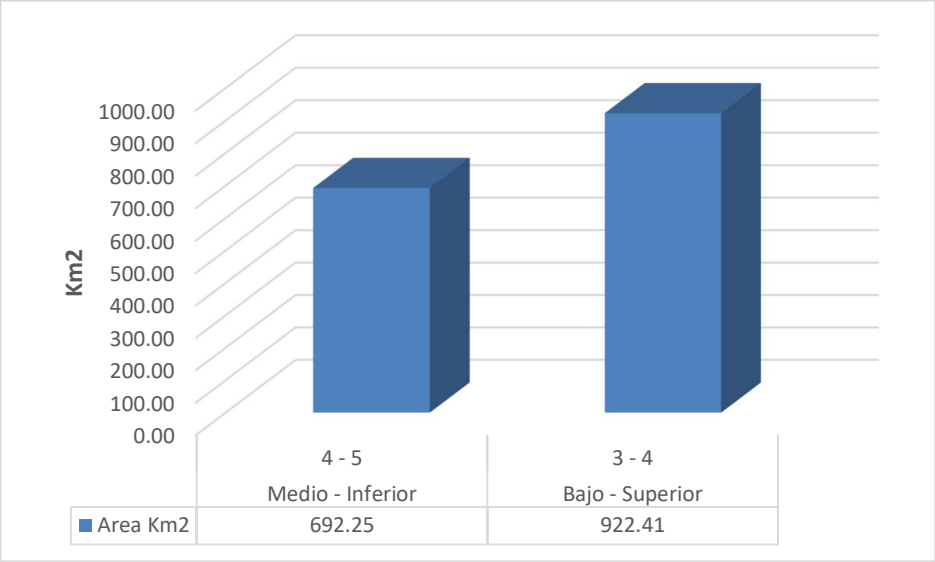


Tabla 34. Distribución de brillo solar sobre la región central RAP-E. Elaboración propia.

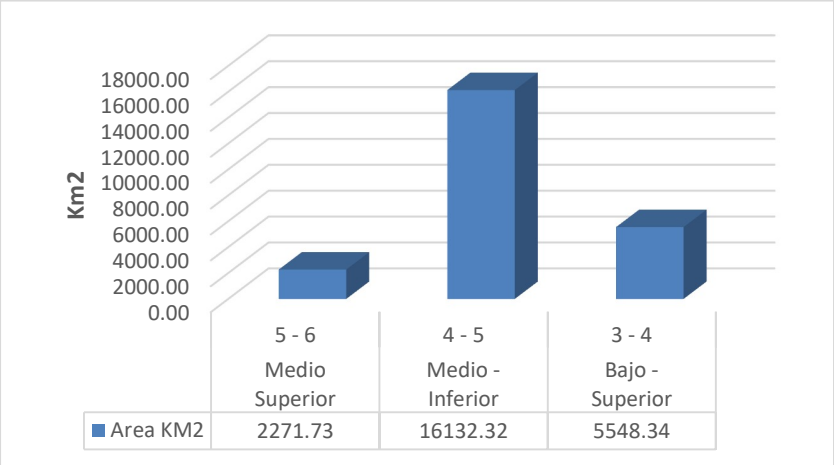
Para la zona de Bogotá se tienen 2 niveles de hSd donde el 57.14% del territorio pertenece al nivel bajo superior (3 – 4 hSd) ubicándose en el centro y nororiente del área capitalina. El otro nivel que se encuentra es el nivel medio inferior (4 – 5 hSd) con un 42.87% localizado en el noroccidente y sur de Bogotá.



Grafica 28 Distribución de brillo solar sobre Bogotá DC. Elaboración propia.

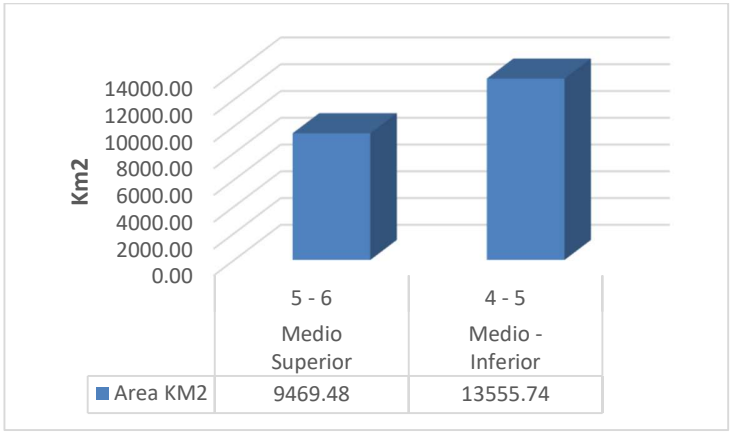
Para el departamento de Cundinamarca se encuentra 3 niveles de brillo solar, el nivel medio superior cuenta con un 9.83% del departamento y se ubica principalmente en la zona occidental del departamento en los límites con los departamentos de Tolima y Caldas con pequeñas zonas al norte y oriente en los límites con Boyacá y Meta. También se encuentra el nivel medio inferior que ocupa el 67.35% del territorio, ubicado en una franja central de norte a sur del departamento y parte del oriente del departamento.

Finalmente se encuentra en nivel bajo superior un 23.16% del territorio cundinamarqués ubicándose en el sur del departamento sobre la reserva del Chingaza y el páramo del Sumapaz y una zona central sobre el valle de Ubaté y sus alrededores.



Grafica 29 Distribución de brillo solar sobre Cundinamarca. Elaboración propia.

Para el departamento de Boyacá se encuentran 2 niveles de brillo solar, el nivel medio inferior cuenta con un 58.87% del departamento y se ubica principalmente en una franja central de sur a norte del departamento en límites con los departamentos de Cundinamarca y Santander con zonas de menor extensión en el costado oriental y occidental de Boyacá. El nivel medio superior se encuentra en un 41.13% del territorio ubicando se principalmente en el nororiente y noroccidente del departamento.

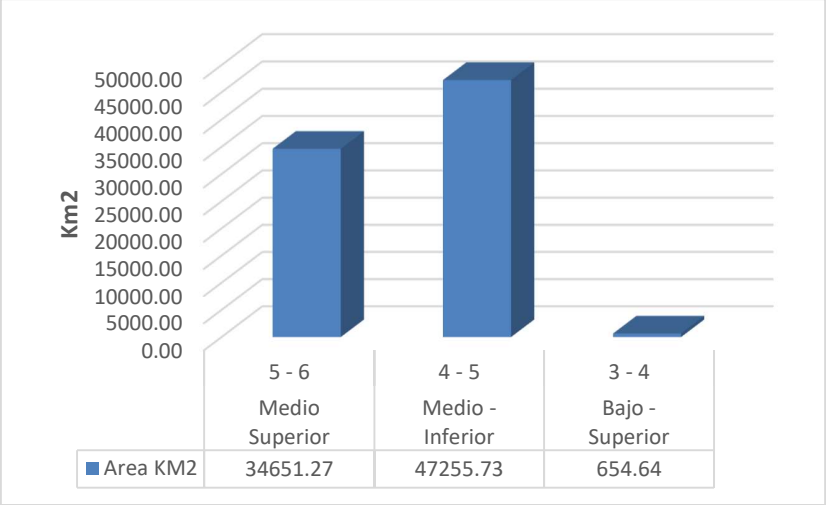


Grafica 30 Distribución de brillo solar sobre Boyacá. Elaboración propia

Para el departamento de Meta se encuentran 3 niveles de brillo solar, el nivel medio inferior cuenta con un 57.24% del departamento y se ubica en parte del centro la totalidad del

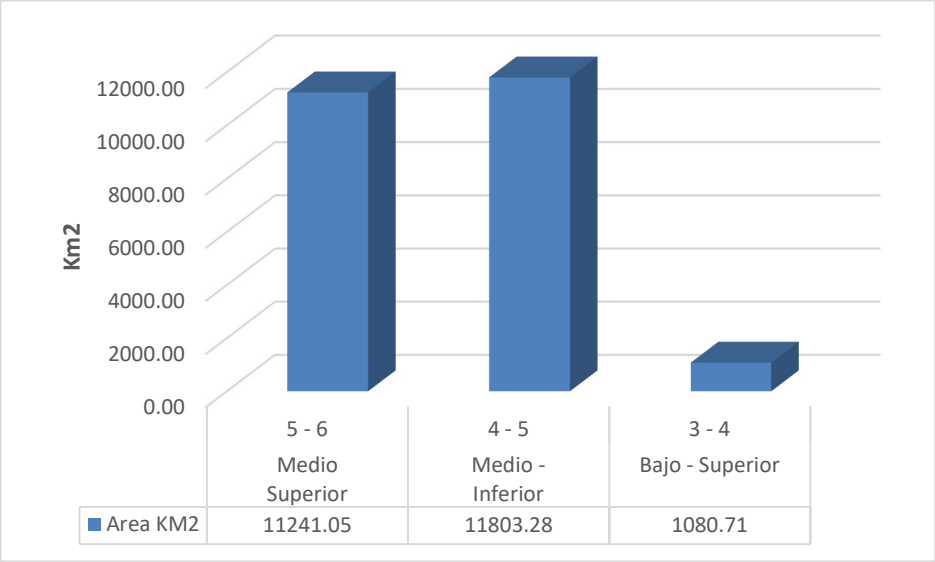
occidente del departamento. El nivel medio superior se encuentra en un 41.97% del territorio ubicándose en parte del centro y la totalidad del oriente del departamento.

Finalmente, el nivel bajo superior se ubica en una zona reducida correspondiente al 0.79% del territorio localizado al norte del departamento en el municipio de San Juanito y El Calvario colindante con el departamento de Cundinamarca.



Grafica 31 Distribución de brillo solar sobre Meta. Elaboración propia

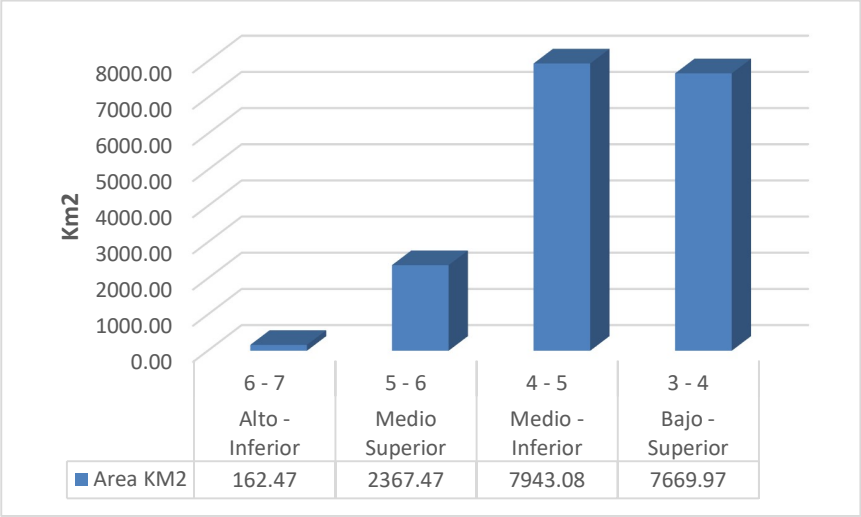
Para el departamento de Tolima se encuentran 3 niveles de brillo solar, el nivel medio inferior cuenta con un 48.93% del departamento y se ubica en el costado occidental del departamento y una porción menor al oriente colindando con Cundinamarca. El nivel medio superior se encuentra en un 46.59% del territorio ubicándose al centro y oriente del departamento. Finalmente, el nivel bajo superior se ubica en una zona reducida correspondiente al 4.48% del territorio localizado al noroccidente y oriente del departamento colindante con los departamentos de Cundinamarca, Caldas, Quindío y Risaralda.



Grafica 32 Distribución de brillo solar sobre Tolima. Elaboración propia

Para el departamento de Huila se encuentran 4 niveles de brillo solar, el nivel medio inferior cuenta con un 43.78% del departamento y se ubica al norte del departamento y con porciones de área menor al sur y suroriente del departamento. Lo sigue el nivel bajo superior con un 42.28% del territorio ubicándose al sur del departamento con zonas residuales al occidente colindando con el Cauca y al nororiente colindando el Meta.

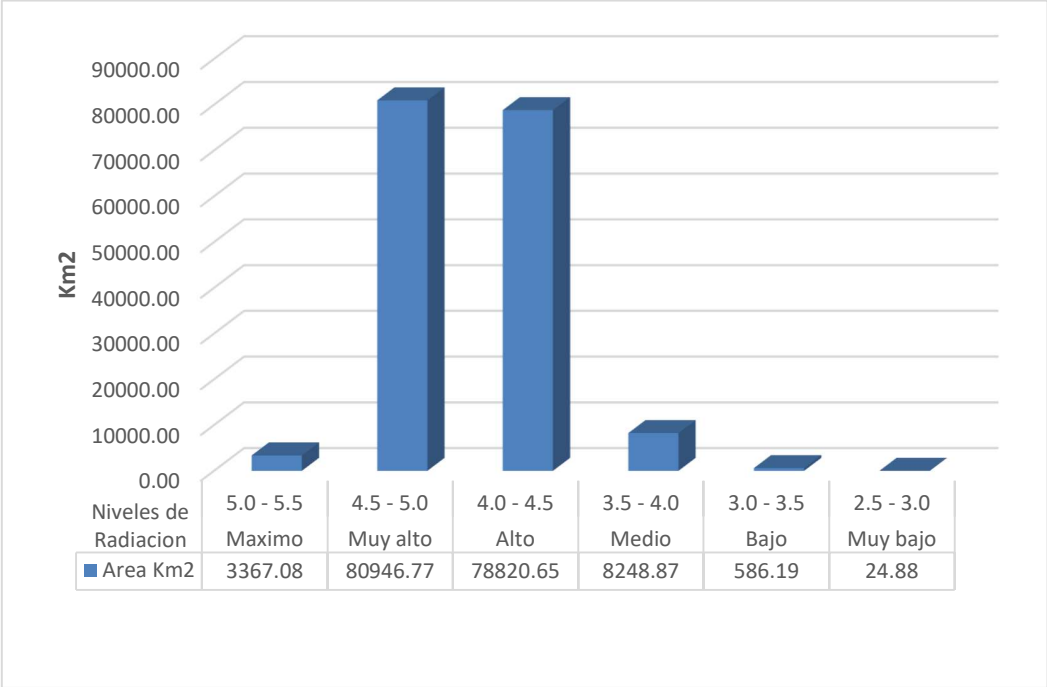
En tercer lugar, de proporción territorial se encuentra el nivel medio superior con 13.05% ubicado sobre los municipios Campoalegre, Rivera, Palermo, Tello, Neiva, Baraya, Aipe, Villa vieja, Baraya. Finalmente, el nivel alto inferior se ubica en una zona correspondiente al 0.90% sobre los municipios de Tello, Aipe, Villa vieja.



Grafica 33 Distribución de brillo solar sobre Huila. Elaboración propia

7. RESULTADOS

Para el año 2025 la región Central RAP-E está compuesta por los departamentos de Bogotá DC, Cundinamarca, Boyacá, Meta, Tolima y Huila sobre los que se presentan 6 niveles de radiación, siendo el nivel de mayor cobertura de superficie el nivel Muy alto con un 47.06% de la región central con un área superior a los 80.000 Km^2, posteriormente los sigue el nivel alto con 45.83% con un área cercana a los 79.000 Km^2, en tercer lugar se encuentra el nivel medio con 4.80% con un área alrededor de los 8250 Km^2, en cuarto lugar se encuentra el nivel Máximo con 1.96% con 3.367 Km^2 y finalizan los niveles bajo y muy bajo que entre ambos tienen un área de 611 Km^2 correspondiente a un 0.35% del territorio en conjunto.



Grafica 34 Niveles de radiación solar sobre el territorio de la región Central RAP-E. Elaboración propia.

A partir de la tesis realizada por el ingeniero Ángel Ocasiones se tomó la siguiente tabla para identificar los diferentes niveles de radiación que recaen sobre la superficie de la región Central RAP-E:

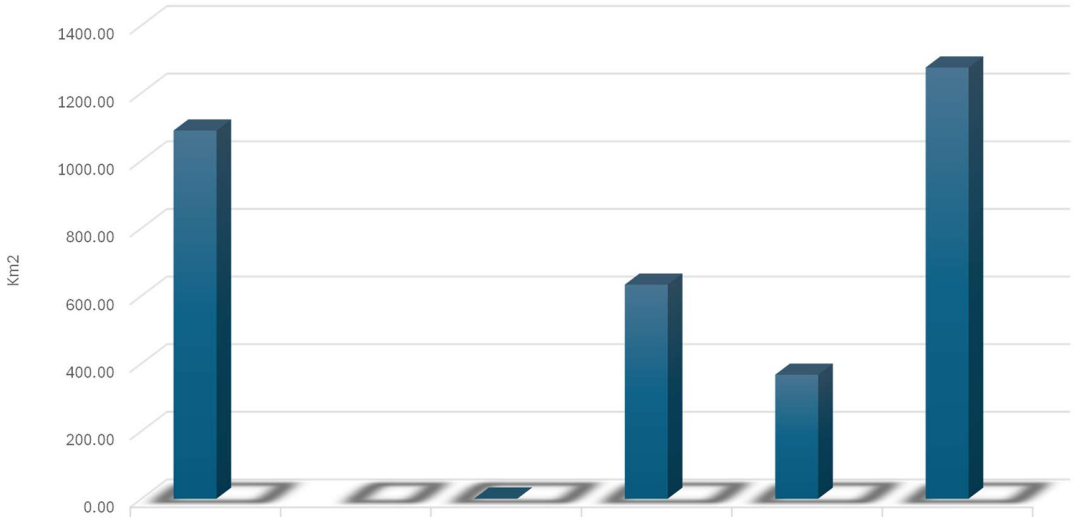
NIVEL DE RADIACIÓN HDMA	RANGOS DE RADIACIÓN HDMA Kwh/m2/día
Máximo	5.0 - 5.5
Muy alto	4.5 - 5.0
Alto	4.0 - 4.5
Medio	3.5 - 4.0
Bajo	3.0 - 3.5
Muy bajo	2.5 - 3.0

Tabla 35. Niveles de radiación. (Ocaciones, 2020)

Con base en lo anterior tabla se clasifico los niveles de radiación sobre la Región Central RAP-E y se logró obtener de la distribución espacial de la radiación solar sobre la Región Central RAP-E generando los siguientes resultados:

- **Radiación Máxima:**

La radiación máxima hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 5.0 a 5.5 kWh/m2/día. Dentro del área de la región central RAP-E 3367.08 Km2 reciben una radiación máxima y la mayor parte de esta área se encuentra en Tolima se concentran 1.275.70 Km2 correspondientes al 37.89% de la superficie con esta radiación. Luego se encuentra Boyacá que concentra 1089.31 Km2 equivalente al 32.35%, continua el departamento del Huila con 633.61 Km2 y un 18.82% de esta zona; en cuarta posición se encuentra el departamento del Meta con 367.22 Km y un 10.91% del área en esta zona. Finalmente se encuentra Cundinamarca con 1.24 Km2 con un valor inferior 1%. Bogotá DC no presenta áreas en este nivel de radiación.

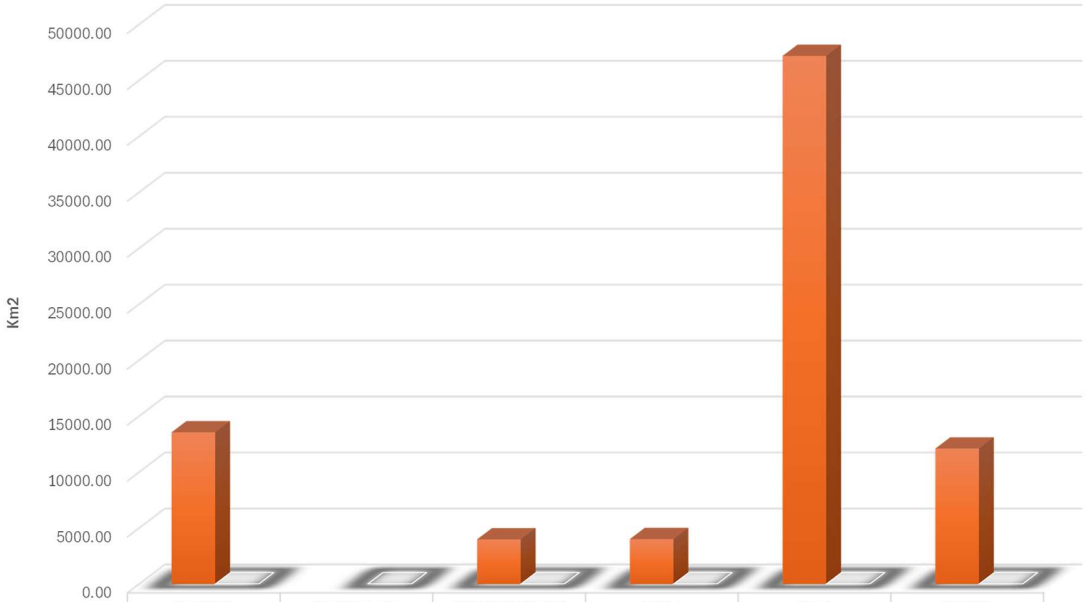


	BOYACA	BOGOTA DC	CUNDINAMARCA	HUILA	META	TOLIMA
Area Km2	1089.31		1.24	633.61	367.22	1275.70
% de ocupacion	32.35%	0.00%	0.04%	18.82%	10.91%	37.89%

Grafica 35 Distribución de área por departamento de Radiación Máxima sobre la Región Central. Elaboración propia.

- **Radiación Muy Alta:**

La radiación muy alta hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 4.5 a 5.0 kWh/m2/día. El nivel de radiación Muy Alto se ubica sobre 80.946,77 Km2 de la superficie de la Región Central RAP-E, donde el departamento con mayor área en este nivel de radiación es Meta con 47.207,89 Km2 concentrando el 58.32% del área ubicada en este nivel. En segundo lugar, se encuentra en el departamento de Boyacá con 13.573,96 Km2 con un 16.77%, en tercer lugar, se encuentra el departamento del Tolima con 12.123,45 Km2 albergando el 14.98% del área, en cuarto lugar, se encuentran los departamentos de Huila y Cundinamarca con 9.93% en conjunto. Bogotá DC no cuenta con área en este nivel de radiación.



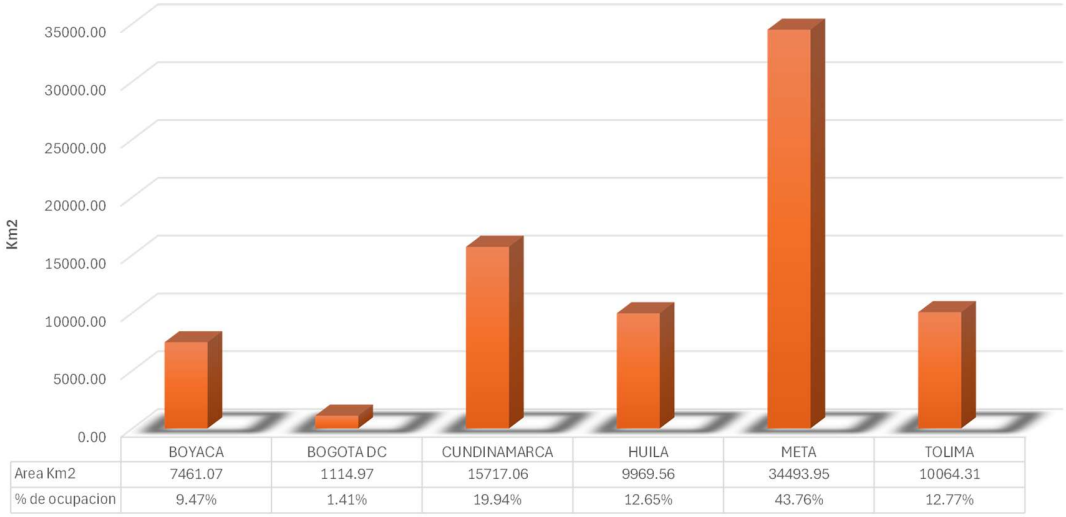
	BOYACA	BOGOTA DC	CUNDINAMARCA	HUILA	META	TOLIMA
Area Km2	13573.96		4009.62	4031.85	47207.89	12123.45
% de ocupacion	16.77%	0.00%	4.95%	4.98%	58.32%	14.98%

Grafica 36 Distribución de área por departamento de Radiación Muy Alta sobre la Región Central. Elaboración propia.

- **Radiación Alta**

La radiación alta hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 4.0 a 4.5 kWh/m2/día. La radiación alta se encuentra sobre 78.820,92 Km2 de la Región Central, donde más de 34.000 Km2 pertenecen al departamento del Meta que equivalen al 43.76%

del total del territorio que se encuentra en este nivel de radiación; en segundo lugar se encuentra el departamento de Cundinamarca con más de 15.500 Km2 que corresponden al 19.94%; posteriormente sigue el departamento de Tolima con un valor superior a 10.000 Km2 teniendo una incidencia del 12.77%; con un valor cercano a los 10.000 Km2 se encuentra en cuarto lugar el departamento del Huila con un 12.65% del territorio; en quinto lugar se encuentra el departamento de Boyacá con valor superior de 7.000 Km2 con 9.47% de ocupación y finalizando la lista se encuentra Bogotá DC con un 1.114,97 Km2 representando el 1.41% de superficie de radiación alta.

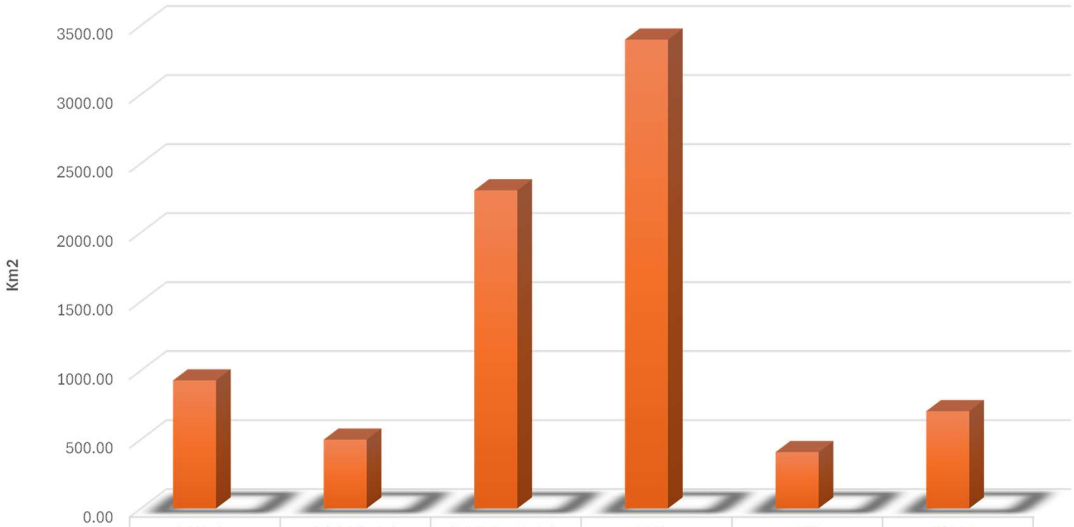


	BOYACA	BOGOTA DC	CUNDINAMARCA	HUILA	META	TOLIMA
Area Km2	7461.07	1114.97	15717.06	9969.56	34493.95	10064.31
% de ocupacion	9.47%	1.41%	19.94%	12.65%	43.76%	12.77%

Grafica 37 Distribución de área por departamento de Radiación Alta sobre la Región Central. Elaboración propia.

- **Radiación Media**

La radiación media hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 3.5 a 4.0 kWh/m2/día. La radiación media se encuentra sobre 8.248,87 Km2 de la Región Central, donde el departamento del Huila posee 3.398,61 Km2 con un 41.20% de ocupación en este nivel, lo sigue el departamento de Cundinamarca con más de 2000 Km2 de superficie en esta zona ocupando el 27.96%; en tercer lugar se encuentra en Boyacá 928.26 Km2 y un 11.26% de ocupación; en cuarto lugar se encuentra Tolima con un área superior a 700 Km2 y un 8.56%; en quinto lugar y sexto lugar se encuentran Bogotá DC y Meta con valores entre los 400 Km2 y 500 Km2 con 6.06% y 4.96% respectivamente.

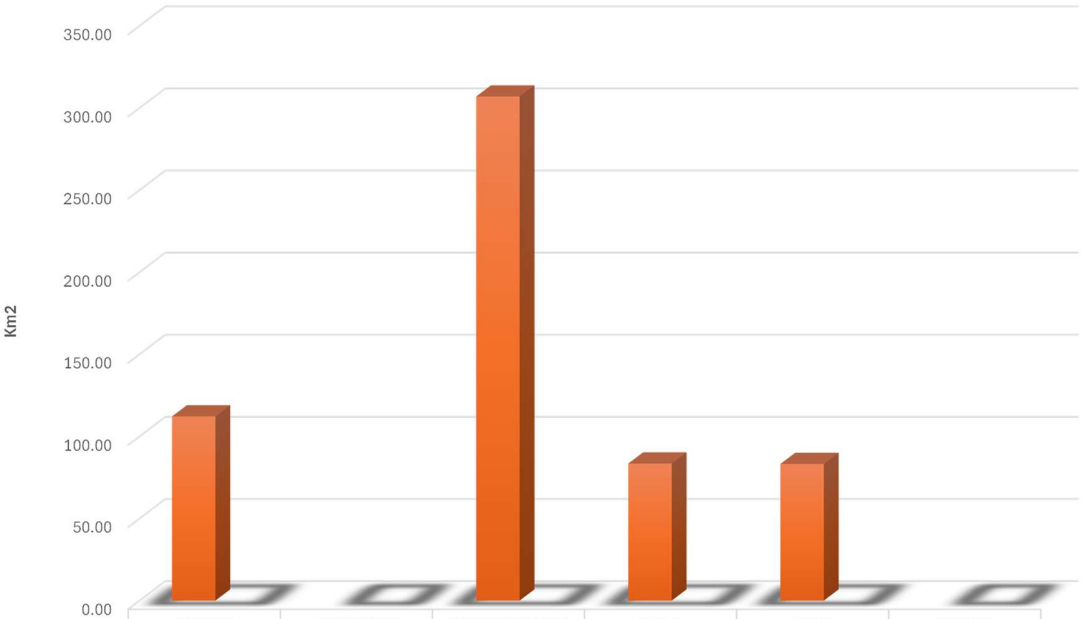


	BOYACA	BOGOTA DC	CUNDINAMARCA	HUILA	META	TOLIMA
Area Km2	928.96	499.69	2306.29	3398.61	409.30	706.02
% de ocupacion	11.26%	6.06%	27.96%	41.20%	4.96%	8.56%

Grafica 38 Distribución de área por departamento de Radiación Media sobre la Región Central. Elaboración propia.

- **Radiación Baja**

La radiación baja hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 3.0 a 3.5 kWh/m2/día. La radiación baja se encuentra en 586.19 Km2 de la Región Central, donde el departamento de Cundinamarca posee 307.07 Km2 con un 52.38% de ocupación en este nivel, lo sigue el departamento de Boyacá con 112.24 Km2 y un porcentaje de ocupación de 19.15%; en tercer y cuarto lugar se encuentran Huila y Meta con valores superiores a los 80 Km2 contando con 14.26% y 14.21% respectivamente. Los departamentos de Tolima y Bogotá DC no cuentan con Área en este nivel de radiación.



	BOYACA	BOGOTA DC	CUNDINAMARCA	HUILA	META	TOLIMA
Area Km2	112.24		307.07	83.57	83.31	
% de ocupacion	19.15%	0.00%	52.38%	14.26%	14.21%	0.00%

Grafica 39 Distribución de área por departamento de Radiación Baja sobre la Región Central. Elaboración propia.

- **Radiación muy baja**

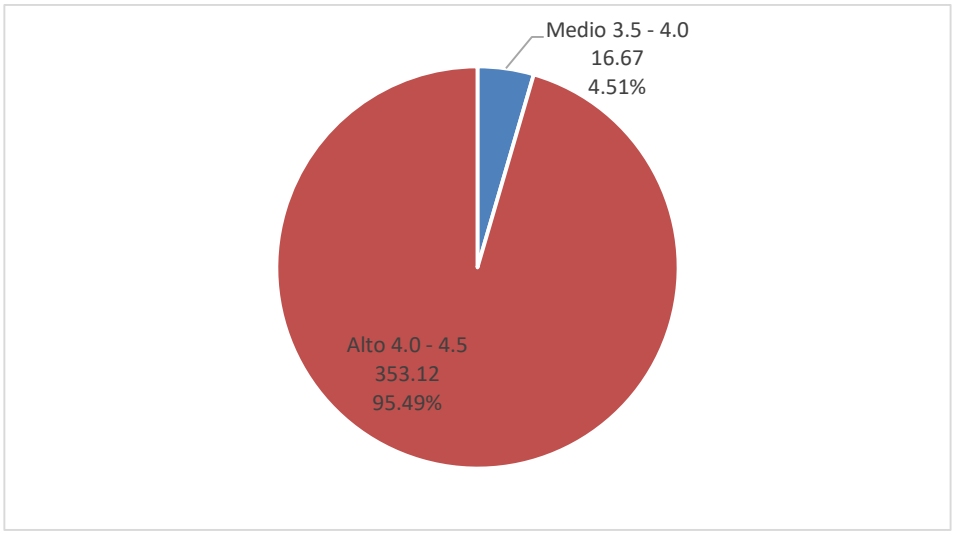
La radiación baja hace referencia a las zonas que reciben radiación entre 2.5 a 3.0 kWh/m2/día. La radiación baja se encuentra únicamente en el departamento de Cundinamarca con 24.88 Km2 de la Región Central.

La superficie de la Región Central RAP-E recibe un recurso solar abundante ya que el 94.85% de su área total recibe radiación superior a 4.0 kWh/m2/día siendo este valor el mínimo necesario para la generación de energía fotovoltaica; aunque la región Andina y Orinoquia son las zonas donde se encuentran los departamentos pertenecientes a la Región Central presentan comportamientos monomodales (un periodo de radiación alta y otro de baja) y bimodales (dos periodos de radiación alta y dos de radiación baja) la ubicación geográfica a nivel mundial permite que haya disponibilidad de recurso solar todo el año.

Para realizar la instalación de un sistema de generación fotovoltaica es necesario tener en cuenta, además de la cantidad de radiación solar que recae sobre su superficie, es necesario contemplar la cantidad de sombras que puedan recaer sobre las zonas, el área de los paneles solares, la tecnología de los paneles solares, la inversión necesaria para poder llegar al sitio donde se lleve a cabo el proyecto, la población beneficiada con el proyecto etc. dichos factores deben evaluarse para hacer un estudio de costo – beneficio de la ejecución del mismo y poder aprovechar el máximo posible del recurso solar.

Con respecto a las zonas urbanas se realizó una aproximación del índice de radiación solar de los cascos urbanos de mayor extensión en cada uno de los departamentos.

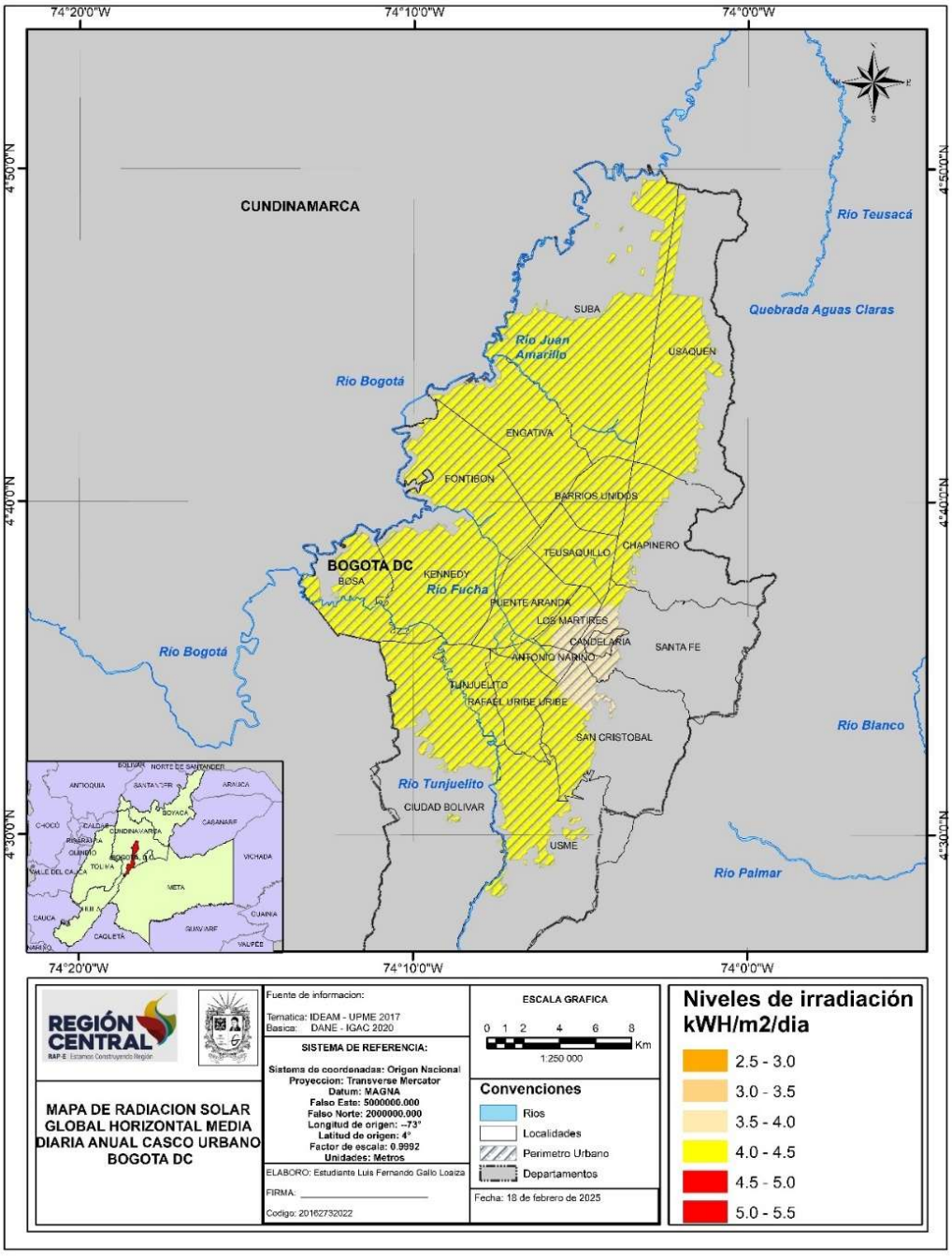
- **Bogotá DC**



Grafica 40 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Bogotá. Elaboración propia.

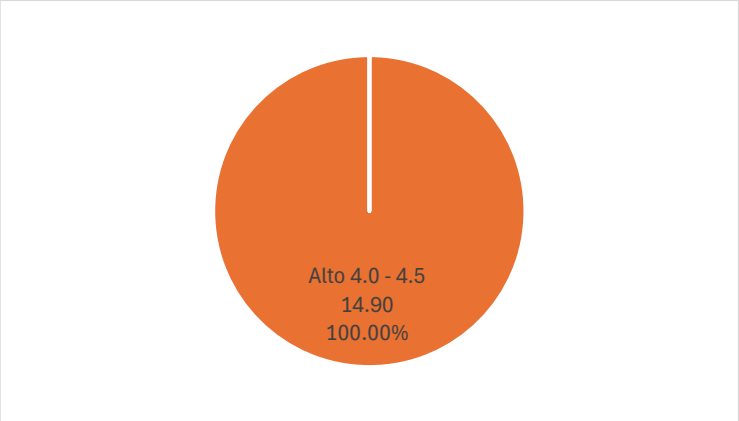
El perímetro urbano de Bogotá posee un área de 369.79 Km2 donde se encuentran 2 niveles de radiación solar donde el 95.49% del casco urbano se encuentra dentro del nivel Alto de radiación localizada en la zona plana del Bogotá y las montañas de Ciudad Bolívar y un 4.51% en nivel medio localizado en el costado centro -oriental del área metropolitana

ocupando parcialmente las localidades de Los Mártires, Antonio Nariño, Santa Fe, La Candelaria y San Cristóbal.



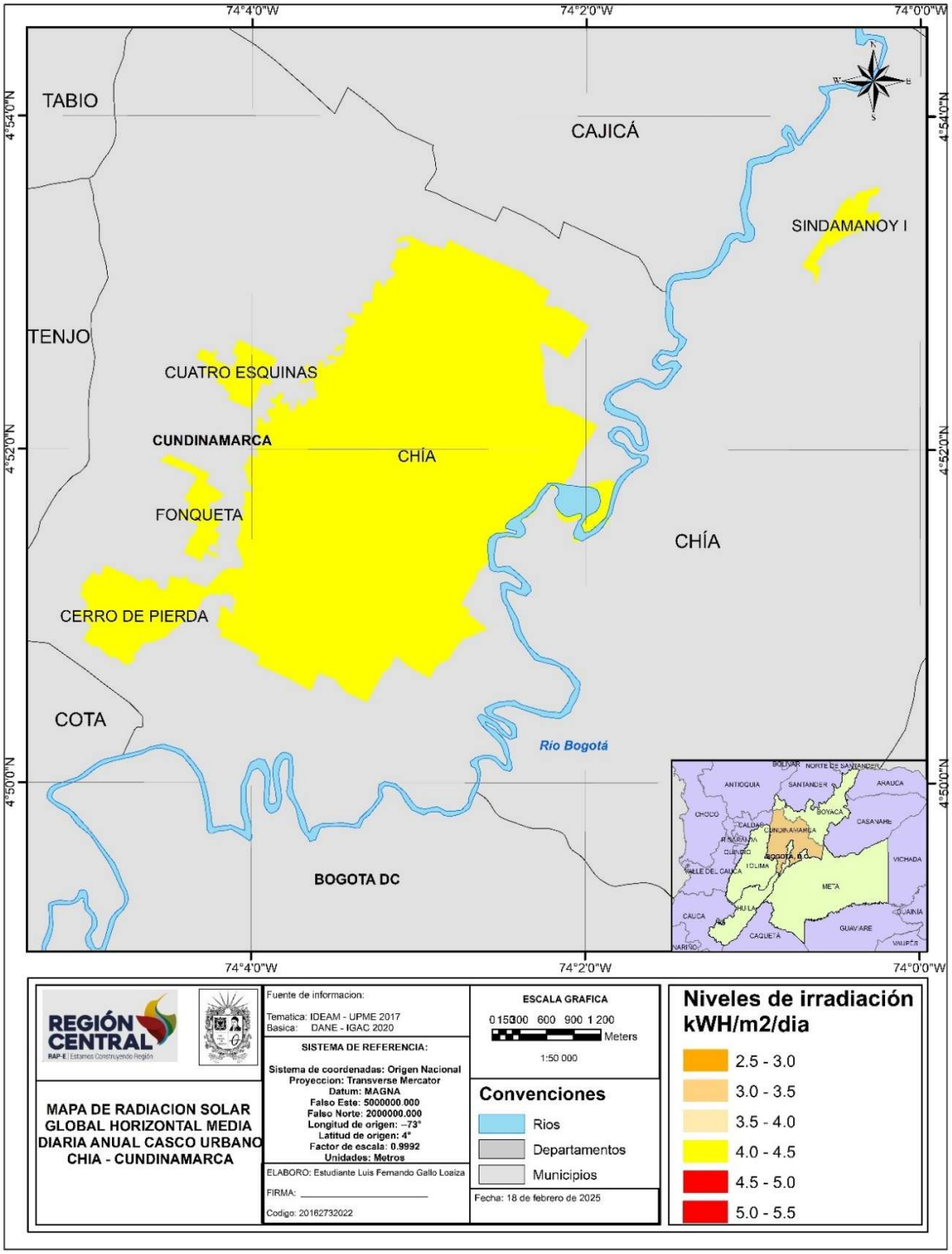
Mapa 11 Mapa de radiación solar global horizontal diaria anual casco urbano Bogotá DC. Elaboración propia.

- **Chía**



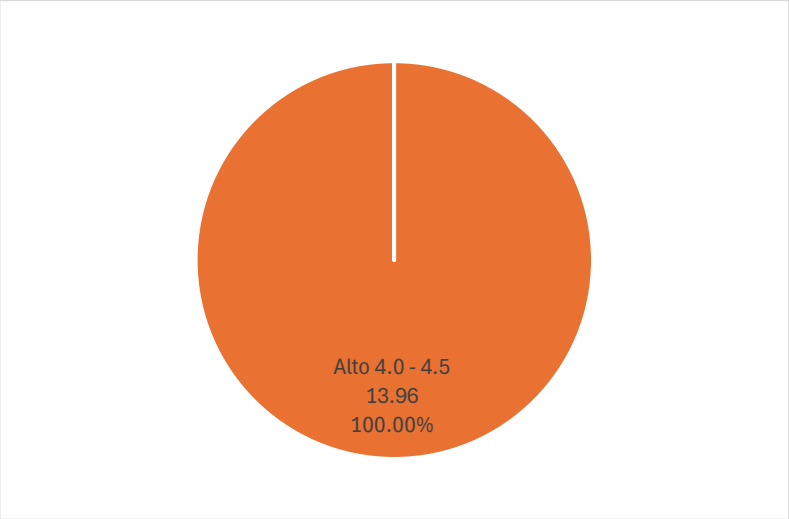
Grafica 41 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Chía. Elaboración propia.

El casco urbano de Chía posee un área de 14.90 Km2 en conjunto donde se encuentra el nivel de radiación solar alto. Las zonas urbanas que conforman el casco urbano de Chía son Chía pueblo y los corregimientos de Cuatro esquinas, Fonqueta, Sindamanoy I y Cerro de Piedra.



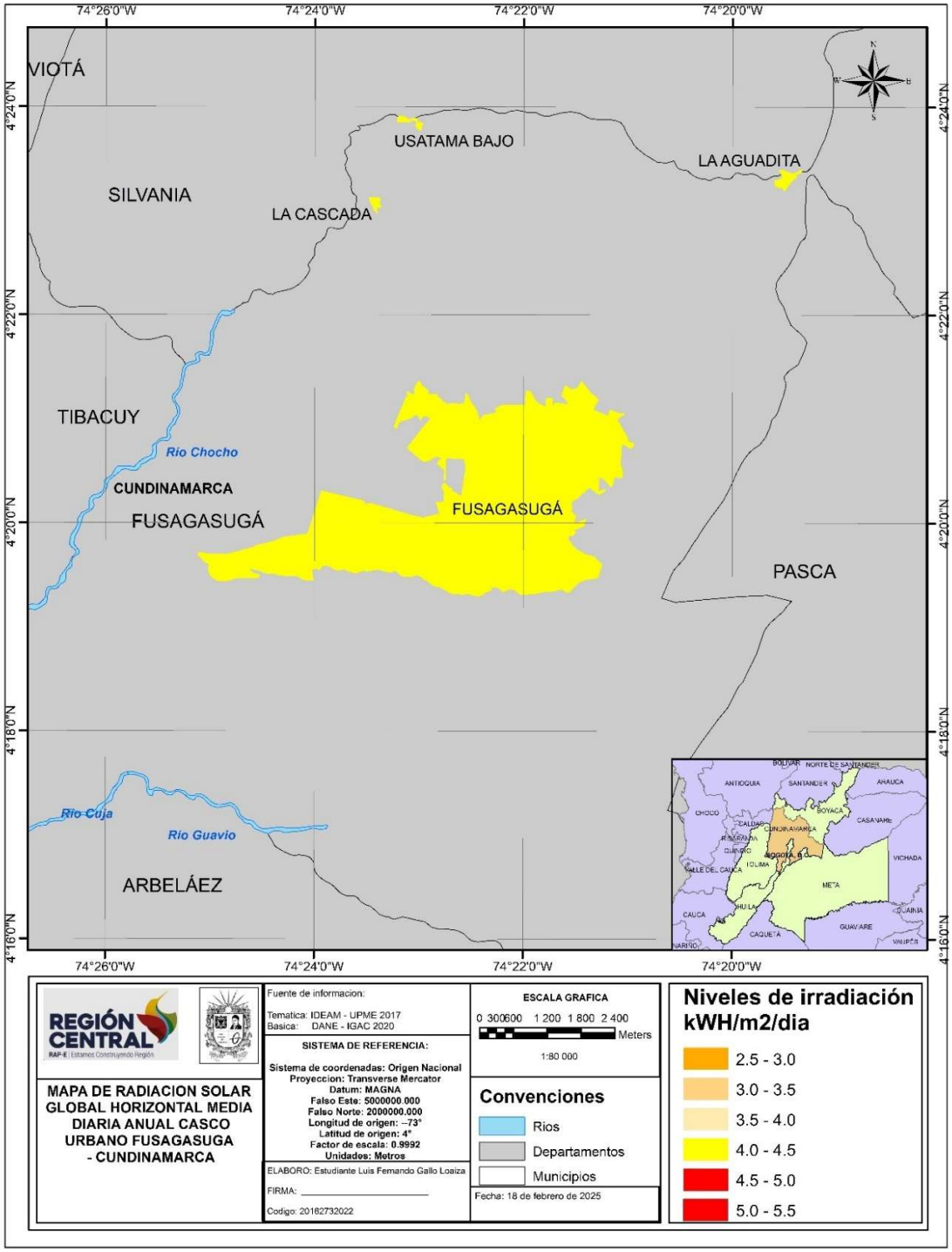
Mapa 12 Mapa de radiación solar global horizontal diaria anual casco urbano Chía. Elaboración propia.

- **Fusagasugá**



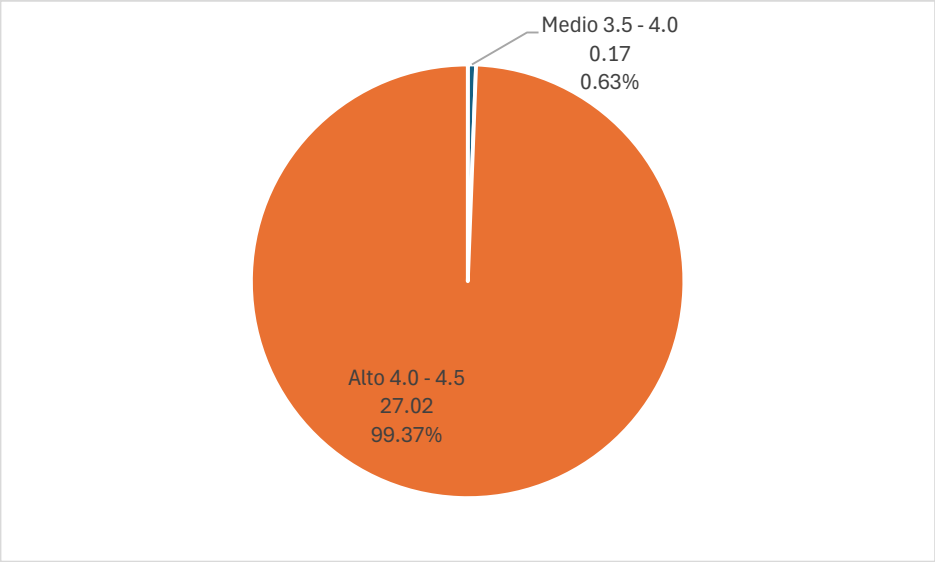
Mapa 13 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Fusagasugá. Elaboración propia.

El casco urbano de Fusagasugá posee un área de 13.96 Km2 en conjunto donde se encuentra el nivel de radiación solar alto en toda su superficie. Las zonas urbanas que conforman el casco urbano de Fusagasugá son Fusagasugá pueblo y los corregimientos de La Aguadita, Usatama bajo y La Cascada.



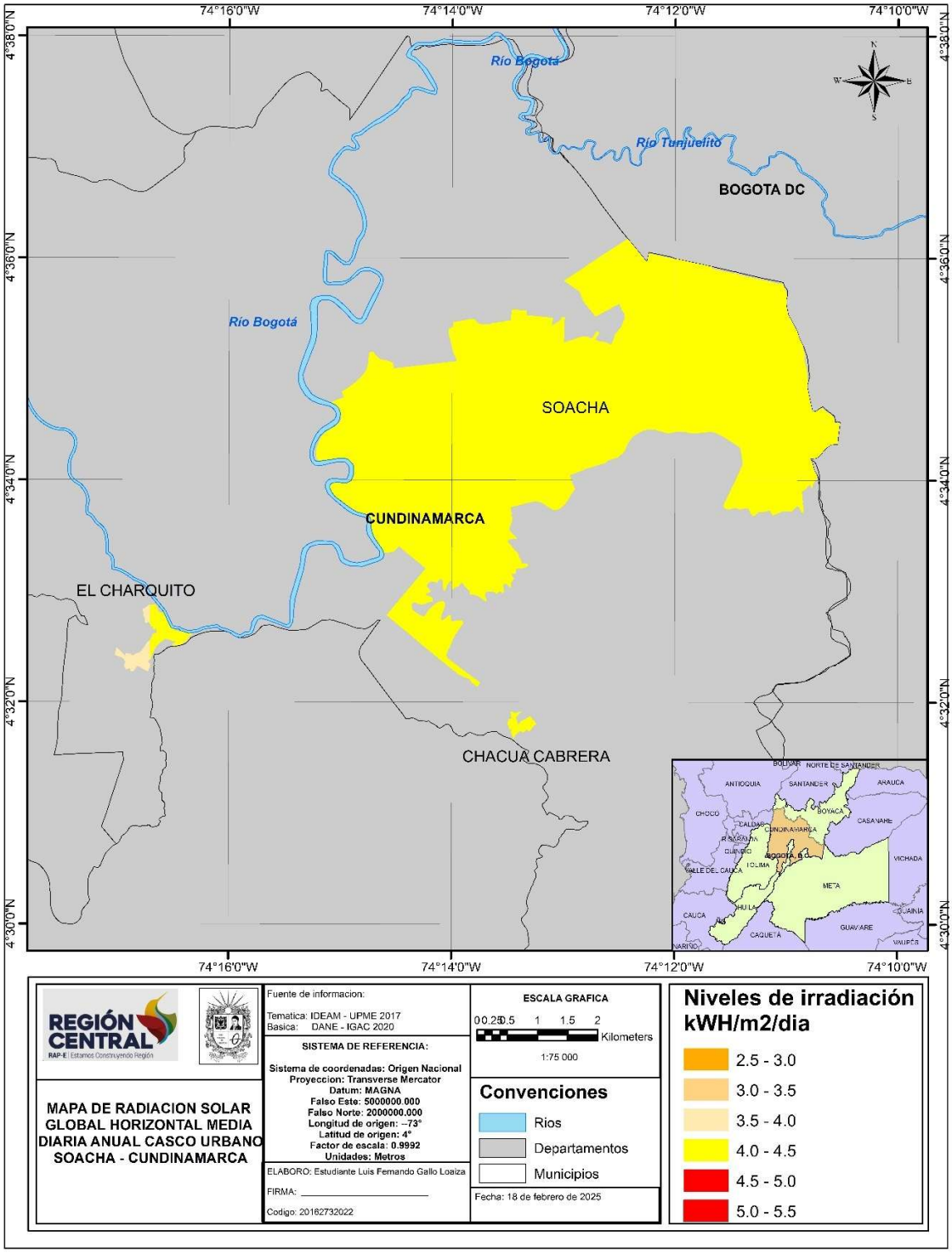
Mapa 14 Mapa de radiación solar global horizontal diaria anual casco urbano Fusagasugá. Elaboración propia.

- **Soacha**



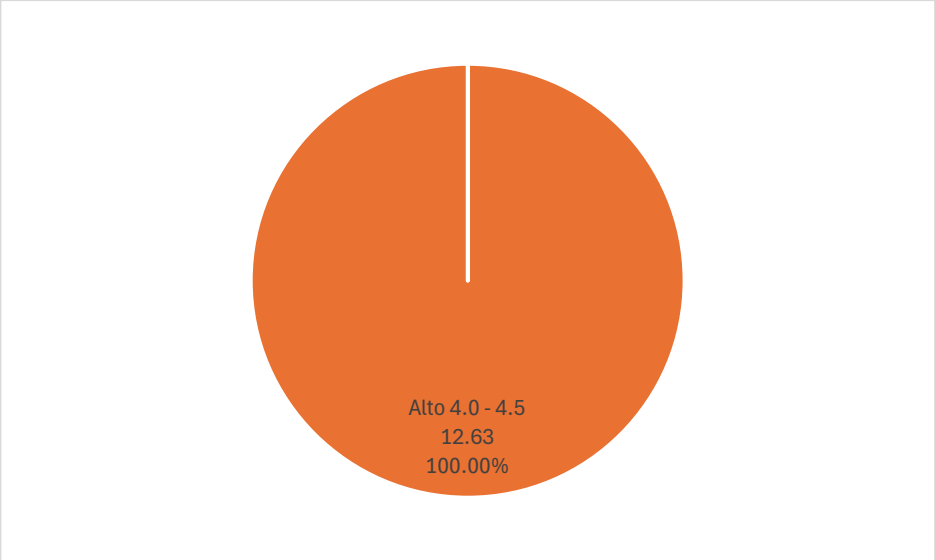
Mapa 15 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Soacha. Elaboración propia.

El casco urbano de Soacha posee un área de 27.19 Km2 en conjunto, donde los cascos urbanos de Soacha, el corregimiento de Chacua Cabrera y parte del área del corregimiento del Charquito se encuentran en el nivel de radiación solar alto con 27.02 Km2. En el nivel medio se encuentran 0.17 Km2 pertenecientes al corregimiento del Charquito.



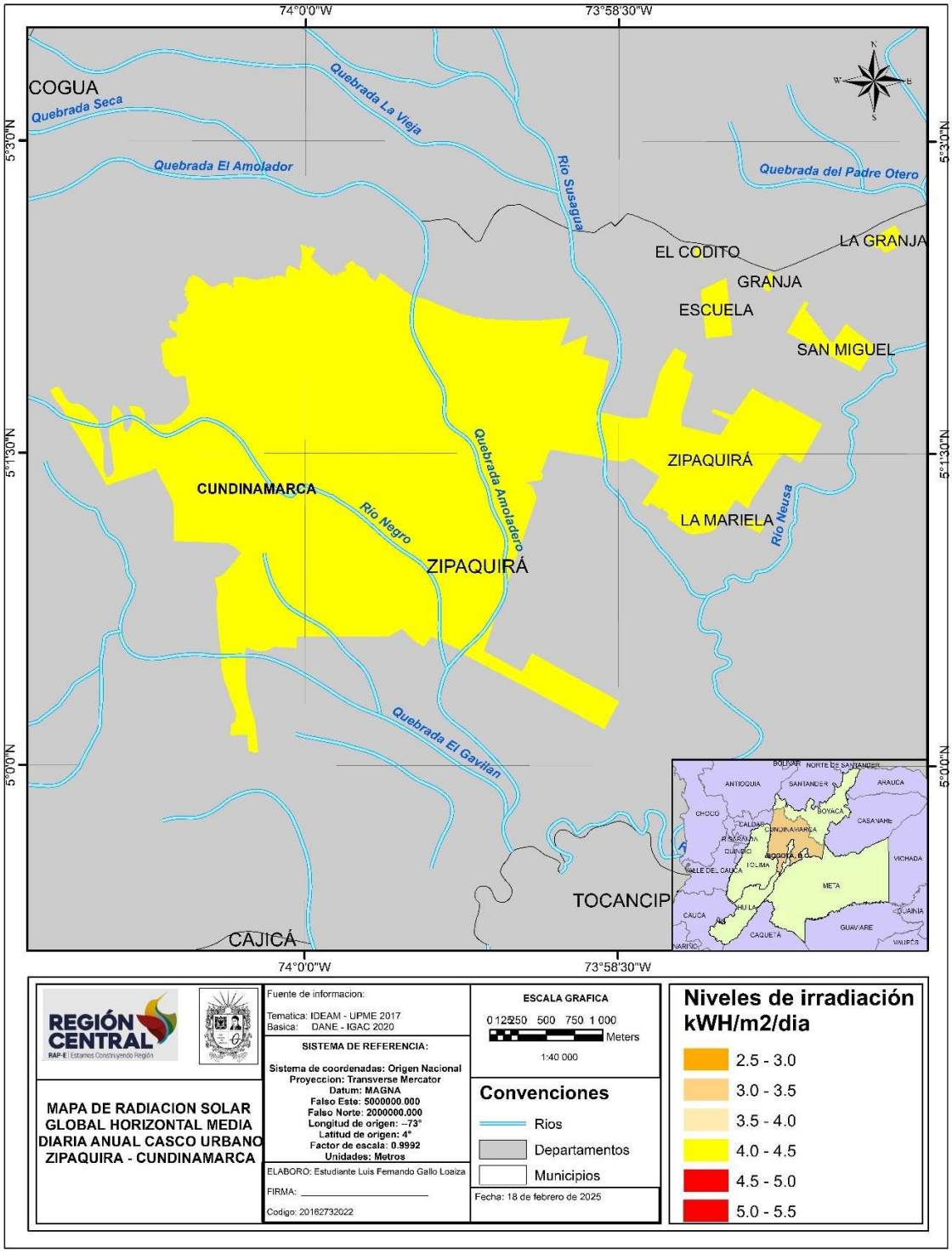
Mapa 16 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Soacha. Elaboración propia.

- **Zipaquirá**



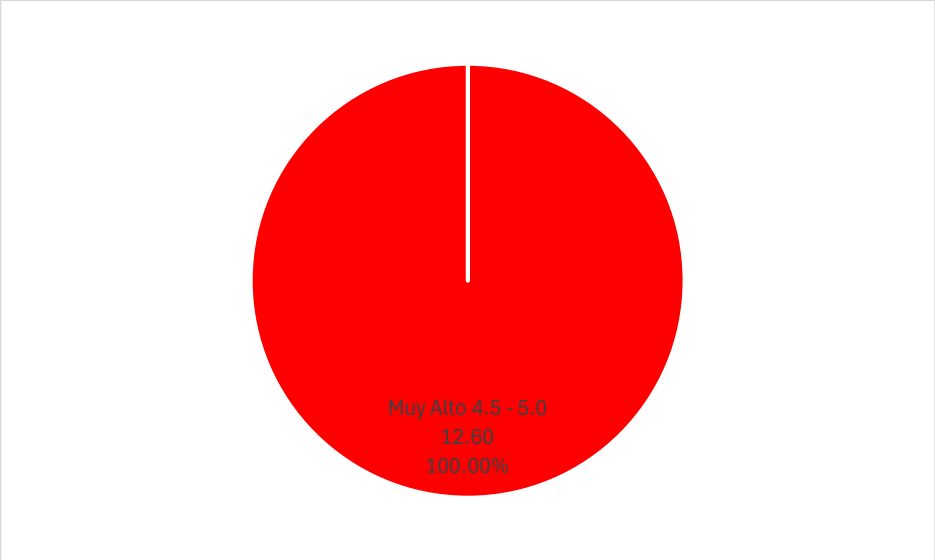
Mapa 17 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Zipaquirá. Elaboración propia.

El casco urbano de Zipaquirá posee un área de 12.63 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad dentro del nivel Alto de radiación. La cabecera urbana del municipio de Zipaquirá donde está compuesta por los cascos urbanos de Zipaquirá pueblo y los corregimientos de Granja, La Granja, El Codito, Escuela, San Miguel y La Mariela.



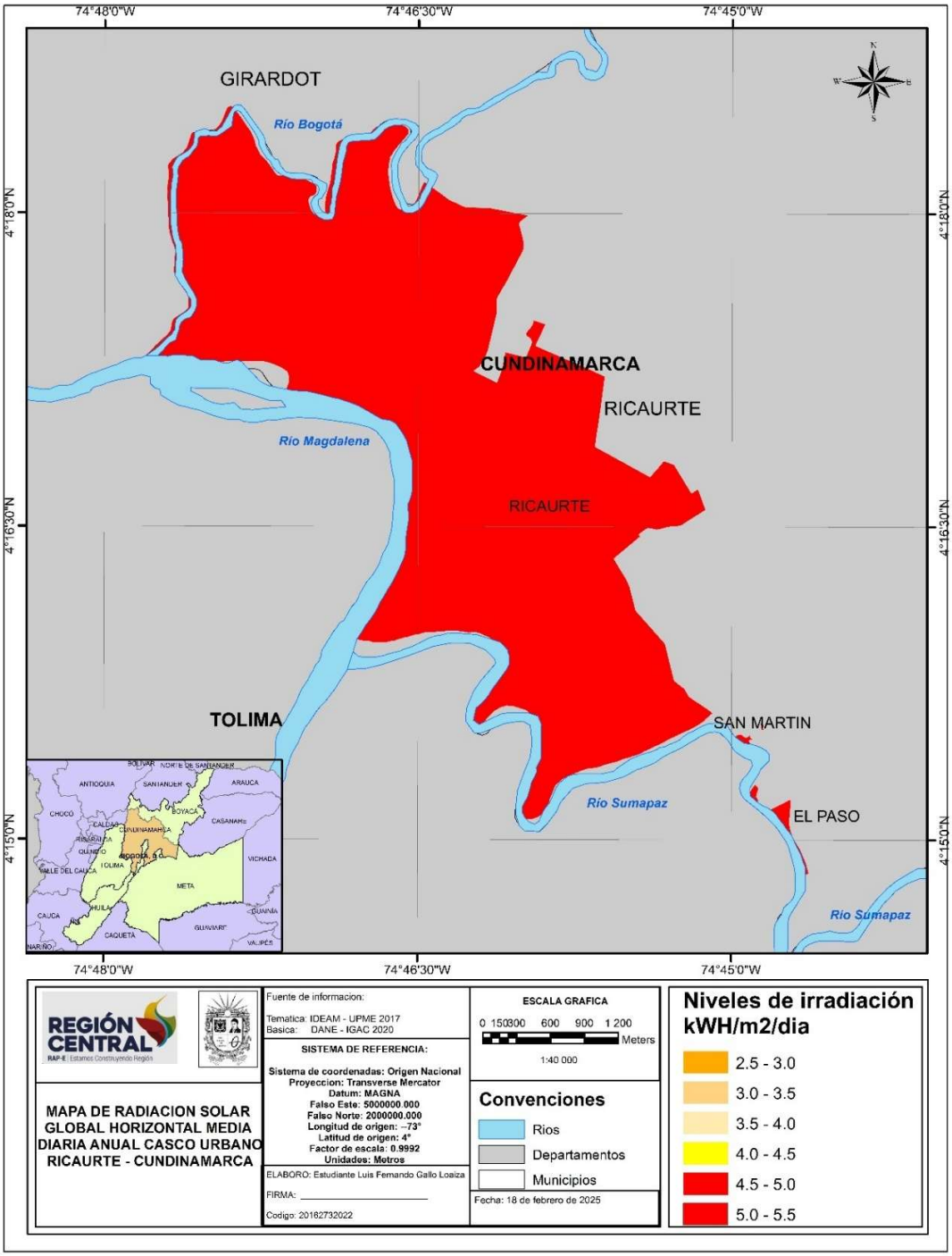
Mapa 18 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Zipaquirá. Elaboración propia.

- **Ricaurte**



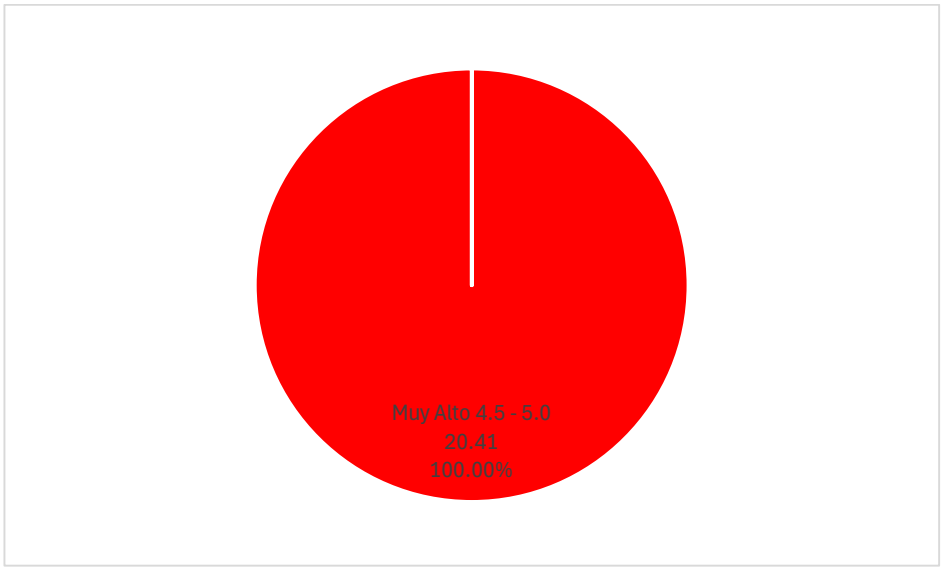
Mapa 19 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Ricaurte. Elaboración propia.

El casco urbano de Ricaurte posee un área de 12.60 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad dentro del nivel muy alto de radiación. La cabecera urbana del municipio de Ricaurte está compuesta por los cascos urbanos de Ricaurte pueblo y los caseríos de El paso y San Martin.



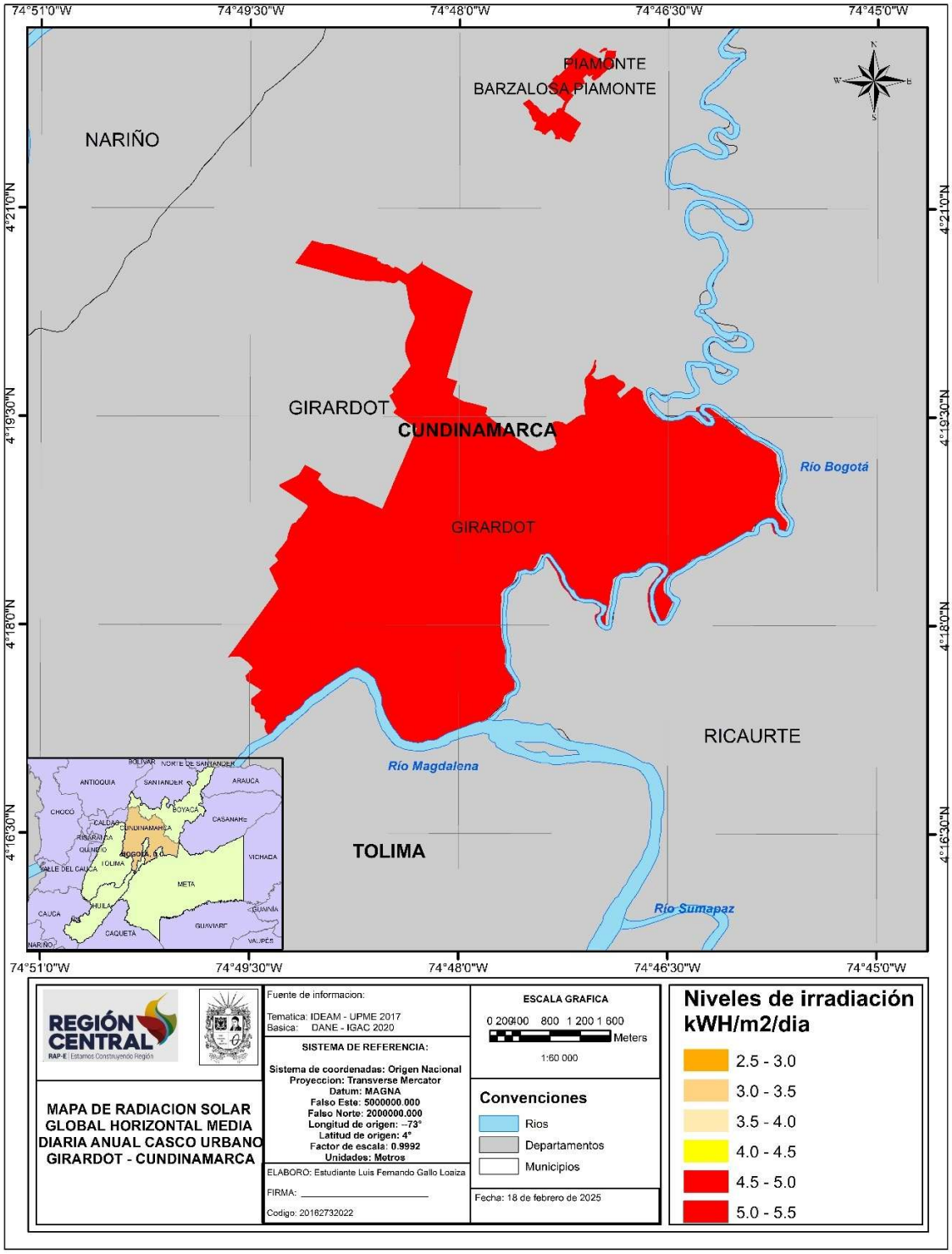
Mapa 20 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Ricaurte. Elaboración propia.

- **Girardot**



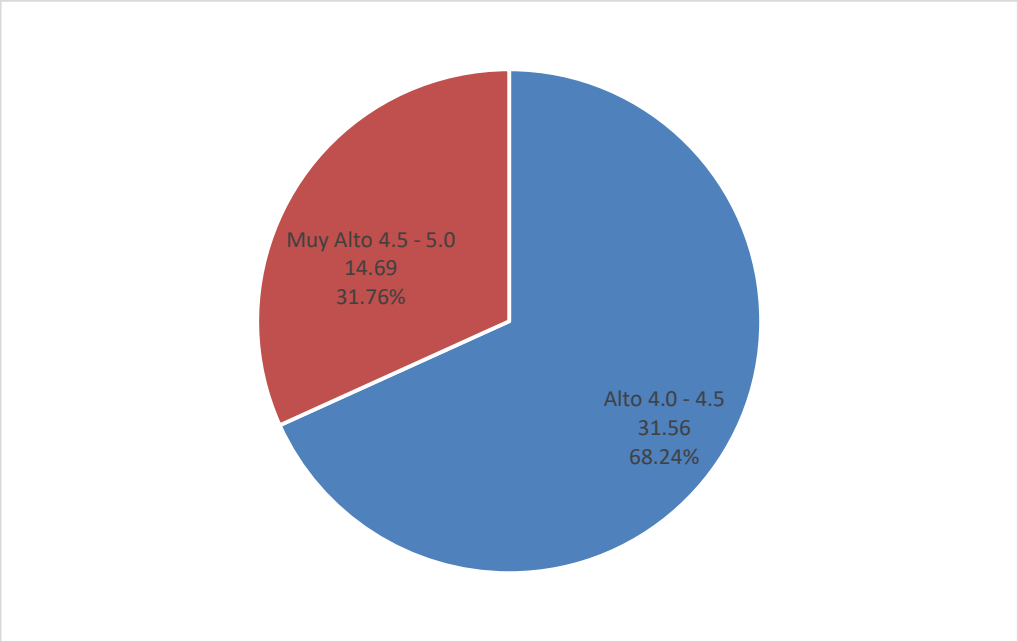
Mapa 21 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Girardot. Elaboración propia.

El casco urbano de Girardot posee un área de 20.41 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad dentro del nivel muy alto de radiación. La cabecera urbana del municipio de Girardot está compuesta por los cascos urbanos de Girardot pueblo y los corregimientos de Barzalosa Piamonte y Piamonte.



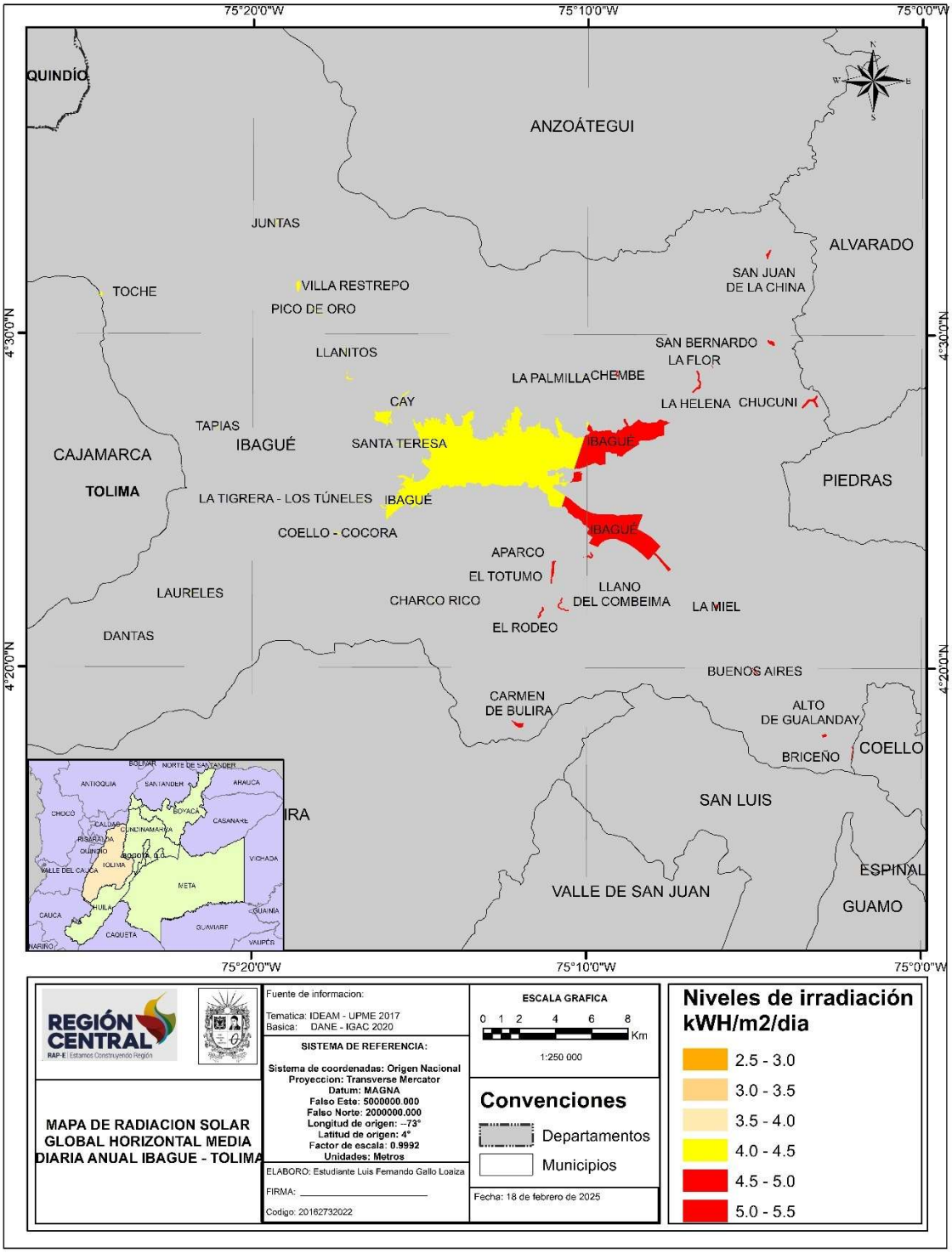
Mapa 22 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Girardot. Elaboración propia.

- **Ibagué**



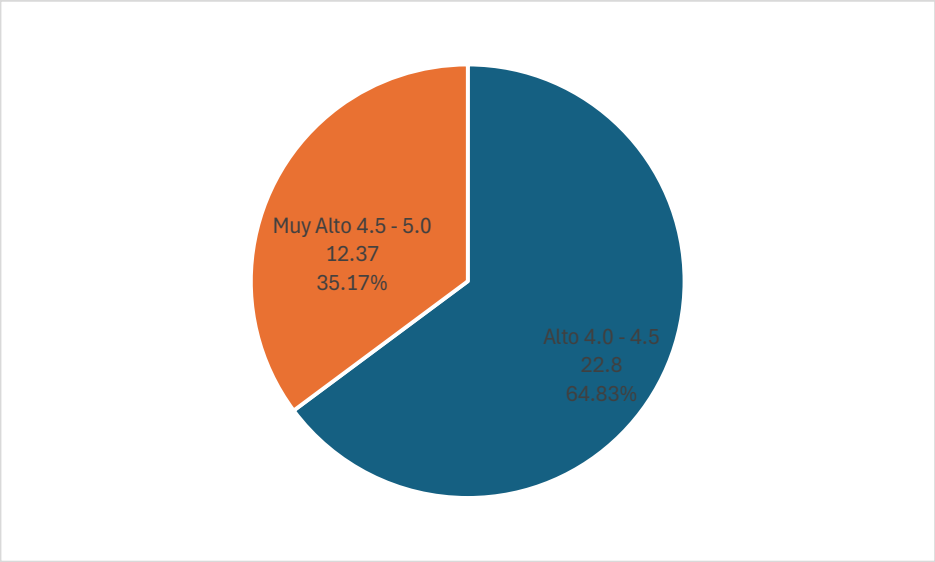
Grafica 42 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Ibagué. Elaboración propia.

El casco urbano de Ibagué posee un área de 46.25 Km2 en conjunto y se encuentra repartido en los niveles alto y muy alto de radiación. El nivel alto posee la mayor parte del territorio con 31.56 Km2 ubicándose en el costado occidental de Ibagué cobijando parte del casco urbano de Ibagué y en los corregimientos o caseríos de Toche, Villa Restrepo, Juntas, Pico De Oro, Pastales Viejo, Pastales Nuevo, Laureles, Dantas, Llanitos, Toche, Llanitos, La Palmilla, Cay, Tapias, Santa Teresa, La Tigrera - Los Túneles, Coello - Cocora, Charco Rico, Ibagué, Santa Teresa. Con 14.69 Km2 al oriente de Ibagué se encuentra el nivel muy alto albergando parte de la zona urbana de Ibagué y los corregimientos o caseríos de Briceño, Buenos Aires, Carmen De Bulira, Alto De Gualanday, Briceño, El Totumo, San Juan De La China, San Bernardo, La Flor, La Helena, Chembe, Chucuni, Aparco, El Rodeo, Aparco, Llano Del Combeima, La Miel.



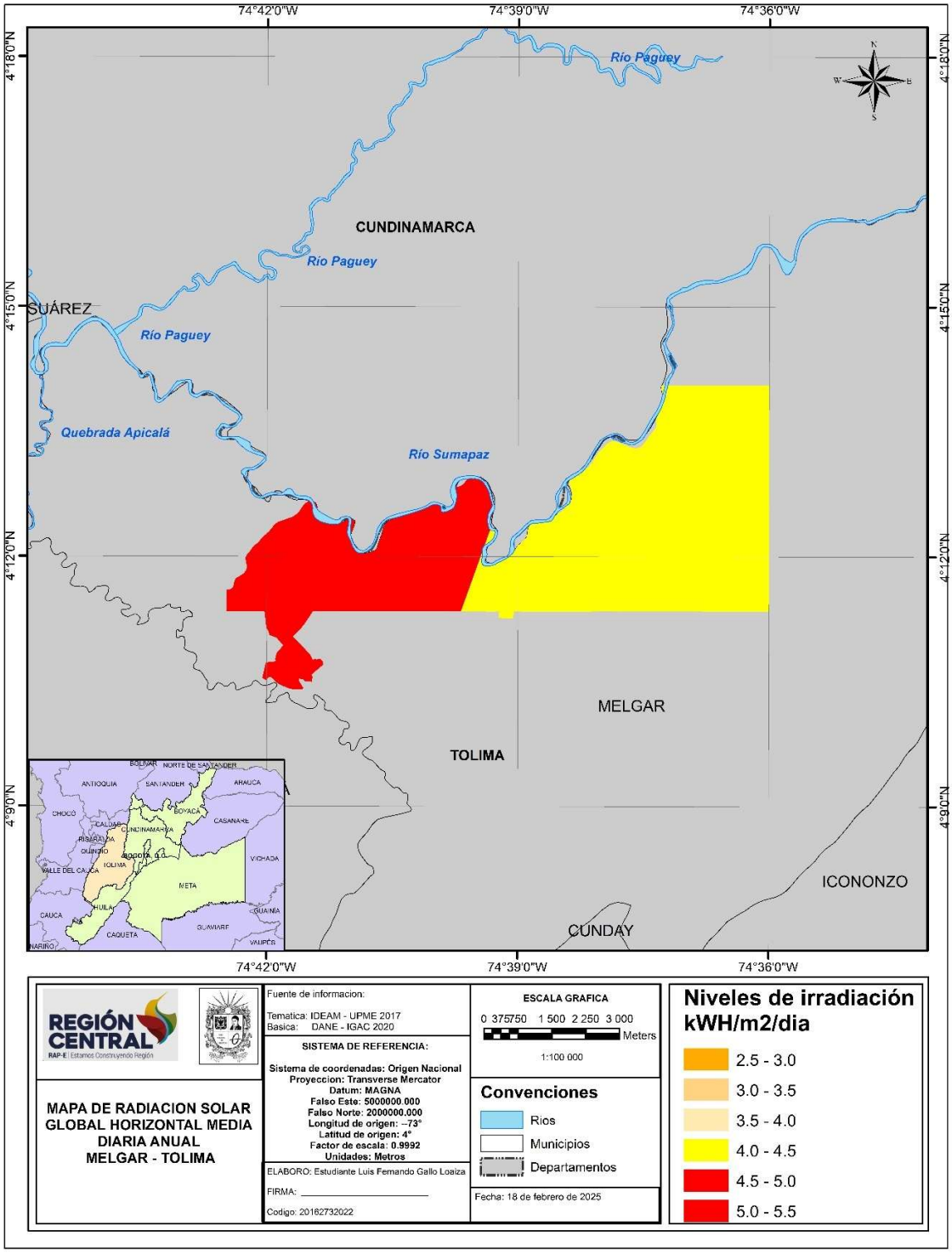
Mapa 23 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Ibagué. Elaboración propia.

- **Melgar**



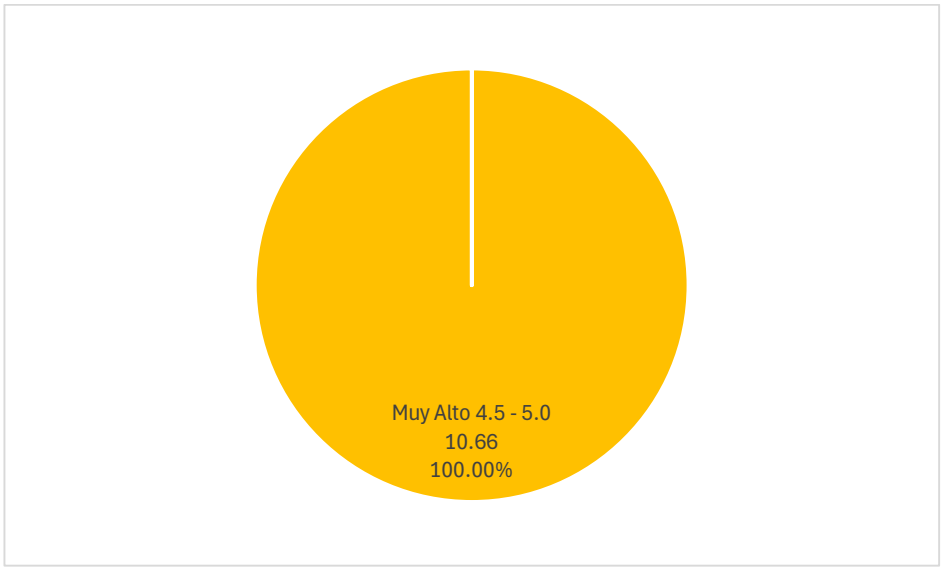
Grafica 43 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Melgar. Elaboración propia.

El casco urbano de Melgar posee un área de 35.17 Km2 en conjunto y se encuentra repartido en los niveles alto y muy alto de radiación. El nivel alto posee la mayor parte del territorio con 22.80 Km2 ubicándose en el costado oriental del municipio y los restantes 12.37 Km2 al costado occidental del casco urbano.



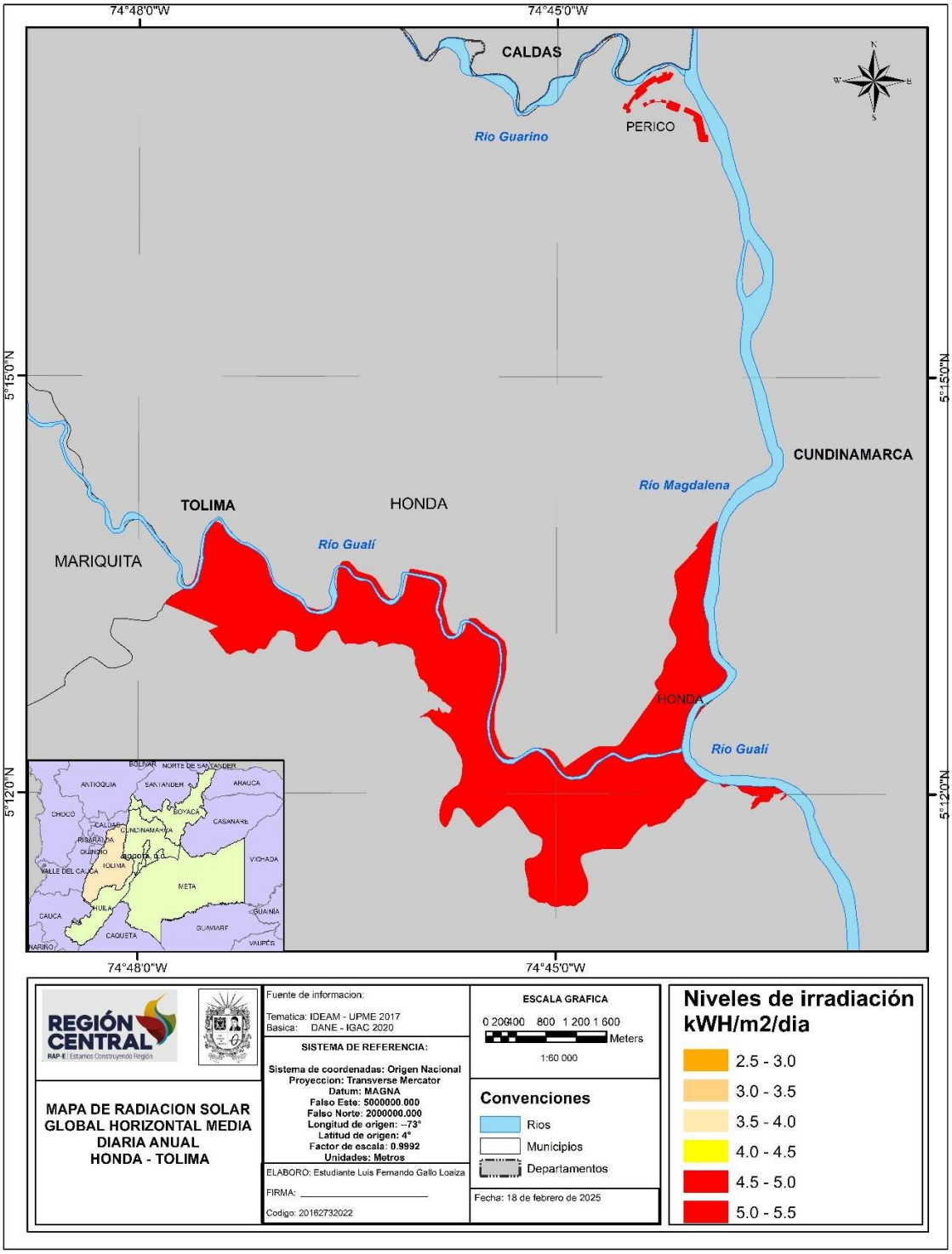
Mapa 24 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Melgar. Elaboración propia.

- **Honda**



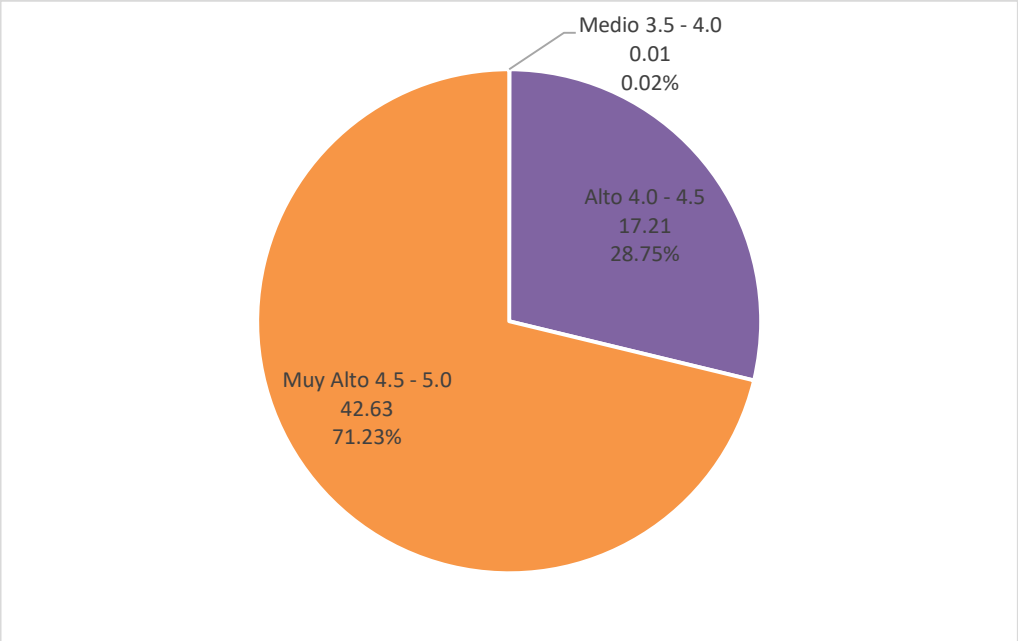
Grafica 44 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Melgar. Elaboración propia.

El casco urbano de Honda posee un área de 10.66 Km2 en conjunto y se encuentra en el nivel muy alto de radiación. El nivel alto posee la mayor parte del territorio con 22.80 Km2 ubicándose en el costado oriental del municipio y los restantes 12.37 Km2 al costado occidental del casco urbano.



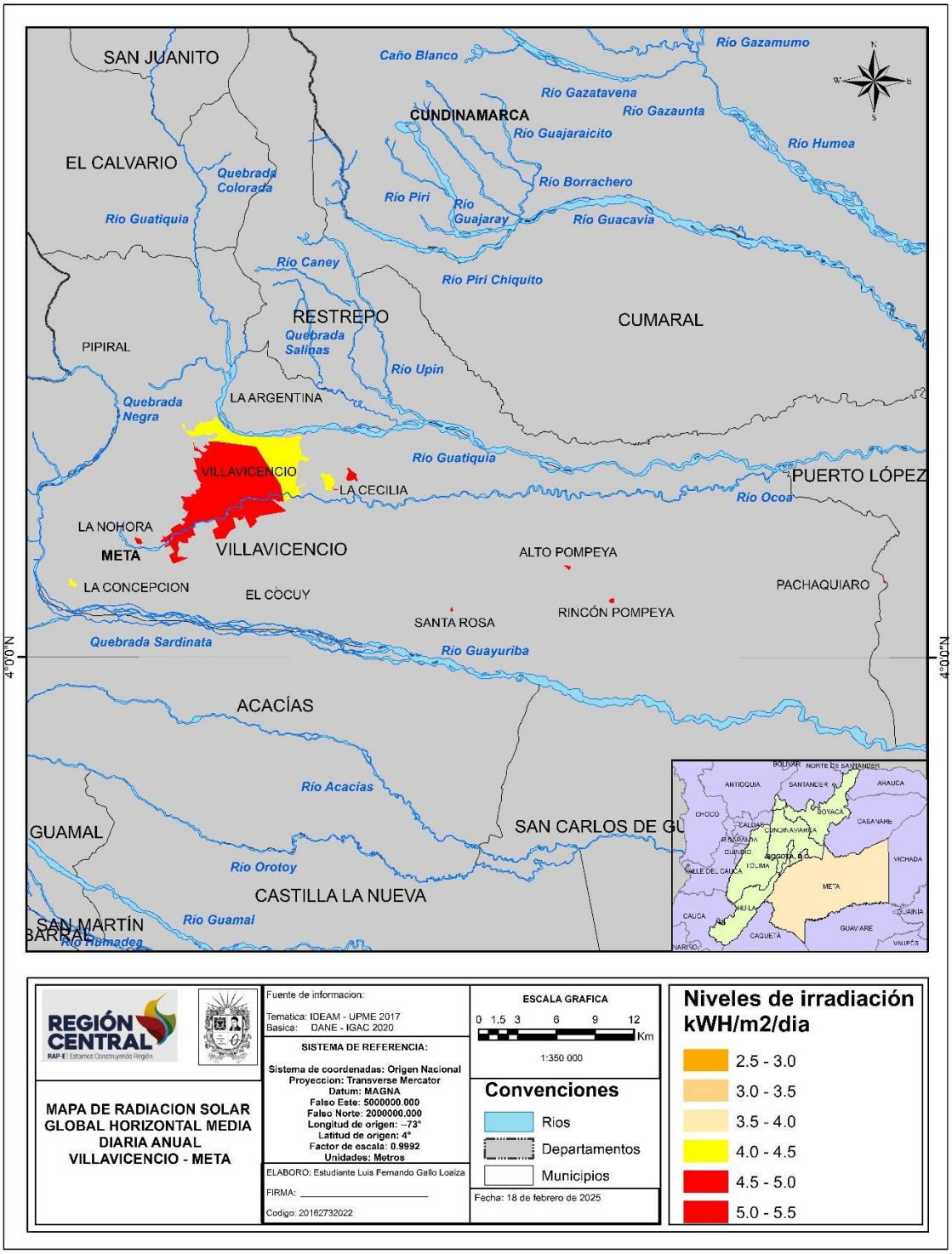
Mapa 25 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Honda. Elaboración propia.

- **Villavicencio**



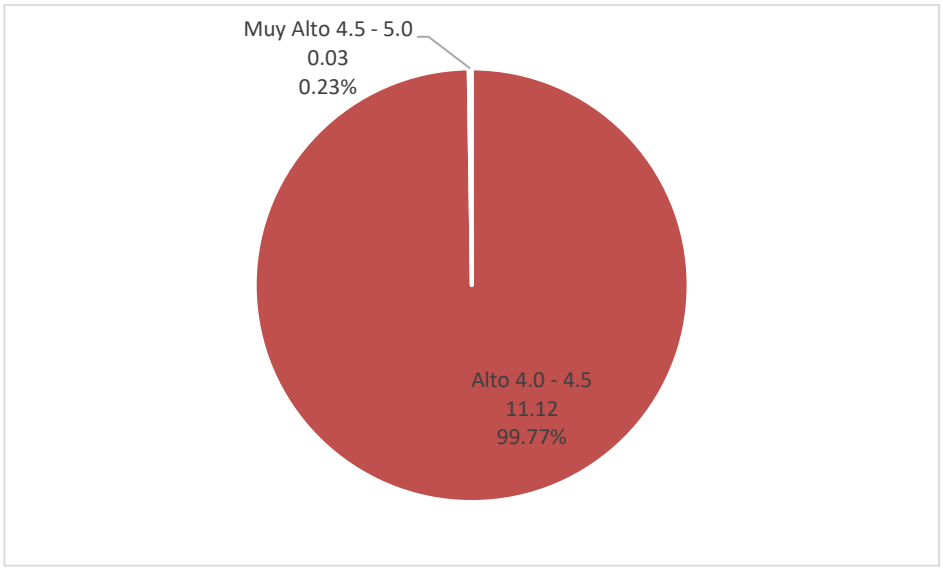
Grafica 45 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Villavicencio. Elaboración propia.

El casco urbano de Villavicencio posee un área de 59.84 Km2 en conjunto y se encuentra repartido en los niveles medio, alto y muy alto de radiación. El nivel muy alto posee la mayor parte del territorio con 42.63 Km2 ubicándose en el costado sur y occidente del municipio abarcando las áreas urbanas de parte de Villavicencio y las cabeceras urbanas de Alto Pompeya, Rincón Pompeya, La Cecilia, La Nohora, San Luis De Ocoa, El Cocuy, Santa Rosa. En segundo lugar se encuentra el nivel alto con 17.21 Km2 ubicados al norte de Villavicencio abarcando parte del casco urbano de Villavicencio y las cabeceras urbanas de Pipiral, La Cecilia, La Concepción. Con un 0.01 Km2 se ubica en nivel medio en la cabecera urbana de la Argentina.



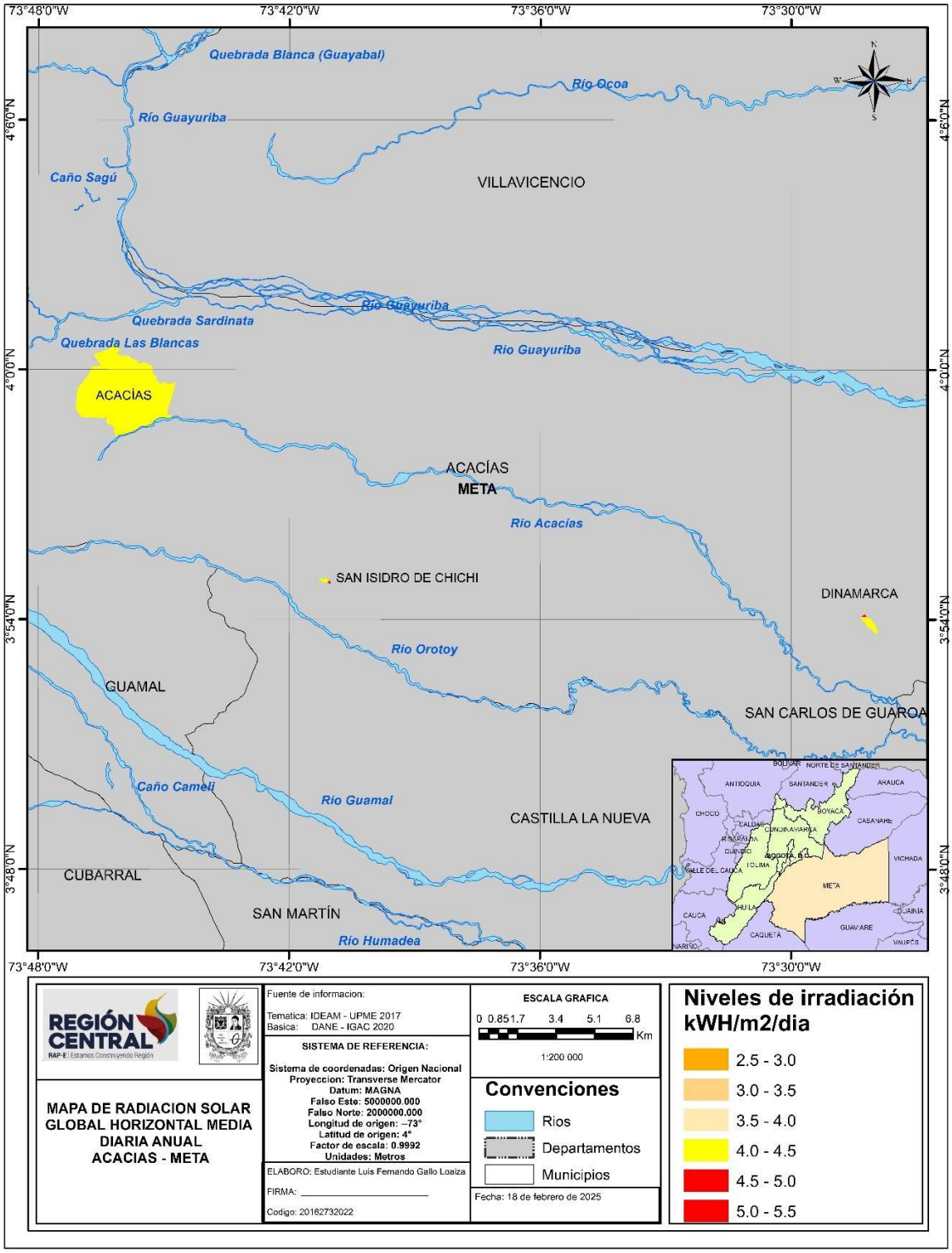
Mapa 26 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Villavicencio. Elaboración propia.

- **Acacias**



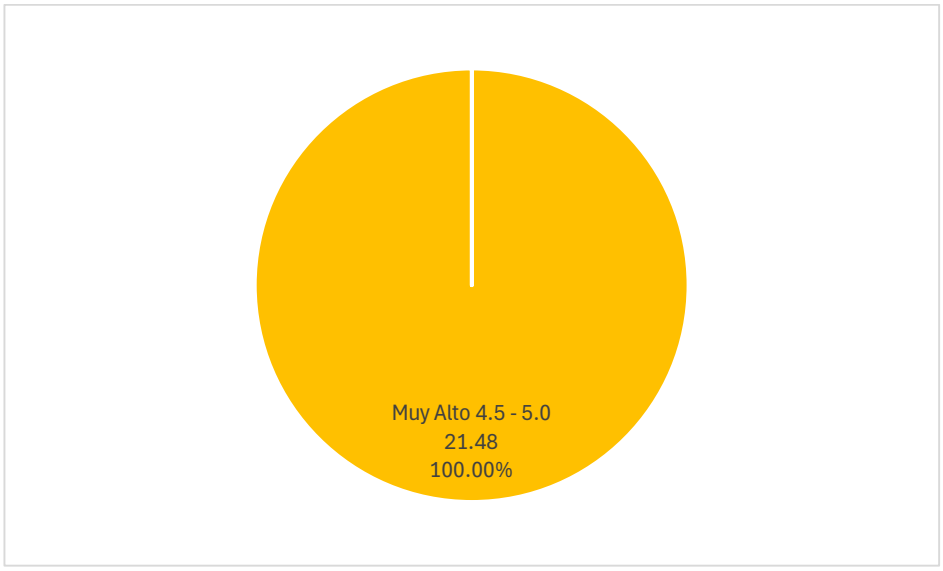
Grafica 46 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Acacias. Elaboración propia.

El casco urbano de Acacias posee un área de 11.15 Km2 en conjunto y se encuentra repartido en los niveles alto y muy alto de radiación. El nivel alto posee la mayor parte del territorio con 11.12 Km2 ubicándose prácticamente en toda el área urbana del municipio abarcando las áreas urbanas de Acacias y las cabeceras urbanas de, Dinamarca, San Isidro De Chichineme. En segundo lugar, se encuentra el nivel muy alto con unas zonas residuales se de las cabeceras urbanas de Dinamarca, San Isidro De Chichineme.



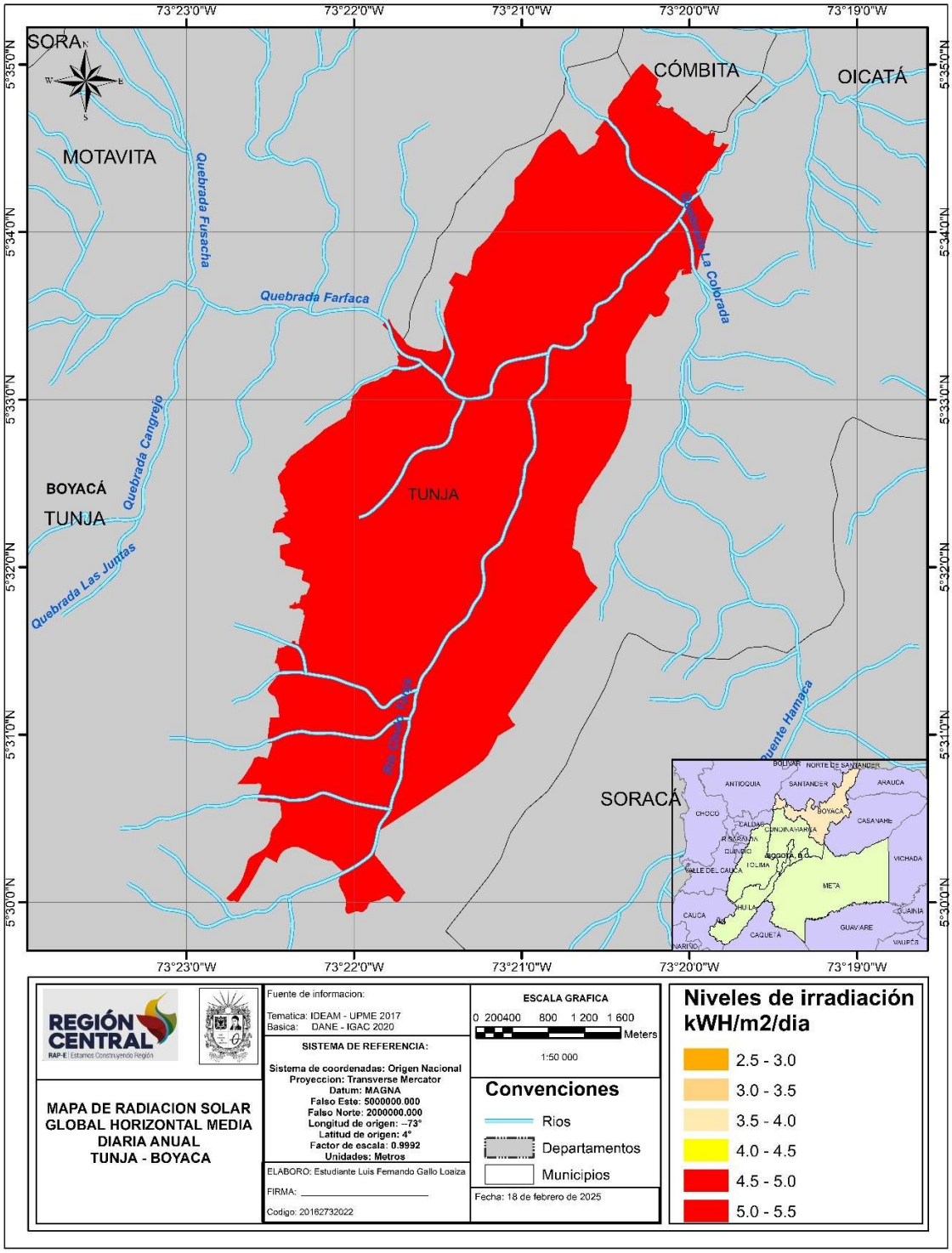
Mapa 27 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Acacias. Elaboración propia.

- **Tunja**



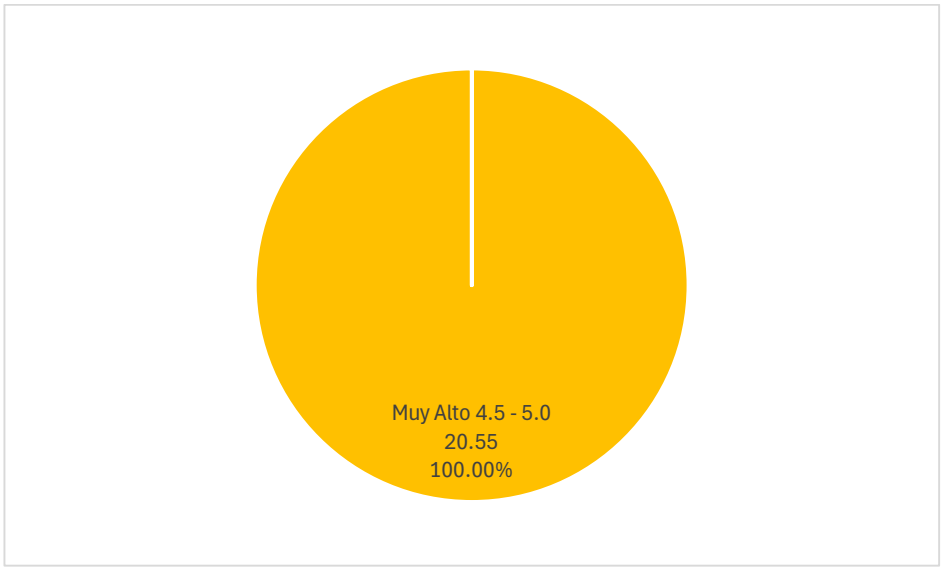
Grafica 47 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Tunja. Elaboración propia.

El casco urbano de Tunja posee un área de 21.48 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad en el nivel muy alto de radiación.



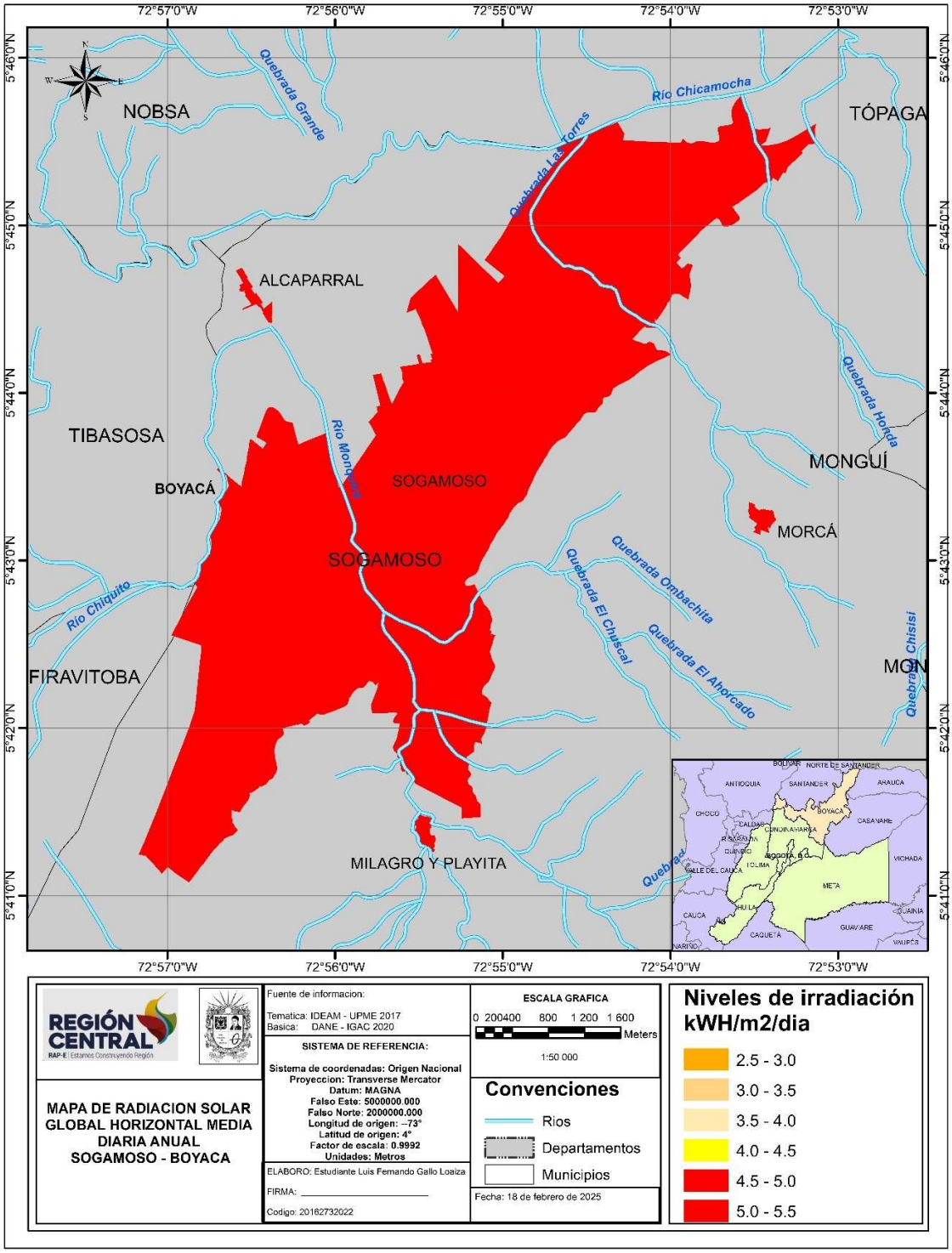
Mapa 28 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Tunja. Elaboración propia

- **Sogamoso**



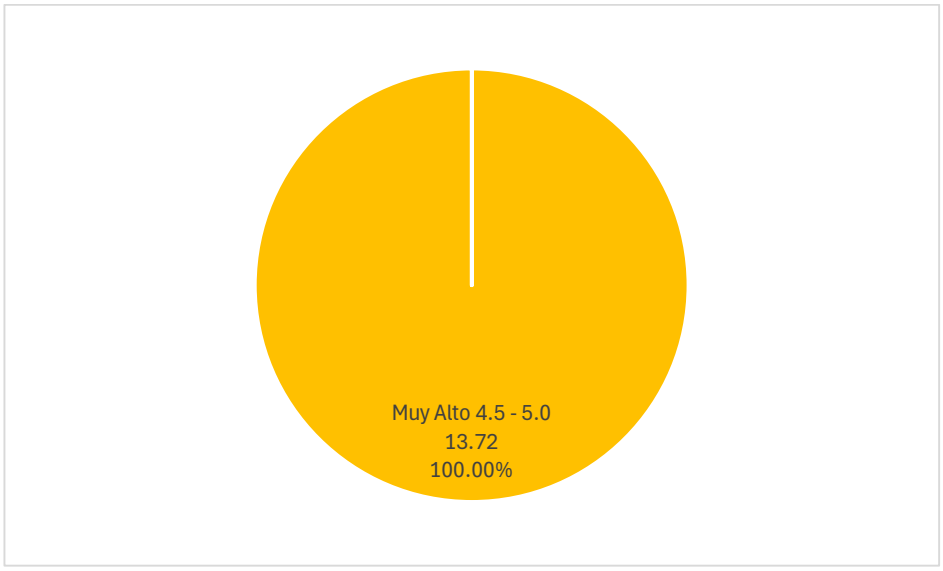
Grafica 48 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Sogamoso. Elaboración propia.

El casco urbano de Sogamoso comprende un área de 20.55 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad en el nivel muy alto de radiación. El casco urbano de Sogamoso incluye el casco urbano de Sogamoso y los centros poblados de Alcaparral, Morcá, Milagro Y Playita



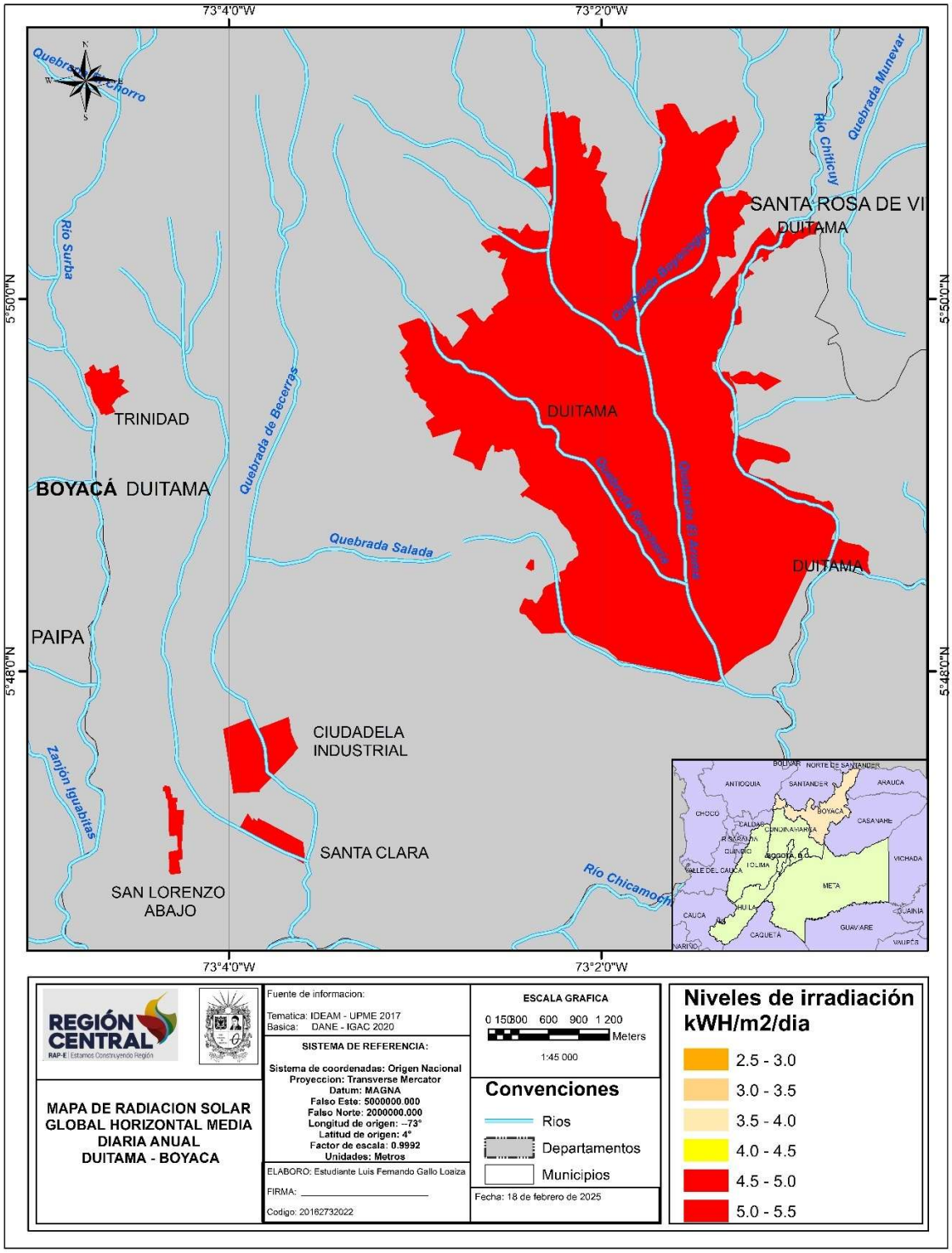
Mapa 29 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Sogamoso. Elaboración propia

- **Duitama**



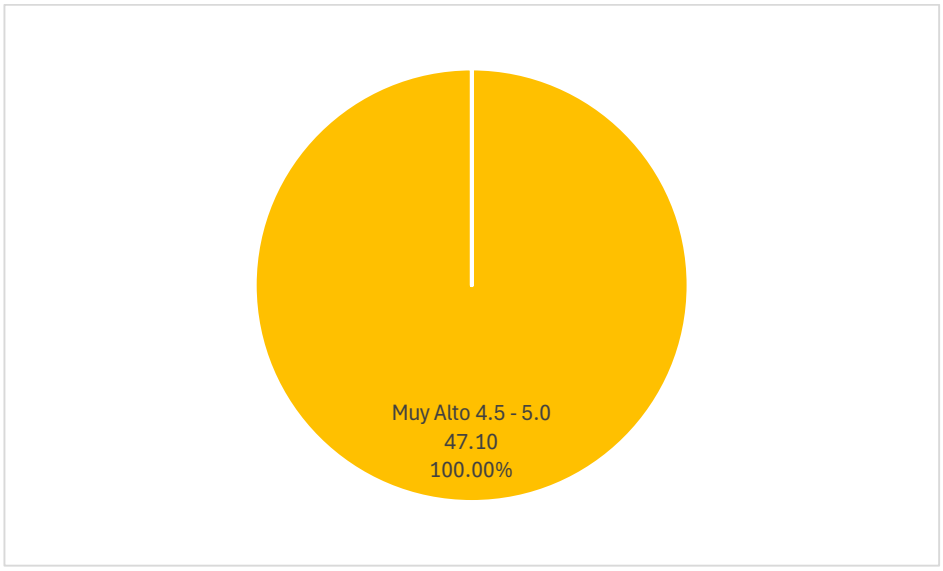
Grafica 49 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Duitama. Elaboración propia.

El casco urbano de Duitama comprende un área de 13.72 Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad en el nivel muy alto de radiación. El casco urbano de Duitama incluye el casco urbano de Duitama y los centros poblados de Trinidad, Ciudadela Industrial, San Lorenzo Abajo, Santa Clara.



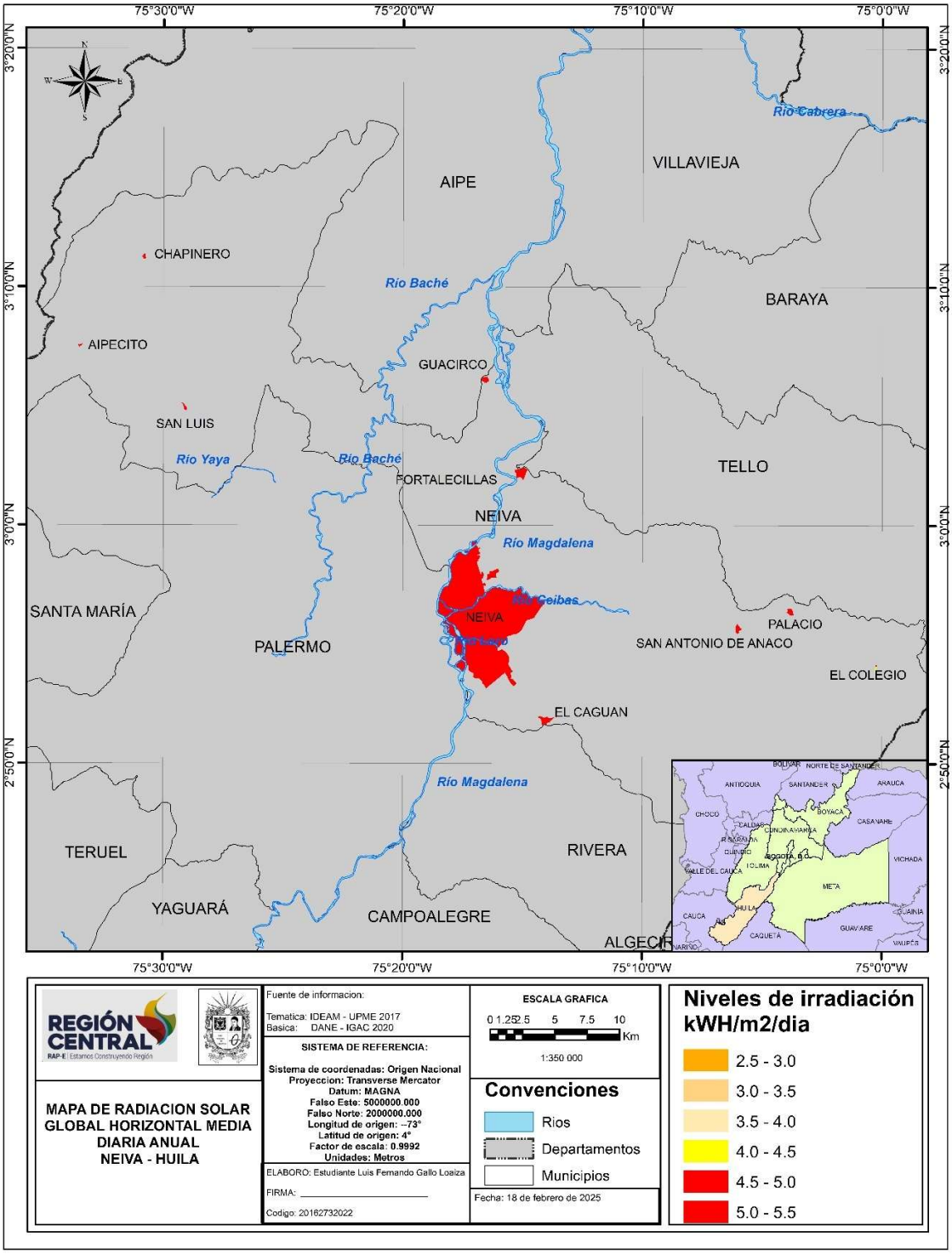
Mapa 30 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Duitama. Elaboración propia

- **Neiva**



Grafica 50 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Neiva. Elaboración propia.

El casco urbano de *Neiva comprende* un área de *47.10* Km2 en conjunto y se encuentra en su totalidad en el nivel muy alto de radiación. Incluye el casco urbano de Neiva y los centros poblados de Aipecito, Chapinero, Guacirco, Fortalecillas, San Antonio De Anaco, El Colegio, El Caguán, Palacio, San Luis,



Mapa 31 Distribución recurso solar sobre el casco urbano de Neiva. Elaboración propia

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realiza geovisor ubicado en la dirección https://udistritalfjc.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=0641ba362a21434eb694d2e59c4911f6 donde se muestra los resultados y shapes del proyecto, con información cartográfica básica que apoye a futuras investigaciones sobre radiación.
- La Región Central de RAP-E muestra una gran disponibilidad de energía solar, resaltando sobre todo zonas con una radiación solar global muy alta o alta, esto la sitúa en una posición de ventaja con respecto al desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica.
- El departamento del Tolima se considera la más sobresaliente de la región, albergando el mayor número de proyectos en ejecución, además de la mayor capacidad instalada de generación solar fotovoltaica, representando aproximadamente el 34% del total de la región.
- EL departamento del Meta tiene un notable potencial solar, sobre todo en su zona norte, pese a las limitaciones de la red de sensores para la recolección precisa de información solar. Esto denota una posibilidad de mejorar significativamente la infraestructura de medición y de esta manera la precisión de los siguientes cálculos.
- En referencia a las fases de desarrollo de los proyectos solares fotovoltaicos documentados ante la UPME, la mayoría de ellos todavía se encuentran en las primeras fases (fases 1 y 2), resaltando la falta de proyectos en fase 3, lo cual refleja un potencial grande todavía por conseguir y desarrollar.
- La distribución del potencial solar dentro de zonas urbanas evidencia posibilidades claras dentro de las principales ciudades de departamentos como Villavicencio, Ibagué y Tunja, ciudades que, de acuerdo a los resultados obtenidos, poseen techos de urbanidad con alto potencial solar que no se ha utilizado.
- Es fundamental aumentar los esfuerzos para la creación y ejecución de proyectos solares fotovoltaicos en el ámbito urbano, particularmente en bienes públicos, como son los colegios, los hospitales y las instalaciones gubernamentales, donde se ha

hallado un considerable potencial de techos urbanos mediante el procedimiento de geoprocesamiento detallado.

- La generación de energía solar por parte de la Región Central está sujeta a la limitada capacidad del sistema interconectado nacional (SIN) y la gestión de excedentes energéticos. En consecuencia, es importante progresar a la modernización y ampliación del SIN con el fin de facilitar la incorporación eficaz de la energía solar generada.
- Se resaltan la importancia de llevar a cabo investigaciones de mayor nivel, particularmente en zonas urbanas y suburbanas, con el fin de aumentar la exactitud y garantizar la viabilidad de proyectos solares en la región central de RAP-E

9. BIBLIOGRAFIA

Alubuild. (15 de Enero de 2024). *Alubuild*. Obtenido de https://alubuild.com/es/techos-solares/

Autosolar. (9 de Marzo de 2024). *Autosolar*. Obtenido de https://autosolar.co/energia-solar/granjas-solares-en-colombia#:~:text=Las%20granjas%20solares%20son%20instalaciones%20a%20gran%20escala,m%C3%A1s%20tarde%20se%20convierte%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20utilizable.

BALLESTEROS, H. O., FONSECA, O. S., & LESMES, H. J. (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia.* Bogotá D.C, Colombia: IDEAM.

Blanco-Cano, X., & Kajdic, P. (2009). El sol, nuestra estrella. *Revista Digital Universitaria, 10*.

Celsia. (24 de 03 de 2017). *Celsia puso en operación el primer techo solar con beneficios de ley*. Obtenido de https://www.celsia.com/es/noticias/celsia-puso-en-operacion-el-primer-techo-solar-con-beneficios-de-ley/

Celsia. (21 de 06 de 2018). *Racafé y Celsia instalan primer techo solar en el Huila*. Obtenido de https://www.celsia.com/es/noticias/racafe-y-celsia-instalan-primer-techo-solar-en-el-huila/

Celsia. (23 de Agosto de 2023). *Celsia*. Obtenido de https://www.celsia.com/es/noticias/celsia-ha-instalado-94-sistemas-solares-en-los-techos-de-viviendas-y-empresas-en-tolima/

dsisolar. (7 de 12 de 2018). *Mapas de recursos solares de Sudamérica*. Obtenido de https://www.dsisolar.com/info/solar-resource-maps-of-south-america-31088568.html

Ecopetrol. (22 de Octubre de 2021). *Ecopetrol.* Obtenido de https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/grupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando

ecopetrol. (22 de 10 de 2021). *Grupo Ecopetrol, Cenit y AES pusieron en operación el Parque Solar San Fernando en el Meta*. Obtenido de https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/grupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando

Ecopetrol. (15 de Enero de 2023). *Ecopetrol*. Obtenido de https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/ecopetrol-y-aes-inauguraron-ecoparque-solar-en-huila

ectricol. (s.f.). *Granja Solar Dulima, Flandes Tolima – Celsia*. Obtenido de https://www.ectricol.com/project/granja-solar-dulima-flandes-tolima-celsia/

Enel. (18 de Abril de 2018). *Enel.* Obtenido de https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/medios/distribuci%C3%B3n/2018/abril/Comestibles-Italo-y-Codensa-desarrollaron-el-proyecto-de-energia-solar-mas-grande-de-Bogota.pdf

enelgreenpower. (8 de 04 de 2019). *Enel Green Power inaugura El Paso Solar, la planta fotovoltaica más grande de Colombia*. Obtenido de https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2019/04/planta-fotovoltaica-el-paso-colombia-puesto-marcha

enelgreenpower. (s.f.). *Parque solar La Loma, Colombia*. Obtenido de https://www.enelgreenpower.com/es/proyectos/operativos/parque-solar-la-loma

GacetaRegional. (11 de 5 de 2022). *Lafayette tendrá el techo solar más grande de Colombia*. Obtenido de https://www.gacetaregional.com/sitegr/lafayette-tendra-el-techo-solar-mas-grande-de-colombia/

Greenyellow. (Enero de 2022). *greenyellow.co*. Obtenido de https://greenyellow.co/proyecto/centro-comercial-paseo-villa-del-rio/

Greenyellow. (15 de Enero de 2022). *greenyellow.co*. Obtenido de https://greenyellow.co/proyecto/premium-outlet-arauco-sopo/

Greenyellow. (21 de Diciembre de 2024). *Greenyellow*. Obtenido de https://greenyellow.co/el-parque-solar-vasconia-construido-por-greenyellow-para-ocensa-ya-entro-en-operacion/

Guerrero Albarracin, A. M., & Castaño Camacho, S. J. (1 de Mayo de 2023). *Observatorio de desarrollo economico.* Obtenido de observatorio.desarrolloeconomico.gov.co

Guzmán, X. (2020). *Mercacentro instala 360 paneles solares*. Obtenido de https://tolimaonline.com/mercacentro-instala-360-paneles-solares/

IDEAM, UPME. (2017). *Atlas de Radiacion Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia.* Bogota DC: IDEAM.

Infante, C. (2010). *Guía para la presentación de proyectos de investigación.* Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

IPSE. (15 de Marzo de 2025). *ipse.gov.co*. Obtenido de https://ipse.gov.co/mapa-del-sitio/proyectos-ipse/proyectos-fanzi/

IRENA. (2024). *Renewable capacity statistics 2024.* Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

LA Network Ciudades. (29 de 03 de 2017). *Centro comercial en Envigado (Colombia) ya cuenta con su primer techo solar*. Obtenido de https://lanetwork.org/centro-comercial-envigado-colombia-ya-cuenta-primer-techo-solar/

La Republica. (22 de Junio de 2018). *La Republica*. Obtenido de https://www.larepublica.co/infraestructura/celsia-instalo-el-techo-solar-de-autogeneracion-numero-25-en-planta-de-racafe-2741032

la republica. (6 de 03 de 2023). *Ya hay 38 proyectos de energía solar en funcionamiento en el territorio nacional*. Obtenido de https://www.larepublica.co/economia/ya-hay-38-proyectos-de-energia-solar-en-funcionamiento-en-todo-el-territorio-nacional-3560668

minenergia. (13 de 2 de 2024). *La Transición Energética avanza en Colombia: En Cesar, se inauguró el Parque Solar La Loma con 387 hectáreas de paneles solares*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-avanza-en-colombia-en-cesar-se-inaugur%C3%B3-el-parque-solar-la-loma-con-387-hect%C3%A1reas-de-paneles-solares/#:~:text=El%20parque%20entregar%C3%A1%20420%20

Ministerio de Minas y Energia. (6 de Febrero de 2023). *Minenergia*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/ministra-irene-v%C3%A9lez-torres-inaugur%C3%B3-tres-parques-solares-en-tolima-que-generar%C3%A1n-energ%C3%ADa-para-m%C3%A1s-de-40000-hogares-al-a%C3%B1o/

Ministerio de Minas y Energia. (9 de Septiembre de 2024). *www.minenergia.gov.co*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/el-

ministerio-de-minas-y-energ%C3%ADa-el-ministerio-de-vivienda-ciudad-y-territorio-y-el-fondo-nacional-del-ahorro-se-unen-para-financiar-soluciones-solares-fotovoltaicas-a-trav%C3%A9s-de-cr%C

Ocaciones, A. (2020). *GEORREFERENCIACIÓN DE ZONAS DE MAYOR POTENCIAL SOLAR .* Bogota DC.

Redacción Cromos. (18 de 04 de 2022). *Lafayette, la segunda empresa con el techo solar más grande de Colombia*. Obtenido de https://www.elespectador.com/cromos/moda/lafayette-la-segunda-empresa-con-el-techo-solar-mas-grande-de-colombia/

revista semana . (22 de 10 de 2021). *Entró en operación el Parque Solar San Fernando en el Meta, que pertenece al Grupo Ecopetrol*. Obtenido de https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/entro-en-operacion-el-parque-solar-san-fernando-en-el-meta-que-pertenece-al-grupo-ecopetrol/202115/

Rios, A. (10 de 11 de 2018). *Feriaexposolar.* Obtenido de https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2018/11/10-Introducci%C3%B3n-Modelos-de-Negocio-Energ%C3%ADa-Solar-aRenergy-compressed.pdf

SectorElectricidad. (22 de 06 de 2021). *Techos con energía solar siguen brillando en Colombia en 2021 sector logístico portuario destaca*. Obtenido de https://www.sectorelectricidad.com/34356/techos-con-energia-solar-siguen-brillando-en-colombia-en-2021-sector-logistico-portuario-destaca/

SolarPower Europe . (2024). *Global Market Outlook For Solar Power 2024 – 2028.*

UPME. (2018). *Registro de proyectos de generacion de energia electrica .*

UPME. (02 de 03 de 2025). *SIEL*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/siel

UPME, U. d. (2024). *Informe de Registro de Proyectos de Generación.* Colombia.

Urrea, D. I. (21 de Febrero de 2025). *Enter.co*. Obtenido de https://www.enter.co/colombia/99-mw-de-sol-para-colombia-inauguran-parque-solar-que-impulsa-la-energia-limpia-en-cundinamarca-a-quienes-beneficiara/