

CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DEL
DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

JUAN DAVID CORTÉS GÓMEZ

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN SOSTENIBLE DE LA ENERGÍA
BOGOTÁ D.C

2019

CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DEL
DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

JUAN DAVID CORTÉS GÓMEZ

Tesis de Investigación

Dirigida por

Dr.-Ing. Carlos Andrés Forero Núñez

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GESTIÓN SOSTENIBLE DE LA ENERGÍA

BOGOTÁ D.C

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, junio de 2019

DEDICATORIA

Como fruto del esfuerzo y la dedicación en el actuar humano, este trabajo de grado representa el despertar y la identificación en el momento presente, y su mensaje es el de ayudar y hacer el bien, sin mirar a quien.

La vida se basa en la gratitud por lo vivido y lo aprendido, por eso, este trabajo de grado, está dedicado a mi familia: Nataly Paola, Claudia Esmeralda, Manuel Eduardo y Juan Manuel, quienes en el amor incondicional han cuidado de mi ser y apoyado cada uno de mis sueños, y me han invitado a ser y disfrutar de mi humanidad en libertad y respeto.

Ma epuse de meu Coração, esta nota tiene el objetivo de agradecer la vida que un día construimos en el amor incondicional y además manifestar mi gratitud y admiración por tu existencia, por tus cuidados, por estar en las buenas y en todas, “Que alegría es poder dedicarte nuestro trabajo”. Gracias por enseñarme que la vida florece a diario y que como el Tao nos indica: “en la vida se cosecha aquello que se siembra”. Gracias por tu ayuda maravillosa en mi existir. Te amo con la fuerza creadora del Universo y los Multiuniversos.

Por último y con el más sincero sentimiento quiero agradecer a cada una de las personas que de alguna forma tuvo que ver en mi proceso de formación como Maestro en la Gestión Sostenible de la Energía.

Saludos y Mil Bendiciones,

Juan David Cortés Gómez

AGRADECIMIENTOS

Carlos Andrés Forero Núñez, por guiarme en el proceso de consolidación de la tesis

Henry Oswaldo Benavidez Ballesteros, por su amabilidad, tiempo y disposición.

Jorge Eliecer Rodríguez, por la perseverancia y el trabajo continuo.

Manuel Eduardo Cortés Gómez, por su generosidad y comprensión en este proceso.

Isaac Dynner Rezonzew, por su apoyo e impulso constante en mi proceso de formación.

Nataly Paola Galán Pérez, por ser la inspiración y motivación de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
JUSTIFICACIÓN	11
CAPÍTULO 1: EL RECURSO SOLAR Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO	12
CAPÍTULO 2: COMPORTAMIENTO DEL RECURSO SOLAR EN NORTE DE SANTANDER: CÚCUTA, OCAÑA Y PAMPLONA	24
CAPÍTULO 3: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER.....	52
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Supercúmulo de Laniakea en el plano ecuatorial supergaláctico	12
Figura 2. La Vía Láctea y nuestra ubicación.	14
Figura 3. Formas de irradiación	16
Figura 4. Fuentes de Energía Primaria.....	17
Figura 5. Pirheliómetro Eppley H-F y Unidad de Control 405.....	23
Figura 6. Piranómetros Eppley modelo PSP.....	23
Figura 7. Estaciones meteorológicas en Colombia.	26
Figura 8. Radiación solar global, Estación Aeropuerto Camilo Daza.	36
Figura 9. Radiación solar global, Universidad Francisco de Paula Santander.....	36
Figura 10. Precipitación Cúcuta, 1981-2010	37
Figura 11. Radiación solar global, Aguas de la Virgen, Ocaña.	38
Figura 12. Precipitación Municipio de Ocaña, 1981-2010	38
Figura 13. Radiación solar global, Estación Universidad de Pamplona.	39
Figura 14. Precipitación Municipio de Pamplona, 1981-2010	39
Figura 15. Promedios de la radiación solar de los municipios de Cúcuta, Ocaña y Pamplona.	40
Figura 16. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teoricos para el municipio de Cúcuta.	49
Figura 17. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teoricos para el municipio de Ocaña	50
Figura 18. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teoricos para el municipio de Pamplona.....	51
Figura 19. Selección de Datos estaciones meteorológicas.....	53
Figura 20. Cargue de mapa base de municipios.....	53
Figura 21. Resultados de la georreferenciación de las estaciones IDEAM.	54
Figura 22. Selección de estaciones cercanas al Departamento Norte de Santander.....	54
Figura 23. Concepto de vecindad del método IDW.	55
Figura 24. Proceso de Interpolación IDW en Arcgis.	55
Figura 25. Análisis Multitemporal del potencial energético de Norte de Santander (enero- junio).....	58
Figura 26. Análisis Multitemporal del potencial energético de Norte de Santander (julio- diciembre)	61
Figura 27. Potencial energético del Departamento Norte de Santander.	64
Figura 28. Análisis del Potencial Energético Solar del Departamento Norte de Santander. ..	65
Figura 29. Potencial energético de Colombia.	66

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Proceso Nuclear de Sol.	15
Ecuación 2. Transmitancia atmosférica	19

Ecuación 3. Parámetros de corrección de altura y clima	20
Ecuación 4. Calculo del Coseno del ángulo cenital	20
Ecuación 5. Calculo de la declinación solar	21
Ecuación 6. Calculo de la declinación solar	21

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Promedio de Radiación en Colombia por región	19
Tabla 2. Factores de Corrección para algunos climas.....	20
Tabla 3. Instrumentos meteorológicos para medir la radiación	22
Tabla 4 Variables e indicadores territoriales del Departamento Norte de Santander.	24
Tabla 5. Municipios localizados en el piso térmico cálido	25
Tabla 6. Municipios localizados en el piso térmico templado	25
Tabla 7. Municipios localizados en el piso térmico frío	26
Tabla 8. Listado de Estaciones presentes en el Departamento Norte de Santander.....	27
Tabla 9. Estaciones meteorológicas presentes en los 3 municipios seleccionados.....	28
Tabla 10. Estaciones meteorológicas en Cúcuta, Ocaña y Pamplona.....	28
Tabla 11. Promedio horario de la radiación solar Estación Universidad Francisco de Paula Santander(UFPS).	30
Tabla 12. Promedio horario de la radiación solar Estación Aeropuerto Camilo Daza	31
Tabla 13. Promedio horario de la radiación solar estación Aguas de la Virgen, Ocaña	32
Tabla 14. Promedio horario de la radiación solar Universidad de Pamplona.....	33
Tabla 15. Promedios anuales de radiación solar Estación UFPS.....	34
Tabla 16. Promedios anuales de radiación solar Estación Aeropuerto Camilo Daza	35
Tabla 17. Promedios anuales de radiación solar Estación Aguas de la Virgen	35
Tabla 18. Promedios anuales de radiación solar Estación Universidad de Pamplona	35
Tabla 19. Variación de la radiación solar en el periodo mayo-junio.	41
Tabla 20. Comparación radiación de máximos y mínimos por mes.	41
Tabla 21. Comparación de radiación solar mes de diciembre.....	42
Tabla 22. Irradiación horaria para la ciudad de Cúcuta por medio del método Hottel.	43
Tabla 23. Irradiación horaria para la ciudad de Cúcuta datos IDEAM.....	44
Tabla 24. Irradiación horaria para la ciudad de Ocaña por medio del método Hottel.	45
Tabla 25. Irradiación horaria para la ciudad de Ocaña datos IDEAM.....	46
Tabla 26. Irradiación horaria para la ciudad de Pamplona por medio del método Hottel.....	47
Tabla 27. Irradiación horaria para la ciudad de Pamplona datos IDEAM.	48
Tabla 28. Listado de estaciones seleccionadas en el Departamento y sus vecindades.	56

INTRODUCCIÓN

Tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015 en París, la transición energética, se ha convertido en una de las temáticas de mayor interés e importancia en el ámbito internacional, por los compromisos adquiridos frente a la reducción y control de la temperatura del planeta. Según la International Energy Agency (IEA), el consumo total de energías renovables en el mundo, para el año 2017 fue del 24%. Adicionalmente, se estima que dicho consumo será del 30% para el año 2023, siendo la energía solar fotovoltaica aquella que lidera el crecimiento en el sector eléctrico (IEA, 2018).

La estimación del potencial energético, entendido como la capacidad con la que cuenta una extensión de territorio para el aprovechamiento de las fuentes primarias de energía y su posterior conversión en energía calorífica y/o eléctrica, es fundamental para consolidar las fuentes primarias de energía, también llamadas renovables, como sustento de la generación de electricidad.

Colombia, situada sobre la línea del Ecuador, presenta una ubicación espacial que favorece la producción de energía eléctrica con base en el recurso solar, permitiendo la combinación con el recurso hídrico para consolidar una matriz eléctrica diversa que garantice la seguridad y el abastecimiento energético sostenible del país. En consecuencia, en el año 2014 se sancionó la Ley 1715 de 2014 “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”.

La Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) reporta a febrero de 2019 que en los cuatro años de vigencia de la ley 1715 del 2014, se aprobaron 387 proyectos de Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCE) que generarán una capacidad instalada de 2.019,209MW, de los cuales 353 son de tipo solar, es decir, el 91,2% (UPME, 2019, pág. 3). Para el caso del departamento Norte de Santander se encuentran 10 proyectos aprobados con una capacidad instalada de 0,215 MW, representando el 0,01% de la producción nacional esperada (UPME, 2019, pág. 4).

Así pues, la pregunta problema de la presente investigación busca caracterizar el potencial energético anual del recurso solar del Departamento Norte de Santander, teniendo en cuenta la información meteorológica existente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) hasta diciembre del 2018. Lo anterior, con el fin de brindar insumos detallados que permitan el máximo aprovechamiento del potencial energético solar existente en el departamento y con ello incentivar el análisis de tecnologías adecuadas a este recurso.

De este modo, el trabajo de investigación se divide en tres capítulos principales, que atienden a cada uno de los objetivos específicos de la investigación. El capítulo 1 busca comprender los conceptos principales relacionados al recurso solar y a su potencial energético. En este se abordan los conceptos básicos de radiación solar, potencial energético, estimación y medición de la radiación solar e instrumentación utilizada para la captura de información de este recurso.

El capítulo 2 tiene como fin, analizar el comportamiento del recurso solar en el departamento de Norte de Santander, para lo cual la estrategia de investigación utilizada retoma los pisos térmicos: cálido, templado y frío. Así mismo, se define a Cúcuta, Ocaña y Pamplona como tres municipios representativos de las características de cada piso térmico, que, además, cuentan con fuentes de información verídica y actualizada. En el capítulo se describe la metodología del análisis de la información, teniendo en cuenta la identificación y selección de estaciones meteorológicas, así como el procesamiento y análisis de datos.

El capítulo 3 tiene como objetivo definir el potencial energético solar del departamento de Norte de Santander. Lo anterior, mediante la interpolación IDW del Software ArcGIS y el análisis multitemporal de irradiación solar, aportando una breve explicación del uso y aplicación del potencial energético solar como nueva fuente de beneficios para el desarrollo humano de la población del departamento.

La presente investigación finaliza con una serie de recomendaciones y conclusiones que buscan resaltar el alto potencial energético solar del departamento de Norte de Santander, motivando la generación de nuevos estudios que detallen y enriquezcan el uso y aplicación de nuevas tecnologías aplicadas al recurso solar y que favorezcan el máximo aprovechamiento del mismo.

JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía renovable se ha convertido en tendencia mundial y esto ha llevado a la reducción de los costos de las tecnologías y su masificación, pero no basta con que sea económico o sea masivo cuando se trata de generar electricidad eficientemente, eso quiere decir que cualquier proceso o intención de generación por medio de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) debe estar enmarcado en un proceso de planificación que permita seleccionar las zonas con mayores potenciales de acuerdo al tipo de recurso y tecnología más acorde a sus características.

Teniendo en cuenta el proceso de planificación mencionado anteriormente, es fundamental contar con información del comportamiento del recurso renovable, ya que es una gran herramienta para la toma precisa de decisiones, aportando las cantidades del recurso solar, sus características y su distribución territorial para posteriormente ser implementada en proyectos basados en este tipo de generación. Es aquí, en donde la teoría construida se convierte en práctica al aplicar los datos que se generaran en esta investigación.

También se destaca que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) cuenta con el Atlas de radiación solar de Colombia. Sin embargo, para el departamento Norte de Santander no se cuenta con un análisis detallado por departamento que permita entender las características específicas de este recurso.

Finalmente, esta investigación será un insumo y herramienta para el departamento Norte de Santander, que permita y promueva el aprovechamiento de las FNCER basado en el comportamiento del recurso solar y la estimación del potencial energético departamental, por medio de análisis gráficos y mapas de irradiación de dicho potencial.

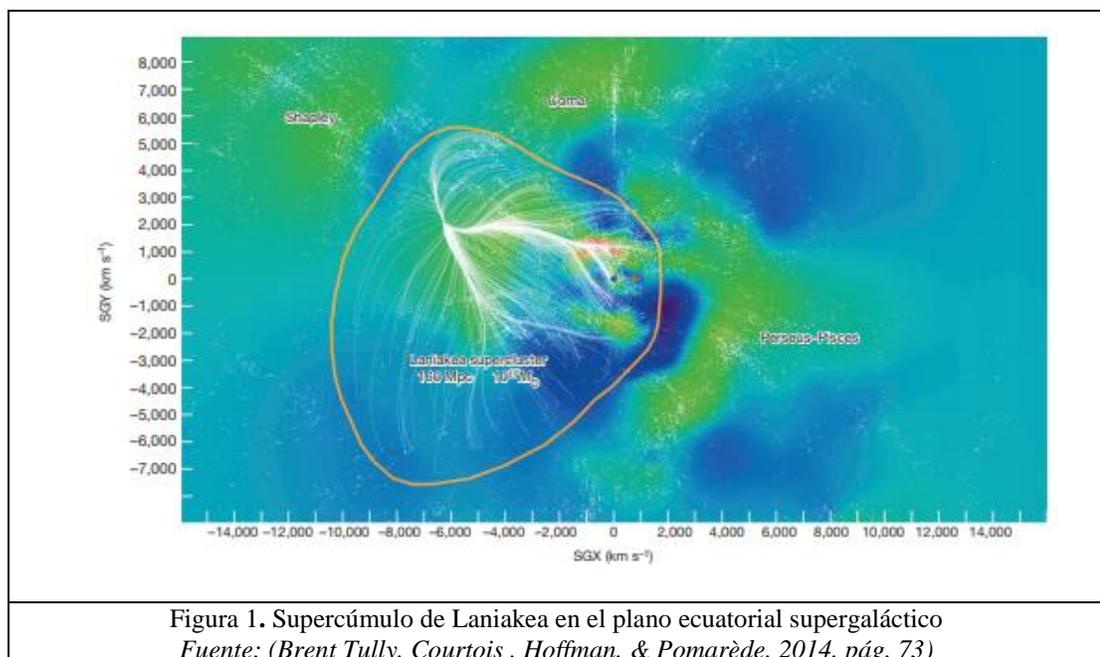
CAPÍTULO 1: EL RECURSO SOLAR Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO

Para entender la importancia y el lugar de la estrella líder del sistema solar al que pertenece el planeta tierra, es relevante conocer su ubicación con respecto al universo y su formación energética.

El universo es una enorme extensión de espacio que contiene toda la materia y toda la energía que existe. Además, contiene todas las galaxias, estrellas y planetas; el tamaño exacto del universo es desconocido, aunque se cree que el universo se encuentra aún en expansión, como resultado de una violenta y poderosa explosión que ocurrió hace 13.700 millones de años (NASA, 2019).

Ahora bien, un concepto básico en la Astronomía indica que a mayores escalas las galaxias se siguen distribuyendo en cúmulos de mayor tamaño. A continuación, se detalla el Supercúmulo de Laniakea en el cual se ubica, a su vez, el Supercúmulo de Virgo, el Grupo Local de Estrellas y la Vía Láctea, galaxia dónde se ubica el sistema solar y el planeta tierra.

La *Figura 1* representa el Supercúmulo de Laniakea etimológicamente definido en el idioma hawaiano como: "lani" que significa "cielo" y "akea" que significa espacioso o inconmensurable. Es decir, cielo inmensurable está compuesto por galaxias que se congregan en grupos, que están ligados gravitacionalmente y poseen un desplazamiento hacia un punto en el Universo denominado: "El Gran Atractor", consolidando grandes filamentos de galaxias y a su vez grandes regiones denominadas vacíos" (*Brent Tully, Courtois, Hoffman, & Pomarède, 2014, pág. 72*).



Dentro del Supercúmulo de Laniakea se encuentra el Supercúmulo de Virgo, que es una estructura con forma de disco plano, con un diámetro de 110 millones de años luz y contiene alrededor de 100 grupos y cúmulos de galaxias como el Grupo Local. Cerca de su centro, el gran grupo de galaxias, es decir, el cúmulo de Virgo, domina gravitacionalmente esta gigantesca macroestructura. Sin embargo, por enorme que pueda parecer el Supercúmulo de Virgo es sólo uno de los millones de superclusters que se pueden encontrar en el Universo observable (León, 2016).

El Supercúmulo de Virgo contiene al Grupo Local de galaxias, que en total suman 54. La mayoría de ellas son enanas y muchas son satélites de la galaxia denominada Vía Láctea. El Grupo Local abarca un volumen de un tamaño de un cubo de 10 millones de años luz de lado y contiene galaxias conocidas como el sistema de galaxias de Andrómeda (M31 y sus diversas galaxias satélites) o la Gran y la Pequeña Nube de Magallanes (ambas visibles a simple vista desde el hemisferio Sur) (Cubillos Jara, 2013, pág. 17).

Ahora bien, una galaxia, por definición es un conjunto de gases, de polvo, de estrellas y de sistemas solares caracterizada por el hecho que se mantiene unida gracias a la fuerza de gravedad y tienen en el medio un gran agujero negro que es supermasivo, es decir, un agujero negro con una masa del orden de millones o decenas de miles de millones de masas solares (Cubillos Jara, 2013, págs. 88-94).

En el caso del comportamiento y movimiento del universo, se destaca que las estrellas se agrupan para dar la forma de espiral a su galaxia y tienen brazos curvados que hacen que parezcan molinos, esta es la representación de la Vía Láctea, galaxia donde se encuentra el planeta tierra (NASA, 2015). La diversidad en las formas de las galaxias es amplia, dado que existen lisas y además con formas ovalada que se denominan elípticas. Hay otras galaxias que no corresponden o se asemejan a ninguna de las formas previamente mencionadas, siendo irregulares y asemejándose a manchas o nubes.

En la Vía Láctea se encuentra el Sistema solar, como puede observarse en la *Figura 2*, entendido como una estrella con planetas en órbita alrededor de ella, en la cual el Sol es la estrella principal con ocho planetas, sus respectivas lunas, junto a cometas, asteroides y otros objetos espaciales. El Sol es el objeto más grande del sistema solar y contiene más del 99% de la masa del sistema solar (García-Badell, 1984, pág. 9)

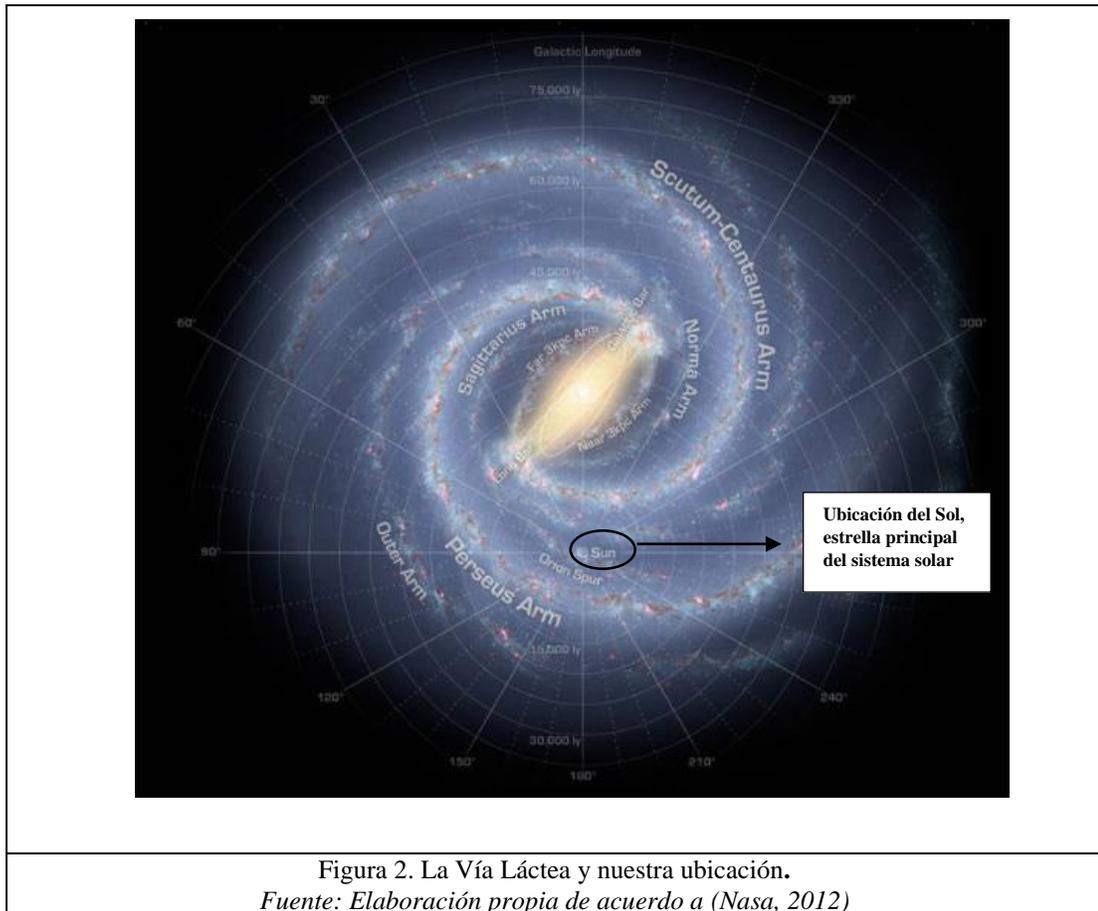


Figura 2. La Vía Láctea y nuestra ubicación.
 Fuente: Elaboración propia de acuerdo a (Nasa, 2012)

Ahora bien, al detallar el sol, se encuentra que es una bola brillante y caliente de hidrógeno y helio en el centro del sistema solar terrestre, tiene un diámetro de 1.400.000 km, es decir, 109 veces más ancho que la Tierra. Es 10.000 grados Fahrenheit (5.500 grados Celsius) en la superficie y 27 millones de grados Fahrenheit en el núcleo (15.000.000 grados centígrados) (García-Badell, 1984, pág. 9). Adicionalmente, es una estrella de tamaño medio, en la medida en que se han encontrado estrellas que son 100 veces más grandes en diámetro que el sol del sistema solar terrestre. (NASA, 2015)

Dado que el sol es la estrella principal del sistema solar, genera una radiación solar hacia los planetas, entendida como “la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y se genera en las reacciones del hidrogeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y es emitida por la superficie solar. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima” (Guerrero, Chacón , & Cely, 2008, pág. 14).

Ahora bien, el sol está compuesto por 71 % de hidrógeno, 27 % de Helio y un 2 % de otros elementos químicos. Tal como se observa en la Ecuación 1, la energía que se genera en el sol es un proceso nuclear de fusión por el que el hidrógeno se transforma en helio y la materia se transforma en energía (Sackmann, Boothroyd, & Kraemer, 1993, pág. 466)

4 Hidrógeno → Helio + energía

Ecuación 1. Proceso Nuclear de Sol.
Fuente: (García-Badell, 1984, pág. 9)

La radiación gamma viaja hasta la superficie solar interactuando con la materia solar y transformándose en radiación ultravioleta (UV), visible (V) e infrarrojo (IR). El sol emite al espacio radiación electromagnética que no requiere medio material para desplazarse. En el límite entre la atmósfera y el espacio vacío a masa de aire cero (AM0), la radiación solar es de 1353 W/m^2 . Este valor se denomina constante solar y supone un valor promedio para toda la superficie de la esfera que contiene a la atmósfera. (Iqbal, 1983, págs. 9-13)

La radiación que llega a la superficie terrestre es menor debido a su interacción con los componentes de la atmósfera. Según (Jaén González, Carreras, Oliva, Costa Perez, & Montserrat, 2006, pág. 154), en promedio a la superficie terrestre llega una irradiación en condiciones AM1 de 1000 W/m^2 (Santamaría & Castejón, 2012, pág. 16) distribuidos espectralmente así: 7% al ultravioleta; 47,3% al visible y 45,7% al infrarrojo. (IDEAM, 2010, pág. 3) Adicionalmente, llega a un punto sobre la superficie terrestre de tres formas: Directa, difusa y reflejada (o albedo), como se muestra en la *Figura 3*.

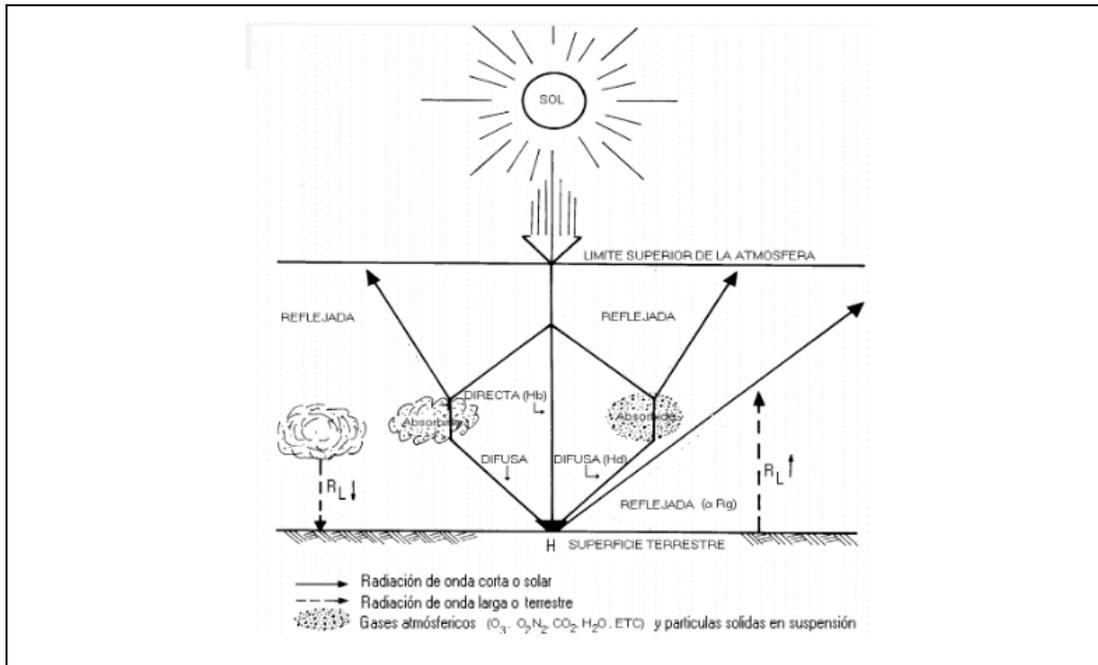
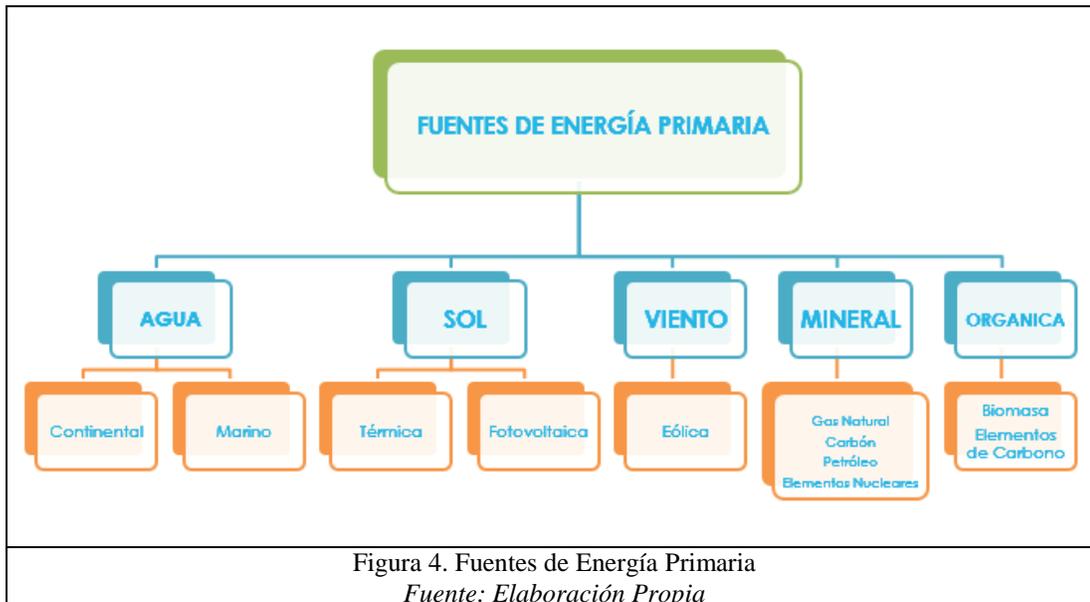


Figura 3. Formas de irradiación

Fuente: (Chacón Cardona, Cely, & Guerrero, 2008, pág. 15)

La radiación directa es la que llega sin cambio de dirección, sin interactuar con nada y es la más importante en un día soleado; la radiación difusa es producto de los choques de la radiación directa con los componentes atmosféricos, en tanto que es la radiación consecuencia de los procesos de reflexión, dispersión, difracción y absorción. Finalmente, la radiación reflejada (también llamada albedo) es la que llega procedente de la reflexión de la radiación directa en los elementos del entorno. (Iqbal, 1983, págs. 281-293)

Por lo anterior, el Sol es una de las fuentes primarias de energía del planeta tierra, como se puede observar en la *Figura 4*. Es importante destacar que el Sol emite continuamente una potencia de 62.600 kilowatts (o kilovatios) por cada metro cuadrado de su superficie, lo cual ha venido ocurriendo a lo largo de cuatro mil quinientos millones de años, y se estima que continuará así por otros cinco mil millones de años, lo cual, en términos de la existencia que ha tenido la humanidad, es prácticamente ilimitado (Arancibia & Best, 2010, pág. 10).



De hecho, en un periodo de tan sólo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas probadas que existen de petróleo, gas y carbón. Esto equivale a cerca de 60 veces el consumo anual de la sociedad humana, lo cual brinda la idea del impresionante potencial que tiene la energía del Sol para satisfacer las demandas energéticas del mundo (Arancibia & Best, 2010, pág. 10)

Es preciso, en este punto, recordar que la energía solar como fuente de energía primaria ha presentado una larga trayectoria a lo largo de los años, incluso desde el origen de la civilización humana. Los primeros registros que relatan la utilización de la energía solar datan de la época de la Grecia Antigua, el Imperio Romano y la China Imperial. “Estos pueblos conocían el arte de prender fuego utilizando lentes y espejos “quemantes” (Arancibia & Best, 2010, pág. 12).

Posteriormente, en el Renacimiento, uno de los primeros científicos en intentar el uso de la energía solar fue Leonardo da Vinci y durante los siglos XVII y XVIII científicos como el químico inglés Joseph Priestley, en 1774, construyó un gran número de hornos solares que usaban la radiación solar concentrada para los campos de la cerámica, la metalurgia y la química. En la actualidad los hornos solares se siguen utilizando como instrumentos de investigación, tales como la producción sustentable de combustibles como el hidrógeno (Arancibia & Best, 2010, págs. 10-17).

Algunos ejemplos de la transformación de la energía del sol se presentan, por un lado, por medio del desarrollo de tecnologías que sirven para el aprovechamiento de la energía solar y se clasifican en solares térmicas y fotovoltaicas (Arancibia & Best, 2010, pág. 12). Por otro lado, la transformación de la energía mediante procesos naturales tales como la fotosíntesis

Para el caso del desarrollo de las tecnologías, un ejemplo del aprovechamiento de la energía solar térmica son las plantas termosolares de potencia eléctrica, de las cuales existen 3 variedades: 1) canal parabólico, 2) torre central y 3) disco o plato parabólico. Por su parte, la energía solar fotovoltaica se implementa para electrificar zonas no interconectadas de los territorios, al igual que para la producción de energía en plataformas oceánicas y desiertos. Además, permite conformar microredes en equipamientos de salud como soporte del suministro de energía en casos de emergencia.

En cuanto a la transformación de la energía mediante procesos naturales, algunos ejemplos se evidencian en los cultivos de caña en Colombia y de trigo en México, como se detalla a continuación. En Colombia, según datos del (Departamento Nacional de Estadística, 2017, pág. 3), se tienen sembrados 1.658.598 Ha de Cultivos Agroindustriales en los cuales se incluye la caña de azúcar, que producen en un año 6.790.334 Toneladas. La producción se debe principalmente a la fotosíntesis que ocurre en las hojas de las plantas en presencia de agua y dióxido de carbono bajo el efecto de la radiación solar.

En México, más concretamente en el Valle de Yaqui, se cosechan 5.500 kg de trigo por hectárea cada año. La eficiencia de la fotosíntesis fluctúa entre uno y ocho por ciento, dependiendo del tipo de planta. Esto significa que de cien unidades de energía solar que inciden sobre un área, la energía almacenada en las plantas por fotosíntesis es de uno a ocho. Aún más, en el caso del trigo y los cereales, los granos constituyen sólo una fracción de la biomasa producida por la planta entera. Así, estos granos que representan la energía almacenada del sol, con una eficiencia de conversión de hasta 0.1%, sustentan en gran parte la vida humana moderna, y la vida terrestre en general. (Centro de Investigación en Energía, UNAM, 2010, pág. 141)

Ahora bien, el potencial energético en el territorio colombiano se evidencia a través de la relación entre la irradiación solar diaria recibida y la extensión del territorio del país. Así, la irradiación promedio en Colombia es de 4,5 kWh/m²/d (IDEAM, 2005, pág. 166), y la extensión de 1.142.748 Km². La Tabla 1 contiene el promedio de radiación en Colombia por región, detallando que la irradiación en Colombia supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/d), un país líder en el uso de la energía solar fotovoltaica a nivel mundial, con aprox. 36 GW de capacidad instalada a 2013 (Gómez Ramírez, 2017, pág. 5)

Tabla 1. Promedio de Radiación en Colombia por región

Región	Promedio irradiación(kWh/m2/día)
Guajira	6,0
Costa Atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Amazonía	4,2
Región Andina	4,5
Costa Pacifica	3,5

Fuente: *Elaboración propia con base en la información de (IDEAM, 2005, pág. 166)*

Respecto a los conceptos básicos para el aprovechamiento del potencial energético solar, a continuación, se definen la Irradiación, Irradiancia y Constante Solar (I), con el fin de estimar el comportamiento del recurso solar y su potencial energético. La irradiación¹ es la energía por unidad de superficie (kWh/m²); la irradiancia es la energía incidente por unidad de superficie y tiempo y la constante solar se define como la cantidad de energía solar (W/m²) que incide perpendicularmente en la cima de la atmósfera a la distancia media Tierra-Sol y su valor medio es de 1367.7 W/m² (Rudolf , Robert H, & Todhunter, 1995, pág. 6)

Para captar la irradiación superficial terrestre se utilizan instrumentos de medición tales como piranómetros. En algunos casos determinados, debido a la complejidad del acceso o a los bajos recursos existentes, no es posible adquirir estos instrumentos para realizar las mediciones respectivas. Por esto, existen modelos matemáticos que plantean ecuaciones que dan un aproximado en la medición. Para el caso de la presente investigación se tiene en cuenta el Modelo Hottel, descrito paso a paso a continuación, cuyas variables son la latitud geográfica, la fecha y la hora, a partir de las cuales se calcula el coseno del ángulo cenital para la obtención de la irradiación superficial (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, págs. 26-27).

La transmitancia atmosférica τ_b se expresa en función del ángulo cenital θ_z , de la altura sobre el nivel del mar A y del tipo de clima (r1). Según (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27), el modelo de Hottel es de la forma como se observa en la Ecuación 2.

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos\theta_z}$$

Ecuación 2. Transmitancia atmosférica

Fuente: (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27)

¹Cantidad total de radiación solar (directa y reflejada) que se recibe en un punto determinado del planeta sobre una superficie de 1 m² para un determinado ángulo de inclinación entre la superficie colectora y la horizontal del lugar

En la ecuación anteriormente descrita “a0, a1 y k son parámetros ajustados empíricamente” (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27). Para el cálculo de estas cantidades, definido como la corrección por altura y tipo de clima, se usa la Ecuación 3:

$$a_o = r_o [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2]$$

$$a_i = r_i [0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2]$$

$$k = r_k [0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2]$$

Ecuación 3. Parámetros de corrección de altura y clima

Fuente: (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27)

La representación de la variable A en estas ecuaciones significa la altura sobre el nivel del mar, en kilómetros. Los valores de r1 están dados en la siguiente tabla, para diversos tipos de clima, que sirven de herramienta de evaluación al momento de hallar el potencial energético de algún territorio en específico, como se observa en la Ecuación 3.

Tabla 2. Factores de Corrección para algunos climas.

Factores de corrección para algunos tipos de climas.			
Tipo de clima	r _o	r _i	r _k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano, latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano, sub-ártico	0.99	0.99	1.01
Invierno, lat. media	1.03	1.01	1.00

Fuente: (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27)

En la aplicación del modelo atmosférico Hottel, dadas la latitud geográfica, la fecha y la hora, el coseno del ángulo cenital debe calcularse según la Ecuación 4, donde
 ϕ : latitud geográfica
 ω : ángulo horario (por definición $\omega = 0$ al mediodía solar)
 δ : declinación solar:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

Ecuación 4. Calculo del Coseno del ángulo cenital

Fuente: (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27)

Respecto a la ecuación anterior se resalta que δ : declinación solar se calcula mediante la Ecuación 5, Donde n representa el día del calendario juliano que se pretende analizar:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(2\pi \frac{284 + n}{365} \right)$$

Ecuación 5. Calculo de la declinación solar

Fuente: (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 27)

Finalmente, para estimar la irradiación sobre una superficie horizontal se utiliza la Ecuación 6 de Liu y Jordán (1960) de la siguiente manera:

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_b$$

Ecuación 6. Calculo de la declinación solar

Fuente: (Sanchez , Piedra Castillo, & Mendoza, 2006)

En consecuencia, mediante el uso de las ecuaciones anteriores, desde la salida hasta la puesta del Sol, se obtiene la irradiación a lo largo de un día y para este modelo se debe tener en cuenta que se desarrolla en condiciones óptimas de claridad. (Álvarez Hernández , Montaña Peralta, & Correa Maldonado, 2014, pág. 26). Por lo cual, el cálculo de la irradiación teórica, mediante el Modelo Hottel, permite realizar la comparación de los datos obtenidos en cualquier estación meteorológica del planeta, validando la pertinencia y certeza de la información.

Para concluir con el presente capítulo, se destacan algunas herramientas tecnológicas e instrumentales que permiten la medición o estimación de la cantidad de determinado recurso primario o de parámetros atmosféricos. Estos instrumentos capturan información según su programación de datos, teniendo ejemplos desde la captura por segundo hasta la captura de un dato por hora. Además, “los instrumentos meteorológicos para medir la radiación se clasifican atendiendo a diversos criterios, entre ellos el tipo de variable que se desea medir, el campo visual, la respuesta espectral, el uso principal a que se destinen, etc.” (Organización Mundial de Meteorología, 2014, pág. 191).

Debido a que esta investigación se centra en el potencial energético solar, la Tabla 3 ilustra las formas en las que se captura este tipo de recurso primario, y se valida por la clasificación reconocida por la Organización Mundial de Meteorología anteriormente mencionada.

Tabla 3. Instrumentos meteorológicos para medir la radiación

Clasificación del instrumento	Parámetro que se desea medir	Uso principal	Ángulo de visión (estereorradianes) (Véase la figura 7.1)
Pirheliómetro absoluto	Radiación solar directa	Patrón primario	5×10^{-3} (aprox. $2,5^\circ$ de semiángulo)
Pirheliómetro	Radiación solar directa	a) Patrón secundario para calibraciones b) Red	5×10^{-3} a $2,5 \times 10^{-2}$
Pirheliómetro espectral	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas (por ej. con filtros OG 530, RG 630, etc.)	Red	5×10^{-3} a $2,5 \times 10^{-2}$
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas (por ej. a $500 \pm 2,5$ nm, $368 \pm 2,5$ nm)	a) Patrón b) Red	1×10^{-3} a 1×10^{-2} (aprox. $2,3^\circ$ de ángulo total)
Piranómetro	a) Radiación (solar) global b) Radiación (solar) celeste difusa c) Radiación (solar) reflejada	a) Patrón de trabajo b) Red	2π
Piranómetro espectral	Radiación (solar) global en intervalos espectrales de banda ancha (por ej. con filtros OG 530, RG 630, etc.)	Red	2π
Piranómetro diferencial	Radiación (solar) global neta	a) Patrón de trabajo b) Red	4π
Pirgeómetro	a) Radiación de onda larga ascendente (sensor hacia abajo) b) Radiación de onda larga descendente (sensor hacia arriba)	Red	2π
Pirradiómetro	Radiación total	Patrón de trabajo	2π
Pirradiómetro diferencial	Radiación total neta	Red	4π

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a (Organización Mundial de Meteorología, 2014, pág. 191)

La tabla anterior resalta dos de los instrumentos meteorológicos utilizados para la cuantificación del recurso solar: el Pirheliómetro y el Piranómetros. Se subraya que ambos instrumentos se encuentran presentes en la mayoría de las estaciones meteorológicas del IDEAM en Colombia.

En cuanto a los Pirheliómetros, ilustrados en la Figura 5 se destaca que capturan la radiación solar directa total y su definición se enuncia a continuación:

“es un instrumento de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro, sus superficies receptoras deben mantenerse en todo momento perpendiculares a la dirección de la radiación solar, por lo que el uso de un sistema de seguimiento adecuado (solar tracker) es ineludible. Las aperturas de este dispositivo están dispuestas de forma que sólo la radiación procedente del disco solar y de una estrecha franja anular en torno al mismo alcanzan el receptor”. (Carrasco, 2016, pág. 20)



Figura 5. Pirheliómetro Eppley H-F y Unidad de Control 405

Fuente: (Carrasco, 2016, pág. 51)

Los Piranómetros, por su lado realizan la medida de la radiación global que es “la suma de la radiación que procede directamente del disco solar (radiación directa) y de la radiación solar dispersada a su paso por la atmósfera (radiación difusa)” (Carrasco, 2016, pág. 27). La Figura 6 muestra un prototipo Eppley modelo PSP, que consta de dos cúpulas, cuya función principal es filtrar la radiación infrarroja procedente de la atmósfera y la radiación de onda corta procedente del sol (Carrasco, 2016, pág. 55)



Figura 6. Piranómetros Eppley modelo PSP

Fuente: (Carrasco, 2016)

CAPÍTULO 2: COMPORTAMIENTO DEL RECURSO SOLAR EN NORTE DE SANTANDER: CÚCUTA, OCAÑA Y PAMPLONA.

La comprensión de la naturaleza de la radiación solar, la dinámica en el tiempo, la relación con las condiciones atmosféricas y climáticas y la interacción con el ser humano y el medio ambiente, son factores que inciden el comportamiento del sol en el territorio (IDEAM, 2005).

Para el desarrollo de la investigación, los factores mencionados anteriormente se evalúan para el departamento Norte de Santander en búsqueda del potencial energético. Norte de Santander limita al oriente y al norte con la República Bolivariana de Venezuela; al occidente con los departamentos de Cesar y Santander y al sur con los departamentos de Boyacá y Santander. Se encuentra ubicado en la parte nororiental de Colombia; con una extensión de 21 648 km² y representa el 1.89% del territorio, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Variables e indicadores territoriales del Departamento Norte de Santander.

Variables e indicadores	Colombia	Norte de Santander	% de Participación en el territorio
Extensión territorial km ²	1,148,706	21,658	1.89
Número de municipios	1,123	40	3.56
Población proyectada 2015 (DANE)	48,203,405	1,355,787	2.81
Participación del PIB departamental en el total nacional 2013	100,0%		1,6
PIB per cápita 2013	\$ 15.073.018	\$ 8.591.406	
	US\$ 8.065	US\$ 4.597	
Exportaciones per cápita 2014	US\$ 1.149,7	US\$ 203,0	
Importaciones* per cápita 2014	US\$ 1.343,4	US\$ 104,5	

Fuente: (Departamento Norte de Santander, 2016)

Continuando con los factores que inciden en el comportamiento solar, se evidencia la influencia que presenta la variabilidad climática y la altura sobre el nivel del mar para el aprovechamiento de este recurso. En el caso del piso térmico cálido se representa por los territorios localizados entre los 50 y 1.000 m.s.n.m., con una zona de transición de 400 metros, la temperatura media anual es superior a 24°C predominando en el norte y noreste del departamento, es decir, en las subcuencas que integran la cuenca del Catatumbo, y al occidente en la subcuenca de San Alberto y Cáchira del Espíritu Santo. Según la (Gobernación de Norte de Santander, 2019), cubre alrededor del 49,3%, lo que representa prácticamente la mitad de la superficie departamental, como se ilustra en la Tabla 5.

Tabla 5. Municipios localizados en el piso térmico cálido

Municipio	Altura (m.s.n.m)	Extensión (km2)
Puerto Santander	60	42
Tibú	72	2296
El Tarra	160	481,53
La Esperanza	180	695,8
El Zulia	220	449,07
San Cayetano	235	144
Sardinata	300	1451,17
Cúcuta	320	1176
Los Patios	410	137
Villa del Rosario	440	228
Santiago	450	173
El Carmen	761	1723
Salazar de las Palmas	845	493,44
Durania	940	177,4
Arboledas	946	456

Fuente: *Elaboración propia con base a* (Gobernación de Norte de Santander, 2019)

Para el caso del piso térmico templado o medio comprende una franja altitudinal entre 1.000 y 2.000 m.s.n.m., con una zona de transición de 400 metros; la temperatura media anual está entre 18 a 24°C y ocupa un 27% de la superficie departamental, como se puede apreciar en la Tabla 6 (Gobernación de Norte de Santander, 2019)

Tabla 6. Municipios localizados en el piso térmico templado

Municipio	Altura (m.s.n.m)	Extensión (km2)
Hacarí	1050	410
Bochalema	1051	172
Convención	1076	829
Teorama	1160	852
Chinácota	1175	166,64
Ocaña	1202	672,27
Cucutilla	1277	373
Abrego	1380	1342
Lourdes	1411	87
Gramalote	1450	150
La Playa	1450	241,25
Labateca	1465	253
Bucarasica	1552	267
Villacaro	1600	402
Ragonvalia	1615	95,847
Toledo	1642	1577,909
San Calixto	1677	387
Pamplonita	1886	173,8
Herrán	1995	112

Fuente: *Elaboración propia con base en* (Gobernación de Norte de Santander, 2019)

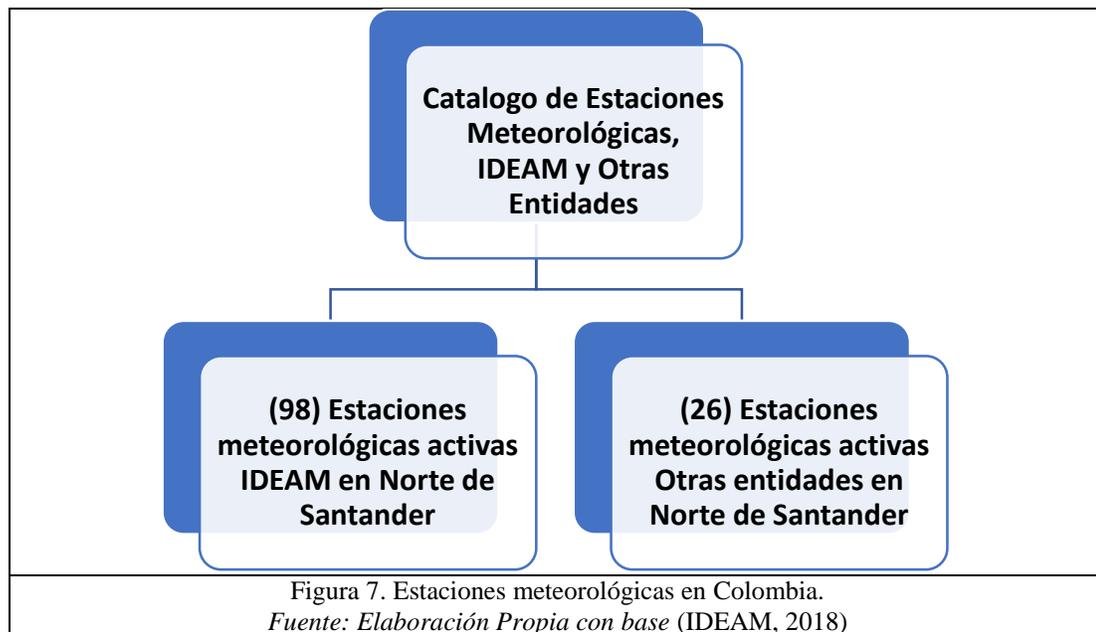
Par finalizar con las características de los climas presentes en el departamento Norte de Santander, se encuentra que el piso térmico frío está ubicado entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m, con una zona de transición de 300 metros, como se ilustra en la Tabla 7, donde se tabulan los municipios pertenecientes a estos rangos. La temperatura media anual va de los 12 a los 18°C, cubriendo el 16% de la superficie del Departamento (Gobernación de Norte de Santander, 2019)

Tabla 7. Municipios localizados en el piso térmico frío

Municipio	Altura (m.s.n.m)	Extensión (km2)
Cáchira	2025	606
Pamplona	2342	318
Chitagá	2350	1200
Cacota	2465	139,847
Mutiscua	2600	159
Santo Domingo de Silos	2845	382

Fuente: Elaboración propia con base en (Gobernación de Norte de Santander, 2019)

A continuación, se plantea la metodología para estimar el comportamiento del potencial energético solar en el departamento Norte de Santander. Dicha metodología fue basada en primera medida, en la identificación de estaciones meteorológicas con datos del comportamiento solar del Catálogo de Estaciones Meteorológicas del IDEAM con corte a enero de 2019, como se muestra en la Figura 7.



Partiendo de lo anterior, se analiza el Catálogo mencionado, junto con las estaciones asociadas a las redes de alertas tempranas del país, que son propiedad de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres de Colombia. El procesamiento de

información muestra que las estaciones IDEAM presentes en el catálogo para el departamento Norte de Santander son equivalentes a 98, y teniendo en cuenta el parámetro de altura sobre el nivel del mar, que identifica los pisos térmicos enunciados nuevamente: cálido, entre 50 a 1000 m.s.n.m; templado de 1000 a 2000 m.s.n.m y frío de 2000 a 3000 m.s.n.m, se obtiene un dato de 27 estaciones meteorológicas en el área de influencia del departamento, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Listado de Estaciones presentes en el Departamento Norte de Santander.

Cantidad	Estación	Municipio	Altura(m.s.n.m)
1	Abrego	Abrego	1430
2	Escuela Agronómica Cáchira	Cáchira	1882
3	Blonay	Chinácota	1235
4	Convención -G.M.Barriga	Convención	1261
5	Instituto Agronómico Convención	Convención	1076
6	Universidad Francisco de Paula Santander	Cúcuta	311
7	Carmen De Tonchalá	Cúcuta	285
8	Ceez Ica	Cúcuta	100
9	Cinera Villa Olga	Cúcuta	100
10	Cúcuta	Cúcuta	1022
11	Limoncito	Cúcuta	120
12	San Faustino	Cúcuta	200
13	Aeropuerto Camilo Daza	Cúcuta	313
14	Santa Isabel	Cúcuta	90
15	Granja H.J.C	Cucutilla	1380
16	Risaralda	El Zulia	90
17	Alcaldía de Herrán	Herrán	2040
18	Parque Nacional Tama	Herrán	2500
19	La Playa	La Playa	1500
20	Aeropuerto Aguas Claras	Ocaña	1435
21	Universidad Francisco de Paula Santander	Ocaña	1150
22	Aguas de la Virgen	Ocaña	1150
23	Universidad de Pamplona	Pamplona	2362
24	Finca La Palmita	Pamplonita	1107
25	Ragonvalia	Ragonvalia	1550
26	Salazar	Salazar	860
27	Silos	Silos	2765
28	Tibú	Tibú	50

Fuente: Elaboración Propia de acuerdo a (IDEAM, 2018)

Ahora bien, de las 28 estaciones meteorológicas filtradas, los municipios más destacables, en cuanto a la cantidad de datos generados a través del tiempo, a su relevancia administrativa y poblacional y a su representatividad frente a cada piso térmico son: el municipio de Cúcuta donde existen 9 estaciones, representando al clima cálido y resaltado en color naranja; Ocaña con información de 3 estaciones, representando al clima templado y resaltado en color amarillo y Pamplona con 1 estación, representando el clima frío y resaltado en color azul como se observa en la Tabla 9

Tabla 9. Estaciones meteorológicas presentes en los 3 municipios seleccionados.

Cantidad	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)
1	Universidad Francisco de Paula Santander	Cúcuta	7,90	-72,49	311
2	Carmen De Tonchalá		7,85	-72,57	285
3	Ceez Ica		8,18	-72,52	100
4	Cinera Villa Olga		8,17	-72,47	100
5	Cúcuta		8,18	-72,52	1022
6	Limoncito		8,10	-72,57	120
7	San Faustino		8,07	-72,42	200
8	Santa Isabel		8,23	-72,43	90
9	Aeropuerto Camilo Daza		7,93	-72,51	313
10	Aeropuerto Aguas Claras	Ocaña	8,32	-73,36	1435
11	Aguas de la Virgen		8,23	-73,40	1150
12	Universidad Francisco de Paula Santander		8,24	-73,32	1150
13	Universidad de Pamplona	Pamplona	7,36	-72,67	2362

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a (IDEAM, 2018)

Los datos de las estaciones que se reportan a través de los años, ilustran que aquellas con mayor confiabilidad son los registradas en la Tabla 10, dado que la provisión de información ha sido constante y sus datos presentan similitudes a los calculados por el modelo teórico de Hottel para validarlos.

Tabla 10. Estaciones meteorológicas en Cúcuta, Ocaña y Pamplona.

Cantidad	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)
1	Aeropuerto Camilo Daza	Cúcuta	7,93	-72,51	313
3	Universidad Francisco de Paula Santander		7,90	-72,49	311
4	Aguas de la Virgen	Ocaña	8,23	-73,40	1150
5	Universidad de pamplona	Pamplona	7,36	-72,67	2362

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a (IDEAM, 2018)

La segunda etapa en la metodología para estimar el comportamiento del potencial energético, una vez identificadas las estaciones meteorológicas con datos del comportamiento solar del Catálogo de Estaciones Meteorológicas del IDEAM, se realiza el procesamiento de los datos generados por las estaciones meteorológicas, los cuales recopilan información por segundo, minuto o promedio horario y que para el

caso de los datos de las estaciones de medición presentes en esta investigación se expresan en promedio horario.

A partir del procesamiento de datos se generan Tablas de *Promedio horario de la radiación solar*, basadas en datos en bruto abastecidos por el IDEAM, de las siguientes estaciones meteorológicas: Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), Camilo Daza, Aguas de la Virgen y Universidad de Pamplona, como se puede apreciar en las Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14. Estos promedios generados se presentan hora a hora, desde las 00:00 horas hasta las 24:00 horas, promediando los años en los que se encontró información constante y verificable en cada uno de los meses, resaltándose en color verde los picos de irradiación de cada mes.

Por otra parte, en la Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18, se muestran los *Promedios anuales de radiación solar* de las mismas estaciones mencionadas con antelación, éstas detallan los promedios acumulados por mes de la irradiación total de cada uno de los años con datos útiles de estas estaciones, para finalmente ilustrar los promedios totales de la estación durante los doce meses.

Tabla 11. Promedio horario de la radiación solar Estación Universidad Francisco de Paula Santander(UFPS).

PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,1	0,1	0,2	2,4	5,7	5,2	3,0	2,5	3,5	4,0	2,6	0,4
6-7	31,7	29,7	38,9	66,6	88,7	88,1	78,5	74,1	91,4	91,8	85,1	50,6
7-8	164,5	152,8	147,4	220,2	262,8	267,4	258,8	281,7	320,0	286,3	269,8	195,9
8-9	367,7	346,1	321,8	410,2	469,6	451,8	439,0	490,4	551,3	522,0	499,7	404,9
9-10	578,2	562,2	495,6	631,6	648,9	626,7	632,2	685,4	747,6	719,3	689,2	595,8
10-11	716,5	711,9	617,4	625,2	700,0	635,6	652,0	693,0	787,3	734,3	766,1	684,1
11-12	747,5	710,4	631,1	635,7	711,0	682,1	663,8	679,6	786,7	772,1	779,2	734,5
12-13	746,6	734,2	674,3	651,3	707,3	661,3	687,8	733,4	796,5	769,0	721,3	704,4
13-14	693,7	727,1	660,8	627,0	688,7	651,8	678,4	710,2	775,8	730,6	643,6	667,6
14-15	535,2	605,7	546,9	551,1	583,0	591,0	615,8	649,0	668,9	549,7	476,7	508,6
15-16	296,2	364,9	372,5	356,7	379,2	410,7	444,6	450,4	428,5	276,2	209,5	227,5
16-17	122,5	161,9	173,4	162,7	174,8	202,4	220,4	221,9	173,6	109,4	81,3	93,7
17-18	22,6	34,3	31,0	32,0	33,5	49,1	56,6	47,9	24,1	9,4	5,7	9,7
18-19	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,6	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	5023,0	5141,4	4711,4	4972,7	5453,3	5323,6	5431,4	5719,8	6155,4	5574,2	5229,7	4877,7

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Tabla 12. Promedio horario de la radiación solar Estación Aeropuerto Camilo Daza

PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m2)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1-2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2-3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
3-4	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
4-5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
5-6	0.3	0.3	0.6	3.0	7.6	6.6	4.5	3.2	4.3	4.2	2.4	0.6
6-7	26.6	24.4	33.9	60.0	89.6	84.8	88.6	78.1	81.1	83.2	66.6	44.7
7-8	124.6	115.9	123.8	172.4	229.5	220.1	225.8	233.7	241.8	228.4	202.0	152.0
8-9	233.6	277.4	272.7	327.0	411.7	376.6	383.6	430.5	434.5	416.4	290.5	220.3
9-10	371.9	392.5	441.1	482.2	568.6	515.0	541.3	595.7	616.7	516.7	484.0	491.1
10-11	602.6	562.7	540.6	612.2	647.2	590.9	663.2	741.5	690.1	651.2	677.8	626.4
11-12	699.5	719.5	651.6	672.8	674.8	622.0	716.5	801.8	743.9	778.1	711.4	687.8
12-13	692.8	759.8	692.2	683.1	701.3	650.6	672.0	803.8	766.4	779.2	720.9	700.7
13-14	649.7	726.3	640.0	640.2	652.4	610.2	593.3	758.7	704.1	678.0	639.4	646.6
14-15	513.3	583.6	522.0	495.5	515.7	532.5	501.3	609.3	564.4	527.3	489.1	492.1
15-16	352.4	372.8	344.5	310.5	356.3	373.9	383.8	448.2	387.8	329.5	293.5	312.1
16-17	168.3	177.0	155.5	143.9	169.0	186.3	224.4	262.5	170.1	124.0	107.4	120.4
17-18	26.5	36.0	32.4	27.8	32.1	48.0	59.6	61.0	26.1	9.1	6.2	11.0
18-19	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
19-20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
20-21	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
21-22	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
22-23	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
23-0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1
Acumulada diaria	4462.2	4748.3	4451.1	4630.7	5055.9	4817.9	5058.7	5828.2	5431.5	5125.4	4691.4	4505.8

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos de (IDEAM, 2018)

Tabla 13. Promedio horario de la radiación solar estación Aguas de la Virgen, Ocaña

PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,0	0,0	0,1	0,8	3,3	4,5	2,1	0,9	1,7	2,3	1,7	0,2
6-7	22,9	11,9	24,3	36,2	55,9	79,8	81,3	74,1	75,5	63,2	61,0	35,4
7-8	127,5	72,5	115,5	116,2	160,8	227,6	241,7	237,5	201,8	191,5	167,2	158,3
8-9	261,1	208,9	270,7	242,5	309,5	413,5	433,2	408,4	383,4	343,2	323,6	312,3
9-10	419,3	394,2	484,0	358,6	409,5	593,8	595,1	571,5	580,0	460,1	472,5	501,2
10-11	548,5	558,6	600,0	445,2	494,8	670,9	669,5	688,5	697,6	563,1	525,8	550,3
11-12	593,0	643,3	581,3	486,0	478,9	577,2	610,1	634,8	667,4	535,5	521,3	558,2
12-13	548,1	651,0	557,2	432,0	438,9	490,3	487,7	542,0	611,3	505,3	452,6	579,8
13-14	477,2	627,9	455,9	365,9	396,7	449,7	460,9	462,1	502,6	473,8	404,9	490,6
14-15	366,0	476,0	323,7	262,6	303,6	297,4	332,3	370,2	366,3	336,9	321,0	393,7
15-16	263,9	323,2	221,1	190,3	197,6	192,4	214,4	238,1	222,9	185,1	182,5	250,9
16-17	137,2	188,3	134,0	100,1	93,6	124,1	122,9	120,1	109,2	83,9	75,6	112,9
17-18	25,1	38,9	35,5	28,1	24,9	37,1	37,2	30,8	22,8	12,2	7,9	12,5
18-19	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1	0,6	1,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	3790,0	4195,1	3803,7	3064,6	3368,1	4158,9	4289,4	4379,3	4442,5	3756,1	3517,4	3956,4

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018).

Tabla 14. Promedio horario de la radiación solar Universidad de Pamplona.

PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,0	0,1	0,4	1,4	3,4	3,5	1,8	1,2	1,7	2,4	2,0	0,4
6-7	29,8	25,3	41,8	54,6	57,1	53,7	47,7	46,6	64,8	81,8	78,9	59,3
7-8	205,2	188,2	178,9	189,7	190,1	174,8	169,6	203,1	236,3	252,6	260,4	241,4
8-9	407,4	364,0	316,0	305,7	316,3	280,3	304,9	347,9	400,6	421,4	427,0	413,0
9-10	554,4	510,0	439,1	406,8	410,8	392,3	402,7	487,6	537,3	550,8	533,1	532,8
10-11	632,8	583,3	519,4	471,9	483,2	481,1	461,8	591,7	618,0	614,8	577,1	593,4
11-12	649,9	599,1	574,1	482,2	530,3	510,7	542,9	635,5	619,1	605,6	540,7	598,4
12-13	596,2	572,5	537,0	471,0	484,5	507,1	544,1	593,8	550,1	533,4	496,1	566,1
13-14	502,0	500,3	470,9	412,4	385,3	433,4	460,0	529,0	481,9	430,7	403,4	490,6
14-15	363,6	354,9	324,7	298,7	314,4	360,7	382,9	426,3	387,7	300,0	295,1	380,9
15-16	230,9	212,8	200,4	178,8	208,5	259,8	283,9	290,6	250,5	171,3	166,1	237,3
16-17	100,9	93,5	89,9	79,0	93,2	122,4	153,3	145,0	102,8	61,8	57,1	79,3
17-18	19,4	19,9	19,9	16,9	20,9	31,6	35,5	28,5	16,7	7,5	7,0	12,9
18-19	0,4	0,7	0,5	0,3	0,3	0,4	0,7	0,4	0,3	0,1	0,1	0,2
19-20	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4293,0	4024,5	3713,1	3369,6	3498,2	3611,9	3791,9	4327,0	4267,8	4034,0	3844,2	4205,9

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Tabla 15. Promedios anuales de radiación solar Estación UFPS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedios
2006	4859,6	5396,0	4490,4	4146,3	5754,2	5397,8	5051,4	6060,0	6387,8	5923,1	5528,4	5086,5	5340,1
2007	5290,5	6191,6	5094,8	5406,6	5595,9	5053,4	5744,4	5427,1	6184,8	6152,8	5445,9	4736,1	5527,0
2008	4894,2	5093,1	5200,3	5313,9	5724,0	5724,5	5561,3	5674,1	6079,6	6190,5	5357,2	4531,2	5445,3
2009	4713,5	4432,0	3521,5	4643,1	5233,6	5536,6	5364,6	6085,6	6148,5	5530,4	5790,4	5169,3	5180,8
2010	5771,0	5717,8	4538,4	4634,4	5332,3	5811,2	5248,0	6006,7	5831,2	5282,7	5045,4	4527,1	5312,2
2011	5162,5	4721,4	3967,1	4844,1	5210,3	5496,6	5628,0	5830,9	6375,9	5039,9	4978,2	4739,1	5166,2
2012	4178,9	4853,5	4416,4	5284,8	5525,1	5895,5	5441,7	5909,5	6184,9	5615,5	5093,3	4960,9	5280,0
2013	5037,4	4731,4	5004,5	5287,3	5313,2	5284,9	5840,0	6038,3	6280,9	5404,3	4929,6	4863,3	5334,6
2014	5370,8	5043,9	5714,9	5529,6	5307,8	4553,7	5413,0	5144,1	5823,6	5050,4	5056,6	4764,9	5231,1
2015	4951,2	5233,0	5166,0	4636,7	5537,1	4481,9	5021,4	5021,8	6256,5	5552,2	5071,8	5399,2	5194,1
Promedios	5023,0	5141,4	4711,4	4972,7	5453,3	5323,6	5431,4	5719,8	6155,4	5574,2	5229,7	4877,7	5301,1

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Tabla 16. Promedios anuales de radiación solar Estación Aeropuerto Camilo Daza

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedios
2015										5045,1	4248,1	4669,2	4654,2
2016	4677,6	4866,4	4930,0	4479,4	4961,3	4834,4	5067,3	5965,1	5463,5	5301,0	4599,8	4348,7	4957,9
2017	4242,0	4998,8	3817,6	5434,7	5011,5	4942,5	4993,1	5752,2	5416,6	5126,0	5226,2	4499,4	4955,0
2018	4467,1	4379,6	4605,6	3978,1	5195,1	4676,8	5115,6	5767,2	5414,6	5029,5			4862,9
Promedios	4462,2	4748,3	4451,1	4630,7	5055,9	4817,9	5058,7	5828,2	5431,6	5125,4	4691,4	4505,8	4900,6

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Tabla 17. Promedios anuales de radiación solar Estación Aguas de la Virgen

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedios
2017						4223,5	4286,0	4407,1	4485,6	4020,7	3517,4	3956,4	4128,1
2018	3790,0	4195,1	3803,7	3064,6	3368,1	4094,2	4292,9	4351,6	4399,5	3491,4			3885,1
Promedios	3790,0	4195,1	3803,7	3064,6	3368,1	4158,9	4289,4	4379,3	4442,5	3756,1	3517,4	3956,4	3893,5

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Tabla 18. Promedios anuales de radiación solar Estación Universidad de Pamplona

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedios
2009										4005,3			4005,3
2011			3591,6	3273,8	3004,3		3886,5	4287,7	3940,9	3134,5			3588,5
2012										3948,5	4244,4		4096,4
2013	3796,6	3385,9	3329,0	3526,7	3580,1	4005,8	4102,7	4220,4	4090,9	4236,6	3667,2	3836,2	3814,8
2014	4394,9	3830,2	3823,1	3433,8	3807,2	3393,3	3679,5	4264,5	4291,0	3610,7			3852,8
2015										4709,4	3503,9	4268,3	4160,5
2016	5041,9	4390,1	4574,7	3142,3	3392,4	3409,1	3569,5	4251,0	4276,5	4203,9	3400,1	3949,5	3966,7
2017	3956,8	4324,2	2899,5	3735,6	3529,7	3789,3	3836,2	4651,2	4515,3	4263,5	4405,6	4769,6	4056,4
2018	4274,9	4191,9	4060,8	3105,3	3675,3	3462,0	3677,3	4287,2	4492,1	4194,0			
Promedios	4293,0	4024,5	3713,1	3369,6	3498,2	3611,9	3791,9	4327,0	4267,8	4034,0	3844,2	4205,9	3915,1

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

La tercera etapa en la metodología para evaluar el comportamiento del potencial energético solar en el departamento Norte de Santander, se enfatiza en analizar los datos filtrados por los criterios anteriormente mencionados para los municipios de Cúcuta, Ocaña y Pamplona.

Para el caso de **Cúcuta** a continuación, se analizan las estaciones respectivas. La estación del Aeropuerto Camilo Daza, se aprecia que el mes con la mayor cantidad de radiación solar global es agosto, entre los años 2015 y 2018, con un total de 5.828,2 Wh/m². Además, para los meses de enero, marzo y diciembre se presenta la menor cantidad de radiación, como se observa en la Figura 8.



Figura 8. Radiación solar global, Estación Aeropuerto Camilo Daza.
Fuente: Elaboración Propia basada en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

En la estación denominada Universidad Francisco de Paula Santander, el comportamiento de la radiación solar presenta su pico máximo para el mes de septiembre, con un total de 6.155,4 Wh/m². Para los meses de marzo y diciembre la radiación se encuentra en los niveles más bajos, como se ilustra en Figura 9.



Figura 9. Radiación solar global, Universidad Francisco de Paula Santander.
Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Como se mencionó al inicio del presente capítulo, las condiciones atmosféricas influyen en el comportamiento solar. Por esto, la precipitación², es un buen ejemplo para comparar y verificar los datos de irradiación analizados en este capítulo, ya que por apreciación se sabe que en el momento que ocurren las precipitaciones, las nubes copan el cielo absorbiendo la irradiación directa y disipándola. Por lo cual, en estos instantes y periodos es preciso afirmar que la irradiación solar tiene un comportamiento inversamente proporcional a la precipitación (IDEAM, 2018).

Los meses de febrero, junio, julio y agosto demuestran como el comportamiento del Sol es afectado por la cantidad de precipitación, observándose además, los niveles más bajos de precipitaciones en el promedio de los últimos 21 años de Cúcuta, tal como se muestra en la Figura 10.

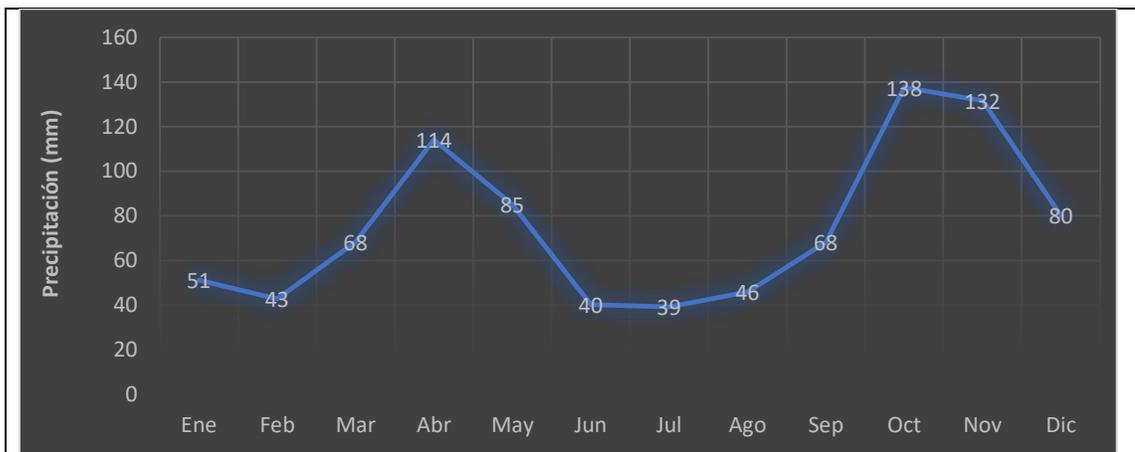


Figura 10 Precipitación Cúcuta, 1981-2010

Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Para el caso del municipio de **Ocaña** el promedio anual de radiación solar global es de 3.893,5 Wh/m², como se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La radiación global en Ocaña es constante y su máximo pico se da en el mes de febrero con un promedio de 4.442,5 Wh/m² y el mes más bajo se da en abril con un mínimo de 3.064,6 Wh/m².

En el caso del comportamiento de las precipitaciones y su influencia en la radiación solar se aprecia que en los meses de enero y febrero se dieron los mínimos con 22 y 23 mm/mes, que están en concordancia con el dato de 4.195,1 Wh/m² en el mes de febrero, como se observó en la Figura 10.

² Concepto definido como la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, que atraviesan la atmósfera y posteriormente llegan al suelo (IDEAM, 2018, pág. 14)

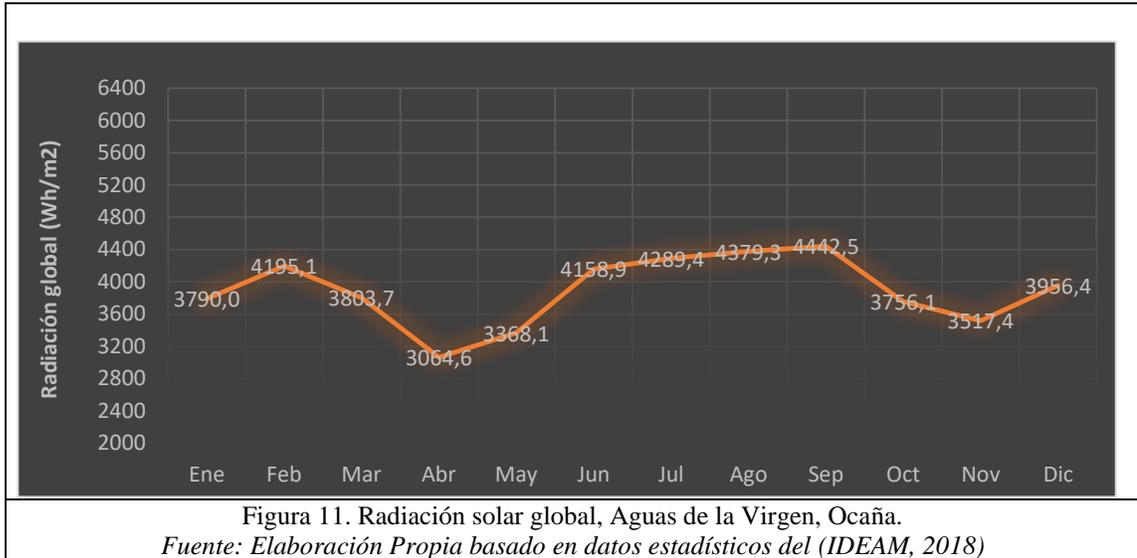


Figura 11. Radiación solar global, Aguas de la Virgen, Ocaña.
Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Continuando con la verificación de la radiación por medio de la precipitación se registra que para los meses de septiembre y octubre los datos máximos son de 156 y 150 mm/mes y al enfrentarlos con los datos de radiación se evidencia una disminución que llega hasta los 3.756, 1 Wh/m², dato que se encuentra por debajo del promedio anual de radiación para esta estación.

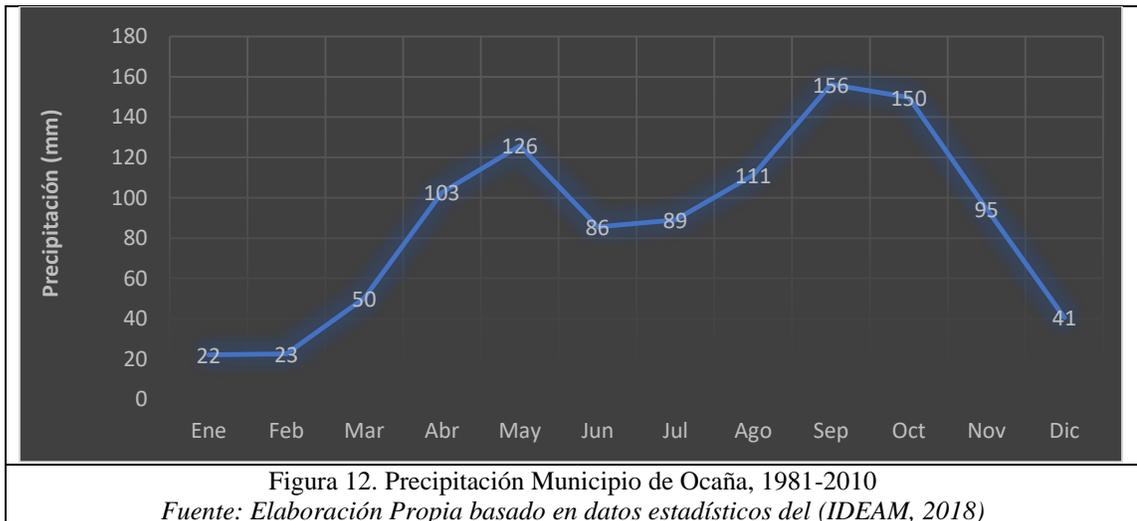


Figura 12. Precipitación Municipio de Ocaña, 1981-2010
Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Para la estación del municipio de **Pamplona**, denominada Universidad de Pamplona, se presentan 2 picos máximos: en enero con 4.293 Wh/m² y agosto con 4.327 Wh/m². Para el mes de abril se encuentra el promedio de radiación más bajo con un total de 3.369,6 Wh/m². El promedio anual de la estación Universidad de Pamplona es de 3.915,1 Wh/m².

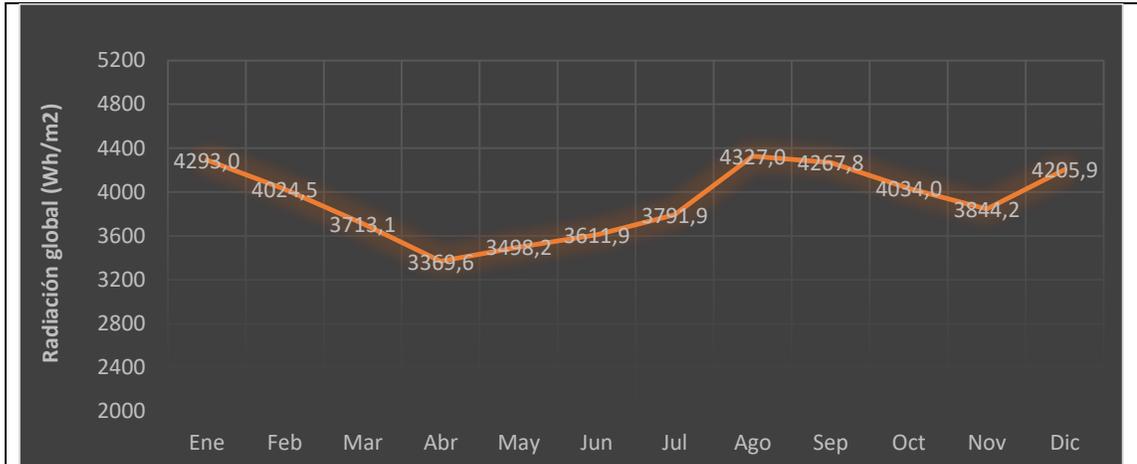


Figura 13 . Radiación solar global, Estación Universidad de Pamplona.
 Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Ahora bien, con respecto a la influencia de la precipitación en la radiación solar presentada por estación, se afirma su influencia directa, ya que el mes de enero con 32 mm/mes, en el que se da la mayor cantidad de radiación solar.



Figura 14. Precipitación Municipio de Pamplona, 1981-2010
 Fuente: Elaboración Propia basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

La síntesis del análisis gráfico de este capítulo demuestra que el comportamiento en el piso térmico cálido, que en la Figura 15 se representa con las estaciones UFPS y Camilo Daza de Cúcuta, es el más alto en comparación con los pisos térmicos templado, representado por la Estación Aguas de la Virgen de Ocaña y frío, con la Estación Universidad de Pamplona. En razón de lo anterior, el clima cálido posee un registro equivalente a los 6.155,4 Wh/m² de radiación solar.

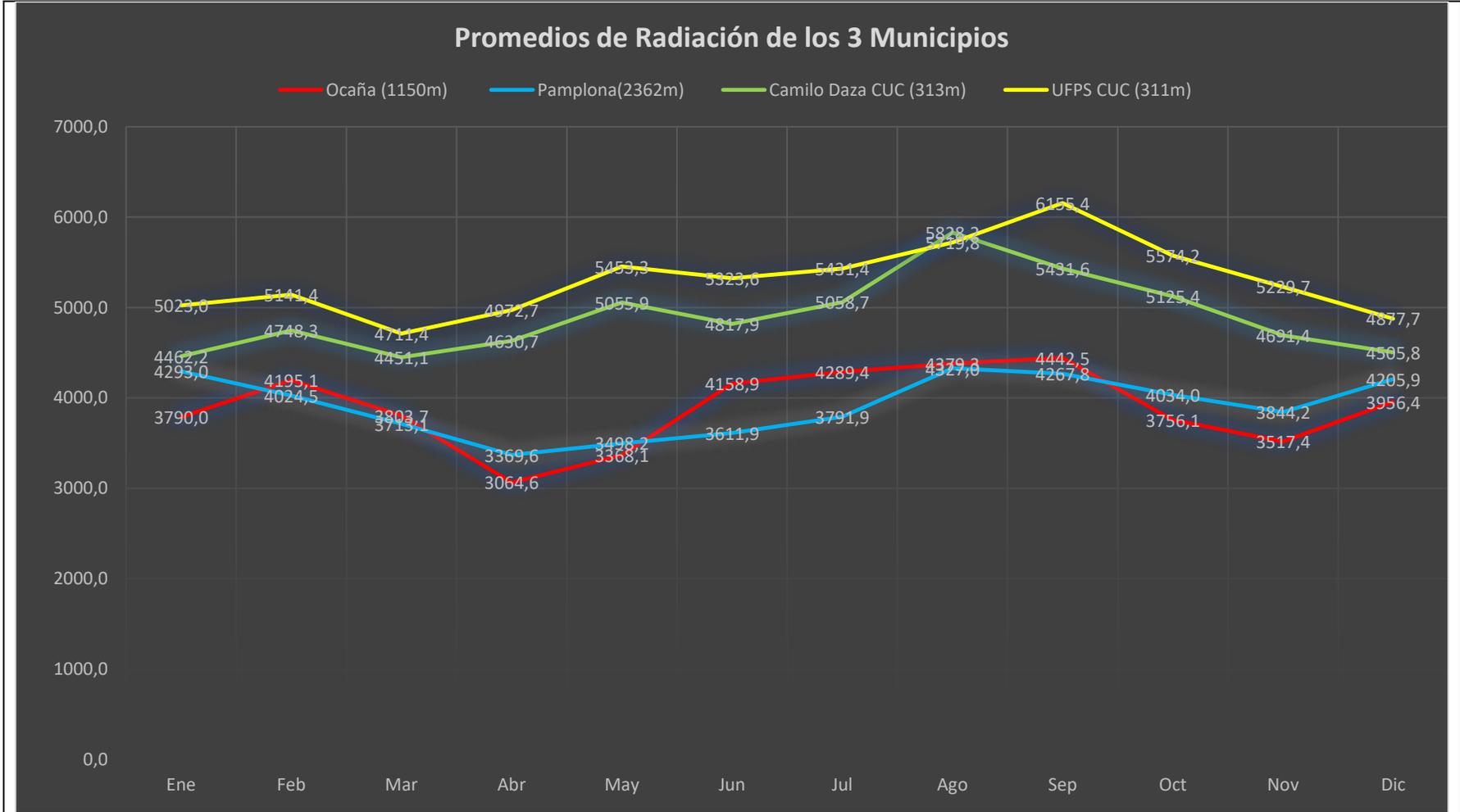


Figura 15. Promedios de la radiación solar de los municipios de Cúcuta, Ocaña y Pamplona.
 Fuente: *Elaboración Propia* basado en datos estadísticos del (IDEAM, 2018)

Por otra parte, dado que en la ciudad de Cúcuta se cuenta con dos estaciones cuya calidad de información es buena, se concluye que ambas estaciones presentan similitudes en la gráfica de comportamiento y se destaca que la estación UFPS genera datos desde el año 2005 hasta al año 2017, mientras que la estación Aeropuerto Camilo Daza genera datos desde el año 2015 hasta el 2018.

De igual manera, el análisis gráfico muestra que en el piso térmico templado se presenta un comportamiento del recurso solar que difiere en $1.712,9 \text{ Wh/m}^2$ en comparación con el piso térmico cálido, dado que el valor más alto es de $4.442,5 \text{ Wh/m}^2$. Además se presenta una variación considerable en el periodo mayo- junio en comparación con el piso térmico cálido y frío, ya que la ciudad de Ocaña presenta un incremento del 23 % en el dato de radiación solar con respecto al mes anterior, mientras que el piso térmico frío, presenta un incremento del 3,25 % y en el caso del clima cálido, se presenta un decrecimiento del 4,70 %, como se puede observar en la Tabla 19.

Tabla 19. Variación de la radiación solar en el periodo mayo-junio.

Pisos Térmicos	Templado	Frio	Cálido	
Incremento Wh/m ²	790,8	113,7	-238,0	-129,7
%	23,4790037	3,25131304	-4,70806686	-2,37883357

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

En el caso del piso térmico frío y el comportamiento de la radiación solar, se evidencia que es similar a la del piso térmico templado, ya que para el mes de agosto alcanza los 4.327 Wh/m^2 y la diferencia con el piso térmico cálido es $1.828,4 \text{ Wh/m}^2$.

Para finalizar y tras realizar los filtros de máximos y mínimos de las estaciones de referencia se obtuvo que el mes de diciembre, el cual está resaltado en verde en la Tabla 21 con un dato de $921,3 \text{ Wh/m}^2$, es el mes con el menor diferencial de radiación como se puede ver en la Tabla 20. A su vez, se observa que las diferencias son relativamente cercanas con los siguientes datos: $249,5 \text{ Wh/m}^2$, $299,9 \text{ Wh/m}^2$, 372 Wh/m^2 , $549,3 \text{ Wh/m}^2$, $671,8 \text{ Wh/m}^2$ y $921,3 \text{ Wh/m}^2$ en cada una de las ciudades que representan los pisos térmicos.

Tabla 20. Comparación radiación de máximos y mínimos por mes.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
1232,9	946,3	998,3	1908,0	2085,3	1711,7	1639,4	1340,5	1887,6	1818,1	1712,3	921,3	1407,7

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

Por esto se concluye que el mes de diciembre en todas las ciudades y estaciones analizadas muestra un comportamiento similar en cada uno de los pisos térmicos analizados, como se observa en la matriz que cruza los datos pertenecientes a estas 4 estaciones en la Tabla 21.

Tabla 21. Comparación de radiación solar mes de diciembre

Estación	Ocaña	Pamplona	Cúc Camilo Daza	Cúc UFPS
Ocaña		-249,5	-549,3	-921,3
Pamplona	249,5		-299,9	-671,8
Cúc Camilo Daza	549,3	299,9		-372,0
Cúc UFPS	921,3	671,8	372,0	

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

Como se mencionó al principio de este capítulo, es preciso tener confiabilidad y certeza de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas, fuente de la presente investigación; por lo anterior se plantea la validación de los datos por medio del modelo teórico Hottel, cuyas variables referentes están asociadas a la posición geográfica y corresponden a la latitud, altitud y el tipo de clima. Además, otra de las variables referentes es la del tiempo y corresponde al día y la hora. Para finalizar, se resalta que las variables geográficas de este modelo corresponden a ajustes empíricos realizados con anterioridad.

Ahora bien, para realizar la validación de la información producida por las estaciones meteorológicas del IDEAM se plantea una comparación entre los datos recolectados en campo y los datos arrojados por el Modelo Hottel. Es por esto que a continuación se muestran los datos modelados para los días 1, 13 y 30 de abril; 1, 16 y 30 de agosto; 1, 19 y 27 de septiembre y 5, 14 y 30 de diciembre, para los municipios de Cúcuta, presentado en la Tabla 22 y Tabla 23, Ocaña mostrado en la Tabla 24 y Tabla 25 y Pamplona ilustrado en la Tabla 26 y Tabla 27. Es importante destacar que para este modelo teórico se utiliza el calendario juliano ya que el cálculo de la inclinación solar dependiente del día fue realizado con este calendario, por eso es preciso desplazar las fechas en 13 días por su diferencia con el calendario gregoriano.

En concordancia con lo anterior se aclara que las fechas seleccionadas para la comparación se sustentan en los comportamientos diferenciales hallados en el análisis gráfico, para los cuales en el mes de abril se generaron los promedios de irradiación solar más bajos del año, debido a la influencia de la precipitación; para el caso de agosto y septiembre, es debido a que se presentaron los niveles más altos de irradiación de todo el año y para finalizar, diciembre fue el mes donde se presentó el comportamiento más homogéneo de los doce meses del año. Además, se destaca que no se utilizaron los promedios mensuales elaborados en la primera parte de este capítulo, toda vez que la estrategia de análisis se sustenta en días aleatorios.

Tabla 22. Irradiación horaria para la ciudad de Cúcuta por medio del método Hottel.

Hora	13-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-abr	1-ago	1-sep	5-dic	30-abr	30-ago	27-sep	30-dic
6	206,0	190,6	185,3	202,2	206,4	192,9	186,1	201,0	205,3	184,8	183,7	205,3
7	478,8	353,6	333,4	435,8	479,8	373,6	338,8	420,6	468,1	340,2	335,0	452,0
8	680,0	611,1	594,1	667,7	678,9	626,7	598,8	658,9	681,3	600,0	595,5	675,8
9	781,9	739,5	726,4	780,2	780,4	751,3	730,0	774,4	786,7	731,0	727,5	785,0
10	836,2	805,4	794,4	838,4	834,5	815,1	797,5	833,9	842,0	798,2	795,3	841,7
11	863,4	837,7	827,7	867,0	861,7	846,5	830,5	863,2	869,5	831,2	828,6	869,7
12	871,7	847,5	837,8	875,8	870,0	856,0	840,6	872,1	877,8	841,2	838,7	878,3
13	863,4	837,7	827,7	867,0	861,7	846,5	830,5	863,2	869,5	831,2	828,6	869,7
14	836,2	805,4	794,4	838,4	834,5	815,1	797,5	833,9	842,0	798,2	795,3	841,7
15	781,9	739,5	726,4	780,2	780,4	751,3	730,0	774,4	786,7	731,0	727,5	785,0
16	680,0	611,1	594,1	667,7	678,9	626,7	598,8	658,9	681,3	600,0	595,5	675,8
17	478,8	353,6	333,4	435,8	479,8	373,6	338,8	420,6	468,1	340,2	335,0	452,0
18	206,0	190,6	185,3	202,2	206,4	192,9	186,1	201,0	205,3	184,8	183,7	205,3
Suma	8564,3	7923,0	7760,3	8458,6	8553,3	8068,2	7804,1	8376,0	8583,5	7812,0	7770,1	8537,2
Promedio	713,7	660,2	646,7	704,9	712,8	672,4	650,3	698,0	715,3	651,0	647,5	711,4

Fuente: Elaboración Propia con base a. (Hottel, 1976)

Tabla 23. Irradiación horaria para la ciudad de Cúcuta datos IDEAM.

Hora	13-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-abr	1-ago	1-sep	5-dic	30-abr	30-ago	27-sep	30-dic
6	10	10	11	10	10	11	12	9	14	11	14	8
7	80	74	107	57	119	50	164	80	106	84	112	32
8	209	173	324	117	312	235	383	120	284	210	265	44
9	335	329	581	363	506	306	408	242	380	401	287	113
10	716	547	732	540	633	508	648	493	385	545	372	62
11	703	583	802	498	614	596	519	396	531	842	555	270
12	872	563	990	784	586	447	992	485	650	904	1026	383
13	988	1051	1027	859	869	403	838	836	771	952	1039	459
14	692	858	947	773	498	541	928	771	520	965	962	321
15	574	707	834	608	690	621	749	578	501	771	800	409
16	486	517	550	425	583	423	469	455	301	489	426	334
17	172	292	265	191	322	139	332	212	238	202	127	209
18	37	116	40	22	71	63	69	25	45	62	14	19
Suma	5874,0	5820,0	7210,0	5247,0	5813,0	4343,0	6511,0	4702,0	4726,0	6438,0	5999,0	2663,0
Promedio	489,5	485,0	600,8	437,3	484,4	361,9	542,6	391,8	393,8	536,5	499,9	221,9

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

Tabla 24. Irradiación horaria para la ciudad de Ocaña por medio del método Hottel.

Hora	16-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-mar	1-ago	1-sep	5-dic	30-mar	30-abr	27-sep	31-dic
6	304,10	283,92	278,46	299,91	305,21	289,15	281,10	298,61	301,71	277,70	276,44	301,67
7	610,37	484,46	459,20	566,54	611,47	502,35	465,16	551,05	599,22	466,65	461,02	583,87
8	790,48	729,04	711,61	778,51	789,66	741,40	715,96	770,50	791,06	717,03	712,95	786,26
9	877,02	840,52	827,95	874,76	875,77	849,59	831,15	869,67	880,66	831,94	828,93	879,14
10	922,12	896,05	885,83	923,31	920,77	903,51	888,46	919,47	926,65	889,11	886,64	926,32
11	944,50	922,94	913,81	947,00	943,14	929,63	916,17	943,71	949,28	916,75	914,53	949,42
12	951,32	931,04	922,24	954,16	949,96	937,51	924,52	951,03	956,16	925,08	922,94	956,42
13	944,50	922,94	913,81	947,00	943,14	929,63	916,17	943,71	949,28	916,75	914,53	949,42
14	922,12	896,05	885,83	923,31	920,77	903,51	888,46	919,47	926,65	889,11	886,64	926,32
15	877,02	840,52	827,95	874,76	875,77	849,59	831,15	869,67	880,66	831,94	828,93	879,14
16	790,48	729,04	711,61	778,51	789,66	741,40	715,96	770,50	791,06	717,03	712,95	786,26
17	610,37	484,46	459,20	566,54	611,47	502,35	465,16	551,05	599,22	466,65	461,02	583,87
18	304,10	283,92	278,46	299,91	305,21	192,88	191,49	200,02	301,71	185,57	184,76	301,67
Suma	9848,51	9244,92	9075,97	9734,20	9841,98	9272,51	9030,93	9558,45	9853,34	9031,31	8992,27	9809,77
Promedio	820,71	770,41	756,33	811,18	820,16	772,71	752,58	796,54	821,11	752,61	749,36	817,48

Fuente: Elaboración Propia con base a. (Hottel, 1976)

Tabla 25. Irradiación horaria para la ciudad de Ocaña datos IDEAM.

Hora	13-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-abr	1-ago	1-sep	1-dic	30-abr	30-ago	27-sep	31-dic
6	9,00	4	8,00	5,00	6,00	1,00	6,00	5,00	1	7,00	7,00	5
7	11,00	67	167,00	14,00	77,00	83,00	140,00	26,00	83	131,00	56,00	20
8	72,00	167	334,00	50,00	419,00	130,00	370,00	125,00	130	300,00	306,00	102
9	266,00	328	712,00	172,00	648,00	300,00	575,00	258,00	300	584,00	590,00	322
10	417,00	479	880,00	302,00	780,00	784,00	859,00	368,00	784	757,00	710,00	546
11	382,00	467	993,00	389,00	984,00	601,00	981,00	332,00	601	850,00	782,00	294
12	311,00	513	1095,00	557,00	550,00	513,00	860,00	318,00	513	1036,00	636,00	299
13	329,00	563	947,00	865,00	459,00	632,00	509,00	313,00	632	1039,00	651,00	333
14	574,00	571	898,00	769,00	583,00	337,00	463,00	473,00	337	876,00	682,00	370
15	499,00	657	257,00	648,00	198,00	279,00	196,00	486,00	279	695,00	708,00	414
16	41,00	95	245,00	387,00	84,00	163,00	412,00	137,00	163	462,00	291,00	145
17	1,00	116	111,00	132,00	43,00	66,00	143,00	40,00	66	259,00	142,00	109
18	0,00	23	36,00	35,00	12,00	12,00	41,00	10,00	12	185,57	27,00	17
Suma	2912,00	4050,00	6683,00	4325,00	4843,00	3901,00	5555,00	2891,00	3901,00	7181,57	5588,00	2976,00
Promedio	242,67	337,50	556,92	360,42	403,58	325,08	462,92	240,92	325,08	598,46	465,67	248,00

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

Tabla 26. Irradiación horaria para la ciudad de Pamplona por medio del método Hottel.

Hora	13-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-mar	1-ago	1-sep	5-dic	30-abr	30-ago	27-sep	30-dic
6	423,7	406,4	400,8	420,7	424,7	409,8	416,0	444,1	421,6	398,1	420,2	421,6
7	722,1	612,6	598,1	688,8	722,7	635,4	603,3	676,2	714,4	604,6	599,7	701,8
8	880,8	830,6	820,4	873,5	879,9	844,3	823,9	867,3	882,4	824,8	821,5	879,0
9	954,4	925,1	917,5	954,3	953,2	934,7	920,0	950,4	958,1	920,7	918,3	957,3
10	992,2	971,5	965,1	994,5	991,0	979,1	967,2	991,5	996,5	967,7	965,7	996,5
11	1010,8	993,7	988,0	1013,9	1009,6	1000,5	989,8	1011,5	1015,2	990,3	988,5	1015,6
12	1016,5	1000,4	994,8	1019,8	1015,3	1006,9	996,7	1017,5	1020,9	997,1	995,4	1021,4
13	1010,8	993,7	988,0	1013,9	1009,6	1000,5	989,8	1011,5	1015,2	990,3	988,5	1015,6
14	992,2	971,5	965,1	994,5	991,0	979,1	967,2	991,5	996,5	967,7	965,7	996,5
15	954,4	925,1	917,5	954,3	953,2	934,7	920,0	950,4	958,1	920,7	918,3	957,3
16	880,8	830,6	820,4	873,5	879,9	844,3	823,9	867,3	882,4	824,8	821,5	879,0
17	722,1	612,6	598,1	688,8	722,7	635,4	603,3	676,2	714,4	604,6	599,7	701,8
18	423,7	406,4	400,8	420,7	424,7	409,8	416,0	444,1	421,6	398,1	420,2	421,6
Suma	10984,6	10480,2	10374,5	10911,1	10977,6	10614,7	10437,2	10899,4	10997,3	10409,4	10423,2	10964,9
Promedio	915,4	873,3	864,5	909,3	914,8	884,6	869,8	908,3	916,4	867,5	868,6	913,7

Fuente: Elaboración Propia con base a. (Hottel, 1976)

Tabla 27. Irradiación horaria para la ciudad de Pamplona datos IDEAM.

Hora	13-abr	16-ago	19-sep	16-dic	1-abr	1-ago	1-sep	5-dic	30-abr	30-ago	27-sep	30-dic
6	21,0	5,0	5,0	4,0	21,0	7,0	6,0	6,0	26,0	8,0	7,0	4,0
7	73,0	46,0	90,0	108,0	39,0	70,0	55,0	24,0	61,0	73,0	41,0	40,0
8	114,0	186,0	434,0	401,0	290,0	182,0	362,0	173,0	231,0	232,0	195,0	156,0
9	154,0	366,0	688,0	651,0	154,0	313,0	415,0	246,0	254,0	298,0	533,0	373,0
10	460,0	391,0	871,0	880,0	225,0	453,0	865,0	153,0	406,0	376,0	885,0	366,0
11	749,0	543,0	996,0	1018,0	565,0	492,0	1066,0	345,0	321,0	448,0	1048,0	536,0
12	330,0	392,0	1080,0	605,0	890,0	632,0	1161,0	694,0	160,0	695,0	1015,0	629,0
13	241,0	541,0	1025,0	605,0	496,0	485,0	712,0	678,0	366,0	644,0	1115,0	480,0
14	442,0	708,0	639,0	718,0	149,0	396,0	490,0	485,0	505,0	807,0	1000,0	371,0
15	420,0	441,0	335,0	613,0	206,0	264,0	753,0	244,0	433,0	725,0	519,0	238,0
16	265,0	310,0	404,0	534,0	180,0	150,0	481,0	266,0	200,0	634,0	220,0	211,0
17	97,0	63,0	112,0	145,0	106,0	280,0	273,0	59,0	68,0	335,0	103,0	83,0
18	36,0	20,0	25,0	15,0	43,0	44,0	29,0	10,0	9,0	34,0	15,0	13,0
Suma	3402,0	4012,0	6704,0	6297,0	3364,0	3768,0	6668,0	3383,0	3040,0	5309,0	6696,0	3500,0
Promedio	283,5	334,3	558,7	524,8	280,3	314,0	555,7	281,9	253,3	442,4	558,0	291,7

Fuente: Elaboración Propia con base a. (IDEAM, 2018)

Es así, que el resultado de la validación de datos se expresa en la comparación entre los promedios reales y teóricos, que se analiza por medio de curvas de comportamiento, que para este caso es de tipo campana. A continuación, se evidencian las tendencias y similitudes de ambos datos, analizados por municipio y por los meses de abril, agosto, septiembre y diciembre planteados en el párrafo anterior.

En consecuencia, para la ciudad de Cúcuta en el año de referencia cumplen con los comportamientos modelados teóricamente y coinciden 2017, se encontró que las curvas de comportamiento de los 4 meses exactamente en el día 13 de abril a las 12:00 del día con un dato de 872 Wh/m² y además se presentan coincidencias cercanas en los días 01 de abril y 01 de septiembre, como se observa la Figura 16.

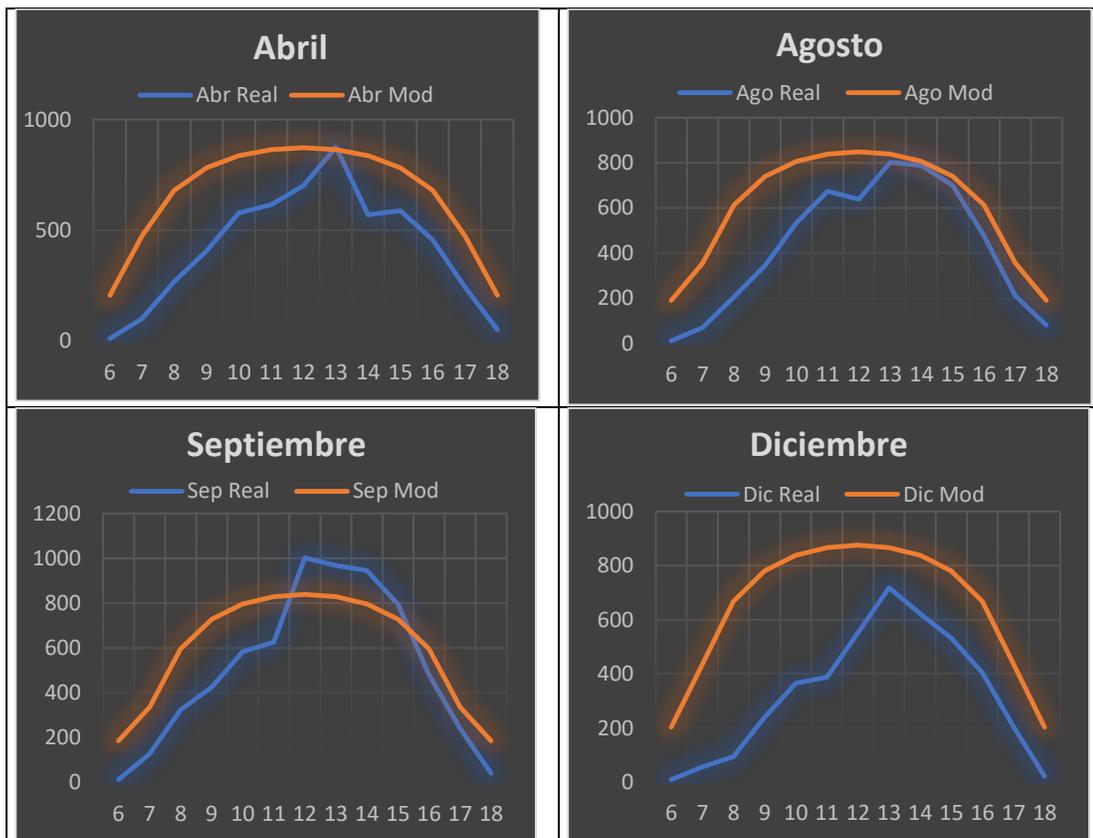


Figura 16. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teoricos para el municipio de Cúcuta.

Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018)

Para el caso del municipio de Ocaña, ilustrado en Figura 17, las curvas de comportamiento presentan similitud con las teóricas, pero solo en el mes de septiembre se alcanza el punto máximo donde coinciden ambas curvas. En datos puntuales, el mes de agosto presenta el dato más cercano de irradiación teórica en el día 30 con un total 876 Wh/m² en comparación con el dato de 889,1 Wh/m².

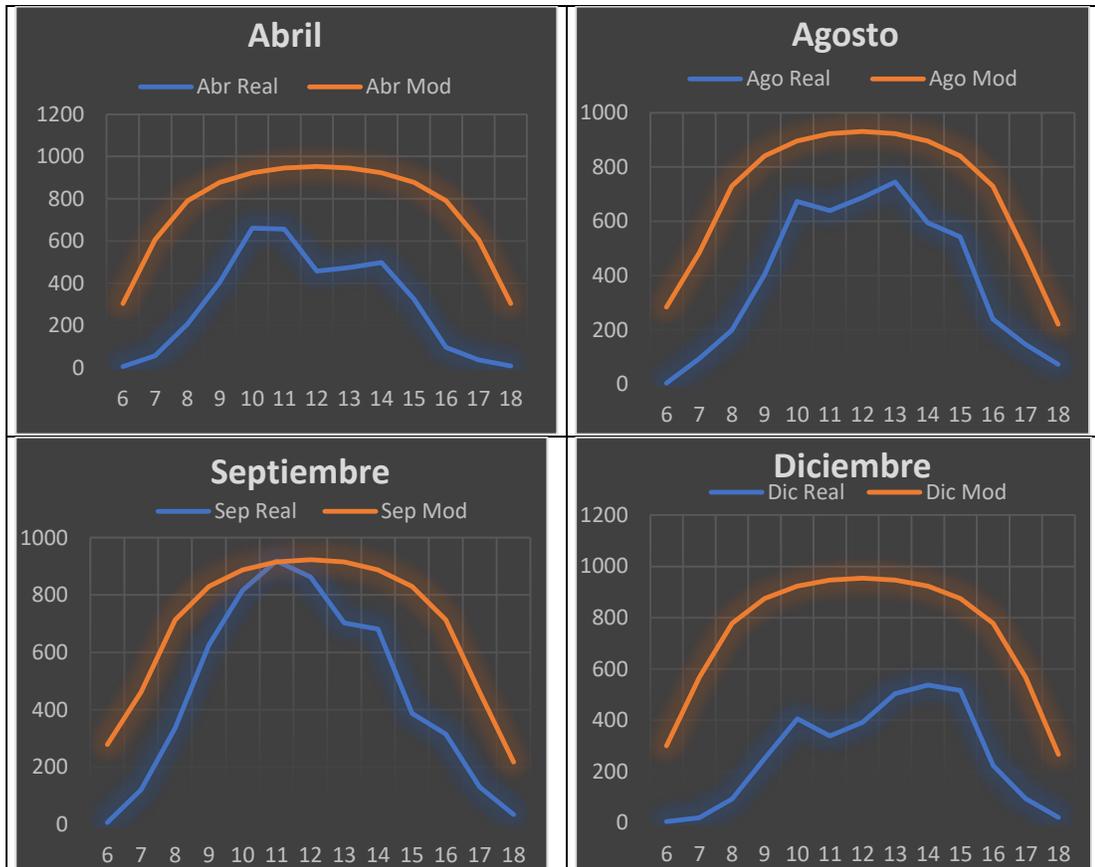


Figura 17. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teóricos para el municipio de Ocaña

Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018)

Complementando lo anterior, para el mes de Pamplona se presentan comportamientos que dan la forma de campana, pero con promedios inferiores a los del modelo teórico. Septiembre es el único mes que sobrepasa los promedios diarios tomados en campo. Por último, se destaca que el mes de diciembre presenta una forma idéntica en ambas graficas con una diferencia de 200 Wh/m² de irradiación solar, como se observa en la Figura 18

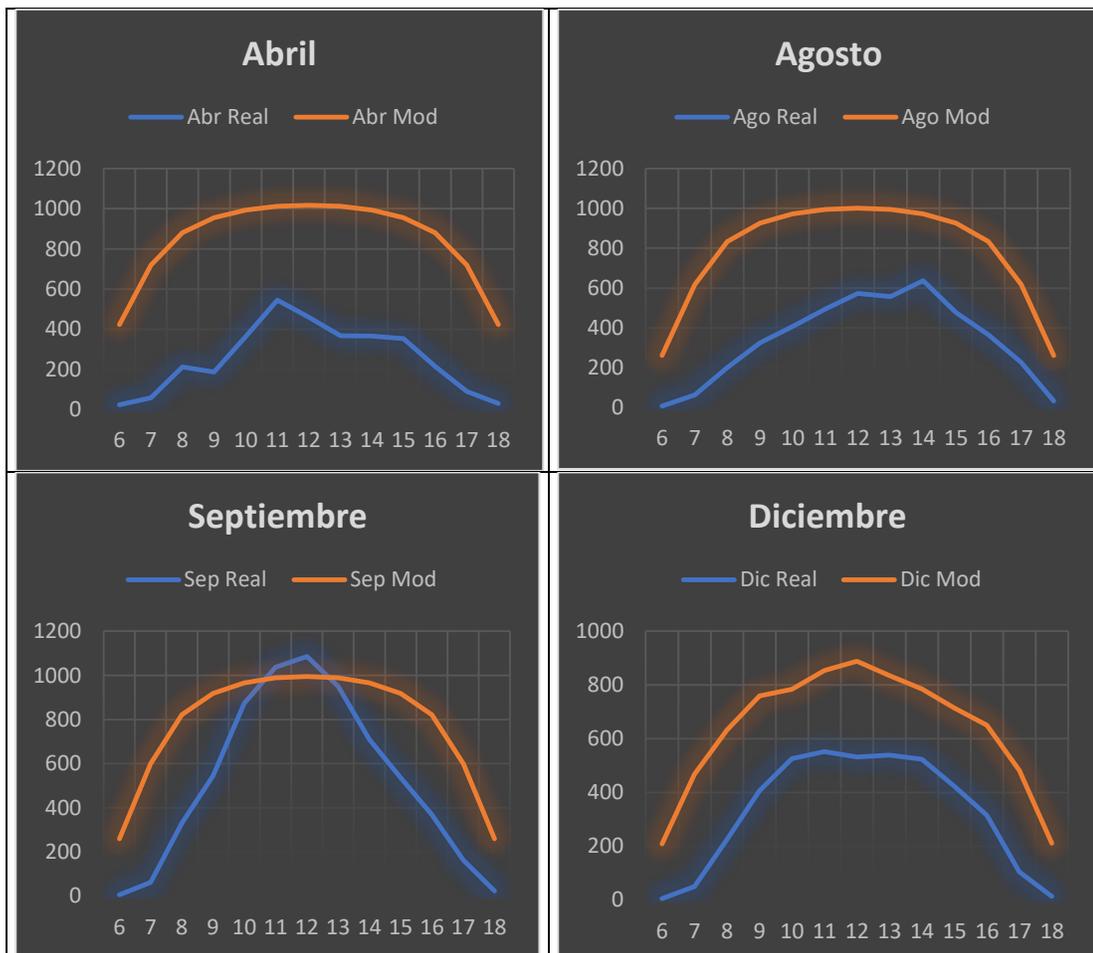


Figura 18. Analisis Comparativo de irradiación horaria entre datos reales y teoricos para el municipio de Pamplona.

Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018)

Por último, se destaca que frente a los datos generados por el modelo teórico Hottel se entiende o se espera que las cantidades estimadas por el mismo siempre sigan un patrón o tendencia, ya que no responden a las condiciones meteorológicas inmediatas que si entregan las estaciones de medición utilizadas en la presente investigación.

CAPÍTULO 3: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER

La definición del potencial energético es de gran relevancia para los departamentos y municipios de Colombia, debido a la oferta y diversidad que ofrecen los recursos no renovables y su transformación representada en opciones económicas y sostenibles. Otra de las razones de la importancia de hallar el potencial energético es que permite a los municipios seleccionar los territorios con mejores opciones para producir electricidad y complementar la matriz energética con la implementación de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCER).

Además, diversas aplicaciones son consideradas para el aprovechamiento de las FNCER, en las “áreas de ingeniería, arquitectura, agricultura, ganadería, salud humana y meteorología, fomentando su uso en la generación de energía eléctrica, en el diseño y calentamiento de agua, en el diseño de edificaciones, en el monitoreo de crecimiento de las plantas, en la deshidratación de alimentos” (IDEAM, 2017), entre otros.

La metodología planteada para conocer el potencial energético está basada en la generación de mapas que facilitan el dimensionamiento de soluciones energéticas para aprovechar la energía solar en el territorio rural y urbano, con aplicaciones útiles en los sectores agrícolas, industriales y eléctricos, que promuevan la gestión sostenible de la energía y la eficiencia energética.

Inicialmente, se filtran los datos correspondientes a las estaciones de medición presentes en el país. Se organizan en pestañas del programa Excel, en los cuales se carga la información total de las estaciones de medición proporcionadas, en este caso por el IDEAM, teniendo como base fundamental los promedios mensuales y totales de la radiación solar expuestos en el Capítulo dos, priorizando las siguientes categorías: Código de identificación, Municipio, Departamento, Ubicación geográfica, Elevación sobre el nivel del mar, Entidad y Valor promedio de radiación, como se ilustra en la Figura 19.

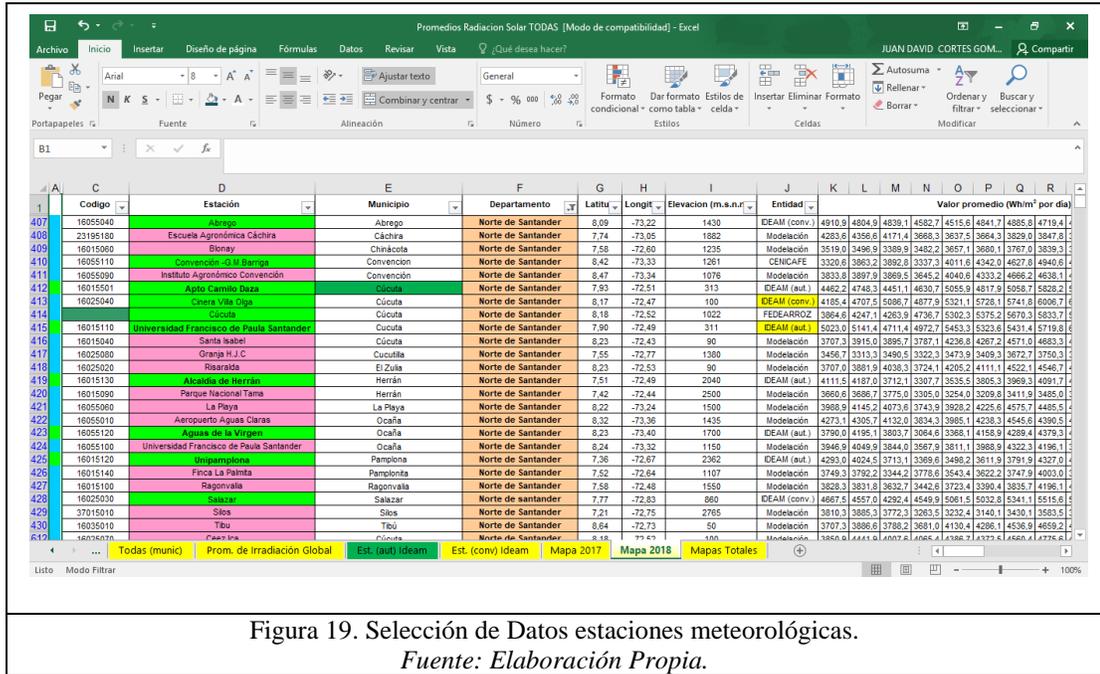


Figura 19. Selección de Datos estaciones meteorológicas.
Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente, se realiza la Georreferenciación e interpolación de las estaciones del IDEAM, mediante la herramienta tecnológica ArcGIS, para lo cual, se cargan los datos correspondientes de las estaciones de medición presentes en el país sobre el polígono que corresponde a la capa de municipios de Colombia, como se muestra en Figura 20

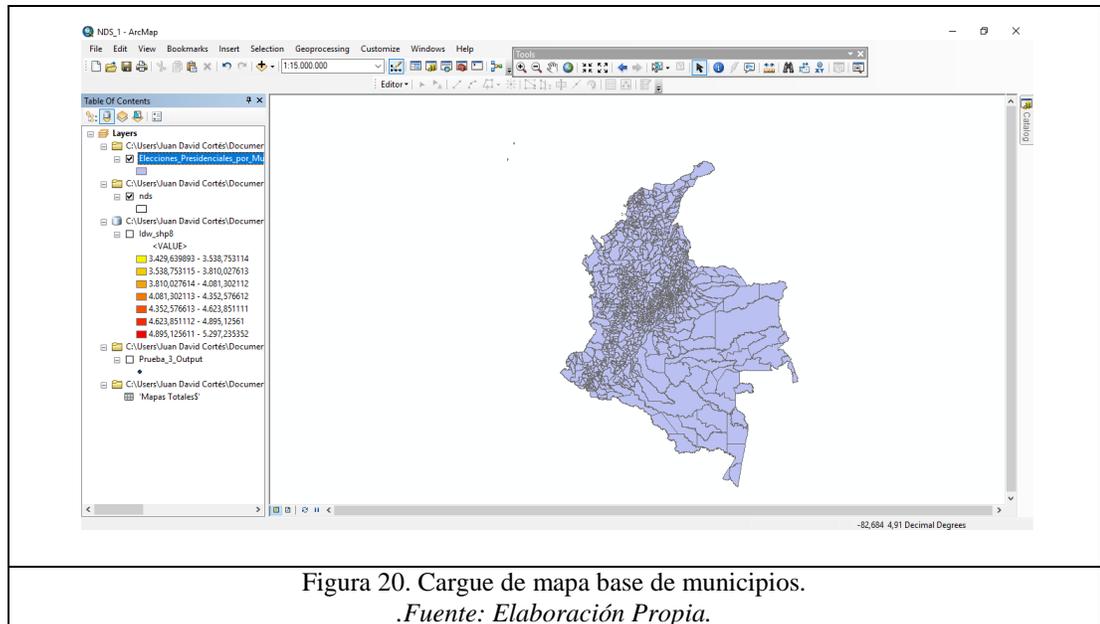


Figura 20. Cargue de mapa base de municipios.
Fuente: Elaboración Propia.

El resultado de la georreferenciación de las estaciones sobre la capa base de Colombia, muestra la cobertura y diversidad de las estaciones a lo largo de los asentamientos presentes en la cordillera central, la cordillera occidental y la zona norte del país, como se ilustra en la Figura 21.

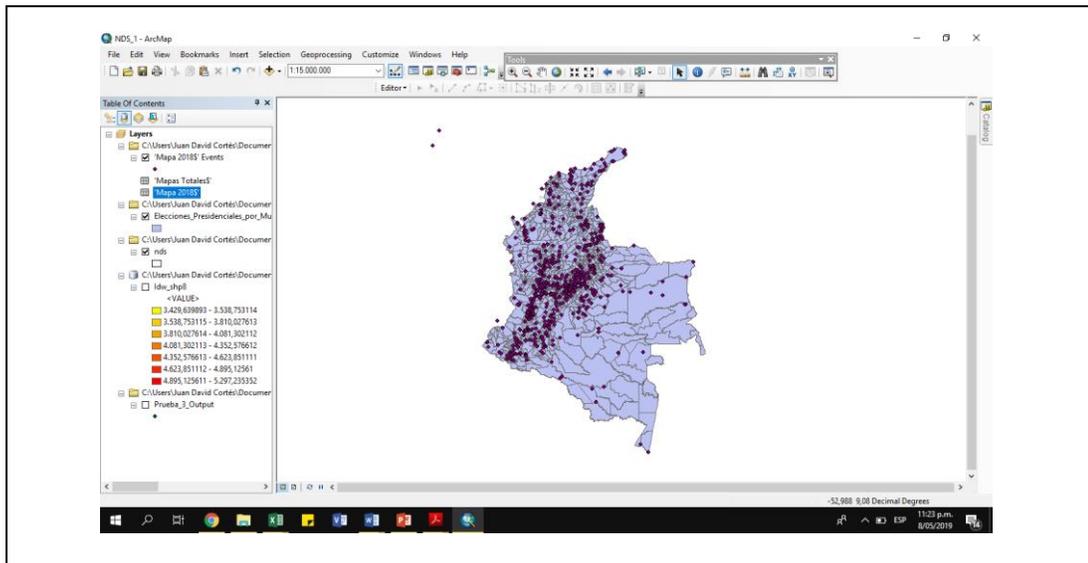


Figura 21. Resultados de la georreferenciación de las estaciones IDEAM.
.Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, por medio del análisis de distancias se realiza otro filtro, seleccionando las estaciones cercanas al departamento Norte de Santander, con motivo de obtener una mayor cantidad de datos para la identificación del potencial solar, como se ilustra en la Figura 22.

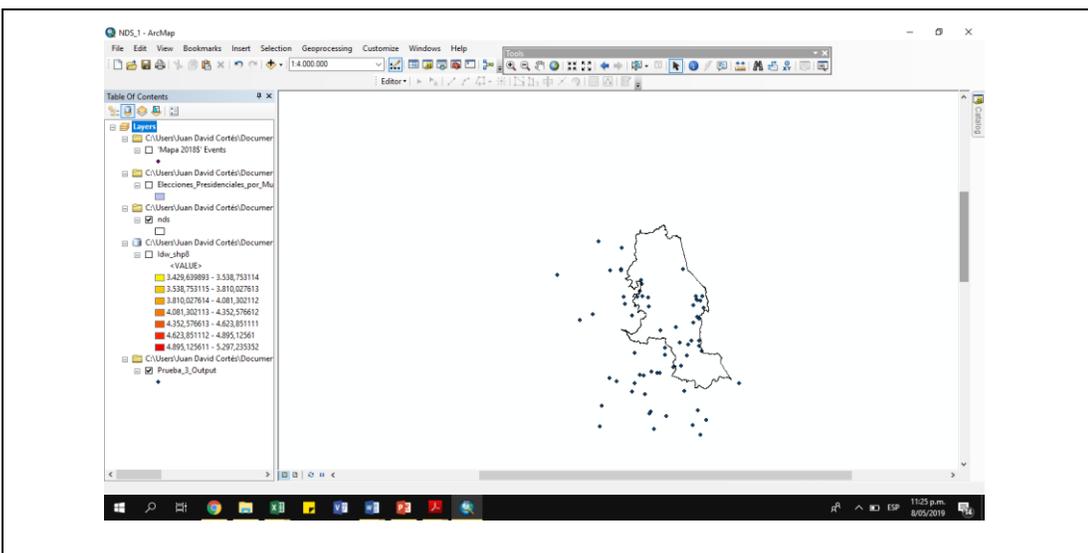
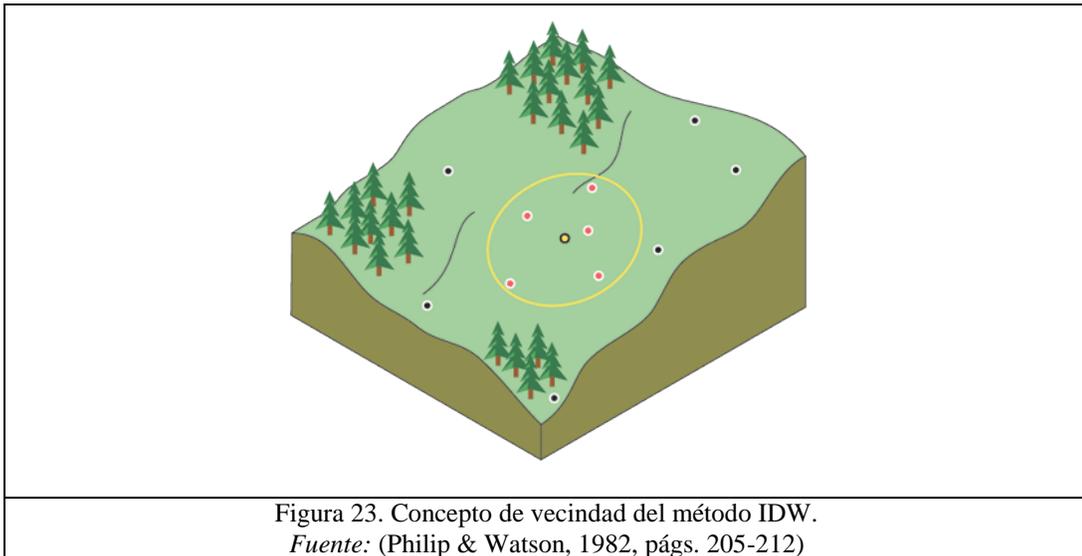
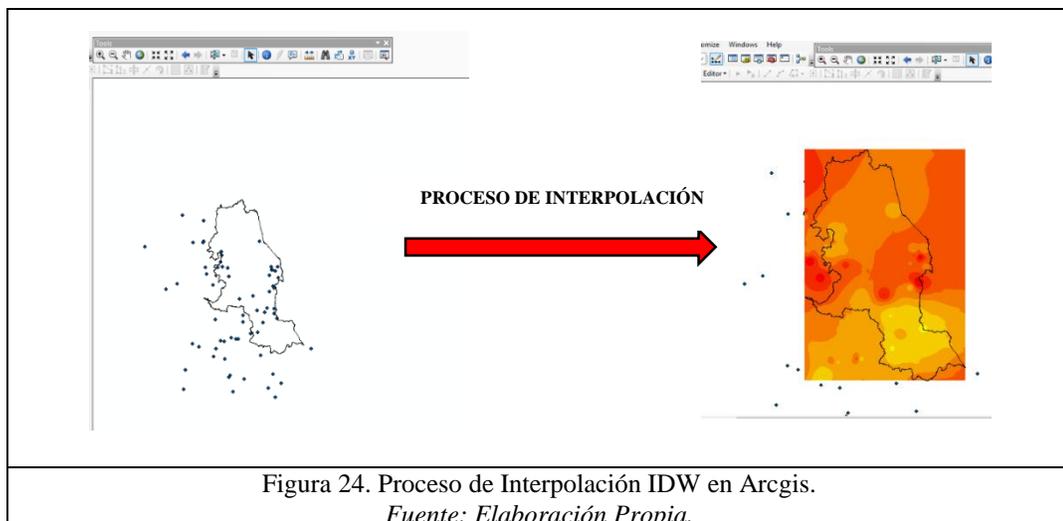


Figura 22. Selección de estaciones cercanas al Departamento Norte de Santander.
.Fuente: Elaboración Propia.

Una vez seleccionadas y georreferenciadas las estaciones, se procede a realizar la interpolación, con la herramienta tecnológica mencionada anteriormente, ArcGIS, denominado IDW. Este método está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática y su forma de análisis presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (Philip & Watson, 1982, págs. 205-212), como se ilustra en la Figura 23 y Figura 24.



Para la selección del método de interpolación y de generación de cartografía se tiene como referente el Atlas Interactivo del IDEAM, versión 2018, en el cual para la estimación de la radiación solar se aplica el método IDW con resultados positivos en los productos cartográficos construidos y mostrados en este atlas (IDEAM, 2019).



Es así que, para definir el potencial energético del Departamento Norte de Santander, se construyen y utilizan herramientas geográficas, como lo son los mapas de irradiación mensuales y anuales, basados en el Catálogo de Estaciones Meteorológicas del IDEAM con corte a enero de 2019.

En el Capítulo 2 se filtraron las estaciones de los municipios de Cúcuta, Ocaña y Pamplona. No obstante, con el fin de elaborar mapas que den cuenta del potencial energético solar en la totalidad del departamento, es determinante obtener diversas fuentes de información adicionales a las de los tres municipios previamente mencionados y que evidencien la mayor cobertura posible del departamento, haciendo necesaria la inclusión de las vecindades del mismo. Así, la generación de cartografía se sustenta en la Tabla 28, que referencia las estaciones seleccionadas en el departamento Norte de Santander y sus vecindades.

Tabla 28. Listado de estaciones seleccionadas en el Departamento y sus vecindades.

Código	Estación	Código	Estación	Código	Estación
37045010	Saravena	16015130	Alcaldía de Herrán	23195170	Provincia
23205050	Canelos	16015090	Parque Nacional Tama	24055050	Aguas Blancas
23205030	Santa Rosa de Simití	16055060	La Playa	24055070	San Vicente de Chucurí
23205030	Boavita	16055010	Aeropuerto Aguas Claras	24025070	Alberto Santos
24035310	Chiscas	16055120	Aguas de la Virgen	23195200	Cachiri
24035250	Chita	16055100	Universidad Francisco de Paula Santander	23195090	Vivero Surata
24035240	Sierra Nevada del Cocuy	16015120	Universidad de Pamplona	37015020	Berlín
23195240	Aguachica	16015140	Finca La Palmita	24055030	Zapatoca
0	San Martín	16015100	Ragonvalia	0	Majagual
23215040	Bella Cruz	16025030	Salazar	0	Yopal
23215060	La Gloria	37015010	Silos	23215030	Aguas Claras
25025330	Colegio Agronómico Pailitas	16035010	Tibú	23215050	La Mata
25025090	Aeropuerto Las Flores	23155030	Aeropuerto Yarigués	2120543	El Delirio
16055040	Abrego	24055080	Vizcaína- La Lizama	16025070	Ceez Ica
23195180	Escuela Agronómica Cáchira	23195230	Neomundo	16025010	Carmen de Tonchalá
16015060	Blonay	24035270	Granja Tinaga	16025050	Limoncito
16055110	Convención - G.M.Barriga	24025050	Charalá	16015050	San Faustino

16055090	Instituto Agronómico Convención	23125120	Cimitarra	23195130	Aeropuerto Palonegro
16015501	Aeropuerto Camilo Daza	23195190	San Antonio		
16025040	Cinera Villa Olga	24065020	Hacienda la Esperanza		
0	Cúcuta	24065030	Hacienda Trigueros		
16015110	Universidad Francisco de Paula Santander	23195502	Aeropuerto Palonegro		
16015040	Santa Isabel	24025090	Mogotes		
16025080	Granja H.J.C	24025020	El Cucharo		
16025020	Risaralda	24055040	Campo Capote		

.Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018)

El resultado del procesamiento de estos datos se expresa por medio de los mapas del análisis multitemporal a 2018, del recurso solar mensual del departamento de Norte de Santander, siendo su función principal la de territorializar el potencial energético del departamento. La Figura 25 retrata el análisis para los meses de enero a junio mientras que la Figura 26 los meses de julio a diciembre. Se subraya que el periodo multitemporal va desde el año 1975 hasta el 2018, el cual se define a partir del año de instalación de cada una de las estaciones meteorológicas y que se cuenta con la totalidad de dicha información brindada por el IDEAM.

Adicionalmente, con los datos consignados en los mapas del análisis multitemporal del potencial energético solar del departamento Norte de Santander se obtienen datos y dinámicas que se expresan según los criterios de pisos térmicos y de ubicación territorial o administrativa durante los doce meses del año, como se observa a continuación.

Una breve e introductoria mirada del análisis multitemporal del potencial energético solar, resume que para los meses de enero a junio el comportamiento es similar durante el primer trimestre del año; que, para el caso del segundo trimestre, se presenta el comportamiento más bajo del año en el mes de abril. Además, que el municipio de Pamplona es el que menor potencial presenta y finalmente, que el municipio de Cúcuta se perfila como el de mayor potencial energético anual en el departamento, tal como se ilustra en la Figura 25

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER A 2018 (ENERO-JUNIO)

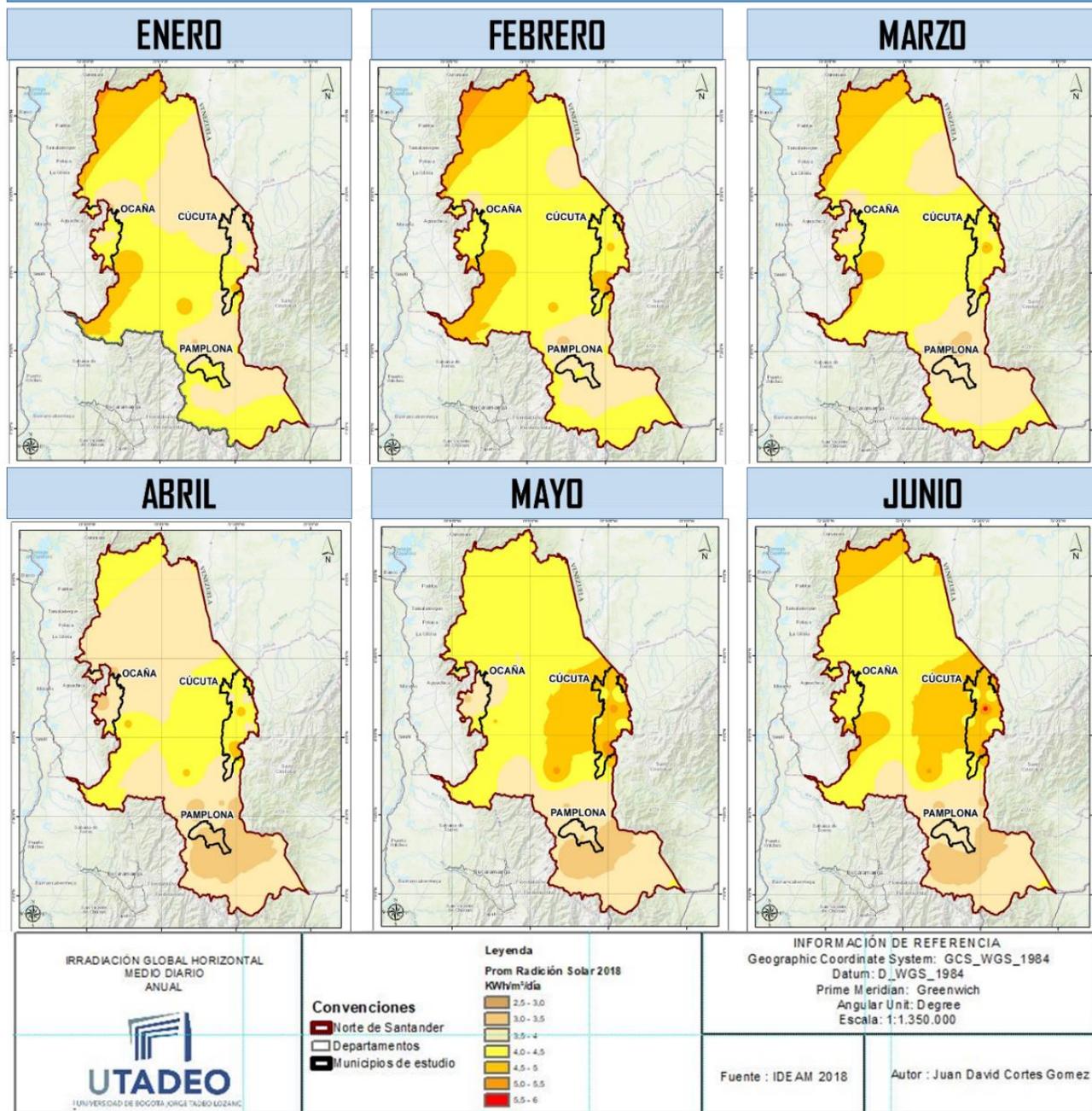


Figura 25. Análisis Multitemporal del potencial energético de Norte de Santander (enero-junio)

Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018)

La irradiación solar global horizontal para el mes de enero presenta sus máximos en los municipios de El Carmen de Nazareth con la totalidad del municipio en rangos que oscilan entre los 5 y 5,5 Kw/m²/día. En el caso de Abrego, La Esperanza y el área urbana de Cúcuta el comportamiento es similar al de enero, solo que en menor proporción territorial. En general el mes de enero expone un potencial heterogéneo que ronda entre los 3 y 4 Kw/m²/día. Es de relevancia mostrar como el municipio de Pamplona y el de Tibú se comportan de manera similar pese a la diferencia de alturas de ambos, ya que el primero está en piso térmico frío y el segundo en el cálido.

Para el mes de febrero se estima un incremento general en todos los municipios del departamento, siendo El Carmen de Nazareth, Abrego, La Esperanza y el área urbana de Cúcuta reincidentes en los máximos departamentales de irradiación solar. Para el caso del municipio de Pamplona se aprecia la disminución representada en el rango de 3,5 – 4 kw/m²/día, disminuyendo 1 Kw/m²/día con respecto al mes de enero.

En el mes de marzo se disminuye ampliamente la irradiación solar y son reiterativos los municipios El Carmen de Nazareth, Abrego y Cúcuta, siendo estos los de mayor influencia para el aprovechamiento del recurso solar, aclarando que en el caso de El Carmen es en la totalidad de su extensión mientras que en los dos restantes es en algunos sectores. Sus promedios toques van hasta los 5,5 kw/m²/día, mientras que los promedios más bajos para este periodo se dan en el municipio de Pamplona, Cúcuta, Chitagá, Mutiscua, Pamplonita y Silos, oscilando entre los 3 y 3,5 Kw/m²/día.

Durante el mes de abril, se identifica una gran reducción en la cantidad de irradiación solar en este mes, dejando gran porción del departamento con potenciales que oscilan entre los 3 y 4 Kw/m²/día. Para el caso de la subregión centro y oriental la irradiación solar oscila entre los 4 y 4,5 Kw/ m²/día, y para el caso de Abrego y el área urbana de Cúcuta se denotan zonas que están en el rango de los 5-5,5 Kw/m²/día.

Para el mes de mayo se aprecia un comportamiento homogéneo en el departamento cuyo dato de irradiación oscila entre los 4 y 4,5 Kw/m²/día, mientras Ocaña, San Calixto y Teorama presentan rangos entre los 3,5 y 4, 6. Kw/ m²/día. Por otra parte, el municipio de Pamplona presenta un leve aumento ya que pasa al rango de los 3,5-4 Kw/m²/día. Los municipios cercanos a Pamplona, como Labateca, Herrán, Cacota de Velasco y una pequeña porción al nororiente de Toledo presentan los niveles más bajos de radiación del departamento con un dato equivalente al rango de 3-3,5 Kw/m²/día. Finalmente, la Subregión Oriental que alberga a Cúcuta y su área metropolitana es la de mejores registros para esta época del año frente al potencial energético solar, con unos picos máximos que van hasta los 5,5 Kw/m²/día.

En el mes de junio el municipio de Ocaña presenta un incremento considerable en la irradiación solar, aumentando 1 Kw/m²/día, dejándolo en el rango 4 -4,5 Kw/m²/día. En el municipio del Carmen de Nazareth, Abrego y la subregión oriental y suroriental del departamento se presentan incrementos que lo dejan situado en el rango de 4,5- 5 Kw/m²/día, para el caso de Pamplona y las subregiones centro y suroccidental no se presenta gran cambio y la irradiación que se obtiene se encuentra entre los 3 y 4 Kw/m²/día.

El presente análisis multitemporal del potencial energético solar consta de dos partes, el periodo enero-junio y el periodo julio-diciembre, en el caso del segundo en mención, como se ilustra en la Figura 26 se presentan las siguientes observaciones: la primera es que en el tercer trimestre del año se alcanzan los niveles más altos de irradiación solar del departamento, presentados en los meses de agosto y septiembre; la segunda es que en el mes de diciembre el potencial energético disminuye y es homogéneo a lo largo del territorio Nortesantandereano y por último que el municipio de Cúcuta sostiene y aumenta los niveles del primer semestre con respecto a la irradiación solar. a continuación, se presenta la descripción mensual del departamento:

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER A 2018 (JULIO-DICIEMBRE)

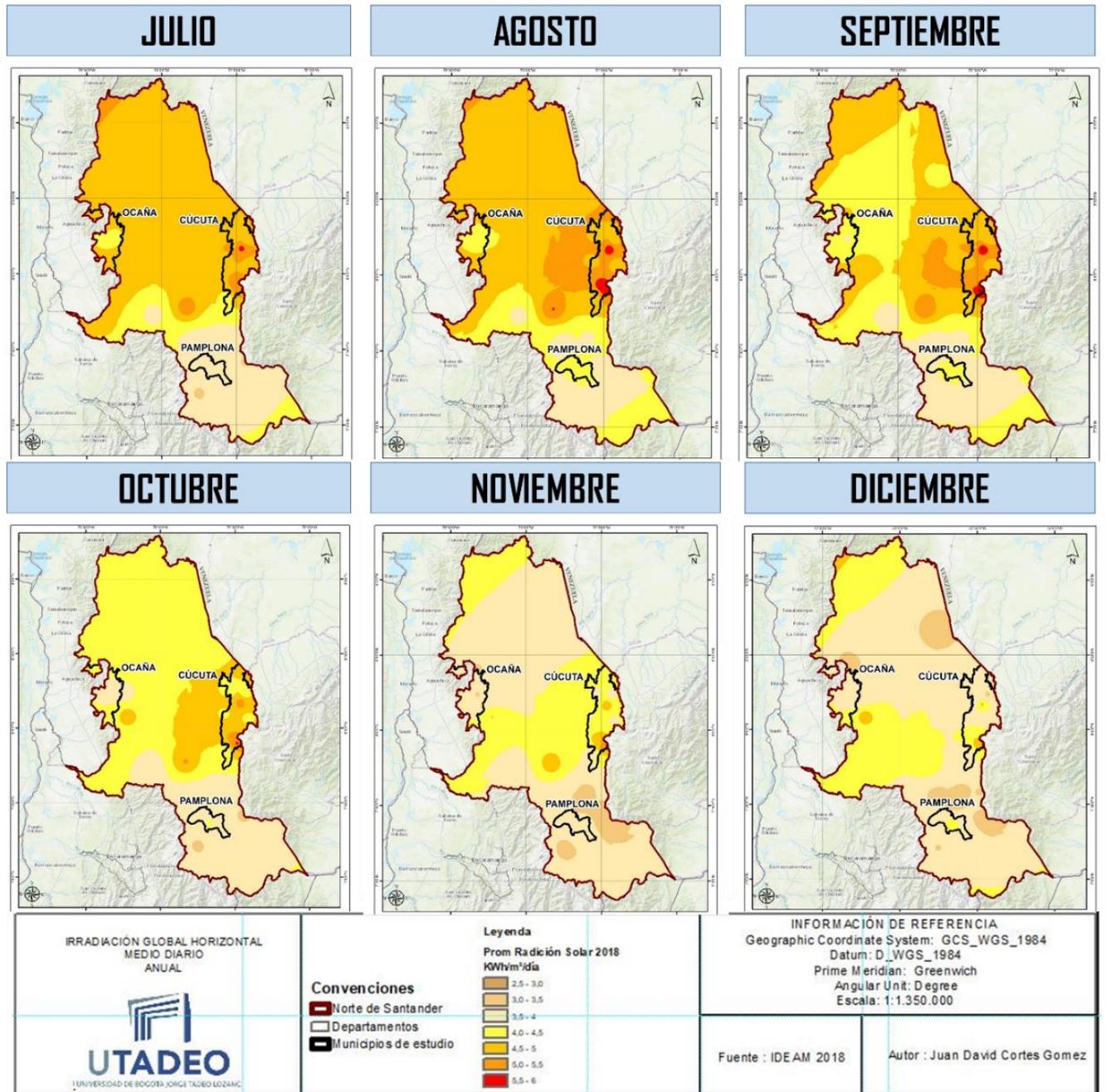


Figura 26. Análisis Multitemporal del potencial energético de Norte de Santander (julio-diciembre)
Fuente: Elaboración Propia con base en (IDEAM, 2018).

El primer mes del tercer trimestre es julio y muestra un comportamiento homogéneo a lo largo del departamento con un rango de 4,5- 5 Kw/m²/día en las subregiones norte, occidental, oriental, suroriental y centro, en estas regiones se resaltan el municipio del Carmen de Nazareth con un rango de 5- 5,5 Kw/ m²/día y el municipio de Cúcuta en el corregimiento de buena esperanza que llega hasta los 6 Kw/ m²/día, siendo el punto máximo de radiación departamental en este mes. Por otra parte, la provincia suroccidental presenta incrementos leves que estiman la irradiación solar en el rango de los 3,5-4 Kw/ m²/día, además se destaca que el municipio de Ocaña fue el de menor variación en este mes.

Por su parte, agosto ilustra el gran potencial que el departamento tiene, ya que mantiene los datos del mes de julio con un rango de 4,5- 5 Kw/ m²/día en las subregiones norte, occidental, y centro, pero la gran novedad se presenta en las subregiones oriental y suroriental con un rango de 5- 5,5 Kw/ m²/día, además, se observan 3 puntos de máxima radiación, el primero de ellos en el municipio de Cúcuta en el corregimiento de buena esperanza, el segundo en el área urbana del municipio de Cúcuta y el tercero en un pequeño punto en el municipio de Salazar de las Palmas. El mes agosto es de alto impacto en la radiación incluso para el municipio de Pamplona y sus bajos registros, ya que para este mes alcanzan los 4,5 Kw/ m²/día.

Para el mes de septiembre la irradiación solar disminuye en los municipios de convención, El Tarra, Teorama, San Calixto, La Playa mostrando rangos entre los 4 - 4,5 Kw/ m²/día. Para el caso de la provincia suroccidental en la que se encuentra Pamplona, la variación fue mínima e incluso se observa un comportamiento similar de un mes a otro. A pesar de la disminución general en el departamento dos puntos o zonas en el municipio de Cúcuta presentan los máximos datos de irradiación solar, el primero en el corregimiento de buena esperanza y el segundo en el área urbana de Cúcuta, encontrándose en el rango de los 6-6,5 Kw/ m²/día.

En el mes de octubre se aprecia la reducción de la irradiación solar a lo largo del departamento en donde la mayor cantidad del territorio se encuentra en el rango de 4- 4,5 Kw/ m²/día, extendiéndose por las regiones occidental, una porción del norte, y los municipios de la región oriental Bochalema, Chinácota, Ragonvalia y Villa del Rosario Para el caso de la subregión oriental (Cúcuta, El Zulia, Los Patios, Puerto Santander) y la subregión norte (Sardinata, Salazar, Bucarasica) el rango que se presenta va de los 4,5-5,5 Kw/ m²/día, siendo reiterativos el corregimiento de Buena Esperanza, el área urbana de Cúcuta con rangos que llegan a los 6 Kw/ m²/día. Para el caso de la provincia centro, suroccidental y suroriental el comportamiento es homogéneo con un rango promedio que oscila entre los 3,5- 4 Kw/ m²/día

En el mes de noviembre se aprecia la disminución general de la irradiación solar resaltando tres rangos: el primer rango 3,0- 3,5 Kw/ m²/día en la subregión suroriental, el segundo rango 3,5- 4 Kw/ m²/día, en gran parte de la subregión norte, occidental, resaltando al municipio del Carmen. y suroccidental y el tercer rango en 4,5Kw/ m²/día en la subregión oriental y centro, conservando los puntos de mayor irradiación en el área urbana de Cúcuta, el corregimiento de Buena Esperanza y el municipio de Salazar de las Palmas.

Diciembre muestra un comportamiento homogéneo compuesto principalmente por el rango de 3,0- 3,5 Kw/ m²/día, con las excepciones de la provincia centro, el área urbana de Pamplona, el Carmen, Convención, Abrego, Cáchira y el Municipio de Cúcuta con un promedio de irradiación de 4-4,5 Kw/ m²/día. Para este mes se demuestra que los puntos con mayor irradiación solar a lo largo del año y que reinciden son el corregimiento de Buena Esperanza, el área urbana de Cúcuta y el municipio del Carmen de Nazareth con un rango de 4,5 – 5 Kw/ m²/día.

Por lo anteriormente mencionado en el análisis multitemporal se observa que en el compendio anual se destacan 3 rangos de irradiación solar. El primero de ellos y en mayor proporción el de 4 – 4,5 Kw/ m²/día, que comprende los municipios de Tibú, El Tarra, Convención, Teorama, San Calixto, La playa, Abrego, La esperanza, Villa Caro, Bucarasica, el área rural de Sardinata, Santiago, San Cayetano, Los Patios, Durania, Villa del Rosario, Lourdes y Salazar con pequeñas partes de su territorio y el extremo sur de Chitagá y Toledo que colinda con el Departamento de Boyacá, como se puede observar en la Figura 28 y Figura 27.

El segundo rango con mayor presencia es 3.5-4 Kw/ m²/día, en los que se encuentra el área urbana de Ocaña, Cáchira, Arboledas, Cucutilla, Bochalema, Chinácota, Ragonvalia, Herrán, Pamplona, Pamplonita, Mutiscua, Cacota, Silos, Labateca, Toledo y Chitagá.

El tercer rango identificado en el departamento y que se encuentra distribuido en menor proporción es el 4,5-5 Kw/ m²/día, integrado por los municipios de El Carmen en el extremo que comunica con el Departamento del Cesar, y una pequeña zona de Convención que colinda con el Carmen y Venezuela. En el centro de Abrego se identifica una zona de gran potencial perteneciente a este rango. Al igual que Sardinata, El Zulia, Salazar de las Palmas, Lourdes, Gramalote y Cúcuta, este último a su vez cuenta con dos puntos en su territorio que llegan a los 5,5 Kw/ m²/día, el primero de ellos situado en el área urbana y el segundo en el corregimiento de Buena Esperanza.

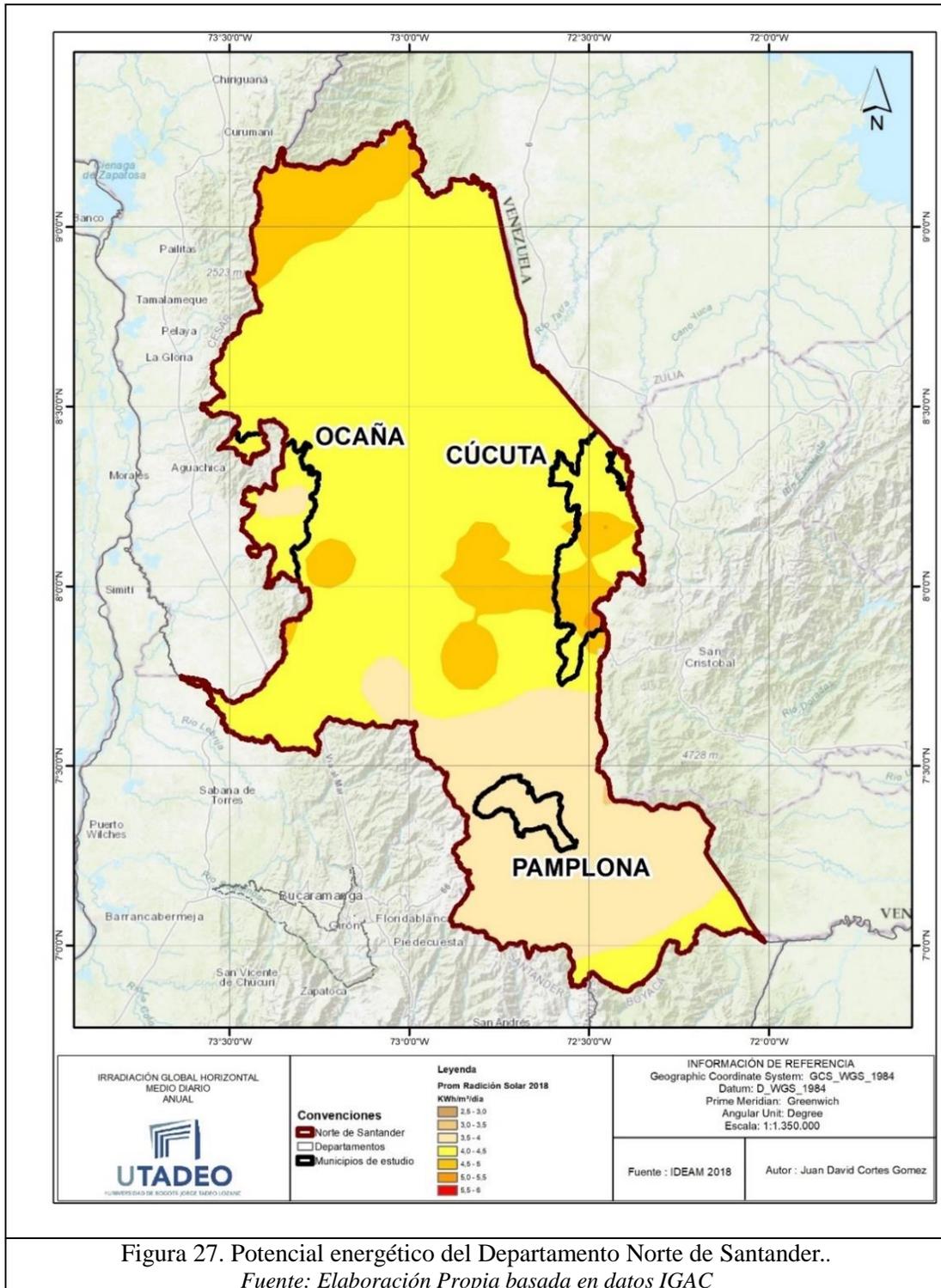


Figura 27. Potencial energético del Departamento Norte de Santander..

Fuente: Elaboración Propia basada en datos IGAC

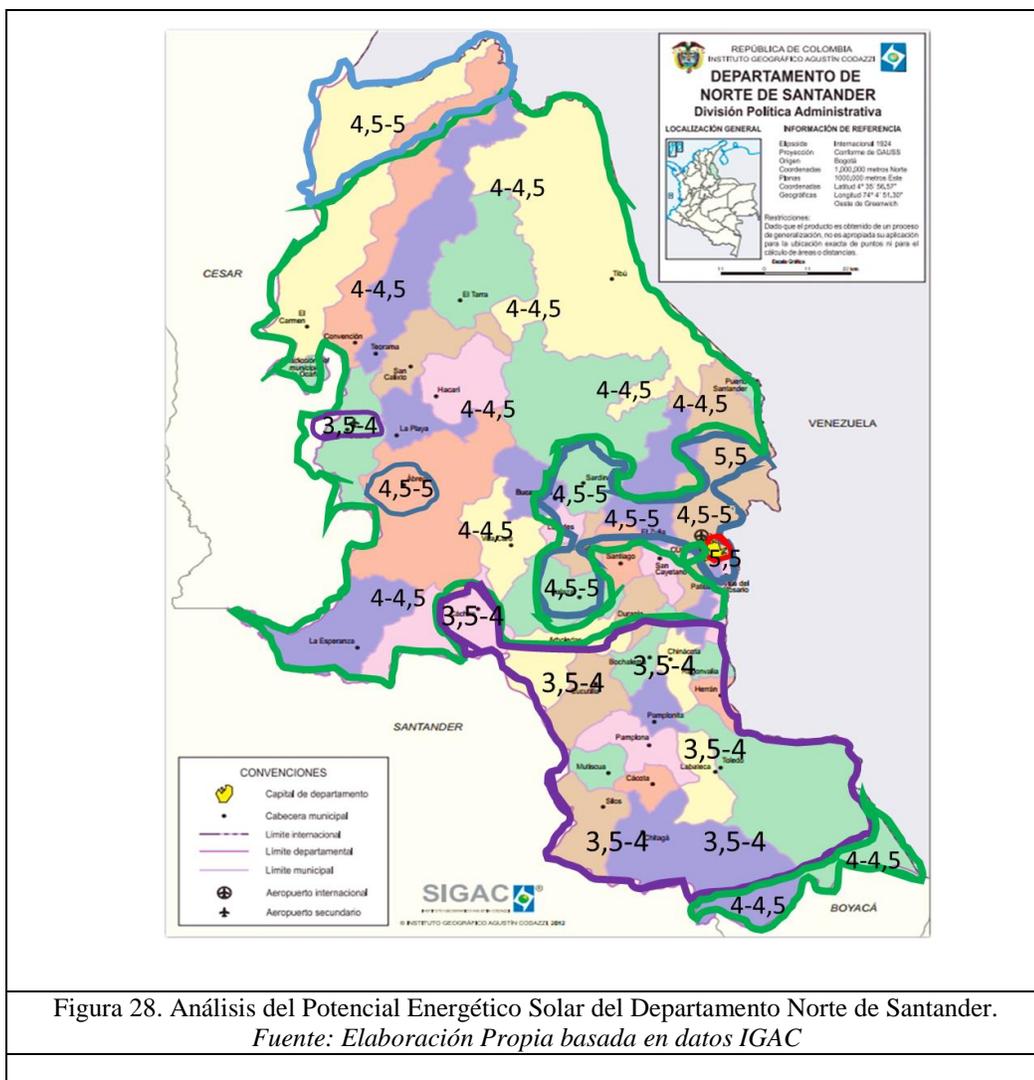


Figura 28. Análisis del Potencial Energético Solar del Departamento Norte de Santander.

Fuente: *Elaboración Propia basada en datos IGAC*

Para finalizar se presentan los resultados de la construcción del mapa de irradiación solar de Colombia, que describe el potencial energético del territorio nacional, ilustrado en la Figura 29 y que destaca al Departamento Norte de Santander en el rango de 4-4.5 Kw/ m²/día, denominado intermedio en comparación con los demás departamentos, ya que el país presenta sus mínimos en Choco y Pasto en un rango 2.5-3 Kw/ m²/día y los máximos en la Guajira y Arauca con datos de irradiación que van hasta los 6 Kw/ m²/día.

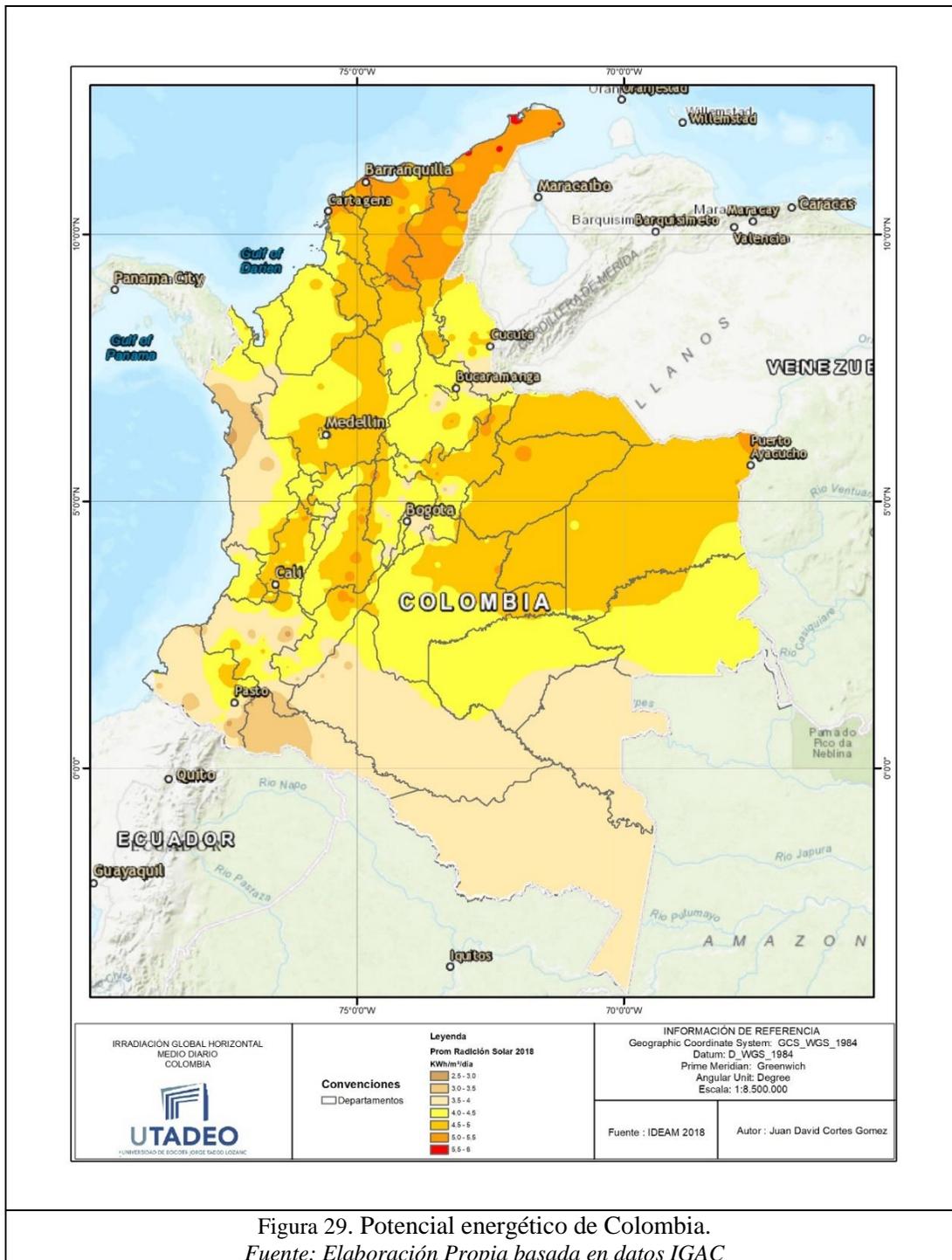


Figura 29. Potencial energético de Colombia.
Fuente: Elaboración Propia basada en datos IGAC

Ahora bien, teniendo en cuenta el potencial energético determinado para el departamento Norte de Santander en esta investigación, se destacan algunos usos, ventajas y aplicaciones que mejoran la calidad de vida de las personas teniendo como base el haber determinado y conocido las características del potencial solar de sus territorios.

Uno de los mayores aportes trata del descubrimiento e ilustración a los municipios del departamento acerca de la gran oportunidad de generar beneficios económicos aprovechando un recurso con el que no se contaba. Soportado en el objetivo de que los avances científicos tienen como propósito garantizar condiciones de calidad de vida a los habitantes del planeta tierra, es por esto que el avance científico en la estimación del potencial de los recursos renovables es fundamental para integrarlo como solución a los problemas de abastecimiento energético o incluso mejorar la calidad de las matrices energéticas de las ciudades.

La reducción de costos se encuentra entre las principales ventajas de implementar energías renovables, dados los altos costos que genera producir con combustibles fósiles, prueba es que para diciembre de 2017 el costo de energía para el departamento de Mitú, Colombia fue de 3.117 \$/kWh en comparación con los \$287 kWh que se trazan en la bolsa de energía del país y los \$529,0 kWh que se pagan en promedio para estrato 5 y 6 en la ciudad de Bogotá. y además con la referencia de los \$ 519 kWh que se paga en el departamento Norte de Santander.” (López, 2016)

En el caso de los usos, el objetivo es generar cobertura, teniendo en cuenta que las zonas más vulnerables de Colombia tienen como característica principal la no prestación de los servicios básicos, entre estos el servicio de electricidad, estas zonas se denominan Zonas No Interconectado (ZNI) y para el gobierno colombiano son uno de los retos más importantes, y su objetivo es ampliar la cobertura del suministro de energía eléctrica en las zonas aisladas del país en los próximos años, con criterios de calidad y continuidad, por esto el conocimiento de los potenciales energéticos municipales contribuirá a estos objetivos nacionales. (IPSE, 2019).

En el marco de los objetivos del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE), está en gestionar y difundir información de referencia de las ZNI que permita apoyar la implementación de soluciones energéticas estructurales, logrando esto por medio de la aplicación de sistemas de medición de potenciales energéticos en las ZNI, insumo para la planeación de proyectos energéticos con fuentes no convencionales. (IPSE, 2019)

Para el caso de las ventajas mencionadas en la introducción de este aparte, Colombia genera desde el año 2001 legislaciones que promueven e incentivan el uso de las

fuentes no convencionales de energía renovable. La ley 697 de 2001, es la primera de su tipo, en la que se incentiva que en Colombia se enlacen las Zonas No Interconectadas(ZNI) y ley 1715 de 2014 genera incentivos económicos para la aplicación de estas tecnologías liberándolas de aranceles por su importación y del impuesto IVA, brindando ahorros a quienes decidan invertir en las FNCER.

En concordancia con lo anterior, la determinación del potencial energético del departamento es una gran realidad y herramienta frente a la gestión de recursos para la producción de energía eléctrica y para aprovechar las estrategias para la implementación de las Fuentes No convencionales de Energía Renovable y el Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía establecido para Colombia. (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

El uso desmesurado de los recursos naturales en el planeta tierra, ha generado la creciente preocupación acerca del incremento de la contaminación del aire y de la temperatura, por esto las organizaciones y cumbres mundiales han promovido una producción limpia que reduzca las emisiones, estableciendo este parámetro como ventaja frente a los otros tipos de producción, además se destaca que Colombia contribuye al 0,46 % de las emisiones globales, y conforme a la meta planteada en el COP21 de “mantener el aumento de la temperatura global muy por debajo de los 2 °C y hacer el mayor esfuerzo para no sobrepasar 1,5 °C, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016)

Para finalizar se destaca que el conocimiento del potencial energético contribuye a reducir las incertidumbres acerca de las fuentes no convencionales de energía renovable y además las posiciona como candidatas para aplicarse en los periodos afectados por el fenómeno del niño, dada la condición de sequía y abundante cantidad del recurso solar, teniendo en cuenta que la matriz de producción eléctrica colombiana se soporta en las hidroeléctricas y en estos periodos en termoeléctricas de alto costo y de alta producción de emisiones.

CONCLUSIONES

Para concluir este estudio de investigación se presentan a continuación los aspectos más relevantes y que contribuyen a las respuestas generadas por los objetivos planteados. La primera de ellas se basa en que se ilustró la importancia, la composición, características y comportamiento del recurso solar y los ejemplos para la transformación de la energía emitida por esta estrella, bien sea en los procesos naturales o en el desarrollo de tecnologías en el aprovechamiento térmico y fotovoltaico.

Además, el análisis del comportamiento del recurso solar en el departamento de Norte de Santander, demostró que el comportamiento en el piso térmico cálido, representado por el municipio de Cúcuta, es el más alto en comparación con los pisos térmicos templado, representado por el municipio Ocaña y frío representado por el municipio de Pamplona. En razón de lo anterior, el clima cálido posee un registro equivalente a los $6.155,4 \text{ Wh/m}^2$ de irradiación solar. Además, por medio del modelo teórico Hottel se validaron los datos de las estaciones meteorológicas fuente de la información, realizando la comparación entre los promedios empíricos y teóricos, generando como conclusión que el comportamiento de las curvas de irradiación solar horaria era similar para los datos tomados en campo en los 4 meses muestra de la comparación.

Por otra parte, se concluye que el potencial energético es diferente en cada uno de los pisos térmicos, pero no por la influencia de la altura sobre el nivel del mar, si no por los factores climáticos que generan nubosidad o precipitaciones captando la radiación directa y generando menores cantidades del recurso solar en la superficie terrestre.

Continuando con las lecciones aprendidas en el proceso de definición del potencial energético del recurso solar anual en el departamento de Norte de Santander, se generaron tres rangos predominantes de irradiación solar ; el primero de ellos y en una mayor proporción, con un dato promedio de $4 - 4,5 \text{ Kw/ m}^2/\text{día}$, representado por la provincia de Ocaña y las regiones cercanas a este. El segundo rango con mayor presencia fue el $3,5-4 \text{ Kw/ m}^2/\text{día}$ representado por el municipio de pamplona y el sector urbano del municipio de Ocaña. Por último, se encontró que el tercer rango distribuido en el departamento y en menor proporción fue el de $4,5-5 \text{ Kw/ m}^2/\text{día}$, en el que se destacan los municipios del Carmen y Cúcuta, este último a su vez cuenta con dos puntos en el territorio que llegan a los $5,5 \text{ Kw/m}^2/\text{día}$, el primero de ellos situado en el área urbana y el segundo en el corregimiento de Buena Esperanza.

Por lo anterior, el Departamento Norte de Santander ostenta un alto potencial energético del recurso solar en los diferentes pisos térmicos a través del año en comparación con el promedio mundial de $3,9 \text{ kWh/ m}^2/\text{día}$ (Gómez Ramírez, 2017,

pág. 5) , superando a Alemania, país líder en el uso de la energía solar fotovoltaica a nivel mundial, y situándose en el promedio nacional de Colombia con 4,5 kWh/ m²/día (IDEAM, 2005, pág. 166). Esto le permite postular diversos aprovechamientos para este recurso, como lo son, electrificar zonas no interconectadas y su población rural, generar proyectos subsidiados en las zonas urbanas de estratos 1 y 2 y fomentar la industria generadora de energía en grandes extensiones, basada en la energía solar fotovoltaica.

Finalmente, este estudio se muestra como una oportunidad ante el desarrollo energético que aborda la cuarta revolución industrial, generando la posibilidad de ver al Departamento como el foco fronterizo desde el cual se expandirá el cambio en la tecnificación de la distribución eléctrica en el país, ahora bien, es relevante que las zonas identificadas con el potencial más alto de irradiación durante el año, tengan o generen accesibilidad aceptable y permitan una factible intervención en términos de transporte, disposición logística y puesta en marcha de los proyectos FNCER.

RECOMENDACIONES

Adicionalmente y con motivo de convertir la información producida en esta investigación se proponen una serie de lineamientos y recomendaciones para el aprovechamiento del potencial energético solar en el departamento de Norte de Santander, enumeradas continuación:

1. Utilizar esta información como el punto de partida para incentivar el uso de las fuentes no convencionales de energía renovable, con énfasis en el recurso solar para el departamento Norte de Santander.
2. Realizar la caracterización del recurso energético de los municipios, por medio del sistema de monitoreo en tiempo real y que promueva la reducción de incertidumbres en la información.
3. Incluir en los Planes de Ordenamiento Territorial la capa de uso del suelo de potencial energético solar creada por esta investigación.
4. Implementar proyectos piloto en las zonas identificadas con alto potencial de irradiación solar, con motivo de validar la información consignada en este documento y tener certeza de estos lugares para proyectos de generación de electricidad como opción económica para sus pobladores.
5. Socializar la información con las comunidades presentes en las Zonas No Interconectadas del Departamento y hacer acuerdos para implementar prototipos en las zonas con alto potencial.
6. Con base en la información del potencial energético solar del departamento, generar acuerdos con entidades del orden nacional e internacional para generar proyectos basados en el uso de las fuentes no convencionales de energía renovable.

BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:
<http://static.iris.net.co/sostenibilidad/upload/documents/EIAcuerdodeParisWEB.pdf>
- Álvarez Hernández , O., Montaña Peralta, T., & Correa Maldonado, J. (2014). La radiación solar global en la provincia de Loja, Evaluación preliminar utilizando el Método deHottel. *INGENIUS*.
- Arancibia, C., & Best, R. (2010). Energía del Sol. *Ciencia*, 10-17.
- Aristizabal, A. J. (2016). Clase Radiación. Seminario I. Universidad Jorge Tadeo Lozano. *Material de Clase*. Bogotá D.C.
- Brent Tully, R., Courtois , H., Hoffman, Y., & Pomarède, D. (2014). The Laniakea supercluster of galaxies. *Nature* , 513, 71–73.
- Brown, C. A. (2010). ENERGÍA DEL SOL. *CIENCIA*, 10-17.
- Carrasco, D. P. (2016). Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica.
- Centro de Investigación en Energía, UNAM. (2010). *Energías Renovables* . Ciudad de Mexico: UNAM.
- Chacón Cardona, C. A., Cely, Ó. E., & Guerrero, F. (2008). Diseño y construcción de un medidor de radiación solar. *con-ciencias*, 13-23. Obtenido de IDEAM:
<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Colvin, A. Z. (19 de Octubre de 2012). *Twisted Sifter*. Obtenido de Twisted Sifter:
<https://twistedifter.com/2012/10/putting-the-size-of-the-observable-universe-in-perspective/7/>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas . (2007). Un viaje al Cosmos en 52 semanas . *Colección Divulgación* , 1-230.
- Cubillos Jara, D. J. (2013). Estudio de la Formacion de Galaxias Enanas Esferoidales Satélites de la Vía Lactea Mediante la Simulación de la Colisión de dos galaxias. *Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ciencias-Física*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Departamento Nacional de Estadística. (2017). *Boletín técnico, Comunicación informativa*. Bogotá .
- Departamento Norte de Santander. (2016). Plan de Desarrollo Departamental "un Norte Productivo. *Plan de Desarrollo Departamental "un Norte Productivo*. CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA.

- Departamento Norte de Santander. (2016). Plan de desarrollo Departamental "Un norte productivo". *Plan de desarrollo Departamental "Un norte productivo"*. Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.
- García-Badell, J. J. (1984). *Calculo de la Energía Solar*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Gasquet , H. (2004). *Manual Teórico Práctico Sobre los Sistemas Fotovoltaicos*. . Cuernavaca.
- Gobernación de Norte de Santander. (2019). *Gobernación de Norte de Santander*. Obtenido de Gobernación de Norte de Santander:
<http://www.nortedesantander.gov.co/Gobernaci%C3%B3n/Nuestro-Departamento/Informaci%C3%B3n-General-Norte-de-Santander>
- Gómez Ramírez, J. (27 de Octubre de 2017). LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERPECTIVAS. *LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERPECTIVAS*. Bogotá D.C.
- Guerrero, C., Chacón , A., & Cely, Ó. (2008). Diseño y construcción de un medidor de radiación solar. *con-ciencias*, 13-23. Obtenido de IDEAM:
<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. . *Solar Energy* 18, 129 - 134.
- IDEAM. (2005). *www.minminas.gov.co*. Obtenido de *www.minminas.gov.co*:
<https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas%20de%20radiaci%C3%B3n%20solar%20Colombia.pdf>
- IDEAM. (2010). *INFORMACIÓN TECNICA SOBRE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA, EL ÍNDICE UV Y SU PRONÓSTICO* . Bogotá D.C.
- IDEAM. (2017). PROGRAMA NACIONAL DE RADIACIÓN. *PROGRAMA NACIONAL DE RADIACIÓN*. BOGOTÁ.
- IDEAM. (2018). *Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (16 de Mayo de 2018). *IDEAM*. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+v+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>
- IDEAM. (2018). Libro en Excel Estación Aguas de la Virgen (N. de Santander) (2018) Kcok. *Estación Aguas de la Virgen (N. de Santander) (2018) Kcok pestañas 2006-2018*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2018). Libro en Excel Estación Francisco de Paula Santander (N de Santander) (2018) Kcook. *Pestañas 2009-2018*. Bogotá.

- IDEAM. (2018). Libro en Excel Estacion Unipamplona (N de Santander) (20181) Kcok. *Estacion Unipamplona (N de Santander) (20181) Kcok pestañas 2009-2018*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2018). Libro Excel Aguas de la Virgen, Estación Apto. Camilo Daza, Unipamplona, Universidad Fco. de Paula. *ibro Excel Aguas de la Virgen, Estación Apto. Camilo Daza, Unipamplona, Universidad Fco. de Paula*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2018). Libro Excel Estación Apto. Camilo Daza (Cúcuta) (20181) KcoM Pestañas . *Estación Apto. Camilo Daza (Cúcuta) (20181) KcoM Pestañas 2015-2018*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2019). *Atlas Interactivo* . Obtenido de Atlas Interactivo : <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IEA. (2018). *Renewables 2018*. Recuperado el 27 de 05 de 2019, de <https://www.iea.org/renewables2018/>
- Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2017). Mapa Administrativo Departamento Norte de Santander. Bogotá D.C.
- IPSE. (16 de 05 de 2019). *IPSE*. Obtenido de IPSE: <http://www.ipse.gov.co/centro-nacional-de-monitoreo/informacion-general>
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Nueva York: Academic Press Canada.
- Jaén González, A., C. P., O. L., Costa Perez, M., & M. R. (2006). *Tecnología energética y medio ambiente I*. Barcelona: Edicions UPC.
- León, G. S. (20 de 11 de 2016). *EUREKA. La estructura del universo. Parte 2*. Obtenido de <https://diarium.usal.es/guillermo/2016/11/eureka-la-estructura-del-universo-2/>
- López, M. B. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, Vol 34, No 2*, 397-240.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2017 - 2022*. Bogotá D.C.
- Nasa. (1 de Feb de 2012). *Milky way and our location* . Obtenido de https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/galaxy-location.html
- NASA. (8 de septiembre de 2015). *Nasa Space Center*. Obtenido de <https://spaceplace.nasa.gov/galaxy/sp/>
- NASA. (01 de 10 de 2015). *National Aeronautics And Space Administration*. Obtenido de National Aeronautics And Space Administration: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>

- NASA. (26 de 03 de 2019). *NASA*. Obtenido de NASA:
https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild_Spanish/docs/StarChild/universe_level2/universe.html
- Organización Mundial de Meteorología. (2014). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos*. Genève.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. (1982). A Precise Method for Determining Contoured Surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 205-212. Obtenido de ArcGIS for Desktop.
- REN21. (2014). *Renovable Energy Policy Network for the 21 Century*. Obtenido de http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf
- Rudolf, G., Robert H, A., & Todhunter, P. (1995). *The Climate Near the Ground*. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield Publishers, Inc.
- Sackmann, I.-J., Boothroyd, A., & Kraemer, K. (1993). Our sun III Present and Future. *Astrophysical Journal*, 466.
- Sanchez, C., Piedra Castillo, D., & Mendoza, I. (2006). Validación y ajuste de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales tomados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Revista Colombiana de Física*, 38(4), 1435-1438.
- Santamaría, G., & Castejón, A. (2012). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid: Editex S.A.,
- UPME. (2019). *Informe mensual - Solicitud de certificación de proyectos de fuentes no convencionales de energía (FNCE) - Incentivos ley 1715 de 2014*. Bogotá.
- Villicaña Ortiz, E. (2008). *Huerta fotovoltaica de 1,2 Mw, con seguimiento solar y conexión a red en Sevilla*. Sevilla: Universidad de Oviedo. Departamento de Energía.