Determinación del potencial de energía solar para el aprovechamiento de sistemas fotovoltaicos en las edificaciones del Quindío.

Nicolle Báez Contreras

TUTORA

Tatiana Pérez Gosteva

Ingeniera Electrónica

Magister en Prevención de Riesgos Laborales, la Excelencia, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Corporativa

COTUTORA

Stephanie Galvis Causil

Geógrafa

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Magister en Tecnologías de la Información Geográfica

Universidad La Gran Colombia

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Geográfica y Ambiental

Armenia, 2022

Agradecimientos

Agradezco a Dios, mis padres Suanny Contreras y Fredy A. Báez por siempre brindarme su apoyo incondicional, estar en los momentos difíciles y creer en mí en todo momento, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

Agradezco a mi pareja David M. González por siempre estar pendiente darme consejos y ánimos de las decisiones que he tomado, por su cariño y amor en medio de todo este proceso.

Agradezco a mis mentoras Tatiana Pérez Gosteva y cotutora Stephani Galvis por brindarnos su apoyo, guía y tutorías en este proceso y desarrollo para sacar adelante el proyecto.

Tabla de Contenido

1. Resumen 7

2. Introducción 8

3. Articulación línea – sublínea de investigación y cuenca de problematización 9

4. Planteamiento del problema 11

   a. Descripción del problema 11

   b. Formulación del problema 13

5. Justificación 14

6. Hipótesis de investigación 16

7. Objetivos 17

   a. Objetivo general 17

   b. Objetivos específicos 17

8. Antecedentes 18

9. Marco Referencial 21

   a. Marco Teórico 21

   b. Marco conceptual 24

   c. Marco espacial 33

   d. Marco Legal 34

10. Metodología 37

a. Enfoque metodológico 37

b. Tipo de estudio 37

c. Diseño de la investigación 37

Operacionalización de variables 44

11. Resultados y discusión 45

12. Conclusiones 82

13. Recomendaciones 84

14. Impactos 85

15. Referencias bibliográficas 87

Lista de ilustraciones

Figura 1. Desarrollo de un modelo en código R para la estimación en cubiertas del potencial solar fotovoltaico para la cobertura de la demanda eléctrica de edificios residenciales y terciarios en la ciudad de Valencia. 23

Figura 2. Efecto fotovoltaico en una celda fotovoltaica 26

Figura 3. Diagrama de bloques central fotovoltaica conectada a la red 29

Figura 4. Esquema de una central fotovoltaica conectada a la red. 30

Figura 5. Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos. 31

Figura 6. Esquema de una central fotovoltaica con almacenamiento 32

Figura 7. Mapa político- Administrativo– Departamento del Quindío. 34

Figura 8. Diagrama del modelo de geoprocesamiento para calcular el potencial energético del Quindío. 43

Figura 9. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío..... 48

Figura 10. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Armenia. 49

Figura 11. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Buenavista. 50

Figura 12. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Circasia. 51

Figura 13. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Córdoba. 52

Figura 14. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Filandia. 53

Figura 15. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Génova 54

Figura 16. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento La Tebaida. 55

Figura 17. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Calarcá. 56

Figura 18. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Montenegro. 57

Figura 19. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Pijao. 58

Figura 20. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Quimbaya. 59

Figura 21. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío - Acercamiento Salento. 60

Figura 22. Mapa de Pendiente adecuada en la zona urbana del Quindío. 62

Figura 23. Mapa de Zonas no orientadas al norte del Quindío para los tejados adecuados. 64

Figura 24. Mapa de potencial de energía solar en edificaciones en el Quindío. 67

Figura 25. Edificaciones de Armenia zona sur. 68

Figura 26. Edificaciones de Armenia zona norte. 69

Figura 27. Edificaciones de Calarcá. 70

Figura 28. Edificaciones de Circasia. 71

Figura 28. Edificaciones de Salento. 72

Figura 29. Edificaciones de Filandia. 73

Figura 30. Edificaciones de Montenegro. 74

Figura 31. Edificaciones de La Tebaida. 75

Figura 32. Edificaciones de Buenavista. 76

Figura 33. Edificaciones de Pijao. 77

Figura 34. Edificaciones de Génova. 77

Figura 35. Edificaciones de Quimbaya. 78

Figura 36. Edificaciones de Córdoba. 79

Figura 37. Datos relevantes. 79

Figura 38. Mapa de densidad de las zonas con mayor potencial energético del Quindío. .. 81

1. Resumen

El cambio climático es una de las problemáticas más urgentes de la última década, esto debido a que dicho cambio afecta la temperatura y el ambiente de los territorios, perturbando a la fauna y flora que allí existen, provocando la migración, el desplazamiento o extinción de las mismas, por lo cual, para reducir y mitigar los efectos del cambio climático, se han realizado diversas actividades como son las comisiones y tratados como se denota en el acuerdo de París de las naciones unidas en donde se incluye a más de 100 países en todo el mundo, en este se comprometen a lograr un cambio a mediano y largo plazo. Por ende, dentro de las soluciones se destaca el cambio de las matrices energéticas las cuales están regidas a partir de los combustibles fósiles y en pro de la transición energética se encuentran las energías alternativas o renovables, cabe resaltar que las energías alternativas son todas aquellas que no emplean combustible fósil, pero no necesariamente son renovables, un ejemplo de esto, corresponde a la energía nuclear. Así mismo, entre las energías renovables que son aquellas que emplean recursos que pueden renovarse, como ocurre con la energía solar fotovoltaica de la cual se realiza el estudio en este proyecto, centrado en determinar el potencial energético, la radiación solar y los criterios óptimos de funcionamiento para los paneles solares fotovoltaicos en las edificaciones de la zona urbana de los municipios del Quindío por medio sistemas de información geográfica, empleando herramientas del software ArcGIS Pro.

Palabras Claves

Cambio climático, desarrollo sostenible, energías renovables, radiación solar, sistemas de información geográfica.

1. Introducción

El constante aumento de la temperatura global a lo largo de las últimas décadas ha venido afectando las condiciones de vida de millones de habitantes. El uso de los combustibles fósiles como primera fuente de energía es una de las principales causas del cambio climático y el acelerado calentamiento global que enfrenta el planeta Tierra; esto ha impulsado al ser humano a buscar fuentes alternativas de energía en beneficio de la sostenibilidad. La energía solar es una de las fuentes renovables con mayor potencial gracias a que genera poca contaminación, es "inagotable" y su producción es gratis (si no se tiene en cuenta el costo de inversión en celdas fotovoltaicas).

En Colombia, la energía fotovoltaica es una implementación completamente viable, ya que esta se define como potencia en energía solar debido a su radiación; esto gracias a que Colombia posee una ubicación privilegiada para la irradiación energética, según Vázquez, M (2022), argumenta lo siguiente, "Colombia cuenta con un potencial positivo de energía solar fotovoltaica frente al resto del mundo. La mayor parte del territorio nacional cuenta con un recurso de brillo solar (horas de sol), alrededor de 4, 8 y 12 horas de Sol al día en promedio diario anual, valores altos en comparación con países como Alemania el cual cuenta con 3 horas de brillo solar."

El presente trabajo busca determinar el potencial de radiación solar en las zonas urbanas del departamento del Quindío con el fin de aprovecharlo por medio de la implementación de sistemas fotovoltaicos, teniendo en cuenta las variables ambientales, climatológicas y geofísicas de la zona de estudio. De la misma manera, se pretende establecer la viabilidad de la instalación de dichos sistemas, considerando algunos de los factores sociales y económicos del departamento.

2. Articulación línea – sublínea de investigación y cuenca de problematización

Línea de investigación

La línea de investigación corresponde a la Planificación y consolidación de la plataforma territorial bajo un modelo sustentable de gestión ambiental y desarrollo social. éste se vincula, en la medida en que mediante el análisis y diseño de modelos de energías renovables será posible disminuir los efectos de los procesos del desarrollo, que han generado consecuencias negativas a la composición natural de la atmósfera; este contexto problemático ha impulsado a los diferentes gobiernos a formular iniciativas como en el caso colombiano, estas corresponden a las directrices de la política energética colombiana de las energías renovables, estás están contenidas en el Plan Energético Nacional, las entidades del IDEAM en compañía de la UPME, desarrollaron el Atlas de Radiación Solar de Colombia en el año 2005 el cual permite identificar y determinar las zonas óptimas para la implementación de sistemas fotovoltaicos en dirección del potencial eléctrico, a su vez funciona como guía de referencia en esta área. Por medio de análisis y generación de información geográfica que faciliten la instalación de los sistemas fotovoltaicos por medio de un sistema de soporte.

Sublinea de investigación

En consecuencia la sublínea de investigación gestión del territorio, permite acoplar este proyecto al componente de conocimiento, mediante el uso y aplicación de los sistemas de información geográfica, que facilitan el análisis de los datos de niveles radiación incidente y otras variables para el departamento del Quindío, lo cual se convierte en una metodología que considera los reglamentos financieros,

institucionales y físicos para determinar la viabilidad y potencial de las instalación e implementación de la energía solar fotovoltaica, la cual se origina desde la radiación que es emitida por los rayos solares hacia la tierra y puede ser transformada directamente en electricidad, mediante células fotovoltaicas; las cuales están dentro de paneles solares y se conectan a un sistema semiconductor. Mencionado lo anterior se relaciona con lo que busca el proyecto que es determinar el potencial de radiación energético, para así determinar la implementación de mencionada energía en la zona urbana del Quindío y tener un impacto ambiental y social en la comunidad.

Cuenca de Problematización

El proyecto, se articula con la cuenca de problematización correspondiente a la gestión ambiental a partir del análisis de impactos de cambio climático en Colombia y específicamente en el departamento del Quindío, con responsabilidad social y ambiental, a través de un estudio realizado con información geográfica de la zona y luego realizar los geoprocesos correspondientes para obtener un resultado sólido y determinar cuáles son las características de la zona de estudio y determinar si es viable y se adapta el uso de celdas fotovoltaicas. Sin embargo, este proyecto se concibe, como una posibilidad de contribuir con la disminución de los impactos negativos al ambiente generados por la producción de energía mediante métodos convencionales y siendo parte de un desarrollo sostenible, disminuyendo los gases de efecto invernadero y de CO_2, los cuales son los principales responsables del cambio climático y catástrofes ambientales.

3. Planteamiento del problema

a. Descripción del problema

Los combustibles fósiles como principal fuente de energía y una de las más viables económicamente hacia los países, para cubrir la demanda de generación energética trae consigo desmedidas consecuencias para el medio ambiente, generando un desbalance ecosistémico, daño en los suelos forestales por medio de la erosión, contaminación atmosférica con emisiones de CO_2, debilitando la capa de ozono y ocasionando el aumento de la temperatura.

Por lo tanto, los combustibles fósiles según Alberdi y Artigas (2010), son insostenibles, por un lado, porque el cambio climático aumentará e intensificará fenómenos naturales como inundaciones, desertificación, deshielos y aumento del nivel de los océanos, y por otro lado los yacimientos de esos combustibles se agotarán a medida que la demanda del mismo aumente. Dicha afirmación muestra un panorama desconsolador de los daños que se causan al ecosistema si se continúa con el uso desmedido de las energías convencionales, una alternativa a esta problemática se encuentra en las energías renovables que, además de suplir una parte de la demanda energética, contribuye a reducir las emisiones de gases efecto invernadero para el cambio climático sin producir daños en la naturaleza y de manera sostenible.

En adición, según la unidad de planeación minero energética, solo el 19% de la generación energética en el mundo es producida por energías renovables (UPME, 2015). Y para el caso de Colombia solo el 7% es empleado por dichas energías (UPME.). El principal factor para el desarrollo de estas energías es el costo económico en el mercado. Para la

energía solar fotovoltaica según Ocaciones, A. (2020) el aumento de la implementación de sistemas fotovoltaicos, se está generando desde hace 10 años, pero sobre todo en los últimos 4 años, los sistemas que han logrado reducir costos de implementación, corresponden a los sistemas fotovoltaicos, lo cual genera oportunidades para aportar al sector energético, además de que pueden resultar competitivos con respecto a precios de la energía eléctrica en el sector comercial.

Dado lo anterior, un factor importante es cómo se encuentra la canasta energética nacional de Colombia puesto que fuentes como Fedesarrollo y la UPME afirman que más del 70% de la canasta energética está compuesta por energías hídricas, otro 20% proviene de las energías fósiles y el 10% restante es para las fuentes alternativas de energía renovable, debido a la poca asignación de recursos a esta fuente de energía, además no están en los planes a corto plazo. Según la UPME se cuenta con suficientes recursos para no preocuparse por un desabastecimiento que requiera de energías alternativas como la fotovoltaica; y de acuerdo con lo anterior se ven afectadas las probabilidades de costos favorables para la implementación e instalación de sistemas fotovoltaicos.

Con lo anterior y analizando otros factores limitantes como el técnico, según Simón Cortés (2017). Además, en circunstancias como la intermitencia y disponibilidad de su captación y de los inconvenientes con su almacenamiento, asimismo está el factor político que presentan los marcos legales y regulatorios para incentivar las inversiones en las energías renovables y el factor financiero de los recursos destinados a los proyectos y los costos altos debido a las tecnologías a las que se deben adaptar.

b. Formulación del problema

Es importante tener en cuenta, la disponibilidad del recurso solar que va de la mano con los factores geofísicos, climáticos y topográficos, ya que es de uso y escala residencial, puesto que de ello depende la factibilidad del proyecto, en este caso para la zona de estudio la cual es en la zona urbana del departamento del Quindío existen pocas referencias investigativas respecto al tema, hecho que hace sea más limitada la información de la zona de estudio, por ello es muy importante conocer la disponibilidad del recurso y los niveles de radiación en la zona dando lugar a la siguiente cuestión ¿Cuál es el potencial de energía solar de las edificaciones para el aprovechamiento de sistemas fotovoltaicos, en la zona urbana del Quindío?

4. Justificación

El presente trabajo de investigación se hace necesario en vista de considerar mediante el análisis de la viabilidad de una alternativa energética, la posibilidad de plantear una propuesta para aprovechar el potencial energético, empleando sistemas diferentes a los que emplean la energía hidroeléctrica, la cual es la fuente primaria en Colombia junto con la energía proveniente de combustibles fósiles, que como es bien sabido, es causante de los gases de efecto invernadero, es preciso por lo anterior, proponer métodos para sustituirlas por alternativas renovables a mediano y largo plazo; además de contribuir con la implementación e instalación a pequeña, mediana y gran escala en Colombia, específicamente en el departamento del Quindío en donde se debe tener presente los factores climáticos representativos de la región, el cual se caracteriza por presentar un clima bimodal que corresponden al fenómeno de la niña y el niño lo cual es un factor importante puesto que de ello depende el nivel de radiación que pueda ser capturado anualmente, otro factor importante corresponde a las variables geofísicas, las cuales incluyen el ángulo de incidencia solar, la topografía y el brillo solar, que permitan cubrir la creciente demanda energética, debido al acelerado crecimiento demográfico, al mismo tiempo la implementación de sistemas fotovoltaicos brinda la posibilidad de generar electricidad para aquellas zonas interconectadas en territorios rurales donde presentan baja conectividad generando un impacto positivo en estas comunidades, dicho lo anterior este proyecto se basa en comprender las limitantes, su alcance y en determinar las zonas óptimas en el departamento del Quindío para el uso de paneles solares, y a su vez analizar si es viable la instalación fotovoltaica teniendo en cuenta los beneficios que puede producir a largo plazo, los impactos tanto

negativos como positivos en sectores sociales, ambientales y económicos. Rincón, S. M., & Camargo, A. K. V. (2018)

5. Hipótesis de investigación

El departamento del Quindío se encuentra en la región Andina, la cual cuenta con una temperatura cálida la mayoría del año, debido a que los rayos solares inciden de manera directa sobre la superficie terrestre. Teniendo en cuenta lo anterior, el departamento del Quindío cuenta con 12 municipios de los cuales 10 están en el rango de 3,5 a 4,5 kWh/m^2, los municipios de Salento y Filandia están por debajo de 3,5 kWh/m^2, según el atlas interactivo de radiación solar del IDEAM, de modo que el departamento del Quindío cuenta con un gran potencial para la implementación e instalación de energía fotovoltaica, pese a que en todo el departamento existe pocos estudios y baja implementación de estos sistemas, las variables climatológicas de temperatura, brillo y radiación solar de la zona permiten observar un panorama positivo para implementar esta fuente de energía mencionada.

6. Objetivos

a. Objetivo general

Determinar el potencial de energía solar en las edificaciones para el aprovechamiento de sistemas fotovoltaicos, en el departamento del Quindío.

b. Objetivos específicos

Identificar las condiciones de radiación solar en las edificaciones en la zona urbana del Quindío para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

Establecer las características óptimas para la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Quindío.

Elaborar un producto geográfico con la información relacionada con el potencial de energía solar para la zona de estudio.

7. Antecedentes

El alto consumo de energía y la creciente demanda de la población diariamente incita a desarrollar y promover el uso de energías renovables, por medio de estudios, estadísticas y software, de esta manera Serrano, A, Zárate E. (2016) Estudia la prospectiva y viabilidad de las energías renovables eólicas y solar en Colombia a 2050 por medio del Software LEAP. El cual tiene como propósito analizar las energías eólicas y solar en Colombia y desarrollar una prospectiva al año 2050 de la evolución de éstas en el país. por medio del software LEAP una herramienta que permitió crear el modelo energético (Eléctrico) de los escenarios con los que se trabajó para obtener resultados a largo plazo y realizar un análisis más detallado del consumo, generación, demanda y capacidad instalada del país. Cada uno de los escenarios presenta datos únicos que pueden ser visualizados en diferentes escalas de tiempo, además el software muestra resultados gráficos en los cuales se pueden observar los diferentes sectores (residencial, comercial, industrial, entre otros.) y las necesidades de cada una de éstos.

No solo se debe considerar un escenario a largo plazo del modelo energético del país, si no también tener una perspectiva de la implementación del sistema fotovoltaico según el estudio realizado por Calvo, F. (2009). Mediante un análisis de viabilidad para la implementación del sistema de generación eléctrica usando energía solar para uso residencial. El cual tiene como objetivo el estudio de la implementación de paneles solares como propuesta alterna de generación de energía para el edificio Fedaliz de 7 apartamentos en el barrio florida Nueva, municipio de Medellín. Encontrar los cálculos necesarios de consumos sobre los diferentes elementos que serán conectados al sistema fotovoltaico, explicando los consumos y los ahorros de energía que esto implica con la implementación de paneles solares.

Se debe conocer también los posibles efectos en el medio rural, B. van Campen, D. Guidi y G. Best. (2000) comprenden que el principal objetivo de estudio es contribuir a conocer mejor el posible efecto y las limitaciones de los sistemas fotovoltaicos en la agricultura y desarrollo rural sostenibles (ADRS), sobre todo en las actividades que generan ingresos. Resulta, en efecto, de primera importancia determinar la contribución potencial de los sistemas fotovoltaicos al desarrollo rural, con el fin de lograr un mayor compromiso económico y político con los proyectos y programas de energía solar FV y perfeccionar su elaboración.

Del mismo modo lo explica Celemin, M. (2016) en su estudio para la implementación de un sistema fotovoltaico como alternativa rural sostenible de la vereda San Roque en el municipio de Ortega- Tolima. El escenario del trabajo Académico se ubica en el Municipio de Ortega (Vereda San Roque), departamento del Tolima; de manera preliminar se tomó de base la información emitida por el proyecto PERS TOLIMA (Planes de Energización Rural Sostenible departamentales o regionales) que fueron estructurados a partir de un análisis de los elementos regionales relevantes en materia de emprendimiento, productividad y energización rural que permiten identificar, formular y estructurar lineamientos y estrategias de desarrollo energético rural, así como proyectos integrales y sostenibles de suministro y aprovechamiento de energía; su objeto es proveer el servicio y apoyar el crecimiento y el desarrollo de las comunidades rurales de las regiones objetivo.

Otro caso de estudio es el de Alberdi, M, Artigas N. (2010). Viabilidad del uso de la Energía Solar en Uruguay; donde se analizaron los tipos de energía solar y en cada tipo se tuvo en cuenta las ventajas y desventajas en el ámbito ambiental, social y económico, su trabajo de campo se realizó más enfocado al ahorro que un hogar puede llegar a tener si se

utiliza la energía solar térmica teniendo en cuenta factores de inversión y aspectos de la instalación. Donde queda expuesto que la instalación de colectores solares es económicamente viable, debido al ahorro de energía, ahorro económico y fácil recuperación de la inversión inicial, y así promover la generación de energía para diversificar la matriz energética del país.

Asimismo, Blasnilo, E. l Barrera, A. et al. (2017). Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare, Colombia. El propósito de la investigación fue realizar una evaluación socio-económica de las familias de la zona rural del municipio, beneficiadas con la instalación de estos sistemas SFV. Además, se realizó un análisis técnico de simulación de la operación del SFV dimensionado con 2 días sin sol y luego 12 días con sol, también se hizo una simulación de la operación del SFV dimensionado con 14 días con sol. Dando resultados positivos para la implementación en otras áreas del país.

Por otro lado, Acosta, S. (2016). En su documento, evaluación económica de la Implementación de Sistemas de Energía Fotovoltaica (Energía Solar) en el Mercado Energético Colombiano. En su evaluación económica mide el cambio en el consumo de energías como consecuencia de la implementación de energía fotovoltaica colombiana, pero dada las características de la demanda emergentica en Colombia y la metodología empleada, con las curvas de oferta y demanda que componen este mercado, posterior se identifican los costos y beneficios asociados al proyecto y preguntas planteadas por Castro & Mokate (2003), diseñadas para esta parte de la evaluación económica. sin embargo, este proyecto no es económicamente viable.

8. Marco Referencial

a. Marco Teórico

La generación de energía a partir del sol como fuente primaria es una alternativa diferente a las energías convencionales, la energía solar corresponde a una radiación electromagnética formada por un conjunto de longitudes de onda, esta energía dispone de una densidad muy baja haciendo un gran esfuerzo para alcanzar 1 kW/ m^2, por esto requiere grandes superficies de captación de rayos solares para alcanzar elevadas concentraciones, esta energía cuenta con dos características la dispersión e intermitencia; la intermitencia es algo muy característico de la energía solar puesto que con las instalaciones solares se hace necesario una revisión constante del almacenamiento de la energía captada.

De acuerdo con el artículo energía solar fotovoltaica de Adler, F., et al. (2013)., la radiación que es emitida por el sol no toda llega a la superficie del suelo, depende de varios factores como espesor de la capa de aire, de la ubicación geográfica del lugar, de la época del año, etc. Lo que quiere decir que la radiación que llega al suelo es de 900 W/m^2, valor que equivale a unas 2.000 veces, al consumo energético mundial.

De acuerdo con la información anterior “En 2014 las inversiones en energías renovables en el sector energético superaron a las de plantas fósiles, hacia final del año 2014, la capacidad total estimada en renovables era del 27,7% del total de la capacidad instalada mundial, lo cual podría abastecer sin problema cerca del 22,8% de la demanda eléctrica del planeta” (Serrano y Zárate, 2016, p.22)

Por consiguiente, los cambios mencionados se han logrado con el apoyo de las políticas gubernamentales que han ayudado a que más países incluyan en sus planes las energías

renovables, tanto que para el año 2015, 164 países contaban con metas de transición energética y otros 145 con políticas de energías renovables respectivamente.

Entrando en contexto, con la energía solar fotovoltaica, la disminución de los costos ha hecho que esta, tenga un papel cada vez más importante en la generación de electricidad a partir de sistemas de energías renovables, con ayuda de subsidios puede incluso competir con costos de generación de electricidad a partir de fuentes fósiles. En 2014 se presentó 40 GW de capacidad instalada para un total mundial aproximado de 117. (Serrano y Zárate, 2016, p.23).

Sumado al panorama global las zonas con mayor disponibilidad de recurso solar se encuentran en África, Asia, el Mediterráneo y Australia, sin embargo en Suramérica se presentan buenos niveles de radiación, encontrándose por encima de la media mundial, y además, teniendo como ventaja que los países ecuatoriales entre los que se encuentra Colombia no hay estaciones por lo que a lo largo del año tiene buena disponibilidad de radiación solar, Colombia cuenta con un promedio de 4,5 $kWh/m^2/d$, por encima del promedio mundial de 3,9 $kWh/m^2/d$, y con un mayor potencial que países con gran capacidad instalada como Alemania que apenas cuenta con un promedio de radiación de 3.0 $kWh/m^2/d$. (Ocaciones Monroy, A. M. 2020).

De manera análoga, en Colombia, el registro de radiación máximo se encuentra en el Norte de la Guajira, una zona desértica sin mucha nubosidad, caracterizada por los largos periodos secos durante el año, todo lo contrario, sucede en las zonas con los registros más bajos de radiación solar como el Chocó donde se presenta el mayor registro de precipitación a lo largo del año, siendo en el país y el mundo uno de los lugares con mayor índice de lluvias, la nubosidad está presente a lo largo de todo el año. (Ocaciones Monroy, A. M. 2020, p.48)

De manera consecutiva, en calidad de la tecnología fotovoltaica, se usa un sistema de paneles formados con materiales altamente sensibles a los rayos de luz. Cada celda es capaz de producir 2 - 4 amperios con un potencial eléctrico de 0,46 – 0,48 voltios, captando la energía que proporciona el sol y convirtiéndola en electricidad (Corredor, 2019).

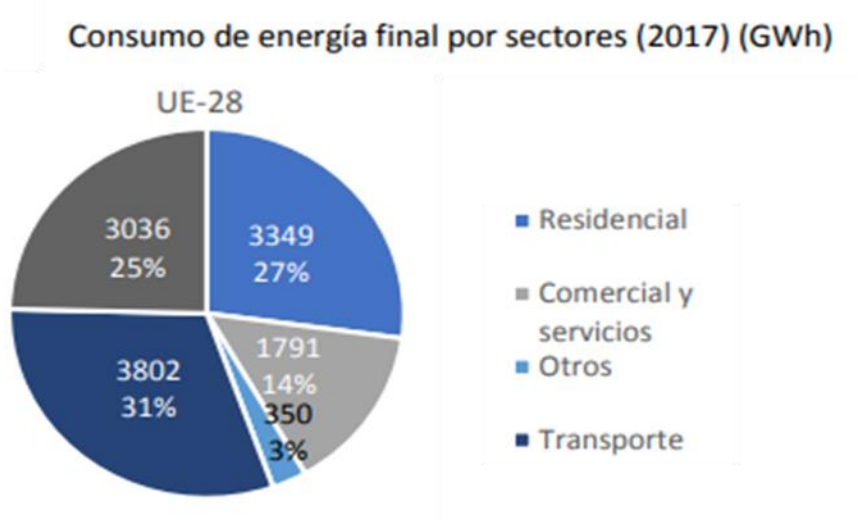


Figura 1. Desarrollo de un modelo en código R para la estimación en cubiertas del potencial solar fotovoltaico para la cobertura de la demanda eléctrica de edificios residenciales y terciarios en la ciudad de Valencia.
Fuente: Fuster Palop, E. (2020).

Teniendo una alusión al consumo eléctrico en edificaciones según la unión Europea, el sector de la edificación, conformado por el sector residencial, comercial, servicios y administraciones públicas, representa aproximadamente un 40% del consumo de la energía final total.

En Colombia la Universidad Nacional, realizó un proyecto el cual comenzó en 2007 para la instalación de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red de 1000 Wp en uno de los edificios, el cual es categorizado como BIPVS (Edificio integrado de sistemas fotovoltaicos) por estar precisamente en el techo de este edificio; como en Colombia no se han escrito normas para la generación de energía eléctrica por medio de módulos fotovoltaicos, implementaron varias normas tomadas de la IEEE 929-2000 las cuales dieron claridad y

forma práctica a los requisitos técnicos necesarios para la interconexión de las PVS a la red de distribución, ya que la condición que se debe tener en cuenta para estas incorporaciones, es no provocar una distorsión de los parámetros que determinan la calidad de la energía. (RED, 2011). Citado de (Martínez, J. A. A., Morales, W. P., & Rincón 2019)

b. Marco conceptual

Energías renovables

Las energías renovables son aquellas energías que se producen de manera que el impacto que genere en el planeta sea el mínimo, por lo tanto, es importante que haciendo uso de fuentes naturales como el sol, el aire, la tierra y el agua se tenga una consciencia de que el uso de estos recursos debe hacerse de manera responsable y ética, disminuyendo la dependencia del petróleo, el carbón y el gas natural.

De acuerdo con la Unidad de planeación minero energética. (2014) (UPME) las energías renovables están asociadas principalmente con el uso tradicional de la biomasa en aplicaciones como la leña para cocción de alimentos y calentamiento de espacios, y la hidroenergía para generación eléctrica. En una menor medida, se aprovecha la energía proveniente de fuentes como el sol, la geotermia y la biomasa para su conversión en energía térmica a través del uso de tecnologías relativamente modernas, seguidas de estas y otras fuentes como la eólica y la solar para la generación de energía eléctrica.

Así mismo las energías renovables según Algarin, C. R., & Álvarez, O. R. (2018) se ha incrementado su consumo en un promedio de 2.3% desde el año 2015, lo cual ha contribuido a crear conciencia de la importancia de las ER y la eficiencia energética como mecanismos fundamentales para abordar el cambio climático, la creación de nuevas oportunidades

económicas y proporcionar acceso a la energía a millones de personas que aún viven sin servicios de energía modernos. En este contexto, la asamblea general de las Naciones Unidas declaró en el 2014 el primer año de una década de energía sostenible para todos (SE4ALL), donde se apunta a duplicar la participación de las ER en el sistema energético desde una línea base del 18% en 2010 al 36% en 2030.

Siguiendo esta idea, según la International Renewable Energy Agency (IRENA), en el año 2016 las ER proporcionaron un estimado de 19.3% del consumo mundial de energía. Se destaca la producción de energía a partir de la biomasa para calefacción y cocina en las áreas rurales en los países en vía de desarrollo con una representación alrededor del 9.1%, una participación del 10.2% para las ER modernas como la energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, solar térmica y biocombustibles (REN21, 2017).

Finalmente, las energías renovables son aquellas que pueden ser producidas de manera sostenible (equilibrio en cuanto a niveles políticos, económicos, ambientales y sociales) de fuentes, las cuales se reabastecen a través de procesos naturales, medibles en escalas de tiempo humanas. (Henry y Heinke, 1999). Las energías renovables son de fácil acceso en casi cualquier parte del mundo y a su vez generan beneficios para quienes optan por su aplicación tales como: estimular el crecimiento económico de la población, generación de empleos, maximizan la creación de valor de la comunidad, mejoran el acceso a la energía disponible para los habitantes, reducen el impacto ambiental, entre otros. (Lisperguer, 2017, como se citó en Rincón, S. M., & Camargo, A. K. V. (2018).

Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una fuente de energía abundante, no contaminante y se encuentra disponible, en mayor o menor medida, en cualquier parte del planeta, puede ser colectada y transformada en energía térmica o eléctrica en el lugar de utilización. (Miguel A. Laborde & Roberto J.J. Williams.2016).

Ahora el sistema fotovoltaico funciona de la siguiente manera, según Ocaciones Monroy, A. M. El efecto fotovoltaico es un fenómeno que se presenta con la unión de dos materiales semiconductores, un material tipo P (Aceptor) de electrones y otro material tipo N (Donador), los materiales tienen una base de cristal de silicio dopado, adicionando átomos del grupo V (Donador) o el grupo III (aceptor), a estos materiales, los fotones de luz originan un flujo de electrones desde el material N al P lo que genera un potencial eléctrico en voltios, entre los dos materiales.

Figura 2

Efecto fotovoltaico en una celda fotovoltaica.

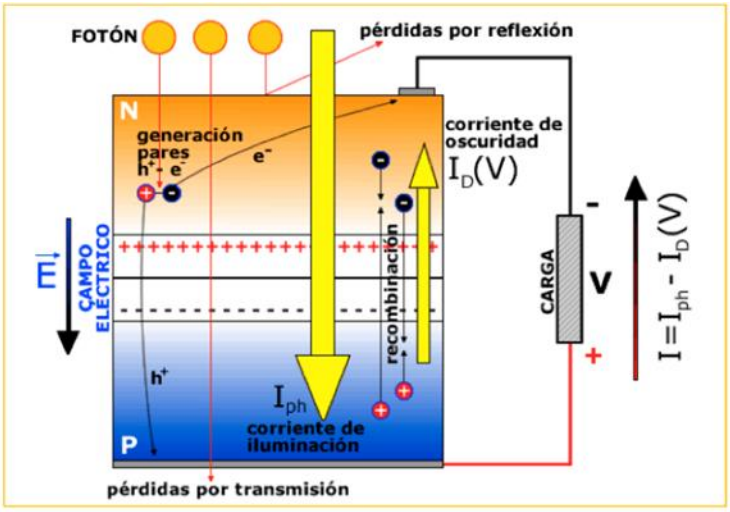


Figura 2. Efecto fotovoltaico en una celda fotovoltaica
Fuente: Ocaciones Monroy, A. M

Los módulos funcionan mediante una estructura, compuesta de diferentes elementos para un adecuado funcionamiento, de acuerdo con Adler, F., Berardi, M., García Pedrosa, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (2013 estos son:

- Cubierta frontal. Suele ser de vidrio templado de entre 3 y 4 mm de espesor, con muy buena transmisión de la radiación solar, proporciona protección contra los agentes atmosféricos y los impactos (granizo, actos vandálicos, etc.). La superficie exterior del vidrio es autorreflexiva y está tratada para impedir la retención del polvo y la suciedad. La superficie interior generalmente es rugosa, lo que permite una buena adherencia con el encapsulante de las células, además de facilitar la penetración de la radiación solar.
- Encapsulante. En la mayoría de los módulos se emplea etil-vinil-acetato (EVA). En contacto directo con las células, protege las conexiones entre las mismas y aporta resistencia contra vibraciones e impactos. Además, proporciona el acoplamiento con la cubierta frontal y la protección posterior. Al igual que la cubierta frontal, permite la transmisión de la radiación solar y no se degrada con la radiación ultravioleta.
- Cubierta posterior. Se utiliza una capa de polivinilo fluoruro (PVF, comercialmente denominado TEDLAR) o de poliéster. Junto con la cubierta frontal, protege al módulo de la humedad y otros agentes atmosféricos y lo aísla eléctricamente. De naturaleza opaca, es habitual que sea de color blanco para reflejar la luz solar que no recogen las células sobre la cara posterior rugosa de la cubierta frontal, que la refleja de nuevo hacia las células. Está cubierta de vidrio se emplea para aprovechar la radiación solar reflejada que puede recogerse por la parte posterior del módulo, este método se emplea por algunos fabricantes. Para ello las células solares incluyen capas de silicio amorfo que recoge esta radiación

- Marco: La mayoría de los fabricantes utilizan aluminio anodizado. Proporciona rigidez y resistencia mecánica al módulo, además de un sistema de fijación. Puede incorporar una conexión para la toma de tierra. Unas variables que se debe tener presente, es que nunca se debe mecanizar, debido a que este proceso genera las vibraciones que pueden romper el cristal de la cubierta frontal.
- Conexiones: Estas se encuentran situadas en la parte posterior del módulo, habitualmente consiste en una caja o sistema con una protección recomendada contra el polvo y el agua IP-65, fabricada con materiales plásticos resistentes a las temperaturas elevadas, estas variables incorporan en su interior, los bornes de conexión positivo y negativo del módulo y los diodos de paso (diodos by-pass). El uso de prensaestopas para el paso de cables mantiene la protección contra el polvo y el agua.
- Células: La conexión de las células de un módulo fotovoltaico se realiza con cintas metálicas soldadas o incrustadas sobre la rejilla de conexión eléctrica de la cara frontal de cada célula. La interconexión entre células se realiza uniendo las cintas de la cara frontal (negativo) de una célula con la cara posterior (positivo) de la célula siguiente.

Radiación solar

La radiación solar entrante (insolación) se origina a partir del sol; se modifica a medida que recorre la atmósfera; se transforma más por las entidades de superficie y topografía; y se intercepta en la superficie de la tierra como componentes directos, difusos, y reflejados. La radiación directa se intercepta sin dificultades en una línea directa desde el sol. La radiación difusa se dispersa por componentes atmosféricos, como nubes y polvo. La radiación reflejada se expresa desde entidades de superficie. La suma de la radiación directa, difusa y reflejada se denomina radiación solar total o global. (Learn ArcGIS de Esri). (s,f).

Tipos de instalación fotovoltaicas

1. Instalación fotovoltaica conectada a la red

En las instalaciones solares conectadas a la red, la energía producida es difundida al mismo instante que se genera. Como se observa en la figura 3:



Figura 3. *Diagrama de bloques central fotovoltaica conectada a la red*

Fuente: Santillán Tituaña, A. (2016).

De acuerdo con el diagrama de bloques estas instalaciones constan principalmente de:

a) Paneles solares fotovoltaicos: Son los encargados de captar los fotones para crear una corriente eléctrica continua. Los paneles se conectan en serie formando varias cadenas, que a su vez forman el campo FV. Al mismo tiempo, poseen una estructura de soporte, que es la encargada de asegurar el anclaje del generador, facilitando la instalación y mantenimiento de los paneles. Con los soportes se podrá orientar correctamente el panel; de modo que se seleccione el ángulo de inclinación idóneo para un mejor aprovechamiento de la radiación solar. En algunos sistemas se emplean servomotores para que mediante sistemas programados se establezca la posición de los paneles con la inclinación apropiada para la captación de la radiación.

b) Inversores: Tiene como función transformar la corriente continua del grupo fotovoltaico en corriente alterna perfectamente sincronizada con la red existente, ya sea trifásica, monofásica o bien de alta, media o baja tensión.

c) Transformador: Corresponde al dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.

También se necesita de las protecciones adecuadas:

d) Armario general de protección y medida: Este debe contener, interruptores magnetotérmicos, diferenciales, contadores de energía, fusibles y seccionadores. Para realizar el control lógico de la planta, para esto se tiene:

1) Un sistema de control SCADA4: Encargado de monitorear y controlar los diferentes parámetros de la central, tanto de los paneles solares, contadores (sistema más utilizado en centrales FV de gran potencia).

2) La estación meteorológica: Es de mucha importancia para recopilar información que servirá para calcular estadísticas de la radiación solar.

Figura 3

Esquema de una central fotovoltaica conectada a la red

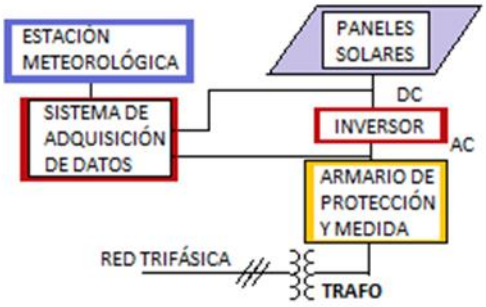


Figura 4. Esquema de una central fotovoltaica conectada a la red.
Fuente: Santillán Tituaña, A. (2016).

2. Instalación fotovoltaica aislada

Los sistemas FV aislados, dependen de la energía obtenida de los paneles y de las baterías. Además, para evitar que por cualquier eventualidad el sistema se quede sin energía, se suele

complementar estos sistemas con generadores. La Figura 4 muestra el diagrama de bloques de un sistema FV aislado.

Figura 4

Instalación fotovoltaica aislada



Figura 5. Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos.
Fuente: Santillán Tituaña, A. (2016).

Usualmente estos sistemas son de baja potencia y se utilizan para cubrir el consumo doméstico de energía. No entregan su energía a la red eléctrica, se dedican exclusivamente al autoconsumo. Al colocar el sistema de baterías, es necesario conectar junto con este un regulador, que controle la energía que entra o sale de dichas baterías para no provocar daños en las mismas.

3. Instalación fotovoltaica conectada a la red con sistema de almacenamiento

Usualmente los sistemas FV conectados a la red no emplean almacenamiento, pero existe la posibilidad de incorporar dicho almacenamiento, si se demuestran las ventajas del mismo a gran escala. Los elementos que se añaden son:

a) Sistema de almacenamiento (SA): Consiste en acumuladores de energía que permiten disponer de la potencia necesaria por la carga cuando esta la requiera, (no necesariamente en el instante de la generación). El costo y la vida útil son parámetros que se toman en cuenta al seleccionar el tipo de sistema, esto dependerá del material de construcción y del desarrollo de la tecnología.

b) Sistema de gestión de almacenamiento (SGA): Está encargado de gestionar la energía del SA, de modo que la vida útil de dicho SA sea la máxima.

La Figura 6 muestra el esquema del funcionamiento de una central fotovoltaica con un sistema de almacenamiento basado en baterías.

Esquema de una central fotovoltaica con almacenamiento

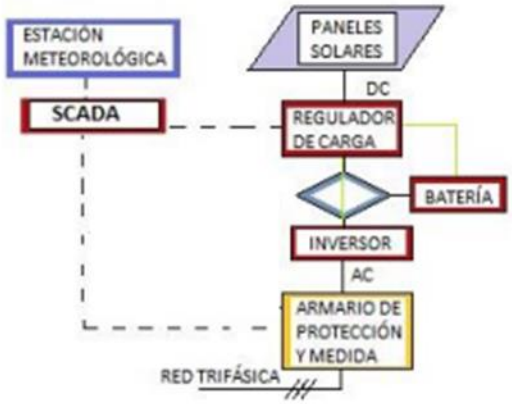


Figura 6. Esquema de una central fotovoltaica con almacenamiento

Fuente: Santillán Tituaña, A. (2016).

De acuerdo con Santillán Tituaña, A. (2016). El sistema SCADA estará encargado de la medición, control y comunicaciones que necesita la planta. Adicional, puede encargarse de la forma de cargar y descargar la batería, mediante algoritmos que nivelen la curva de generación de energía eléctrica. Adaptando la generación de energía de acuerdo a la demanda.

Teniendo claro lo anterior, las implicaciones y los instrumentos que se emplean para poder obtener energía solar fotovoltaica, realizar este estudio puede generar beneficios económicos, sociales y ambientales a largo plazo, en este caso en la zona de estudio en el Quindío, en el cual se encuentra el municipio de La Tebaida, cerca al valle del cauca donde la incidencia de

los rayos solares es alta la mayor parte del tiempo, de acuerdo con Ramírez, E. B. R., Siabato, A. I. B., & Orduz, M. G. (2017), en adición, el Plan Indicativo de Expansión y Cobertura 2013-2017 PIEC (Sánchez, 2010) elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética -UPME- del Ministerio de Minas y Energía, para el caso de Colombia indica que el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica -ICEE- al 2012 era del 96,1%, es decir, que según este censo 470.244 viviendas no cuentan con servicio de energía eléctrica (3,9% del total nacional), de las cuales se estima que el 91,98%, que representan alrededor de 432.530 viviendas, están ubicadas fuera de las cabeceras municipales, es decir, en zonas rurales y que de éstas aproximadamente 55.809 viviendas (0,46% del total nacional) no son interconectables al sistema eléctrico nacional -SIN-, lo que indica que requieren de soluciones aisladas.

c. Marco espacial

En relación con lo propuesto por los objetivos del presente proyecto, se realizó el análisis en el Departamento del Quindío, en las zonas urbanas de cada municipio del departamento del Quindío el cual cuenta con una superficie que se extiende 1.845 km^2, cuenta con una altitud que va desde 900 hasta 4.750 m.s.n.m, una latitud norte los 04º 04' 41" y 04º 43' 18" y entre los 75º 23' 41" y 75º 53' 56" de longitud oeste, Limita al norte con el departamento de Risaralda; al sur con el Valle del Cauca y al oriente con el departamento del Tolima, así mismo se muestra un mapa político administrativo donde se indica cómo está divido en 12 municipios y 4 corregimientos como se observa en el siguiente mapa.

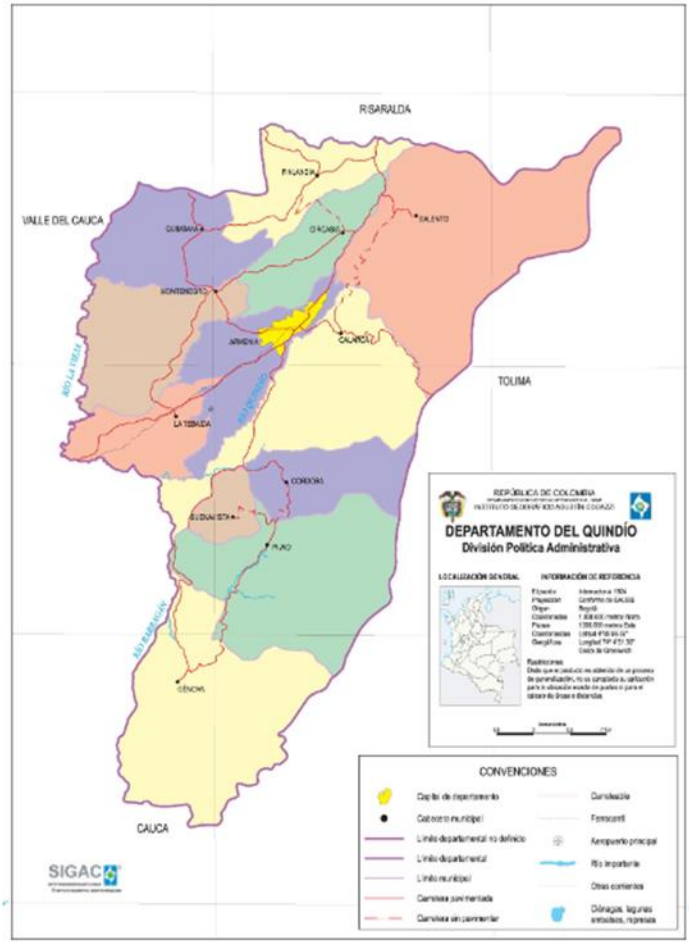


Figura 7. Mapa político- Administrativo– Departamento del Quindío.
Fuente: IGAC (s. f.).

d. Marco Legal

Colombia cuenta con la legislación pertinente para promover las políticas del uso de energías renovables o alternativas, estipuladas en el plan Energético Nacional a partir del cual se origina la ley 51 de 1989 por la cual se crea la Comisión Nacional de Energía. Esta ley vela por organizar y regular la utilización racional e integral de las distintas fuentes de energía, de acuerdo con los requerimientos del país y estudia el beneficio y viabilidad de los usos de energías no convencionales.

Cuatro años más tarde salió la ley 142 de 1994 esta es pionera como incentivo de energías no convencionales en los servicios domiciliarios públicos como el gas natural y así imponer

funciones para la regulación en cuanto a autogeneración y cogeneración de energía por parte de las empresas prestadoras de servicio y los funcionarios públicos.

Del mismo modo la ley 143 de 1994 conocida como la ley eléctrica que contribuye con la actualización del plan Energético nacional Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, trasmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional**,** gracias a esta ley se impulsaron muchos proyectos para abastecer la demanda de electricidad usando diferentes recursos energéticos.

Como principales normativas está la ley 697 de 2001 la cual promueve el uso de energías alternativas, donde se declara el Uso racional y eficiente de la energía (URE), como entidad responsable, está el ministerio de minas y energía, resaltando en el artículo 1 que es "fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales."

Asimismo, la ley 788 de 2002 por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial y su objetivo es mitigar el impacto del cambio climático por medio del uso de tecnologías como lo contempla el artículo 18 Otras rentas exentas "Venta de energía eléctrica generada con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas, realizada únicamente por las empresas generadoras, por un término de quince (15) años,". De forma que también sea un beneficio para las empresas generadoras de estos equipos y tecnologías siempre y cuando se cumplan por los requisitos establecidos en el mismo artículo.

Para finalizar la ley 1715 de 2014 tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes no convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en

el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas, entre otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético, también incentiva la inversión de aranceles contables y tributarios, investigación, interconectividad para la distribución de energía en Colombia.

9. Metodología

a. Enfoque metodológico

La metodología que se empleó en la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, esto se da porque el proyecto tiene un análisis de datos y estadísticas numéricas, que se calcularon para los 12 municipios del Quindío; como lo es la radiación solar, el modelo de cuenca visual hemisférico y, las cubiertas con cierto nivel de radiación solar y por último el potencial energético, para así determinar el potencial en las cubiertas de los hogares, institutos de salud, educación y más servicios que son de vital importancia para el buen funcionamiento de los municipios con una energía alternativa.

b. Tipo de estudio

La tipología de estudio para esta investigación, es de carácter experimental, puesto que por una parte se tiene las variables de radiación solar, y por otra parte se miden las posibilidades para la instalación y aprovechamiento de energía solar fotovoltaica de acuerdo a las estadísticas que se obtengan al aplicar la metodología para el departamento del Quindío. Así mismo, esta investigación posee un tipo de estudio de carácter analítico, puesto que los datos que se obtenga son evaluados y finamente se pueda identificar las zonas y edificaciones con mayor potencial de energía y si resulta factible el uso de la metodología aplicada, la cual para este estudio es de Delphine Khanna

Diseño de la investigación

El diseño de la investigación está sometida a una prueba de hipótesis de tipo no experimental, puesto que las variables no son manipuladas ni controladas, tal es el caso de la radiación incidente que llega a las cubiertas de las viviendas del Quindío, lo que se planteó, fue realizar

el cálculo de la radiación solar a lo largo del año 2022 y paso seguido determinar por medio de las variables las zonas más favorables de acuerdo a los criterios geofísicos y estimar el potencial de generación de energía eléctrica que se puede generar con los panes solares.

Fase 1: Identificar las condiciones de radiación solar en la zona urbana del Quindío para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

Se llevó a cabo la búsqueda de información geográfica de datos abiertos que es necesaria para determinar la radiación, en este caso es el modelo digital de elevación (DEM) por medio del cual se realiza el cálculo en ArcGIS Pro, para este se tiene en cuenta los siguientes puntos:

- **Ráster de entrada:** El ráster de superficie de elevación de entrada.
- **Latitud:** es necesaria para el área del sitio (unidades: grados decimales, positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur) se utiliza en cálculos como la declinación solar y la posición solar.
- **Tamaño del cielo / Resolución**: en este se identifican la resolución o tamaño del cielo para los rásteres de cuenca visual, mapa del cielo y mapa del sol. Las unidades son celdas y el valor predeterminado es ráster de 200 por 200 celdas
- **Configuración del tiempo:** en este campo se debe especificar el periodo del tiempo que se va a utilizar para los cálculos.
- **Días especiales**: se calcula la insolación solar para los días de solsticio (verano e invierno) y de equinoccio (cuando la insolación del equinoccio de primavera y de otoño es la misma).

- **En el día**: los cálculos se realizarán para un periodo de tiempo especificado dentro de un solo día.

Posterior a la obtención de los puntos, se selecciona la fecha e introduce las horas de inicio y fin. Cuando la hora de inicio y la de fin son las mismas, se calculará la insolación instantánea. Cuando la hora de inicio es anterior a la salida del sol y la hora de fin es posterior a la puesta del sol, la insolación se calculará para todo el día.

Para introducir el día correcto, puede utilizar el botón de calendario para abrir el cuadro de diálogo Calendario.

Varios días: los cálculos se realizarán para un periodo de tiempo especificado de varios días en un año.

Especificar el año de inicio, el día de inicio y el día de fin. Cuando el día de fin es menor que el día de inicio, se considera que el día de fin se encuentra en el año siguiente. La configuración de la hora predeterminada empieza el día 5 y termina el día 160 del actual año juliano.

Todo el año: los cálculos se realizarán para todo un año utilizando intervalos mensuales para los cálculos.

Si la opción Crear salida para cada intervalo está activada, los archivos de salida se crearán para cada mes; en caso contrario, se creará una única salida para todo el año.

Intervalo horario: El intervalo de tiempo a lo largo del día (unidades: horas) que se utilizará para calcular los sectores de cielo para el mapa del sol.

Factor z: El factor z ajusta las unidades de medida para las unidades z cuando son diferentes de las unidades x, y de la superficie de entrada. Los valores z de la superficie de entrada se multiplican por el factor z al calcular la superficie de salida final. Si las unidades z y las unidades x, y están en las mismas unidades de medida, el factor z es 1. Esta es la opción predeterminada.

Tipo de entrada de pendiente y orientación: Específica cómo se derivará la información de la pendiente y de la orientación para el análisis.

Desde el ráster de superficie de entrada—Los ráster de pendiente y orientación se calculan a partir del ráster de superficie de entrada. Esta es la opción predeterminada.

Desde una superficie plana—Se utilizarán valores constantes de cero para la pendiente y la orientación.

- **Cálculo de indicaciones**: El número de direcciones acimutales que se utilizarán al calcular la cuenca visual.

Los valores válidos deben ser múltiplos de 8 (8, 16, 24, 32, así sucesivamente) El valor predeterminado es 32 direcciones, lo que es adecuado para una topografía compleja.

- **Ráster de salida**: los ráster de radiación de salida siempre son del tipo punto flotante y poseen unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m^2). La salida de ráster de duración directa será un entero con unidades hora.

Para finalizar este proceso se cambia en el entorno y se configura como una máscara para que solo se procesen las áreas dentro de las construcciones del Quindío; así pues, se ahorra tiempo de cálculo.

Fase 2: Establecer las características óptimas para la implementación de sistemas fotovoltaicos en el departamento del Quindío.

Ya calculada la radiación solar en las edificaciones, se determina los tejados o cubiertas adecuadas para los paneles solares de la zona de estudio de acuerdo a Khanna. D (s, f) por medio de ArcGIS Pro y sean determinadas las zonas con las condiciones más apropiadas, es decir, con mayor radiación (kWh/m^2); se identifican con base a 3 criterios, los cuales se explican a continuación, de igual manera se elaboró un diagrama donde se muestra todos los procesos:

- La pendiente de los tejados adecuados debe ser de 45 grados o menos, puesto que las pendientes empinadas tienden a recibir menos luz solar. Para determinar la pendiente del tejado, debe crear una capa ráster de pendiente.
- Los tejados adecuados según Khanna. D (s, f) deben recibir al menos 800 kWh/m^2 de radiación solar. Puede evaluar este criterio con su capa ráster de radiación solar.
- Eliminar las áreas orientadas hacia el norte, puesto que los del hemisferio norte reciben menos luz solar. Así mismo el modelo de cuenca visual, dado que la radiación se puede ver muy afectada por la topografía y las entidades de superficie, por esto se tiene en cuenta la posición del sol en las diferentes horas del día a lo largos del año y la cantidad de cielo visible juega un rol importante en la insolación en una ubicación en los tejados adecuados

Una vez se hayan realizado los procesos que ayudan a cumplir con los criterios mencionados anteriormente, se pasa a eliminar las áreas con poca radiación solar teniendo en cuenta los

criterios para las edificaciones que como mínimo debe recibir 800 kWh/m^2 de radiación mínima para la instalación de paneles solares.

Ahora bien, se genera una tabla en la cual se calcula el valor medio para determinar la radiación solar media por metro cuadrado para cada edificio, una vez se tiene el valor del área y medio de cada edificación y esta tabla se une con la capa de edificios adecuados donde se calcularon los criterios mencionados anteriormente, posteriormente se agrega un criterio para la adecuación de paneles solares, para este se tiene que considerar que las construcciones que tienen menos de 30 metros cuadrados de superficie no es apto para la instalación ya que no vale la pena la inversión de instalación. Esto se da según los criterios obtenidos de la metodología empleada en el software que consiste en las bases de Delphine Khanna

En esta capa de edificios adecuados se agrega un campo el cual se llama radiación aprovechable, en este campo y multiplicando el área apta de cada edificio por su radiación solar media por metro cuadrado. Para evitar que las cifras sean demasiado grandes, también convertirá la radiación solar de kilovatios-hora a megavatios-hora dividiéndola por 1000. La fórmula correspondiente será:

```
(Área * Mean) / 1000
```

Finalmente se convierte la radiación a energía, los valores de radiación solar aprovechable se convierten en potencial de producción de energía eléctrica para cada vivienda en él Quindío. De acuerdo a Khanna. D (s, f), los paneles solares pueden convertir el 16 por ciento de la energía solar que reciben en electricidad, y que el 86 por ciento de esta electricidad se conserva a lo largo de la instalación, como se hizo anteriormente, el creo un campo con el nombre de productividad eléctrica y la formula correspondiente para el cálculo es:

Radiación aprovechable * 0.16 * 0.86.

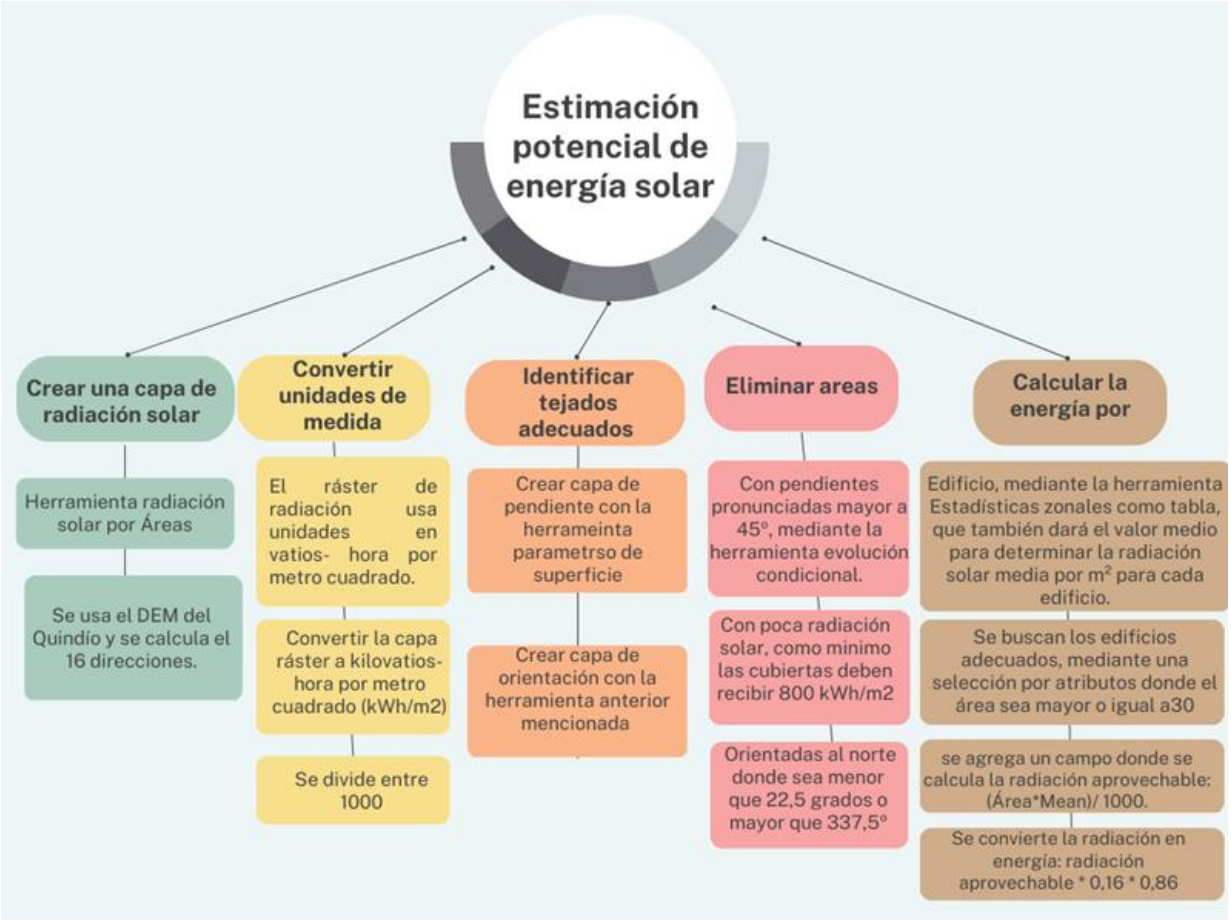


Figura 8. Diagrama del modelo de geoprocesamiento para calcular el potencial energético del Quindío.
Fuente: Autora (2023).

Fase 3: Elaborar un producto geográfico con la información relacionada con el potencial de energía solar para la zona de estudio.

Una vez se obtengan los resultados, se realizan las salidas gráficas correspondientes a la radiación solar en el Quindío, adicional se ejecutan la salida para cada uno de los 12 municipios del Quindío, este con el fin de que se pueda tener una mayor visualización del resultado, igualmente se realizan las salidas graficas de las pendientes y orientación adecuada del Quindío; para terminar se llevan a cabo las salidas graficas del potencial energético fotovoltaico por edificaciones adecuadas de la zona urbana del Quindío, en las cuales también

se hace un acercamiento a cada uno de los municipios para mayor comprensión, a su vez se analizan las zonas con mayor potencial energético en las construcciones y por consiguiente las superficies que presentan limitaciones con los requerimientos de las celdas o paneles fotovoltaicas para el área de las cubiertas y el rendimiento de la instalación.

Para finalizar se calcula la densidad de las edificaciones, estas se pasan a formato punto y se calcula de cada celda ráster de salida, donde se ajusta una superficie curva uniforme sobre cada punto. El valor de superficie es más alto en la ubicación del punto y disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto, alcanza cero en la distancia Radio de búsqueda desde el punto, es decir, que muestra y logra identificar por medio de zonas el potencial energético más alto y la manera en que disminuye en las zonas urbanas de cada municipio, por lo que sigue se evidencia las estadísticas por medio de un gráfico donde se ejemplifica la suma del potencial de producción de energía eléctrica de todos los edificios, así mismo el valor medio estimado del año, la mínima y la máxima del potencial energético para el departamento del Quindío estimado en el año 2022.

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Técnica o instrumento
Radiación solar de áreas	Deriva la radiación solar entrante de una superficie de ráster.	Unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m^2).	Los cálculos para un modelo digital de elevación (DEM) grande pueden tardar varias horas y para un DEM muy grande, incluso días. Puede realizar algunas series de pruebas con una resolución más gruesa o con un subconjunto de datos para asegurarse de que la configuración es correcta.
Áreas con poca radiación solar	Los tejados deben recibir de radiación solar un mínimo de radiación si se van a instalar paneles solares.	Cubiertas que reciban mínimo 800 kWh/m^2	Utilizará la herramienta Evaluación condicional, teniendo en cuenta la pendiente para eliminar las áreas con poca radiación solar.
Edificios adecuados	Muestra la cantidad de radiación solar que recibe cada celda ráster apta. En este módulo, agregará estos datos para determinar la cantidad de radiación solar que recibe cada edificio en un año normal.	Mayor de 30 metros cuadrados de superficie de tejado es apto.	Se realiza una selección por atributos, donde se tiene el criterio que el área del tejado sea mayor o igual a 30 metros cuadrados y los que clasifiquen son los aptos para la instalación.
Conversión de radiación a energía	Se convierte los valores de radiación solar aprovechable en potencial de producción energético. La cantidad de energía que pueden producir los paneles solares no solo depende de la radiación solar, sino también de la eficiencia de los paneles solares y el rendimiento de la instalación	Los paneles solares pueden convertir el 16% de la energía solar que reciben en electricidad, y que el 86 por ciento de esta electricidad se conserva a lo largo de la instalación.	Para determinar el potencial de producción de energía eléctrica, creará un campo y lo calculará multiplicando los valores de radiación solar aprovechable por los valores de la ratio de eficiencia y rendimiento. En la calculadora de campo se aplica la formula ! Aprovechable_EnergiaMWh! * 0,16 * 0,86

Tabla 1: Operacionalización de Variables.

Fuente: (Autora, 2023).

10. Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados finales, los cuales dan repuesta a los objetivos que se plantearon en la investigación y a su vez siguiendo la metodología de Delphine Khanna realizada por medio de la información geográfica del departamento del Quindío para calcular la radiación solar el potencial energético para el año 2022

11.1 Radiación solar en edificaciones

Se identificaron las condiciones de radiación solar en las construcciones de la zona urbana en los 12 municipios del Quindío, a partir del modelo digital de elevación (DEM) de acuerdo con los parámetros que se mencionaron en el la metodología de Khanna. D (s, f):

Ráster de entrada: DEM Quindío
Latitud: 4,398
Tamaño del cielo / Resolución: 200
Configuración del tiempo: Todo el año, para el año 2022
Intervalo horario: 1 vez cada hora
Factor z: 1
Tipo de entrada de pendiente y orientación: Desde el ráster de superficie de entrada
Cálculo de indicaciones: 16 direcciones
Ráster de salida: Radiación _solar

Como se puede observar en la figura 8, el cual muestra la radiación solar calculada por áreas en unidades de medida de Kwh/m^2; la zona de estudio percibe radiación que va desde 0,112 Kwh/m^2, que es la mínima radiación registrada para el departamento del Quindío; las viviendas que reciben esta radiación se encuentran en el tono amarillo más claro cómo se puede observar en el mapa, la cual es una radiación menor e igual a 367,08 Kwh/m^2 , por otro lado el máximo valor registrado de radiación solar fue de 4.925,25 Kwh/m^2; su tonalidad

está representada en el mapa con el color rojo más fuerte; de manera que deja ver la variedad de zonas que cuenta con la adecuada radiación y las que superan el valor mínimo de 800 Kwh/m^2, el cual es necesario para la instalación fotovoltaica.

De acuerdo con UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). (2014). La radiación solar en el Quindío oscila entre 4,5 y 5,0 kWh/m^2 al día en promedio, lo que equivale a alrededor de 1642 y 1825 kWh/m^2 al año; pero en cierta medida este valor puede cambiar debido al fenómeno climático del año.

Así mismo, de acuerdo con la Agencia Nacional de Tierras de Colombia (2017) en su estudio titulado Potencial de generación de energía eléctrica a partir de fuentes solares en Colombia afirma que la región del Quindío presenta una irradiación solar promedio de 4,6 kWh/m^2 por día, lo que indica que la región es adecuada para la generación de energía solar fotovoltaica.

No obstante, hay que tener presente que así el Quindío cuente con una buena radiación solar, no es el único factor importante para que sea eficiente en el potencial energético y puede llegar a generar en los paneles solares fotovoltaicos, ya que estos dependen de otros factores que se mencionaron en la metodología como la inclinación, orientación, la cuenca visual y demás.

Seguidamente se muestran después del mapa de la radiación del Quindío (figura 8) una serie de mapas los cuales corresponden a cada uno de los municipios en donde se realizó un acercamiento para una mayor visualización de los resultados, teniendo presente y resaltando que la radiación es la misma ya que se realizó de manera unánime para todo el departamento.

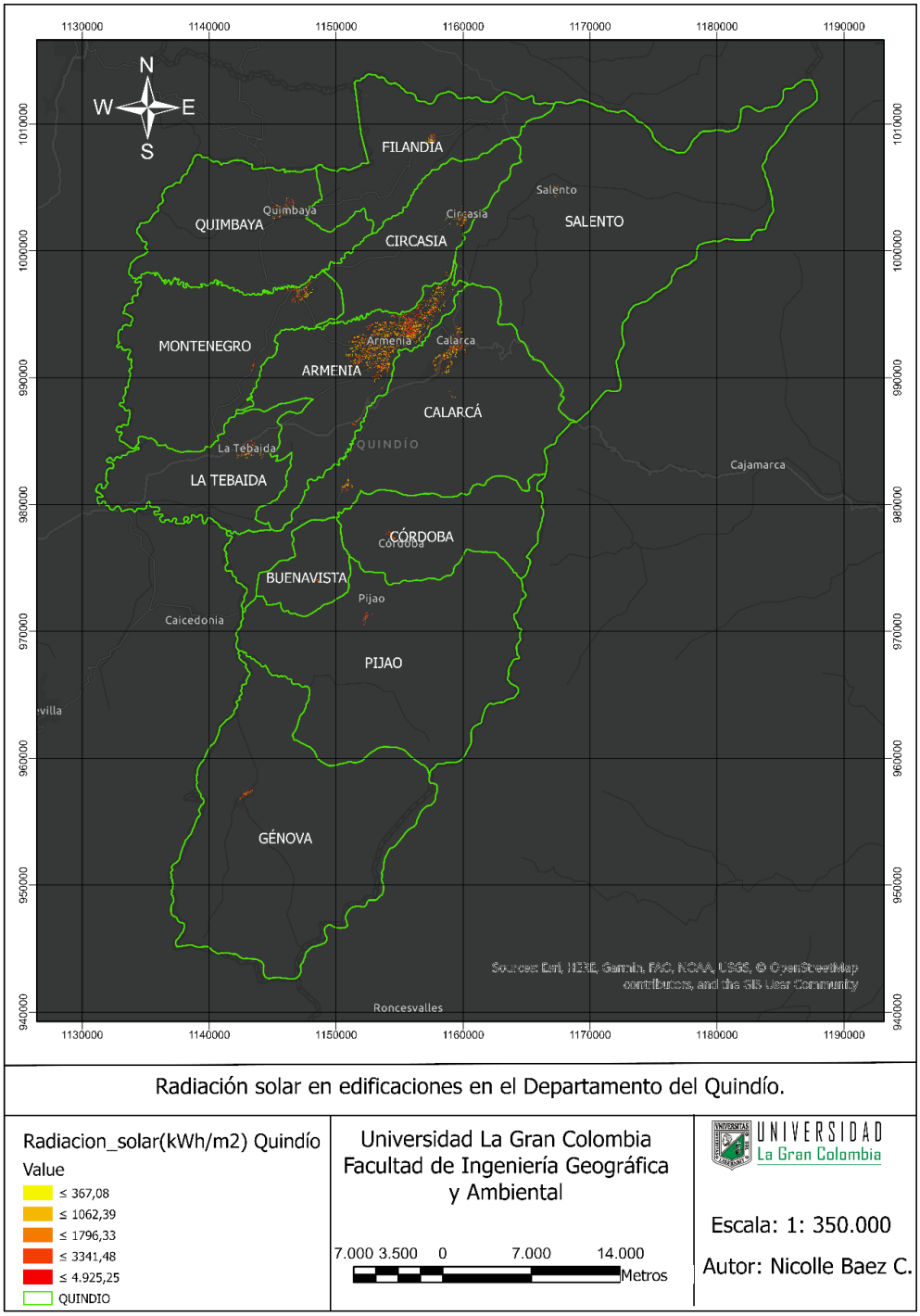


Figura 9. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío.
Fuente: Autores (2023).

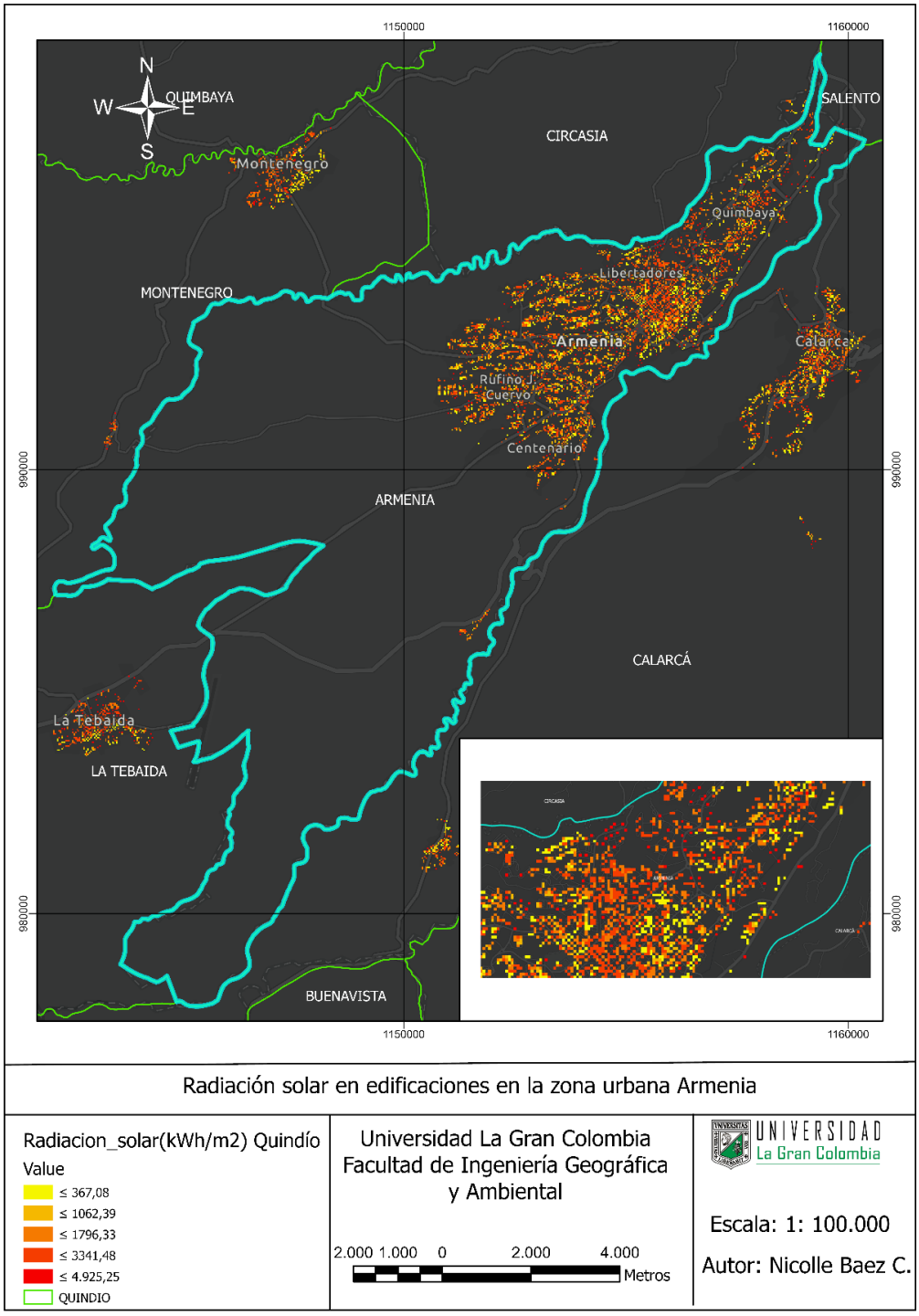


Figura 10. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Armenia.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 10, se puede ver la radiación del municipio de Armenia, la cual resulta tener muchos niveles de radiación (amarillo, naranja y rojo) al redor de toda la zona urbana, sin embargo, se destaca una mayor radiación en la zona norte del municipio, dejando ver,

mayores pixeles de color rojo el cual representa la máxima radiación registrada con un valor mayor o igual a 4925,25 kWh/m2.

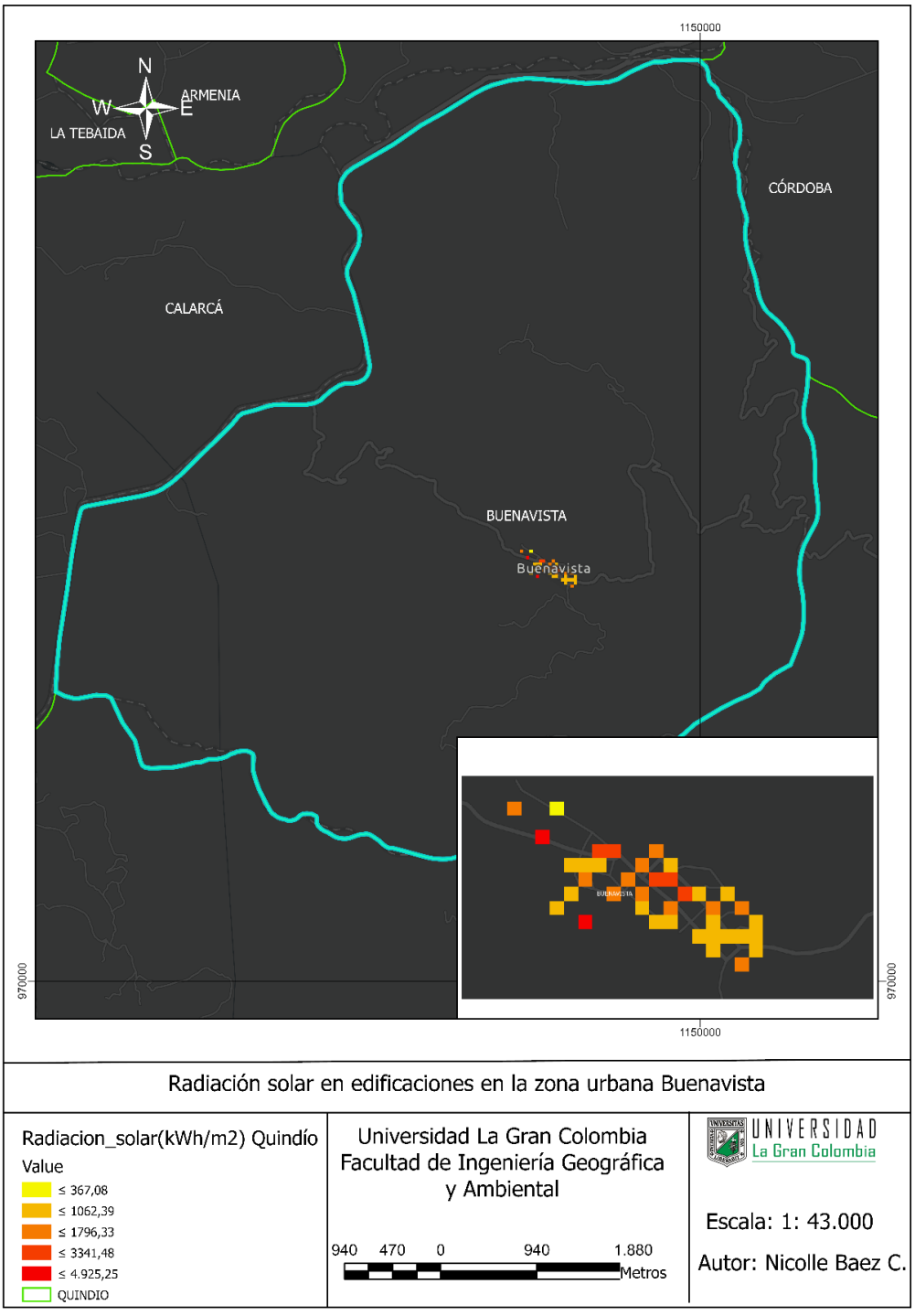


Figura 11. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Buenavista.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 11, se tiene el municipio de Buenavista, el más pequeño de todo el departamento en la zona urbana, este municipio logra obtener buenos niveles de radiación, la mayoría de las zonas están en niveles de naranja y rojo, los cuales van de 1062,40 kWh/m2 hasta 4925,25 kWh/m2 o más, excepto en la parte superior hacia el norte donde se registra radiación abaja de 367,08 kWh/m2.

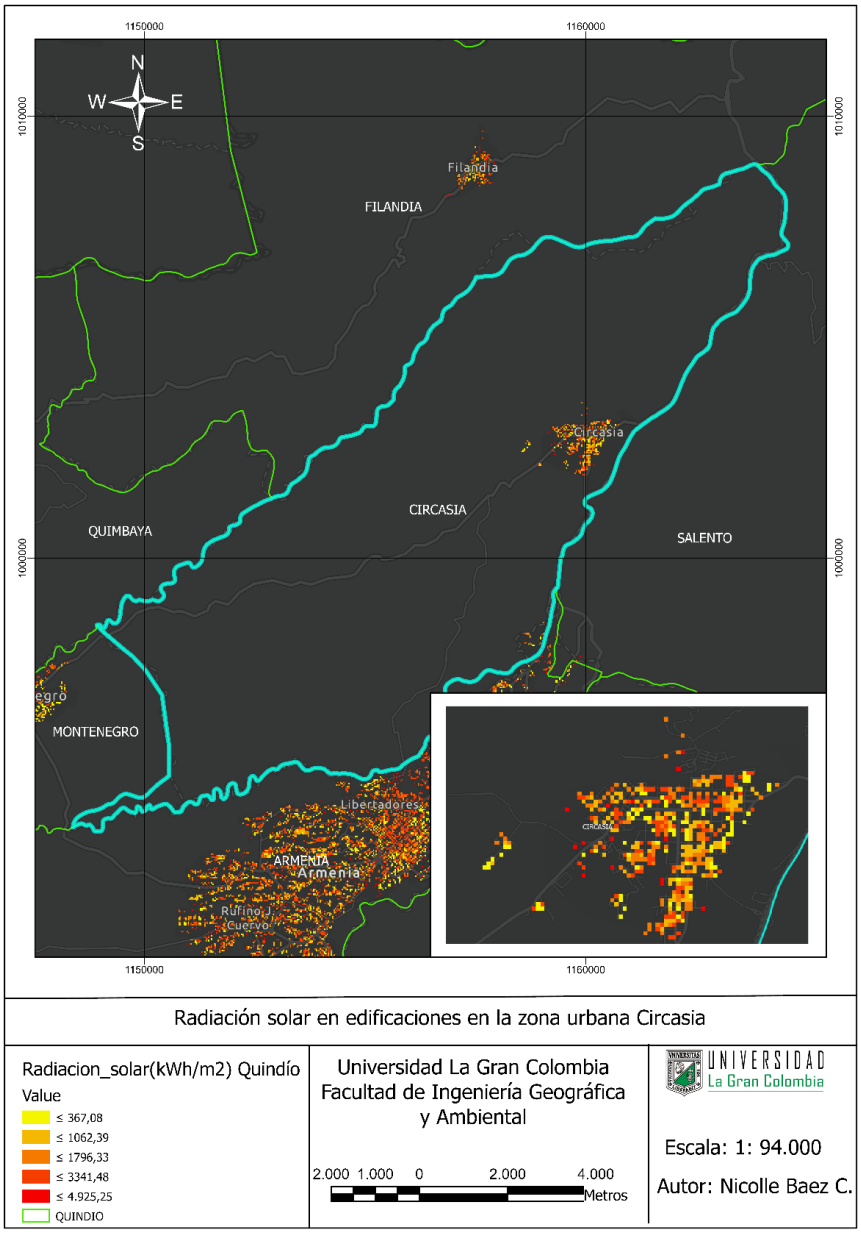


Figura 12. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Circasia.
Fuente: Autores (2023).

La figura 12 representa la radiación del municipio de Circasia, en esta se observó que la radiación en circasia es de nivel bajo y medio; es decir amarilla y naranja, con pocas zonas al redor del municipio con radiación alta (roja), lo cual lo convierte en poco favorable en comparación con los demás municipios.

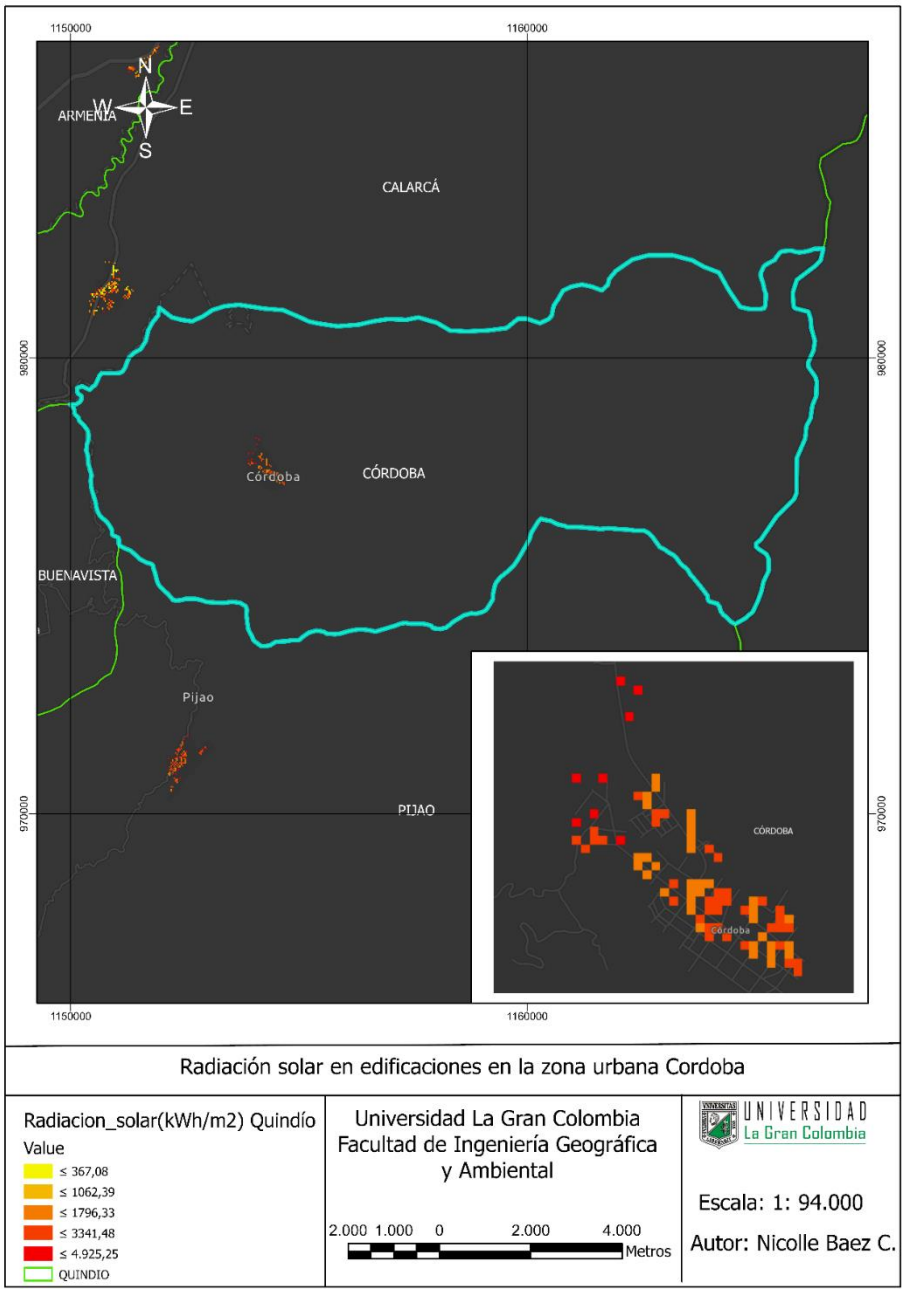


Figura 13. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Córdoba.
Fuente: Autores (2023).

En el mapa de la figura 13, se aprecia el municipio de Córdoba, el cual cuenta con muy buenos niveles de radiación solar, toda la zona urbana se encuentra en niveles naranja y rojo que representa lo valores de 1796,33 y 4925,25 respectivamente, dejando un panorama muy positivo

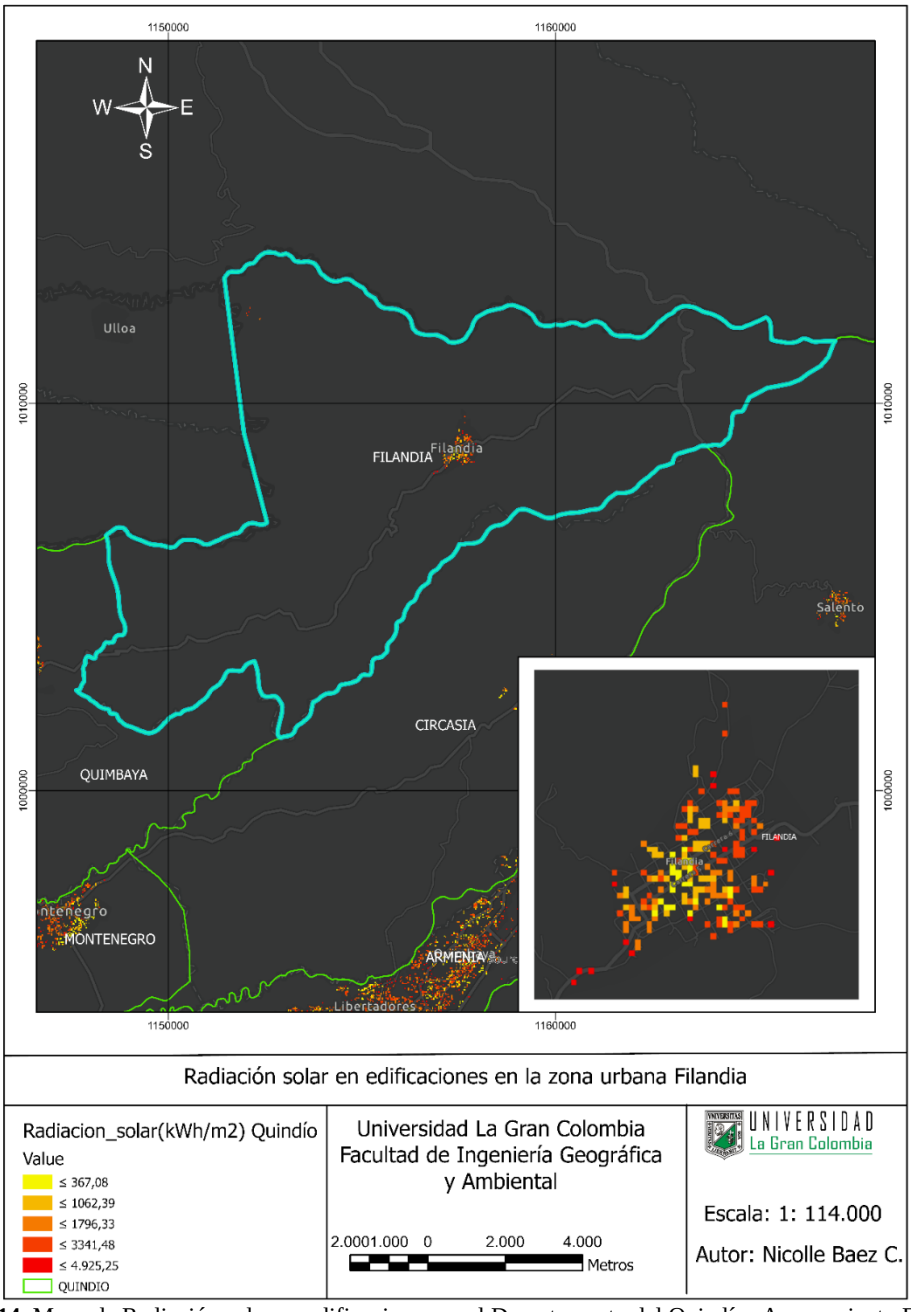


Figura 14. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Filandia.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 14 se encuentra el municipio de Filandia, en donde se observo que en la zona centro del municipio la radiación es la mas baja representada en color amarillo con valores de 367,08 kWh/m2, sin embargo, en las zonas limite, a las afueras del municipio la radiación registrada fue alta (roja).

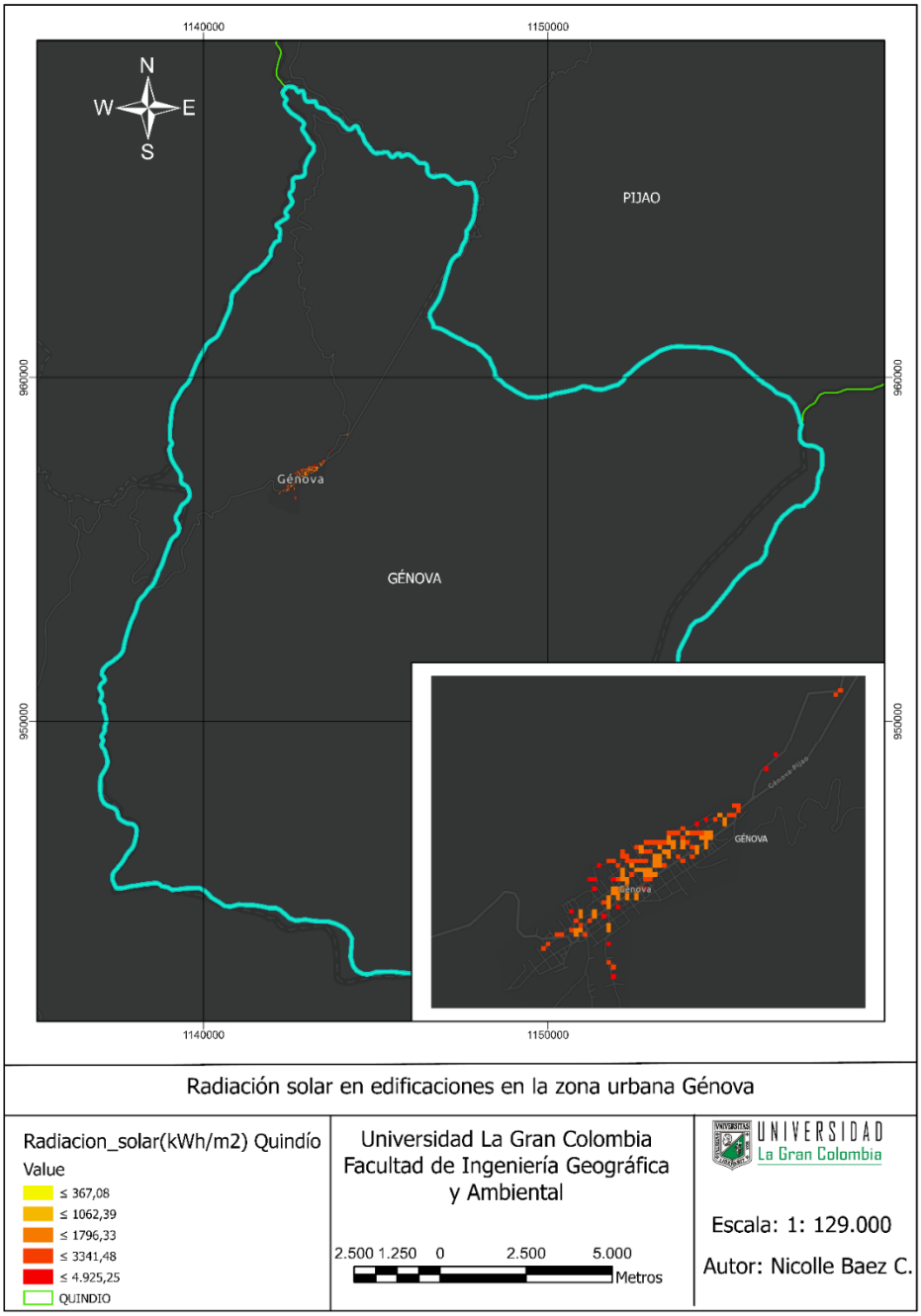


Figura 15. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Génova
Fuente: Autores (2023).

En la figura 15, se tiene al municipio de Génova, respecto al mapa se puede observar que la radiación captada en el municipio es muy buena en general en toda la zona urbana del Génova, es el municipio con mayor radiación de forma parcial, lo cual lo hace muy bien candidato para la energía solar fotovoltaica.

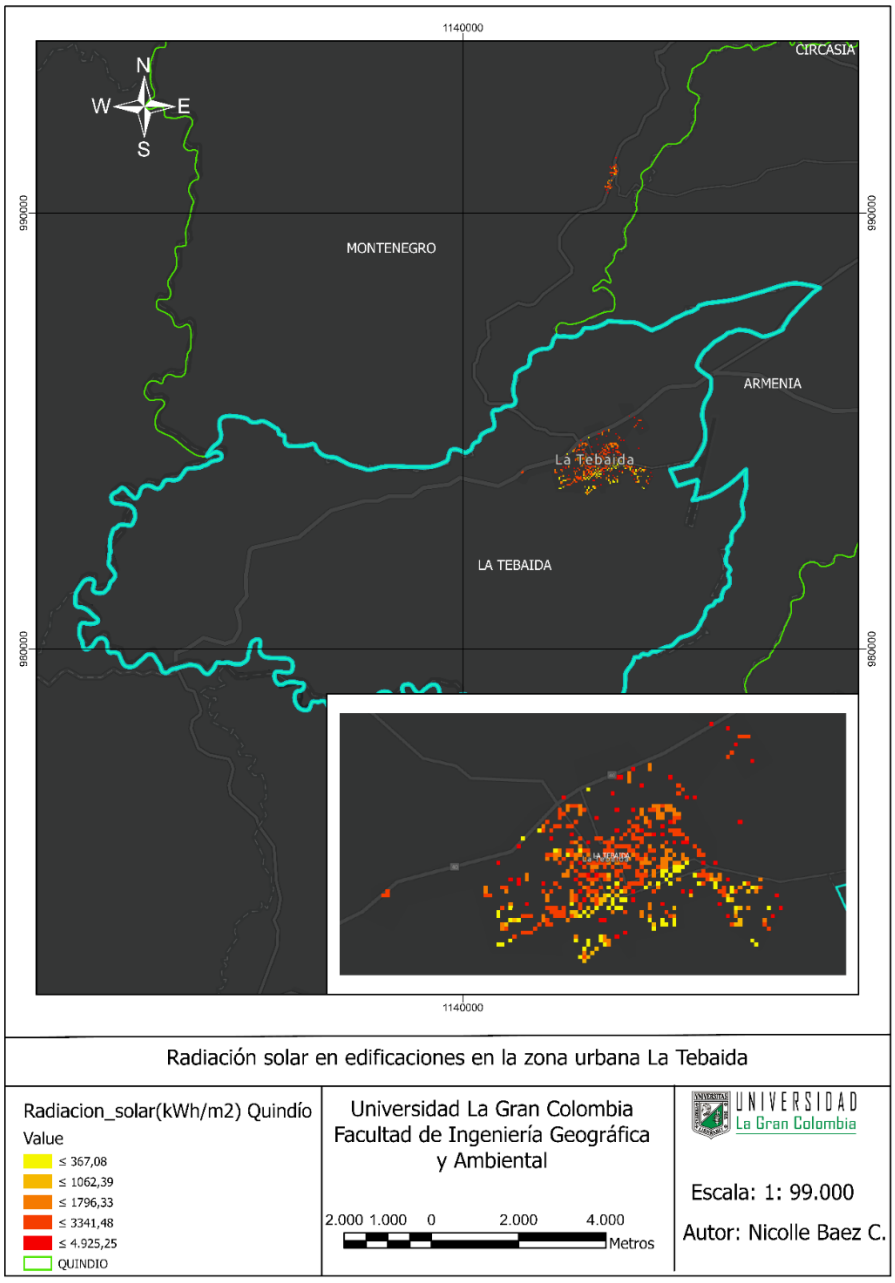


Figura 16. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento La Tebaida.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 16, La tebaida, se destaca muchas zonas alrededor del todo municipio que reciben niéveles altos de radiación solar (rojo), a su vez se registran niveles bajos de radiación, pero en comparación con el resto del municipio son inferiores a las zonas con niveles altos.

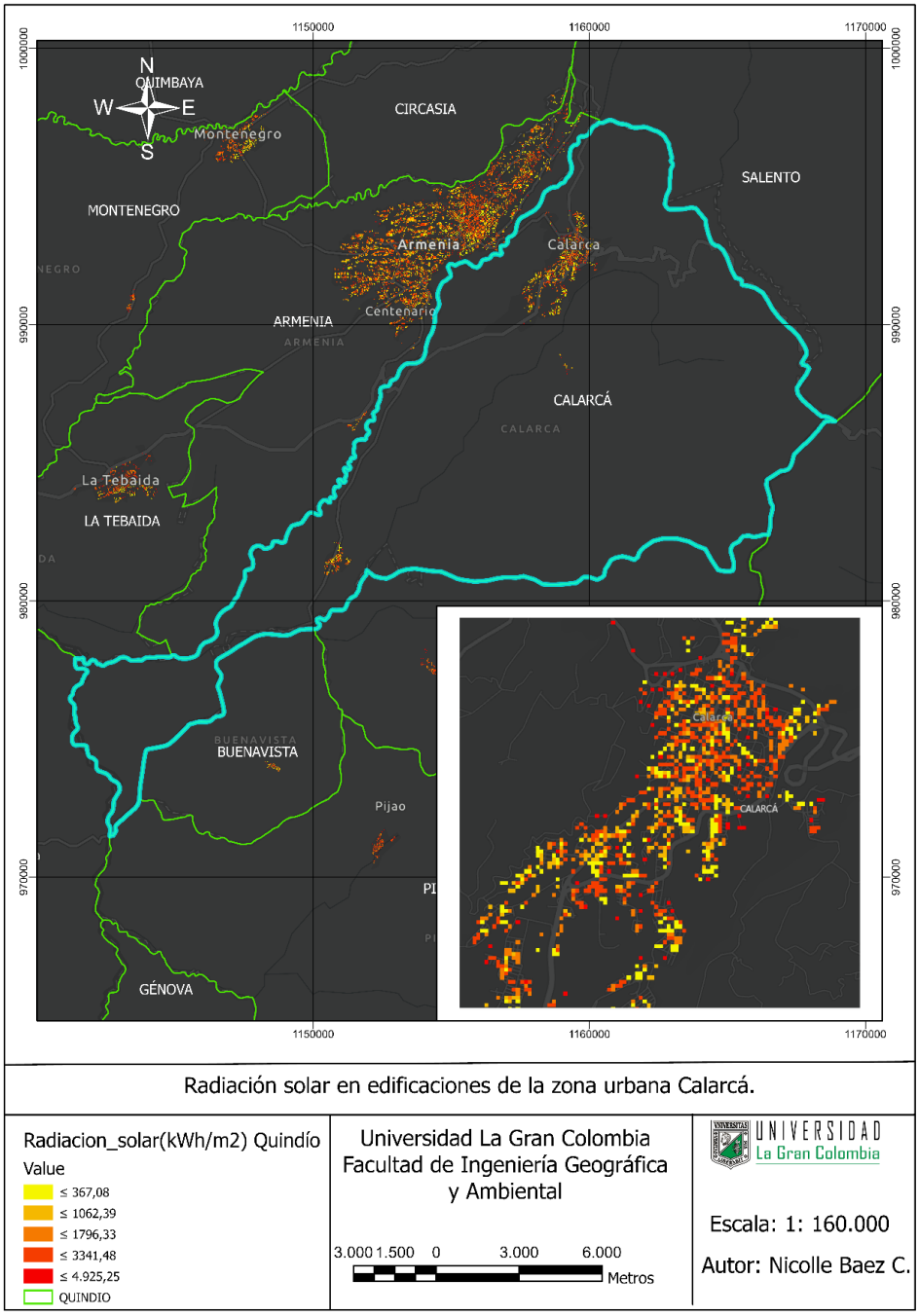


Figura 17. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Calarcá.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 17 se encuentra la radiación captada por el municipio de Calarcá, en la cual se equilibra las zonas con niveles altos (rojo) y las zonas con niveles bajos (amarillos) en todo el municipio.

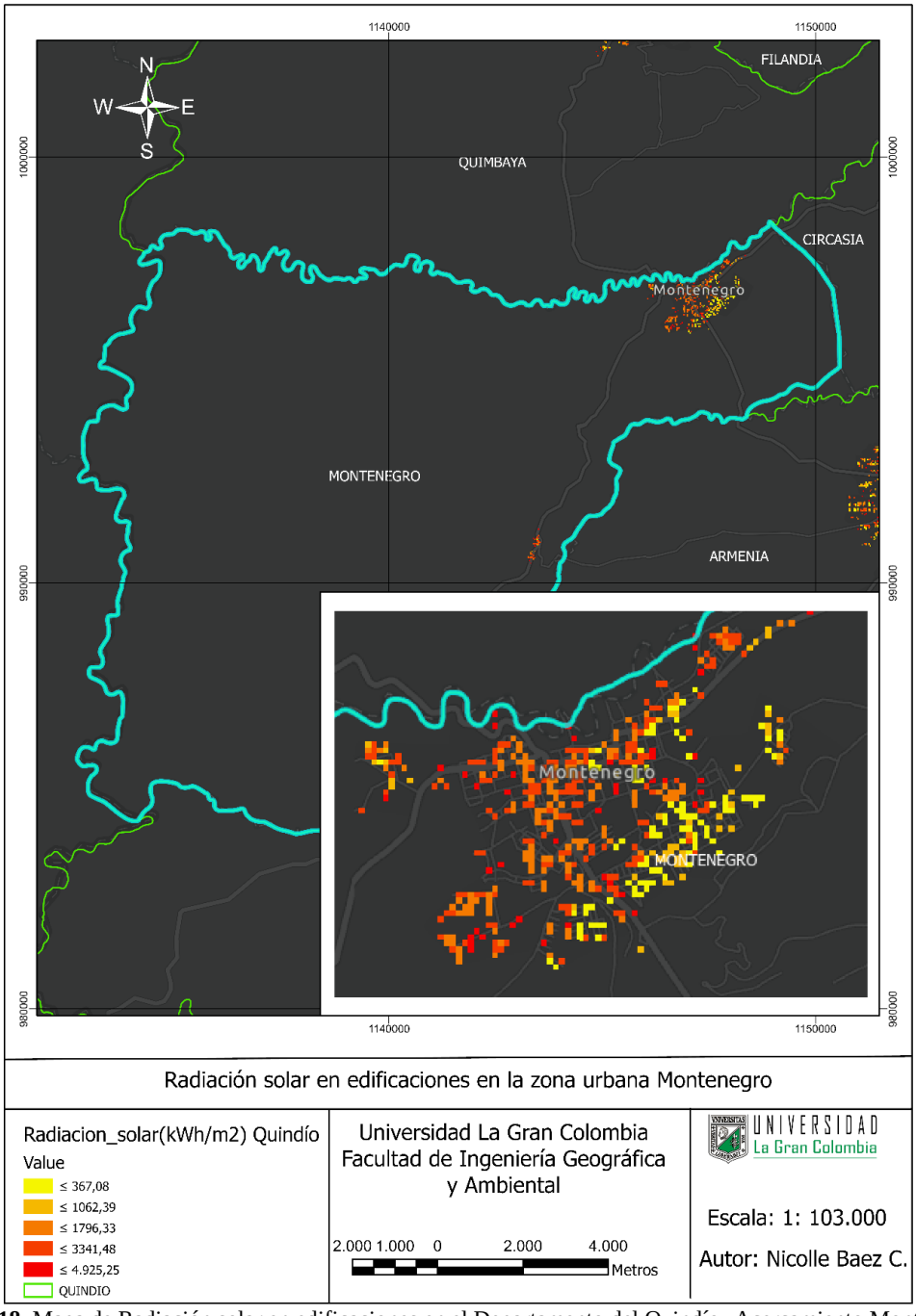


Figura 18. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Montenegro.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 18 se puede observar la radiación del municipio de Montenegro, la cual en la mayoría de la zona urbana registra niveles altos y medios de radiación solar, aun así, en la parte sureste si se presencia niveles bajos de radiación (amarillo).

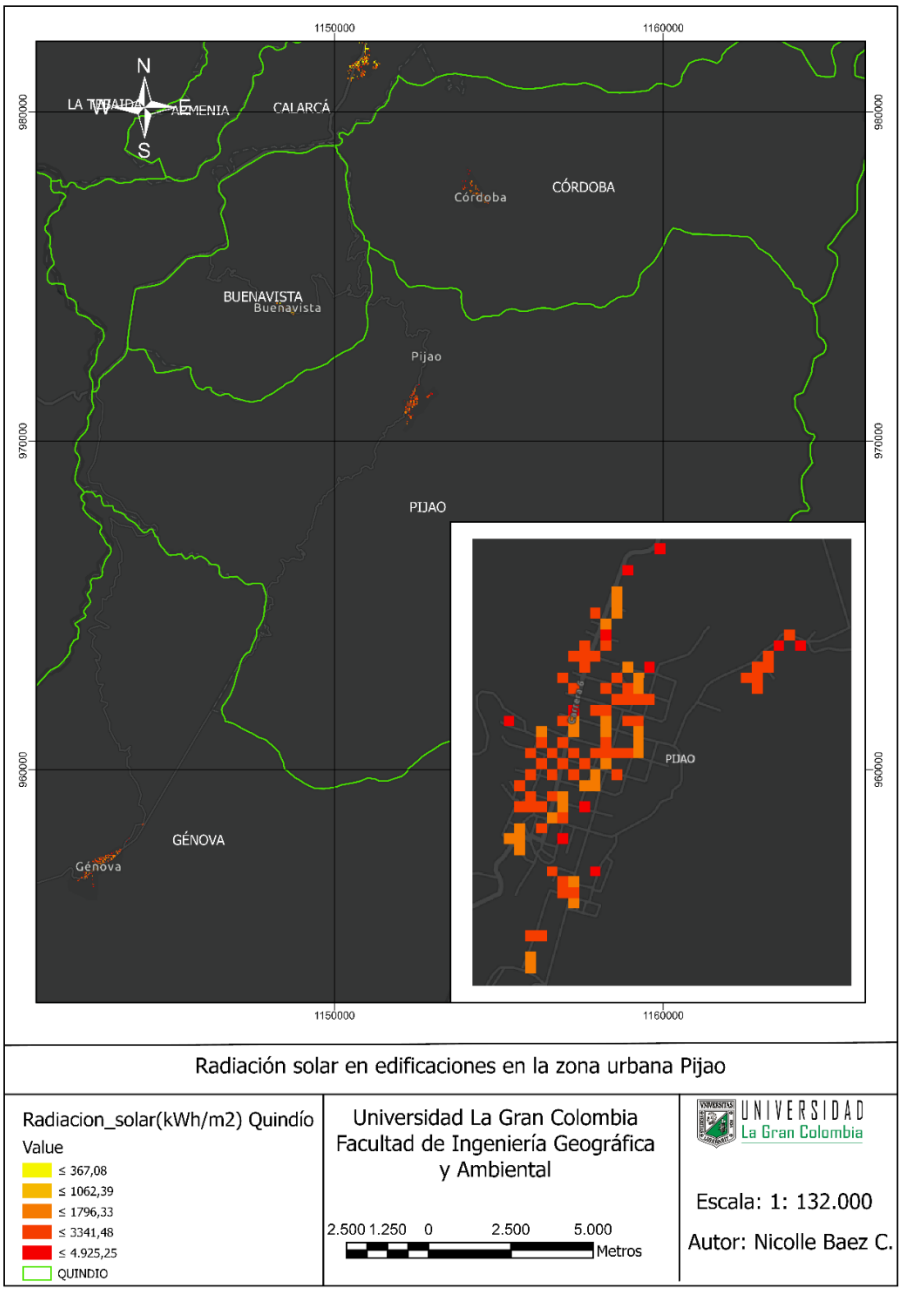


Figura 19. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Pijao.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de Pijao cuenta con niveles de radiación altos, esta entre los 1796,33 kWh/m2 y mayor o igual 4925,25 kWh/m2, siendo uno de los municipios con mas factibilidad para la implementación fotovoltaica, al igual que el municipio de Génova.

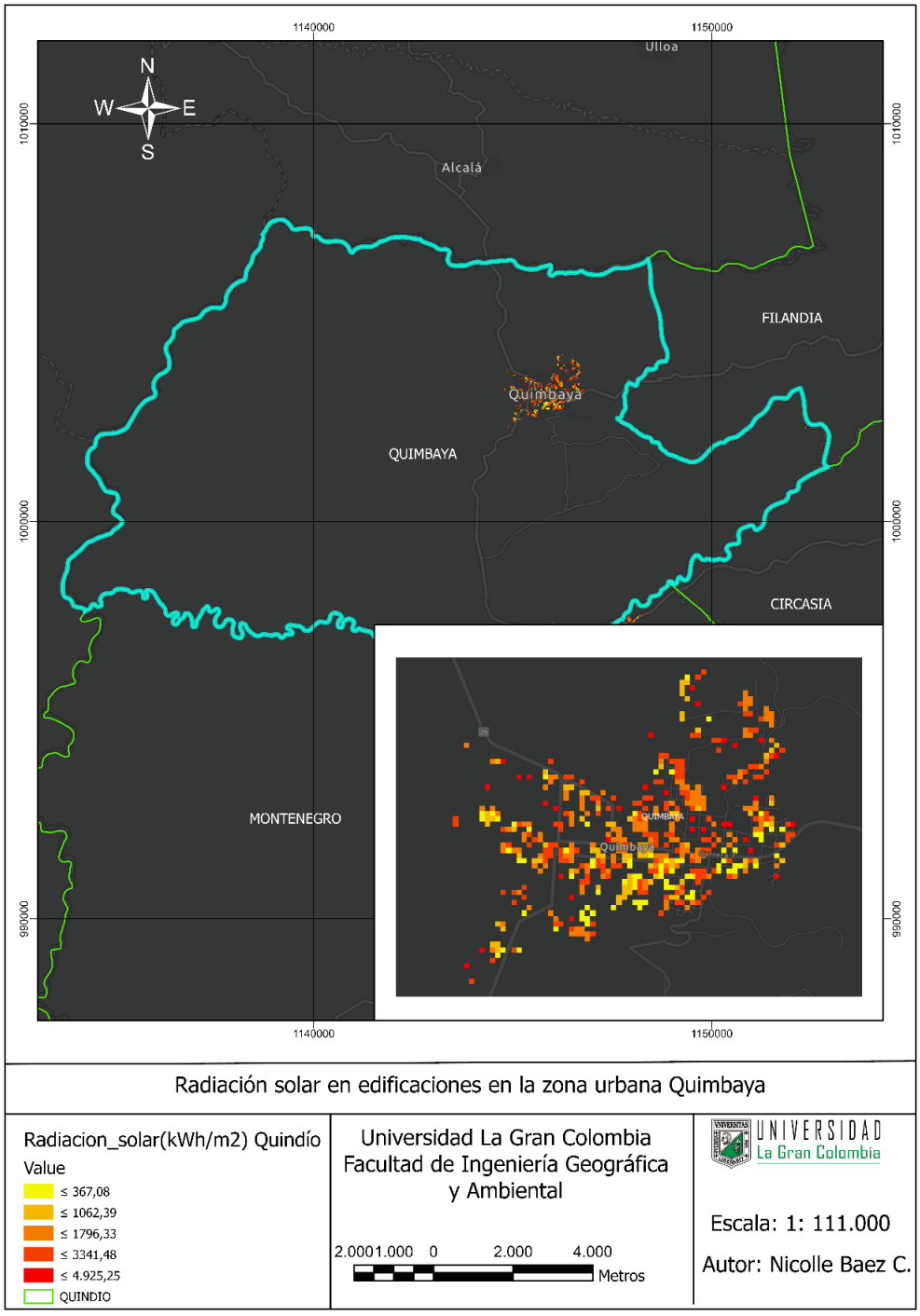


Figura 20. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Quimbaya.
Fuente: Autores (2023).

La figura 20 indica el municipio de Quimbaya, el cual registra una radiación variada en general, hay zonas con niveles altos, zonas con niveles medios y zonas con niveles bajos, resaltan de más el nivel medio (naranja).

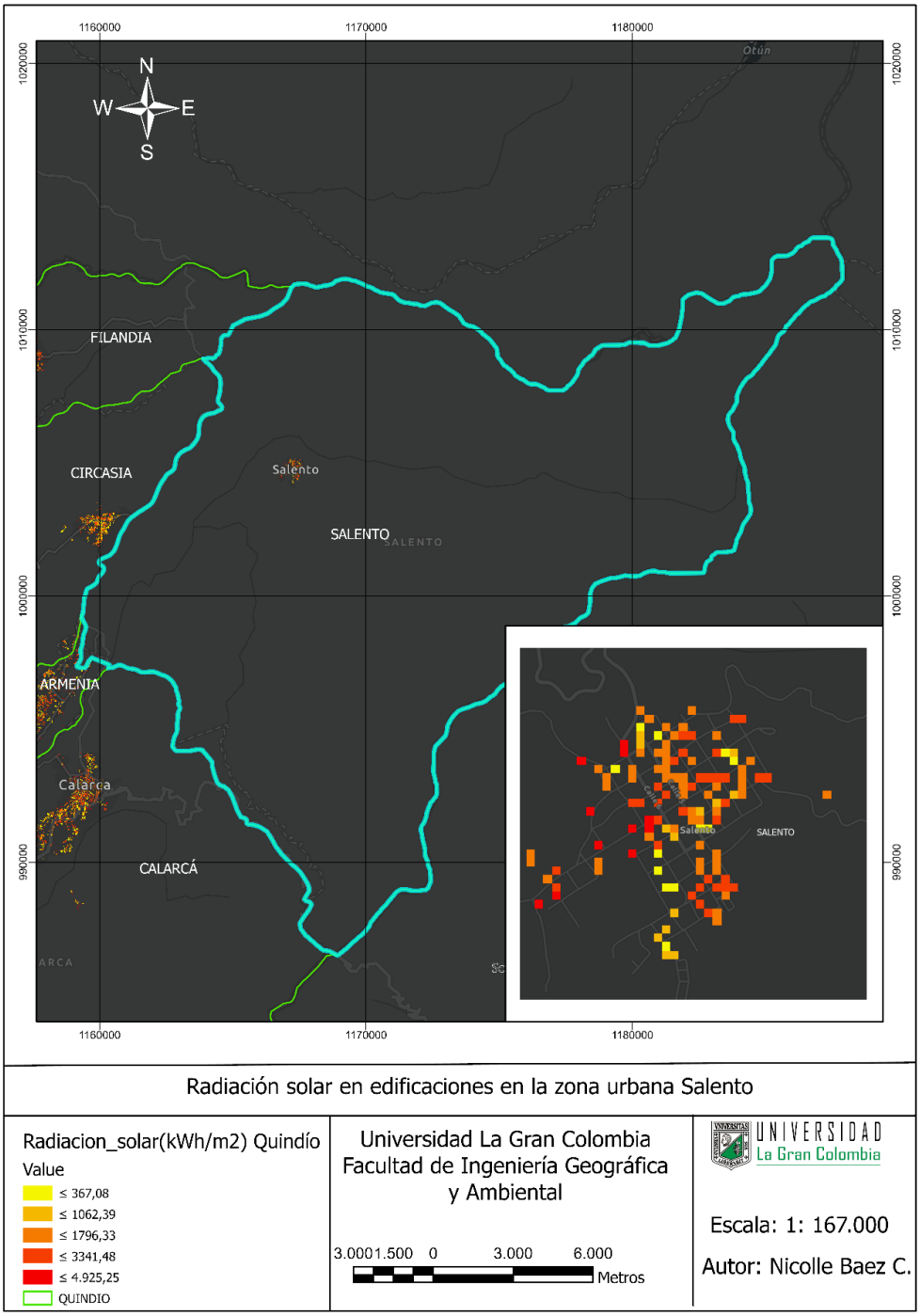


Figura 21. Mapa de Radiación solar en edificaciones en el Departamento del Quindío -Acercamiento Salento.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de Salento, se observa en la figura 21, la radiación captada, la cual es en mayoría niveles medios y altos (naranja y rojo), y unas pocas zonas con radiación baja (amarillo), donde también muestra un panorama alentador.

11.2 Características óptimas para la implementación de sistemas fotovoltaicos

Una vez se obtiene la radiación solar en las edificaciones de los municipios del Quindío, se prosigue a identificar las superficies adecuadas teniendo en cuenta la pendiente, según Khanna. D (s, f) las áreas del DEM con una pendiente superior a 45 grados son eliminadas, esto se debe a que la eficiencia energética de los paneles solares fotovoltaicas con ángulos más empinados, no reciben la suficiente luz solar directa lo que se traduce a reducir la eficiencia y producción energética. Esto se da, según la metodología empleada.

Así mismo, según El Centro Nacional de Energías Renovables (NREL por sus siglas en inglés) indica que las pendientes muy pronunciadas pueden aumentar el riesgo de deslizamientos de tierra y erosión, lo que puede poner en peligro la seguridad de las personas y la estabilidad de los paneles solares.

Aclarando esto en la figura 22 se encuentra el mapa como resultado de la pendiente adecuada de la zona urbana del Quindío, en el que se eliminaron las áreas con una pendiente mayor a 45 grados, de igual manera en el mapa también se muestra la pendiente del Quindío y permite entender como la mayoría de las edificaciones se encuentran en una zona donde la pendiente va desde valores desde 0 grados las cuales son prácticamente planas lo que es muy conveniente para los paneles solares junto a su orientación; hasta los 32, 82 grados donde de igual manera es una muy buena inclinación para los paneles solares ya que están dentro

del rango para la instalación de paneles solares y tener muy buena capacidad de generación de energía y ser un sistema eficiente

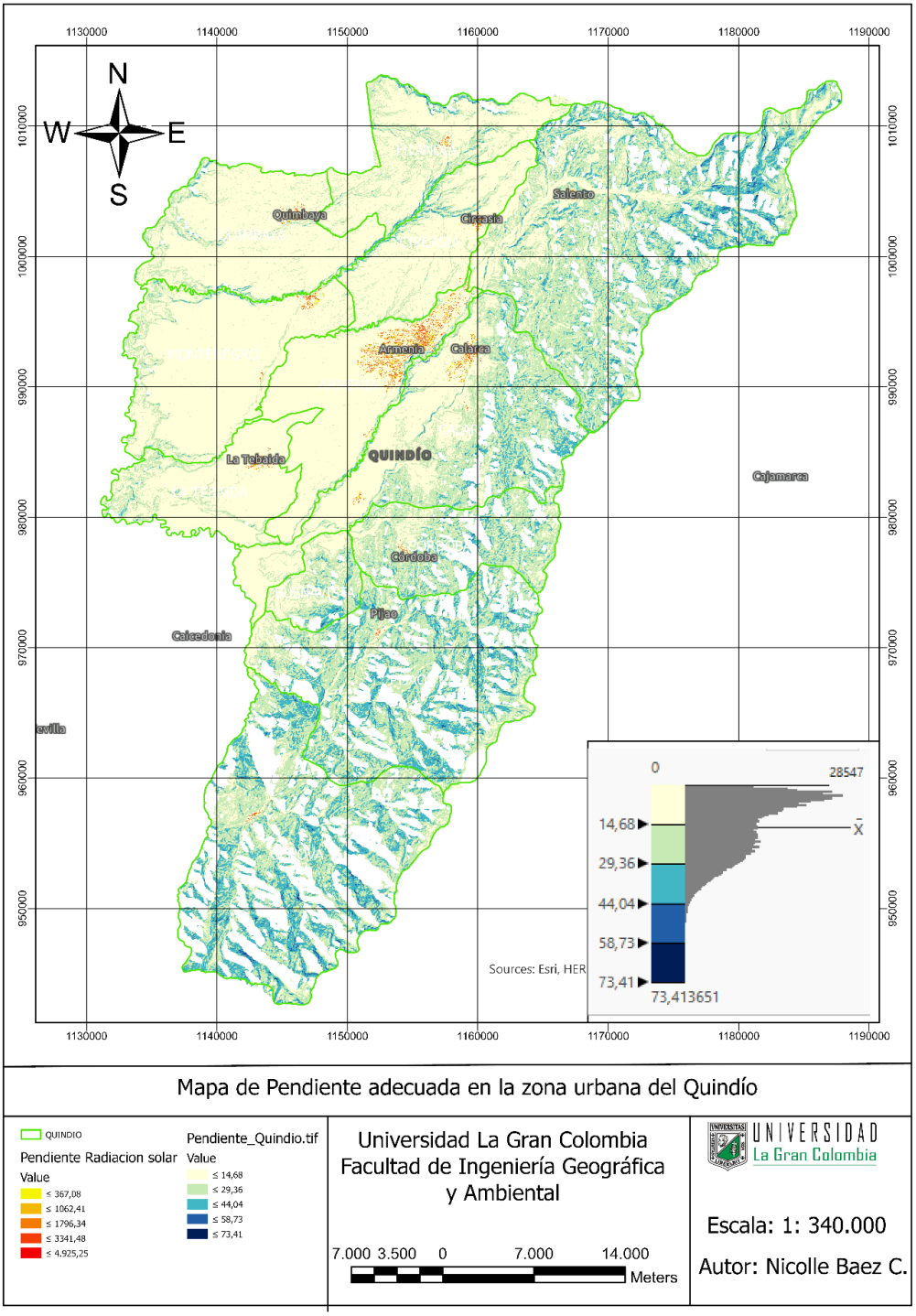


Figura 22. Mapa de Pendiente adecuada en la zona urbana del Quindío.
Fuente: Autores (2023).

Como se puede observar en la figura 22, se tiene a las edificaciones de la pendiente de radiación solar con las áreas que, si se encuentran en el rango de menor o igual a 45 grados, adicionalmente se muestra la pendiente de todo el terreno del Quindío donde se hace notar que es una región montañosa gracias a la presencia de la cordillera central de los Andes alcanzando una valor máximo de inclinación 73,41 grados, adicional a esto se muestra una gráfica en donde se indica la relación entre las edificaciones con respecto al valor de la pendiente, la cual demuestra que la mayoría de las construcciones van de 0 a 32,82 grados es decir, la mayoría de la zona urbana de los municipios.

Una vez se eliminaron las áreas con pendientes muy pronunciadas, posteriormente se eliminan las superficies que no deben estar orientadas al hemisferio norte debido a que estas tienden a recibir menor radiación que las que están orientadas en otras direcciones.

De igual manera de acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España la orientación de los paneles solares también afecta a la eficiencia de los mismos. Si los paneles están mal orientados, pueden generar sombras entre ellos, lo que reduce su eficiencia y capacidad de generación de energía.

Al tener calidad con lo anterior se obtuvo como resultado que las pendientes que están orientadas al norte presentan un valor inferior a 22,5 grados o mayor que 337,5 grados, es decir que las áreas que estén orientadas en estos valores se eliminaron ya que no cuentan con la orientación apta.

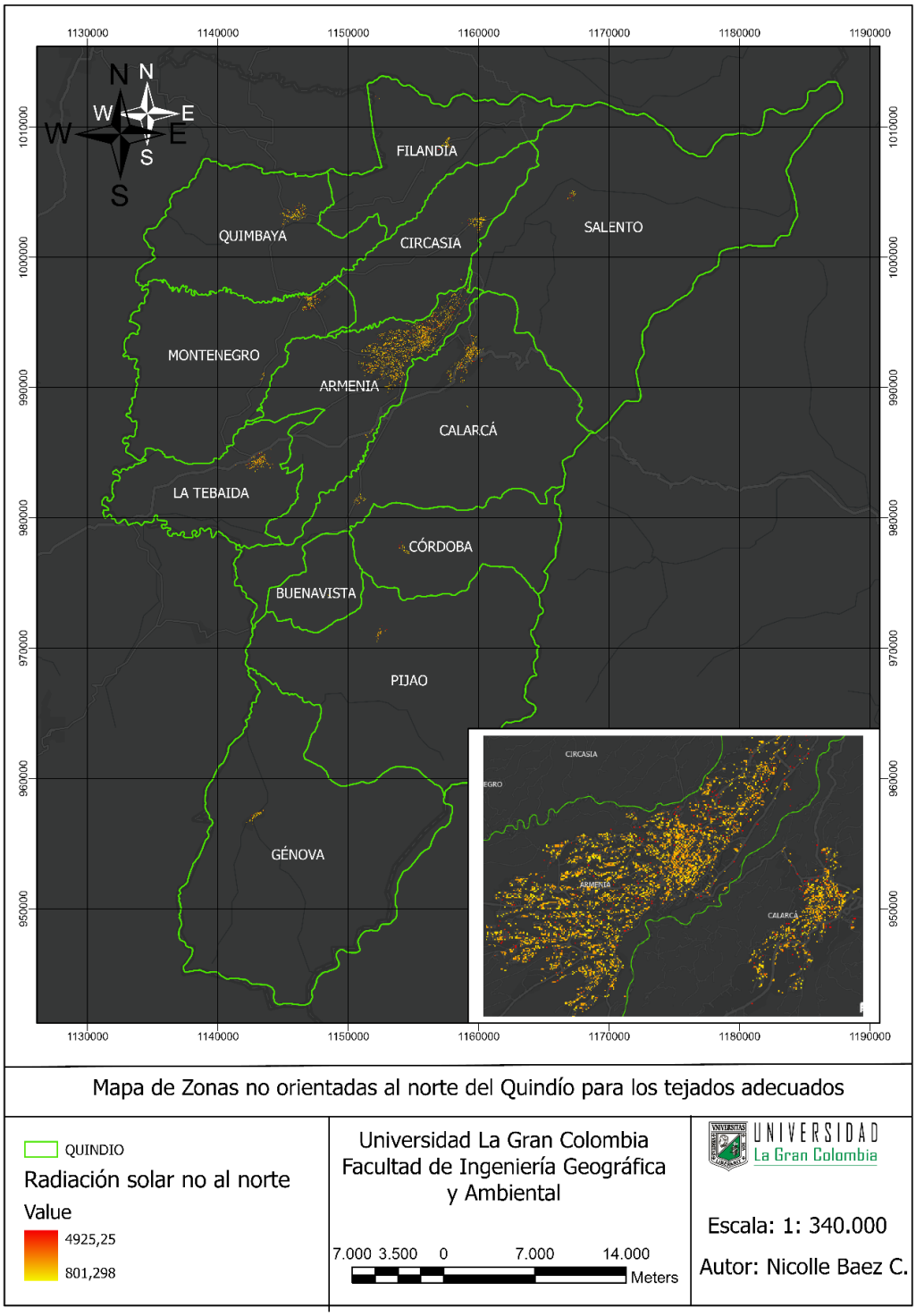


Figura 23. Mapa de Zonas no orientadas al norte del Quindío para los tejados adecuados.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 23 se puede observar como cambiaron los valores de la radiación, aplicando lo criterios que se explicaron anteriormente y en la metodología, eliminado así las edificaciones

en las cuales la pendiente supera los 45 grados y las áreas que estaban orientadas al norte, dejando así las construcciones que cumplen con la metodología planteada, como se evidencia en el mapa estas zonas van con una radiación de 801,298 Kwh/m^2 como valor mínimo en color amarillo, hasta 4925, 25 Kwh/m^2 en rojo, en el que se deja ver que la mayoría de las construcciones cumplieron los parámetros establecidos.

11.3 Estimación de potencial energético en edificaciones

Como resultado final se obtuvo potencial de energía por vivienda, el cual se consiguió a partir de aplicar la fórmula de área por la radiación solar media, divida por 1000 ya que las cifras son demasiados grandes se hace la conversión de kilovatios-hora a megavatios-hora y a partir de esta se obtuvo la radiación aprovechable en unidades de Megavatio hora (MWh), acto seguido, se calculó la energía a partir del potencial energético para todo el año 2022 de las viviendas aptas.

En la figura 23 se observa el potencial de producción de energía eléctrica, en el año 2.022 en las edificaciones del Quindío, se puede observar la variabilidad de potencial energético en las diferentes infraestructuras en toda la zona, como dato adicional se destaca la totalidad de edificaciones que resultaron aptas, el cual fue de 10.263 viviendas las cuales cumplieron con los criterios adecuados para la generación de energía a partir de los paneles solares fotovoltaicos, los valores que obtuvieron mayor potencial energético presenta valores de 1510,16 MWh a 3951,77 MWh, las construcciones que se encuentran en este rango son aquellas en la cual las cubiertas presentaban un área grande y están representadas en color rojo, y las de menor potencial presenta un valor de 74,72 MWh y están en tono amarillo como se puede ver en la figura 23.

De la figura de la 24 a la 33 se muestra un conjunto de imágenes las cuales corresponden a las edificaciones de cada municipio desde una perspectiva mucho más cerca para mayor comprensión de los resultados, sin olvidar que son los mismos resultados del mapa de potencial de energía en el Quindío. Por último, resaltar que el municipio de Armenia cuenta el mayor número de cubiertas donde alcanza el potencial de 3951 Kwh/m^2, otros municipios que también alcanzaron estos valores son: Calarcá, Circasia, La Tebaida y Quimbaya.

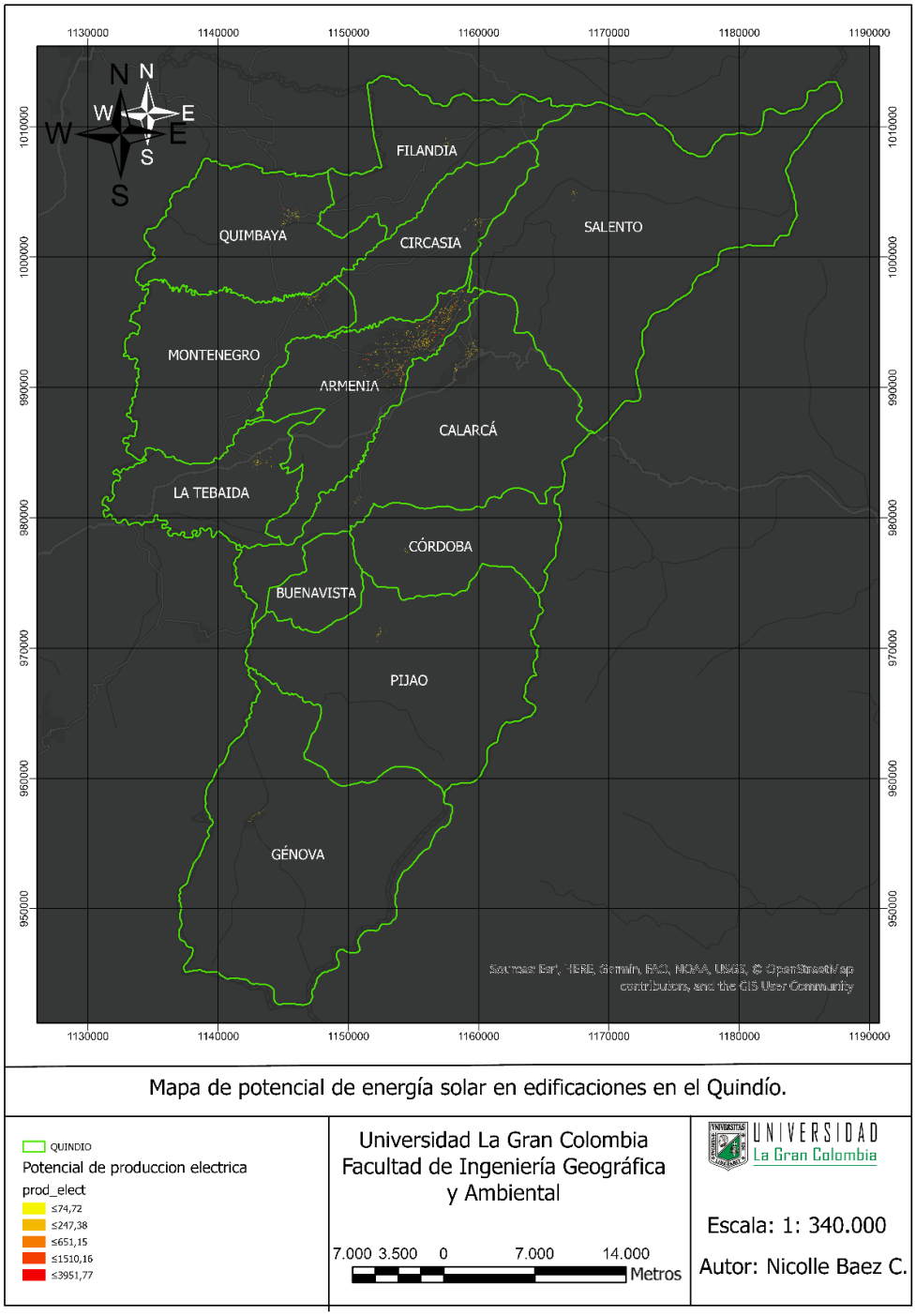


Figura 24. Mapa de potencial de energía solar en edificaciones en el Quindío.
Fuente: Autores (2023).

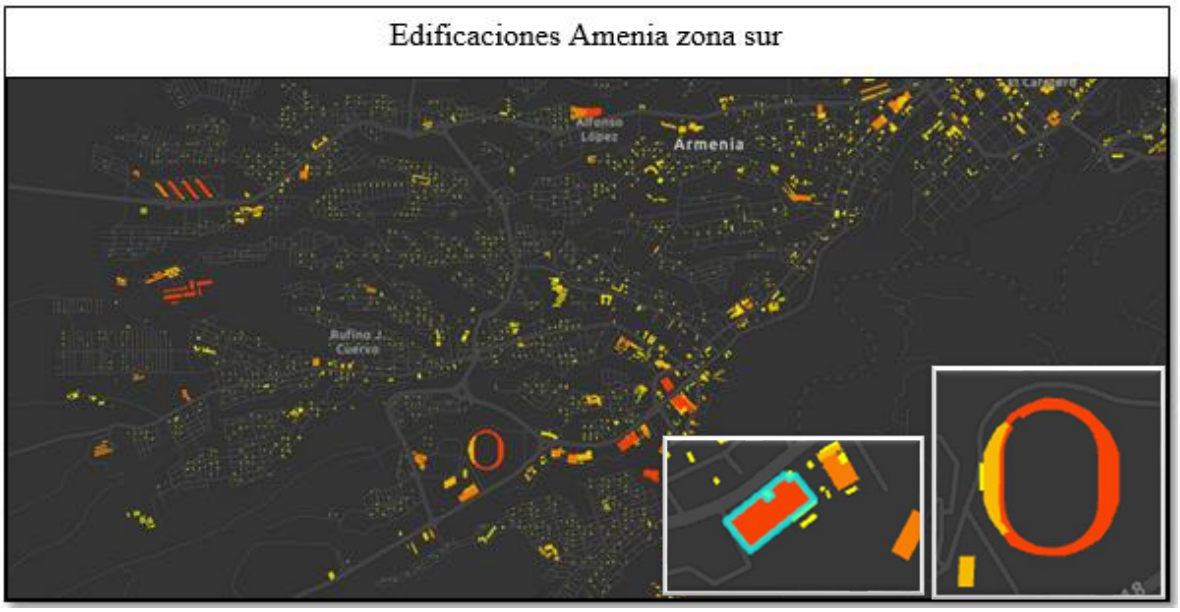


Figura 25. Edificaciones de Armenia zona sur.
Fuente: Autores (2023).

En Armenia en la zona norte, se puede observar que las mayores edificaciones las cuales reciben mayor potencial energético, son las que cuentan con un área grande, una de ellas es el estadio el cual por su área de 2953,42 m^2, así mismo edificaciones con área de 5266,22 m2 como señala la figura 25, de la misma manera las edificaciones con el área cerca a las que mencione anteriormente son las que logran un mayor potencial energético, el cual está entre 1510,16 kWh/m2 y 3951,77 kWh/m^2 de acuerdo a la metodología usada.

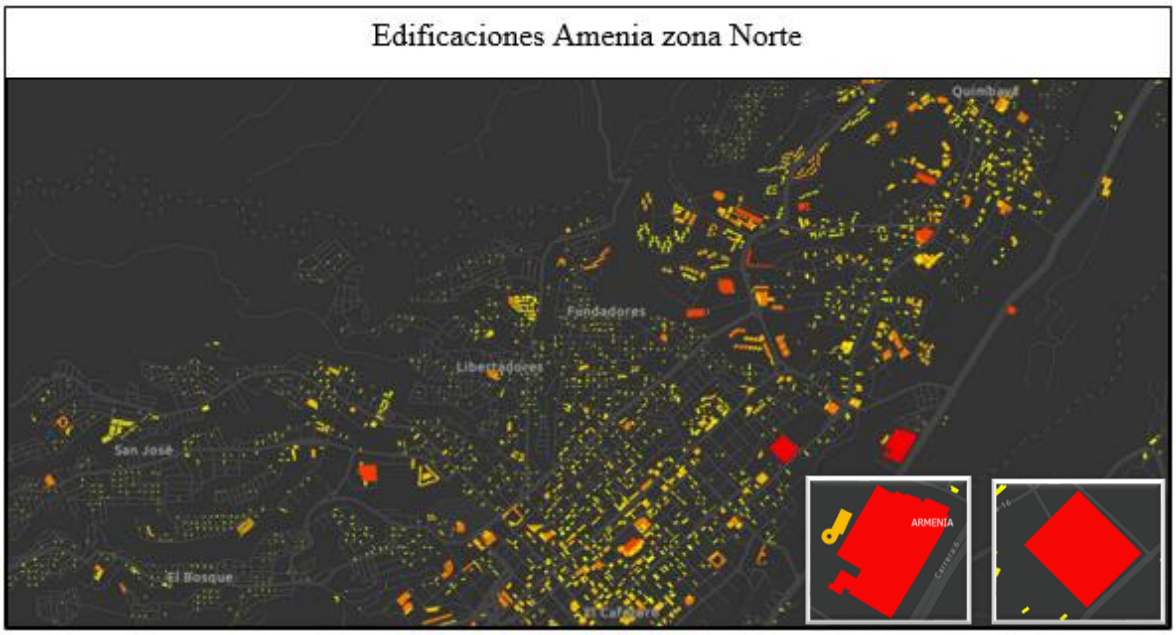


Figura 26. Edificaciones de Armenia zona norte.
Fuente: Autores (2023).

En la zona norte del municipio también se puede observar las construcciones con mayor potencial energético, en las que se destacan las de mayor tamaño en el caso de las edificaciones señaladas en la figura 26, la primera que corresponde a un centro comercial con un área 15027 m^2 y el segundo cuadro corresponde el centro comercial Unicentro con un área de 100008 m^2, recibiendo un potencial energético muy favorable con valores de 3951,77 kWh/m^2, por otro lado la mayoría de las construcciones de armenia presentan un potencial bajo de 74,72 kWh/m^2.

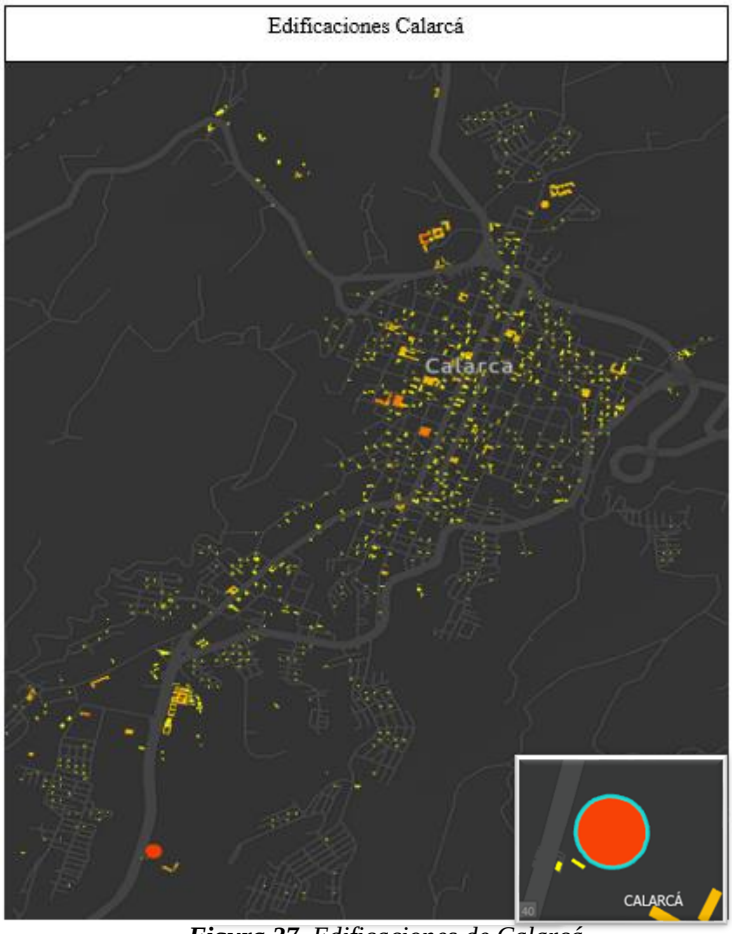


Figura 27. *Edificaciones de Calarcá.*
Fuente: Autores (2023).

El potencial energético de Calarcá es bajo con valores de 74,72 kWh/m^2 en la mayoría de las edificaciones están en este rango y se distinguen por el color amarillo, la edificación que se señala es la que genera un potencial mayor el cual corresponde al jardín botánico del Quindío con una radiación de 1510,16 kWh/m2 y un área de 3772 m^2.

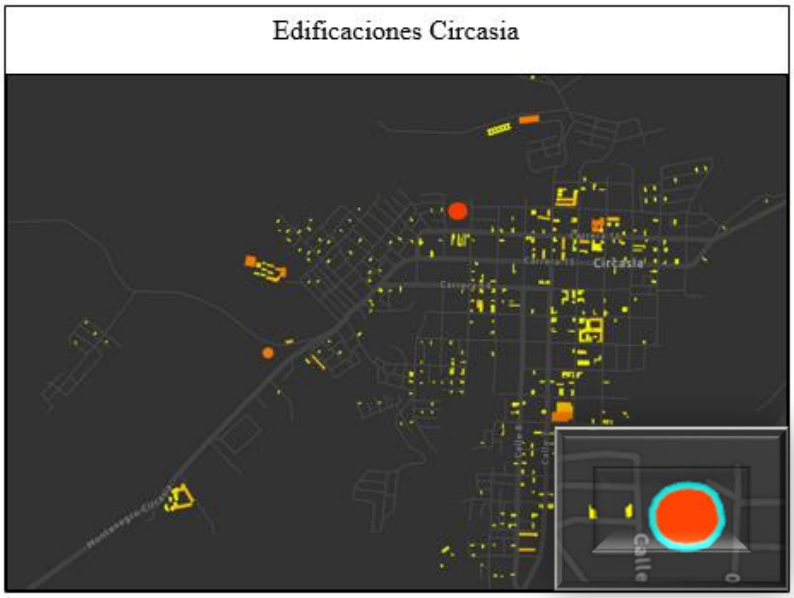


Figura 28. Edificaciones de Circasia.
Fuente: Autores (2023).

El caso del municipio de Circasia es similar al de Calarcá, presenta poco potencial energético, la mayoría de las edificaciones presentan potencial de 74,72 kWh/m^2, donde la mayoría de las edificaciones, presentan un área de 240 m^2 en promedio, la edificación que se resalta el cual corresponde al coliseo; es la de mayor potencial con un área de 2443 m^2, para un potencial de 1510,16 kWh/$m^{2.}$

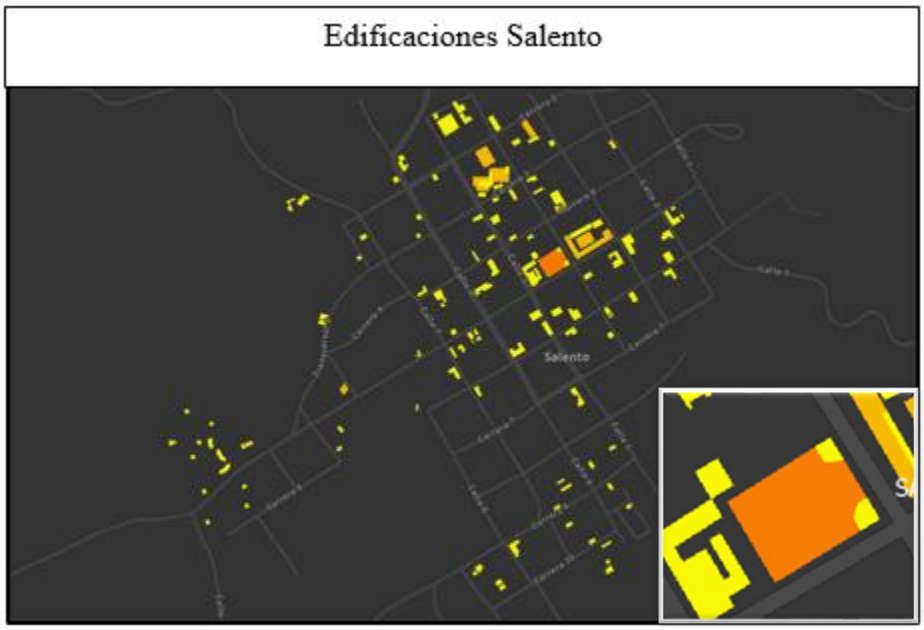


Figura 299. Edificaciones de Salento.
Fuente: Autores (2023).

El potencial que alcanza la mayoría de las construcciones en Salento es bajo, puesto que están en color amarillo con el valor más mínimo de potencial energético, gran parte de esto se debe a las construcciones con un área tan pequeña, lo cual no aporta lo suficiente a la metodología aplicada, aun así, se resalta una construcción que presenta potencial energético medio con 651,15 kWh/m^2, y un área respectivamente de 1261 $m^{2.}$

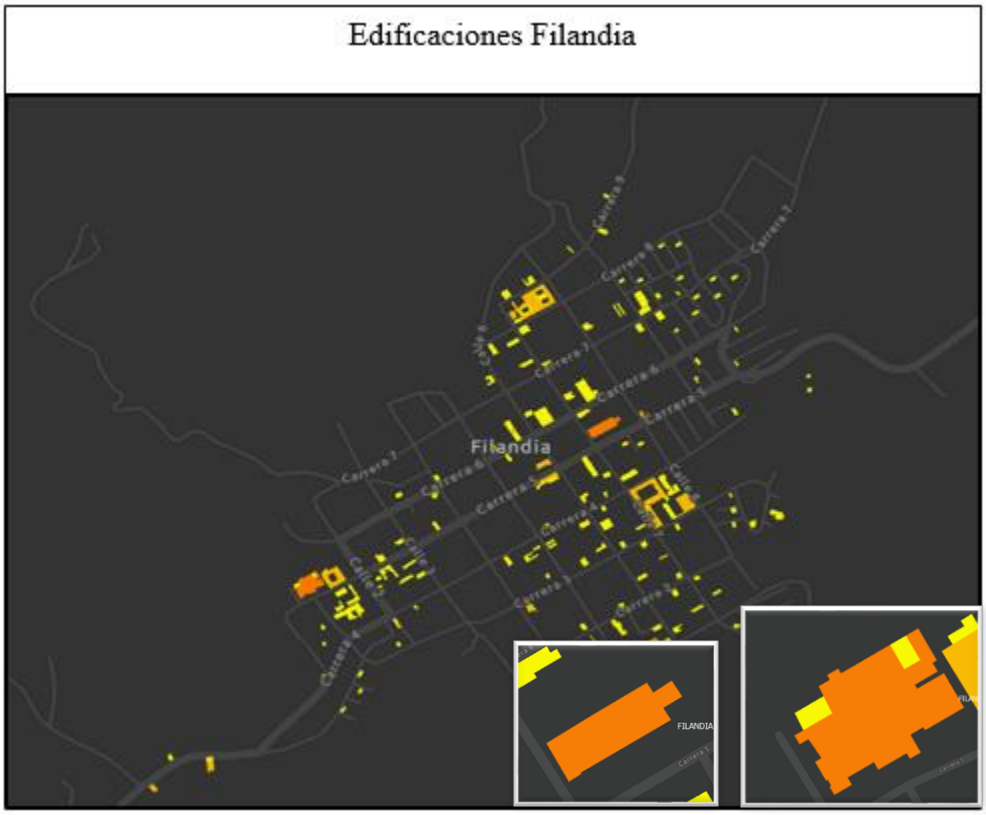


Figura 30. Edificaciones de Filandia.
Fuente: Autores (2023).

En el municipio de Finlandia, se observo que el potencial energético presente es medio y bajo, con una propensión más abajo, aun así, las edificaciones que llegan a tener un potencial medio de 651,15 kWh/m^2 se resaltaron, y se tuvo en cuenta sus respectivas áreas, la primera dispone un área de 950 m^2 y la segunda de 1259 $m^{2.}$

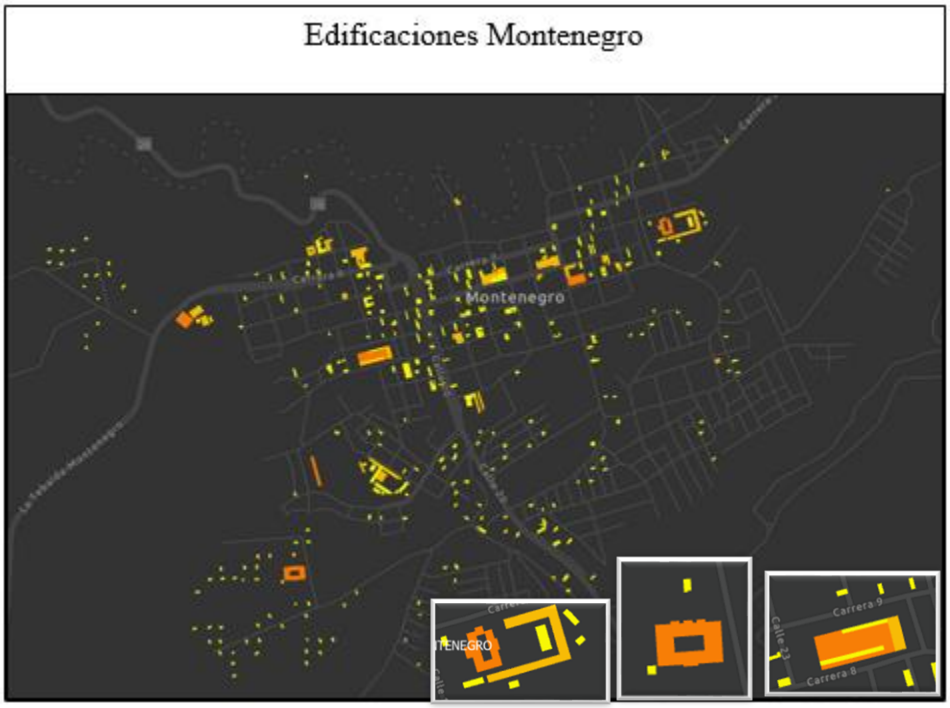


Figura 31. Edificaciones de Montenegro.
Fuente: Autores (2023).

Continuando con Montenegro, presenta un potencial similar al de Salento y Filandia, donde la mayoría de las edificaciones son de potencial bajo y algunas edificaciones con potencial medio, sin un resultado de potencial alto, las edificaciones que presentan em mayor potencial corresponden a colegios, plaza de mercados y el estadio de Montenegro, con áreas que superan los 1000m^2.

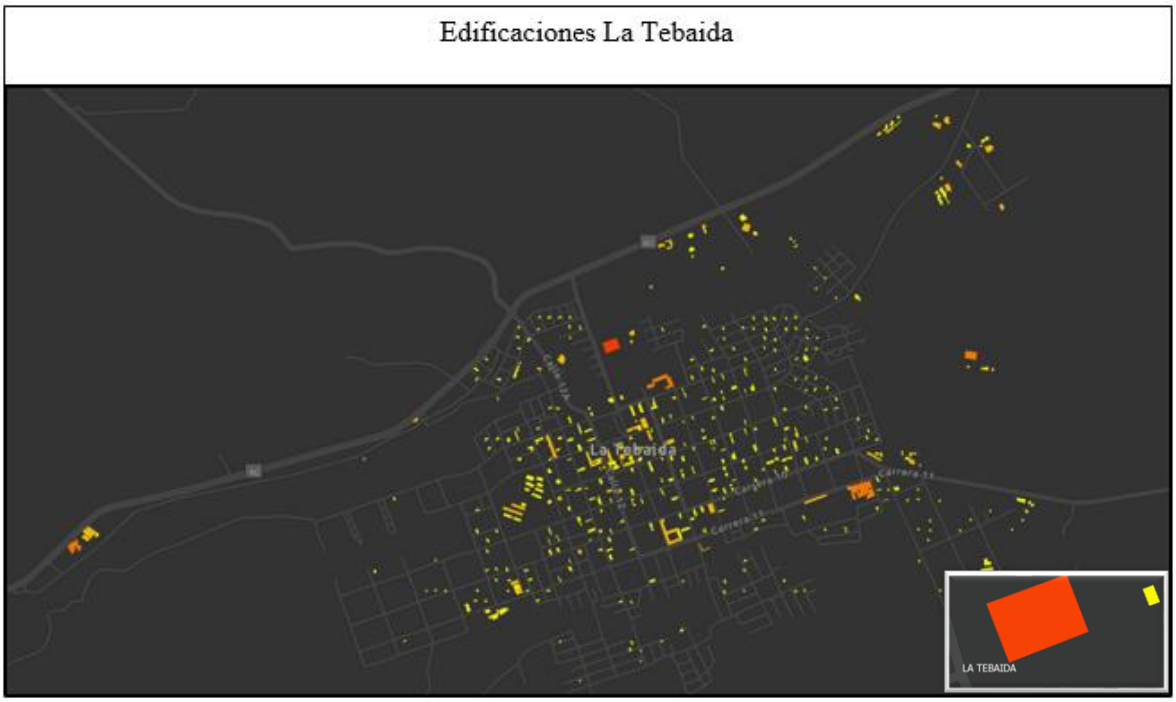


Figura 322. Edificaciones de La Tebaida.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de la Tebaida cuenta con zonas de potencial bajo, potencial medio y una edificación con potencial alto, la cual se resalta, esta corresponde al coliseo municipal con un área de 1493 m^2, las construcciones medio altas corresponden al hospital y un colegio de la Tebaida.

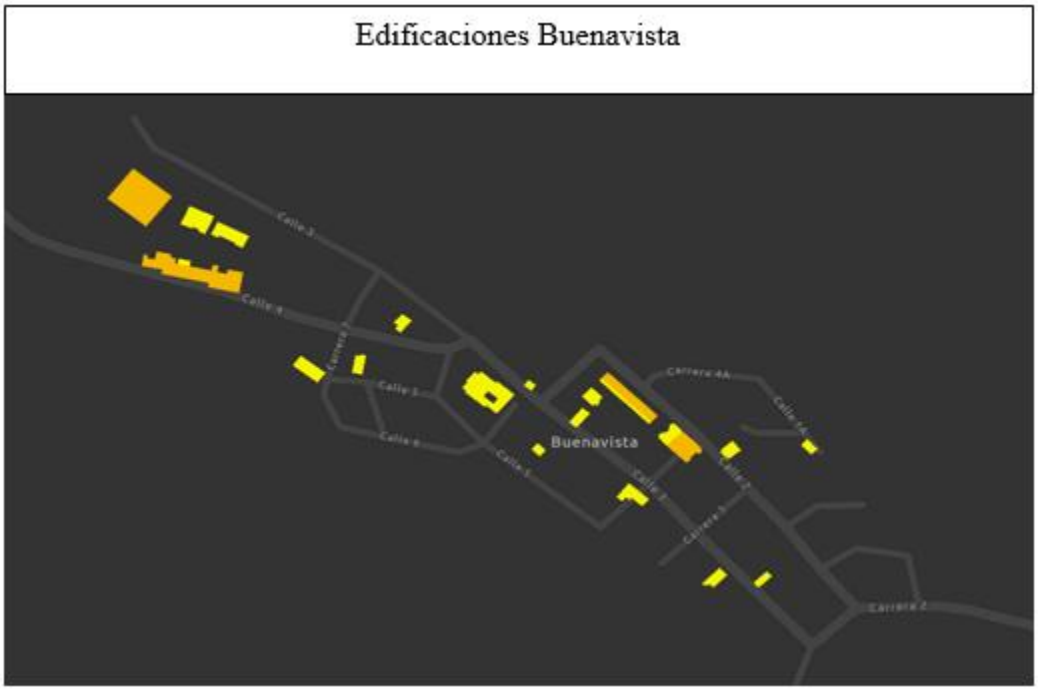


Figura 33. Edificaciones de Buenavista.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de Buenavista, es uno de los menos favorecidos por la metodología, debido que es un pueblo pequeño con una población más reducida a los demás municipios, por ende, las construcciones no son de gran tamaño y el potencial energético alcanzado es bajo y medio-bajo, con valores que van desde 74,72 kWh/m^2 hasta 247,38 kWh/m^2, la edificación con mayor potencial tiene un área de 800 m^2.

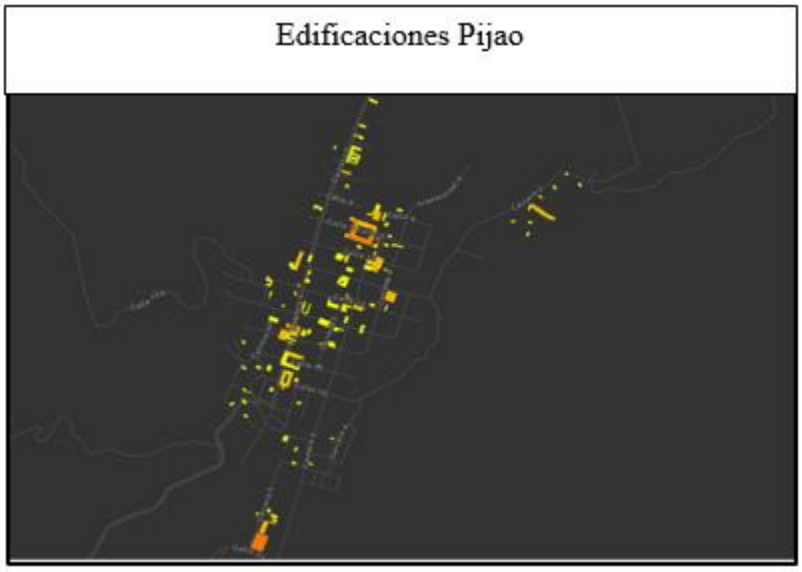


Figura 34. Edificaciones de Pijao.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de Pijao, es un caso similar al de Buenavista, con zona urbana corta, con potencial energético bajo y medio bajo, las infraestructuras con el potencial medio corresponden a instituciones educativas y el coliseo cubierto de Pijao, con un área de 790 m^2 y 860 m^2 respectivamente.

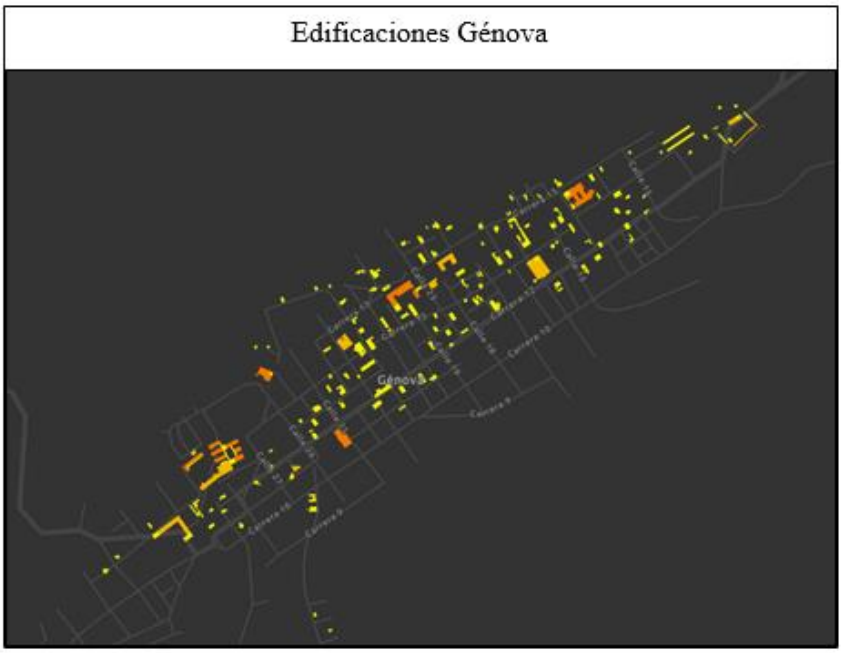


Figura 35. Edificaciones de Génova.
Fuente: Autores (2023).

El municipio de Génova presenta varias infraestructuras con un potencial energético medio de 651,15 kWh/m^2, la mayoría de etas infraestructuras corresponden al Hospital y las instituciones educativas, pese a que en la mayoría de las edificaciones es un potencial bajo (amarillo).

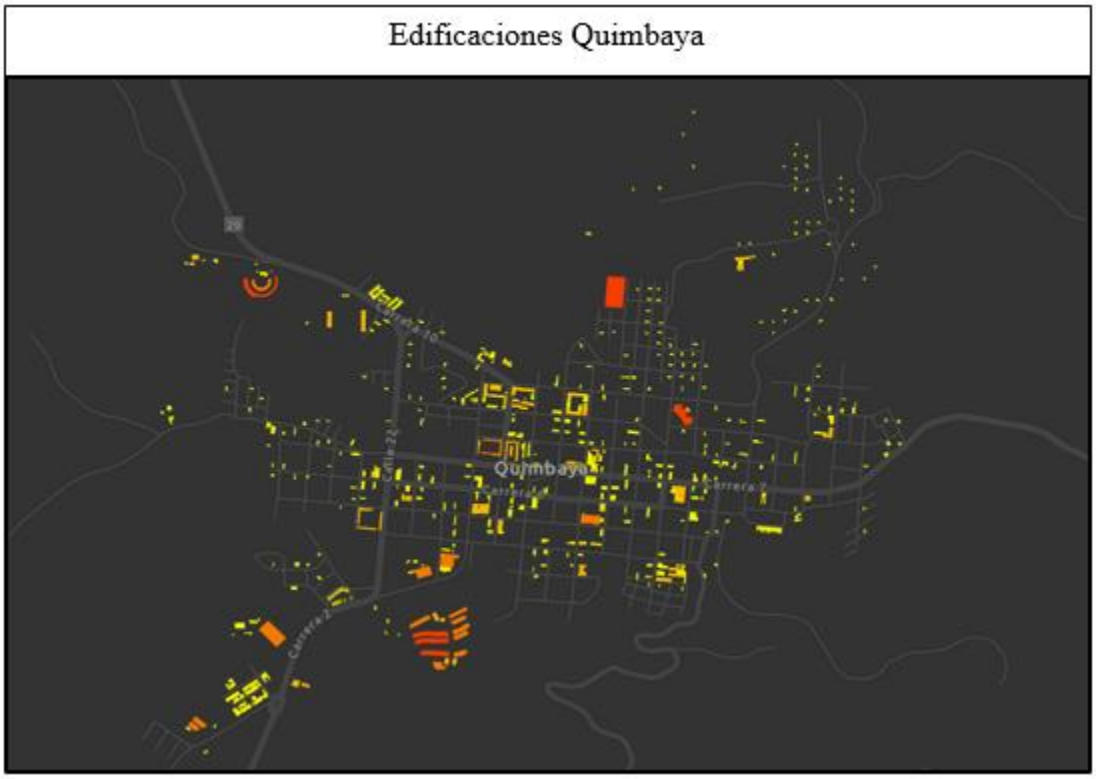


Figura 36. Edificaciones de Quimbaya.
Fuente: Autores (2023).

En la figura 36 se puede observar que el municipio de Quimbaya cuenta con varias infraestructuras con un a potencial energético alto es decir mayor o igual a 1510,16 kWh/m^2, varias construcciones son urbanizaciones, centro deportivo, el instituyo Quimbaya, y el museo, el resto del municipio presenta potencial bajo.

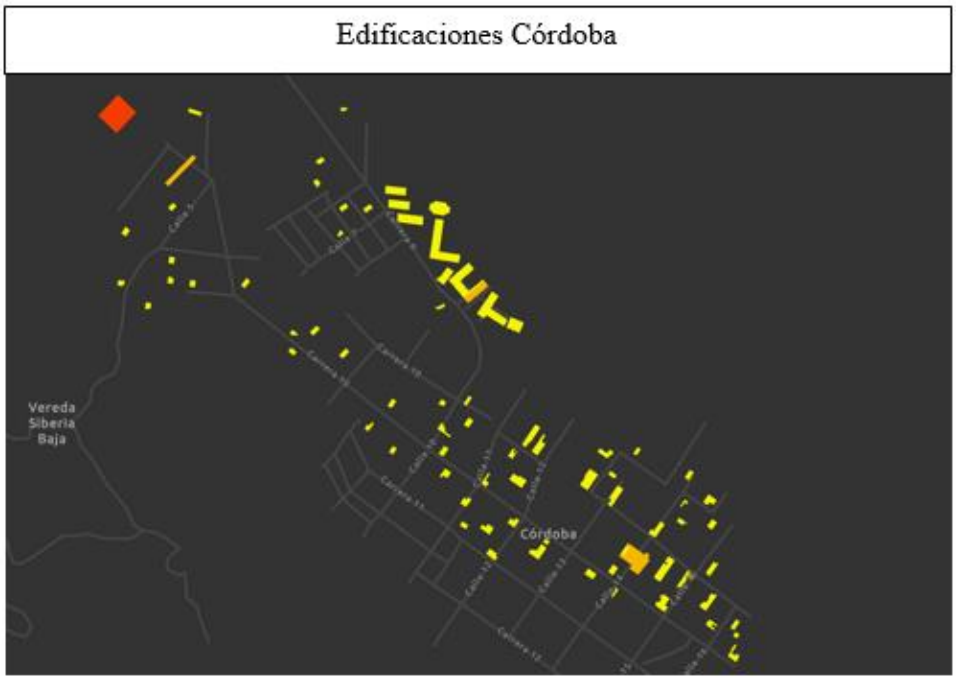


Figura 377. Edificaciones de Córdoba.
Fuente: Autores (2023).

En el municipio de Córdoba se puede observar como la mayoría de la zona urbana, se encuentra con potencial bajo a excepción de una edificación la cual corresponde a una urbanización con un área 1458 m^2 y las demás edificaciones se mantiene con un potencial bajo debido al tamaño de las cubiertas.

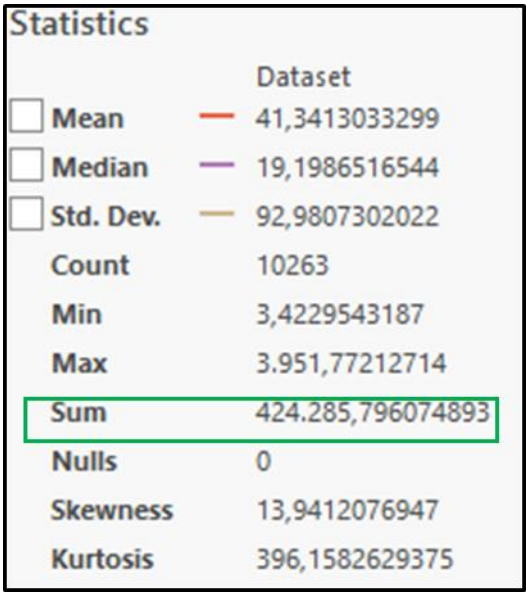


Figura 388. Datos relevantes.
Fuente: Autores (2023).

Por último, se puede observar la figura 38 donde se muestra una gráfica la cual indica el valor medio que fue 41,34 Kwh/m^2 de la producción de energía de las edificaciones adecuadas, a su vez la sumatoria de las presentes viviendas es de 424.285,80 Megavatios-hora MWh, Según el último informe disponible del Ministerio de Minas y Energía de Colombia, correspondiente al año 2020, el departamento del Quindío consumió un total de 766,707 MWh (megavatios hora) de electricidad durante ese año.

De acuerdo con lo anterior hay que tener en cuenta varios factores, ya que estos valores pueden variar de acuerdo a variables como, el consumo de energía en distintas épocas del año y las fluctuaciones diarias de la radiación solar, la capacidad económica, el crecimiento demográfico y el consumo acorde a este.

Así mismo este potencial energético se puede ver afectado por factores geográficos, lo cual es el caso de la presente investigación como la orientación, el modelo de cuenca visual y la inclinación, son factores que no favorecieron a muchas viviendas, por otro lado, se ve afectada por la disponibilidad de espacio, donde el área de las cubiertas que para la metodología usada de Khanna. D (s, f) tiene que superar los 30 metros cuadrados.

Finalmente, en la figura 38 se obtuvo como resultado las zonas con mayor densidad energética, es decir, con mayor producción de energía de los municipios, donde se muestra en que zonas tiene mayor densidad y potencial de energía en las viviendas, de la misma manera en que esta influye en la instalación de los paneles solare fotovoltaicos, donde las zonas amarillas corresponden a las zonas donde se concentra mayor potencial de energía a partir de la radiación solar adecuada y las edificaciones para los paneles solares, y las zonas con color morado, son las zonas con menor concentración de potencial energético.

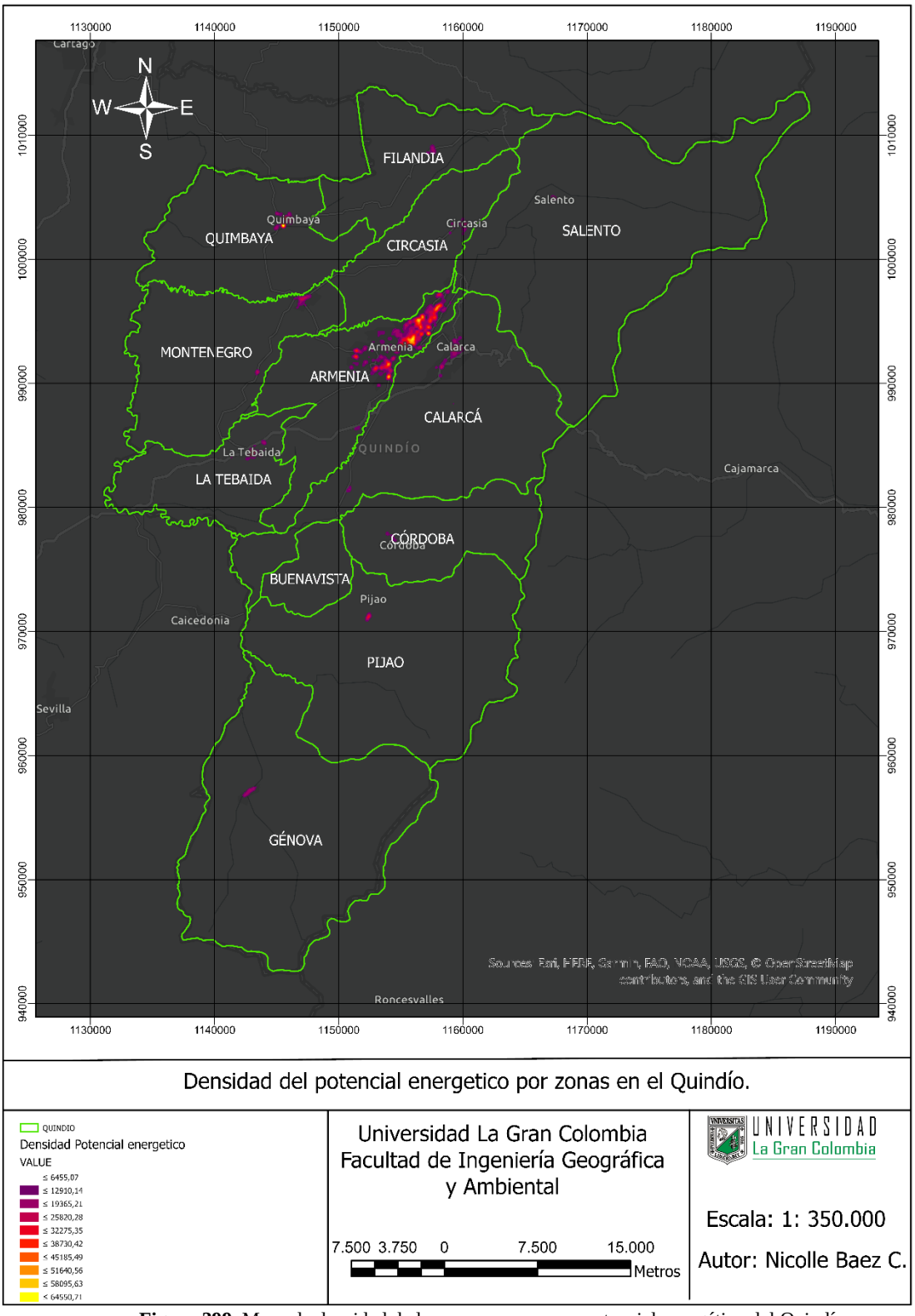


Figura 399. Mapa de densidad de las zonas con mayor potencial energético del Quindío.
Fuente: Autores (2023).

11. Conclusiones

La metodología de Delphine Khanna, Learn ArcGIS de ESRI, la cual permitió obtener cada uno de los procesos para llegar a los resultados obtenidos y realizar un análisis del potencial que se llega a generar en el departamento del Quindío y cuáles fueron los municipios que obtienen un mayor beneficio de acuerdo a los criterios mencionados en la investigación. Cada uno de los resultados se pueden observar en cada municipio con sus respectivos valores a nivel residencial. Las variables que se abordaron fueron la radiación solar de las edificaciones, la pendiente de las zonas adecuadas, la orientación no al norte para tejados adecuados y el potencial de energía solar en el Departamento del Quindío.

En primer lugar, se determinó que la radiación solar por áreas por m^2 de toda la zona urbana del departamento del Quindío, los municipios que obtiene una mayor radiación son: Córdoba, Génova, La Tebaida, Montenegro y Pijao, recibe una radiación optima y favorable la cual se destaca más que en los demás municipios; que incluso puede llegar a superar el valor mínimo para la implementación de paneles solares, dejando un marco de posibilidades para el uso de este tipo de energía alternativa.

En cuanto a las características optimas se estableció por una parte a: la pendiente en las cubiertas adecuadas, todas las viviendas están con valores menores a los establecidos(45 grados centígrados), lo cual indica que con respecto a la inclinación la mayoría de las cubiertas tienen una inclinación prácticamente plana, lo que las convierte en que sean independientes para la orientación de los paneles solares, y las que no, aun así presentan una inclinación menor a la establecida, indicando que están con una ubicación de poca pendiente, la cual demuestra que la mayoría de las construcciones van de 0 a 32,82 grados es decir, la

mayoría de la zona urbana de los municipios, en una región donde la mayoría de la topografía es zona montañosa, superando estos desafíos.

La segunda característica que se estableció fue la orientación de las cubiertas que estaban hacia el norte, fueron eliminadas ya que reciben menos luz solar directa al estar ubicadas en el hemisferio norte, así mismo factores geográficos como el modelo de cuenca visual que en otras palabras es la cantidad de cielo expuesto que se puede ver interceptado con componentes atmosféricos como nubes y polvo, también factores climáticos que varían dependiendo de la temporada del año, la ubicación geográfica de las edificaciones y la topografía, no favorecieron a una parte de las viviendas en los municipios del Quindío.

Por último, en cuanto al potencial energético de la zona de estudio se determina valores altos en las viviendas que clasificaron como aptas de acuerdo a los criterios explicados anteriormente; los municipios que presentan mayor potencial de energía son: Armenia, Quimbaya y algunas zonas de Calarcá, circasia y La tebaida, aun así la relación de las áreas de la cubierta con la productividad de energía y radiación no obtiene una respuesta positiva en su totalidad para las viviendas en todo el departamento.

Como conclusión general y final, la metodología usada no es viable, para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, puesto que gran parte de esta se basa en el área de las cubiertas y de este depende el potencial de energía que se puede generar; sin embargo si en un porcentaje notorio lo cual es una estimación confortable para el departamento del Quindío, usando una metodología donde el uso de eficiencia sea diferente y no depende directamente de la cubierta.

12. Recomendaciones

Respecto a la relación que se dio entre el tamaño de las cubiertas y el potencial de energía solar con la metodología utilizada en la presente investigación, se recomienda analizar el tipo de coberturas para lograr una mayor captación de la incidencia de la radiación solar a su vez contar con diferentes alternativas de diseños de paneles solares de uso residencial. Con la estimación de la productividad eléctrica del Departamento se pueden generar otras propuestas para un mayor aprovechamiento de este recurso solar con los departamentos vecinos.

De los 12 municipios del Quindío se evidencio como se tenían valores más altos en algunos municipios como Quimbaya, Montenegro, Circasia y Armenia; en los municipios donde es menor el potencial se propone investigar otro tipo de metodología el cual beneficie mejor a los municipios para el aprovechamiento del recurso.

Obtener mayor accesibilidad publica de los datos con fines investigativos para Poder generar a una escala nacional este tipo de investigación para uso residencial de las comunidades, con el fin de dar pie al provecho del recurso solar y generación de energía analizando los factores positivas y negativas en todo el territorio colombiano a nivel de uso residencial.

13. Impactos

- **Impacto social:** la implementación de la energía solar fotovoltaica trae consigo varios beneficios al redor de todas las comunidades, generando accesibilidad a la energía y más en aquellas zonas interconectadas o remotas donde se puede mejorar la calidad de vida de las comunidades, ofreciendo servicios básicos como iluminación, conexión a dispositivos como el celular, televisor, entre otros. Por otra parte, se mitigan los gases de dióxido de carbono lo cual ayuda a crear una atmosfera más limpia y sana para el beneficio de los humanos.

- **Impacto económico:** el impacto económico se puede ver desde diferentes aspectos, por un lado, está la reducción de costos de energía, ya que, al estar produciendo energía desde una fuente renovable y gratuita, a largo plazo resulta muy rentable y más económico. También está la generación de empleo en la industria de instalación, comercialización, implementación y mantenimiento de los paneles solares fotovoltaicos y equipos. Por otra parte, se debe considerar los costos de inversión en la instalación de plantas solares, la inversión inicial puede parecer costosa, sin embrago a largo plazo es rentable, lo cual significa que ayuda a estimular la economía de acuerdo a la demanda energética y por último trae beneficios para las personas de bajos ingresos, siendo una energía asequible y reduciendo la pobreza.

- **Impacto ambiental:** por una parte está la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y a su vez mitigar el efecto de cambio climático el cual es de suma importancia, esta energía al ser una fuente limpia y renovable proveniente de un recurso infinito como

el sol es una alternativa amigable con el medio ambiente pero por otra parte en el proceso de fabricación de celdas, paneles e infraestructura existe un desgaste y contaminación de ciertos recursos naturales, por ende el medio natural, aun así no se compara con los impactos generados con las energías tradicionales.

14. Referencias bibliográficas

Acosta Betancourt, S. (2016). Evaluación económica de la implementación de sistemas de energía fotovoltaica (energía solar) en el mercado energético colombiano» Bachelor's thesis, Uniandes.

Acosta, S. (2016). Energías Renovables: Un futuro óptimo para Colombia Espitia Adler, F., Berardi, M., García Pedrosa, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (2013). Energía solar fotovoltaica. Notas del curso instalaciones industriales Universidad nacional de mar de plata.

Agencia Nacional de Tierras de Colombia (2017). Potencial de generación de energía eléctrica a partir de fuentes solares en Colombia.

Alberdi, N., & Artigas, N. (2010). Viabilidad del uso de la energía solar en Uruguay.

B. van Campen, D. Guidi y G. Best. Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles

Calvo, F. (2019). Análisis de viabilidad para la implementación de sistemas de generación eléctrica usando energía solar para uso residencial (Doctoral dissertation, Tesis de pregrado). Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia) República de Colombia, Bogotá.

Castro & Mokate. (2003). Evaluación Económica de la Implementación de Sistemas de Energía Fotovoltaica (Energía Solar) en el Mercado Energético Colombiano.

Celemín Cuellar, M. A. (2017). Estudio para la implementación de un sistema fotovoltaico como alternativa rural sostenible de la vereda San Roque en el municipio de Ortega-Tolima.

Mejía García, Y. K. (2021). Estimación del potencial de generación de energía solar en el norte del Caribe Colombiano.

Martínez, J. A. A., Morales, W. P., & Rincón, L. A. M. Evaluación del potencial energético, solar fotovoltaico de las cubiertas de los edificios de la sede principal de la universidad cooperativa de Colombia, sede Villavicencio

National Renewable Energy Laboratorio. (s.f.). Solar Energy Basics

Ocaciones Monroy, A. M. Georreferenciación de zonas de mayor potencial solar para la generación de energía fotovoltaica en la región central RAP-E.

Santillán Tituaña, A. (2016). Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos.

Serrano Reyes, A. F., & Zarate Torres, E. N. (2016). Estudio De La Prospectiva Y Viabilidad De Las Energías Renovables Eólica Y Solar En Colombia A 2050 Por Medio Del Software Leap.

Rahimi Mirazizi, H. y Agha Shafiyi, M. (2018). Evaluación de los requisitos técnicos para lograr el máximo punto de potencia en el inversor de fuente z con alimentación fotovoltaica. Revista Internacional de Ingeniería, 31(6), 921-931.

Ramírez, E. B. R., Siabato, A. I. B., & Orduz, M. G. (2017). Analisis tecnico, socioeconomico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare, Colombia. RIAA, 8(1), 239-248.

República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.

Rey, C. M. (2017). Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia.

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). (2014). Atlas Solarimétrico de Colombia.

Simón Cortés. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. República de Colombia, Bogotá.

Vazquez, M. (2022). Energia solar en Colombia. ICEX (España, Exportacion e inversion)