

DISEÑO DE SISTEMA DE ILUMINACIÓN AUTÓNOMO PARA ALUMBRADO PÚBLICO.

Diseño de iluminación solar fotovoltaica de alumbrado público para el tramo Agustín Codazzi –  
Serranía del Perijá

Aldair Alejandro Vega Daza y Mario José Mendoza Novoa  
Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia  
MBA. Ingeniero Electricista

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga  
PhD. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Ingeniería Eléctrica  
Bucaramanga, Santander  
2025

### **Dedicatoria**

A Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y guía en cada paso de mi vida.

A mis padres, por su amor incondicional, esfuerzo y apoyo constante, pilares fundamentales en este logro.

A mi hermana, por su compañía, motivación y fe en mí, incluso en los momentos más difíciles.

A mis amigos más cercanos, por su comprensión, ánimo y por compartir conmigo este camino con alegría y esperanza.

Esto es para ustedes, con profundo agradecimiento y cariño.

**Aldair Alejandro Vega Daza**

### **Dedicatoria**

A Dios, por permitirme llegar hasta aquí.

A todas las personas que me acompañaron en esta etapa significativa.

En especial, a mi madre Gloria Elena Novoa, por su apoyo constante e incondicional; a mi abuela Josefa Isabel Yáñez, Rafael Novoa, Jaime Novoa por su respaldo y confianza.

A mis hermanos, Daisy Rodríguez y Wilson Rodríguez por su cariño y aliento.

Y a mis amigos, que estuvieron presentes y contribuyeron para este sueño universitario.

**Mario José Mendoza Novoa**

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, primeramente, por brindarme salud, fortaleza y mucha sabiduría para alcanzar este logro. A mis padres Sonia Daza y Alejandro Vega, quienes han sido mi motor y apoyo incondicional durante toda mi formación. Gracias a mi familia y amigos por sus palabras de aliento y motivación constante en todo este recorrido.

A mi director de tesis, Rolando Andrés Rincón Saravia, por su guía, paciencia y compromiso para el desarrollo de este proyecto. Su conocimiento y orientación fueron clave para superar los retos encontrados.

Finalmente, agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a todos los profesores que edificaron mi trayectoria, por impartirme las herramientas y conocimientos necesarios para mi formación como un excelente profesional.

¡Gracias de todo corazón!

**Aldair Alejandro Vega Daza**

### **Agradecimientos**

A la majestuosa y siempre bella Universidad Industrial de Santander, por brindarme el conocimiento y las herramientas necesarias para culminar este ciclo.

Al director, Rolando Rincón, por su apoyo y la valiosa guía que permitió que este documento se convirtiera en un gran trabajo.

A cada uno de los docentes que hicieron parte de mi formación, por su dedicación y aporte en este camino académico.

¡Infinitas gracias!

**Mario José Mendoza Novoa**

## Tabla de contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	13
1 Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 Marco Teórico.....	15
2.1 Alumbrado Publico .....	15
2.1.1 Ventajas del uso de sistemas autónomos fuera de la red eléctrica .....	15
2.2 Luminarias LED autónomas.....	15
2.2.1 Características y funcionamientos .....	15
2.2.2 Componentes principales.....	16
2.2.3 Beneficios de la integración en un solo dispositivo .....	17
2.3 Energía solar fotovoltaica.....	17
2.3.1 Factores que afectan la eficiencia de captación solar .....	17
2.3.2 Importancia de la autonomía energética en el alumbrado publico .....	18
2.4 Controladores de carga y gestión de energía.....	18
2.4.1 Regulación del flujo de energía en sistemas autónomos .....	18
2.4.2 Protección contra sobrecargas, descargas profundas y descargas atmosféricas. ....	18
2.5 Principios de conversión de energía solar fotovoltaica.....	19
2.5.1 Radiación solar y su conversión en electricidad.....	19
2.5.2 Radiación, irradiación e irradiancia .....	20
2.6 Tecnología LED y fotometría .....	20
2.6.1 Temperatura de color y eficiencia luminosa .....	20
2.6.2 Distribución lumínica en alumbrado publico .....	20
2.7 Impacto ambiental y sostenibilidad .....	21
2.7.1 Comparación de emisiones de CO2 entre sistemas solares y convencionales .....	21
2.7.2 Reducción de contaminación lumínica mediante control eficiente de luz .....	21
2.7.3 Contribución del alumbrado solar a los objetivos de desarrollo sostenible .....	21
3 Marco Legal.....	22
4 Metodología.....	22
4.1 Dimensionamiento del sistema .....	22
4.1.1 Caracterización de la zona .....	22
4.1.1.1 Ubicación de la zona .....	22
4.1.1.2 Descripción del tramo .....	23
4.1.1.3 Condiciones climatológicas .....	24

## DISEÑO DE SISTEMA DE ILUMINACIÓN AUTÓNOMO PARA ALUMBRADO PÚBLICO.

4.1.1.4	Potencial energético .....	26
4.1.1.5	Condiciones actuales de la zona .....	28
4.1.2	Diseño del sistema de iluminación de alumbrado público .....	28
4.1.2.1	Clasificación de la vía .....	28
4.1.2.2	Niveles de iluminación .....	29
4.1.2.3	Selección de luminarias .....	30
4.2	Propuesta de diseño .....	30
4.3	Análisis de diseño .....	31
4.3.1	Configuraciones geométricas y parámetros de diseño .....	31
4.3.2	Resultado de simulaciones DIALux .....	32
4.3.2.1	Simulación luminaria marca Ecolite modelo "SLSUN80PRO" (Ver) .....	33
4.3.2.2	Simulación luminaria marca Philips modelo "SunStay" (Ver) .....	33
4.3.2.3	Simulación luminaria marca Sylvania modelo "Kit Sylstreet" (Ver) .....	33
4.3.3	Análisis técnico/económico y selección .....	34
4.3.4	Simulación en zonas críticas de estudio .....	35
4.4	Evaluación ambiental .....	37
4.5	Cantidades y presupuesto .....	38
5	Recomendaciones .....	39
5.1	Recomendaciones técnicas .....	39
5.2	Recomendaciones normativas .....	39
5.3	Recomendaciones ambientales .....	39
5.4	Recomendaciones sociales y comunitarias .....	39
6	Conclusiones .....	40
	Referencias bibliográficas .....	41

**Lista de tablas**

Tabla 1. Clases de iluminación para vías vehiculares (Adaptado RETILAP 2024)..... 29

Tabla 2. Variación en las clases de iluminación según características de la vía (Adaptado RETILAP 2024)  
..... 29

Tabla 3. Requisitos fotométricos según la clase de iluminación de la vía (Adaptado RETILAP 2024)..... 30

Tabla 4. Luminarias seleccionadas para el diseño del proyecto (Adaptado por autor)..... 30

Tabla 5. Parámetros técnicos establecidos para el diseño de alumbrado. (Adaptado por autor) ..... 32

Tabla 6. Información del CAUE para las luminarias del proyecto. .... 34

### Lista de figuras

Figura 1. Efecto fotovoltaico. ....	19
Figura 2. Mapa Agustín Codazzi (SIGAC, 2012).....	23
Figura 3. Tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá, vista 2D (Google Earth, 2025) .....	24
Figura 4. Tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá, vista 3D (Google Earth, 2025) .....	24
Figura 5. Temperatura en el municipio Agustín Codazzi (Weather Spark, 2025) .....	25
Figura 6. Nubosidad en el municipio de Agustín Codazzi (Weather Spark, 2025).....	26
Figura 7. Promedio de irradiación directa mensual Agustín Codazzi (Adaptado de Global Solar Atlas, 2025) .....	26
Figura 8. Promedio de irradiación directa por hora Agustín Codazzi (Adaptado de Global Solar Atlas, 2025) .....	27
Figura 9. Promedio mensual de horas de brillo solar Agustín Codazzi (Adaptado de IDEAM, 2022) .....	28
Figura 10. Valores de simulación con luminaria marca Ecolite (DIALux, autoría propia).....	33
Figura 11. Valores de simulación con luminaria marca Phillips (DIALux, autoría propia).....	33
Figura 12. Valores de simulación con luminaria Sylvania (DIALux, autoría propia).....	33
Figura 13. Identificación de curvas en el tramo Agustín Codazzi - Serranía del Perijá.....	35
Figura 14. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia) .....	36
Figura 15. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia) .....	37
Figura 16. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia) .....	37
Figura 17. Estimación total del presupuesto del proyecto .....	38

### **Lista de apéndices**

**Nota: Ver apéndices adjuntos en repositorio institucional**

**Apéndice A.** Memoria de cálculos tramo Agustín Codazzi - Serranía del Perijá.

**Apéndice B.** Planos eléctricos detallados de la vía Agustín Codazzi - Serranía del Perijá.

**Apéndice C.** Presupuesto general del proyecto.

**Apéndice D.** Informe de DIALux tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá (Luminaria Ecolite).

**Apéndice E.** Informe de DIALux tramo Agustín Codazzi - Serranía del Perijá (Luminaria Philips).

**Apéndice F.** Informe de DIALux tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá (Luminaria Sylvania).

**Apéndice G.** Informe de DIALux tramos Agustín Codazzi – Serranía del Perijá (Zonas críticas).

**Apéndice H.** Condiciones actuales del tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá

**Apéndice I.** Ficha técnica luminaria Sylvania

**Apéndice J.** Ficha técnica luminaria Philips.

**Apéndice K.** Ficha técnica luminaria Ecolite.

**Apéndice L.** Evaluación financiera del proyecto.

**Apéndice M.** CAUE propuestas.

## Resumen

**Título:** Diseño de iluminación solar fotovoltaica de alumbrado público para el tramo Agustín Codazzi - Serranía del Perijá\*.

**Autor:** Aldair Alejandro Vega Daza y Mario José Mendoza Novoa\*\*.

**Palabras clave:** Alumbrado público, Dialux EVO, Iluminación solar fotovoltaica, RETILAP.

**Descripción:** El presente trabajo de grado tiene como objetivo principal diseñar un sistema de iluminación solar fotovoltaica para el alumbrado público en un tramo de vía terciaria entre Agustín Codazzi y la Serranía del Perijá mediante el software DIALux. Este proyecto surge como una solución sostenible y eficiente para mejorar las condiciones de iluminación en zonas rurales con acceso limitado a redes eléctricas convencionales.

La metodología desarrollada incluye un análisis detallado de la radiación solar disponible en la zona, la selección de componentes adecuados, y el cumplimiento de los requisitos establecidos en el RETILAP. Los resultados del diseño buscan garantizar la iluminación uniforme, el ahorro energético y la durabilidad del sistema propuesto.

Este estudio contribuye a fomentar el uso de energías renovables en aplicaciones de infraestructura pública y presenta una alternativa viable para la electrificación rural mediante tecnologías limpias.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Rolando Andrés Rincón Saravía - Máster en Gerencia de Proyectos. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga - PhD. en Ingeniería.

### **Abstract**

**Title:** Design of solar photovoltaic street lighting for the Agustín Codazzi – Serranía del Perijá section\*.

**Author(s):** Aldair Alejandro Vega Daza y Mario José Mendoza Novoa\*\*.

**Key words:** Street lighting, Dialux EVO, Solar photovoltaic lighting, RETILAP.

**Description:** The main objective of this degree is to design a solar photovoltaic lighting system for public lighting in a tertiary track between Agustín Codazzi and the Serranía del Perijá using the Dialux software. This project emerges as a sustainable and efficient solution to improve lighting conditions in rural areas with limited access to conventional electricity grids. The methodology developed includes a detailed analysis of the solar radiation available in the area, selection of appropriate components, and compliance with the requirements set out in RETILAP. The design results seek to ensure uniform lighting, energy savings, and durability of the proposed system.

This study contributes to the promotion of renewable energy in public infrastructure applications and presents a viable alternative for rural electrification through clean technologies.

---

\*Degree work

\*\*Faculty Physical Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia - Master's in project management. Co-director: Oscar Arnulfo Quiroga - PhD. In Electrical Engineering.

## **Introducción**

El alumbrado público constituye un componente esencial en el desarrollo urbano y rural, al proporcionar condiciones adecuadas de visibilidad, seguridad vial y percepción de bienestar en las zonas intervenidas. En los últimos años, el uso de tecnologías sostenibles como la energía solar fotovoltaica ha cobrado especial importancia en el diseño de sistemas de iluminación, especialmente en contextos donde el acceso a la red eléctrica convencional es limitado o inexistente.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un sistema de alumbrado público autónomo, basado en luminarias solares, para un tramo comprendido entre la Serranía del Perijá y el municipio de Agustín Codazzi, en el departamento del Cesar. Esta zona, caracterizada por su riqueza ecológica y su función como corredor vial de importancia local, demanda soluciones de iluminación que garanticen eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y viabilidad técnica.

El proyecto no solo responde a la necesidad de mejorar las condiciones de seguridad y movilidad de este corredor vial, sino que también se alinean con las metas globales de transición energética y desarrollo sostenible, al integrar tecnologías limpias, de bajo mantenimiento y adaptadas a las condiciones geográficas y climáticas de la región.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de alumbrado público vía del tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá con iluminación LED basada en energía solar fotovoltaica.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Recopilar información que permita el desarrollo de sistemas de iluminación solar fotovoltaica en el tramo de Agustín Codazzi y la Serranía del Perijá.

Realizar la selección de luminarias autónomas a utilizar en el proyecto según los catálogos reconocidos a nivel nacional.

Diseñar un modelo de la vía y realizar cálculos de iluminación mediante el software Dialux EVO teniendo en cuenta la información recopilada anteriormente.

Realizar memoria de cálculos según RETILAP.

Realizar el presupuesto de inversión para la implementación del sistema de iluminación diseñado.

## **2 Marco Teórico**

### **2.1 Alumbrado Público**

Es un servicio público que se presta con el fin de iluminar lugares de libre circulación, que incluyen las vías públicas, los parques, y demás espacios que se encuentren a cargo del municipio o ciudad, con el fin de permitir el desarrollo de actividades nocturnas dentro del perímetro rural y urbano. Pero sin duda, el objetivo principal es proporcionar condiciones de iluminación que generen sensación de seguridad a los peatones y una adecuada visibilidad a los conductores de vehículos en zonas con alta circulación peatonal. (Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME 2007).

#### **2.1.1 Ventajas del uso de sistemas autónomos fuera de la red eléctrica**

Los sistemas de iluminación autónomos, precisamente los solares fotovoltaicos, operan de forma independiente a la red eléctrica, lo que los convierte en una solución ideal para zonas rurales o de difícil acceso. Su principal ventaja es la autonomía energética, ya que generan y almacenan su propia energía, eliminando la necesidad de conexión a la red.

Además, presentan bajos costos operativos y de mantenimiento, al no requerir consumo eléctrico convencional. Son también una alternativa sostenible, al reducir las emisiones contaminantes y el impacto ambiental.

Estos sistemas aportan mayor seguridad y continuidad del servicio, incluso ante fallos de la red, y su instalación es versátil y poco invasiva, adaptándose fácilmente a distintos entornos. Por estas razones, son altamente recomendados para proyectos de alumbrado público en zonas no interconectadas o de difícil acceso a la red eléctrica local.

### **2.2 Luminarias LED autónomas**

Las luminarias LED solares autónomas son sistemas compactos que contienen un panel solar, luminaria LED, batería, controlador de carga. Esta configuración simplifica su instalación y reduce la necesidad de cableado externo, facilitando su implementación.

Entre sus ventajas se destacan la eficiencia energética, el bajo mantenimiento, la resistencia a condiciones climáticas adversas y su capacidad de operación autónoma durante varios días incluso con baja irradiación solar. Su diseño modular permite una instalación rápida y estética, sin afectar significativamente el entorno.

Estas luminarias son ideales para proyectos de alumbrado público sostenible, ya que optimizan el uso de la energía solar y requieren poca intervención en infraestructura eléctrica.

#### **2.2.1 Características y funcionamiento**

Dentro de las características de las luminarias LED solares que se deben conocer son la potencia, los lúmenes y el IRC.

- La potencia varía entre 15 W y 150 W, según el modelo y aplicación.
- El flujo luminoso para este tipo de luminaria oscila entre 1500 y 12000 lúmenes, dependiendo de la eficiencia de LED.
- El Índice de Reproducción Cromática (IRC) suele estar entre 70 y 80, lo que permite una buena reproducción de colores y visibilidad adecuada.

### 2.2.2 Componentes principales

Las luminarias LED autónomas se componen principalmente de:

- **Panel solar fotovoltaico:** Es el encargado de captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica. Generalmente este es de tipo monocristalino o policristalino, y está integrado en la parte superior de la luminaria para recibir la máxima exposición al sol.
- **Luminaria LED:** Es la fuente de luz del sistema. Está compuesta por diodos emisores de luz de alta eficiencia que generan un flujo luminoso adecuado con bajo consumo de energía y larga vida útil.
- **Batería:** Se encarga de almacenar la energía generada por el panel solar durante el día y la suministra durante la noche. Comúnmente existen dos tipos de baterías:
  - Litio ( $\text{LiFePO}_4$ ). Livianas, compactas de mayor durabilidad en cuanto a factores de carga y descarga profundas con mayor eficiencia energética. La más usada en luminarias modernas debido a su rendimiento/durabilidad, aunque presenta alto costo.
  - Gel (plomo-ácido sellada). Resistente a altas temperaturas, con vida útil promedio, pesada, requiere más espacio para su instalación, tiene menor densidad energética y mayormente económicas en cuanto a las de litio.
- **Controlador de carga:** Es el dispositivo fundamental en estas luminarias ya que regula la carga y descarga de la batería, evita sobrecargas o descargas profundas, controla el encendido/apagado de las luminarias y regula su intensidad.

Existen dos tipos de controladores, Modulación por Ancho de Pulso (PWM) que realiza una regulación directa entre el panel y la batería. Confiable y adecuado para sistemas pequeños y los de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) el cual maximiza la captación de energía solar ajustando constantemente el punto de operación del panel. Tiene mayor eficiencia de carga y es ideal para luminarias de mayor capacidad o zonas con condiciones solares variables.

### **2.2.3 Beneficios de la integración en un solo dispositivo**

La tecnología LED se destaca por su bajo consumo de energía, lo que se traduce en facturas de electricidad más bajas y un menor impacto ambiental. Además, las luminarias LED autónomas tienen una vida útil significativamente más larga en comparación con las bombillas tradicionales. Esto no solo permite un ahorro energético, sino también una reducción en los costes de mantenimiento.

Estas luminarias suelen ser regulables, lo que permite a los usuarios ajustar el nivel de brillo según sus necesidades y preferencias. Este grado de control mejora la experiencia de iluminación en general y contribuye aún más a la eficiencia energética.

## **2.3 Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es una fuente de electricidad de origen renovable, generada directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor llamado celda fotovoltaica. Actualmente, se ha consolidado como la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel mundial, después de la energía hidroeléctrica y la eólica.

Una de sus principales ventajas es que no produce emisiones contaminantes durante su funcionamiento, contribuyendo significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, su principal limitación radica en la dependencia de la radiación solar: si la celda no está orientada perpendicularmente al sol, puede perder entre un 10% y un 25% de la energía incidente. Además, su rendimiento también se ve afectado por condiciones meteorológicas adversas, como la nubosidad, la falta de sol o la acumulación de suciedad en los paneles.

Ante la creciente demanda de energías limpias, la fabricación de celdas solares y la instalación de sistemas fotovoltaicos han experimentado un notable avance en los últimos años. Este tipo de energía se usa principalmente para la generación de electricidad a gran escala a través de redes de distribución.

### **2.3.1 Factores que afectan la eficiencia de captación solar**

La eficiencia con que estas luminarias convierten la luz solar en energía eléctrica depende de varios factores de tipo ambiental, técnicos y de instalación. Entre los principales encontramos:

- **Radiación solar disponible:** Es la cantidad de energía solar que incide sobre el panel es el factor más determinante. Regiones con alta irradiación solar diaria (kWh/m<sup>2</sup>) permiten mayor captación y autonomía del sistema.
- **Orientación e inclinación del panel:** Los paneles deben orientarse hacia el ecuador

(hacia el Sur en Colombia) y con una inclinación adecuada (generalmente similar a la latitud del lugar) para maximizar la captación solar. Una mala orientación reduce significativamente la eficiencia.

- **Sombras:** La presencia de árboles, postes, edificaciones o montañas que proyectan sombra sobre los paneles, especialmente en horas pico, disminuyen la cantidad de energía captada y afecta el rendimiento del sistema.
- **Acumulación de polvo y suciedad:** Películas de polvo, hojas, excremento de animales o residuos sobre la superficie del panel bloquean la radiación solar y reducen la eficiencia. Se recomiendan limpiezas periódicas para evitar pérdidas.

### **2.3.2 Importancia de la autonomía energética en el alumbrado público**

La autonomía energética se refiere al tiempo en que una luminaria solar puede funcionar sin recibir carga solar directa, normalmente expresado en días. Este aspecto es fundamental en el alumbrado público por diferentes razones:

- Funcionamiento continuo: Garantiza que la luminaria opere durante noches nubladas o lluviosas, cuando la captación solar es baja.
- Confiabilidad del sistema: Una buena autonomía mejora la estabilidad del servicio evitando apagones y garantizando la seguridad vial y ciudadana.
- Adaptabilidad climática: Es crucial en regiones con alta nubosidad o estaciones lluviosas, ya que permiten mantener la iluminación sin depender del clima diario.
- Reducción del mantenimiento: Un sistema con autonomía no necesita una recarga frecuente ni ajustes manuales, lo que minimiza costos operativos.
- Cumplimiento normativo: Como lo exige RETILAP, se requiere un mínimo de días (3 a 5) de autonomía para garantizar el rendimiento del sistema en condiciones reales.

## **2.4 Controladores de carga y gestión de energía**

### **2.4.1 Regulación del flujo de energía en sistemas autónomos**

El controlador de carga regula el flujo de energía entre el panel solar, la batería y la luminaria, garantizando eficiencia y protección del sistema. Sus funciones clave son: Protección de la batería, encendido/apagado, regulación de luz (dimming), gestión inteligente y optimización solar.

### **2.4.2 Protección contra sobrecargas, descargas profundas y descargas atmosféricas.**

Las luminarias LED solares autónomas incorporan un sistema de protección para

garantizar su durabilidad y funcionamiento estable. El controlador impide que la batería reciba más energía de la necesaria, evitando calentamiento y deterioro. Se desconecta la carga cuando la batería alcanza un nivel mínimo crítico con el propósito de prolongar su vida útil, además estos equipos incorporan varistores, supresores de picos y sistemas de puesta a tierra para proteger los componentes a sobretensiones causadas por rayos o tormentas eléctricas.

Estas protecciones son esenciales para garantizar la seguridad, fiabilidad y vida útil del sistema en condiciones ambientales exigentes.

## 2.5 Principios de conversión de energía solar fotovoltaica

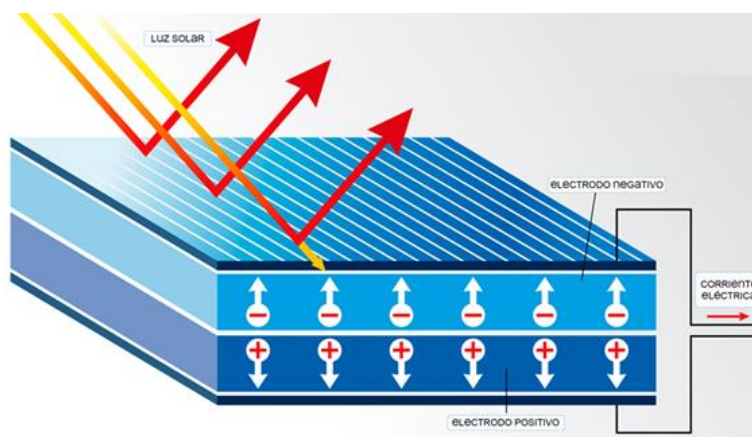
### 2.5.1 Radiación solar y su conversión en electricidad

El proceso de conversión de la energía solar en electricidad ocurre en las capas internas de la celda fotovoltaica, justo debajo de la capa reflectante. Allí se encuentran dos placas de silicio: la superior, dopada con fósforo, actúa como conductor de tipo negativo (tipo n); mientras que la inferior, dopada con boro, funciona como conductor de tipo positivo (tipo p).

Cuando un fotón incide sobre un átomo de silicio, transfiere su energía a un electrón, liberándolo de su posición. Dado que este fenómeno ocurre de manera continua y masiva, los electrones liberados buscan ocupar las vacantes dejadas por otros electrones, generando así un movimiento constante. Este flujo de electrones entre ambas capas constituye una corriente eléctrica.

No obstante, es el campo eléctrico generado en la unión p-n (la interfaz entre las capas positiva y negativa) en que separa los pares electrón-hueco creados por la radiación solar, dirigiendo los electrones hacia la capa tipo n y los huecos hacia la capa tipo p. Esta separación ordenada de cargas es lo que produce una diferencia de potencial, es decir, un voltaje eléctrico (ver Figura 1).

**Figura 1. Efecto fotovoltaico.**



**Fuente:** Panel Power ¿Cómo funcionan los paneles solares? Tomado de: <https://www.panelpower.com.mx/como-funcionan-los-paneles-solares>

Este sistema puede conectarse fácilmente a la red eléctrica local, sin embargo, antes es necesario incorporar un inversor, el cual transforma la corriente continua generada por las celdas fotovoltaicas en corriente alterna, adecuada para el suministro eléctrico convencional.

El silicio se utiliza como material base en la fabricación de celdas fotovoltaicas debido a que la energía de un fotón es suficiente para liberar un electrón de un átomo de silicio. Aunque el silicio puro no es el semiconductor más eficiente por sí solo, al doparse con fósforo (para crear una capa tipo n) y boro (para crear una capa tipo p) se convierte en una de las soluciones más eficaces disponibles para la conversión fotovoltaica (TME, 2023).

### **2.5.2 Radiación, irradiación e irradiancia**

La radiación es un tipo de energía de carácter electromagnético emitido por el sol que se extiende en forma de ondas. La irradiación se refiere a la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie por unidad de área y se mide en Julios por metro cuadrado ( $J/m^2$ ) o en su defecto vatios-hora por metro cuadrado ( $Wh/m^2$ ). La irradiancia, es la potencia de radiación solar que incide en una superficie para un determinado instante y se expresa en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

## **2.6 Tecnología LED y fotometría**

### **2.6.1 Temperatura de color y eficiencia luminosa**

Los sistemas de alumbrado público que incluyen tecnología LED destacan por su alta eficiencia, bajo consumo y control preciso de la luz emitida. Dos parámetros claves para su desempeño son: El CCT definido como la temperatura de color que define el aspecto cromático de la luz y se mide en Kelvin (K), para alumbrado público se recomiendan valores entre 4000K y 5000K, que ofrecen tonalidades neutras o blanco frío para adecuada visibilidad y seguridad. Una temperatura de color equilibrada mejora la percepción visual sin alterar los colores pertenecientes del entorno.

En cuanto a términos de eficiencia luminosa esta representa cuanto luz útil genera la luminaria por cada vatio consumido y se expresa en lúmenes por vatio ( $lm/W$ ). Las luminarias LED solares modernas alcanzan eficiencias superiores, lo que reduce el consumo energético manteniendo una alta calidad de iluminación.

### **2.6.2 Distribución lumínica en alumbrado público**

La distribución lumínica se refiere a la forma en que la luz se reparte en el espacio, influenciada por el diseño óptico de la luminaria. En el alumbrado público, una distribución adecuada es esencial para garantizar visibilidad, seguridad vial y eficiencia energética. Los tipos de distribución son: simétricos, los cuales proyectan luz de manera uniforme en todas la

direcciones y asimétricos los cuales dirigen la luz hacia el área útil evitando deslumbramientos.

Los parámetros clave en la distribución lumínica parten desde la uniformidad, alcance y apertura del haz, altura y posición del montaje y la normatividad técnica (RETILAP 2024) la cual exige ciertos niveles mínimos de iluminancia, uniformidad y control del deslumbramiento.

## **2.7 Impacto ambiental y sostenibilidad**

### **2.7.1 Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> entre sistemas solares y convencionales**

El alumbrado público convencional, conectado a la red eléctrica, suele depender de fuentes para generar energía, lo que conlleva a emisiones significativas de CO<sub>2</sub>. Esto depende de la matriz energética del país para estimar los kilogramos de dióxido carbono emitidos.

En contraste, los sistemas de alumbrado público con luminarias LED autónomas operan con energía solar, lo que implica cero emisiones directas durante su funcionamiento lo que se traduce en un ahorro potencial en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> por luminaria al año, todo esto al evitar el uso convencional.

Agregando, las luminarias solares reducen el consumo energético anual, no generan contaminación sonora ni térmica y tienen vida útil prolongada lo que disminuye el impacto ambiental.

### **2.7.2 Reducción de contaminación lumínica mediante control eficiente de luz**

La contaminación lumínica ocurre cuando la luz artificial se dispersa fuera de las áreas útiles, afectando el entorno, el cielo nocturno y la salud. Las luminarias LED ayudan a mitigarla mediante un diseño óptico preciso que dirige la luz solo donde se precisa, evitando deslumbramientos y emisiones hacia áreas distintas a la útil.

Incorporan programaciones y sensores en cuanto a los controladores que permiten el encendido, apagado, atenuación en horas que lo precise con temperaturas de color controladas con el fin de reducir el impacto sobre la fauna nocturna. Características que hacen que el alumbrado solar sea ambientalmente responsable y eficiente.

### **2.7.3 Contribución del alumbrado solar a los objetivos de desarrollo sostenible**

El alumbrado público destinado con luminarias LED solares apoya directamente varios objetivos de desarrollo sostenible (ODS) establecidos, al combinar eficiencia energética, sostenibilidad y equidad social: Energía asequible y no contaminante, ciudades y comunidades sostenibles, acción por el clima, industria, innovación e infraestructura.

Estas luminarias autónomas ofrecen una solución viable y responsable para avanzar hacia modelos de desarrollo más limpios y equitativos.

### 3 Marco Legal

Los requerimientos y medidas que se deben cumplir en los sistemas de iluminación de interiores y exteriores, contemplando el alumbrado público en el país, son establecidos por el Ministerio de Minas y Energía en el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público **RETILAP**. Ubicándonos en el “Capítulo 5, alumbrado público e iluminación exterior” se emiten los principios generales de iluminación y las consideraciones técnicas de un diseño para el alumbrado público (Ministerio de Minas y Energía, 2010). Del mismo modo, el ministerio en su objetivo proteger la vida y la salud humana, la vida animal y vegetal, preservar el medio ambiente y prevenir las prácticas que puedan inducir a errores del usuario, emitió el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas **RETIE** (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

### 4 Metodología

La metodología utilizada para realizar este proyecto consta de 3 etapas con el fin de cumplir a cabalidad con los alcances propuestos.

La primera se centra en los estudios y diseños de sistemas de iluminación exterior y vial, normativa vigente en Colombia para este tipo de dominio, en la utilidad de las nuevas tecnologías de iluminación solar fotovoltaica. La caracterización de la zona de estudio (Ubicación, condiciones climatológicas, potencial energético y condiciones actuales de iluminación); la segunda es la selección de luminarias, dimensionamiento del sistema siguiendo los requerimientos exigidos de iluminación por el RETILAP y realización del diseño mediante el software DIALux. Por último, materializar documentación (memoria de cálculos, informe de análisis de resultados obtenidos), determinación de viabilidad y presupuesto inversión para la implementación del sistema diseñado.

#### 4.1 Dimensionamiento del sistema

Cuando se utilizan este tipo de luminarias autónomas, sus componentes vienen prediseñados, calibrados y certificados, lo que simplifica el proceso de dimensionamiento. Sin embargo, hay aspectos claves a considerar para garantizar la viabilidad y eficiencia del proyecto: Ubicación geográfica, descripción del tramo y radiación solar, demanda lumínica del área, autonomía energética requerida, alturas y distancias de instalación, condiciones ambientales y selección del modelo de luminaria adecuado que cubra la demanda energética y ofrezca respaldo suficiente según las condiciones del sitio.

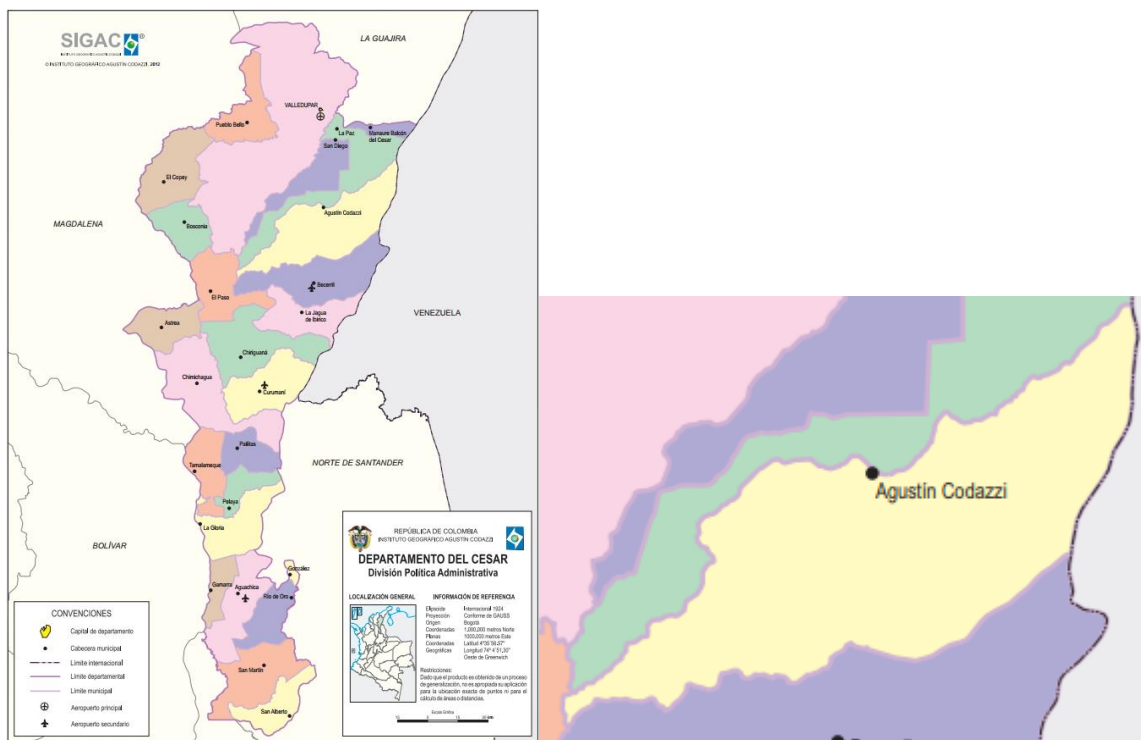
##### 4.1.1 Caracterización de la zona

###### 4.1.1.1 Ubicación de la zona

El municipio de Agustín Codazzi situado en el norte del departamento del Cesar se ubica a 60 kilómetros de la ciudad de Valledupar y limita al norte con los pueblos de La Paz y San

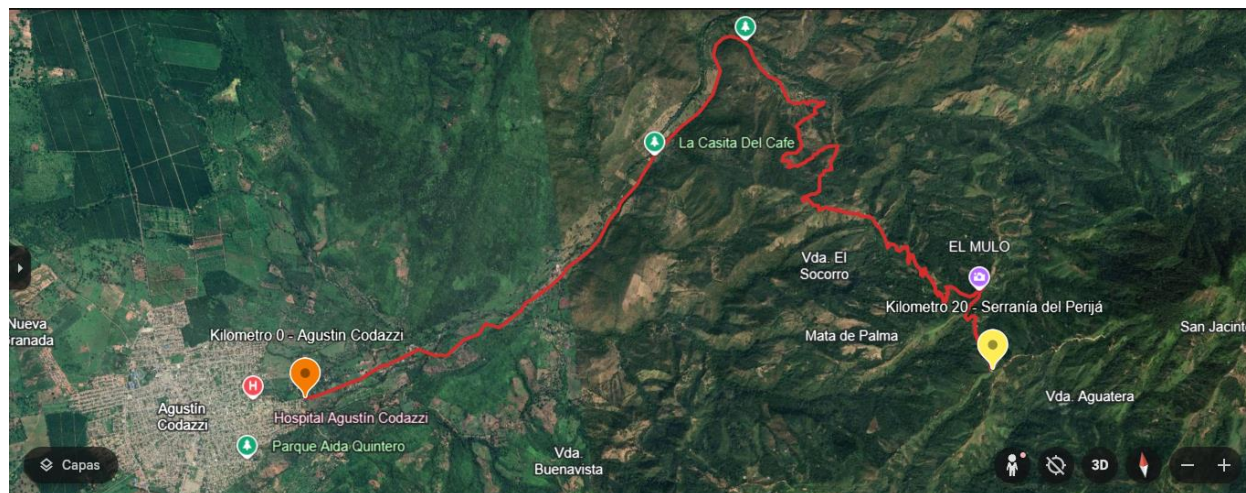
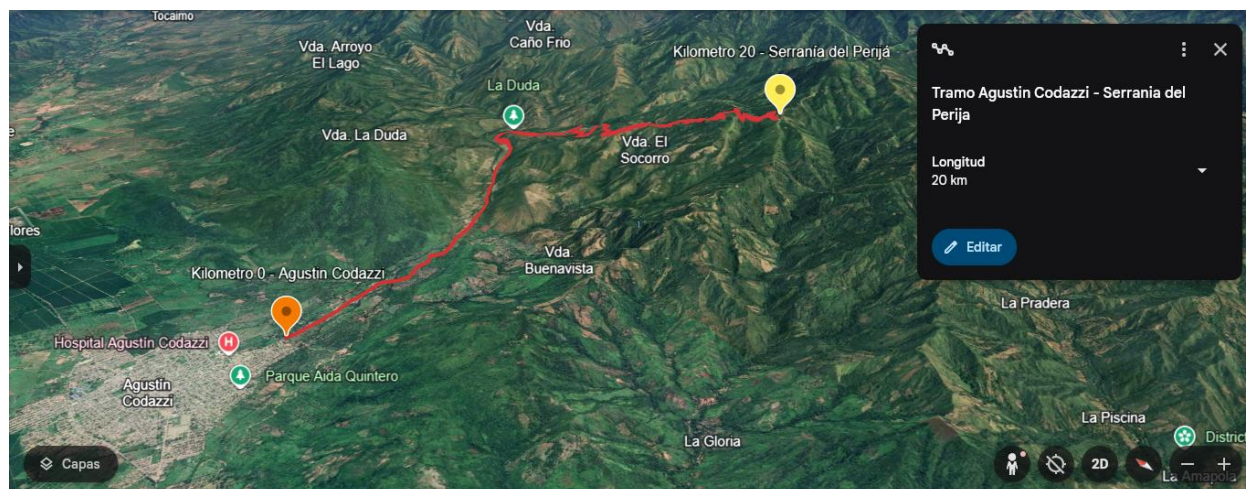
Diego al norte, Becerril al sur, República de Venezuela al oriente y al occidente con El paso (Ver Figura 2). El municipio tiene una extensión total de 1739 km<sup>2</sup> de los cuales 6.49 km<sup>2</sup> pertenecen a la extensión urbana y 1732,51 km<sup>2</sup> pertenecen a la extensión rural. (Alcaldía Municipal de Agustín Codazzi, 2017).

**Figura 2. Mapa Agustín Codazzi (SIGAC, 2012)**



#### 4.1.1.2 Descripción del tramo

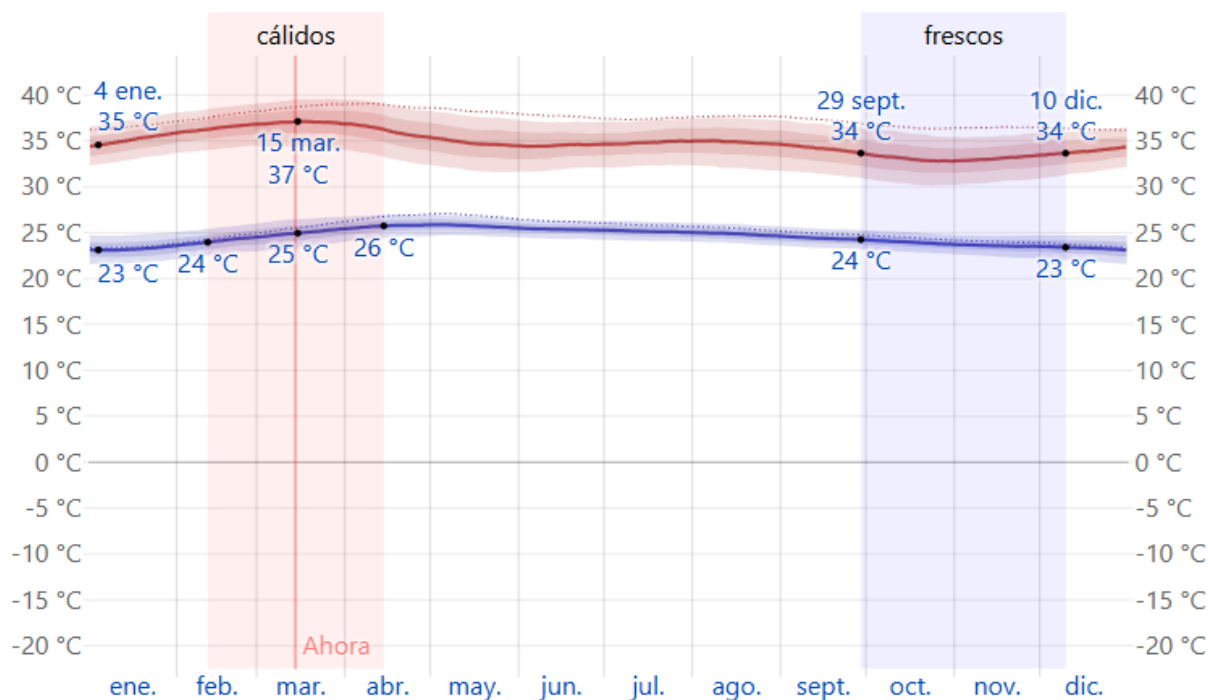
El tramo objeto de estudio comprende una extensión aproximada de 20 kilómetros, localizado entre el municipio de Agustín Codazzi y la Serranía del Perijá, en el departamento del Cesar. Se trata de una zona rural con topografía montañosa, con presencia de curvas, pendientes y cambios de nivel, características que representan desafíos de movilidad como en la seguridad vial, especialmente en condiciones nocturnas.

**Figura 3. Tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá, vista 2D (Google Earth, 2025)****Figura 4. Tramo Agustín Codazzi – Serranía del Perijá, vista 3D (Google Earth, 2025)**

#### 4.1.1.3 Condiciones climatológicas

El clima del municipio corresponde a dominios tropicales, donde las características generales del clima son elevadas temperaturas y escasa oscilación térmica anual, aunque varía por la altitud de las montañas. El municipio cuenta con una temporada calurosa de 2,1 meses, del 11 de febrero al 14 de abril, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 36 °C. El mes más cálido del año en esta zona es marzo, con una temperatura máxima promedio de 37 °C y mínima de 25 °C.

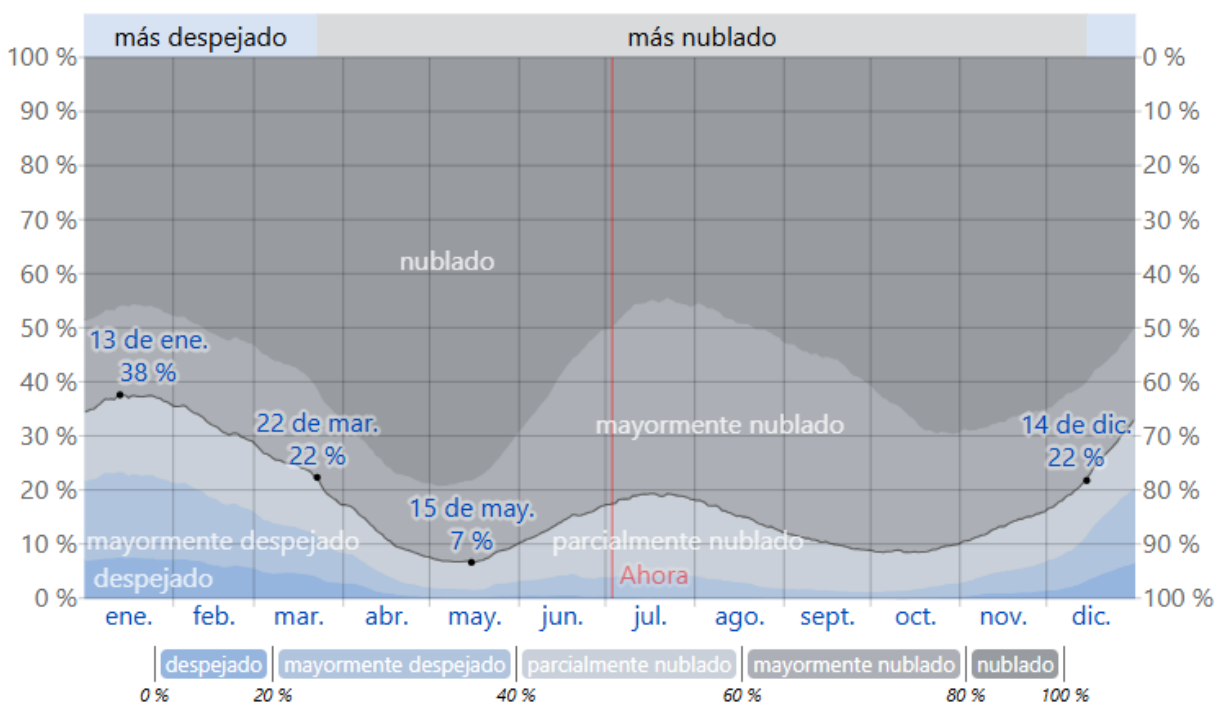
La temporada “fresca” dura 2,4 meses, del 29 de septiembre al 10 de diciembre, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 34 °C. El mes más frío del año en el municipio es noviembre, con una temperatura mínima promedio de 24 °C y máxima de 33 °C. (Weather Spark, 2025).

**Figura 5. Temperatura en el municipio Agustín Codazzi (Weather Spark, 2025)**

Por otro lado, en Agustín Codazzi, el porcentaje promedio de cielo cubierto con nubes varía significativamente a lo largo del año (Weather Spark, 2025).

La temporada más despejada del año inicia aproximadamente el 14 de diciembre, se extiende por 3,2 meses y finaliza alrededor del 22 de marzo. El mes más despejado del año es enero, durante el cual en promedio el cielo se presenta despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 37% del tiempo (ver Figura 6).

En contraste, la temporada más nublada comienza alrededor del 22 de marzo, tiene una duración de 8,8 meses y concluye aproximadamente el 14 de diciembre. El mes con mayor cobertura nubosa del año es mayo, cuando en promedio el cielo está nublado o mayormente nublado el 92% del tiempo (ver Figura 6).

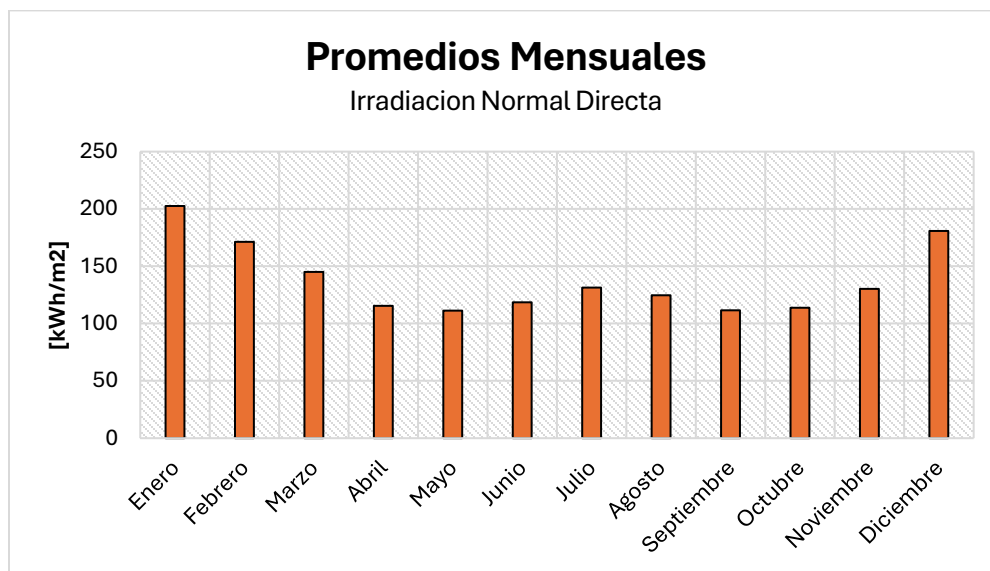
**Figura 6. Nubosidad en el municipio de Agustín Codazzi (Weather Spark, 2025)**

#### 4.1.1.4 Potencial energético

El municipio de Agustín Codazzi cuenta con una irradiación directa de aproximadamente  $1626,5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$  por año, lo que equivale a una irradiación directa diaria de  $4,445 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ . Los meses donde presenta mayor promedio de irradiación son Enero y Diciembre (Ver Figura 7) que corresponden a los meses donde se presenta el nivel más bajo de precipitaciones, con un promedio de  $196,7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$  y  $177,5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ , respectivamente. En ese sentido, los niveles de irradiación directa por hora se presentan en el mes de Enero, evidenciando que las horas entre las 8 de la mañana y 1 de la tarde se alcanzan los valores pico de irradiación (Ver Figura 8).

**Figura 7. Promedio de irradiación directa mensual Agustín Codazzi (Adaptado de Global**

**Solar Atlas, 2025)**

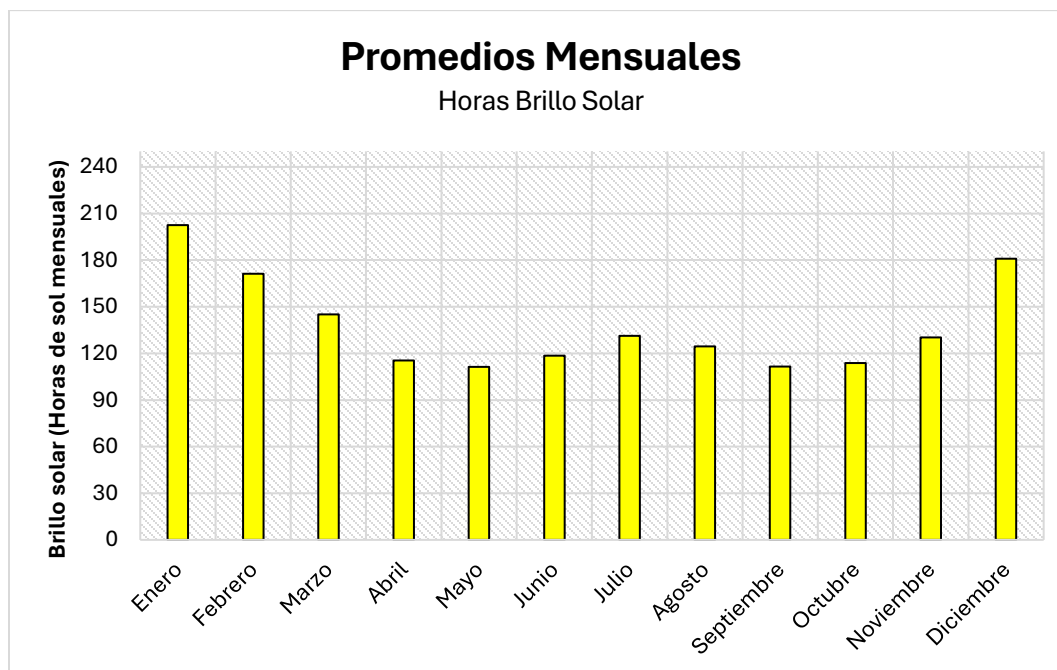


**Figura 8. Promedio de irradiación directa por hora Agustín Codazzi (Adaptado de Global Solar Atlas, 2025)**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6												
6 - 7	68	58	73	91	114	136	134	104	98	111	135	124
7 - 8	442	385	281	245	229	261	272	258	241	262	320	428
8 - 9	607	553	422	362	329	363	384	365	345	359	434	568
9 - 10	709	663	533	447	401	434	466	440	420	424	505	658
10 - 11	771	742	610	506	453	475	517	499	473	475	551	709
11 - 12	800	771	639	541	504	532	565	532	497	499	556	728
12 - 13	785	752	607	490	456	469	507	493	478	460	514	694
13 - 14	718	677	524	416	380	401	438	432	404	388	446	618
14 - 15	618	575	410	322	294	334	366	345	319	311	379	526
15 - 16	522	469	301	228	224	268	290	270	243	226	300	436
16 - 17	385	340	198	148	146	187	197	189	160	137	186	297
17 - 18	108	134	79	55	58	88	99	91	41	21	11	49
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	6,535	6,117	4,676	3,851	3,589	3,950	4,236	4,019	3,717	3,673	4,339	5,835

Conforme con los datos brindados por el IDEAM, el municipio de Agustín Codazzi cuenta con un promedio de 6 – 7 horas de brillo solar diario, que alineándose con los datos de irradiación los meses de enero y diciembre son los que presentan mayor cantidad de horas de brillo solar al mes, llegando a alcanzar un promedio de 180 horas en el mes de enero y 155 horas en el mes de diciembre (Ver Figura 9).

**Figura 9. Promedio mensual de horas de brillo solar Agustín Codazzi (Adaptado de IDEAM, 2022)**



#### 4.1.1.5 Condiciones actuales de la zona

La zona de estudio presenta una deficiencia total en su sistema de alumbrado público, ya que actualmente no cuenta con ningún tipo de iluminación. Situación que ha persistido durante varios años afectando a los habitantes que dependen únicamente de sus fuentes de luz particulares, como linternas o luces provenientes de viviendas lo que resulta insuficiente para garantizar visibilidad y seguridad en estos espacios.

Aunque existió algún tipo de alumbrado público en este tramo, este dejó de funcionar por diversos factores y por lo cual nunca fue reemplazado, ni restaurado para el bien comunitario. (Ver Anexo A).

#### 4.1.2 Diseño del sistema de iluminación de alumbrado público

##### 4.1.2.1 Clasificación de la vía

En el artículo 3.3.1.1. (clasificación de vías) ubicado en el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público, se establece la adecuada identificación de perfiles viales teniendo en cuenta los criterios de clasificación según la descripción de la vía, la velocidad de circulación permitida por la ley y la importancia de esta.

La clasificación del tramo de vía de este diseño se establece basándose en la tabla 3.3.1.1.a. y 3.3.1.1.b. del RETILAP 2024. (Ver Tabla 1 y Tabla 2)

**Tabla 1. Clases de iluminación para vías vehiculares (Adaptado RETILAP 2024)**

Clase de iluminación	Descripción vía	Velocidad de circulación (km/h)		Tránsito de vehículos T (veh/h/carril)	
M1	Autopistas y carreteras	Extra alta	$V \geq 80$	Muy importante	$T > 1.000$
M2	Vías de acceso controlado y vías rápidas	Alta	$45 \leq V < 80$	Importante	$1.000 < T > 700$
M3	Vías principales y ejes viales	Media	$40 \leq V < 45$	Media	$700 < T > 500$
M4	Vías primarias o colectoras	Reducida	$30 \leq V < 40$	Reducida	$500 < T > 300$
M5	Vías secundarias en barrios	Muy reducida	$20 \leq V < 30$	Muy reducida	$300 < T > 150$
M6	Vías dentro de conjuntos residenciales cerrados y condominios	Muy reducido	$V < 20$	Muy reducido	$T < 150$

**Tabla 2. Variación en las clases de iluminación según características de la vía (Adaptado RETILAP 2024)**

Descripción en la vía	Tipo de iluminación
Vías de extra alta velocidad, con calzadas separadas exentas de cruces a nivel y con accesos completamente controlados (autopistas expresas). Con densidad de tráfico y complejidad de circulación :	
Alta $T > 1.000$ (Veh./h/carril)	M1
Vías de alta y media velocidad, vías con doble sentido de circulación. Con confluencias de tráfico, glorietas cruces semaforizados, pasos a nivel y desnivel, diferentes usuarios de vía y separación :	
Alta $1.000 < T > 700$ (Veh./h/carril)	M2
Vías intermedias y colectoras en entradas de barrios de tráfico urbano, vías distribuidoras. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía, vías de barrio en sectores comerciales:	
Medio $700 < T > 500$ (Veh./h/carril)	M3
Bajo $500 < T > 300$ (Veh./h/carril)	M4
Vías de bajo flujo vehicular, vías de barrio o residenciales. Vías de acceso a propiedades individuales y a otras vías privadas. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Bajo $305 < T > 150$ (Veh. /h/carril)	M5
Bajo $T < 150$ (Veh./h/carril)	M6

**Fuente:** Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2024), Resolución No. 40150 de mayo 2024 "Por el cual se modifica el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP".

Con base en el análisis de las tablas anteriores y teniendo en cuenta que el tramo en estudio corresponde a una vía de conexión entre el casco urbano del municipio de Agustín Codazzi y la Serranía del Perijá, se concluye que corresponde a una vía principal o colectora, lo cual la ubica dentro de la clase de iluminación M3, según los criterios del RETILAP.

Esta clase de iluminación, bajo condiciones de estado seco, exige el cumplimiento de determinados requisitos fotométricos, los cuales se presentan en la Tabla 3.

#### 4.1.2.2 Niveles de iluminación

Los niveles iluminación clasificados para los perfiles viales vehiculares los podemos encontrar en el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP 2024) en la sección 3.3.1.2. donde detalla los niveles de iluminación adecuados en la tabla. 3.3.1.2.a.

**Tabla 3. Requisitos fotométricos según la clase de iluminación de la vía (Adaptado RETILAP 2024)**

Clase de iluminación	Superficie de la carretera (estado seco)				
	Luminancia promedio L <sub>pro</sub> (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidad general U <sub>o</sub> (min/med)	Uniformidad longitudinal U <sub>L</sub> (min/máx)	Índice de deslumbramiento f <sub>TI</sub>	Relación de entorno mínimo EIR
M1	2,0	0,4	0,7	10	0,35
M2	1,5	0,4	0,7	10	0,35
M3	1,0	0,4	0,6	15	0,30
M4	0,75	0,4	0,6	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,4	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,4	20	0,30

**Fuente:** Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2024), Resolución No. 40150 de mayo 2024 “Por el cual se modifica el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP”.

#### 4.1.2.3 Selección de luminarias

Para el diseño del sistema de alumbrado público, se han seleccionado tres (3) tipos de modelos de luminarias solares autónomas que cumplen con los requerimientos técnicos, operativos y normativos del proyecto. La elección de estas luminarias se basa en criterios de eficiencia energética, fotometría, autonomía, durabilidad y adecuación a las condiciones ambientales de la zona de instalación.

**Tabla 4. Luminarias seleccionadas para el diseño del proyecto (Adaptado por autor)**

Marca	Referencia	Potencia [W]	Flujo luminoso [lm]
Ecolite	SLSUN80PRO	80	14200 (programable)
Phillips	SunStay	60	4500
Sylvania	Kit Solar Sylstreet	150	23550 (programable)

Las respectivas fichas técnicas de las luminarias descritas en la tabla se pueden observar en el Anexo B, Anexo C y Anexo D en su respectivo orden.

#### 4.2 Propuesta de diseño

En los procesos de diseño de un sistema de iluminación es importante tener en cuenta el tipo de zona, ya que cada área requiere niveles distintos de iluminación y uniformidad. Los valores en los que se basa la propuesta de diseño se observan en la Tabla 3.

La propuesta de diseño contempla la implementación de un sistema de alumbrado público con luminarias LED autónomas, a lo largo del tramo comprendido entre la Serranía y el municipio. Esta solución responde a la necesidad de iluminación eficiente y sostenible en un corredor vial rural con acceso limitado a la red eléctrica convencional.

El diseño se fundamentó bajo el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público

(RETILAP 2024), considerando las exigencias específicas para este tipo de perfil vial (M3) con flujo vehicular y los diferentes estudios en cuanto a lo que la vía concierne. Las luminarias previamente seleccionadas obedecieron a criterios normativos, eficiencia, facilidad de instalación y su bajo costo en mantenimiento.

La disposición de las estructuras (altura y distancia entre ellas) para las luminarias se definió en base a la fotometría de las luminarias y geometría del tramo y fue validada mediante simulaciones en el software DIALux, asegurando el cumplimiento de los niveles mínimos de iluminancia y uniformidad requeridos.

Esta propuesta busca garantizar la seguridad vial, fomentar el desarrollo rural y contribuir a los objetivos de sostenibilidad mediante el aprovechamiento de este tipo de energías en este tipo de entornos.

### **4.3 Análisis de diseño**

Con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP 2024) para el tramo en estudio, se efectuaron simulaciones en el software DIALux considerando tres (3) referencias comerciales de luminarias solares. Cada propuesta fue configurada bajo condiciones geométricas particulares a lo largo del tramo, determinadas por la fotometría propia de cada luminaria.

Los principales criterios de análisis correspondieron a la luminancia promedio sobre la calzada, la uniformidad de la iluminación, el nivel de deslumbramiento, la evaluación de sitios críticos como curvas y calzadas en pendiente para la adecuada ubicación de luminarias, así como el cumplimiento del índice de reproducción cromática (IRC) mínimo y la temperatura de color recomendada.

#### **4.3.1 Configuraciones geométricas y parámetros de diseño**

El diseño se desarrolló sobre una vía colectora de tipo M3, destinada a tránsito vehicular sin excluir, la circulación de ciclistas y peatones. Para este fin se efectuaron simulaciones en las que se plantearon diferentes configuraciones geométricas variando interdistanciamiento y altura de montaje en función de las características fotométricas de cada luminaria. El objetivo fue garantizar el cumplimiento de los requisitos de uniformidad establecidos en el reglamento para el perfil de vía seleccionado, manteniendo una disposición unilateral de las estructuras y respetando los demás criterios técnicos del proyecto conforme a los resultados obtenidos en los informes generados por el software DIALux.

Los parámetros técnicos y normativos establecidos en cada luminaria del proyecto se incluyen en la Tabla 5.

**Tabla 5. Parámetros técnicos establecidos para el diseño de alumbrado. (Adaptado por autor)**

Parámetros	Valores		
	Ecolite	Philips	Sylvania
Distancia entre postes	16 m	7 m	30 m
Altura del punto de luz	12 m	7 m	12 m
Luminarias por poste	1	1	1
Inclinación del brazo	10°	10°	10°
Saliente del punto de luz	1 m	1 m	1 m
Distancia poste - calzada	0,79 m	0,79 m	0,79 m
Longitud del brazo	1,8 m	1,8 m	1,8 m
Luminancia promedio (L <sub>pro</sub> )	1,0 cd/m <sup>2</sup>	1,0 cd/m <sup>2</sup>	1,0 cd/m <sup>2</sup>
Uniformidad general (U <sub>o</sub> )	0,4 min/med	0,4 min/med	0,4 min/med
Uniformidad longitudinal (U <sub>L</sub> )	0,6 min/máx	0,6 min/máx	0,6 min/máx
Índice de deslumbramiento (fTI)	15	15	15
Relación de entorno mínimo	0,30	0,30	0,30

**4.3.2 Resultado de simulaciones DIALux**

Con el propósito de verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en el reglamento (RETILAP 2024) para vías de tipo M3, se desarrollaron simulaciones en el software DIALux orientadas a analizar con precisión el desempeño de las luminarias seleccionadas bajo condiciones reales de instalación.

En el proceso se consideraron las características geométricas del tramo, como ancho de la vía y demás parámetros descritos en la Tabla 3. De igual manera, se evaluaron las luminarias teniendo en cuenta el flujo luminoso, la distribución espacial de la luz y la eficiencia energética.

Las simulaciones permitieron comprobar el desempeño de cada luminaria con relación a los parámetros exigidos para este perfil vial, tales como la Luminancia promedio (L<sub>m</sub>), Uniformidad general (U<sub>o</sub>), Uniformidad longitudinal (U<sub>L</sub>), Índice de deslumbramiento (TI) y Relación de iluminancia en el entorno (R<sub>EI</sub>).

Con el fin de asegurar la transparencia técnica y económica en la selección de la luminaria definitiva, se efectuaron validaciones fotométricas en DIALux utilizando las configuraciones geométricas más favorables para cada alternativa. Asimismo, se realizó un análisis económico mediante el método del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), en concordancia con lo establecido con el RETILAP 2024. Las tres luminarias evaluadas alcanzaron el cumplimiento normativo; no obstante, la decisión final no se sustentó únicamente en los resultados fotométricos obtenidos, sino en una comparación integral que consideró tanto el desempeño como el costo total a lo largo del ciclo de vida.

#### 4.3.2.1 Simulación luminaria marca Ecolite modelo “SLSUN80PRO” (Ver)

**Figura 10. Valores de simulación con luminaria marca Ecolite (DIALux, autoría propia)**

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Calzada 1 (M3)	$L_m$	1.04 cd/m <sup>2</sup>	≥ 1.00 cd/m <sup>2</sup>	✓
	$U_o$	0.74	≥ 0.40	✓
	$U_l$	0.86	≥ 0.60	✓
	TI	2 %	≤ 15 %	✓
	$R_{EI}$	0.78	≥ 0.30	✓

#### 4.3.2.2 Simulación luminaria marca Philips modelo “SunStay” (Ver)

**Figura 11. Valores de simulación con luminaria marca Phillips (DIALux, autoría propia)**

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Calzada 1 (M3)	$L_m$	1.06 cd/m <sup>2</sup>	≥ 1.00 cd/m <sup>2</sup>	✓
	$U_o$	0.63	≥ 0.40	✓
	$U_l$	0.84	≥ 0.60	✓
	TI	2 %	≤ 15 %	✓
	$R_{EI}$	0.70	≥ 0.30	✓

#### 4.3.2.3 Simulación luminaria marca Sylvania modelo “Kit Sylstreet” (Ver)

**Figura 12. Valores de simulación con luminaria Sylvania (DIALux, autoría propia)**

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Calzada 1 (M3)	$L_m$	1.10 cd/m <sup>2</sup>	≥ 1.00 cd/m <sup>2</sup>	✓
	$U_o$	0.49	≥ 0.40	✓
	$U_l$	0.66	≥ 0.60	✓
	TI	3 %	≤ 15 %	✓
	$R_{EI}$	0.78	≥ 0.30	✓

Los resultados de las simulaciones evidenciaron que, debido a las variaciones en las curvas fotométricas de las luminarias y a las geometrías definidas para cada caso, la cantidad de equipos requeridos a lo largo de los veinte (20) kilómetros del tramo no fue uniforme. En las diferentes propuestas se observó que algunas requieren más luminarias mientras que en otros

resultado suficiente una menor densidad de instalación, lo que permitió optimizar tanto la inversión inicial como los costos de operación.


- **Ecolite** – 1428 Luminarias.
- **Philips** – 3320 Luminarias.
- **Sylvania** – 565 Luminarias.

#### 4.3.3 **Análisis técnico/económico y selección**

Durante el proceso de simulación se constató que las tres (3) luminarias evaluadas cumplieron de manera íntegra con los criterios normativos establecidos para el tipo de perfil vial, destacándose por ofrecer niveles adecuados de iluminación promedio, una uniformidad aceptable y una distribución eficiente del flujo luminoso sobre el tramo.

En concordancia con lo anterior, y con el propósito de garantizar el cumplimiento de lo dispuesto en el RETILAP 2024 (Numeral 3.3.2.4 “Evaluación financiera del proyecto”) se llevó a cabo un análisis económico mediante la aplicación del método del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), como mecanismo de validación y soporte para una selección más precisa y con criterio entre las luminarias consideradas en el proyecto. (Ver Anexo E)

**Tabla 6. Información del CAUE para las luminarias del proyecto.**

	<b>DISEÑO DE ILUMINACIÓN SFV VIA AGUSTÍN CODAZZI - SERRANÍA DEL PERIJÁ</b>
---	--

Empresa	Costo Inicial	CAUE
Sylvania	\$ 5.207.283.515,00	\$ 1.403.353.485,52
Ecolite	\$ 7.063.838.733,84	\$ 1.890.542.518,42
Philips	\$ 3.160.640.000,00	\$ 2.122.517.530,08

Escogido por menor CAUE	<b>Sylvania</b>
-------------------------	-----------------

Se seleccionó la luminaria con el menor valor de Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), en concordancia con lo estipulado en el artículo 3.3.2.4 del RETILAP 2024, siendo la marca **Sylvania** la elegida para este diseño, lo que permitió validar los criterios técnico/económicos del proyecto.

Una vez definida la luminaria, se llevaron a cabo simulaciones detalladas en los tramos más representativos del recorrido, poniendo especial atención en las zonas críticas identificadas por su geometría irregular, curvas, calzadas con pendiente e intersecciones. Dichos análisis permitieron comprobar una distribución homogénea de la luz, garantizando condiciones visuales seguras para los usuarios de la vía, incluso en los puntos de mayor complejidad.

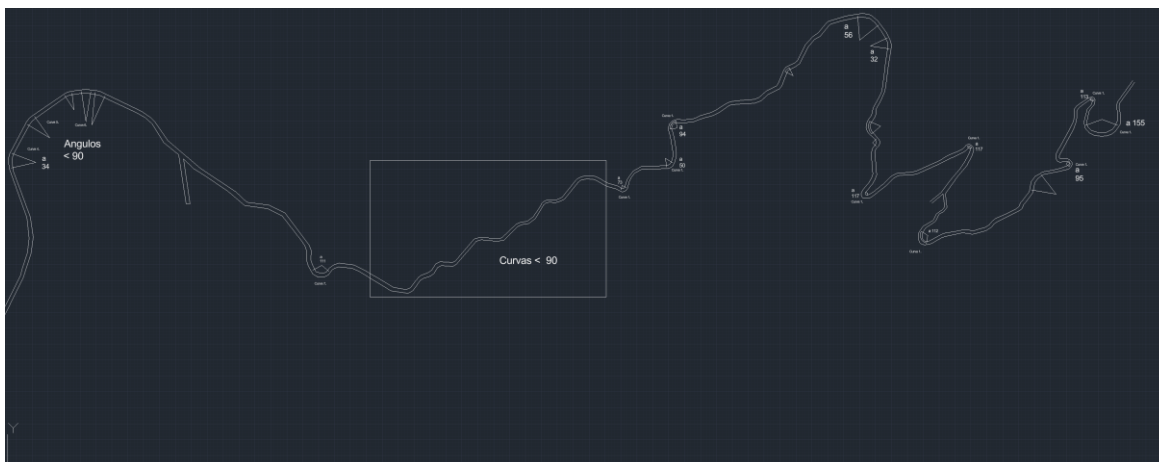
De manera complementaria, se efectuaron evaluaciones en áreas con baja intensidad de tránsito, con el propósito de verificar la versatilidad del sistema y su comportamiento lumínico en distintos escenarios trazado vial. En todos los casos, la luminaria seleccionada mostró un desempeño favorable.

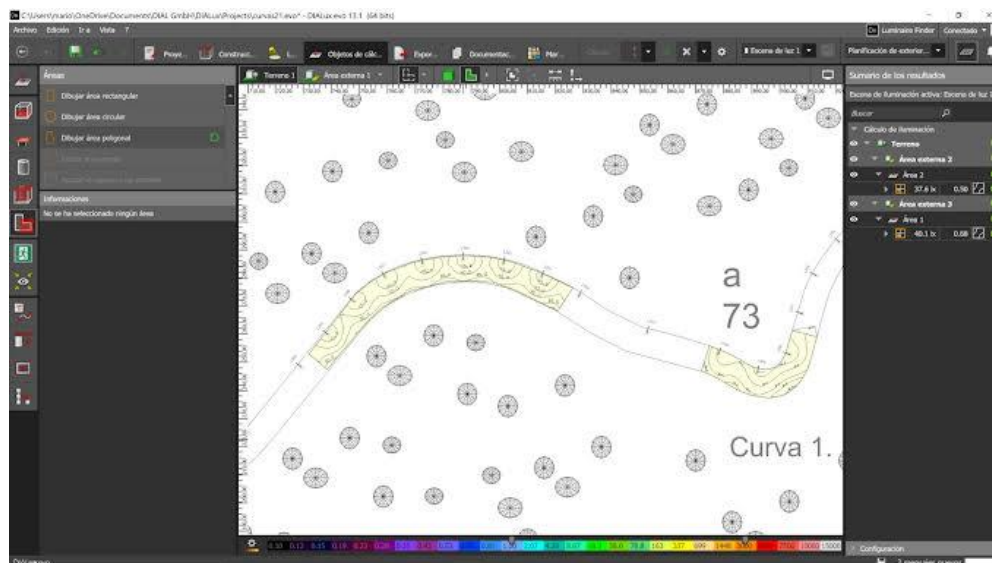
#### **4.3.4 Simulación en zonas críticas de estudio**

El artículo 3.3.1.4.1 del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público nos expone que, en sitios críticos como bifurcaciones, curvas, cruces a nivel, pendientes, pendientes curvas etc. Se debe cumplir con las especificaciones fotométricas exigidas para cada sitio teniendo en cuenta las condiciones del tránsito vehicular, la importancia de la vía, obstáculos existentes y señales de tránsito.

Teniendo en cuenta lo anterior y lo estipulado en la normativa para este tipo de sitios, se realizó la disposición de luminarias en base a las curvas encontradas en el trayecto, curvas leves ( $0$  a  $30^\circ$ ) y pronunciadas (entre  $30$  y  $90^\circ$  con radio interior de  $300$  m). Esto se define en la reducción de la distancia entre estructuras con el fin de brindar mejor trabajo visual.

**Figura 13. Identificación de curvas en el tramo Agustín Codazzi - Serranía del Perijá**



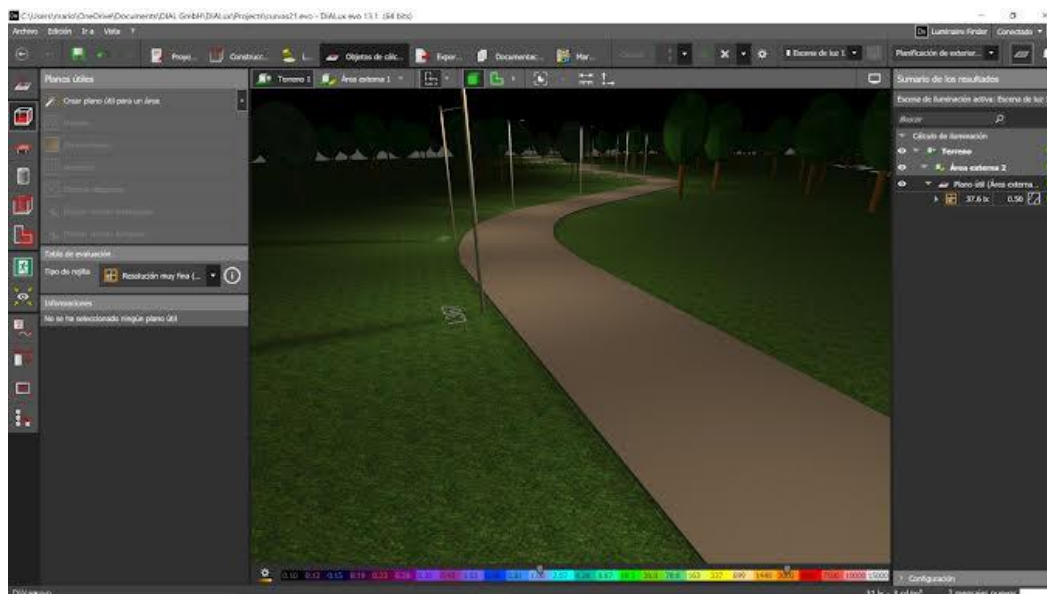
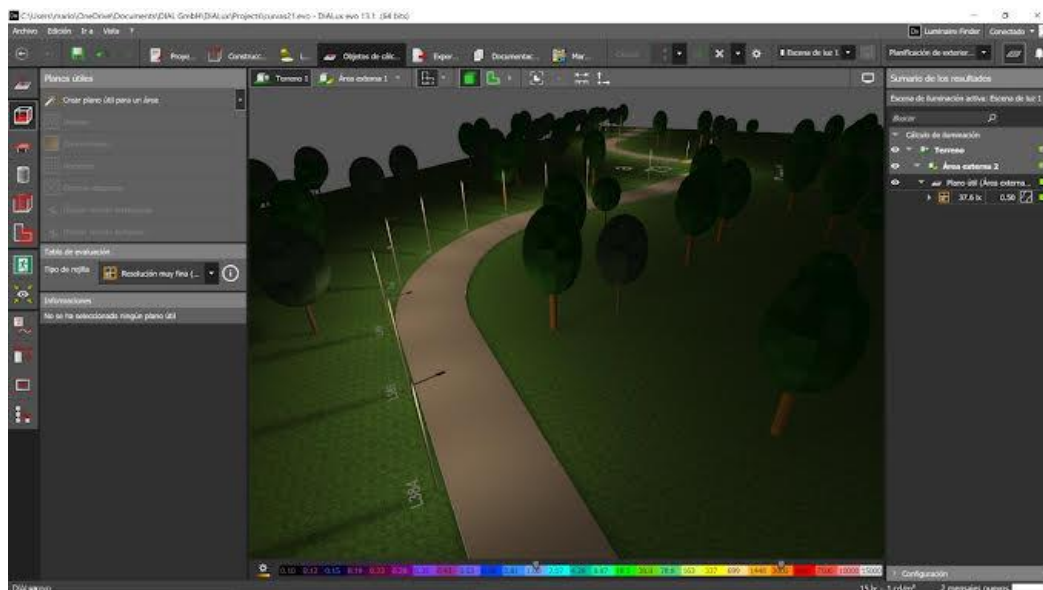
**Figura 14. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia)**

En cuanto a lo que concierne en calzadas con pendiente, las luminarias serán orientadas de tal manera que el rayo de luz en el nadir sea perpendicular a la vía. Este ángulo formado entre el brazo y la luminaria denominado “Spin” debe ser igual al ángulo de inclinación de la vía para asegurar máxima uniformidad en la distribución lumínica y reducir el deslumbramiento mientras que las estructuras deben permanecer verticales e independientes a la inclinación de la calzada.

La normativa nos aclara que una calzada está en pendiente cuando esta excede el 8% y que por debajo de este valor es considerada un trayecto plano.

Generalmente para nuestro diseño a lo largo de la vía encontramos pendientes entre 5% y 10% en tramos largos lo que indica ángulos entre 5 y 10° de inclinación.

Para trayectos con pendiente y además curvos, las estructuras deben ubicarse detrás de las barreras protectoras o naturales que existan, en pro de evitar accidentes y reducir sus complicaciones en caso de producirse alguno.

**Figura 15. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia)****Figura 16. Simulación y estudio en zonas críticas (DIALux, autoría propia)**

#### 4.4 Evaluación ambiental

Se resalta el numeral **3.3.1.7 “Coexistencia de luminarias con árboles en la vía”** ya que el presente proyecto está caracterizado por vegetación densa existente a lo largo del tramo.

El diseño está basado en tecnología LED lo que en cuestión no permite variar bases o soportes, pero si efectuar desviaciones con los parámetros geométricos de las estructuras, alternativas en cuanto a variación de interdistancias y disposición de luminarias con el objetivo de evitar la sombra ocasionada por follajes tanto para la luminaria como en los paneles.

Dicha vegetación existente es posible intervenirla cumpliendo con los permisos pertinentes a la entidad competente para la realización de podas en los sitios específicos que requiera el proyecto para lo no interferencia de captación solar e interferencia con el haz luminoso.

La arborización como integrante principal del contexto rural, merece importancia, en tal condición debe formar parte de los proyectos de diseño sin reñir el principal objetivo del alumbrado público.

#### 4.5 Cantidades y presupuesto

El diseño del sistema de iluminación autónomo en este tramo vial de 20 km contempla la instalación de 565 luminarias solares LED autónomas de la marca Sylvania, distribuidas estratégicamente a lo largo del recorrido conforme a los parámetros definidos.

La cantidad y ubicación de las luminarias fueron determinadas mediante simulaciones en DIALux, considerando las geometrías que nos brinda el tramo, como curvas e inclinaciones. En base a estos estudios se estableció un interdistanciamiento promedio ajustado en zonas críticas para cumplir con los requisitos mínimos descritos en la normativa.

Esta estimación presupuestal abarca costos directos e indirectos, garantizando un enfoque integral y realista. No solo respondiendo a criterios técnicos y normativos, si no también priorizando la sostenibilidad operativa y energética del sistema, al tratarse de una solución autónoma y fuera de la red eléctrica. (Ver apéndice C).

**Figura 17. Estimación total del presupuesto del proyecto**

<b>SUBTOTAL DEL PROYECTO COP \$</b>	<b>\$ 8.750.716.765,00</b>
<b>GASTOS IMPREVISTOS (5% SUBTOTAL)</b>	<b>\$ 437.535.838,25</b>
<b>TOTAL DEL PROYECTO COP \$</b>	<b>\$ 9.188.252.603,25</b>

## **5 Recomendaciones**

### **5.1 Recomendaciones técnicas**

Priorizar luminarias solares autónomas con curvas fotométricas según el tipo de vía, con un IRC superior a 65 y temperaturas de color entre 4000 K y 5000 K para vías vehiculares.

Verificar que la altura y separación entre estructuras garantice la uniformidad y nivel de iluminancia mínimos según la normativa. Usar estructuras con anclajes resistentes a condiciones ambientales adversas.

Incluir protecciones contra sobretensiones, vandalismos y robos (especialmente en zonas rurales).

### **5.2 Recomendaciones normativas**

Verificar que todos los elementos del diseño cumplan con los requisitos de iluminancia, uniformidad, deslumbramiento, IRC y eficiencia energética establecidos por el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público.

Asegurar la correcta instalación del sistema, siguiendo lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para los aspectos no exentos por tratarse de un sistema autónomo.

Gestionar ante los entes locales la validación de diseños y autorizaciones para su instalación, especialmente si se intervienen vías públicas.

### **5.3 Recomendaciones ambientales**

Usar luminarias con ópticas dirigidas, baja luminancia en el hemisferios superior y sistemas de control horario para reducir el impacto ambiental.

Establecer protocolos para la correcta disposición de componentes electrónicos y baterías al final de su vida útil.

### **5.4 Recomendaciones sociales y comunitarias**

Involucrar a la comunidad en el seguimiento del sistema, promoviendo el cuidado y vigilancia del alumbrado.

Realizar campañas informáticas sobre los beneficios del alumbrado solar y su relación con el desarrollo sostenible.

## 6 Conclusiones

Tras el desarrollo del proyecto de diseño de alumbrado público solar fotovoltaico en el tramo comprendido entre el municipio de Agustín Codazzi y la Serranía del Perijá, se concluye que la luminaria de la marca Sylvania, representa la opción más adecuada en términos normativos y técnico/económico. Dicha elección se fundamentó en simulaciones realizadas mediante el software DIALux, en las que se evaluaron otros dos (2) modelos de luminarias (Philips y Ecolite) bajo los parámetros exigidos por el RETILAP y mediante el análisis del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

La implementación de un sistema de alumbrado público autónomo, basado en energía solar, aporta beneficios en términos ambientales, económicos y técnicos, especialmente en zonas rurales. Al ser independientes de la red, este tipo de sistemas reduce los costos asociados a la infraestructura eléctrica tradicional, disminuye la huella de carbono y promueve el uso de fuentes de energía limpias y renovables.

Este proyecto representa una mejor significativa en la calidad de vida de los habitantes de la zona. La presencia de este servicio contribuye en el aumento de la seguridad vial y peatonal, facilita la movilidad nocturna, disuade actos delictivos y propicia espacios más seguros para la convivencia. Además, el acceso a infraestructura moderna y sostenible puede generar un impacto positivo en el desarrollo social y económico del territorio, abriendo puertas a futuras intervenciones.

El proyecto logró consolidar una propuesta técnica y socialmente pertinente, articulando criterios de sostenibilidad, eficiencia y beneficio colectivo. La adecuada selección de tecnologías, el análisis del entorno y la aplicación de herramientas de simulación permitieron estructurar una solución adaptada a las condiciones de la zona en estudio.

### Referencias bibliográficas

- Global Solar Atlas. (2024). Mapa de radiación solar para Colombia. Solargis, IRENA, Banco Mundial. <https://globalsolaratlas.info/>
- Google Earth (2024). [Ubicación geográfica: Agustín Codazzi – Serranía del Perijá, Cesar, Colombia] [Imagen de satélite]. <https://earth.google.com/>
- Granados Cristancho, C. A., & Leguizamón Gómez, D. A. (2022). Energía solar fotovoltaica para alimentación de sistemas de alumbrado público en vías de acceso controlado y rápidas en Bogotá D.C.
- IGAC. (2023). Mapas topográficos y análisis geográficos de la región Caribe colombiana. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://www.igac.gov.co>
- IDEAM. (2023). Datos climáticos y meteorológicos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales. <https://www.ideam.gov.co>
- León Ávila, D. S., Triana Pachón, J. M., Sánchez Torres, C.J., & Cardozo Cruz, D. A. (2023). Diseño de un parque solar para el suministro de energía eléctrica en redes de alumbrado público en la vereda Barzalosa de Girardot, Cundinamarca.
- Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP 2024
- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE 2024
- Weather Spark. (2023). Clima y condiciones promedio en Agustín Codazzi. <https://es.weatherspark.com/>