



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Sistemas de iluminación para túneles

Trabajo de Titulación, previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Electromecánico

**AUTOR:**

José Alejandro Masache Neira

**DIRECTOR:**

Dr. C. Jorge Enrique Carrión Gonzáles PhD.

Loja - Ecuador

2024

## **Certificación.**

Loja, 19 de enero de 2024

Dr. C. Jorge Enrique Carrión González PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Sistemas de iluminación para túneles**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del estudiante **José Alejandro Masache Neira**, con **cédula de identidad Nro. 1150554218**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

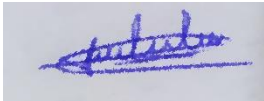
Dr. C. Jorge Enrique Carrión González PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **Autoría.**

Yo, **José Alejandro Masache Neira**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**C. I:** 1150554218.

**Fecha:** 19/ 01/2024

**Correo Electrónico:** [jamasachen@unl.edu.ec](mailto:jamasachen@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0980058823.

**Carta de autorización por parte del autor para la consulta de producción parcial o total, y publicación electrónica de texto completo del Trabajo Titulación.**

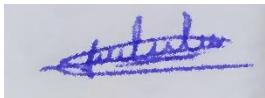
Yo, José **Alejandro Masache Neira**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Sistemas de iluminación para túneles**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del del trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los diecinueve días del mes de enero del dos mil veinticuatro.

**Firma:**



**Autor:** José Alejandro Masache Neira

**C. I:** 1150554218

**Dirección:** Catamayo-Buena Esperanza

**Correo electrónico:** [jamasachen@unl.edu.ec](mailto:jamasachen@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0980058823

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Titulación:** Dr.C. Jorge Enrique Carrión Gonzales, Ph. D.

### **Dedicatoria.**

Dedico este gran logro, primero, a Dios por darme salud y sabiduría para culminar este trabajo de investigación. Agradezco a mis padres, José y Alexandra, por ser ese pilar fundamental en mi vida y por su apoyo incondicional. También agradezco a mis queridos hermanos, amigos, por llenarme de alegría. Y a ti, mi querida Alexandra Vicente, gracias por impulsarme a superarme. Cada uno de ustedes ha sido un pilar fundamental en este logro académico. Dedico este Trabajo de Titulación a todos ustedes, con el más profundo agradecimiento.

*José Alejandro Masache Neira*

### **Agradecimiento.**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la salud y guiar mi vida. Agradezco a las personas que han contribuido, tanto directa como indirectamente, al desarrollo de este Trabajo de Titulación.

Expreso mi sincero agradecimiento al director del este Trabajo de Titulación, el Dr. C. Jorge Carrión Gonzáles, por haber sido un guía fundamental durante el proceso de investigación. Agradezco su generosidad al compartir sus conocimientos y experiencias, así como su apoyo inquebrantable, que ha sido crucial para alcanzar el éxito en esta investigación. También agradecer al Centro de Investigación I2TC por su asistencia en la superación de las diversas dificultades que se presentaron a lo largo de esta investigación.

Quiero extender mi gratitud a mis padres, hermanos y demás familiares, quienes han brindado un apoyo invaluable. Han sido una fuente constante de inspiración y aliento para alcanzar la meta propuesta. Su apoyo moral y emocional ha sido fundamental para superar los obstáculos que surgieron durante esta etapa. Este trabajo representa el resultado de un gran esfuerzo y marca el comienzo de mi carrera profesional.

*José Alejandro Masache Neira.*

## Índice de contenidos

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Carta de autorización</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de contenidos</b> .....	<b>vii</b>
Índice de tablas.....	<b>x</b>
Índice de Figuras .....	<b>xii</b>
Índice de Anexos.....	<b>xiv</b>
Simbología: .....	<b>xv</b>
<b>1. Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Resumen</b> .....	<b>2</b>
Abstract.....	3
<b>3. Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Marco Teórico</b> .....	<b>6</b>
4.1. Importancia de la iluminación en Túneles.....	6
4.2. Propiedades ópticas de los materiales.....	6
4.2.1. Reflexión .....	7
4.2.2. Transmisión.....	8
4.2.3. Absorción .....	8
4.2.4. Refracción .....	8
4.3. Conceptos relacionados a iluminación .....	9
4.3.1. Vida útil.....	9
4.3.2. Eficacia Luminosa.....	9
4.3.3. Radián .....	9
4.3.4. Estereorradián .....	9
4.3.5. Lumen .....	9
4.3.6. Lux .....	9
4.3.7. Candela.....	9
4.3.8. Flujo luminoso .....	10
4.3.9. Intensidad luminosa .....	10

4.3.10. Iluminancia.....	10
4.3.11. Luminancia.....	10
4.3.12. Orientación visual .....	10
4.3.13. Iluminación de emergencia .....	10
4.3.14. Iluminación Nocturna.....	11
4.3.15. Contraste .....	11
4.3.16. Uniformidad General y Longitudinal.....	11
4.3.17. Curvas de distribución fotométrica .....	12
4.3.18. Curvas Isocandelas.....	12
4.3.19. Curvas Isolux .....	13
4.3.20. Curvas Isoluminancias .....	14
4.4. Diferentes tipos de sistemas de iluminación utilizados en túneles .....	14
4.4.1. Alumbrado simétrico.....	14
4.4.2. Alumbrado asimétrico.....	15
4.5. Componentes de alumbrado público.....	15
4.5.1. Luminarias.....	15
4.6. Conceptos Relacionados a Túneles.....	17
4.6.1. Zonas de un túnel. ....	17
4.7. Conceptos relacionados al tráfico .....	19
4.7.1. Calzada.....	19
4.7.2. Carril .....	19
4.7.3. Distancia de seguridad .....	19
4.7.4. Flujo de tráfico .....	21
4.8. Normativas y regulaciones aplicables.....	21
4.9. Tipos de lámparas y utilizadas en sistemas de iluminación para túneles .....	21
4.9.1. Lámparas de vapor de sodio a alta presión .....	21
4.9.2. Tecnologías LED y su aplicación en sistemas de iluminación para túneles .....	21
4.10. Consideraciones de seguridad en sistemas de iluminación para túneles .....	22
4.10.1. Control de deslumbramiento y efectos visuales.....	22
4.11. Factor de Mantenimiento .....	25
4.12. Sistemas de control .....	27
4.13. Iluminación en cada sección de un túnel .....	28
4.13.1. Zona umbral luminancia $L_{th}$ .....	28



4.13.2. Luminancia en la zona de transición Ltr .....	32
4.13.3. Luminancia en la zona interior.....	32
4.13.4. Luminancia en la zona de salida .....	34
4.14. Eficiencia energética en Instalación de alumbrado vial y Ornamental.....	34
<b>5. Metodología.....</b>	<b>37</b>
5.1. Área de estudio .....	37
5.2. Equipos y Materiales .....	37
5.3. Procedimiento .....	38
5.3.1. Primer Objetivo .....	38
5.3.2. Segundo Objetivo.....	39
5.4. Procesamiento y análisis de datos.....	40
5.4.1. Parámetros fotométricos de diseño .....	40
5.4.2. Procedimiento para el dimensionamiento de sistemas de iluminación.....	41
5.4.3. Recopilación de información del Túnel de los Ahorcados .....	45
5.4.4. Distancia De Seguridad.....	47
5.4.5. Cálculo de luminancia requerida en la entrada del túnel .....	47
5.4.6. Nivel de iluminancia Nocturna .....	58
5.4.7. Selección De Luminarias .....	61
5.4.8. Simulación en Software .....	62
5.4.9. Evaluación de la eficiencia de la instalación.....	73
<b>6. Resultados .....</b>	<b>76</b>
<b>7. Discusión .....</b>	<b>78</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>79</b>
<b>9. Recomendaciones .....</b>	<b>80</b>
<b>10. Bibliografía .....</b>	<b>81</b>
<b>11. Anexos .....</b>	<b>83</b>

## Índice de tablas:

<b>Tabla 1.</b> Distancia de seguridad. ....	20
<b>Tabla 2.</b> Factores de depreciación de las luminarias (FDLU). ....	26
<b>Tabla 3.</b> Factores de depreciación de las superficies del recinto (FDSR). ....	27
<b>Tabla 4.</b> Niveles de velo. ....	29
<b>Tabla 5.</b> Ángulos de apertura de cada anillo. ....	30
<b>Tabla 6.</b> Ejemplos de luminancias en portales de túnel ....	31
<b>Tabla 7.</b> Valores de luminancia en cd / m <sup>2</sup> en la zona interior (túneles largos). ....	33
<b>Tabla 8.</b> Valores de luminancia en cd / m <sup>2</sup> en la segunda parte de la zona interior (túneles muy largos). ....	33
<b>Tabla 9.</b> Clasificación del flujo de tráfico. ....	34
<b>Tabla 10.</b> Valores de eficiencia energética de referencia. ....	35
<b>Tabla 11.</b> Clasificación. ....	36
<b>Tabla 12.</b> Datos del Túnel de los Ahorcados. ....	46
<b>Tabla 13.</b> Resultados de la evaluación Sección 1, anillo 6. ....	52
<b>Tabla 14.</b> Cálculo detallado de iluminancia de velo equivalente. ....	53
<b>Tabla 15.</b> Continuación. ....	54
<b>Tabla 16.</b> Continuación. ....	55
<b>Tabla 17.</b> Tabla de resultados de luminancia calculada. ....	56
<b>Tabla 18.</b> Tabla de resultados de luminancia calculada delante del ojo. ....	57
<b>Tabla 19.</b> Tabla de mediciones realizadas. ....	60
<b>Tabla 20.</b> Valores de las mediciones realizadas. ....	61
<b>Tabla 21.</b> Resultados de la medición realizada. ....	61
<b>Tabla 22.</b> Resultados de la simulación Diurna. ....	70
<b>Tabla 23.</b> Resultados de uniformidad longitudinal. ....	70
<b>Tabla 24.</b> Simulación Nocturna. ....	72

<b>Tabla 25.</b> Simulación uniformidad longitudinal Nocturna.....	72
<b>Tabla 26.</b> Etapas de Iluminación por protocolo 1-10V. ....	73
<b>Tabla 27.</b> Resultados de la eficiencia energética.....	75
<b>Tabla 28.</b> Parámetros fotométricos establecidos por la norma.....	76
<b>Tabla 29.</b> Resultados del estudio Fotométrico. ....	76
<b>Tabla 30.</b> Resultados del estudio realizado en el Túnel de los Ahorcados.....	77

## Índice de Figuras:

<b>Figura 1.</b> Ejemplo de reflexión, refracción y absorción.....	6
<b>Figura 2.</b> Tipos de reflexión.....	7
<b>Figura 3.</b> Tipos de transmisión.....	8
<b>Figura 4.</b> Ejemplo de curva de distribución fotométrica simétrica.....	12
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de curvas isocandelas.....	13
<b>Figura 6.</b> Curvas Isolux.....	13
<b>Figura 7.</b> Curvas Isoluminancias.....	14
<b>Figura 8.</b> Distribución de intensidad luminosa en sistema simétrico.....	14
<b>Figura 9.</b> Distribución de intensidad luminosa en sistema asimétrico.....	15
<b>Figura 10.</b> Luminarias con repartición Cut-off.....	16
<b>Figura 11.</b> Luminarias con repartición semi Cut-off.....	16
<b>Figura 12.</b> Luminarias con repartición non Cut,off.....	17
<b>Figura 13.</b> Diagrama de iluminación Diurna en túneles.....	17
<b>Figura 14.</b> Zonas que componen un túnel.....	18
<b>Figura 15.</b> Diagrama del Coeficiente de fricción longitudinal.....	20
<b>Figura 16.</b> Diagrama del efecto Flicker.....	24
<b>Figura 17.</b> Diagrama polar que muestra zonas en las que la luminancia produce cantidades iguales de luz parásita en el centro.....	30
<b>Figura 18.</b> Evolución de la luminancia a lo largo del túnel.....	32
<b>Figura 19.</b> Ubicación del lugar de estudio.....	37
<b>Figura 20.</b> Diagrama de bloques para el dimensionamiento de Sistemas de Iluminación.....	38
<b>Figura 21.</b> Diagrama de bloques para dimensionamiento fotométrico Túnel de los Ahorcados.....	39
<b>Figura 22.</b> Ilustración de toma de fotografía.....	42
<b>Figura 23.</b> Relación trigonométrica para determinar el diámetro central.....	42

<b>Figura 24.</b> Determinación del coeficiente de fricción longitudinal.....	47
<b>Figura 25.</b> Diagrama de iluminación Diurna en túneles cortos.....	48
<b>Figura 26.</b> Fotografía del Túnel de los Ahorcados.....	48
<b>Figura 27.</b> Diagrama polar sobrepuesto en la fotografía de evaluación.....	49
<b>Figura 28.</b> Perfil de la fotografía montada en el diagrama polar.....	50
<b>Figura 29.</b> Exportación del archivo TunelDeLosAhorcados.....	50
<b>Figura 30.</b> Evaluación Sección 1 Anillo 6.....	51
<b>Figura 31.</b> Evaluación para todo el diagrama.....	51
<b>Figura 32.</b> Disposición de los puntos de medición.....	59
<b>Figura 33.</b> Aplicación usada en la medición. ....	60
<b>Figura 34.</b> Características Fotométricas de la luminaria seleccionada.....	62
<b>Figura 35.</b> Diseño 2D en el Software AutoCAD.....	63
<b>Figura 36.</b> Importación del archivo 2D a Revit.....	63
<b>Figura 37.</b> Configuración del área de trabajo Revit. ....	64
<b>Figura 38.</b> Modelado de muros, berma y calzada. ....	64
<b>Figura 39.</b> Modelado del techo del túnel.....	65
<b>Figura 40.</b> Exportación del modelo 3D en formato IFC. ....	65
<b>Figura 41.</b> Importación del archivo TúnelAhorcados.ifc. ....	66
<b>Figura 42.</b> Modelado 3D del Túnel en el Software DIALux. ....	66
<b>Figura 43.</b> Configuración de la malla de medición Carril 1.....	67
<b>Figura 44.</b> Configuración de la malla de medición Pared Carril 1.....	67
<b>Figura 45.</b> Importación del archivo fotométrico de luminaria al Software.....	68
<b>Figura 46.</b> Configuración de la disposición de las luminarias en el Túnel. ....	69
<b>Figura 47.</b> Configuración de malla uniformidad longitudinal.....	70
<b>Figura 48.</b> Configuración de luminarias para simulación. ....	71
<b>Figura 49.</b> Luminancímetro para sistema de control.....	73

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1.</b> Manual de operación Luxómetro UT383 BT (Bluetooth Versión).....	83
<b>Anexo 2.</b> Características de la Cámara Digital. ....	85
<b>Anexo 3.</b> Macros para cálculo de nivel de iluminancia. ....	87
<b>Anexo 4.</b> Características y medidas de las luminarias seleccionadas. ....	89
<b>Anexo 5.</b> Especificaciones Driver IzyHub.....	91
<b>Anexo 6.</b> Fotografías de la medición de la Iluminación Nocturna. ....	93
<b>Anexo 7.</b> Fotografías de las mediciones realizadas del Túnel de los Ahorcados. ....	96
<b>Anexo 8.</b> Certificado de traducción del resumen. ....	98

**Simbología:**

$C$	Contraste [%]
$L_o$	Luminancia del Objeto [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_b$	Luminancia del Fondo [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$U_o$	Uniformidad Global [%]
$U_l$	Uniformidad Longitudinal [%]
$L_{min}$	Luminancia mínima [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{pro}$	Luminancia promedio [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{máx}$	Luminancia máxima [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$D_s$	Distancia de seguridad [m]
$v_o$	Velocidad al momento de aplicar los frenos [Km/h]
$f_l$	Fricción longitudinal
$p$	Pendiente longitudinal [°]
$T_l$	Incremento del Umbral en una instalación de alumbrado público [%]
$L_r$	Promedio de luminosidad de la superficie de la carretera [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_v$	Luminancia de velo [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$F_m$	Factor de mantenimiento
$FDFL$	Factor de depreciación del flujo luminoso
$FSL$	Factor de supervivencia de las lámparas
$FDLU$	Factor de depreciación de las luminarias
$FDSR$	Factor de depreciación de las superficies del recinto
$I_r$	Índice de recinto
$L$	Longitud de recinto [m]
$A$	Anchura de recinto [m]
$H$	Altura de montaje de luminarias [m]
$L_{o,p}$	Luminancia percibida del objeto [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$\tau_{ws}$	Transmitancia del parabrisas
$\tau_{atm}$	Transmisividad atmosférica
$L_{atm}$	Luminancia de velo atmosférico [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{ws}$	Luminancia de velo parabrisas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$L_{seq}$	Luminancia de velo total equivalente [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{r,p}$	Luminancia percibida de la carretera [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{ije}$	Luminancia de cada sección frente al ojo [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{ij}$	La luminancia media medida fuera del coche, en frente al parabrisas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_{th}$	Luminancia de Umbral [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$W_T$	Ancho de abertura del túnel [m]
$C_m$	Contraste percibido mínimo requerido [%]
$\rho$	Factor de reflectancia
$q_c$	Coficiente de contraste revelador
$\varepsilon$	Eficiencia energética [ $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{lux}}{\text{KW}}$ ]
$S$	Superficie iluminada [ $\text{m}^2$ ]
$E_m$	Iluminancia media en servicio [lux]
$P$	Potencia activa [kW]
$I\varepsilon$	Índice de eficiencia energética
$\varepsilon_R$	Eficiencia energética de referencia [ $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{lux}}{\text{KW}}$ ]
$ICE$	Índice de consumo energético



## **1.Título**

**Sistemas de Iluminación para Túneles.**

## 2. Resumen

El presente trabajo de investigación permite conocer los parámetros fotométricos que se deben cumplir para el correcto dimensionamiento de los sistemas de iluminación para túneles, así mismo el procedimiento adecuado a seguir, con la finalidad de cumplir con los parámetros definidos en normativas internacionales y así garantizar la seguridad de los usuarios que hacen uso de estos medios para trasladarse de un lugar a otro. Mediante una metodología analítica de los diferentes métodos de cálculos para determinar los niveles de luminancia requeridos en cada una de las secciones que componen un túnel, se desarrolló una guía de cálculo que proporciona a los proyectistas las herramientas necesarias para dimensionar estos sistemas de manera correcta y eficiente. Para llevar a cabo las simulaciones fotométricas, se utilizaron herramientas de softwares especializados que permitieron evaluar la distribución de luz de las luminarias seleccionadas y su posición dentro del túnel, además de analizar el diseño planteado. Para la validación de la guía planteada se aplicó el procedimiento a un caso real, en este caso al Túnel de los Ahorcados, ubicado en la ciudad de Loja, las simulaciones fotométricas se llevaron a cabo en el software DIALux, las luminarias se seleccionaron del fabricante Schröder, las cuales cumplen con los requerimientos constructivos para este tipo de ambientes. Los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con los parámetros fotométricos planteados por la normativa CIE 88:2004, concluyendo así que los resultados obtenidos de la guía plantean son mayores o iguales a los requerimientos establecidos en la norma.

***Palabras claves:*** *Parámetros fotométricos, simulaciones fotométricas, secciones de un túnel.*

## **Abstract**

The present research allows to understand the photometric parameters that must be met for the proper design of tunnel lighting systems, as well as the appropriate procedure to follow, in order to comply with the parameters defined in international regulations and ensure people's safety who use these means to move from one place to another. Through an analytical methodology of different calculation methods to determine the required luminance levels in each of the sections that compose a tunnel, a calculation guide was developed that provides designers with the necessary tools to correctly and efficiently design these systems. To carry out the photometric simulations, specialized software tools were utilized to evaluate the light distribution of the selected luminaires and their positioning within the tunnel, as well as to analyze the proposed design. To validate the proposed guide, the procedure was applied to a real case, specifically to the "Túnel de los Ahorcados" located in the city of Loja. Photometric simulations were conducted using the DIALux software, and luminaires from the manufacturer Schröder were chosen, meeting the constructive requirements for this type of environment. The results obtained from the simulations were compared with the photometric parameters set by the CIE 88:2004 standard, concluding that the results obtained from the guide are greater or equal to than the requirements established in the standard.

**Key words:** *Photometric parameters, photometric simulations, tunnel sections.*

### 3.Introducción

La iluminación de túneles es un aspecto crítico en la seguridad vial, ya que una iluminación adecuada puede mejorar significativamente la visibilidad y reducir el riesgo de accidentes. La iluminación de túneles debe proporcionar una luminancia uniforme y adecuada en toda la longitud del túnel, lo que permite a los conductores ver claramente la carretera y cualquier obstáculo o peligro potencial ([CIE], 2004).

El tema de sistemas de iluminación para túneles es muy importante ya que la iluminación adecuada en estos espacios es fundamental para garantizar la seguridad vial y el confort de los usuarios. El planteamiento del problema se enfoca en la falta de una guía metodología para el dimensionamiento de sistemas de iluminación en túneles vehiculares, lo que puede generar incertidumbre en los profesionales encargados del diseño. Sin embargo, existen normas internacionales que pueden ser utilizadas como referencia para asegurar un dimensionamiento apropiado y garantizar una transitabilidad segura para los usuarios ([SCT], 2016).

La investigación se ha centrado en los profesionales responsables del diseño e implementación del sistema de iluminación de túneles. A través de este estudio, se espera que estos profesionales adquieran un profundo conocimiento sobre los estándares internacionales que garantizan la seguridad vial y la comodidad de los usuarios. Según la normativa ([RTE], 2012) “el objeto es establecer los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación pública, garantizando niveles y calidad de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados por la instalación y uso de sistemas de iluminación” (p. 2). De esta manera el sector público se verá beneficiado debido a que se dimensionaran dichos sistemas de manera más eficiente.

En este proyecto de investigación se lleva a cabo el planteamiento de una guía metodología para el dimensionamiento de los sistemas de iluminación para túneles y su aplicación en el Túnel de los Ahorcados. A pesar de la existencia de un procedimiento establecido para el dimensionamiento de estos sistemas en ([RTE], 2012), se ha identificado una carencia importante en este aspecto: La ausencia de un procedimiento claro y conciso que pueda guiar eficazmente al proyectista en la tarea de dimensionar de forma eficiente dichos sistemas.

El objetivo general de esta investigación es el de “Desarrollar un procedimiento que permita dimensionar sistemas de iluminación para túneles”.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir fotometrías adecuadas para iluminar túneles.
- Validar el procedimiento en un caso de estudio.

Es por ello, que la primera parte de este documento se centra en la revisión bibliográfica que abarca los conceptos relacionados a iluminación y túneles. Esto incluye el análisis de las fotometrías adecuadas propuestas por normativas internacionales que se deben cumplir en el dimensionamiento de este tipo de sistemas, los diferentes métodos de cálculos para determinar los niveles de iluminancia requeridos en cada una de las secciones que componen un túnel.

En la segunda parte se describe el procedimiento planteado para el desarrollo de la guía de cálculo que ayudará a dimensionar estos sistemas de manera correcta, la cual permite establecer primeramente el nivel de iluminancia requerido en un túnel en estudio y segundo la simulación fotométrica en un software especializado. Además, se describe el procedimiento de la aplicación de la guía planteada al Túnel de los ahorcados ubicado en la ciudad de Loja, el nivel requerido en este caso de estudio y su simulación fotometría en el software DIALux.

En la tercera parte, se presentan los resultados de la investigación, la discusión de la guía de cálculo planteada, las conclusiones derivadas de la validación del procedimiento planteado en el caso de estudio y las recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas. Además, se incluyen los anexos que documentan la aplicación de la guía en un caso real.

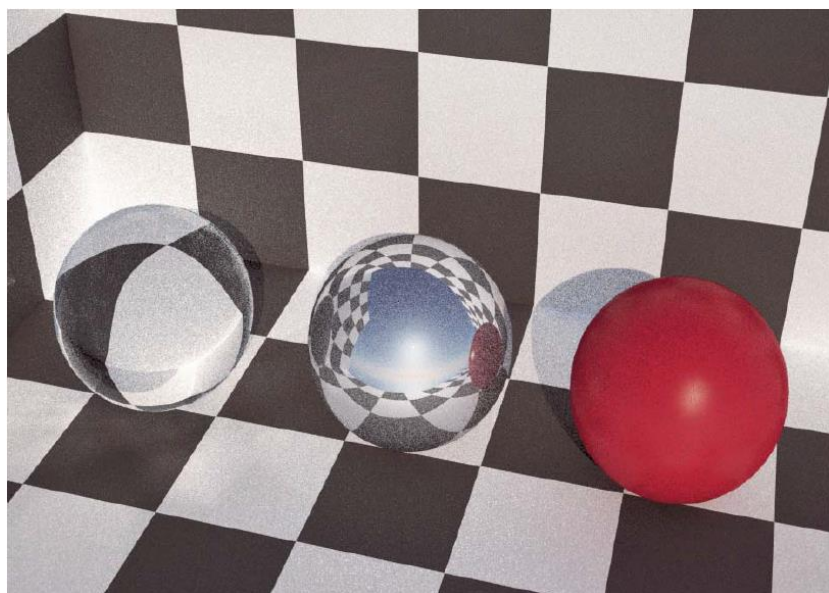
## 4.Marco Teórico

### 4.1.Importancia de la iluminación en Túneles

La infraestructura vial nacional depende en gran medida de los túneles de las carreteras, lo que enfatiza su importancia. La construcción y la determinación de las dimensiones afectan en gran medida la seguridad y los costos de operación. La iluminación sirve como un aspecto crítico en las medidas de seguridad del túnel. El objetivo de la iluminación de túneles de carretera es permitir un flujo de tráfico seguro y cómodo incluso durante el día, cuando la iluminación contrasta con el entorno exterior. Los usuarios de la carretera encuentran comodidad en la iluminación del túnel y logran la máxima seguridad. Además, durante el día, los conductores utilizan el mismo sistema de iluminación (Secretaría De Comunicaciones y Transporte [SCT], 2016, pp. 2-3).

### 4.2.Propiedades ópticas de los materiales

Reflejar o absorber la luz es un rasgo que poseen materiales específicos. La característica que determina si un artículo es opaco o transparente determinará esta capacidad. Si es opaco, parte de la luz se absorbe y el resto se refleja. Por el contrario, si el objeto es transparente, se absorbe parte de la luz, mientras que el resto atraviesa el objeto (ver **Figura 1**) (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, [SCT], 2015, p. 38).



**Figura 1.** Ejemplo de reflexión, refracción y absorción.

*Fuente:* ([SCT], 2015).

### 4.2.1. Reflexión

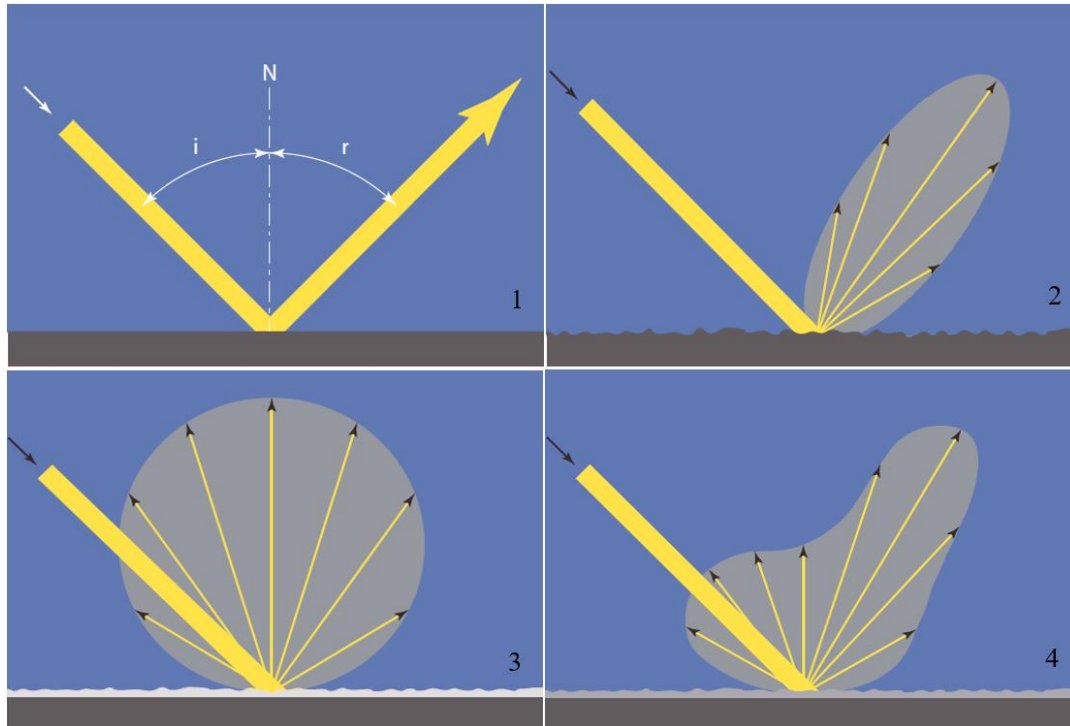
El fenómeno en el que las ondas de luz rebotan debido a la colisión con obstáculos o espejos. Debido al fenómeno de absorción, parte de la luz de colisión es absorbida por obstáculos. La cantidad de luz reflejada por un objeto depende de las propiedades reflectantes de la superficie, y existen 4 clasificaciones de reflexión (ver **Figura 2**):

Reflexión especular. - Ocurre cuando un rayo de luz que incide sobre un objeto perfectamente plano se refleja con un ángulo igual al ángulo de reflexión.

Reflexión compuesta, - Este fenómeno se produce cuando los rayos de luz impactan con una superficie irregular.

Reflexión difusa. - Evento en el cual la luz impacta en la cara externa de un cuerpo y esta se refleja en diferentes direcciones debido a la irregularidad de la misma, un ejemplo es un pizarrón, piso de baldosa, etc.

Reflexión mixta. -Acontecimiento intermedio entre difusa y especular, en el cual parte de la luz se refleja y la otra se difunde. Un ejemplo claro es la superficie sin pulir del cobre, entre otros ([SCT], 2015, pp. 39-41).



**Figura 2.** Tipos de reflexión.

**Nota.** La imagen representa los tipos de reflexión cuando la luz choca con la superficie de un objeto, 1. Reflexión Especular, 2. Reflexión Compuesta, 3. Reflexión Difusa y 4. Reflexión Mixta. Adaptada de ([SCT], 2015).

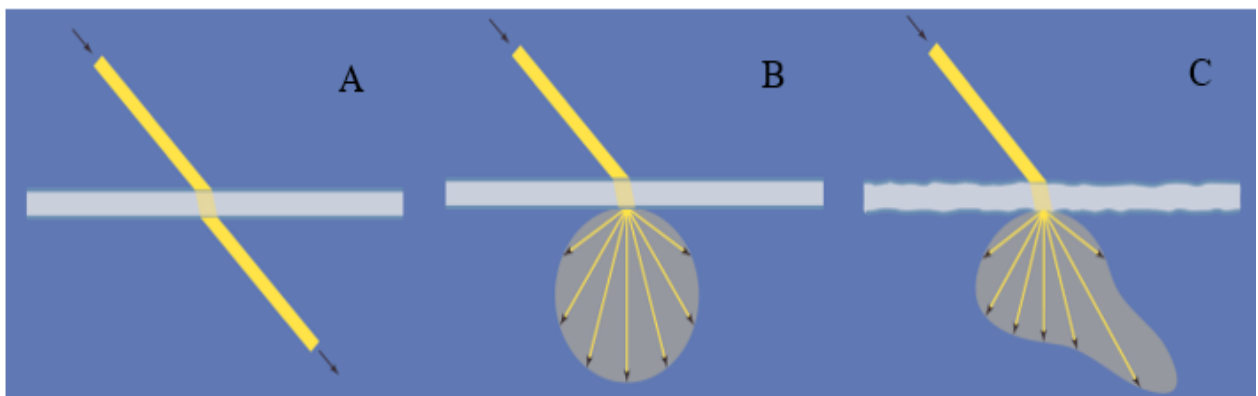
### 4.2.2. Transmisión

Se produce en cuerpos transparentes o translúcidos, lo cual parte de la luz que atraviesa el objeto es modificada por refracción, y la otra parte es absorbida, este fenómeno se lo denomina transmitancia del material. Existen tres tipos de transmitancia (ver **Figura 3**):

Transmisión regular. –Cuando la luz que atraviesa el objeto no se desvía, esta propiedad la tienen los objetos transparentes.

Transmisión difusa. –Cuando la luz que atraviesa el objeto, sale en diferentes direcciones, esta propiedad la tienen los cuerpos translúcidos.

Transmisión mixta. –Fenómeno intermedio entre la difusa y regular, un ejemplo es el vidrio soplado ([SCT], 2015, pp. 43-45).



**Figura 3.** Tipos de transmisión.

**Nota.** La figura representa los tipos de transmisión de luz, que atraviesa un objeto, A. Regular, B. Difusa, C. Mixta. Adaptada de ([SCT], 2015).

### 4.2.3. Absorción

Fenómeno por el cual la energía radiante se transforma en energía en forma de calor generalmente, esta característica la poseen los cuerpos con una superficie no completamente reflectante ni tampoco transparentes, esta propiedad en los cuerpos se denomina absorción del material ([SCT], 2015, p. 45).

### 4.2.4. Refracción

Fenómeno por el cual el rayo de luz es desviado al atravesar dos superficies separadas entre sí, esto se debe a la velocidad de propagación en cada una de las superficies ([SCT], 2015, p.45).



### **4.3. Conceptos relacionados a iluminación**

#### ***4.3.1. Vida útil***

La vida útil de una lámpara concluye cuando la lámpara emite un 70% de su luz, según los fabricantes las lámparas led tiene una vida útil de 50 000 horas en comparación con las convencionales halógenas con 2 000 horas (Cansinos, 2015, p. 37).

#### ***4.3.2. Eficacia Luminosa***

Indica el flujo que emite una fuente de luz por unidad de potencia eléctrica utilizada, se expresa con la letra  $\eta$ , generalmente se expresa en (lm/W). Siendo las lámparas LED las más eficientes (Cansinos, 2015, pp.41-42).

La normativa ([RTE], 2012) establece: “Para proyectos de alumbrado público deben tener un conjunto óptico con una eficiencia de por lo menos el 60% del flujo luminoso” (p.28).

#### ***4.3.3. Radián***

El Radián es unidad de medida angular en una superficie, representa la relación entre la longitud del arco y el radio de la circunferencia ([SCT], 2015, p.31).

#### ***4.3.4. Estereorradián***

El estereorradián es unidad de medida de un volumen, que se relaciona a una corona esférica cuya superficie es igual al cuadrado del radio ([SCT], 2015, p. 32).

#### ***4.3.5. Lumen***

Unidad para medir la luz, evaluando la cantidad de flujo luminoso que emana una fuente y posee una intensidad luminosa constante equivalente a una candela (Reglamento Técnico Ecuatoriano [RTE], 2012, p. 6).

#### ***4.3.6. Lux***

El lux es una unidad de medida según ([RTE], 2012) “El lux es la unidad de medida de iluminancia en el Sistema Internacional (SI). Un lux es igual a un lumen por metro cuadrado ( $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ )” (p. 7).

#### ***4.3.7. Candela***

Se refiere a la intensidad de la luz emitida por una fuente de luz en una dirección determinada y es igual a un lumen por estereorradián ([RTE], 2012, p. 3).

#### ***4.3.8. Flujo luminoso***

Es la energía radiante emitida por un objeto en forma de luz que es visible al ojo humano. Se indica con el símbolo ( $\Phi$ ) y se mide en lúmenes (lm) (El Directorio de la Agencia De Regulación y Control De Electricidad [ARCONEL], 2018, p. 5).

#### ***4.3.9. Intensidad luminosa***

Se define como el flujo luminoso que emite una fuente de luz en una dirección específica por unidad de ángulo sólido ([ARCONEL], 2018, p. 5).

#### ***4.3.10. Iluminancia***

La iluminancia se refiere a la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie determinada. Se representa con el símbolo (E) y se expresa en unidades de lux (lx) o lúmenes por metro cuadrado (lm/m<sup>2</sup>). La iluminancia es una medida importante para determinar la cantidad de luz necesaria para iluminar adecuadamente un espacio o superficie ([ARCONEL], 2018, p. 5).

#### ***4.3.11. Luminancia***

La luminancia se refiere a la relación entre la intensidad luminosa y la superficie vista por el ojo en una dirección específica. Se representa con el símbolo (L) y se mide en unidades de candelas por metro cuadrado (cd/m<sup>2</sup>). La luminancia es una medida importante para determinar la apariencia visual de un objeto o superficie, y es especialmente útil en aplicaciones de iluminación y visualización ([ARCONEL], 2018, p. 5).

#### ***4.3.12. Orientación visual***

Señaléticas de información para los usuarios acerca del curso de la carretera dentro del túnel (International Commission On Illumination [CIE], 2004, p. 6).

#### ***4.3.13. Iluminación de emergencia***

En caso de fallo del suministro eléctrico normal que alimenta el sistema de iluminación, se recomienda utilizar un sistema de alimentación ininterrumpida para garantizar un suministro suficiente de luminarias en la instalación. Por convención, la "iluminación de emergencia" es parte de la Etapa 1, que es el nivel nocturno normal para todo el túnel. Por ejemplo, una configuración de emergencia puede incluir: Selección de lámparas de los accesorios del sistema para formar una matriz lineal simétrica y distribuida de dispositivos de iluminación de emergencia alimentados por una fuente de alimentación ininterrumpida. La iluminación media recomendada para el alumbrado de emergencia es de al menos 10 lx, con una iluminación mínima de 2 lx en todo el túnel ([CIE], 2004, p. 20).

#### **4.3.14. Iluminación Nocturna**

Si el túnel está situado en una vía iluminada, la calidad de la iluminación del túnel debe coincidir al menos con el nivel, la uniformidad y el deslumbramiento de la vía de acceso. Si el túnel es parte de un camino de entrada no iluminado, la luminosidad media de la superficie interior del camino de entrada no debe ser inferior a 1 cd/m<sup>2</sup>, con una uniformidad total de al menos el 40 % y una uniformidad longitudinal de al menos el 60 % ([CIE], 2004, p. 20).

#### **4.3.15. Contraste**

Según la ([CIE]2004) “el contraste entre un objeto relativamente pequeño con contornos nítidos y su fondo (inmediato) generalmente se define **Ecuación 1**” (p. 6).

$$C = 100 * \frac{L_o - L_b}{L_b} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$C$ : Contraste [%]

$L_o$ : Luminancia del Objeto [cd/m<sup>2</sup>]

$L_b$ : Luminancia del Fondo [cd/m<sup>2</sup>]

#### **4.3.16. Uniformidad General y Longitudinal**

Debe proporcionar una buena uniformidad de brillo en calzadas y paredes de hasta 2 m. La parte inferior del muro actúa como telón de fondo del tráfico, al igual que la carretera. Por lo tanto, ambos deben ser considerados de la misma manera. En condiciones de túnel limpio, se recomienda una relación mínima a media de 0,4 para superficies de carreteras y paredes de hasta 2 m. Se recomienda una uniformidad longitudinal de 0.6 para carreteras a lo largo del centro de cada carril. Estos valores de uniformidad deben verificarse para todos los pasos de atenuación del dispositivo de iluminación. Además, en la región de transición y en la segunda mitad de la región de umbral (si existe una región de salida), la uniformidad de luminancia se calcula y mide en la parte central de cada paso, reemplazando la curva de variación ([CIE], 2004, p.18).

Según ([RTE], 2012, p. 85) la **Ecuación 2** permite calcular la uniformidad General y la **Ecuación 3** permite calcular la uniformidad Longitudinal.

$$U_o = \frac{L_{min}}{L_{pro}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$U_L = \frac{L_{min}}{L_{m\acute{a}x}}$$

**Ecuación 3**

Donde:

$U_o$ : Uniformidad Global [%]

$U_l$ : Uniformidad Longitudinal [%]

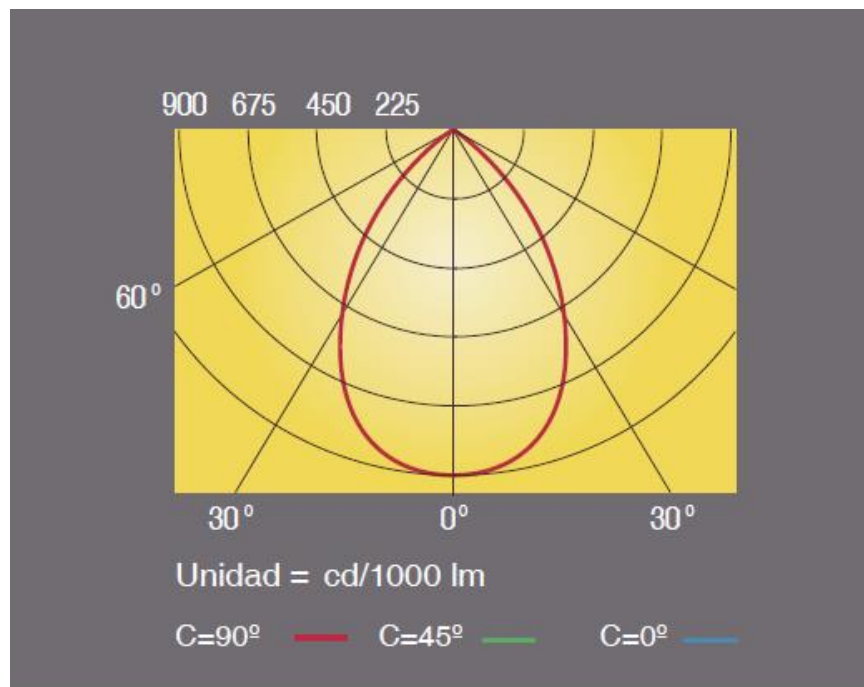
$L_{min}$ : Luminancia mínima [cd/m<sup>2</sup>]

$L_{pro}$ : Luminancia promedio [cd/m<sup>2</sup>]

$L_{m\acute{a}x}$ : Luminancia mımima [cd/m<sup>2</sup>]

#### 4.3.17. Curvas de distribución fotométrica

Diagramas que permiten visualizar la distorsión del flujo luminoso, es decir su volumen dependiendo de las características del reflector. En la **Figura 4** siguiente se representa la distorsión del flujo luminoso, producido por un reflector ([SCT], 2015, p. 54).



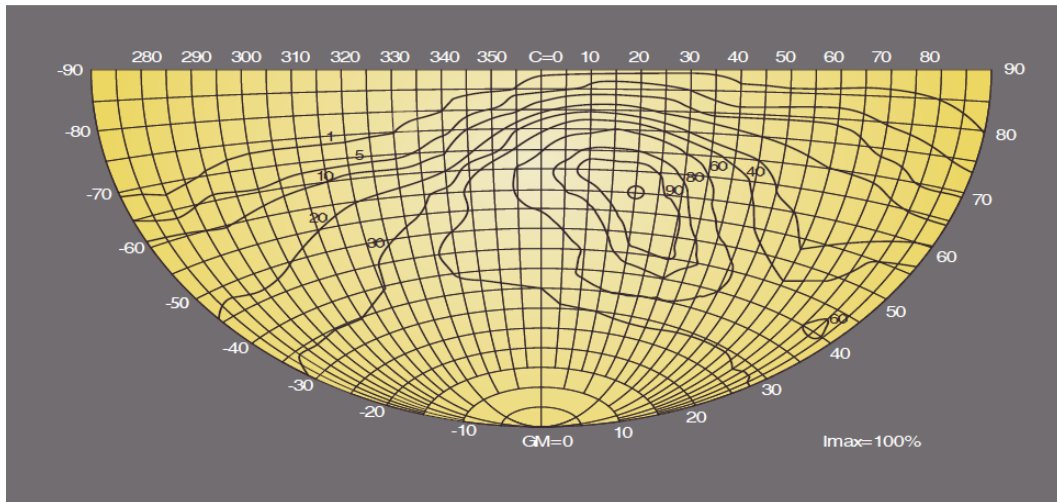
**Figura 4.** Ejemplo de curva de distribución fotométrica simétrica.

**Nota:** La figura representa las curvas de distribución. Tomada de ([SCT], 2015).

#### 4.3.18. Curvas Isocandelas

Es una representación de la distribución del flujo luminoso más compleja (espacio tridimensional), y se requiere conocimiento suficiente para ser interpretada. Esta representación tiene como fundamento representar la luminaria en el centro de una esfera y conectando puntos

con la misma iluminancia, permitiendo observar la distribución de la luz en diferentes áreas (ver **Figura 5**) ([SCT], 2015, p. 56).

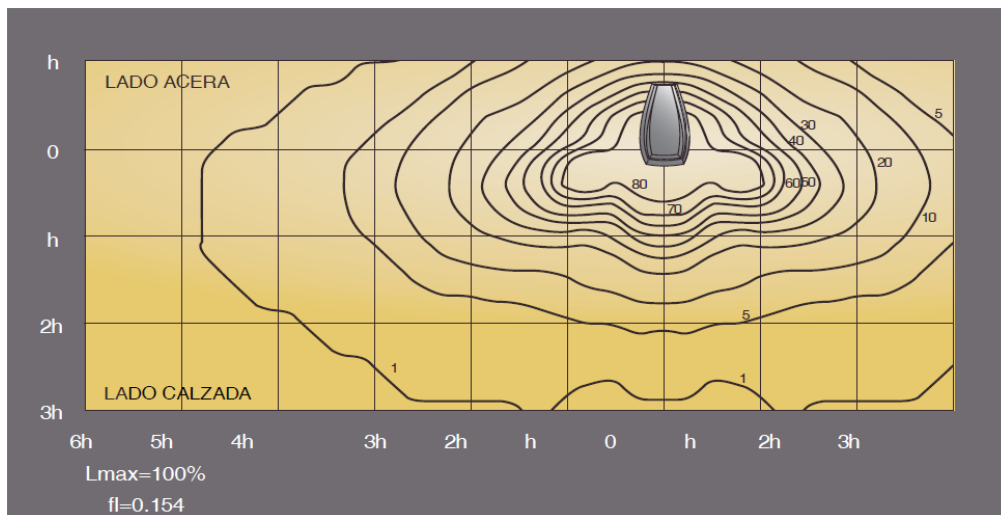


**Figura 5.** Ejemplo de curvas isocandelas.

*Nota:* La figura representa la distribución de curvas Isocandelas, las cuales son las más completas y complejas de interpretar. Tomada de ([SCT], 2015).

#### 4.3.19. Curvas Isolux

Representación de la distribución de iluminancia en una superficie, esta representación une puntos de la misma iluminancia dando lugar a las curvas isolux como se muestra en la **Figura 6**, esta iluminancia se mide en lux ([SCT], 2015, p. 56).

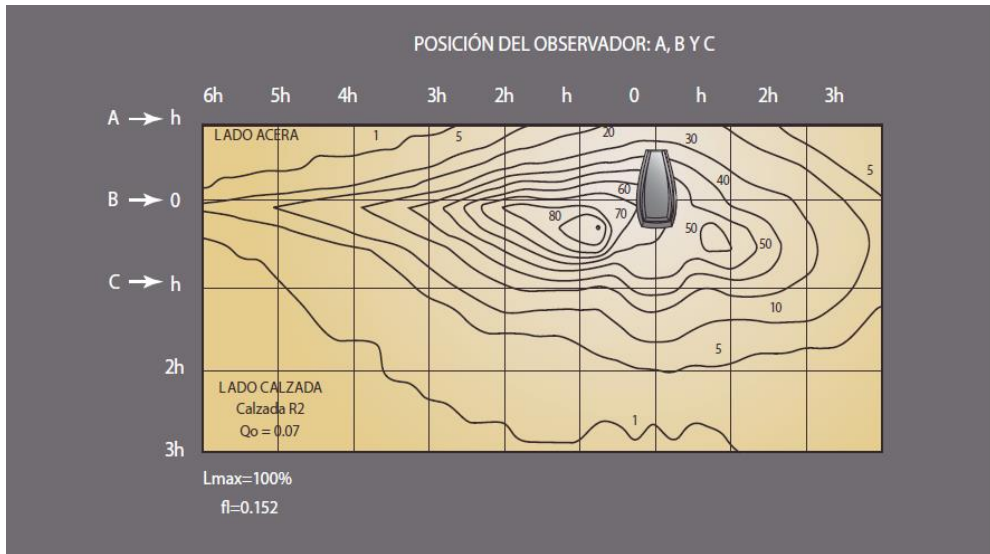


**Figura 6.** Curvas Isolux.

*Nota:* La figura muestra la distribución de curvas isolux las cuales permiten medir la distribución de luminancia en diferentes puntos. Tomada de ([SCT], 2015)

#### 4.3.20. Curvas Isoluminancias

Son curvas que representan el flujo luminoso reflejado en la dirección del observador y se mide en candelas por metro cuadrado (ver **Figura 7**) ([SCT], 2015, p. 58).



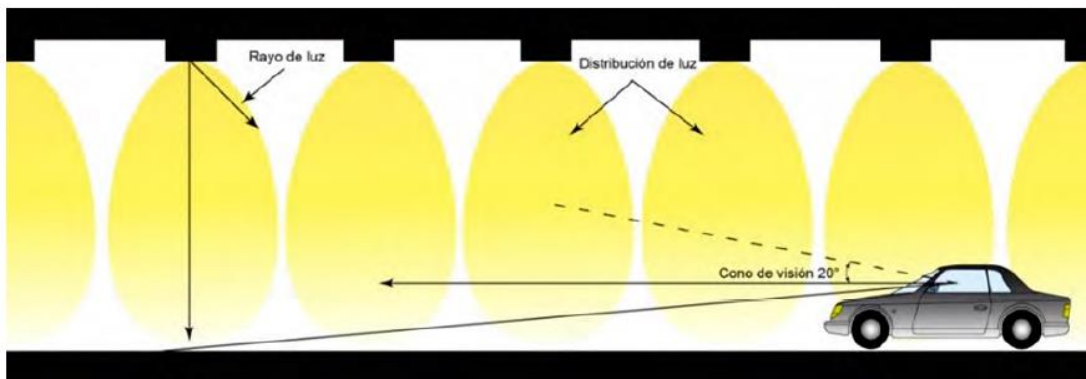
**Figura 7.** Curvas Isoluminancias.

**Nota:** La figura muestra la distribución de curvas isoluminancias las cuales permiten medir la distribución de luminancia en diferentes puntos vista desde un observador. Tomada de ([SCT], 2015).

#### 4.4. Diferentes tipos de sistemas de iluminación utilizados en túneles

##### 4.4.1. Alumbrado simétrico

El sistema simétrico es el más idóneo para iluminar el interior del túnel, siempre y cuando la velocidad de diseño no sea muy elevada, si los requerimientos de luminancia en la entrada del túnel superan las 200cd/m<sup>2</sup>, se debe usar el sistema asimétrico. La característica de este tipo de alumbrado es que presenta, una distribución de intensidad luminosa simétrica con respecto al plano normal a la dirección del tráfico (ver **Figura 8**) (Izquierdo, 2013, pp. 24-25).

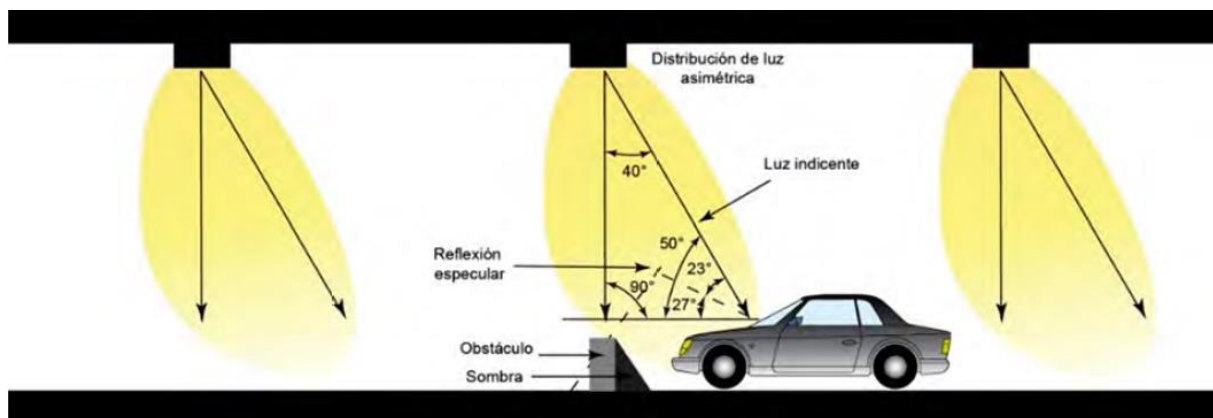


**Figura 8.** Distribución de intensidad luminosa en sistema simétrico.

*Fuente:* ([SCT], 2016).

#### 4.4.2. Alumbrado asimétrico

Este tipo de sistema se limita a situaciones en las que la velocidad de diseño es elevada y sólo debe aplicarse en la entrada del túnel debido a que su distribución de intensidad luminosa es contraria al flujo del tráfico. Aunque este sistema ofrece una mayor eficiencia y un beneficio económico, puede causar incomodidad visual al usuario. Es importante tener en cuenta que este tipo de sistema no es adecuado para túneles bidireccionales (ver **Figura 9**) (Izquierdo, 2013, p.25).



**Figura 9.** Distribución de intensidad luminosa en sistema asimétrico.

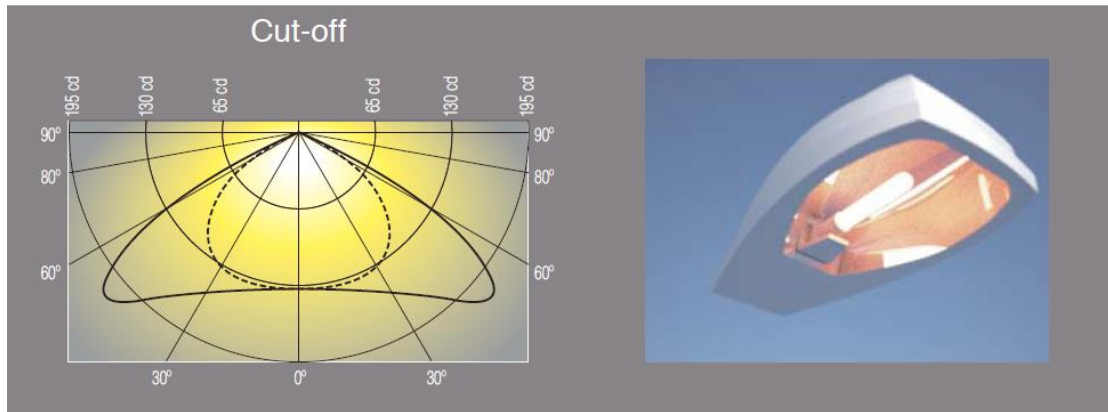
*Fuente:* ([SCT], 2016).

### 4.5. Componentes de alumbrado público

#### 4.5.1. Luminarias

Dispositivos que contienen todos los componentes para controlar la radiación luminosa, proteger las mismas y conectarlas al sistema de alimentación ([SCT], 2015, p. 97).

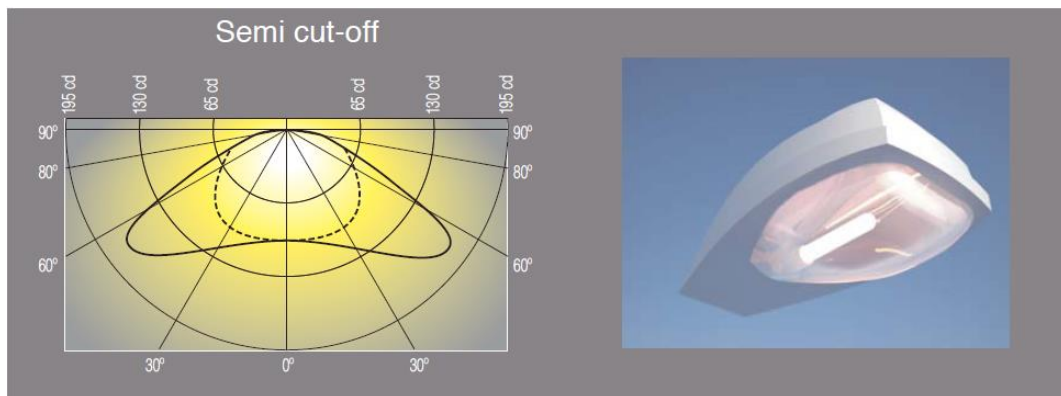
**Luminarias Con Repartición Cut-Off.** Curvas en las que el flujo luminoso está limitado por un ángulo mayor o igual a  $80^\circ$  en relación a la vertical descendente, generalmente se establece que esto no debe superar las 10 candelas por cada 1000 lúmenes. Estas características de la distribución de la luz emitida por una fuente, aseguran que la intensidad luminosa esté correctamente dirigida a la observación de los automovilistas **Figura 10** ([SCT], 2015, p. 97).



**Figura 10.** Luminarias con repartición Cut-off.

*Fuente:* ([SCT], 2015).

**Luminarias Con Repartición Semi Cut-Off.** Situación en la cual la distribución de la intensidad de luz se limita a un ángulo mayor o igual que  $80^\circ$  con respecto a la vertical descendente, dirección en la cual los automovilistas suelen observar. Generalmente esta intensidad luminosa no supera las 50 candelas por cada 1000 lúmenes (ver **Figura 11**) ([SCT], 2015, p. 98).

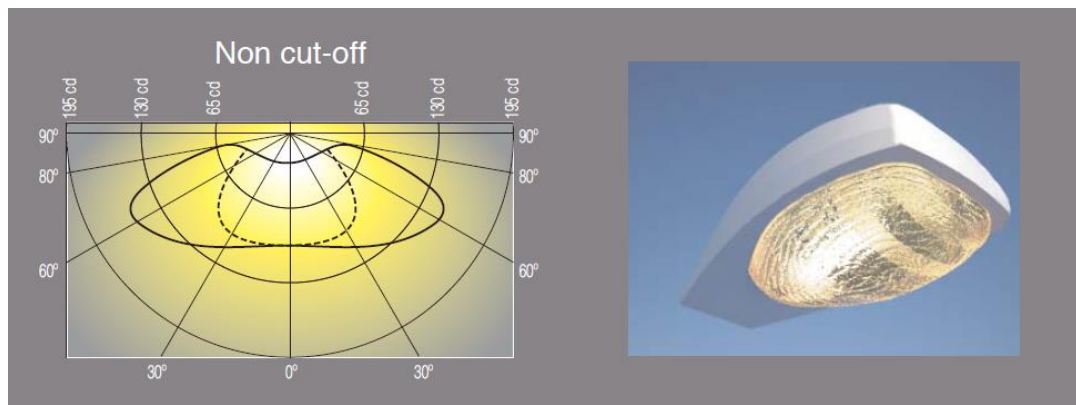


**Figura 11.** Luminarias con repartición semi Cut-off.

*Fuente:* (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015).

**Luminarias Con Repartición Non Cut-Off.** El tipo de luminarias con esta configuración no se recomienda instalar en vías principales debido a que se desperdicia flujo luminoso al espacio, y no se aprovecha la energía (Ver **Figura 12**) ([SCT], 2015, p. 99).



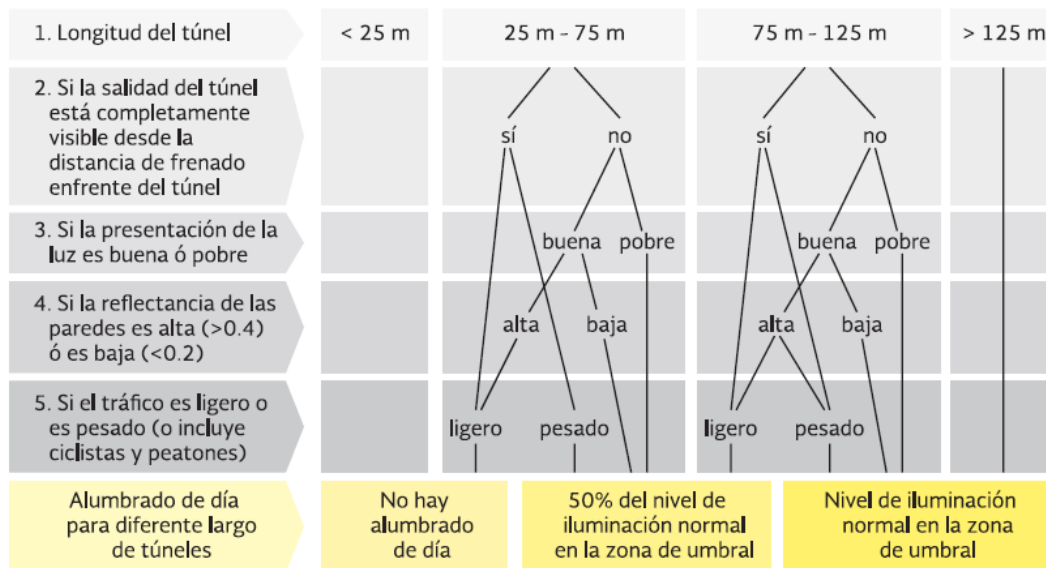


**Figura 12.** Luminarias con repartición non Cut,off.

*Fuente:* ([SCT], 2015).

#### 4.6. Conceptos Relacionados a Túneles

Según la normativa CIE 88:2004, los túneles generalmente se clasifican en túneles largos y túneles cortos, siendo la característica principal la longitud medida a lo largo del eje central del mismo. Existe una clasificación especial cuando el usuario no puede observar la salida del túnel, ubicado desde la entrada del mismo que se denomina túneles ópticamente largos y deben iluminar igual que los túneles largos, aunque su longitud sea corta. La distinción se puede realizar de acuerdo con el gráfico dado en la **Figura 13** ([CIE], 2004, p. 3).

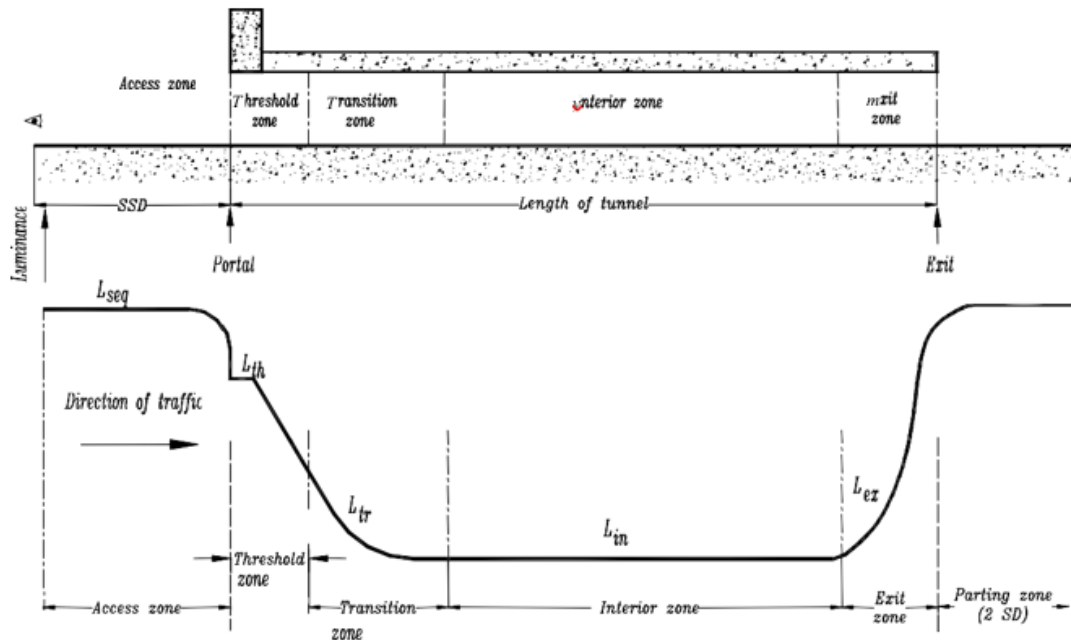


**Figura 13.** Diagrama de iluminación Diurna en túneles.

**Nota:** Diagrama para evaluar el porcentaje de iluminación diurna requerida en el túnel de estudio. Tomado de ([SCT], 2016).

##### 4.6.1. Zonas de un túnel.

Para la correcta iluminación, un túnel se divide en zonas (ver **Figura 14**):



**Figura 14.** Zonas que componen un túnel.

*Fuente:* ([CIE], 2004).

**Zona de Acceso.** Tramo de la vía a cielo abierto inmediatamente en frente del portal del túnel. La distancia de esta zona es igual a la distancia de frenado, iniciando en el punto de distancia de frenado por delante del portal y terminando en el portal ([CIE], 2004).

**Zona Umbral.** Según la ([CIE], 2004) “se define como la primera parte del túnel, directamente después del portal. La zona umbral comienza ya sea al comienzo del túnel o al comienzo de los protectores solares a la luz del día cuando se produce.” (p. 5).

**Zona de transición.** Es la zona contigua a la zona de umbral, y termina en la zona interior, los niveles en esta zona van disminuyendo gradualmente hasta llegar a los niveles de la zona interior ([CIE], 2004, p.5).

**Zona interior o central.** Según la [CIE], 2004 se define como “la parte del túnel que sigue directamente después de la zona de transición. Se extiende desde el final de la zona de transición hasta el comienzo de la zona de salida” (p. 5).

**Zona de salida.** La ([CIE], 2004) la define como “la parte del túnel donde, durante el día, la visión de un conductor que se acerca a la salida está predominantemente influenciada por el brillo fuera del túnel. La zona de salida comienza al final de la zona interior. Termina en el portal de salida del túnel” (p. 5).

**Zona de despedida.** Esta zona no pertenece al túnel, pero es la zona de la carretera a cielo abierto, que está relacionada a la iluminación ([CIE], 2004, p. 5).

**Portal de entrada.** Según la ([CIE], 2004) la define como “la parte de la construcción del túnel que corresponde al comienzo de la parte cubierta del túnel, o, cuando se usan protectores solares abiertos, al comienzo de los protectores solares” (p. 6).

**Portal de salida.** Según la ([CIE], 2004) se define como “la parte de la construcción del túnel que corresponde al final de la parte cubierta del túnel o, cuando se usan protectores solares abiertos, al final de los protectores solares” (p. 6).

#### **4.7. Conceptos relacionados al tráfico**

##### ***4.7.1. Calzada***

Según la ([SCT], 2016) se define como “parte de la carretera, usada normalmente para el tránsito de vehículos” (p. 4).

##### ***4.7.2. Carril***

Según la ([SCT], 2016) se define como “una banda de la calzada, destinada a acomodar una única línea de vehículos que se mueven” (p. 4).

##### ***4.7.3. Distancia de seguridad***

Distancia necesaria para detener un vehículo con total seguridad, esta distancia es necesaria para que un conductor pueda detener el vehículo cuando se presente una situación que lo amerite ([SCT], 2016, pp. 17-18).

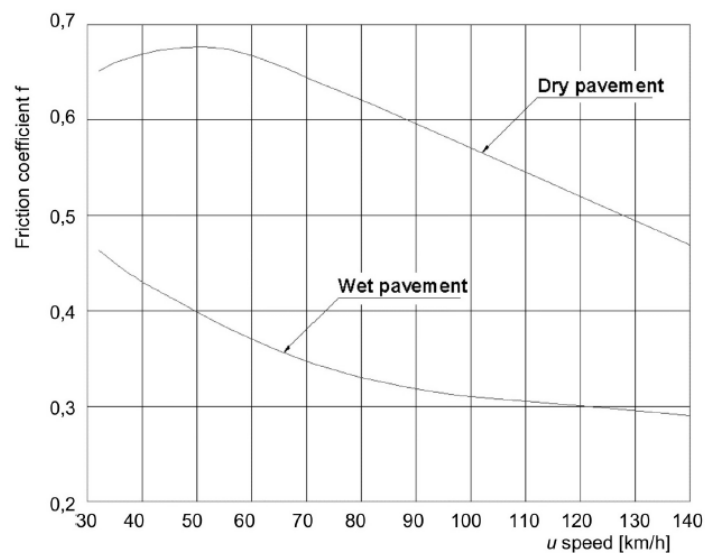
Esta distancia depende de tres factores: tiempo de percepción, de reacción y de frenado. La distancia de seguridad se puede obtener de la **Tabla 1**, cuando el pavimento está mojado y a nivel (Cal et al., 1994, p.53).

**Tabla 1.** Distancia de seguridad.

Velocidad de proyecto (Km/h)	Velocidad de marcha (Km/h)	Percepción-reacción		Coeficiente de fricción longitudinal	Distancia de frenado (m)	Distancia de parada (m)	
		Tiempo (s)	Distancia (m)			Calculado	Proyecto
30	28	2.5	19.43	0.400	7.72	27.15	25
40	37	2.5	25.68	0.380	14.18	39.86	40
50	46	2.5	31.92	0.360	23.14	55.06	55
60	55	2.5	38.17	0.340	35.03	73.20	75
70	63	2.5	43.72	0.325	48.08	91.80	90
80	71	2.5	49.27	0.310	64.02	113.29	115
90	79	2.5	54.83	0.305	80.56	135.39	135
100	86	2.5	59.68	0.300	97.06	156.74	155
110	92	2.5	63.85	0.295	112.96	176.81	175

**Nota:** La tabla muestra la distancia de seguridad calculada para la situación más crítica y a nivel (pavimento mojado). Tomado de (Cal et al., 1994).

En el caso de evaluar el coeficiente de fricción longitudinal se puede determinar mediante el Diagrama de la **Figura 15**.



**Figura 15.** Diagrama del Coeficiente de fricción longitudinal.

**Nota:** El diagrama representa el coeficiente de fricción en función de la velocidad y la condición del pavimento (mojado o seco). Para un estudio siempre se debe evaluar para la situación más crítica (pavimento mojado). Tomado de ([CIE], 2004).

En el caso que la calzada tenga una pendiente ascendente o descendente se aplica la **Ecuación 4** la cual permite determinar la distancia de seguridad, las unidades de esta ecuación están en el sistema internacional, el coeficiente de fricción longitudinal  $f_1$  se determina mediante la **Figura 15** (Cal et al., 1994, p.57).

$$D_s = 0.694(v_0) + \frac{v_0^2}{254(f_l \pm p)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- $D_s$ : Distancia de seguridad [m]  
 $v_0$ : Velocidad al momento de aplicar los frenos [Km/h]  
 $f_l$ : Fricción longitudinal  
 $p$ : Pendiente longitudinal [°]

#### **4.7.4. Flujo de tráfico**

Número de vehículos que pasan en un punto determinado, en un tiempo específico en iluminación de túneles se diseña la para las horas pico ([CIE], 2004, p. 7).

#### **4.8. Normativas y regulaciones aplicables**

- Normativa CIE 88-2004 GUIDE FOR THE LIGHTING OF ROAD TUNNELS AND UNDERPASSES.
- INEN RTE 069.
- RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL -058/18.
- RESOLUCIÓN Nro. CONELEC -005/14.

#### **4.9. Tipos de lámparas y utilizadas en sistemas de iluminación para túneles**

##### **4.9.1. Lámparas de vapor de sodio a alta presión**

Conocidas como SON, su funcionamiento se debe a un tubo de descarga que contiene una aleación de mercurio y sodio domada por un gas noble, la cual alcanza el millar de grados centígrados. La vida útil es de 24000 h y una eficacia luminosa de 130lm/W.

Históricamente fueron las más usadas en la iluminación de túneles debido a su relación lm/W aprovechando más la energía para iluminar (Cansinos, 2015, pp. 55-56).

##### **4.9.2. Tecnologías LED y su aplicación en sistemas de iluminación para túneles**

La nueva tecnología led empleada para la iluminación de los túneles mejora la calidad del alumbrado, aunque las lámparas de vapor de sodio a alta presión compiten con la tecnología led, las lámparas led son superiores en varios aspectos como:

La temperatura del color. -Las lámparas led emiten una luz mayor fría en comparación a la luz amarilla emitida por las lámparas de vapor de sodio a alta presión.

Mantenimiento e instalación. -La vida útil de las lámparas led son mayores en comparación de otras fuentes de luz, es por ello que son mejores. El proceso de reemplazo o renovación de un número determinado de lámpara o componentes de las lámpara dentro de túnel se realiza cada dos años, en comparación a las lámparas led que su reemplazo o renovación se realiza cada 5 años, el mantenimiento preventivo de las instalaciones se realiza cada año.

Control y regulación. -Esta es la mayor diferencia ya que la tecnología led es mucho más precisa debido a su tecnología, permitiendo en control inmediato al cambio repentino de requerimientos del sistema de iluminación, en comparación a otras tecnologías que requieren un mayor tiempo para adaptarse a los requerimientos exigidos por el sistema.

Por todos estos aspectos la implementación de la tecnología led en la iluminación de túneles es recomendable debido a su eficiencia y vida útil mayor a otros tipos de tecnología (Cansinos, 2015, pp. 58-60).

#### **4.10.Consideraciones de seguridad en sistemas de iluminación para túneles**

##### ***4.10.1.Control de deslumbramiento y efectos visuales***

**Efecto Visual.** El sistema visual del ojo tiene la capacidad de adaptarse de manera gradual a cambios en la iluminación, como ocurre al pasar de un ambiente iluminado a uno oscuro en un túnel. Estos ajustes no son instantáneos, ya que el proceso de adaptación del ojo requiere un cierto período de tiempo que varía según la diferencia en la luminosidad. A medida que aumenta la diferencia de luminosidad, también aumenta el tiempo necesario para que el ojo se adapte completamente al nuevo nivel de iluminación ([SCT], 2016, p.15).

**Efecto de Adaptación.** El proceso de adaptación de la sensibilidad del ojo humano a cambios en la distribución de luminancias en el campo de visión. El tiempo que tarda en producirse esta adaptación se conoce como tiempo de adaptación. La adaptación no es instantánea y puede disminuir la capacidad de visión durante un tiempo determinado, incluso llegar a producir ceguera momentánea en el caso de un cambio brusco de la distribución de luminancias ([SCT], 2016, p.15).

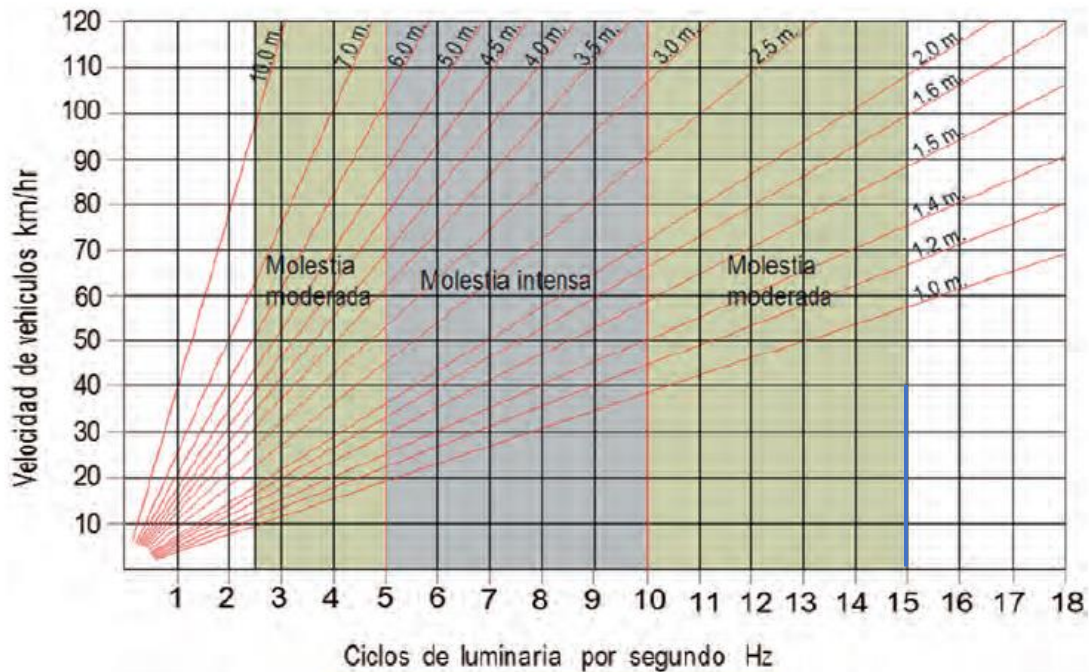
**Fenómeno De Inducción.** Producido por las partes adyacentes de la retina que forman la imagen de un objeto visualizado. Cuando el conductor se adapta a un cierto nivel de luminancia, sólo puede ver objetos con una luminancia similar. El efecto de inducción puede ser observado en cambios extremos de iluminación, como cuando se entra en un túnel, donde

la luminancia de los objetos debe ser mayor que la del nivel de entrada del túnel para poder ser vistos. Este cambio extremo de iluminación puede provocar una ceguera momentánea que es peligrosa ([SCT], 2016, p.16).

**Luminancia De Velo.** Un conjunto de luces parásitas que aparecen en los ojos del conductor debido a los reflejos del parabrisas y la luminancia atmosférica que se combinan para crear un velo luminoso que reduce la visibilidad de los obstáculos a la entrada del túnel. Los tres fenómenos que afectan la visibilidad del conductor son: la adaptación, la inducción y la luminancia de velo, que reducen la visibilidad de objetos como vehículos u otros obstáculos que se presentan al frente([SCT], 2016, pp. 16-17).

**Efecto Flicker o Parpadeo.** El efecto de parpadeo se refiere a la percepción de luz parpadeante o fluctuante, que puede ser causada por una variedad de factores, como la frecuencia de la corriente que alimenta la lámpara o el tipo de tecnología utilizada para generar la luz. En términos generales, el efecto estroboscópico es intrascendente por debajo de 2,5 Hz y por encima de 15 Hz, pero cuando la frecuencia está entre 4 Hz y 11 Hz y dura más de 20 segundos, puede causar inconvenientes sin medidas adicionales.

En instalaciones de más de 20 segundos de duración, se recomienda evitar el rango de frecuencia entre 4 Hz y 11 Hz, especialmente cuando se utilizan fuentes de luz pequeñas y de cambio rápido. Los efectos de parpadeo deben tenerse en cuenta al diseñar sistemas de iluminación para garantizar la seguridad y la comodidad del usuario (ver **Figura 16**) ([CIE], 2004, p. 20).



**Figura 16.** Diagrama del efecto Flicker.

**Nota:** El diagrama permite evaluar el efecto Flicker y verificar si la instalación está en los rangos recomendados. Tomado de (Secretaría De Comunicaciones y Transporte [SCT], 2016).

**Restricción de Deslumbramiento.** La limitación del deslumbramiento hace referencia a la necesidad de minimizar el deslumbramiento en la iluminación de túneles, lo que reduce la visibilidad y aumenta el riesgo de accidentes. En la iluminación de túneles es importante tener en cuenta el deslumbramiento fisiológico (incapacidad), que puede lograrse mediante el incremento del umbral  $Tl$  que debe ser inferior al 15% para las zonas interiores del túnel y para la zona de salida se evalúa con la **Ecuación 5** cuando el nivel de luminancia es menor que cinco, cuando el nivel de luminancia es mayor a 5 se evalúa con la **Ecuación 6**.

$$Tl = 65 \left( \frac{L_v}{L_r^{0,8}} \right) \text{ Para } L_r \leq 5 \frac{cd}{m^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Tl = 65 \left( \frac{L_v}{L_r^{1,05}} \right) \text{ Para } L_r > 5 \frac{cd}{m^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$Tl$ : Incremento del Umbral en una instalación de alumbrado público [%]

$L_r$ : Promedio de luminosidad de la superficie de la carretera [ $cd/m^2$ ]

$L_v$ : Luminancia de velo [ $cd/m^2$ ]



Para minimizar el deslumbramiento, se pueden usar varias técnicas, como reducir la intensidad de la luz en áreas específicas o usar pantallas o deflectores para dirigir la luz donde se necesita ([CIE], 2004, p. 19).

#### **4.11.Factor de Mantenimiento**

Al pasar el tiempo las características y prestaciones de un alumbrado público se degradan. Existen varios factores que provocan este desgaste, pero un adecuado mantenimiento puede ayudar a mitigar este desgaste.

Este factor es de mucha importancia porque permite garantizar que los niveles de iluminación se mantengan por encima de los recomendados, para calcular se debe usar la **Ecuación 7**.

$$f_m = FDFL * FSL * FDLU * FDSR \qquad \qquad \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

*F<sub>m</sub>*: Factor de mantenimiento

*FDFL*: Factor de depreciación del flujo luminoso

*FSL*: Factor de supervivencia de las lámparas

*FDLU*: Factor de depreciación de las luminarias

*FDSR*: Factor de depreciación de las superficies del recinto

El valor del factor de depreciación del flujo luminoso de las lámparas (*FDFL*) y el factor de supervivencia de las lámparas (*FSL*), se debe consultar a los datos del fabricante de la luminaria.

El factor de depreciación de las luminarias (*FDLU*) se determina de la **Tabla 2**. Teniendo en cuenta las características constructivas de la luminaria (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013, p. 3-5).

**Tabla 2.** Factores de depreciación de las luminarias (FDLU).

Grado Protección sistema óptico	Tipo de cierre	Grado de contaminación	Intervalo de limpieza en años		
			1 año	2 años	3 años
IP 2X	-----	Alto	0,53	0,45	0,42
		Medio	0,62	0,56	0,53
		Bajo	0,82	0,79	0,78
IP 55	Plástico	Alto	0,87	0,71	0,61
		Medio	0,88	0,74	0,64
		Bajo	0,92	0,80	0,71
	Vidrio	Alto	0,91	0,78	0,70
		Medio	0,92	0,81	0,72
		Bajo	0,94	0,85	0,77
IP 65	Plástico	Alto	0,89	0,76	0,66
		Medio	0,91	0,79	0,69
		Bajo	0,95	0,85	0,76
	Vidrio	Alto	0,94	0,84	0,76
		Medio	0,95	0,86	0,78
		Bajo	0,97	0,90	0,82
IP 66	Plástico	Alto	0,92	0,81	0,74
		Medio	0,92	0,83	0,76
		Bajo	0,95	0,87	0,82
	Vidrio	Alto	0,95	0,88	0,83
		Medio	0,96	0,89	0,84
		Bajo	0,97	0,93	0,90

**Nota:** A los efectos del cálculo del factor de mantenimiento, 1 año equivale a 4000 h de funcionamiento. Tomada de (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013).

Índice de recinto, permite hacer uso de la **Tabla 3**, este valor se calcula con la **Ecuación 8** (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013, p.7).

$$I_r = \frac{L * A}{H * (L + A)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $I_r$  Índice de recinto
- $L$  Longitud de recinto [m]
- $A$  Anchura de recinto [m]
- $H$  Altura de montaje de luminarias [m]

**Tabla 3.** Factores de depreciación de las superficies del recinto (FDSR).

Índice de recinto Ir	Distribución flujo luminoso	Intervalo de limpieza en años																	
		0,5 años			1 año			1,5 años			2 años			2,5 años			3 años		
		Grado de contaminación			Grado de contaminación			Grado de contaminación			Grado de contaminación			Grado de contaminación			Grado de contaminación		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
Pequeño	Directo	0,97	0,96	0,95	0,97	0,94	0,93	0,96	0,94	0,92	0,95	0,93	0,90	0,94	0,92	0,89	0,94	0,92	0,88
	Direc/Indirec	0,94	0,88	0,84	0,90	0,86	0,82	0,89	0,83	0,80	0,87	0,82	0,78	0,85	0,80	0,75	0,84	0,79	0,74
	Indirecto	0,90	0,84	0,80	0,85	0,78	0,73	0,83	0,75	0,69	0,81	0,73	0,66	0,77	0,70	0,62	0,75	0,68	0,59
Medio	Directo	0,98	0,97	0,96	0,98	0,96	0,95	0,97	0,96	0,95	0,96	0,95	0,94	0,96	0,95	0,94	0,96	0,95	0,94
	Direc/Indirec	0,95	0,90	0,86	0,92	0,88	0,85	0,90	0,86	0,83	0,89	0,85	0,81	0,87	0,84	0,79	0,86	0,82	0,78
	Indirecto	0,92	0,87	0,83	0,88	0,82	0,77	0,86	0,79	0,74	0,84	0,77	0,70	0,81	0,74	0,67	0,78	0,72	0,64
Grande	Directo	0,99	0,97	0,96	0,98	0,95	0,95	0,97	0,96	0,93	0,96	0,95	0,94	0,96	0,95	0,94	0,96	0,95	0,94
	Direc/Indirec	0,95	0,90	0,86	0,94	0,88	0,85	0,90	0,86	0,83	0,89	0,85	0,81	0,87	0,84	0,79	0,86	0,82	0,78
	Indirecto	0,92	0,87	0,83	0,88	0,82	0,77	0,86	0,79	0,74	0,85	0,77	0,70	0,81	0,74	0,68	0,78	0,72	0,65

**Nota:** Grado de contaminación: B= baja, M= media, A= alta. Tomado de (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013).

#### 4.12.Sistemas de control

El brillo del área de acceso cambia según las condiciones de la luz del día. Dado que los niveles de Umbral y zona de Transición son porcentajes constantes. En la luminosidad de la zona de Acceso es necesario el sistema de control de iluminación en estas áreas. El control puede ser a través de un dispositivo de ajuste continuo o a través de abrir y cerrar en diferentes etapas. Como regla general, el factor Por motivos económicos y de comodidad visual, la reducción entre etapas no supera los 3. Aunque el sistema de control está fuera del alcance de este proyecto, el asesoramiento al respecto a continuación.

Para que el control de iluminación sea adecuado, la luminosidad del área del canal debe ser monitoreado continuamente. Para ello, se utilizará un medidor de luminancia, colocado en mantenerse a cierta distancia de la boca del túnel y diríjase hacia ella. Por razones de mantenimiento debe instalarse a una altura de 2 a 5 metros sobre la carretera. (Izquierdo, 2013)

El luminancímetro empleado debe ser capaz de medir el valor medio en un cono de 20 grados según se especifica en la normativa ([CIE], 2004, p. 19).

#### 4.13. Iluminación en cada sección de un túnel

##### 4.13.1. Zona umbral luminancia $L_{th}$

Esta zona es la más crítica y fundamental para poder iluminar correctamente las demás zonas a lo largo del túnel, en esta zona se evalúa el contraste percibido el cual depende de tres factores:

- 1- El velo de luz debido a la luz dispersa en la atmósfera
- 2- El velo de luz debido a la dispersión en el parabrisas
- 3- El velo de luz debido a la dispersión en el ojo

El método de contraste percibido evalúa estos tres factores, para determinar la luminancia percibida de un objeto **Ecuación 9**.

$$L_{o,p} = \tau_{ws} * \tau_{atm} * L_{o,intrinsic} + \tau_{ws} * L_{atm} + L_{ws} + L_{seq} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- $L_{o,p}$ : Luminancia percibida del objeto [cd/m<sup>2</sup>]
- $\tau_{ws}$ : Transmitancia del parabrisas
- $\tau_{atm}$ : Transmisividad atmosférica
- $L_{atm}$ : Luminancia de velo atmosférico [cd/m<sup>2</sup>]
- $L_{ws}$ : Luminancia de velo parabrisas [cd/m<sup>2</sup>]
- $L_{seq}$ : Luminancia de velo total equivalente [cd/m<sup>2</sup>]

Así mismo para calcular la luminancia percibida de la carretera se emplea la **Ecuación 10**.

$$L_{r,p} = \tau_{ws} * \tau_{atm} * L_{r,intrinsic} + \tau_{ws} * L_{atm} + L_{ws} + L_{seq} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- $L_{r,p}$ : Luminancia percibida de la carretera [cd/m<sup>2</sup>]

En el caso de poca información disponible para propósitos de diseño la transmisividad atmosférica ( $\tau_{atm}$ ) es 1,0 y la transmitancia para el parabrisas ( $\tau_{ws}$ ) es 0,8.

Para determinar la luminancia del parabrisas y la atmósfera se puede evaluar en base a la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Niveles de velo.

Niveles de velo (cd/m <sup>2</sup> )	Alto	Medio	Bajo
Luminancia de velo atmosférico	300	200	100
Luminancia de velo del parabrisas	200	100	50

*Nota.* Los valores de esta tabla son típicos para diseño, sin embargo, estos valores pueden variar. Tomado de ([CIE], 2004).

Determinación de  $L_{seq}$  este valor se puede determinar con mediciones en el sitio de estudio con equipos especializados para este fin. Otro método se puede usar el método gráfico basado en la fórmula de Holladay-Stiles **Ecuación 11**.

$$L_{seq} = 5,1 * 10^{-4} \sum L_{ije} \quad \text{Ecuación 11}$$

Con

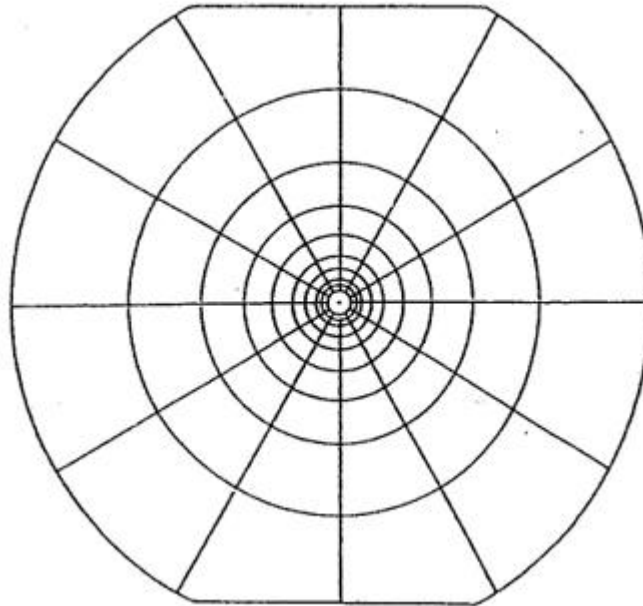
$$L_{ije} = (\tau_{ws} * L_{ij}) + L_{ws} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$L_{ije}$ : Luminancia de cada sección frente al ojo [cd/m<sup>2</sup>]

$L_{ij}$ : La luminancia media medida fuera del coche, en frente al parabrisas [cd/m<sup>2</sup>]

Para determinar el valor de  $L_{ij}$  se usa el método gráfico, el cual se debe sobreponer el diagrama de la **Figura 16**.



**Figura 17.** Diagrama polar que muestra zonas en las que la luminancia produce cantidades iguales de luz parásita en el centro.

**Fuente:** ([CIE], 2004).

Para graficar cada anillo superpuesta sobre la imagen a evaluar se deben usar los ángulos de apertura de la **Tabla 5**, se debe considerar el ángulo de apertura de 2° se debe descartar de la evaluación.

Para Sobreponer el diagrama polar en la fotografía tomada se debe emplear la **Ecuación 13** para determinar el anillo central que se graficara en la fotografía.

$$\alpha = 2 * \arctg\left[\frac{W_T}{2 * D_S}\right] - 57 * W_T/D_S \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$W_T$ : Ancho de abertura del túnel [m]

**Tabla 5.** Ángulos de apertura de cada anillo.

Anillo	Centro	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ángulo de apertura	2,0°	3,0°	4,0°	5,8°	8,0°	11,6°	16,6°	24,0°	36,0°	56,8°

*Fuente:* Tomada de ([CIE], 2004).

Una vez graficado el diagrama en la imagen correspondiente, se procede a evaluar cada sección del anillo, para evaluar el porcentaje y determinar  $L_{ij}$  se usa la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Ejemplos de luminancias en portales de túnel

Dirección de manejo (hemisferio norte)	$L_c$ (cielo) $Kcd/m^2$	$L_r$ (carretera) $Kcd/m^2$	$L_e$ (entorno) $Kcd/m^2$			
			Rocas	Edificios	Nieve	Prados
N	8	3	3	8	15(V) 15(H)	2
E-W	12	4	2	6	10(V) 15(H)	2
S	16	5	1	4	5(V) 15(H)	2

**Nota.** (V) País montañoso con superficies principalmente empinadas, (H) País plano más o menos horizontal; En el hemisferio Sur, N y S deben intercambiarse. Tomado de ([CIE], 2004).

Para el cálculo del umbral de luminancia se emplea la **Ecuación 14**.

$$L_{th} = \frac{L_m}{\frac{1}{C_m} \left( \frac{\rho}{\pi * q_c} - 1 \right) - 1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Con

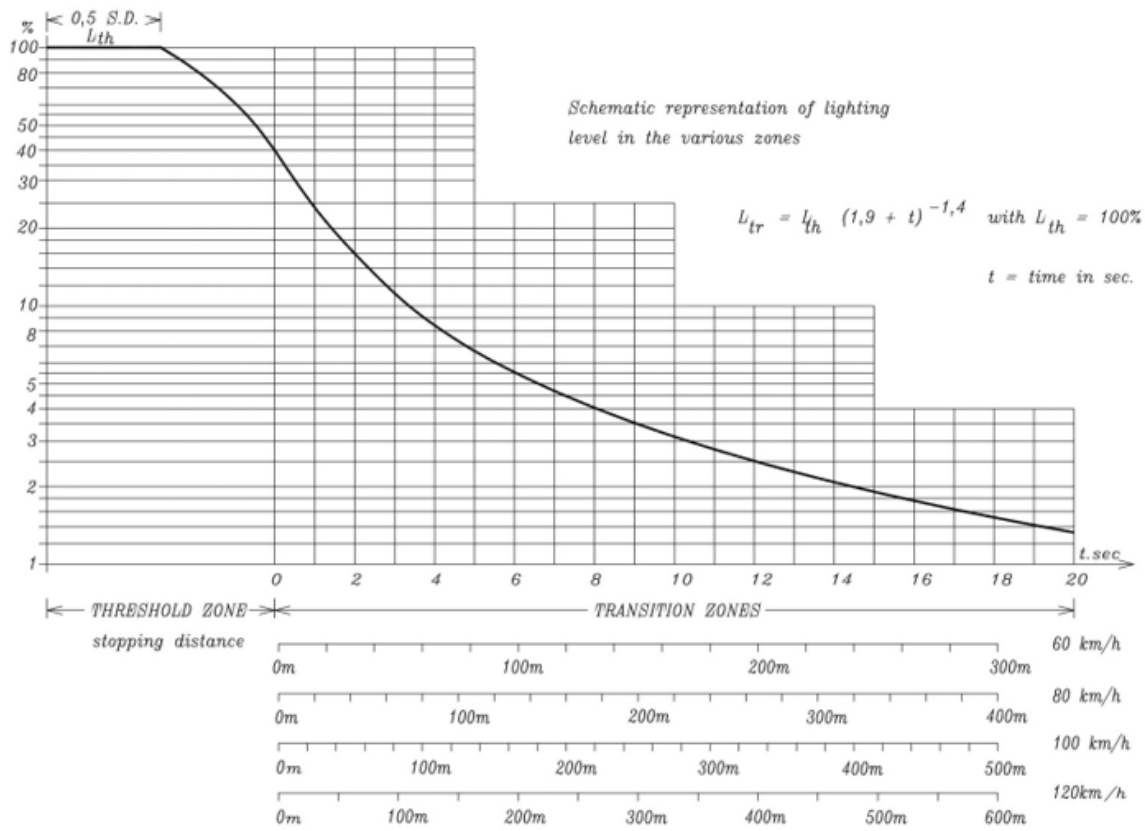
$$L_m = \frac{(\tau_{ws} * L_{atm} + L_{ws} + L_{seq})}{\tau_{ws} * \tau_{atm}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- $L_{th}$ : Luminancia de Umbral [ $cd/m^2$ ]
- $C_m$ : Contraste percibido mínimo requerido [%]
- $\rho$ : Factor de reflectancia
- $q_c$ : Coeficiente de contraste revelador

La normativa CIE establece un contraste percibido mínimo requerido para diseño de - 28, para un factor de reflectancia de 0,2 y un coeficiente de contraste revelador de 0,2 para un sistema simétrico y 0,6 para un sistema asimétrico.

En esta sección la primera mitad igual a la distancia de seguridad, los niveles de  $L_{th}$  deben mantenerse luego debe ir disminuyendo de forma escalonada en una relación a  $0,4L_{th}$  como se muestra en la **Figura 18** ([CIE], 2004, p. 7-16).



**Figura 18.** Evolución de la luminancia a lo largo del túnel.

Fuente: ([CIE], 2004).

**4.13.2. Luminancia en la zona de transición  $L_{tr}$**

El brillo de la zona de transición del túnel sigue la curva que se muestra en la **Figura 18**. Esta curva puede ser sustituida por una curva escalonada, cuyo nivel nunca es inferior al de la curva continua. La relación de brillo máxima permitida de una capa a otra es 3. La última capa no debe ser más grande que 2 veces el brillo del área interior. Es importante señalar que, dado que el campo de visión del conductor consiste en el interior del túnel, se recomienda una zona de transición más larga para contrarrestar el segundo efecto de "agujero negro". En general, se recomienda que la diferencia entre el brillo real y el brillo preferido en la región del umbral sea lo más pequeña posible ([CIE], 2004, p. 16-17).

**4.13.3. Luminancia en la zona interior.**

La iluminación de esta zona está influenciada por la velocidad de seguridad y el flujo de tráfico, en el caso de que el túnel sea demasiado largo se recomienda usar una segunda zona interior como se muestra en la **Tabla 7**, **Tabla 8** y para evaluar el flujo de tráfico usar la **Tabla 9** ([CIE], 2004, p. 17-18).



**Tabla 7.** Valores de luminancia en cd / m<sup>2</sup> en la zona interior (túneles largos).

Distancia de seguridad (m)	Flujo de tráfico (vehículos/hora/carril)	
	Bajo	Pesado
<60	3	6
70	3,3	6,4
80	3,6	6,8
90	3,9	7,2
100	4,2	7,6
110	4,5	8
120	4,8	8,4
130	5,1	8,8
140	5,4	9,2
150	5,7	9,6
>160	6	10

*Nota:* Adapta de ([CIE], 2004).

**Tabla 8.** Valores de luminancia en cd / m<sup>2</sup> en la segunda parte de la zona interior (túneles muy largos).

Distancia de seguridad (m)	Flujo de tráfico (vehículos/hora/carril)	
	Bajo	Pesado
<60	1	2
70	1,1	2,2
80	1,2	2,4
90	1,3	2,6
100	1,4	2,8
110	1,5	3
120	1,6	3,2
130	1,7	3,4
140	1,8	3,6
150	1,9	3,8
>160	2,5	4,5

*Nota:* Adapta de ([CIE], 2004).

**Tabla 9.** Clasificación del flujo de tráfico.

Flujo de tráfico (vehículos/hora/carril)	Un solo sentido	Tráfico en ambas direcciones
<b>Alto</b>	> 1500	> 400
<b>Bajo</b>	<500	<100

**Fuente:** ([CIE], 2004).

#### 4.13.4.Luminancia en la zona de salida

Para garantizar una adecuada iluminación directa y una adecuada visibilidad detrás de los espejos para vehículos pequeños, el área de salida debe estar iluminada de la misma manera que el área interior del túnel. En los casos en que se esperan peligros adicionales cerca de la salida del túnel y en túneles con áreas interiores largas, se recomienda que la luminancia diurna en el área de salida aumente linealmente en una longitud igual a la Distancia de Seguridad (antes de la entrada de salida), a una distancia de 20 m de la salida, fije la elevación de la zona interior para que sea cinco veces más alta que el nivel de la zona interior ([CIE], 2004, p.18).

#### 4.14.Eficiencia energética en Instalación de alumbrado vial y Ornamental

Para la evaluación de la eficiencia energética de una instalación de alumbrado, el (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2008) define el resultado como “la relación entre el producto de la superficie iluminada por la iluminancia media en servicio de la instalación entre la potencia activa total instalada” (cap. 1) **Ecuación 16.**

$$\varepsilon = \frac{S \cdot E_m}{P} = \frac{m^2 \cdot lux}{KW} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Eficiencia energética [  $\frac{m^2 \cdot lux}{KW}$  ]
- $S$ : Superficie iluminada [m<sup>2</sup>]
- $E_m$ : Iluminancia media en servicio [lux]
- $P$ : Potencia activa [kW]

Luego se procede a determinar el índice de eficiencia energética se define como “El cociente entre la eficiencia energética de la instalación y el valor de eficiencia energética de referencia” **Ecuación 17** (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2008).

$$I\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R}$$

**Ecuación 17**

Donde:

$I\varepsilon$ : Índice de eficiencia energética

$\varepsilon_R$ : Eficiencia energética de referencia [ $\frac{m^2 * lux}{KW}$ ]

El valor de la eficiencia energética de referencia se determina de la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Valores de eficiencia energética de referencia.

Alumbrado vial funcional		Alumbrado vial ambiental y otras instalaciones de alumbrado	
Iluminancia media de servicio proyectada $E_m$ (lux)	Eficiencia energética de referencia $\varepsilon_R$ $\frac{m^2 * lux}{KW}$	Iluminancia media de servicio proyectada $E_m$ (lux)	Eficiencia energética de referencia $\varepsilon_R$ $\frac{m^2 * lux}{KW}$
$\geq 30$	32	--	--
25	29	--	--
20	26	$\geq 20$	13
15	23	15	11
10	18	10	9
$\leq 7,5$	14	7,5	7
--	--	$\leq 5$	5

**Nota:** En el caso de que el valor de la iluminancia proyectada este entre los valores de la tabla debe realizarse una interpolación lineal. Tomada de (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2008).

Con estos parámetros se puede determinar el Índice de consumo energético con la **Ecuación 18**. Esto permitirá clasificarlo de acuerdo a 7 etiquetas que van desde la A hasta la G **Tabla 11** (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2008).

$$ICE = \frac{1}{I\varepsilon}$$

**Ecuación 18**

Donde:

$ICE$ : Índice de consumo energético

**Tabla 11.** Clasificación

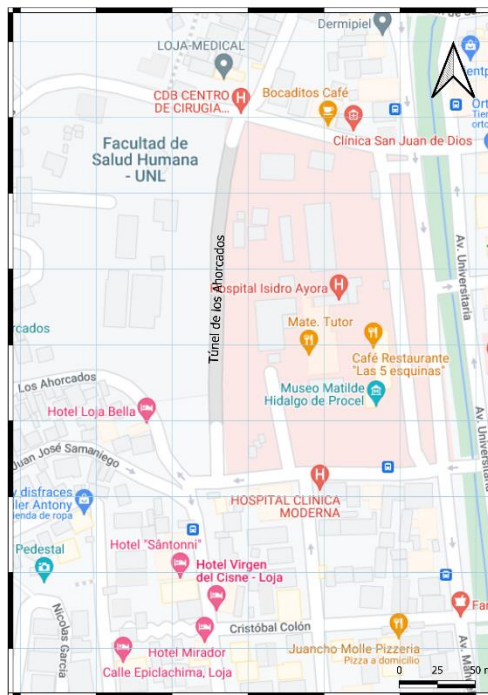
<b>Clasificación Energética</b>	<b>Índice de consumo energético</b>	<b>Índice de eficiencia energética</b>
<b>A</b>	$ICE < 0,91$	$I\varepsilon > 1,1$
<b>B</b>	$0,91 \leq ICE < 1,09$	$1,1 \geq I\varepsilon > 0,92$
<b>C</b>	$1,09 \leq ICE < 1,35$	$0,92 \geq I\varepsilon > 0,74$
<b>D</b>	$1,35 \leq ICE < 1,79$	$0,74 \geq I\varepsilon > 0,56$
<b>E</b>	$1,79 \leq ICE < 2,63$	$0,56 \geq I\varepsilon > 0,38$
<b>F</b>	$2,63 \leq ICE < 5$	$0,38 \geq I\varepsilon > 0,20$
<b>G</b>	$ICE \geq 5,00$	$I\varepsilon \leq 0,20$

**Fuente:** (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2008)

## 5. Metodología

### 5.1. Área de estudio

El lugar de emplazamiento donde se realizó la investigación, es en el Túnel de los Ahorcados, un túnel circular de 5 m de alto y una longitud de 171 m con dirección de manejo Sur-Norte, tipo bidireccional, ubicado en la ciudad de Loja, en el Barrio 18 de noviembre, Antonio José de Sucre, con Coordenadas Geográficas  $3^{\circ}59'35,7''S$   $79^{\circ}12'24,8''W$  **Figura 19**.



**Figura 19.** Ubicación del lugar de estudio.

*Fuente:* Google Maps APIs.

### 5.2. Equipos y Materiales

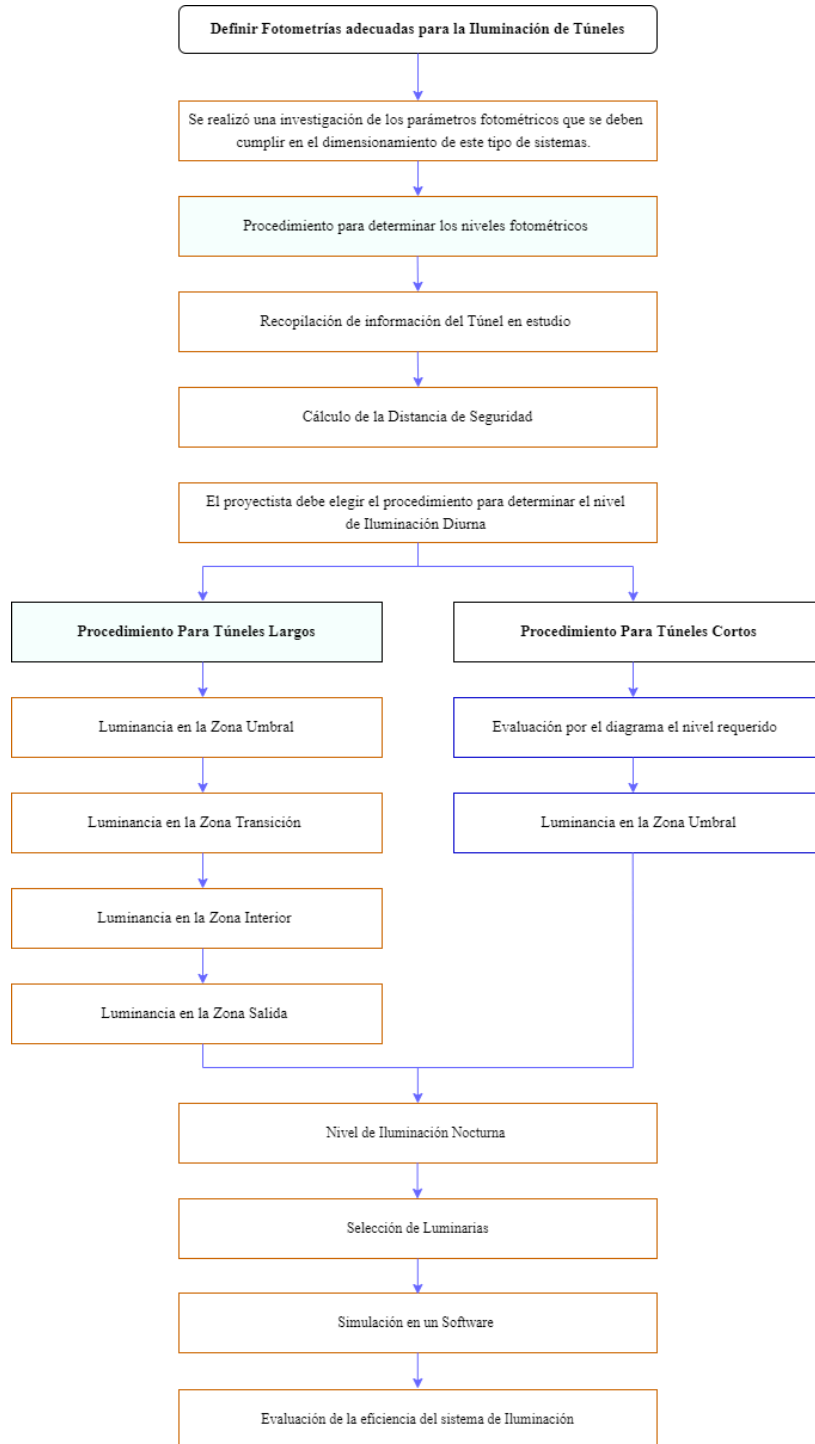
Los equipos empleados en la investigación cumplen con las normativas CIE 88:2004 y INEN RTE 069.

- Luxómetro UT383 BT (Bluetooth Versión) **Anexo 1.**
- Cámara digital Sony DSC-W730 **Anexo 2.**
- Cinta métrica de 30 m.
- Computadora.
- Internet.
- Materiales de oficina.
- Programa de simulación DIALux.

- Paquete Office 2021.
- Software de edición de fotos.
- Software para modelado 3D.

### 5.3.Procedimiento

#### 5.3.1.Primer Objetivo

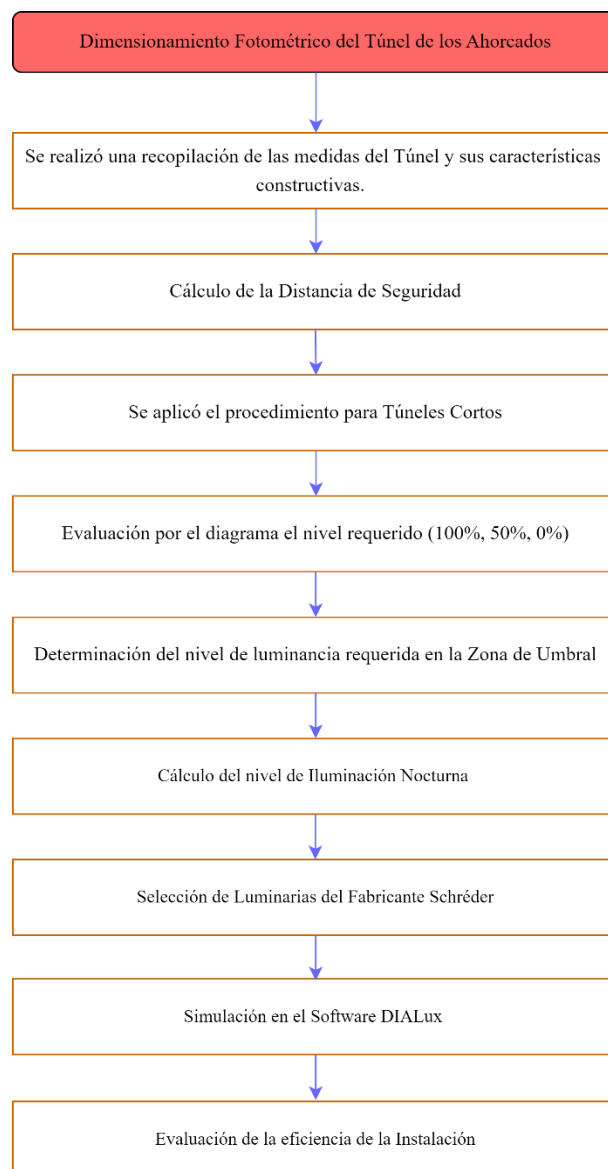


**Figura 20.** Diagrama de bloques para el dimensionamiento de Sistemas de Iluminación.

Se ha seguido el procedimiento del diagrama de bloques de la **Figura 20**. Se realizó una revisión bibliográfica en Normativas Nacionales e Internacionales para establecer los parámetros que se deben cumplir en el dimensionamiento de Sistemas de Iluminación para Túneles. En la investigación realizada las normativas principales son la CIE 88:2004 y la INEN RTE 068, las cuales establecen los requerimientos mínimos para el correcto dimensionamiento de este tipo de sistemas.

Con los requerimientos fotométricos establecidos se planteó una guía metodológica para ayudar al proyectista que dimensionan este tipo de sistemas, el procedimiento se realizó para Túneles Largos y Túneles Cortos.

### 5.3.2. Segundo Objetivo



**Figura 21.** Diagrama de bloques para dimensionamiento fotométrico Túnel de los Ahorcados.

Para el dimensionamiento fotométrico del Túnel de los Ahorcados se ha seguido el procedimiento planteado en el diagrama de bloques de la **Figura 21**. Primeramente, se llevó a cabo un levantamiento de las medidas del Túnel de los Ahorcados. Se registraron las medidas de la longitud, ancho de carril, ancho de berma, altura de la boca del túnel, todas las medidas se registraron en el sistema métrico (m) haciendo uso de una cinta métrica de 30 m.

Posteriormente, se definieron los parámetros de diseño del Túnel, la velocidad máxima permitida de circulación en Km/h, el tipo de circulación (unidireccional, bidireccional), tipos de materiales constructivos (tipo de calzada R1, R2, R3, R4 según la CIE).

Con los parámetros de diseño ya establecidos, se procedió a evaluar a que tipo de Túnel pertenecía, ya sea Túnel Largo o Túnel Corto, y se aplicó el procedimiento correspondiente para determinar el nivel de luminancia requerido en  $\text{cd/m}^2$ .

A continuación, se aplicó el procedimiento correspondiente para calcular la Distancia de Seguridad.

Se llevó a cabo un estudio lumínico en el Software DIALux, el estudio se realizó como un Túnel recto para seleccionar las luminarias adecuadas y sus características fotométricas. El Objetivo era cumplir con los valores de uniformidad general, uniformidad longitudinal, efecto parpadeo e incremento de umbral establecidos en los requerimientos para este tipo de sistemas. Finalmente, se realizó una evaluación de la eficiencia energética del sistema de iluminación.

## **5.4. Procesamiento y análisis de datos**

### **Primer objetivo.**

#### ***5.4.1. Parámetros fotométricos de diseño***

Según ([CIE], 2004) los parámetros fotométricos que se deben cumplir en el dimensionamiento de diseño en la Iluminación de Túneles son:

- La iluminación Diurna mínimo una uniformidad general del 40 % y una uniformidad longitudinal del 60 %.
- Las paredes hasta una altura de 2 m un valor de iluminancia del 60 % de la calzada.
- El efecto de parpadeo Flicker para un tiempo inferior a 20 s, debe estar fuera del rango de 2,5 Hz a 15 Hz y para un tiempo superior a 20 s, debe estar fuera del rango de 4 Hz a 11 Hz.
- El incremento de umbral TI debe ser inferior al 15 %.



- El alumbrado de emergencia la normativa recomienda 10 lx, aunque el mínimo de 2 lx a lo largo de todo el túnel.
- La iluminación nocturna mínimo 1 cd/m<sup>2</sup> uniformidad total del 40 % y uniformidad longitudinal del 60 %.

#### ***5.4.2. Procedimiento para el dimensionamiento de sistemas de iluminación***

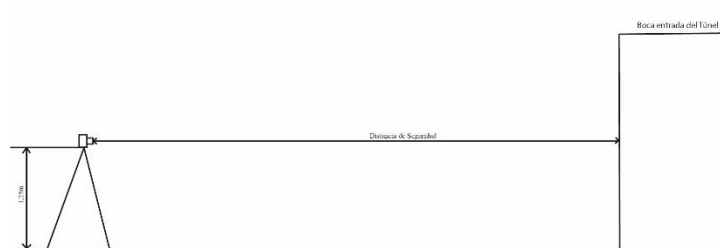
**Recopilación de información del túnel en estudio.** EL proyectista debe tener acceso a toda la información relevante del túnel en estudio, los parámetros para poder dimensionarlo son:

- Velocidad de Diseño.
- Longitud del Túnel.
- Número de carriles.
- Ancho de carril.
- Ancho de Berma.
- Pendiente de calzada.
- Altura máxima del túnel.
- Características de la calzada.
- Dirección del tráfico.
- Densidad del tráfico.
- Sentido de manejo.
- Dirección de manejo.
- Flujo de tráfico.

**Distancia De Seguridad.** Al definir los parámetros necesarios para determinar la distancia necesaria para detener un vehículo con total seguridad, se utiliza la **Ecuación 4**. Se debe tener en cuenta que la velocidad de diseño debe estar en Km/h, para determinar el Coeficiente de Fricción se determina del Diagrama de la **Figura 15**.

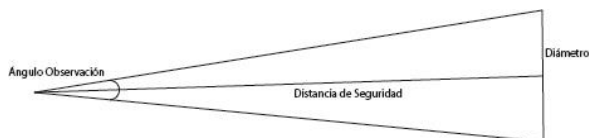
**Cálculo De Luminancia Requerida En La Entrada Del Túnel.** Para determinar el nivel requerido en la primera parte del túnel se debe emplear el siguiente procedimiento usando el Método del Contraste Percibido:

1. Tomar una fotografía (usar cámara digital) a una distancia igual a la Distancia de Seguridad, medida desde la boca de entrada al Túnel y a una altura de 1,25m (ver **Figura 22**).



**Figura 22.** Ilustración de toma de fotografía.

2. Con la fotografía tomada se procede a calcular el diámetro del anillo central que se dibujara en la fotografía, se puede usar un Software de edición de fotografías. Para determinar el ángulo de observación se debe emplear la **Ecuación 13** y con la Distancia de Seguridad y por trigonometría se obtiene el diámetro del anillo como se muestra en la **Figura 23**.



**Figura 23.** Relación trigonométrica para determinar el diámetro central.

3. Sobreponer el Diagrama Polar de la **Figura 17**, haciendo coincidir el anillo central de la fotografía con el anillo central del Diagrama.

4. Evaluar de cada Sección y Anillo, el porcentaje que corresponde a cada elemento (%cielo, %camino, %rocas, %edificio, %nieve, %prado, %túnel), multiplicar cada porcentaje por el valor de luminancia en portales de Túneles **Tabla 6** y realizar la sumatoria obteniendo el valor de la luminancia medida fuera del coche, en frente al parabrisas ( $L_{ij}$ ). Debe considerarse en que hemisferio está ubicado el Túnel de estudio y la dirección de manejo.

5. Emplear la **Ecuación 12**, para multiplicar cada valor de luminancia medida fuera del coche, en frente al parabrisas ( $L_{ij}$ ) anteriormente calculado, por una transmisividad atmosférica de 0,8 y sumar este resultado con una luminancia del parabrisas de  $0,1 \text{ Kcd/m}^2$ , obteniendo el valor de luminancia de cada sección delante del ojo ( $L_{ije}$ ).

6. Finalmente, con la **Ecuación 14** se calcula la luminancia requerida en la Zona de Umbral, se debe tener en cuenta los parámetros de diseño recomendados. Para calcular el valor de  $L_m$  debe aplicarse la **Ecuación 15**.

El proyectista debe elegir que procedimiento a usar, para calcular el nivel de Luminancia requerida en el Túnel en estudio.

**Procedimiento Para Túneles Largos.** Cuando la longitud del túnel es larga, debe evaluarse en etapas y cada Zona requiere un nivel adecuado para asegurar que el usuario transite con total seguridad.

La Zona Umbral debe iluminarse en dos etapas, la primera etapa con el 100% del nivel de iluminancia requerido y la segunda etapa en forma escalonada (80%, 60%, 40%) hasta alcanzar el 40% del nivel de luminancia requerido.

La Zona de Umbral tiene una distancia igual a la Distancia de Seguridad, la primera etapa tiene una distancia de  $\frac{1}{2}$  DS y la otra etapa en forma escalonada con distancias de  $\frac{1}{3}$ ( $\frac{1}{2}$  DS).

Zona de Transición, esta zona se ilumina siguiendo la curva de adaptación de la CIE88:2004, para graficar la curva real de luminancia requerida, se realiza en función del tiempo en segundos hasta alcanzar un valor inferior o igual a 2 veces la Zona Interior, para 1s se tiene un valor del 22,52%, para 2s 14,88%, para 3s 10,08%, etc.

Esta curva se reemplaza por una en forma escalonada, con valores de  $\frac{1}{3}$ . Esta Zona tiene una longitud total en función de la Velocidad de Diseño y la curva de adaptación de la CIE88:2004, la longitud de esta zona se determina multiplicando la Velocidad de Diseño en m/s por 20s que es el tiempo que tarda el ojo humano para adaptarse de un nivel de iluminación alto a un nivel bajo.

Zona Interior, debe iluminarse en función de la Velocidad de Diseño y el Flujo de Tráfico (se recomienda un valor medio en el caso de no contar con suficiente información, este valor se obtiene de la **Tabla 7**, en el caso que el Túnel sea demasiado largo y requiera una segunda Zona Interior este valor se obtiene de la **Tabla 8**. Se debe realizar interpolaciones en función de la velocidad y el flujo de tráfico.

La Zona Interior, la longitud de la primera zona se obtiene multiplicando la Velocidad de Diseño en m/s por 30s y la longitud de la segunda zona corresponde a la longitud restante menos la longitud de la Zona de Salida.

Zona de Salida, esta zona se ilumina en dos tramos el primero debe iluminarse de forma lineal hasta alcanzar 5 veces la Zona Interior y el segundo tramo debe iluminarse a 5 veces la Zona Interior en una distancia de 20m. La longitud es igual a la Distancia de Seguridad más 20m.

Para la ayuda con los cálculos, se creó una herramienta de cálculo en el Software Excel, como se muestra en el **Anexo 3**.

**Procedimiento para Túneles Cortos.** Cuando la longitud del Túnel es estudio es corto debe seguirse el siguiente procedimiento.

Primeramente, debe evaluarse si el Túnel requiere de iluminación diurna completa, iluminación diurna media o no requiere de iluminación, con el Diagrama de la **Figura 13** se determina este nivel requerido. Con el valor de luminancia calculado anteriormente (luminancia en la entrada del Túnel) debe iluminarse a lo largo de todo el Túnel.

**Nivel de Iluminación Nocturna.** Si la calle adyacente al túnel tiene iluminación nocturna debe iluminarse el Túnel con ese mismo valor, para calcular este valor se debe marcar una malla de medición de acuerdo a la normativa (Reglamento Técnico Ecuatoriano [RTE], 2012), colocar el luxómetro a nivel de piso en cada uno de los puntos marcados y realizar la medición considerando que el valor se estabilice y procurando que la persona que está realizando la medición no haga sombras en el sensor. En el caso de que no cuente con iluminación adyacente se deben usar niveles Recomendados en la Normativa ARCONEL 006/18.

**Selección de Luminarias.** En la selección de las Luminarias, estas deben tener ciertas características constructivas para garantizar el correcto funcionamiento en ambientes de este tipo.

Los parámetros que se tienen que considerar al seleccionar luminarias son las siguientes:

- El grado de hermeticidad mínimo IP66.
- Grado de resistencia a los impactos mínimo un IK08.
- El índice de reproducción cromática CRI de >70.

Seleccionadas las Luminarias se deben descargar los archivos fotométricos, estos archivos los proporciona el fabricante.

**Simulación en Software.** Para la realización de la simulación para cumplir con los parámetros fotométricos establecidos, se debe realizar una simulación en un Software, existen varios programas que permiten la simulación entre los más conocidos hay Ulises y DIALux evo.

En el caso de usar el Software DIALux para la simulación en ambos casos se recomienda:

En la simulación para túneles cortos simplemente debe importarse un modelado 3d del túnel en estudio (se recomienda software que permita modelado 3d y exportación en formato IFC), y ajustar los parámetros de número de luminarias, la disposición, ajuste del área de estudio.

En la simulación para túneles largos se recomienda evaluar cada zona por separado con la longitud de la zona y el nivel calculado de igual manera configurar los parámetros para cumplir con los niveles calculados.

**Evaluación de la Eficiencia de la Instalación.** Para evaluar la eficiencia del sistema de iluminación estimado en el área de estudio, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se debe calcular la eficiencia energética de una instalación con la **Ecuación 16**, Una vez con el valor calculado, se procede a determinar el índice de eficiencia energética con la **Ecuación 17**. Para determinar la eficiencia energética de referencia se determina de la **Tabla 10** con el nivel de iluminancia previamente determinado.


A continuación, se debe calcular el índice de consumo energético con la **Ecuación 18**, con este valor debe compararse con los valores de la **Tabla 11** y de esta manera saber si el sistema de alumbrado simulado está en los diferentes niveles de la clasificación de la eficiencia energética. Es importante destacar que a medida que el sistema se acerca más al nivel A, su eficiencia se considera mejor.

## **Segundo Objetivo**

### ***5.4.3. Recopilación de información del Túnel de los Ahorcados***

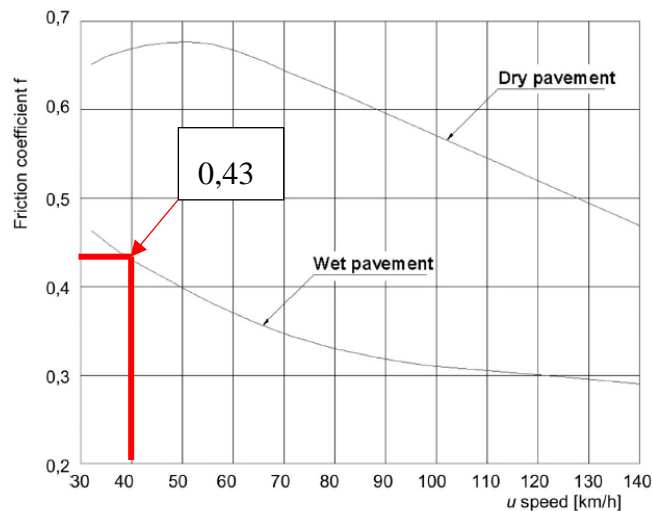
Primero se realizó una inspección visual del Túnel de los Ahorcados, recopilando información de la estructura del mismo, para las mediciones se usó una cinta métrica de 30 m de longitud como se expone en la **Tabla 12**.

**Tabla 12.** Datos del Túnel de los Ahorcados.

<b>Datos del túnel en estudio.</b>		
<b>Nombre del túnel</b>	Túnel de los Ahorcados	
<b>Ubicación geográfica</b>	3°59'35.7"S 79°12'24.8"W	
<b>Velocidad de diseño (Km/h)</b>	40	
<b>Longitud del túnel (m)</b>	171	
<b>Número de carriles</b>	2	
<b>Ancho de cada carril (m)</b>	4	
<b>Ancho de cada berma (m)</b>	0.8	
<b>Pendiente de la calzada (%)</b>	0	
<b>Altura máxima del túnel (m)</b>	5	
<b>Material de la calzada</b>	Concreto	<b>Tipo vía: R1</b>
<b>Dirección del tráfico</b>	Bidireccional	
<b>Densidad del tráfico (vehículos/hora)</b>	400 (valor medio para diseño)	
<b>Sentido de manejo</b>	Norte	
<b>Dirección de manejo</b>	Hemisferio Sur	
<b>Fotografía del túnel en estudio</b>		
		

#### 5.4.4. Distancia De Seguridad

Se procedió a calcular la Distancia de seguridad, el túnel en estudio posee una Velocidad de Diseño de 40 Km/h, el coeficiente de fricción longitudinal (pavimento mojado) para esa velocidad es de 0,43 (ver **Figura 24**), aplicando la **Ecuación 4** y una pendiente nula se obtiene una distancia de:



**Figura 24.** Determinación del coeficiente de fricción longitudinal.

*Fuente:* Adaptada de (CIE, 2004).

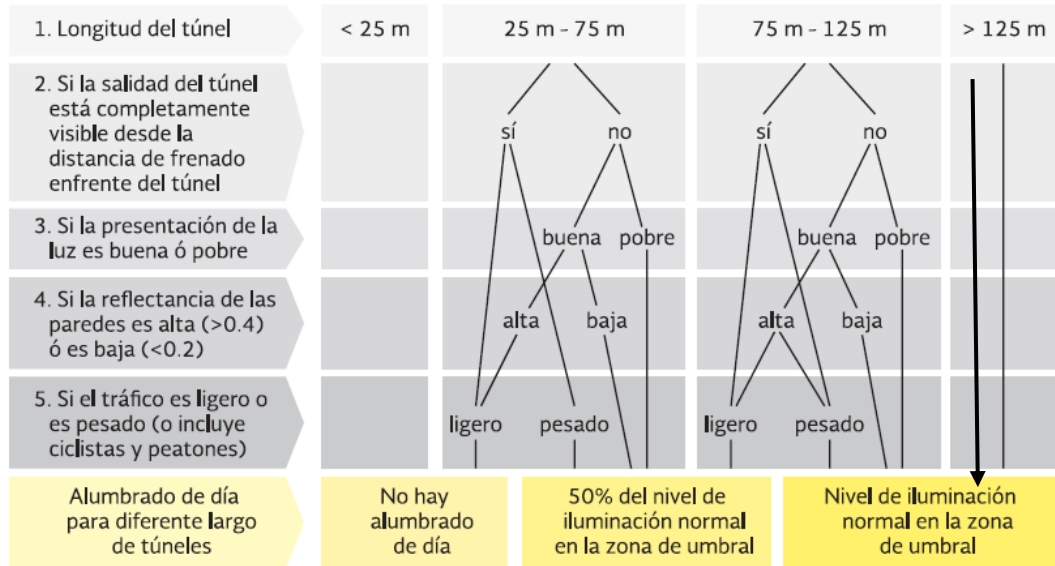
$$Ds = 0.694(40) + \frac{40^2}{254(0,43 \pm 0)} = 42 \text{ m}$$

Obteniendo una Distancia de Seguridad de 42 m, para el dimensionamiento fotométrico del túnel en estudio.

#### 5.4.5. Cálculo de luminancia requerida en la entrada del túnel

El Túnel de los Ahorcados tiene una longitud de 171 m y una Velocidad de Diseño de 40 Km/h igual a 11,11 m/s se multiplicó esta velocidad por 20 s que es el tiempo de adaptación de un nivel alto a un nivel bajo del ojo humano según ([CIE], 2004), se obtiene una longitud de 222,2 m que es mayor que la longitud del Túnel, por esta razón se aplicó el procedimiento para Túneles Cortos.

Con la información recopilada, se procedió a evaluar si el túnel requiere iluminación diurna, debido a la longitud del mismo que es mayor a 125 m se requiere un nivel de iluminación normal de la Zona de Umbral a lo largo de todo el túnel **Figura 25**.



**Figura 25.** Diagrama de iluminación Diurna en túneles cortos.

**Fuente:** Adaptada de (SCT, 2016).

Con una Distancia de Seguridad de 42 m, se procedió con el cálculo de la Iluminancia en la Zona de Umbral, utilizando el Método de Contraste Percibido, para evaluar la luminancia de velo equivalente  $L_{seq}$ . Para emplear este método se realizaron los siguientes pasos:

Se tomó una fotografía con la Cámara Digital Sony DSC-W730, desde una distancia de 42 m medida desde la boca de entrada al túnel y a una de altura de 1,25 m apuntando al centro del carril de evaluación **Figura 26.**



**Figura 26.** Fotografía del Túnel de los Ahorcados.



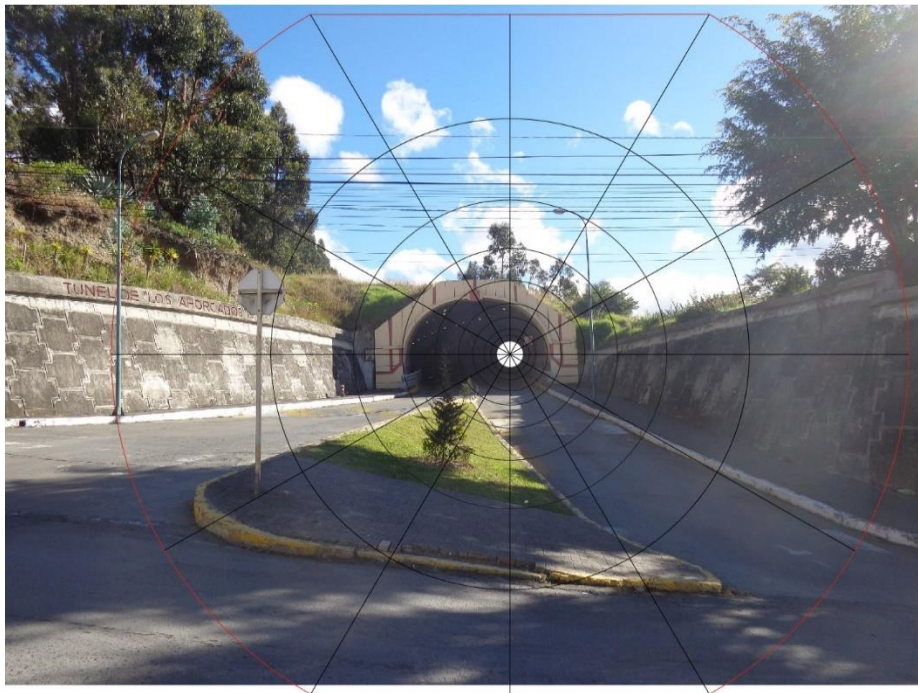
Para superponer el diagrama polar en la fotografía tomada para la evaluación de la luminancia medida fuera del coche en frente al parabrisas, se determinó el diámetro del anillo central para dibujarlo en la fotografía. En primer lugar, se calculó el ángulo de visión con el ancho de 9,6 m del túnel y una distancia de seguridad de 42 m, haciendo uso de la **Ecuación 13**.

$$\alpha = 2 * \arctg\left[\frac{9,6}{2 * 42}\right] = 57 * 9,6/42 \quad = \mathbf{0,01^\circ}$$

Obteniendo un ángulo  $\alpha = 0,01^\circ$ , se calculó el diámetro del círculo central que fue dibujado en la fotografía tomada, para ello se realizó por trigonometría (ver **Figura 23**) y aplicando la **Ecuación 13**.

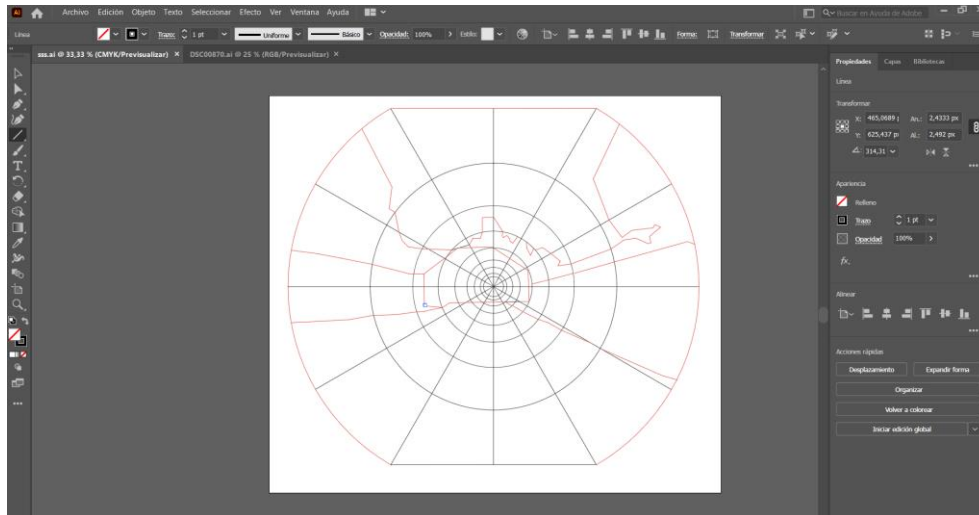
$$d = 2(\text{Tang}(0,01) * 42\text{m}) \quad = \mathbf{0,015\text{m}}$$

Con un diámetro de 15 mm, se dibujó el anillo central y se superpuso el diagrama polar para la evaluación, teniendo en cuenta que el anillo central coincide con el círculo dibujado en la fotografía **Figura 27**. Este procedimiento se llevó a cabo en el software Adobe Illustrator.



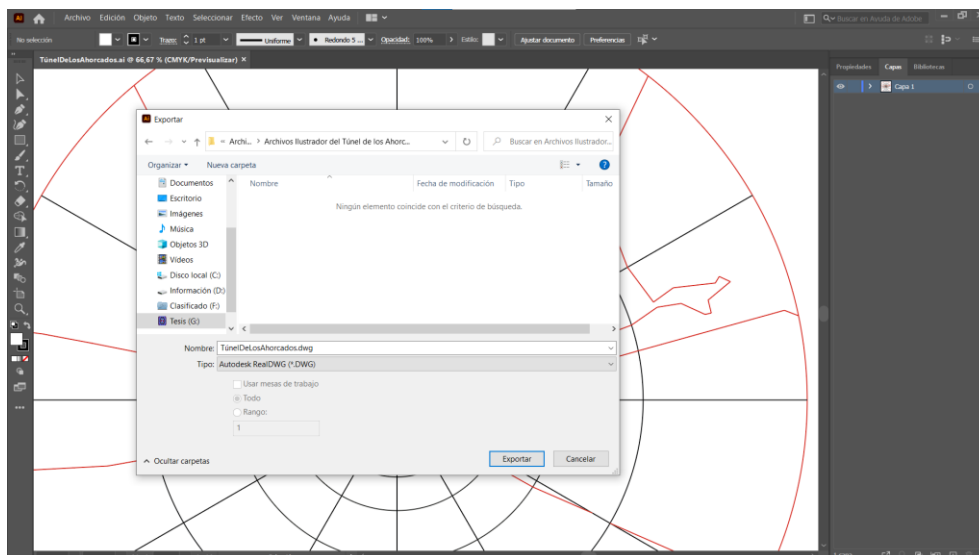
**Figura 27.** Diagrama polar superpuesto en la fotografía de evaluación.

Con la herramienta Segmento de Línea del Software (Adobe Illustrator), se dibujó el perfil de la fotografía (que incluye vegetación, túnel, construcción, cielo) en el diagrama, para su posterior evaluación como se muestra en la **Figura 28**.



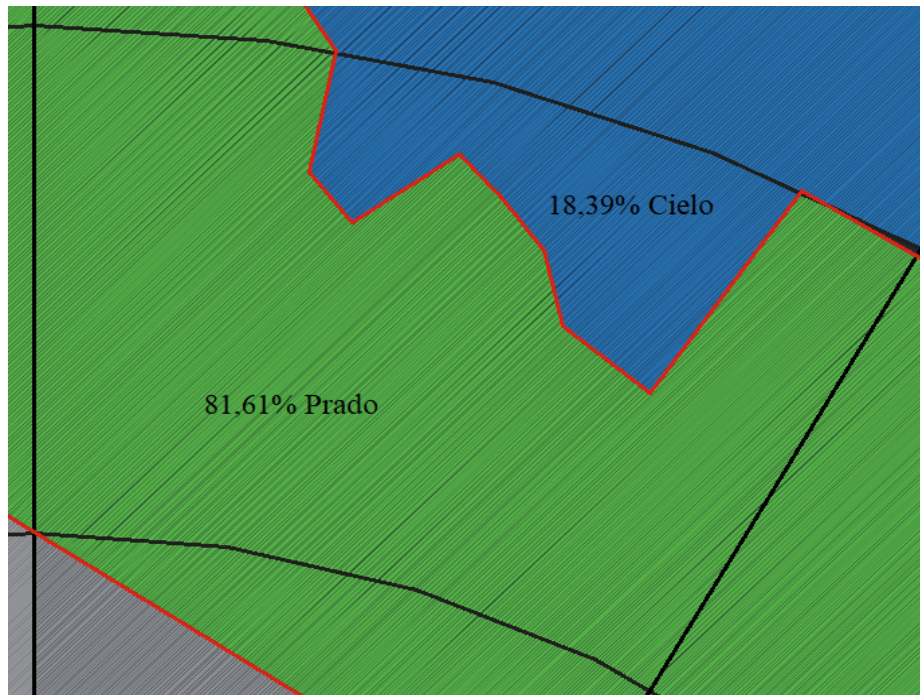
**Figura 28.** Perfil de la fotografía montada en el diagrama polar.

El archivo `TunelDeLosAhorcados.ai` (extensión.ai) fue exportó a `TunelDeLosAhorcados.dwg` (extensión.dwg) para su utilización en el Software AutoCAD **Figura 29**.



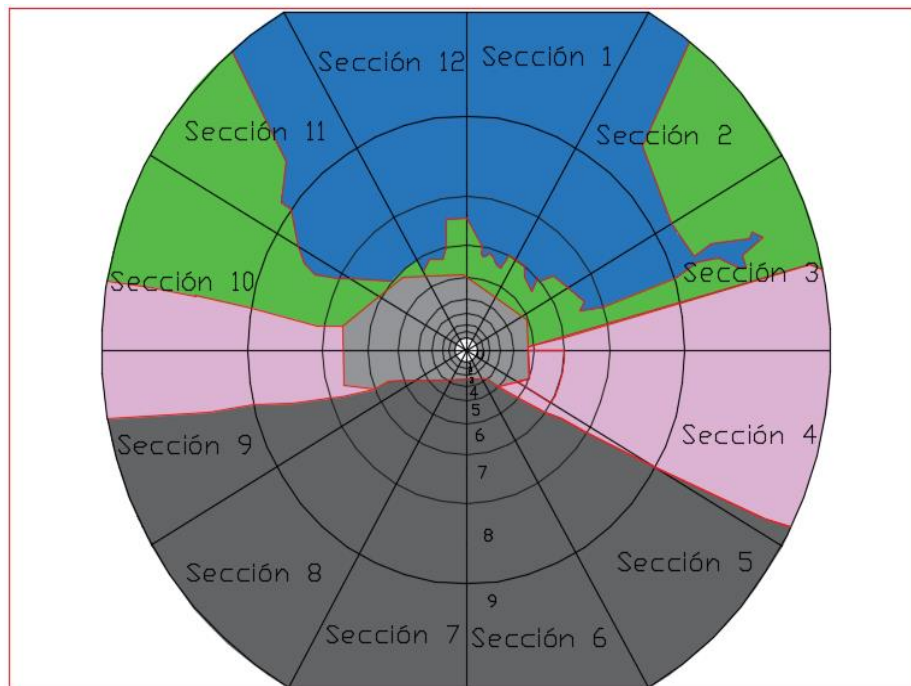
**Figura 29.** Exportación del archivo `TunelDeLosAhorcados`.

Se procedió a evaluar cada sección del diagrama, para determinar el porcentaje de cada zona, utilizando el Software AutoCAD y la herramienta medición de áreas. Para la Sección 1 Anillo 6, un porcentaje de 18,39 % de Cielo y un 81,61 % Prado, como se puede observar en la **Figura 29**.



**Figura 30.** Evaluación Sección 1 Anillo 6.

Se llevó a cabo el mismo procedimiento anterior para evaluar la totalidad del Diagrama Polar, como se muestra en la **Figura 31**. Es relevante destacar que, para la evaluación, tanto el anillo central como las secciones 1, 6, 7, 12 del anillo 9 deben ser excluidos del análisis.



**Figura 31.** Evaluación para todo el diagrama.

Para la evaluación de la luminancia media de cada sección en  $Kcd/m^2$  (medida fuera del coche, en frente al parabrisas Lij), se multiplicó el porcentaje obtenido de cada sección y anillo

por el valor de luminancia de la **Tabla 4**. En el caso de la Sección 1 Anillo 6, los resultados se detallan en la **Tabla 13**.

**Tabla 13.** Resultados de la evaluación Sección 1, anillo 6.

<b>Anillo 6</b>		<b>Valor de luminancia de la Tabla 4 Kcd/m<sup>2</sup></b>	<b>Valor Kcd/m<sup>2</sup></b>	
<b>1</b>	Cielo	18,39%	16	2,94
	Camino	0%	5	0
	Rocas	0%	1	0
	Edificio	0%	4	0
	Nieve	0%	5	0
	Prado	81,61%	2	1,63
	Túnel	0%	0	0
		100%		4,57

Se obtuvo un valor de 4,57 Kcd/m<sup>2</sup>, el mismo procedimiento se realizó para todo el diagrama (ver **Tabla 14**, **Tabla 15** y **Tabla 16**). Dado que el Túnel De los Ahorcados se encuentra en el hemisferio sur, los valores de N y S se intercambiaron, el manejo de circulación se dirige hacia el Norte.

Tabla 14. Cálculo detallado de iluminancia de velo equivalente.

## UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Trabajo de titulación: Sistemas de Iluminación para Túneles

Tesisista: José Alejandro Masache Neira

Dirección	Lc cielo	Lc carretera	Le entorno				
			Rocas	Edificio	Prado	Nieve(V)	Nieve(H)
N	16	5	1	4	2	5	15
E-W	12	4	2	6	2	10	15
S	8	3	3	8	2	15	15

	Dirección de Manejo		Lc		Lr		Le									
	N	16	5	1	4	2	0	6	7	8	9					
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9			NC				
	0	0	0	0	0,752	4,5702	14,9962	16								
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	18%	Cielo	93%	Cielo		100%	Cielo		
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino		0%	Camino		
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas		0%	Rocas		
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio		0%	Edificio		
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve		0%	Nieve		
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	38%	Prado	81%	Prado		7%	Prado		
	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	62%	Túnel	0%	Túnel		0%	Túnel		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		100%			
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9							
	0	0	0	0	0,9346	3,6282	14,6378	16	8,1726							
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	12%	Cielo	90%	Cielo	100%	Cielo	44%		
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%		
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%		
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%		
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%		
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	47%	Prado	88%	Prado	10%	Prado	56%		
	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	53%	Túnel	0%	Túnel	0%	Túnel	0%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9							
	0	0	0	0	0,4002	2,3784	5,7108	8,7086	4,0704							
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	23%	Cielo	43%	Cielo	9%				
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%				
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%				
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	19%	Edificio	28%	Edificio	42%				
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%				
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	20%	Prado	81%	Prado	49%	Prado	21%	Prado	50%
	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	80%	Túnel	0%	Túnel	0%	Túnel	0%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				

Tabla 15. Continuación.

4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0	0	0	1,0504	4	4	4	4,0555
	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6%
	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	
0%	0%	0%	0%	26%	100%	100%	100%	94%	
Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	
100%	100%	100%	100%	74%	0%	0%	0%	0%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0	0,2035	1,8395	4,5809	4,7347	4,8815	4,9739	5
	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino
	0%	0%	4%	37%	58%	73%	88%	97%	100%
	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	
0%	0%	0%	0%	42%	27%	12%	3%	0%	
Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	
100%	100%	96%	63%	0%	0%	0%	0%	0%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0	2,8215	5	5	5	5	5	NC
	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino
	0%	0%	56%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	
100%	100%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0	0	5	5	5	5	5	NC
	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino
	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	
100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0	0,114	2,696	4,79	5	5	5	5
	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo	Cielo
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino	Camino
	0%	0%	2%	54%	96%	100%	100%	100%	100%
	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas	Rocas
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	Edificio	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	Nieve	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	Prado	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	
100%	100%	98%	46%	4%	0%	0%	0%	0%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

Tabla 16. Continuación.

9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	0	0	0	0,279	1,3485	2,985	4,4759	4,6081	
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	6%	Camino	27%	Camino	33%
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	34%	Edificio	52%
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%
Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	94%	Túnel	73%	
	100%		100%		100%		100%		100%	
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	0	0	0	0	0	1,7444	3,5676	2,6974	
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	1%	Cielo	7%
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	15%	Edificio	32%
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	50%	Prado	61%
Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	34%	
	100%		100%		100%		100%		100%	
11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	0	0	0	0	3,9584	14,341	15,3056	8,37	
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	25%	Cielo	88%
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	12%	Prado	5%
Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	75%	Túnel	0%	
	100%		100%		100%		100%		100%	
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	0	0	0	0	4,276	13,5486	16		
	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	0%	Cielo	18%	Cielo	82%
	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	0%	Camino	100%
	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%	Rocas	0%
	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%	Edificio	0%
	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%	Nieve	0%
	Prado	0%	Prado	0%	Prado	0%	Prado	68%	Prado	18%
Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	100%	Túnel	13%	Túnel	0%	
	100%		100%		100%		100%		100%	
									Nc	

En la **Tabla 17** se resumen los valores de luminancia promedio de cada sección obtenidos a partir del análisis de todo el Diagrama Polar.

**Tabla 17.** Tabla de resultados de luminancia calculada.

Luminancia promedio de cada sección en Kcd/m <sup>2</sup> (medido fuera del automóvil frente al parabrisas)										
Sección	Anillo									Suma
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	4,57	15,00	16,00	NC	36,32
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	3,63	14,64	16,00	8,17	43,37
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	2,38	5,71	8,71	4,07	21,27
4	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	4,00	4,00	4,00	4,06	17,11
5	0,00	0,00	0,20	1,84	4,58	4,73	4,88	4,97	5,00	26,21
6	0,00	0,00	2,82	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	NC	27,82
7	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	NC	25,00
8	0,00	0,00	0,11	2,70	4,79	5,00	5,00	5,00	5,00	27,60
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	1,35	2,99	4,48	4,61	13,70
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,74	3,57	2,70	8,01
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,96	14,34	15,31	NC	33,61
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,28	13,55	16,00	NC	33,82
									Lij	313,8369

Se multiplicó cada valor (de cada sección y anillo) de la luminancia promedio medida fuera del automóvil frente al parabrisas, por la transmitancia para el parabrisas y se sumó el resultado al valor de luminancia de cada sección frente al ojo (valores recomendados para diseño según la CIE). Para la sección 1 anillo 6, con un valor de 4,57 Kcd/m<sup>2</sup>, aplicando la **Ecuación 12** se obtiene:

$$L_{ije} = \left( 0,8 * 4,57 \frac{Kcd}{m^2} \right) + 0,1 = 3,76 \frac{Kcd}{m^2}$$

Obteniendo par esta sección y anillo un valor de 3,76 Kcd/m<sup>2</sup>, se realizó el mismo procedimiento para todos los valores. En la **Tabla 18** se presentan los valores de Luminancia de cada sección frente al ojo (Lije):



**Tabla 18.** Tabla de resultados de luminancia calculada delante del ojo.

Luminancia de cada sección en Kcd/m2 delante del ojo										
Sección	Anillo									Suma
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,70	3,76	12,10	12,90	0,00	29,85
2	0,10	0,10	0,10	0,10	0,85	3,00	11,81	12,90	6,64	35,60
3	0,10	0,10	0,10	0,10	0,42	2,00	4,67	7,07	3,36	17,91
4	0,10	0,10	0,10	0,10	0,94	3,30	3,30	3,30	3,34	14,58
5	0,10	0,10	0,26	1,57	3,76	3,89	4,01	4,08	4,10	21,87
6	0,10	0,10	2,36	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	0,00	23,06
7	0,10	0,10	0,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	0,00	20,80
8	0,10	0,10	0,19	2,26	3,93	4,10	4,10	4,10	4,10	22,98
9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,32	1,18	2,49	3,68	3,79	11,86
10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,50	2,95	2,26	7,31
11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	3,27	11,57	12,34	NC	27,68
12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	3,52	10,94	12,90	NC	27,86
									Lije	261,3695

Con un valor de luminancia delante del ojo del conductor de 216,3695 Kcd/m<sup>2</sup>, se procedió a calcular el valor de luminancia de velo equivalente, aplicando la **Ecuación 11**.

$$L_{seq} = 5,1 * 10^{-4} * 261,3695 \frac{Kcd}{m^2} = 133 \frac{cd}{m^2}$$

Se calculó una Luminancia de velo equivalente igual a 133 cd/m<sup>2</sup>. Para determinar el nivel de luminancia requerida en la Zona de Umbral, se utilizaron los coeficientes de transmisividad atmosférica y para el parabrisas, según la norma CIE 88:2004 para diseño, son 1 y 0,8 respectivamente. Se seleccionó un valor medio de la luminancia de velo atmosférico y parabrisas de la **Tabla 4**, de acuerdo con las recomendaciones de la normativa para diseño.

El mínimo contraste percibido requerido para el diseño es de -28 %, con un factor de reflexión del objeto con 0,2. El coeficiente de revelado de contraste es de 0,2 para un Sistema simétrico y de 0,6 y para un Sistema Asimétrico (recomendaciones de la norma CIE88:2004), aplicando la **Ecuación 14** se obtiene:

$$L_{th} = \frac{0,8 * 200 \frac{cd}{m^2} + 100 \frac{cd}{m^2} + 133 \frac{cd}{m^2}}{0,8 * 1} = 342 \frac{cd}{m^2} \text{ Sistema simétrico}$$

$$\frac{1}{-0,28 \left( \frac{0,2}{\pi * 0,2} - 1 \right) - 1}$$

$$L_{th} = \frac{0,8 * 200 \frac{cd}{m^2} + 100 \frac{cd}{m^2} + 133 \frac{cd}{m^2}}{0,8 * 1} = 224,2 \frac{cd}{m^2} \text{ Sistema asimétrico}$$

$$\frac{1}{-0,28 \left( \frac{0,2}{\pi * 0,6} - 1 \right) - 1}$$

Dado que el túnel en estudio es bidireccional, el sistema seleccionado a instalar es el Sistema Simétrico con un valor de 342 cd/m<sup>2</sup> a lo largo del todo el Túnel. Para llevar a cabo la simulación en el Software DIALux, se consideró que el pavimento del túnel es de tipo R1, con un coeficiente de reflectancia de 0,1 según la CIE. Para calcular la iluminancia necesaria, este valor se dividió por 342 cd/m<sup>2</sup>, resultando un valor de 3 420 lux. Con este valor se realizó la simulación para seleccionar el tipo de luminaria que cumple con los requerimientos en el dimensionamiento de este tipo de sistemas.

#### **5.4.6. Nivel de iluminancia Nocturna**

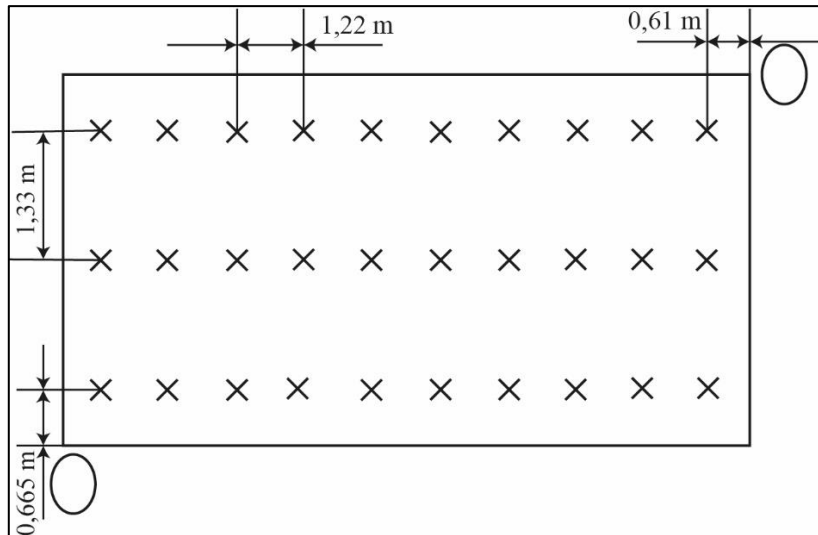
Se llevaron a cabo mediciones de iluminancia en los alrededores del Túnel de los Ahorcados debido a la presencia de iluminación nocturna en la zona (ver **Anexo 6**).

Se realizó el cálculo de la malla de medición con una interdistancia entre luminarias de 12,22 m y un ancho de carril de 4 m, aplicando la metodología del (Reglamento Técnico Ecuatoriano [RTE], 2012).

$$D = \frac{12,2 \text{ m}}{10} = 1,22 \text{ m}$$

$$d = \frac{4 \text{ m}}{3} = 1,33 \text{ m}$$

Dado que la distancia entre las luminarias es menor a 30 m, el valor de N es igual a 10. Esto resultó en una distancia entre puntos longitudinalmente de 1,22 m y una distancia entre puntos transversalmente de 1,33 m, como se muestra en la **Figura 32**. Esta malla se trazó en la calzada para llevar a cabo las mediciones.

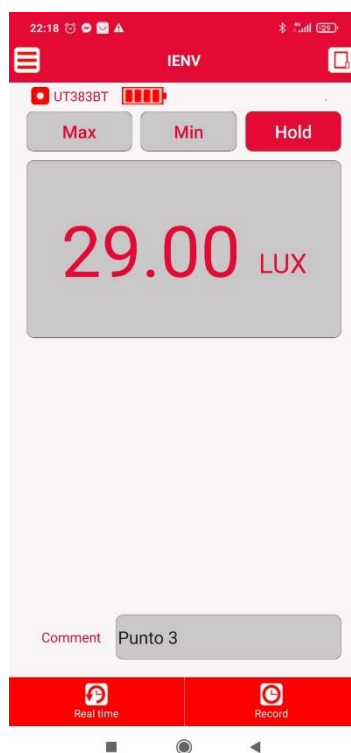


**Figura 32.** Disposición de los puntos de medición.

Las consideraciones tomadas en la medición son:

- Las mediciones realizadas fueron tomadas a nivel del piso.
- Se colocó el Luxómetro en el punto de medición y se esperó un período de tiempo hasta que el valor se estabilizara.
- Para evitar la proyección de sombras en el sensor y, por ende, mediciones erróneas, se mantuvo una distancia prudente entre el Luxómetro y la persona encargada de colocar el equipo en el punto de medición.
- Se utilizó chaleco reflectante para la realización de mediciones.

Se llevaron a cabo las mediciones en cada punto marcado utilizando la aplicación UNIT (ver **Figura 33**) con el luxómetro, que cuenta con tecnología Bluetooth. Esto permitió evitar mediciones incorrectas causadas por sombras.



**Figura 33.** Aplicación usada en la medición.

En la **Tabla 19** se detallan la hora de inicio y fin de la medición, así como el número de identificación del poste donde se realizaron las mediciones.

**Tabla 19.** Tabla de mediciones realizadas.

<b>Hora de Inicio</b>	<b>21:30</b>
<b>Hora Fin</b>	23:30
<b>Poste Nro 1</b>	137041
<b>Poste Nro 2</b>	137041
<b>Unidades</b>	lx

Los valores de las mediciones tomadas en cada punto marcado en la calzada del Túnel de evaluación se detallan en la **Tabla 20**.

**Tabla 20.** Valores de las mediciones realizadas.

Descrip.	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Carril</b>	Dist.	0,61	1,83	3,05	4,28	5,59	6,72	7,94	9,17	10,39	11,61
		0,67	24	24	18	18	15	17	18	19	15
<b>1</b>	2,00	26	24	20	22	18	18	23	24	10	10
	3,33	26	24	22	25	20	18	28	26	13	10
	4,67	27	25	28	28	23	19	29	25	18	28
<b>2</b>	6,00	28	25	30	29	26	18	16	20	22	28
	7,33	29	27	26	28	27	26	15	25	23	26

Una vez completadas las mediciones en los puntos marcados, se llevaron a cabo mediciones adicionales en algunos puntos dentro de la malla de evaluación, para verificar la precisión de los valores.

Finalmente, los resultados de las mediciones realizadas se detallan en la **Tabla 21**.

**Tabla 21.** Resultados de la medición realizada.

<b>Valores</b>	<b>Iluminancia</b>	
	Parámetros	Motorizado
<b>Mediciones</b>	Iluminancia Promedio - Eprom(lx)	22,15
	Iluminancia Mínima - Emin(lx)	10,00
	Iluminancia Máxima - Emax(lx)	30,00
	Uniformidad General ( $U_o = E_{min}/E_{prom}$ )	45,15 %

El valor promedio de la iluminancia medida en cada punto marcado es de 22,15 lux, esta es la cantidad mínima requerida de iluminación durante la noche en todo el túnel.

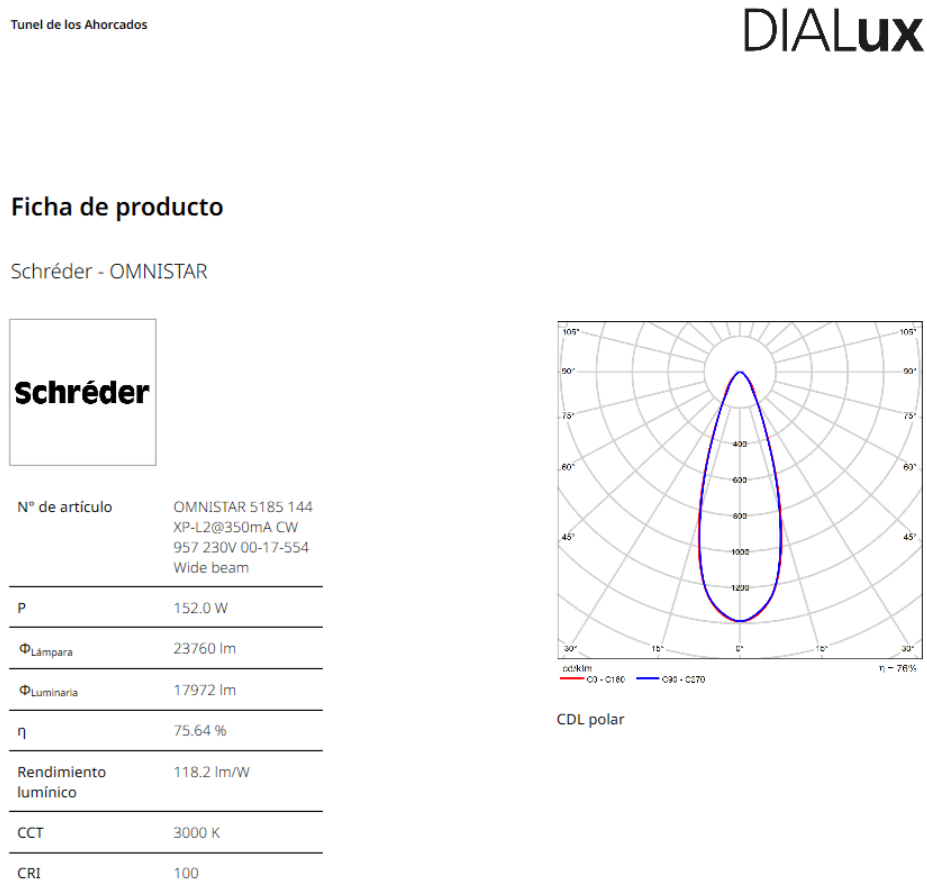
#### **5.4.7. Selección De Luminarias**

Para la simulación, se han seleccionado las OMNISTAR del fabricante Schröder. Estas luminarias están diseñadas para ser controladas con un drive IzyHub, que permite su control por el protocolo 1.10V (ver **Anexo 4** y **Anexo 5**), lo que facilita una instalación y mantenimiento más rápidos. Además, este dispositivo cuenta con un sistema de protección contra sobretensiones.

Las características de las luminarias seleccionadas son las siguientes:

- Grado de hermeticidad es de IP66.
- Grado de resistencia a los impactos de IK08.
- El número de LEDs es de 144.
- Corriente de alimentación (mA) de 350.

Las especificaciones Fotométricas de las luminarias seleccionadas se muestran en la **Figura 34**.

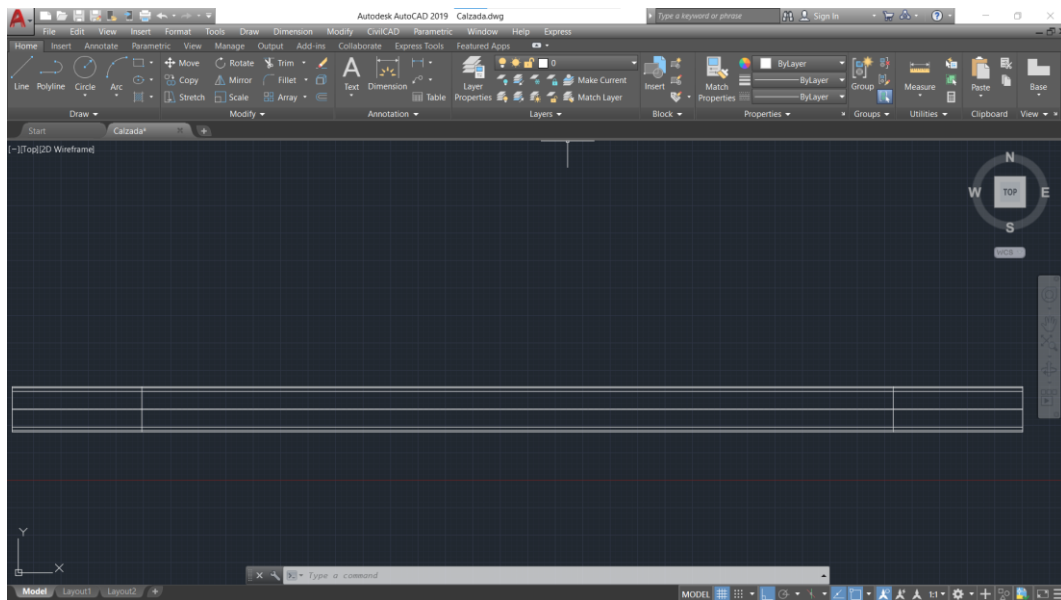


**Figura 34.** Características Fotométricas de la luminaria seleccionada.

Cumpliendo con las especificaciones técnicas de la normativa nacional para las especificaciones de luminarias de alumbrado público.

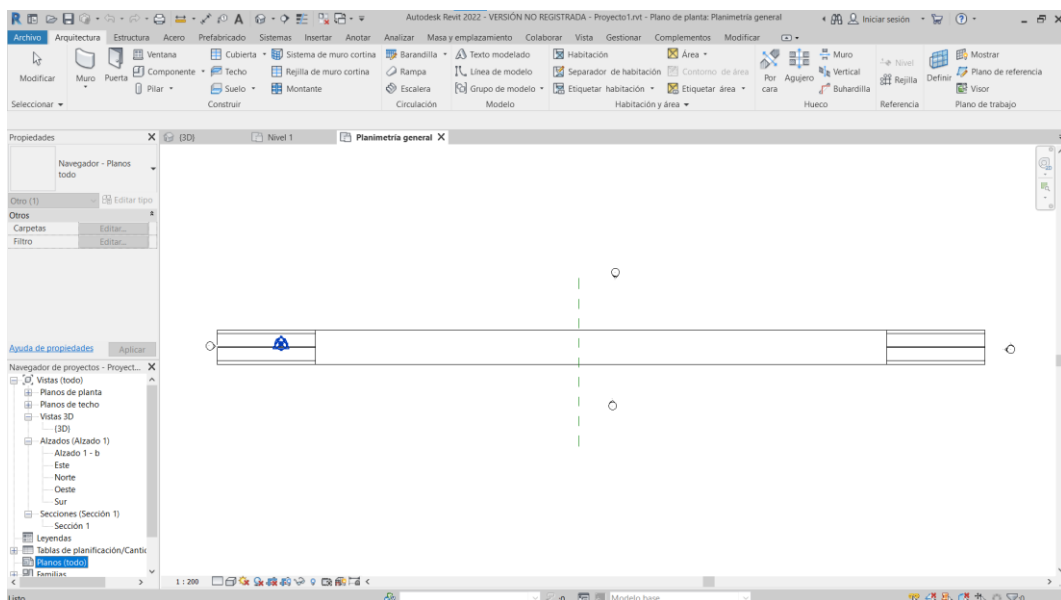
#### **5.4.8. Simulación en Software**

Las simulaciones Diurna y Nocturna se llevaron a cabo utilizando el software DIALux. En primer lugar, se creó un diseño en 2D en AutoCAD (CalzadaTunelDeLosAhorcados.dwg) que incluye las dimensiones de la calzada, la berma y la longitud del túnel en estudio, como se muestra en la **Figura 35**.



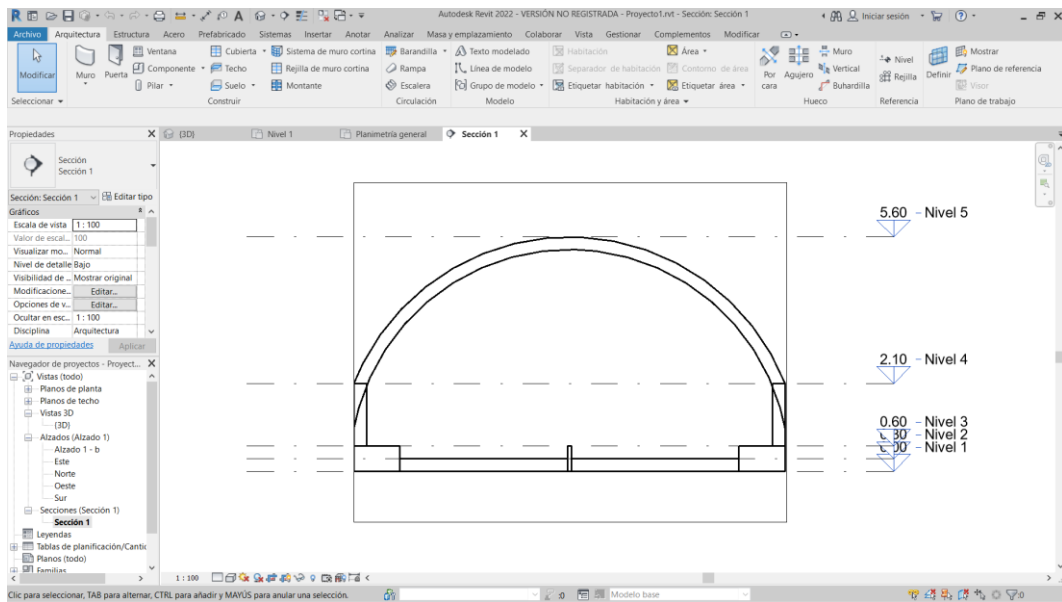
**Figura 35.** Diseño 2D en el Software AutoCAD.

Con el diseño en 2D, se lo importó al Software Revit, para construir un modelo 3D con las características y medidas reales del Túnel (ver **Figura 36**).



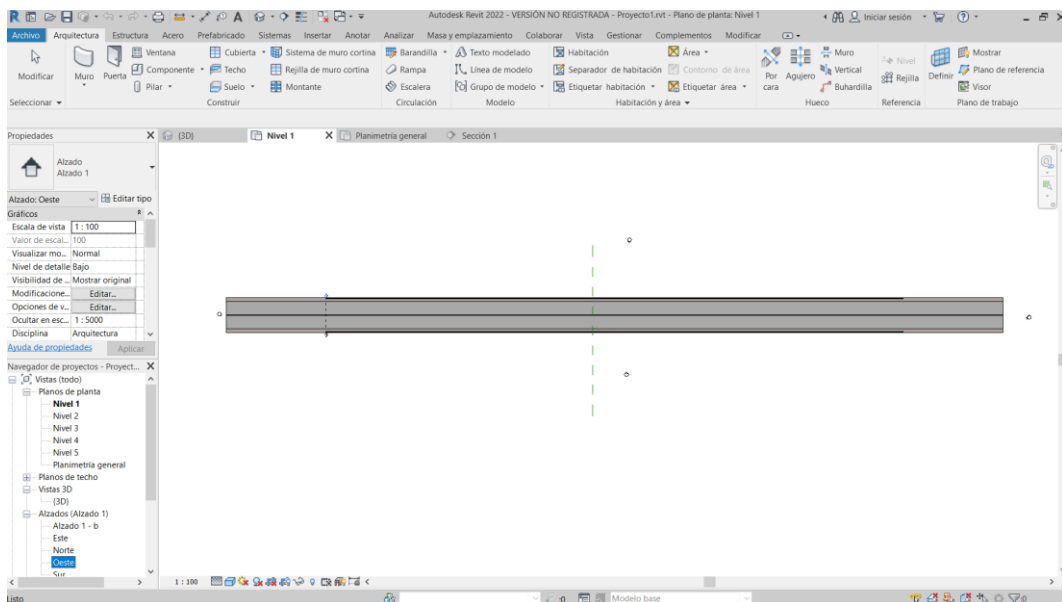
**Figura 36.** Importación del archivo 2D a Revit.

Para la realización del modelo en 3D a partir del plano 2D, se configuraron los niveles, los cuales permiten restringir las alturas tanto de los muros como del techo. Para este diseño, se consideró un espesor de 30 cm, el cual no interfirió en la simulación fotométrica, puesto que no se conoce este factor, como se muestra en la **Figura 37**.



**Figura 37.** Configuración del área de trabajo Revit.

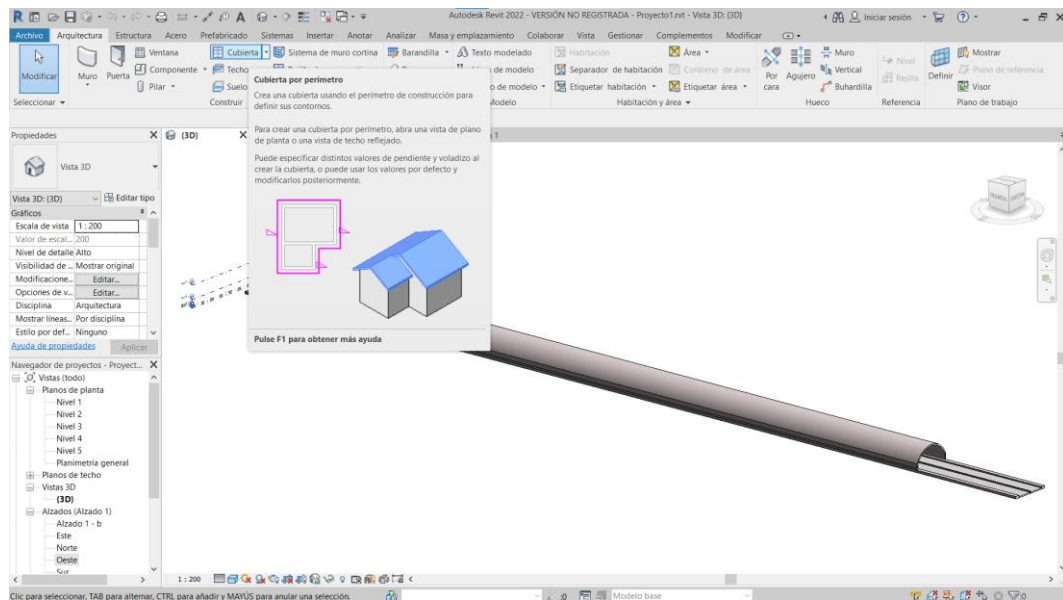
Para la construcción de los muros, calzada y berma del túnel, se utilizó la herramienta de construcción de muros (ver **Figura 38**).



**Figura 38.** Modelado de muros, berma y calzada.

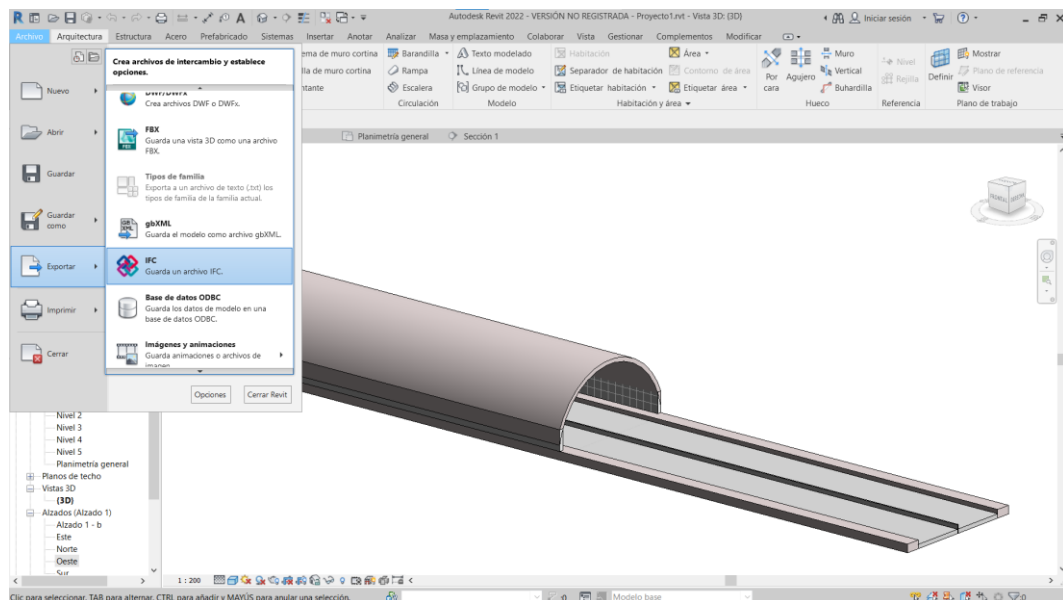
Después, se procedió a construir el techo del túnel utilizando la herramienta cubierta por perímetro, para crear la forma abovedada, tal como se muestra en la **Figura 39**.





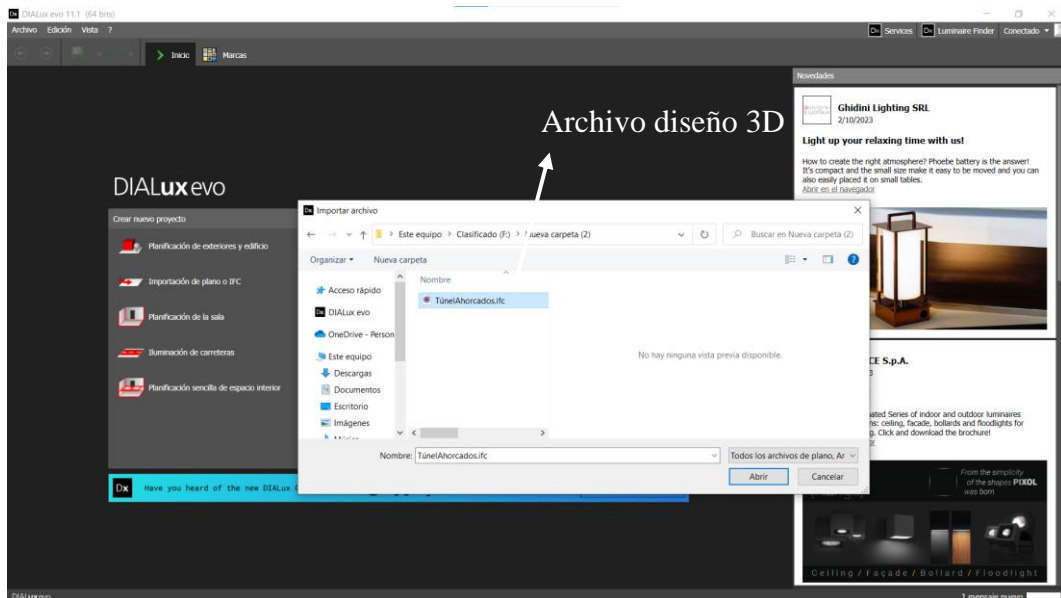
**Figura 39.** Modelado del techo del túnel.

Una vez Finalizado el diseño 3D en el software Revit, se exportó en formato IFC (TúnelAhorcados.ifc) para su uso en el Software DIALux y llevar a cabo las simulaciones fotométricas (ver **Figura 40**).



**Figura 40.** Exportación del modelo 3D en formato IFC.

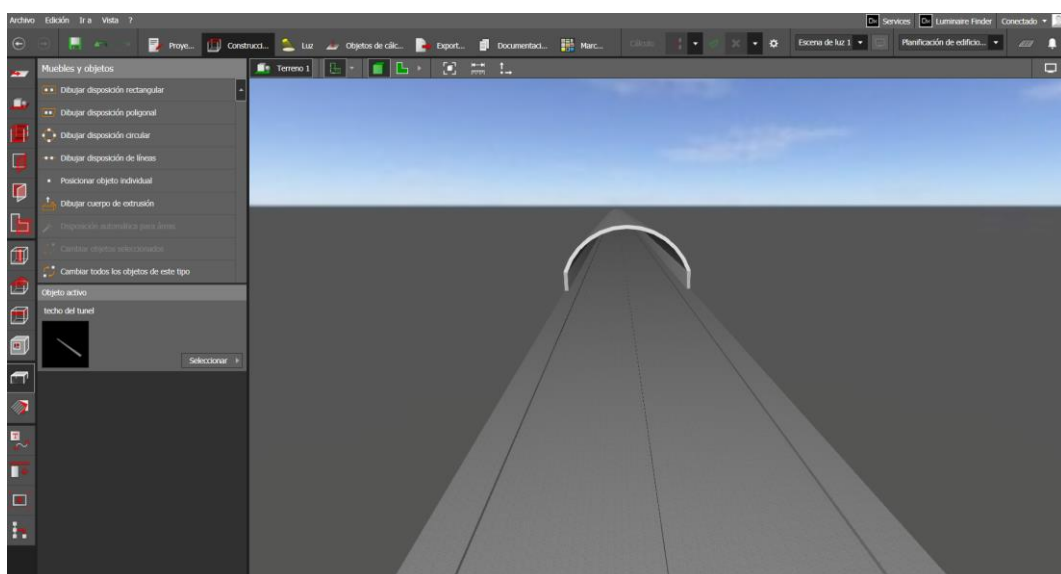
Con esto, se importó archivo con el diseño 3D del túnel en el software DIALux, para su posterior uso en las simulaciones correspondientes **Figura 41**.



**Figura 41.** Importación del archivo TúnelAhorcados.ifc.

Finalmente, con el diseño dentro del entorno de DIALux (Ver **Figura 42**), se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

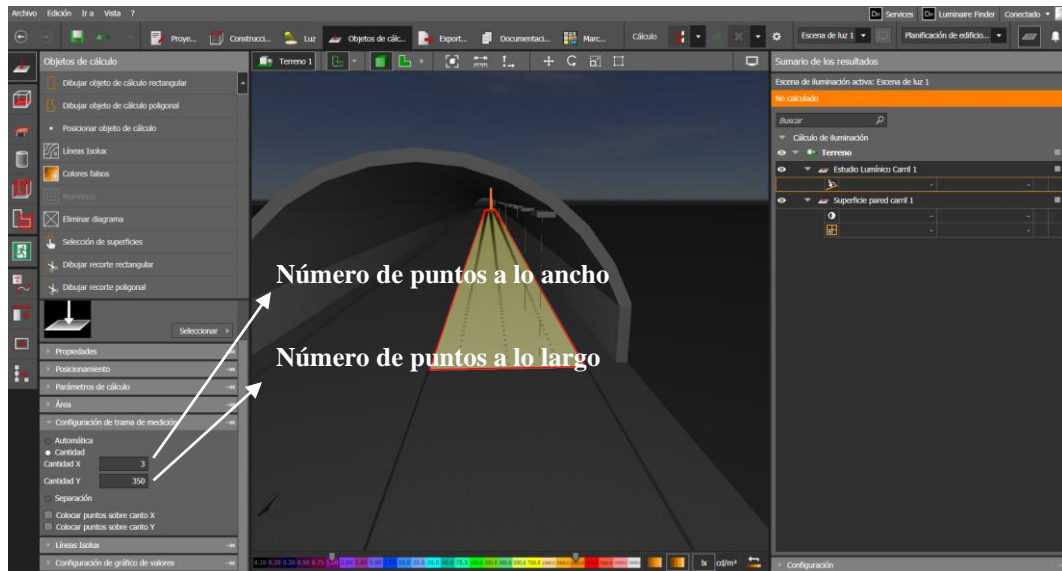
- Se analizó el túnel como un túnel recto.
- Se estableció una altura de 1,5 m para el recubrimiento del material reflectante (baldosa).
- Se excluyeron las barreras de protección del análisis debido a las sombras que generan las paredes.



**Figura 42.** Modelado 3D del Túnel en el Software DIALux.

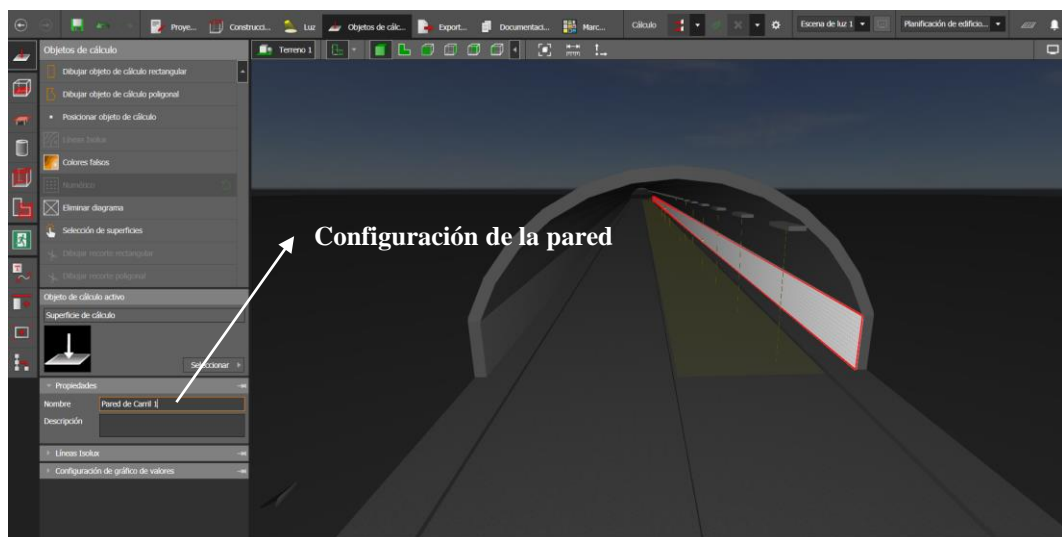
**Simulación Diurna.** Para la simulación Diurna, se configuró una malla de medición, con la opción ‘Objetos de cálculo’. Se colocaron 3 puntos de cálculo a lo ancho del carril, con

una distancia de 1,33 m entre cada punto, y 350 puntos de medición a lo largo, como se muestra en la **Figura 43**. Este estudio se realizó para el carril 1, en dirección al norte.



**Figura 43.** Configuración de la malla de medición Carril 1.

Asimismo, se configuró una malla de medición en la pared del carril 1 (ver **Figura 44**), con la opción 'Objetos de Cálculo' y la herramienta selección de superficies.



**Figura 44.** Configuración de la malla de medición Pared Carril 1.

Con las mallas de medición configuradas, se procedió a insertar el archivo fotométrico (extensión. iess) de la luminaria seleccionada **Figura 45**.

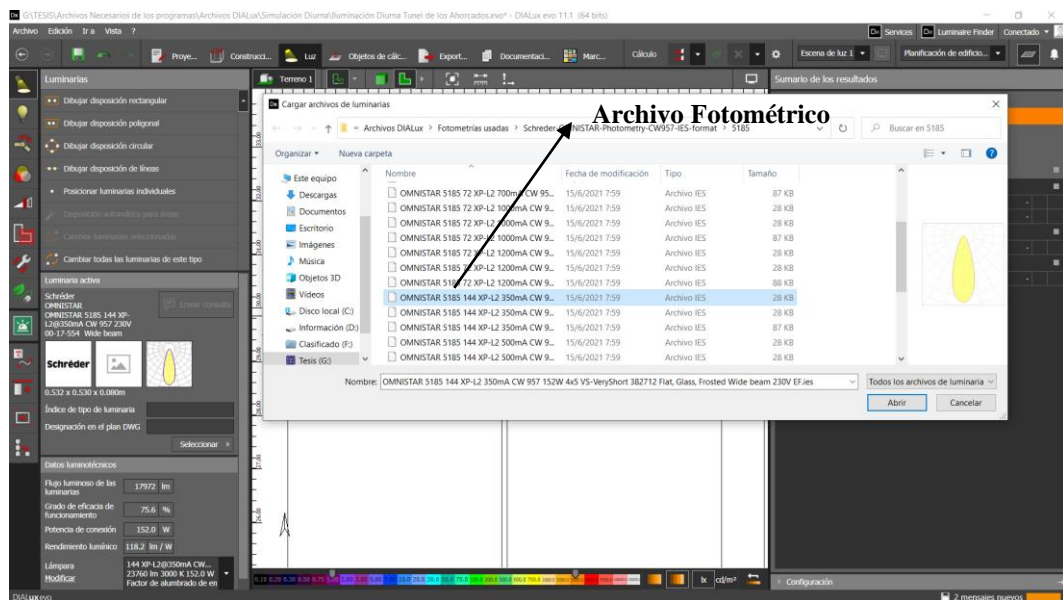


Figura 45. Importación del archivo fotométrico de luminaria al Software.

El entorno de simulación se configuró con la luminaria seleccionada, y a continuación, se procedió a evaluar el factor de mantenimiento. Esto se hizo para garantizar la confiabilidad del sistema instalado. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

Se consideró un factor de depreciación del flujo luminoso de la lámpara es de 0,95 y el factor de supervivencia de la lámpara de 0,95 datos del fabricante.

El factor de depreciación de la luminaria se seleccionó en función de las siguientes características:

- Grado de Protección IP66.
- Protector de vidrio templado
- Un grado de contaminación medio por ser una vía urbana sometida a un tráfico medio.

El factor seleccionado es de 0,96. El intervalo de limpieza de las lámparas es de 1 año para garantizar el valor seleccionado de la **Tabla 2**.

Factor de depreciación de las superficies del recinto para túneles de carretera o pasos inferiores, la longitud del Túnel de 171 m, ancho de carril 4 m y altura de montaje de 4,280 m, el índice de recinto es de 0,98 mayor a 0,7 se seleccionó un recinto medio, una distribución del flujo directo y una contaminación baja, el valor seleccionado es de 0,98. El período de limpieza del Túnel es de 1 año para garantizar el factor seleccionado de la **Tabla 3**.

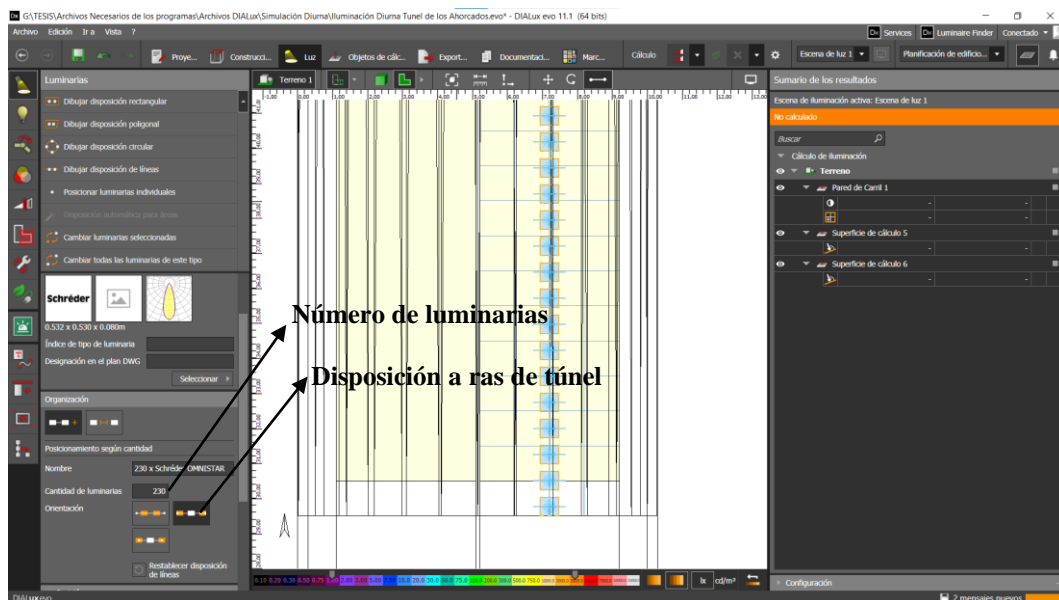
$$Fm = 0,95 * 0,95 * 0,96 * 0,98 = 0,85$$

Por lo tanto, el factor de mantenimiento es de 0,85 para el diseño. Es importante tener en cuenta que debe mantener un período de limpieza de un año para asegurar el nivel mínimo recomendado.

Se configuró la disposición de las luminarias a lo largo del área de estudio. Se utilizaron un total de 230 unidades de luminarias de 230 unidades, con una distancia entre luminarias de 0,7 m y una altura de montaje de 4,280 m, tal como se muestra en la **Figura 46**. La disposición de las luminarias se realizó a ras de la boca del túnel.

El nivel de iluminancia calculado fue de 3420 lux. Para llevar a cabo la simulación este valor debe dividirse por el factor de mantenimiento previamente calculado, que es de 0,85.

Por lo tanto, se utilizará un nivel de 4023 lux para realizar la simulación. Este valor tiene en cuenta la degradación esperada de la iluminación debido a los diferentes factores.



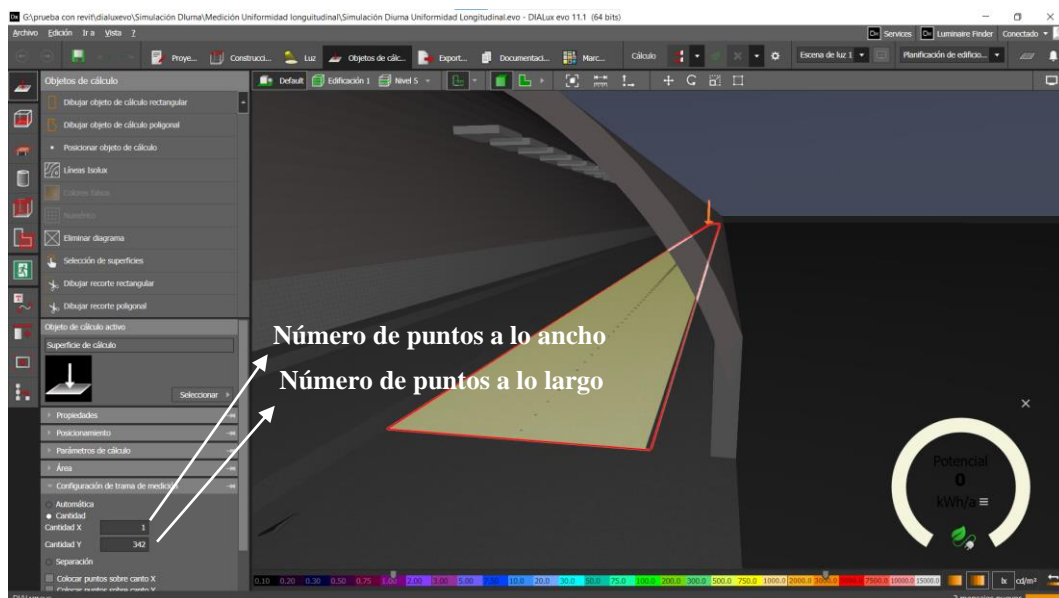
**Figura 46.** Configuración de la disposición de las luminarias en el Túnel.

Con el nivel requerido de iluminancia, se procedió a iniciar la simulación y se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 22**.

**Tabla 22.** Resultados de la simulación Diurna.

Estudio lumínico Carril 1	
<b>Media</b>	4 137 lux
<b>Mín.</b>	1 754 lux
<b>Max</b>	6 054 lux
<b>Mín/medio</b>	0,42

Para evaluar la uniformidad longitudinal, se realizaron los siguientes ajustes al entorno de trabajo, la malla de medición se configuró a un punto a lo ancho del carril y 350 puntos a lo largo (ver **Figura 47**).



**Figura 47.** Configuración de malla uniformidad longitudinal.

Con los ajustes de la malla de medición, se procedió a iniciar la simulación y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Resultados de uniformidad longitudinal.

Estudio lumínico Carril 1	
<b>Media</b>	5 987 lux
<b>Mín.</b>	4 223 lux
<b>Max</b>	6 053 lux
<b>Mín/máx.</b>	0,70

Seguidamente, se procedió a la evaluación del efecto Flicker. Para una Velocidad de Diseño de 40 Km/h (11,11 m/s) y una distancia entre luminarias de 0,7 m, se determinó que la frecuencia de efecto Flicker es de 15,8 Hz, lo que está fuera del rango peligroso de 2,5 Hz-15 Hz.

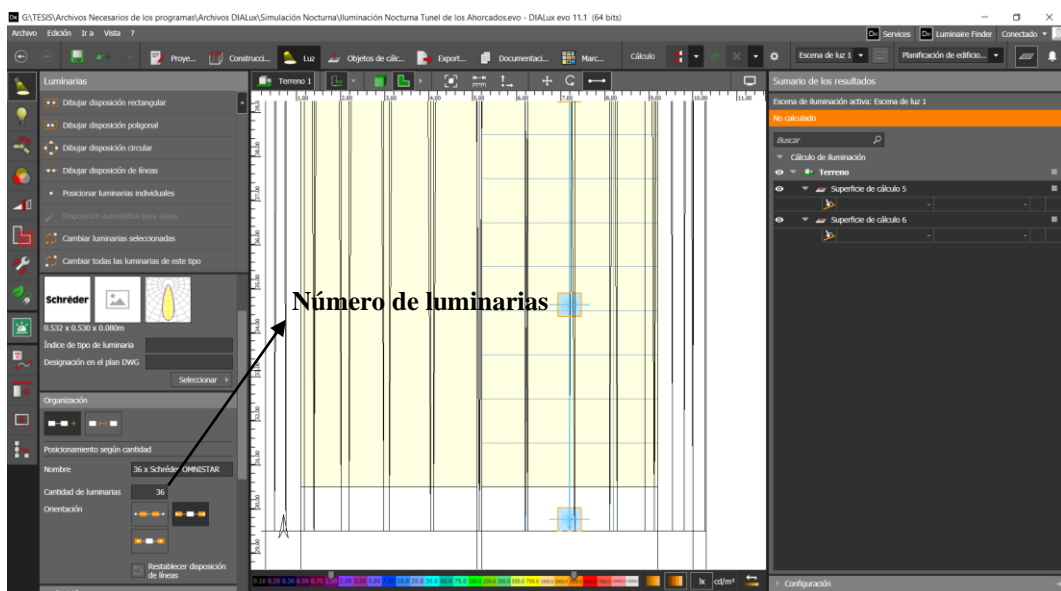
En cuanto a la evaluación del incremento de umbral TI, con una uniformidad promedio en el carril de 446,6 cd/m<sup>2</sup> y una luminancia de velo equivalente de 342 cd/m<sup>2</sup>, se obtiene lo siguiente:

$$TI = 95 * \frac{342 \frac{cd}{m^2}}{446,6^{1,5} \frac{cd}{m^2}} = 3,44$$

El incremento de umbral de la instalación es de 3,44% menor al 15% recomendado por la normativa.

**Simulación Nocturna.** Para la simulación nocturna, se utilizó la misma malla que en la simulación diurna, con 3 puntos a lo ancho y 350 a lo largo del carril de evaluación. El valor previamente calculado de 22,15 lux se ha magnificado por el factor de mantenimiento de 0,85 obteniendo un valor de simulación de 26 lux.

Debido a que los requerimientos de iluminancia son bajos, se optó por disminuir el número de luminarias activas durante la noche, el número de luminarias de 36 unidades con el 10% de su flujo por el sistema de control 1-10V (ver **Figura 48**).



**Figura 48.** Configuración de luminarias para simulación.

Se procedió con la simulación y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Simulación Nocturna.

<b>Estudio lumínico Carril 1</b>	
<b>Media</b>	114 lux
<b>Mín.</b>	60,5 lux
<b>Max</b>	208 lux
<b>Mín/medio</b>	0,53
<b>Mín/máx.</b>	0,60

Para la evaluación de la uniformidad longitudinal, se realizaron ajustes a la malla de medición que, en el caso de la simulación diurna, con un punto de medición en el centro del carril y 350 puntos a lo largo.

Finalmente, al iniciar la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la **Tabla 25**.

**Tabla 25.** Simulación uniformidad longitudinal Nocturna.

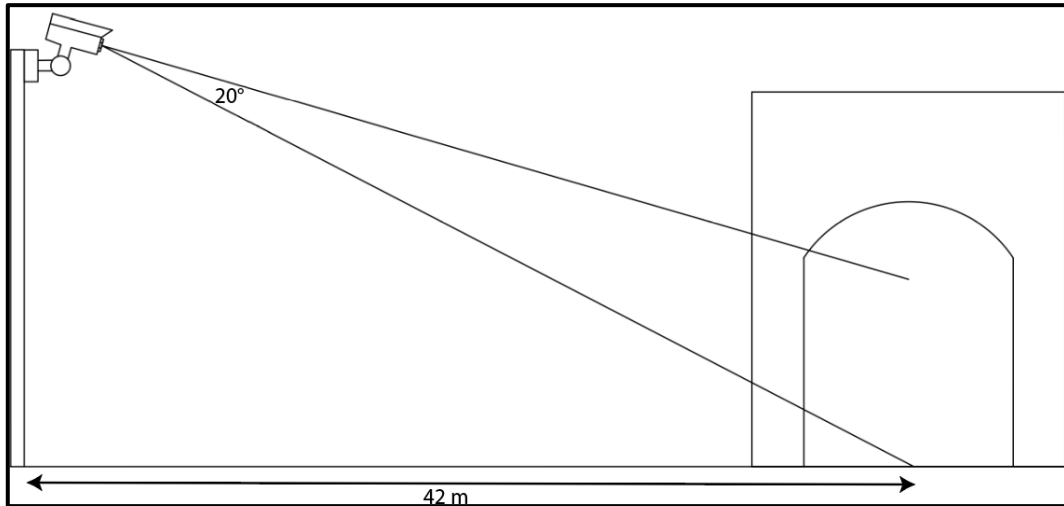
<b>Estudio lumínico Carril 1</b>	
<b>Media</b>	169 lux
<b>Mín.</b>	124 lux
<b>Max</b>	208 lux
<b>Mín/máx.</b>	0,60

Para asegurar que los niveles de iluminación en el sistema de control del túnel, se realizó mediante el sistema por el protocolo 1-10V (sistema que permite variar la intensidad lumínica de la luminaria seleccionada), debido a que el Túnel en estudio será Iluminado como un Túnel Corto.

Las luminarias seleccionadas cuentan con un drive IzyHub que permite el control de la luminaria por el protocolo 1-10V.

Para el monitoreo y control de las etapas dentro del túnel, se propone colocar en la Zona de Acceso se colocar un Luminancímetro a una distancia de 42 m (Distancia de Seguridad) y una altura entre 2 m a 5 m (por razones de mantenimiento) apuntando al centro del carril (ver **Figura 49**).





**Figura 49.** Luminómetro para sistema de control.

Como la normativa recomienda pasar de un nivel a otro en pasos de 1/3, para evitar perturbaciones momentáneas el sistema de control se ha evaluado en 4 etapas **Tabla 26**.

**Tabla 26.** Etapas de Iluminación por protocolo 1-10V.

Etapa	%
Nocturno	100
Crepuscular	25
Diurno medio	50
Diurno alto	100

**Nota:** El valor del 100% de la etapa nocturna equivale a encender 36 luminarias con el 10% de su potencia por el protocolo de control 1-10V.

Este perfil de configuración se ingresaría en el sistema de control inteligente para el encendido o apagado de las luminarias en función de los requerimientos fotométricos.

#### **5.4.9. Evaluación de la eficiencia de la instalación**

Para la evaluación de la eficiencia se debe calcular el área de iluminación, en este caso se tiene un ancho de 4 m y 171 m de longitud de calzada, el cual se obtiene un área a iluminar de 684 m<sup>2</sup>.

Para evaluar la eficiencia se ha realizado en cada etapa Diurna y Nocturna.

Simulación Diurna, con una iluminancia media de 4 137 lux y una potencia activa instalada de 34 730 KW obteniendo para este análisis lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{684 \text{ m}^2 * 4 \text{ 137 lux}}{34 \text{ 730 KW}} = 81,48 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$$

Obteniendo para este análisis una eficiencia energética de  $81,48 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$ , como el valor de la iluminancia es mayor que 30 lux la eficiencia de referencia para el análisis es de  $32 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$ .

El índice de eficiencia energética se calculó con:

$$I\varepsilon = \frac{81,48 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}}{32 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}} = 2,5$$

Obteniendo un valor de  $I\varepsilon$  de 1,3 con este valor se determinó el índice de consumo energético:

$$ICE = \frac{1}{1,3} = 0,4$$

Para la Simulación Nocturna, con una iluminancia media de 114 lux y una potencia activa instalada de 951,3 KW obteniendo para este análisis lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{684 \text{ m}^2 * 114 \text{ lux}}{951,3 \text{ KW}} = 81,97 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$$

Obteniendo para este análisis una eficiencia energética de  $81,97 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$ , como el valor de la iluminancia es mayor que 30 lux la eficiencia de referencia para el análisis es de  $32 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}$ .

El índice de eficiencia energética se calculó con:

$$I\varepsilon = \frac{81,97 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}}{32 \frac{\text{m}^2 * \text{lux}}{\text{KW}}} = 2,6$$

Obteniendo un valor de  $I\varepsilon$  de 1,3 con este valor se determinó el índice de consumo energético:

$$ICE = \frac{1}{2,6} = 0,4$$

Con los resultados obtenidos del índice de eficiencia energética y el índice de consumo energético de ambos casos de simulación se procede a compararlos con la **Tabla 11** Se obtuvieron los siguientes resultados que se detallan en la **Tabla 27**.

**Tabla 27.** Resultados de la eficiencia energética.

<b>Régimen</b>	<b>Índice consumo energético</b>	<b>Índice de eficiencia energética</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Diurno</b>	0,4	2,5	A
<b>Nocturno</b>	0,4	2,6	A

En las simulaciones realizadas tanto en régimen diurno como en régimen nocturno, se observó una eficiencia de A, ya que los índices de consumo energético calculados fueron inferiores a 0,9 (establecido en la Norma), mientras que los índices de eficiencia energética calculados fueron mayores que 1,1 (establecido en la Norma).

## 6.Resultados

En la **Tabla 28** se muestran los resultados de los parámetros fotométricos que se deben cumplir establecidos por la normativa CIE.

**Tabla 28.** Parámetros fotométricos establecidos por la norma.

Normativa		
<b>Iluminación Diurna Carril</b>	Uniformidad General	$\geq 40\%$
	Uniformidad Longitudinal	$\geq 60\%$
	Efecto Flicker	$\leq 20s: 2,5Hz-15Hz$
		$\geq 20s: 4Hz-11Hz$
Incremento Umbral	$\leq 15\%$	
<b>Iluminación Diurna Paredes</b>	Nivel de luminancia	$\geq 60\%$ Carril
	Uniformidad General	$\geq 40\%$
<b>Iluminación Nocturna</b>	Nivel de Iluminancia	$\geq 1cd/m^2$
	Uniformidad General	$\geq 40\%$
	Uniformidad Longitudinal	$\geq 60\%$

Los resultados obtenidos de la aplicación de la guía metodología planteada en el Túnel de los Ahorcados se exponen en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Resultados del estudio Fotométrico.

	Descripción	Estudio Lumínico
<b>Iluminación Diurna Carril</b>	Uniformidad General	63%
	Uniformidad Longitudinal	86%
	Efecto Flicker	$\leq 20s: 15,8Hz$
	Incremento Umbral	3,44%
<b>Iluminación Diurna Paredes</b>	Nivel de luminancia	60%
	Uniformidad General	57%
<b>Iluminación Nocturna</b>	Nivel de Iluminancia	16,85cd/m <sup>2</sup>
	Uniformidad General	40%
	Uniformidad Longitudinal	60%

Una vez obtenido los parámetros fotométricos y los resultados de la aplicación de la guía se realizó una comparativa con el fin de determinar si la guía metodológica planteada cumple lo establecido por la norma **Tabla 30**.

**Tabla 30.** Resultados del estudio realizado en el Túnel de los Ahorcados.

	<b>Descripción</b>	<b>Estudio Lumínico</b>	<b>Normativa</b>	<b>Verificación</b>
<b>Iluminación Diurna Carril</b>	Uniformidad General	63%	$\geq 40\%$	Cumple
	Uniformidad Longitudinal	86%	$\geq 60\%$	Cumple
	Efecto Flicker	$\leq 20s: 15,8Hz$	$\leq 20s: 2,5Hz-15Hz$ $\geq 20s: 4Hz-11Hz$	Cumple
	Incremento Umbral	3,44%	$\leq 15\%$	Cumple
<b>Iluminación Diurna Paredes</b>	Nivel de luminancia	60%	$\geq 60\%$ Carril	Cumple
	Uniformidad General	57%	$\geq 40\%$	Cumple
<b>Iluminación Nocturna</b>	Nivel de Iluminancia	16,85cd/m <sup>2</sup>	$\geq 1cd/m^2$	Cumple
	Uniformidad General	40%	$\geq 40\%$	Cumple
	Uniformidad Longitudinal	60%	$\geq 60\%$	Cumple

Determinando de esta manera que la guía planteada cumple con los estándares establecidos por la normativa base CIE88:2004.

## **7.Discusión**

En el dimensionamiento de los sistemas de iluminación de túneles deben cumplir ciertos parámetros fotométricos establecidos por normativas internacionales, estos sistemas se deben adaptar al país donde se implementen, en este caso se adaptó para la ciudad de Loja- Ecuador, y de esta manera poder asegurar el bienestar de los usuarios que hacen uso de este medio para trasladarse de un punto a otro, estos sistemas deben cumplir la Norma CIE88:2004, en donde se establecen los parámetros que deben cumplir este tipo de proyectos, con la finalidad de evitar atentar contra la integridad de los usuarios que circulan por túneles.

De acuerdo (SCT, 2016) en donde se menciona que los parámetros y recomendaciones de la CIE son determinantes para realizar normativas, las cuales involucran un estudio veraz y conciso, el cual permite regular las normativas para la obtención de resultados netamente verídicos y comprobados. Los resultados obtenidos del caso de estudio analizado permiten afirmar que los parámetros establecidos en el estudio de investigación son adecuados para poder realizar correctamente el dimensionamiento de sistemas de iluminación de túneles.

## 8.Conclusiones

- Los requisitos fotométricos identificados consideran lo expuesto por la normativa CIE 88:2004, fundamentan la secuencia de cálculos propuesta, en donde se establecen los requisitos fotométricos que se deben cumplir en una instalación considerando que las fotometrías en un régimen diurno son de una uniformidad longitudinal del  $\geq 60\%$ , uniformidad general del  $\geq 40\%$ , en las paredes un nivel de luminancia  $\geq 60\%$  de la calzada, uniformidad general del  $\geq 40\%$  y en un régimen nocturno de una uniformidad longitudinal del  $\geq 60\%$ , uniformidad general del  $\geq 40\%$ , siendo estos parámetros los más importantes en el dimensionamiento de los sistemas de iluminación para túneles vehiculares.
- La validación del procedimiento planteado cumple con los requerimientos establecidos por los parámetros fotométricos, en el caso de estudio analizado se obtuvieron los siguientes parámetros, en un régimen diurno uniformidad longitudinal del  $86\%$ , uniformidad general del  $63\%$ , en las paredes un nivel de luminancia  $60\%$  de la calzada, uniformidad general del  $57\%$  y en un régimen nocturno uniformidad longitudinal del  $60\%$ , uniformidad general del  $40\%$ , cumpliendo las recomendaciones expuestas en la norma.

## **9.Recomendaciones**

- Para futuras investigaciones se recomienda desarrollar un algoritmo de cálculo que permita automatizar el proceso de cálculo, en donde se incluya la etapa de superponer el diagrama polar con la fotografía para la evaluación de la luminancia de velo equivalente.
- Para la construcción en modelado 3D, se recomienda usar un Software que permita exportar el modelado en un formato IFC dentro del entorno de DIALux.



## 10. Bibliografía

- Cal, R., Reyes, M., & Cárdenas, J. (1994). *Ingeniería de Transito Fundamentos y Aplicaciones*. (7ma Ed.). Alfaomega, S. A. de C. V. <https://n9.cl/mfu0c>
- Cansinos, A. (2015). *Guía de iluminación en Túneles e Infraestructura Subterráneas*. Smartlighting, SL. [www.madrid.org](http://www.madrid.org)
- El Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad [ARCONEL]. (2018). *Resolución Nro. ARCONEL-054/18 de 2018. Por lo cual se expide Prestación del servicio de Alumbrado Público General*. <https://n9.cl/8sz33>
- International Commission On Illumination [CIE]. (2004). *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*. CIE 88:2004 2da Ed. [www.cie.co.at](http://www.cie.co.at)
- Izquierdo, E. (2013). *Diseño de una instalación eficiente de iluminación en un túnel*. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla]. Repositorio Universidad de Sevilla. <https://n9.cl/w5qp7>
- Comité Europeo de Normalización [CEN]. (2007). *Aplicaciones de Iluminación Alumbrado de túneles*. CEN CR 1438:2003. AENOR. <https://n9.cl/nfa59>
- Ministerio de Industria Energía y Turismo. (2013). *Eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior Mantenimiento de la eficiencia energética de las instalaciones*. GUÍA-EA-06.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio. (2008). *Eficiencia energética*. ITC-EA-01. <https://n9.cl/2oncf>
- Reglamento Técnico Ecuatoriano [RTE]. (2012). *Alumbrado Público*. RTE INEN 069. [www.inwn.gon.ec](http://www.inwn.gon.ec)
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte [SCT]. (2016). *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*. Primera Ed. [www.dgst.sct.gob.mx](http://www.dgst.sct.gob.mx)
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte [SCT]. (2015). *Manual de Iluminación Vial*. Segunda Ed.
- UNI-TREND TECHNOLOGY CO., LTD. (s.f.). *UT383 Mini light Meters Operating Instruction*. <https://n9.cl/lasz9v>

SONY CORPORATION. (2012). *Digital Still Camera DSC-W730 Instruction Manual*.  
<https://n9.cl/evuou5>

Schröder. (2021). *Omnistar Product Sheet\_ES*. <https://n9.cl/kclsn>

Schröder. (2020). *IzyHub Product Sheet\_ES*. <https://n9.cl/chx47>

## 11.Anexos

### Anexo 1. Manual de operación Luxómetro UT383 BT (Bluetooth Versión).

P/N:110401105808X

UNI-T.

# UT383 BT

## Mini Light Meter (Bluetooth Version)

### Operating Manual

#### 1. Introduction

UT383 BT with Bluetooth function is a stable, safe, reliable mini digital light meter, widely used in lightening enterprises, agriculture and animal husbandry, mining enterprises, laboratory, office, household, street lights construction and others.

This operating manual includes relevant safety information and warnings. Please read this manual carefully and observe all the cautions strictly.

#### ⚠ Warning:

Before using the product, please read the operation safety rules carefully.

#### 2. Out of the Box

Open the packing box and take out the meter. Please check carefully if any items are missing or damaged.

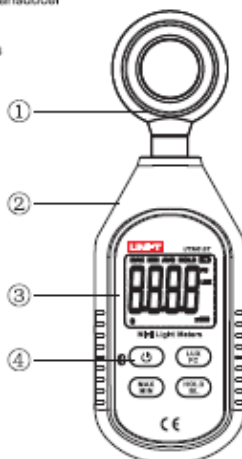
1. Blister----- 1
2. Operating manual----- 1

#### 3. Operation Safety Rules

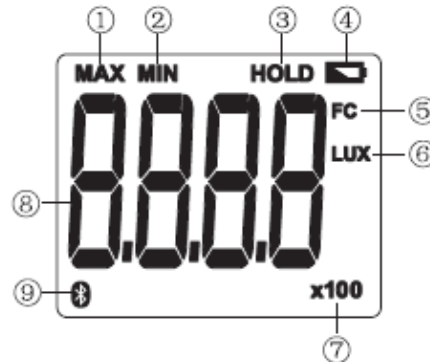
1. Please check the meter and the accessories before using and beware of any damage or abnormal phenomenon. If you find the case is damaged or the LCD shows nothing, or you consider that the meter could not work properly anymore, please stop using it.
2. Observe the operating instructions while measuring.
3. Do not open the meter at will or change internal wiring to avoid damages to the meter.
4. When the LCD displays "⚡", replace the battery timely. Remove the battery if the meter is not used for a long time.
5. Do not store or use the meter in high temperature, high humidity, flammable, combustible, or strong electromagnetic environment.
6. Please use soft cloth and neutral detergent to clean the case for maintenance. Do not use grinding agent and solvent to avoid case corrosion and damaging the meter.
7. This product has passed CE certification.

#### 4. Product Exterior

1. Illumination transducer
2. Meter case
3. LCD display
4. Function keys



#### 5. Display Interface



1	Maximum measurement
2	Minimum measurement
3	Data hold
4	Low battery
5	Foot candle
6	Lux
7	Value*10 or value*100
8	Illumination value
9	Bluetooth communication symbol indication

#### 6. Key Function and Setup

(remark: "short press" means : about 1second continuous press;"long press" means : about 2 second continuous press)

##### 1. ⏻ ON/OFF /Bluetooth communication

Short press once to start up; short press again to power off.

Bluetooth communication : Under the state of boosting unit , long press to enter Bluetooth communication mode, and then long press again to quit Bluetooth communication mode.

##### 2. LUX/FC: lux / FOOTCANDLE

LUX/FC unit conversion key: short press the key, the illumination units can be selected between LUX and FC in performing illumination measurement

##### 3. MAX/MIN

Pressing this key can select maximum, minimum or normal value measurement; select maximum and the meter will always show the maximum reading; select minimum and the meter will always show the minimum reading.

##### 4. HOLD/BL

HOLD: Short press this key to hold measurement; short press this key again to exit data hold and continue normal measurement.

BL: Long press this key to turn on backlight; long press this key again to turn off backlight.

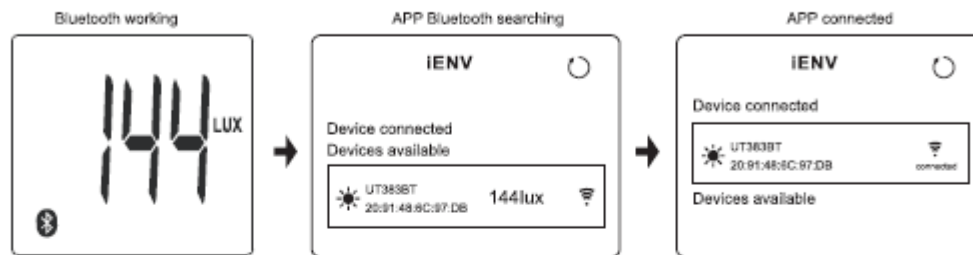
##### 5. Automatic shutdown

No operation 5 minutes after , then shut down the unit automatically (the default is automatic shutdown mode )

When you want to remove the automatic shutdown function, hold down the "hold" + "⏻" key to boot. LCD has a "APO OFF" character prompt, the automatic shutdown function will be removed .

## 7. Bluetooth APP specification

- To connect Bluetooth , you need to install the application (IENV APP) on the smartphone
  - iOS device access it in App Store , Android device access it in Play Store or Please login [www.uni-trend.com](http://www.uni-trend.com) to download.
- Compatibility:
- ios 8.4 or higher version
  - Android 4.3 or higher version
  - Bluetooth 4.0 or higher version
  - Memory 1G or more
- Before Bluetooth APP and product are connected , you need to open the Bluetooth at the same time, and through the APP search the Bluetooth, and select the corresponding products to be connected in IENV APP
    - when in the working state, long press the power button to turn on or off the Bluetooth
    - Bluetooth icon is flashing, indicating that the product is not connected with APP
    - Bluetooth icon isn't flashing, indicating that the product is connected with APP



## 8. Performance Testing

### 1. Technical Parameter

Function	Range	Resolution	Accuracy	Remark
Illuminance Measurement	0~9999 Lux	1 Lux	± (4% rdg+8 dgts)	Ambient temperature: 23°C±15°C Ambient humidity: ≤80%RH
	≥10000 Lux	10 Lux	± (5% rdg+10 dgts)	
	≥100000 Lux	100 Lux	± (5% rdg+10 dgts)	
Measurement Range	0~199900 Lux			Shift to automatic range

### 2. General Type

- LCD: 4 digits LCD display. The max display is 9999
- Overload indication: When illumination is over 199900 Lux, "OL" will be displayed
- Battery low power display: Prompt " "
- Sampling rate: 0.5s
- Sensor type: Silicon photocell
- Impact strength: Can withstand the impact of landing from 1 meter height
- Battery requirement: 1.5V batteries (AAA) ×3
- Power consumption: More than 12 hours with Bluetooth enabled
- Product size: 163×55×28mm
- Spec of thread to connect the product with three tripod:  $\varnothing 1/8"$
- Weight: 118g

### 3. Environment Limitation

- Indoor use
- Maximum operating height: 2000m
- Pollution level: 2
- Working temperature and humidity:
  - 0°C~40°C (not greater than 80%RH)
  - 40°C~50°C (not greater than 45%RH)
- Storage temperature and humidity:
  - 20°C~60°C (not greater than 75%RH)

### 4. General Maintenance

Warning: please do not open the case of meter to avoid affecting device accuracy or damage to the meter.

- Maintenance and service of the meter should be accomplished by professional personnel or designated maintenance department.
- Clean the case by dry cloth periodically, detergent with abrasive or solvent composition shall not be used.

### 5. Battery Installation and Replacement

- The meter uses 3 pieces of AAA 1.5V batteries. Please see figure below for steps of battery installation and replacement.
- Turn the panel down, push the battery cover open in the direction of the arrow, lift the cover and remove the batteries; install new batteries in accordance of polarity indications.
- Please use batteries of same type instead of improper ones.
- Close the cover tightly after installing new batteries.



Manufacturer:  
Uni-Trend Technology (China) Limited  
No 6, Gong Ye Bei 1st Road  
Songshan Lake National High-Tech Industrial  
Development Zone, Dongguan City  
Guangdong Province  
China  
Postal Code: 523 808

Headquarters:  
Uni-Trend Group Limited  
Rm901, 9/F, Nanyang Plaza  
57 Hung To Road  
Kwan Tong  
Kowloon, Hong Kong  
Tel: (852) 2850 8188  
Fax: (852) 2850 9303  
Email: [info@uni-trend.com](mailto:info@uni-trend.com)  
<http://www.uni-trend.com>

Fuente: (UNI-TREND TECHNOLOGY CO., LTD., s.f.).

## Anexo 2. Características de la Cámara Digital.

### Especificaciones

#### Cámara

##### [Sistema]

Dispositivo de imagen: CCD de 7,75 mm (tipo 1/2,3) Filtro de color primario  
Total de píxeles: Aprox. 16,4 Megapíxeles  
Píxeles efectivos: Aprox. 16,1 Megapíxeles  
Objetivo: Objetivo zoom 8× Carl Zeiss Vario-Tessar  
f = 4,5 mm – 36 mm (25 mm – 200 mm (equivalente a película de 35 mm))  
F3,3 (W) – F6,3 (T)  
Mientras se toman películas (16:9): 28 mm – 224 mm\*  
Mientras se toman películas (4:3): 34 mm – 272 mm\*  
\* Cuando [SteadyShot película] está ajustado a [Estándar].  
SteadyShot: Óptico  
Control de exposición: Exposición automática, Selección escena  
Balance del blanco: Automático, Luz diurna, Nublado, Fluorescente 1/2/3, Incandescente, Flash, Una pulsación  
Toma con ráfaga (cuando se toma con el mayor número de píxeles): Aprox. 1 imágenes/segundo (hasta 3 imágenes)  
Formato de archivo:  
Imágenes fijas: Compatible con JPEG (DCF, Exif, MPF Baseline), compatible con DPOF  
Películas: MPEG-4 AVC/H.264

Soporte de grabación: Memoria interna (Aprox. 27 MB) “Memory Stick Duo”, “Memory Stick Micro”, tarjetas SD, tarjetas de memoria microSD  
Flash: Alcance del flash (sensibilidad ISO (Índice de exposición recomendado) ajustada a Auto): Aprox. 0,3 m a 2,8 m (W)  
Aprox. 1,5 m a 2 m (T)

ES

##### [Conectores de entrada y salida]

Toma USB / A/V OUT:  
Salida de vídeo  
Salida de audio  
Comunicación USB  
Comunicación USB: Hi-Speed USB (USB 2.0)

##### [Pantalla]

Pantalla LCD:  
6,7 cm (tipo 2,7) unidad TFT  
Número total de puntos:  
230 400 puntos

##### [Alimentación, general]

Alimentación: Batería recargable NP-BN, cc 3,6 V  
Adaptador de alimentación de ca (FUENTE DE ALIMENTACIÓN) AC-UB10/UB10B/UB10C/UB10D, cc 5 V  
Consumo (durante la toma de imagen): Aprox. 1,2 W  
Temperatura de funcionamiento: 0 °C a 40 °C  
Temperatura de almacenamiento: –20 °C a +60 °C  
Dimensiones (cumple con CIPA): 93,1 mm × 52,3 mm × 22,5 mm (An/Al/Pr)

ES  
27

Peso (cumple con CIPA) (incluyendo la batería NP-BN, "Memory Stick Duo"):

Aprox. 122 g

Micrófono: Monoaural

Altavoz: Monoaural

Exif Print: Compatible

PRINT Image Matching III:  
Compatible

### **Adaptador de alimentación de ca (FUENTE DE ALIMENTACIÓN) AC-UB10/UB10B/UB10C/UB10D**

Requisitos de alimentación: ca 100 V a 240 V 50 Hz/60 Hz 70 mA

Tensión de salida: cc 5 V 0,5 A

Temperatura de funcionamiento:  
0 °C a 40 °C

Temperatura de almacenamiento:  
-20 °C a +60 °C

Dimensiones:

Aprox. 50 mm × 22 mm × 54 mm  
(An/Al/Pr)

Peso:

Para EE.UU. y Canadá:

Aprox. 48 g

Para países o regiones distintos de EE.UU. y Canadá: Aprox. 43 g

### **Batería recargable NP-BN**

Batería utilizada: Batería de litio-ion

Tensión máxima: cc 4,2 V

Tensión nominal: cc 3,6 V

Tensión de carga máxima: cc 4,2 V

Corriente de carga máxima: 0,9 A

Capacidad:

típica: 2,3 Wh (630 mAh)

mínima: 2,2 Wh (600 mAh)

El diseño y las especificaciones están sujetos a cambios sin previo aviso.

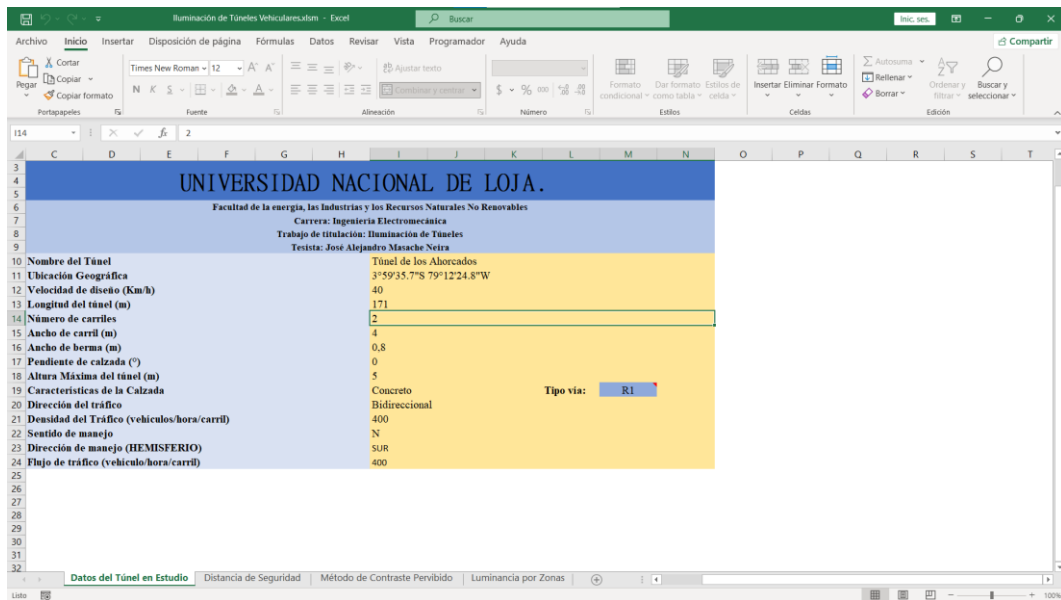
ES  
28

### **Marcas comerciales**

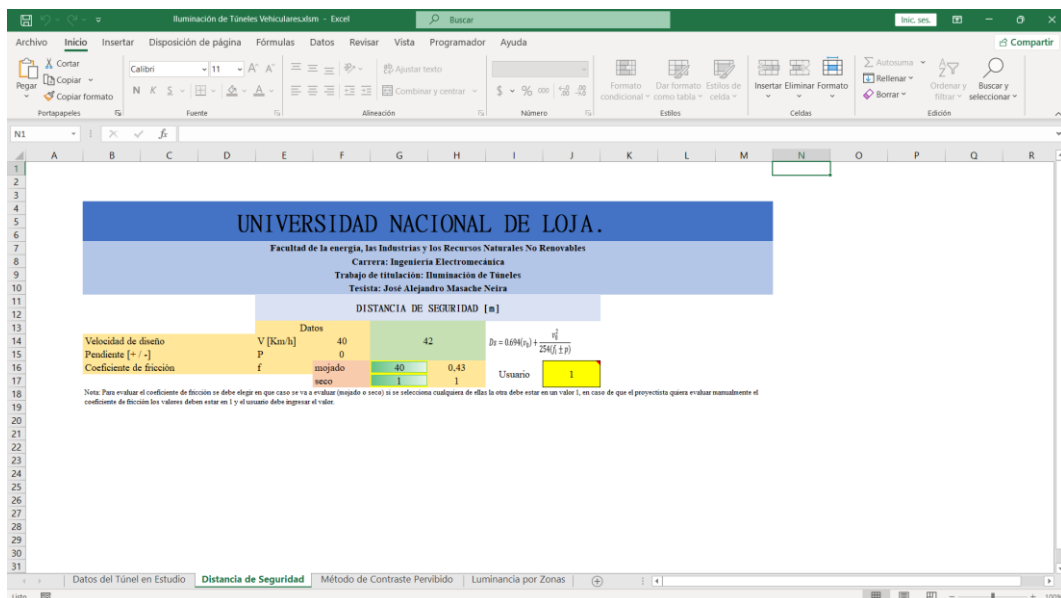
- Las marcas siguientes son marcas comerciales de Sony Corporation. **Cyber-shot**, "Cyber-shot", "Memory Stick PRO Duo", "Memory Stick PRO-HG Duo", "Memory Stick Duo", "Memory Stick XC-HG Duo", "Memory Stick Micro"
- Windows es una marca comercial registrada de Microsoft Corporation en los Estados Unidos y/u otros países.
- Mac y Mac OS son marcas comerciales registradas de Apple Inc.
- El logotipo de SDXC es una marca comercial de SD-3C, LLC.
- Eye-Fi es una marca comercial de Eye-Fi Inc.
- Facebook y el logotipo de "f" son marcas comerciales o marcas comerciales registradas de Facebook, Inc.
- YouTube y el logotipo de YouTube son marcas comerciales o marcas comerciales registradas de Google Inc.
- Además, los nombres de sistemas y productos utilizados en este manual son, en general, marcas comerciales o marcas comerciales registradas de sus respectivos desarrolladores o fabricantes. Sin embargo, las marcas <sup>TM</sup> o ® no se utilizan en todos los casos en este manual.

**Fuente:** (SONY CORPORATION, 2012).

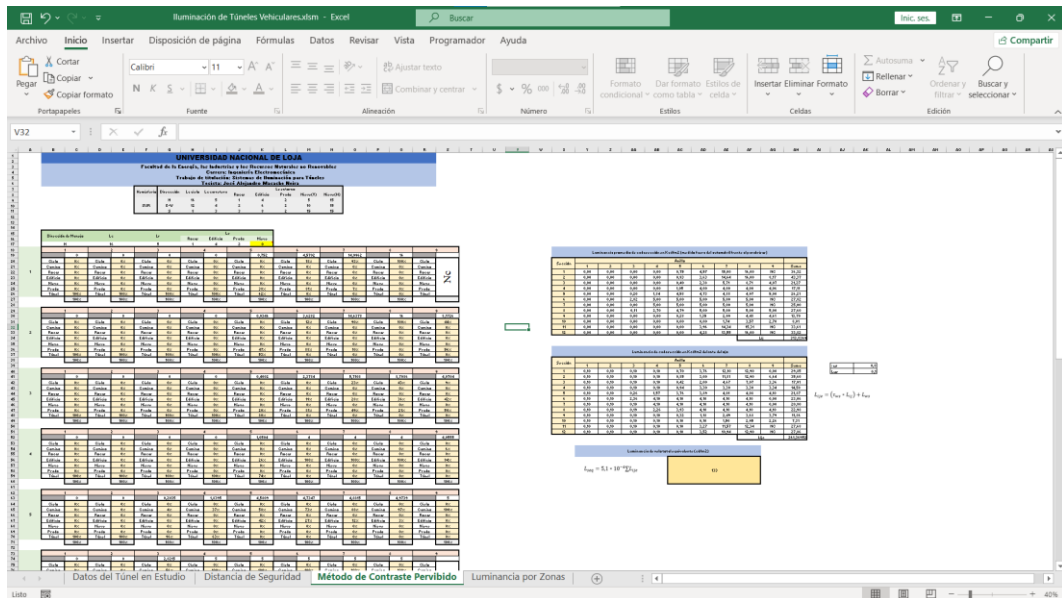
### Anexo 3. Macros para cálculo de nivel de iluminancia.



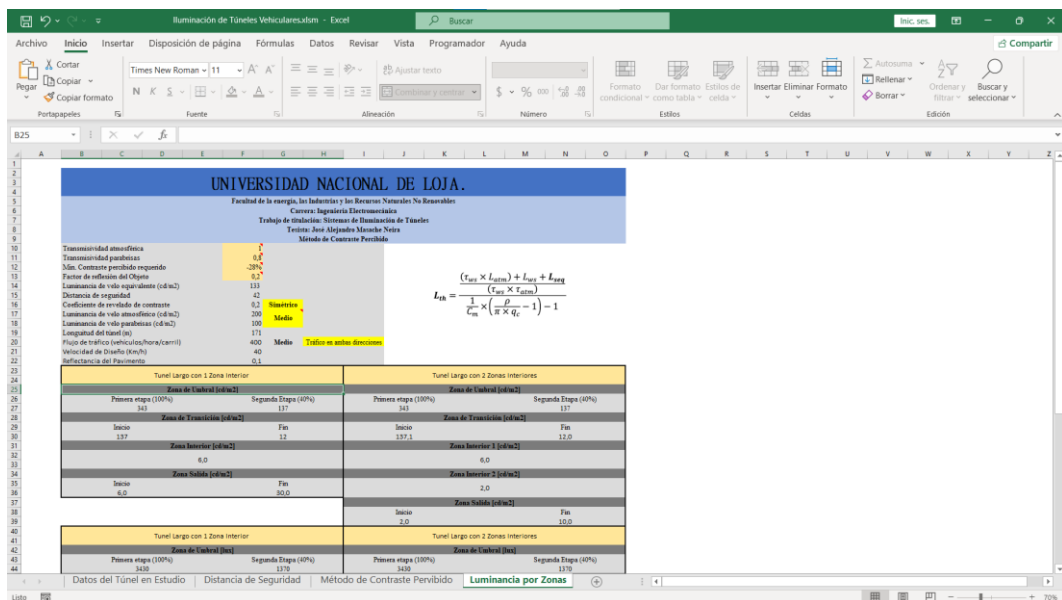
**Nota:** La página inicial es donde se ingresan todos los datos del tunel en estudio para su posterior uso. Se debe tener en cuenta el tipo de vía según sus características, para ello, se debe acercarse al recuadro color azul en el que se indican las características de la calzada.



**Nota:** La página de Distancia de Seguridad permitirá calcular automáticamente este valor, se debe tener en cuenta que, para el proyectista que desee evaluar manualmente el factor de la fricción longitudinal los valores de mojado y seco debe estar en una valor 1, para que de esta manera el proyectista ingrese el valor.



**Nota:** Para utilizar la hoja del Método del Contraste Percibido en el contexto de esta investigación, es esencial tener en cuenta que, en caso de presencia de nieve, se debe ingresarse manualmente dicho valor en el recuadro amarillo. Los porcentajes evaluados en el diagrama polar debe ser introducidos manualmente en los recuadros verdes, lo que permitirá realizar automáticamente el cálculo del nivel de luminancia de velo total equivalente.



**Nota:** En la página 'Luminancias por Zonas', se esencial seleccionar los parámetros adecuados de los recuadros amarillos. En el caso de suficiente información de diseño, los valores establecidos en los recuadros color verde (valores recomendados por norma CIE), pueden ser sustituidos manualmente cuando el diseñador considere otros factores.



## Anexo 4. Características y medidas de las luminarias seleccionadas.

### TFLEX COMBI | CARACTERÍSTICAS

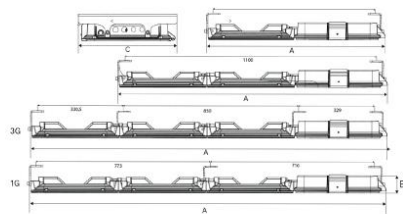
**Schröder**

INFORMACIÓN GENERAL		INFORMACIÓN ELÉCTRICA	
Etiqueta Circle Light	Puntuación > 90 : el producto cumple totalmente con los requisitos de economía circular	Clase eléctrica	Class 1US, Class I EU
Marca CE	Sí	Tensión nominal	220-240 V – 50-60 Hz 347-480 V – 50-60 Hz 277 V – 50-60 Hz
Certificado ENEC	Sí	Opciones de protección contra sobretensiones (kV)	10 20
Certificado ENEC Plus	Sí	Compatibilidad electromagnética (CEM)	EN 55015 / EN 61000-3-2 / EN 61000-3-3 / EN 61547
Certificado UL	Sí	Protocolo de control	1-10V, DALI
CARCASA Y ACABADO		Opciones de control	Lumgate, Bipotencia, Telegestión
Carcasa	Aluminio	Sistemas de control asociados	Advanced Tunnel System 4 (ATS 4) Advanced Tunnel System 4 DALI (ATS 4 DALI)
Óptica	PMMA	INFORMACIÓN ÓPTICA	
Protector	Vidrio templado	Temperatura de color de los LED	4000K (NW 740)
Acabado de la carcasa	Recubrimiento de polvo de poliéster	Índice de reproducción cromática (CRI)	>70 (NW 740)
Color estándar	Gris AKZO 900 enarenado	VIDA ÚTIL DE LOS LED A TQ 25 °C	
Grado de hermeticidad	IP66/IP69	All configurations	100.000h – L95
Resistencia a los impactos	IK 09	<i>· La vida útil puede ser diferente según el tamaño / configuraciones. Por favor consúltenos.</i>	
Norma de vibración	Cumple con la modificada IEC 68-2-6 (0.5G)	CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO	
Acceso para mantenimiento	Acceso sin herramientas al caja de auxiliares	Rango de temperatura de funcionamiento (Ta)	-30 °C a +50 °C / -22 °F a 122 °F
<i>· TFLEX COMBI 3 modules with fixed brackets complies with ANSI C 136-31 standard, 3G load</i>		<i>· Depende de la configuración de la luminaria. Para más información, póngase en contacto con nosotros.</i>	

## DIMENSIONES Y MONTAJE

AxBxC (mm   inch)	TFLEX COMBI 1 : 786x74.3x440   30.9x2.9x17.3 TFLEX COMBI 2 : 1175x74.3x440   46.3x2.9x17.3 TFLEX COMBI 3 : 1564x74.3x440   61.6x2.9x17.3
Weight (kg   lbs)	TFLEX COMBI 1 : 16.0   35.2 TFLEX COMBI 2 : 23.0   50.6 TFLEX COMBI 3 : 32.0   70.4
Mounting possibilities	Gancho de suspensión Soporte para un montaje en superficie Montaje sobre pared

· Para obtener más información sobre las posibilidades de montaje, consulte las instrucciones de instalación.



## Anexo 5. Especificaciones Driver IzyHub.

**Schröder**  
Experts in lightability™

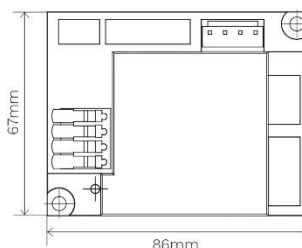
# IzyHub



IzyHub is a luminaire electrical connection hub with built-in surge protection. The hub allows easy connection to the end user mains network with no additional tools required.

Failure proof quick connectors ensure easy upgradeability and component replacement without the risk of misconnection and also reducing servicing time.

It also features a built in Type 3 surge protector with visible end-of-life indicator for protection of connected equipment from surges up to 10kV. Suitable for Class I and Class II installations.



### General Technical Data

SPECIFICATION	VALUES
Operating voltage range	240V 50/60Hz
Rated current	4A
Degree of protection	IP20
Housing material	Glass filled PBT
Operating temperature range	-40°C to +70°C
Storage temperature range	-40°C to +85°C
Maximum case temperature (T <sub>case</sub> )	80°C
End-of-life indication	Optical
Dynamic thermal disconnection	Yes for SPD only – no load disconnection
Certifications	CE, ENEC according to: IEC 61347-2-11 and IEC 61643-11

### SPD Electrical data

SPECIFICATION	UNITS	VALUES
Designation acc. EN61643-11		Type 3
Designation acc. IEC61643-11		Class III
Protection mode		Differential & Common mode
Network configuration		TN (TN-C, TN-C-S, TN-S), TT, IT
Nominal input voltage (L-N)	U <sub>N</sub> [V]	240V 50/60Hz
Max. continuous operating voltage (L-N)	U <sub>c</sub> [V]	275V 50/60Hz
Max. continuous operating voltage (L-GND)	U <sub>c</sub> [V]	275V 50/60Hz
Max. continuous operating voltage (N-GND)	U <sub>c</sub> [V]	275V 50/60Hz
Temporary overvoltage TOV - HV-system fault: 1200V+255V at tt=200ms – TT and IT power grid	U <sub>T</sub> [V]	1455
Temporary overvoltage TOV - LV-system fault: 255Vx1.32 at tt=5s – TN, TT and IT power grid	U <sub>T</sub> [V]	337
Temporary overvoltage TOV - LV-system fault: 255Vx√3 at tt=120min – TN, TT and IT power grid	U <sub>T</sub> [V]	442
Nominal discharge current (L-N) (8/20μS)	I <sub>N</sub> [kA]	5
Nominal discharge current (L-GND) (8/20μS)	I <sub>N</sub> [kA]	5
Nominal discharge current (N-GND) (8/20μS)	I <sub>N</sub> [kA]	5
Max. discharge current (8/20μS)	I <sub>max</sub> [kA]	10
Max. voltage protection level @I <sub>N</sub> (L-N)	U <sub>F</sub> [kV]	1.3
Max. voltage protection level @I <sub>N</sub> (L-GND)	U <sub>F</sub> [kV]	1.8
Max. voltage protection level @I <sub>N</sub> (N-GND)	U <sub>F</sub> [kV]	1.8
Open circuit voltage	U <sub>oc</sub> [kV]	10
Max. backup fuse (gG type)	[A]	20
Max. Earth leakage current @U <sub>c</sub>	[μA]	50
Isolation voltage capability	[V]	600
Insulation resistance	[MΩ]	>1
Surge withstand capability @10kA	[strike]	1
Surge withstand capability @5kA	[strike]	15

## Configuration options

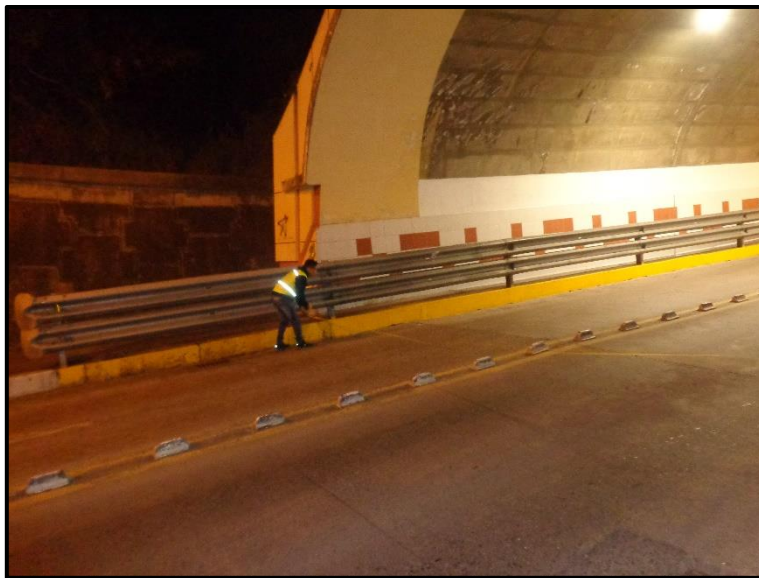


IzyHub	Light	CusDim		Control	Full control		Full control with fuse		
Part Number	01-27-044	01-27-047	01-27-050	01-27-045	01-27-048	01-27-049	01-27-046	01-27-051	
Electrical class	Class I	Class I	Class II	Class I	Class I	Class II	Class I	Class II	
SPD included	-	■	■	■	■	■	■	■	
SPD type designation	N/A	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T3	
Protection mode IEC61643-11	N/A	L-N L-PE N-PE	L-N	L-N L-PE N-PE	L-N L-PE N-PE	L-N	L-N L-PE N-PE	L-N	
<b>FEATURES</b>									
ESD protection	-	-	■	-	-	■	-	■	
Surge protection differential mode	-	■	■	■	-	■	■	■	
Surge protection common mode	-	■	-	■	■	-	■	-	
Bi-Power	-	-	-	-	■	■	■	■	
External dimming lines	-	-	-	■	■	■	■	■	
Power control (NEMA7)	-	-	-	■	■	■	■	■	
ELV control (24V / dimming)	-	-	-	■	■	■	■	■	
<b>CONNECTORS</b>									
4-pin mains input	■	■	■	-	-	-	-	-	
7-pin mains input	-	-	-	■	■	■	■	■	
4-pin load (JST NV)	■	■	■	■	■	■	■	■	
3-pin power ctrl (JST NV)	-	-	-	■	■	■	■	■	
4-pin ELV control1 (JST XA)	-	-	-	■	■	■	■	■	
4-pin ELV control2 (JST XA)	-	-	-	■	■	■	■	■	
4-pin ELV control3 (JST XA)	-	-	-	■	■	■	■	■	
4-pin fuse (TE Power Key)	-	-	-	-	-	-	■	■	
<b>INDICATORS</b>									
SPD LED indicator (Green)	-	■	■	■	■	■	■	■	

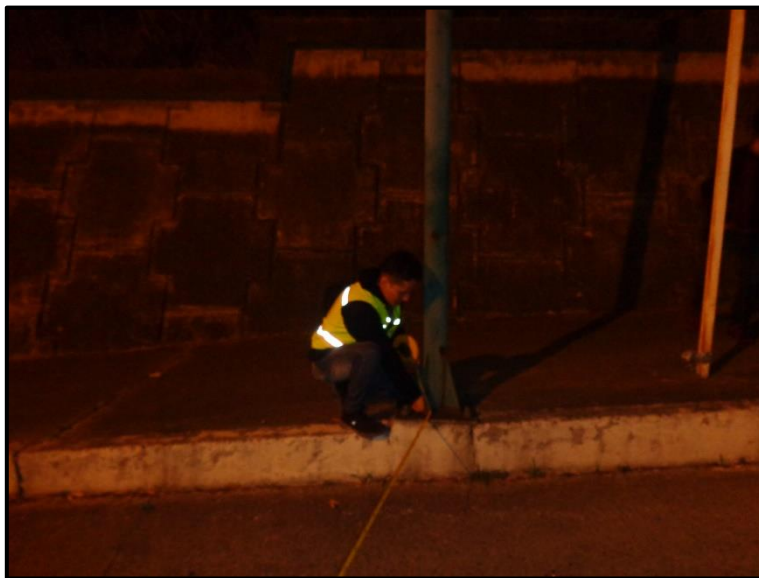
Copyright ©Schröder SA - November 2019. All rights reserved. Specifications are of an indicative nature and subject to change without notice.

Fuente: (Schröder, 2020)

**Anexo 6.** Fotografías de la medición de la Iluminación Nocturna.



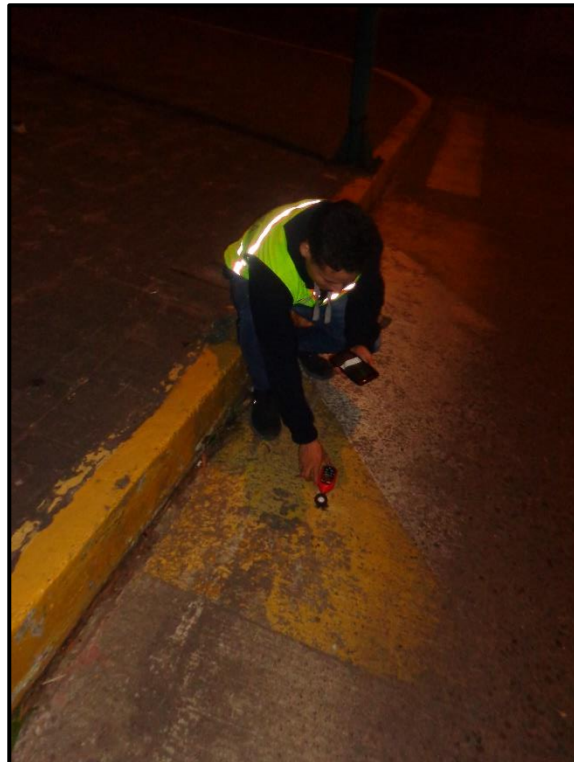
Mediciones para trazado de matriz.



Medida de distancia entre luminarias a evaluar.



Registro de los valores de luminancia de cada punto marcado.



Colocación del luxómetro en el punto marcado.



Registro de iluminancia mediante aplicación UTienv.

**Anexo 7.** Fotografías de las mediciones realizadas del Túnel de los Ahorcados.



Registro de datos de las medidas del Túnel de los Ahorcados.





Mediciones de la longitud del tunel.

Anexo 8. Certificado de traducción del resumen.

**EUROpeek**  
INSTITUTO DE IDIOMAS

Dirección: Calle La Condomina 25-37 y Avenida Pío  
Jaramillo Alvarado, Edificio Rosalia,  
www.europeek.com.ec  
europeekloja@gmail.com  
LOJA-ECUADOR

I can do it #YoSoyEuroPeek

Loja 5 de Enero del 2024

### CERTIFICADO DE TRADUCCION

EUROpeek INSTITUTO DE IDIOMAS

**CERTIFICA:**

Haber realizado la traducción de español a inglés del resumen de la Tesis titulada: "**SISTEMAS DE ILUMINACION PARA TÚNELES** " de autoría de José Alejandro Masache Neira Cédula de Identidad Nro. 1150554218.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad. Facultando al interesado hacer uso del presente documento en lo que creyere conveniente.



Escanea el código QR para verificar la autenticidad de este documento.

Mg.Sc. Noralma Ordóñez Ortega  
**REPRESENTANTE LEGAL**  
EUROpeek INSTITUTO DE  
IDIOMAS

**EUROpeek**  
INSTITUTO DE IDIOMAS

R.U.C.: 1102404553001





@Europeek



@Europeek



(07) 254 6834  
098 436 1690



098 980 0093