

Estudio espectral de la iluminación en las construcciones

Corporación Universitaria Remington.

Facultad de Ingeniería.

Ingeniería Civil.

Juan David Serna Reyes.

Juan Esteban Vélez Álvarez.

Proyecto de grado.

2025.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo de grado a la facultad de ingenierías Uniremington y a todos los estudiantes y profesionales de ingeniería civil que están iluminando el mundo con la ciencia y tecnología.

Agradecimientos

Le agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado durante la ejecución de este proyecto de grado para cumplir con los objetivos.

Agradezco a mi tutor Juan Esteban Álvarez Vélez por su dedicación para explicarme y enseñarme, que a través de la ciencia se puede transformar el mundo.

A Uniremington por todos los servicios prestados a través del laboratorio y espacios educativos.

Tabla de Contenidos

Contenido

1.0.	Resumen.....	6
2.0.	Palabras clave.....	6
3.0.	Introducción	7
4.0.	Marco Teórico.....	9
4.1.	Difracción.	9
4.2.	Reflexión de la luz.	9
4.3.	Refracción de la luz.	10
4.4.	Ley de Snell.	11
4.5.	Principio de Fermat.	11
4.6.	Espectroscopia.	12
5.0.	Estado del arte.....	13
6.0.	Planteamiento del problema.....	14
7.0.	Objetivos.	15
7.1.	Objetivo General.....	15
7.2.	Objetivos específicos.	15
8.0.	Metodología.	16
9.0.	Resultados y Discusión.....	20
10.0.	Conclusiones.....	27
11.0.	Referencias.....	28

Lista de figuras

1. Reflexión de la luz.	10
2. Refracción de la luz	10
3. Esquema óptico del espectrómetro.	16
4. Esquema en 3D del espectrómetro y las posiciones de las rendijas de entrada y salida.	17
5. Prototipo de espectrómetro impreso en 3D: Posicionamiento de la red de difracción y lente de colimación.	18
6. Esquema general de la luz combinada: Halógena y blanca.	19
7. Espectro de la luz natural.	20
8. Espectro Luz blanca.	21
9. Espectro de la luz Halógena.	21
10. Comparación espectral Luz Natural - Blanca	23
11. Imagen sustraída original del espectro de la luz natural – Blanca con degradado rojo (ROI)	23
12. Imagen sustraída invertida del espectro de la luz natural - Blanca con degradado rojo (ROI)	23
13. Comparación Espectral Luz Natural - Combinada	24
14. Imagen sustraída original del espectro de la Luz natural – combinada con degradado rojo (ROI)	25
15. Imagen sustraída invertida del espectro de la Luz natural – combinada con degradado rojo (ROI)	25
16. Comparación Espectral Luz Natural – Halógena.	26
17. Imagen sustraída original del espectro de la Luz natural – Halógena con degradado rojo (ROI)	26
18. Imagen sustraída invertida del espectro de la Luz natural – Halógena con degradado rojo (ROI)	26

1.0. Resumen

Este estudio comparó espectros de fuentes de iluminación convencionales (luz LED blanca y halógena) con el espectro solar, utilizando un dispositivo (espectrómetro) diseñado para este fin. Los resultados demostraron que la luz halógena presenta la mayor similitud espectral con la luz solar, debido a su distribución continua en longitudes de onda y su mayor potencia en comparación con la luz LED blanca. Estos hallazgos coinciden con la literatura científica que destaca que los espacios con la iluminación natural mejoran el confort visual e influye en el consumo energético [1]. Por lo tanto, se recomienda construir o tener en cuenta para los diseños que el edificio o la propiedad, su entorno sea la luz natural y optar por sistemas halógenos.

2.0. Palabras clave

- Iluminación natural
- Espectrómetro
- Eficiencia energética
- Confort visual
- Espectro
- Diseño ingenieril

3.0. Introducción

En el ámbito de la arquitectura, la iluminación artificial ha sido tradicionalmente utilizada para satisfacer las necesidades funcionales de los ocupantes. Sin embargo, en el contexto actual, marcado por una creciente preocupación por el medio ambiente, el consumo energético y el bienestar físico y mental de las personas. La iluminación natural ha cobrado un papel protagónico en los diseños arquitectónicos contemporáneos [2][3]. Incorporar luz natural no solo permite reducir el uso de energía eléctrica, sino que también contribuye a crear espacios más agradables y promueve una conexión más directa con el entorno natural [4].

Diversos estudios han demostrado que las vistas hacia entornos naturales generan respuestas psicológicas positivas: ayudan a reducir el estrés, disminuir la ansiedad, mantener la concentración y mejorar el estado de ánimo general [5]. Esto plantea una reflexión crítica sobre el propósito de las ventanas en las edificaciones modernas: ¿son meros elementos operativos o cumplen un rol esencial en la interacción con el entorno natural? Investigaciones realizadas en oficinas de Nueva Zelanda e Inglaterra revelaron que, en ausencia de luz solar directa, los trabajadores experimentaban incomodidad y preferían claramente trabajar con iluminación natural [6].

Existen múltiples tipos de fuentes de luz artificial como lámparas fluorescentes de luz fría, incandescentes, fluorescentes compactas y aquellas de espectro completo cada una con características espectrales y niveles de consumo energético distintos. Estas diferencias se deben principalmente a la distribución espectral de la energía que emiten, lo que influye tanto en su eficiencia como en la calidad de la luz percibida por el ojo humano [7].

Desde los experimentos pioneros de Isaac Newton con prismas, se sabe que la luz blanca del sol se puede descomponer en un espectro continuo de colores, que va del rojo al violeta [8]. Este espectro abarca el rango visible para el ojo humano, que se extiende aproximadamente desde los 380 nm (violeta) hasta los 780 nm (rojo). Fuera de estos límites, el ojo no es capaz de detectar radiación electromagnética [9].

Este trabajo se enfoca en el análisis espectral de distintas fuentes de luz artificial, con el objetivo de encontrar un equilibrio entre la eficiencia energética de tecnologías como el LED y la riqueza espectral que ofrecen fuentes como la halógena. El propósito es determinar si es posible emular, al menos en parte, las cualidades espectrales de la luz solar sin comprometer significativamente el rendimiento energético. Para ello, se diseñó y construyó un espectrómetro portátil mediante impresión 3D, empleando componentes ópticos de bajo costo y piezas recuperadas de dispositivos electrónicos en desuso. Este instrumento permitió realizar una caracterización espectral comparativa de diferentes fuentes de iluminación, contribuyendo así a identificar aquellas que más se aproximan al perfil espectral de la luz solar.

4.0. Marco Teórico.

4.1. Difracción.

La difracción es un fenómeno típico de ondas que ocurre cuando la luz encuentra un obstáculo o abertura comparable a su longitud de onda (λ). A diferencia de la óptica geométrica (que predice sombras nítidas), la luz se desvía, generando patrones de interferencia. Este efecto demuestra que la luz no solo sigue trayectorias rectas (como postula Fermat), sino que también exhibe propiedades ondulatorias. La difracción es clave en técnicas como el diseño de redes de difracción. [10][11]. Para hallar el ángulo de difracción se utiliza la siguiente formula:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{2b} \right) \quad (1)$$

Donde:

b: ancho de rejilla.

θ = ángulo de difracción. Es el que se forma con respecto al haz incidente y el punto de observación.

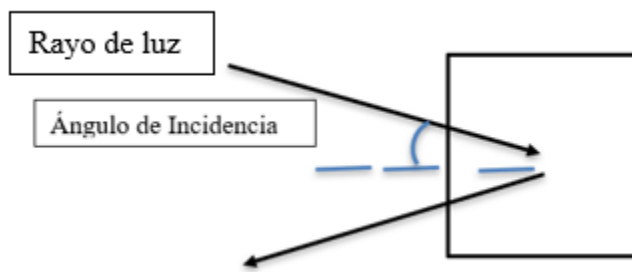
m: orden de difracción, es un numero entero del máximo o mínimo de intensidad (Franjas oscuras).

λ : Longitud de la onda

4.2. Reflexión de la luz.

La reflexión es un fenómeno óptico en el que un rayo de luz incide sobre una superficie y rebota manteniendo su medio de propagación. Este comportamiento se rige por la ley de reflexión, que establece que el ángulo de incidencia (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r), medidos respecto a la normal. Este principio es fundamental en

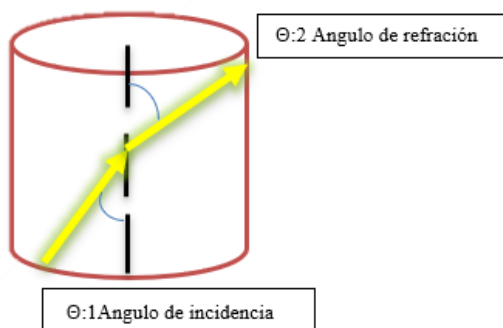
instrumentos como espejos y telescopios, y se deriva directamente del Principio de Fermat, al minimizar la trayectoria de la luz entre dos puntos. [12], a continuación, se muestra como ilustración este fenómeno.



1. Reflexión de la luz.

4.3. Refracción de la luz.

La refracción es un fenómeno óptico que ocurre cuando un rayo de luz cambia de dirección y velocidad al pasar de un medio a otro con diferente densidad óptica (por ejemplo, del aire al agua). Este cambio se debe a la variación en la velocidad de propagación de la luz en cada medio, la cual está caracterizada por el índice de refracción (n) del material. Cuanto mayor sea el índice de refracción de un medio, más se reducirá la velocidad de la luz en él [13].



2. Refracción de la luz

4.4. Ley de Snell.

La **Ley de Snell** (o **Ley de Refracción**) describe cuantitativamente cómo se desvía un rayo de luz al pasar de un medio a otro [14]. Establece que:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación yacen en el mismo plano.
- La relación entre los ángulos de incidencia (θ_1) y refracción (θ_2), y los índices de refracción (n_1 y n_2) de los medios, satisface:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

Despejando:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (3)$$

n_1 y n_2 son parámetros que nos indican un cambio de medio, por ejemplo n_1 podría ser el aire y n_2 agua.

θ_1 y θ_2 son los ángulos que se forman cuando un rayo de luz impacta una línea perpendicular de una superficie.

4.5. Principio de Fermat.

Formulado por Pierre de Fermat en el siglo XVII, este principio establece que "la luz sigue la trayectoria que requiere el menor tiempo para viajar entre dos puntos". Es la base teórica de la reflexión y refracción: En reflexión, la luz elige el camino más corto (ángulos iguales). En refracción, la luz ajusta su velocidad y dirección (Ley de Snell) para minimizar el tiempo total. Este principio también explica fenómenos avanzados como la difracción cuando se considera la naturaleza ondulatoria de la luz [15][16]. Este principio es el que justifica la escogencia de la configuración Littrow para el espectrómetro desarrollado en este trabajo.

4.6. Espectroscopia.

La espectroscopia estudia la interacción entre la luz y la materia mediante el análisis de longitudes de onda absorbidas, emitidas o dispersadas a partir de un elemento dispersor, tal como prisma, red de difracción o rendijas de tamaño comparable a la longitud de onda incidente, en general se emplea para estudiar la naturaleza molecular o elemental de la materia [17]. En este caso puntual se empleará para analizar fuentes de luz de diferente tipo con el fin de establecer la de mejor perfil espectral para reemplazar la iluminación led blanca.

5.0. Estado del arte.

El estudio espectral de la iluminación en los entornos construidos ha cobrado una gran importancia en la última década, motivado por la necesidad de mejorar el bienestar humano, aumentar la eficiencia energética y elevar la calidad visual. Las investigaciones llevadas a cabo por Rea y Figueiro (2018) establece que el espectro influye en los ritmos circadianos, subraya la relevancia de la luz de onda corta (480nm) en la estimulación de producción de melatonina. Su trabajo propone métricas como el “estímulo circadiano” para evaluar como diferentes fuentes de luz afectan el ritmo biológico [18].

Ohno (2014) examina las limitaciones del índice de Renderizado de color (CRI) en fuentes de luz LED y sugiere la adopción del índice de fidelidad espectral (IES TM-30-15) como una herramienta más precisa para la evaluación del color. Su investigación evidencia que los espectros presentan picos en longitudes de onda específicas, como 450nm y 620nm, mejoran la percepción del color en ambientes interiores [19]. Este aspecto resulta fundamental en entornos educativos y hospitalarios, donde la precisión en la representación del color es especialmente importante.

Bellia et al. (2017) analizan de qué manera la reflectancia espectral de diversas superficies, como pinturas y textiles, influye en la calidad de la luz. A través de simulaciones, descubren que los tonos cálidos, en el rango de 600nm a 700nm, en las paredes disminuyen la necesidad de intensidad lumínica. En cambio, las superficies frías, situadas entre 400nm y 500nm, aumentan la dispersión de la luz, lo que puede afectar la uniformidad de la iluminación [20]. Este hallazgo destaca la relevancia de considerar análisis espectrales en las primeras fases del diseño arquitectónico.

Este estado de arte evidencia la necesidad de abordar la iluminación desde un enfoque óptico combinado con el diseño arquitectónico para optimizar entornos construidos.

6.0. Planteamiento del problema.

En edificios con acceso limitado a luz natural, el uso predominante de iluminación artificial convencional que carece del espectro completo de la luz solar afectando negativamente la salud de los ocupantes [21], si bien es cierto permitió un salto de calidad en términos de eficiencia energética, por otro lado, descuido el potencial efecto adverso sobre la salud humana. Esta deficiencia impacta directamente en el confort visual, el bienestar e incluso la salud mental de las personas en estos espacios.

Este proyecto aborda dos problemáticas que no se tienen en cuenta frecuentemente en los diseños arquitectónico de las propiedades horizontales y verticales: el balance entre confort visual, eficiencia energética y salud mental.

7.0. Objetivos.

7.1. Objetivo General.

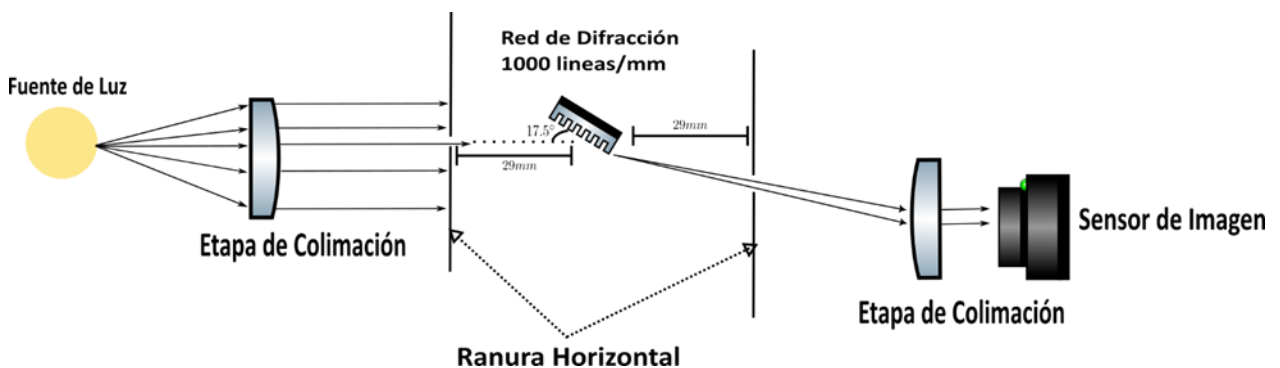
Establecer un tipo de iluminación con fuentes convencionales (LED, halógenas, etc) que permitan obtener un patrón espectral similar al de la luz solar natural.

7.2. Objetivos específicos.

- Diseñar un dispositivo para medición de espectros de luz de diferentes fuentes.
- Obtener espectros de diferentes fuentes de iluminación con el fin de estimar la más óptima en comparación con el espectro de luz solar.
- Construir una fuente de iluminación con un patrón espectral que se asemeje a la luz solar.

8.0. Metodología.

Actualmente, la mayoría de los edificios emplean sistemas de iluminación artificial cuya riqueza espectral es considerablemente inferior a la de la luz solar. Esta carencia se ha acentuado con la progresiva eliminación de las lámparas halógenas, las cuales, si bien no replicaban completamente la luz natural, ofrecían una reproducción espectral más continua y cercana al espectro solar, como se analizará más adelante. Esta limitación motivó la siguiente pregunta: ¿cómo podemos facilitar el ingreso de luz natural a los espacios interiores? Para abordar esta cuestión, se diseñó un espectrómetro portátil hecho a medida con el objetivo de caracterizar la luz en distintos entornos [22]. El dispositivo incorpora una red de difracción que permite descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda, revelando así su espectro [23][24]. Para la etapa de colimación se utilizó una lente que dirige los rayos incidentes de manera paralela hacia la red de difracción, optimizando su incidencia sobre el detector. En este caso, el sistema de detección fue implementado mediante el sensor CCD integrado en la cámara del teléfono móvil HONOR X8A [25].



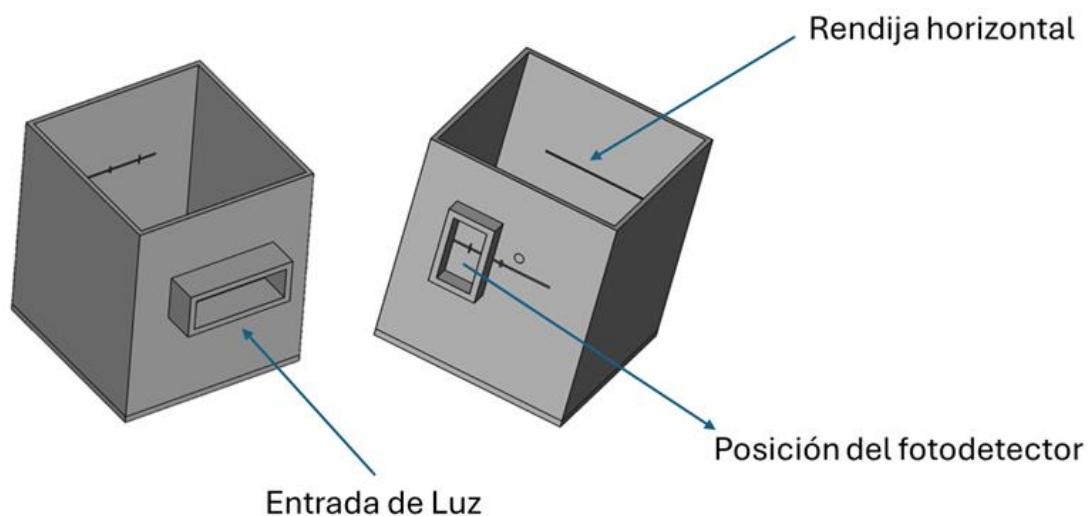
3. Esquema óptico del espectrómetro.

La posición del sensor de imágenes se calculó con base a la configuración Littrow dado que la trayectoria de la luz difractada sigue el mismo camino óptico que la luz incidente, esto es,

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{2b} \right) \quad (4)$$

Donde θ es el **ángulo de Littrow** (también llamado ángulo de blaze), m es el orden de difracción (para este caso $m = 1$), λ es la longitud de onda central (es decir, 600 nm), d es el espaciado de la red, dado por $d = \frac{1}{N}$, donde $N=1000$ líneas/mm, por lo cual, $d = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$.

Lo anterior arroja un ángulo $\theta = 17.46^\circ$. Con esta información se procede a ubicar la red de difracción como se muestra en las figuras 4 y 5



4. Esquema en 3D del espectrómetro y las posiciones de las rendijas de entrada y salida.

Como se puede observar, el dispositivo fue fabricado mediante impresión 3D, lo que permitió una disposición precisa y personalizada de los componentes ópticos. Las posiciones relativas entre estos elementos fueron determinadas en función de la ecuación descrita anteriormente, asegurando una alineación adecuada para la propagación y análisis del haz. Se utilizó una red de difracción de transmisión, lo cual simplifica significativamente el diseño óptico del espectrómetro, ya que permite una configuración más compacta y directa en comparación con las redes de reflexión. Un desafío central en este tipo de dispositivos es el posicionamiento preciso del sensor de imágenes, aspecto que en este proyecto adquiere especial relevancia. A diferencia de los espectrómetros convencionales que utilizan fotodiodos o sensores CCD lineales para capturar el espectro, en este caso se recurre a técnicas de procesamiento de imágenes aplicadas sobre sensores

bidimensionales, lo que no solo reduce costos, sino que también amplía las posibilidades analíticas al aprovechar métodos avanzados de análisis de imágenes.

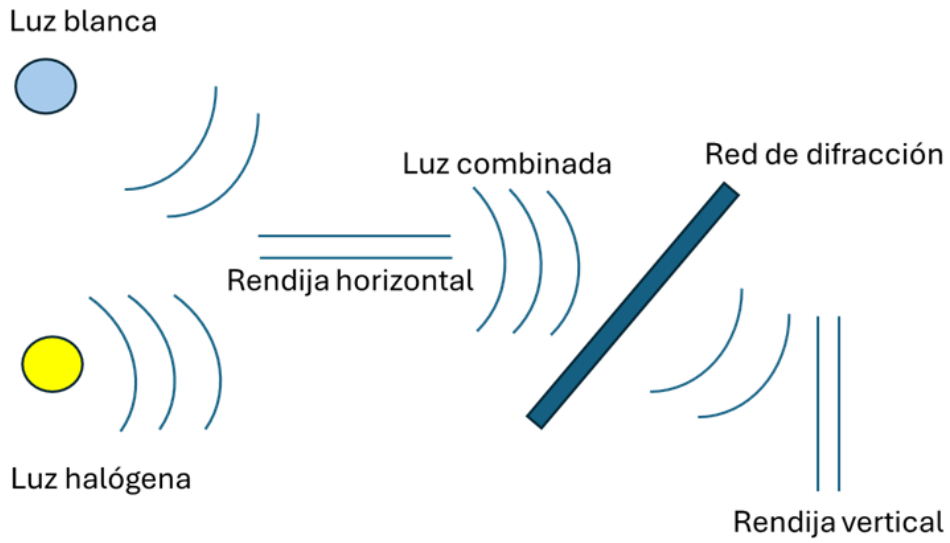


5. Prototipo de espectrómetro impreso en 3D: Posicionamiento de la red de difracción y lente de colimación.

Para la adquisición de los espectros se emplearon diversas fuentes de luz: halógena, blanca (LED), solar y una combinación de las dos primeras, con el objetivo de aproximarse al espectro continuo de la luz natural. En todos los casos, el haz luminoso se dirigió hacia la lente de colimación situada a una distancia de 4.5 cm, correspondiente a su distancia focal, lo que asegura una colimación adecuada antes de incidir sobre la red de difracción. Un aspecto particularmente destacable es el origen de dicha lente: fue recuperada de un iPhone averiado, lo que permitió reutilizar un componente óptico de calidad que, de otro modo, habría sido desechado. Este gesto no solo optimiza recursos, sino que también promueve una práctica sostenible al integrar elementos reciclados en la construcción de instrumentos científicos.

Para la iluminación combinada, se emplearon lámparas halógena y blanca de 5W cada una, las cuales se hicieron incidir con un ángulo de 17.5° , relativo a la posición de la lente, con

el fin de producir un efecto similar a la luz natural como se muestra en el esquema de la figura 6.

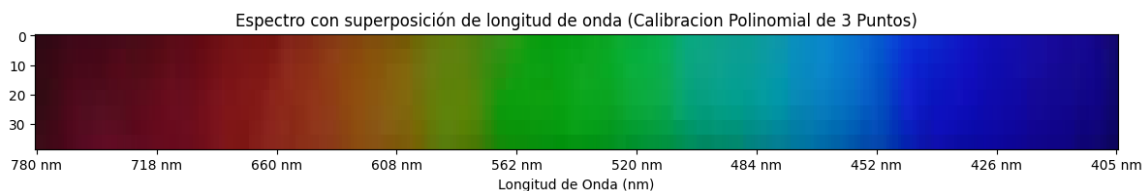


6. Esquema general de la luz combinada: Halógena y blanca.

9.0. Resultados y Discusión.

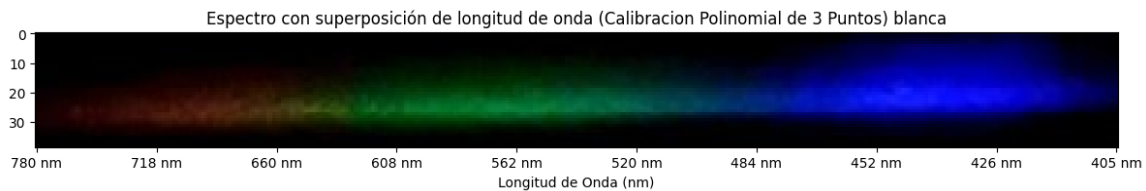
Se tomaron las mediciones con el espectrómetro y se analizó a través de un algoritmo de análisis de imágenes que permite comparar pixel a pixel las diferencias entre dos imágenes similares, en este caso, imágenes espectrales tomadas con el espectrómetro en las mismas condiciones, como se mencionó anteriormente en la metodología, se empleó una distancia focal de 4.5 cm en todos los casos y la imagen se escaló a 370 x 39 pixeles, permitiendo tener homogeneidad en el tratamiento de los datos.

Para tener el espectro del sol se hizo el experimento a las 9:00 Am debido a que se tienen condiciones mucho más ideales en términos de estrés visual [26]. Para esto, se tomó un espejo con el fin de reflejar los rayos del sol directamente a la lente colectora del espectrómetro y poder tomar la imagen espectral de este, tal como se muestra en la figura 7.

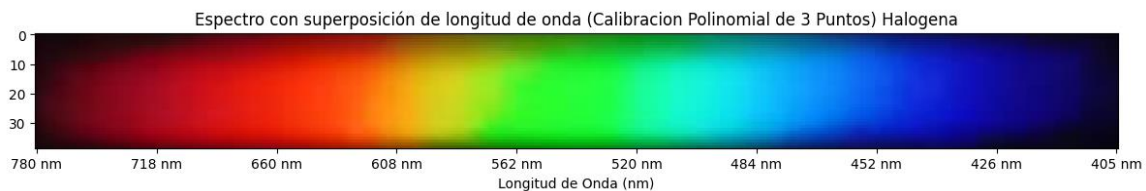


7. Espectro de la luz natural.

Para obtener esta imagen, se superpuso mediante un algoritmo de calibración que toma tres puntos de longitud de onda conocida, en este caso, 405 nm, 600 nm y 780 nm, a lo cual se aplicó una interpolación polinomial de 3 puntos. La ubicación de estas longitudes de onda obedecen a la posición en pixeles de la imagen comparada con la región espectral conocida, esto es, para 405 nm, los colores purpura, los cuales son muy tenues para el tipo de sensor de imagen empleado, lo mismo para las longitudes de onda superiores a los 780 nm, ya que estas se encuentran en el comienzo de la región infrarroja del espectro, además, la región de 600 nm es la que se denomina naranja, fácilmente identificable en la imagen y con la ventaja comparativa de que su rango espectral es de solo 2 nm, permitiendo estimar de manera apropiada su posición. Lo siguientes espectros se tomaron de manera similar.



8. Espectro Luz blanca.



9. Espectro de la luz Halógena.

Lo anterior ilustra claramente el dilema previamente mencionado entre la eficiencia energética, como la que ofrece la iluminación LED, y el confort visual de los ocupantes. A simple vista, resalta la similitud espectral entre las figuras 7 y 9, lo cual sugiere una mayor riqueza espectral en comparación con otras fuentes de luz artificial. Sin embargo, también se evidencia una de las principales desventajas de la luz blanca emitida por LEDs: el notable corrimiento hacia el azul. Este desplazamiento espectral, característico de muchas lámparas LED de baja calidad, ha sido ampliamente documentado como un factor negativo en términos de salud visual y ritmos circadianos [27].

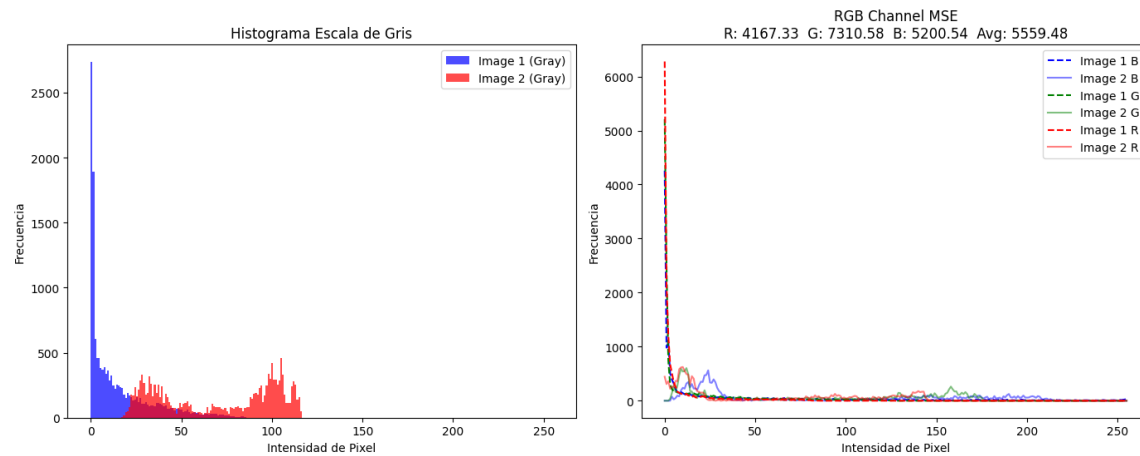
Dado que esta observación inicial se basa en una comparación cualitativa, se llevó a cabo un análisis cuantitativo para profundizar en la evaluación de similitud entre los espectros. Para ello, se calculó el error cuadrático medio (ECM) por canal de color en el espacio RGB, comparando las imágenes píxel a píxel. Esta métrica permite cuantificar con mayor precisión las diferencias espectrales percibidas, considerando los canales R (rojo), G (verde) y B (azul), según su denominación en inglés [28]. Este enfoque proporciona una herramienta objetiva para evaluar el grado de correspondencia entre la luz artificial y el espectro de referencia solar. A continuación, se presenta la ecuación modificada para calcular el grado de semejanza entre las imágenes:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

Donde n representa el número total de datos (o píxeles considerados), y_i corresponde a la intensidad del píxel i en el espectro de la fuente de iluminación artificial, y \hat{y}_i representa la intensidad del píxel correspondiente en el espectro de referencia, en este caso el de la luz natural. El resultado de esta comparación es un valor escalar que representa el **error cuadrático medio (ECM)**: cuanto menor sea dicho valor, mayor será la similitud espectral entre ambas imágenes. En otras palabras, un ECM bajo indica que la distribución espectral de la fuente artificial se aproxima con mayor fidelidad al comportamiento espectral de la luz solar.

En los histogramas mostrados a partir de la figura 10, la interpretación sigue el mismo principio: se analiza la frecuencia de ocurrencia de intensidades de píxel resultantes de la sustracción entre la imagen espectral de la fuente artificial y la de la luz natural. Cuando las intensidades entre ambas imágenes son similares, se espera que las diferencias sean pequeñas y, por tanto, se observen frecuencias elevadas para valores bajos de diferencia. En el caso específico de esta figura, se aprecia una discrepancia significativa, reflejada en una alta frecuencia de píxeles con diferencias notables de intensidad, lo cual indica una escasa similitud espectral entre ambas fuentes de iluminación.

Particularmente, el análisis por canal de color (mostrado en la imagen de la derecha) revela diferencias sustanciales en las componentes azul (B) y verde (G), con valores de error cuadrático medio (ECM) de 5200 y 7310, respectivamente. Estos resultados coinciden con lo reportado en la literatura [29], donde se señala que muchas lámparas de luz blanca presentan un exceso de emisión en la región azul del espectro, en contraste con la distribución más equilibrada de la luz solar. En conjunto, el ECM promedio fue de 5559, un valor que, si bien cuantifica la diferencia global, debe interpretarse siempre en el contexto de los resultados individuales por canal y del comportamiento espectral general de las fuentes comparadas.



10. Comparación espectral Luz Natural - Blanca

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis comparativo mediante la sustracción directa entre las imágenes espectrales de las distintas fuentes de iluminación y la luz solar, con el objetivo de facilitar la visualización de las diferencias, como se observa en la figura 11. Para resaltar de manera más efectiva las regiones con mayor discrepancia espectral, se aplicó una inversión de colores, lo que permite identificar visualmente las áreas con mayor concentración de diferencias. Este enfoque resulta particularmente útil cuando las diferencias son sutiles, como se aprecia en la figura 12, donde la escasa variación espectral entre ambas fuentes se refleja en una imagen con contrastes mínimos.



11. Imagen sustraída original del espectro de la luz natural – Blanca con degradado rojo
(ROI)

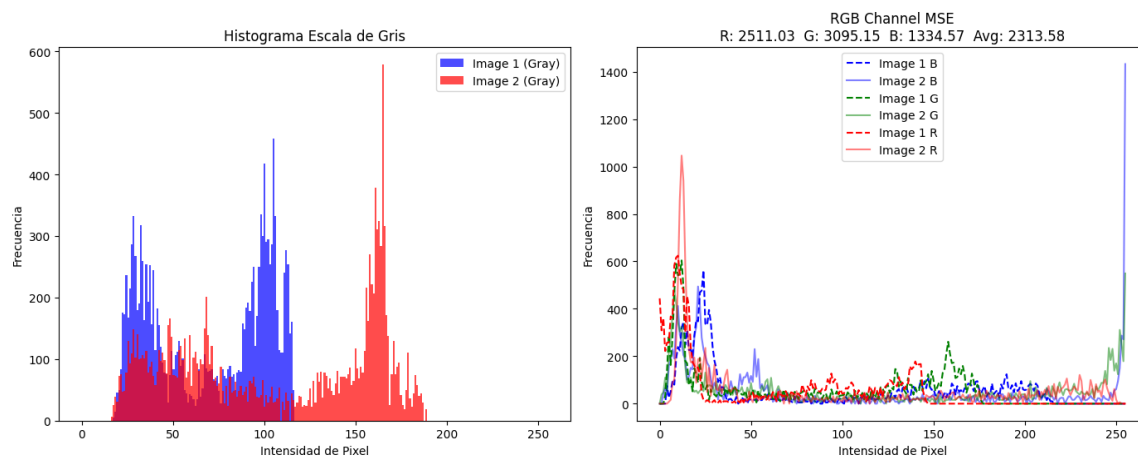


12. Imagen sustraída invertida del espectro de la luz natural - Blanca con degradado rojo
(ROI)

Con este análisis es posible apreciar que se trata de espectros completamente diferentes y no se requiere conocimientos avanzados de estadística para su interpretación.

Se realizó una comparación entre el espectro de la luz natural y el de una fuente combinada (halógena + blanca). En este experimento se observó un fenómeno conocido como interferencia destructiva, el cual ocurre cuando dos ondas de distinta longitud interactúan y se anulan parcialmente, modificando así la intensidad espectral resultante [30][31]. El espectro obtenido corresponde, por tanto, a la superposición neta de ambas fuentes tras dicha interferencia.

Como se muestra en las figuras siguientes, esta combinación dio lugar a un espectro con un error cuadrático medio de 2313.58, un valor significativamente menor al observado con la luz blanca por sí sola. Este resultado apoya la hipótesis de que la mezcla de fuentes de distinta naturaleza espectral puede acercarse de forma más precisa a la distribución espectral de la luz solar, ofreciendo una alternativa viable que equilibra eficiencia energética y confort visual.



13. Comparación Espectral Luz Natural - Combinada



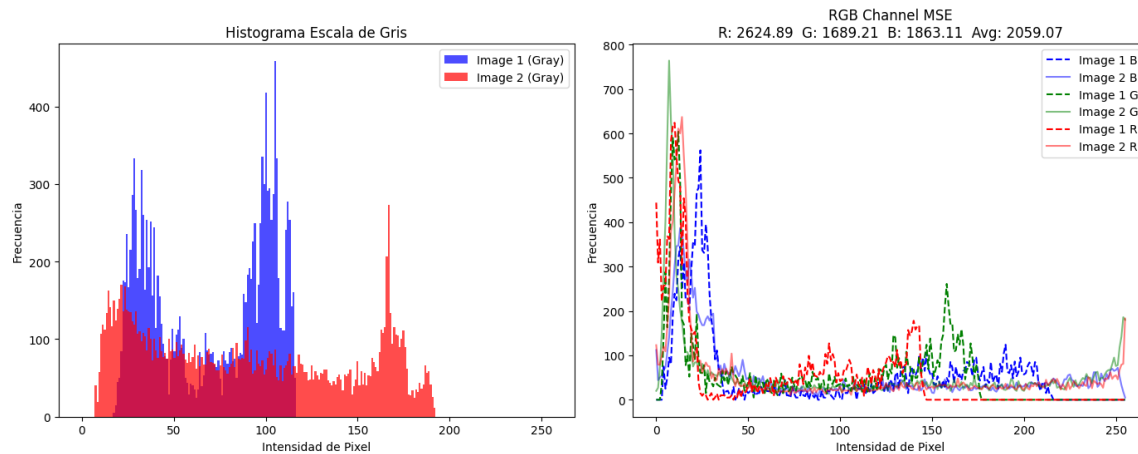
14. Imagen sustraída original del espectro de la Luz natural – combinada con degradado rojo (ROI)



15. Imagen sustraída invertida del espectro de la Luz natural – combinada con degradado rojo (ROI)

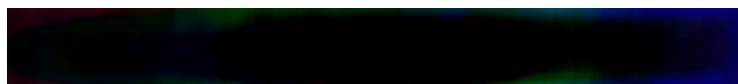
Las figuras 14 y 15 ilustran lo previamente expuesto, mostrando la complejidad de distinguir posiciones similares entre las imágenes espectrales. Dado que esta diferencia es sutil, se recurre al uso de imágenes invertidas, lo que facilita la identificación de las regiones espectrales donde se encuentran las discrepancias. En este caso, las diferencias son particularmente notorias en las longitudes de onda correspondientes a los colores cian, naranja y amarillo, ubicándose en torno a los 500 nm y entre los 580-606 nm, respectivamente. Este enfoque permite resaltar las variaciones en el espectro con mayor precisión, facilitando el análisis comparativo.

Analizando la luz natural con la halógena, se puede observar en que en la siguiente figura el promedio (AVG) es de **2059.07**, el cual es menor que el promedio de las otras dos comparaciones, esto quiere decir que; el espectro de luz halógena es el que más se asemeja al de la luz natural, sin embargo, debido a las nuevas tendencias de mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de electricidad, fue necesario la sustitución de este tipo de iluminación por luz blanca LED.



16. Comparación Espectral Luz Natural – Halógena.

Las imágenes mostradas en las figuras 17 y 18 confirman lo expuesto anteriormente, pero con un hallazgo aún más relevante: la diferencia fundamental entre ambas se debe principalmente a la tonalidad azul del espectro. Este resultado refuerza lo señalado en la literatura, proporcionando evidencia adicional de que la metodología utilizada en este estudio produce resultados coherentes con otros trabajos en la misma línea, pero empleando instrumentación basada en enfoques más tradicionales. Así, este análisis espectral no solo valida la técnica empleada, sino que también destaca su capacidad para ofrecer resultados comparables en términos de precisión y relevancia.



17. Imagen sustraída original del espectro de la Luz natural – Halógena con degradado rojo (ROI)



18. Imagen sustraída invertida del espectro de la Luz natural – Halógena con degradado rojo (ROI).

10.0. Conclusiones.

Este trabajo ha demostrado la viabilidad de una metodología innovadora para el análisis espectral de diversas fuentes de luz artificial en comparación con la luz natural, utilizando un espectrómetro portátil impreso en 3D y componentes ópticos de bajo costo. Los resultados obtenidos validan la hipótesis de que la combinación de fuentes de luz artificial puede aproximarse significativamente a la riqueza espectral de la luz solar, logrando un equilibrio entre eficiencia energética y calidad del confort visual. Sin embargo, cabe destacar que, a pesar de que la luz halógena presenta la mayor similitud con la luz natural, sigue siendo problemática desde una perspectiva ambiental. Esto plantea la necesidad de explorar soluciones que, aunque no sean completamente sostenibles, puedan ofrecer un equilibrio ideal entre ambos aspectos. En este sentido, la combinación de fuentes LED de bajo vataje con una fuente halógena de baja intensidad podría representar una alternativa viable que combine los beneficios de ambas tecnologías.

La comparación espectral entre la luz natural y las fuentes artificiales, así como la aplicación de técnicas como la inversión de colores y la sustracción de imágenes, ha permitido resaltar diferencias fundamentales, especialmente en las tonalidades azules, que son un factor clave en la percepción de la luz artificial en términos de salud visual. Además, se ha corroborado que los resultados obtenidos con este enfoque son comparables a los de trabajos previos que emplean instrumentación más convencional, lo que valida la metodología utilizada y establece su potencial para ser aplicada en futuros estudios e innovaciones en la iluminación arquitectónica.

Este estudio contribuye a la mejora en el diseño de sistemas de iluminación más eficientes y saludables, y abre la puerta a nuevas posibilidades en el uso de tecnologías accesibles y sostenibles para analizar y replicar las condiciones de luz natural en entornos interiores.

11.0. Referencias.

- [1] Gueymard, C. A. (2020). A detailed review of the spectral similarity between artificial light sources and daylight. *Solar Energy*, 207, 136–152.
- [2] Liberman, J. (1991). *Light: Medicine of the future*. Bear & Company Publishing.
- [3] Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting* (3rd ed.).
- [4] Robbins, C. L. (1986). Daylighting design and analysis (pp. 4–13).
- [5] Heerwagen, J. H. (1986). The role of nature in the view from the window. In 1986 International Daylighting Conference Proceedings II (pp. 430–437).
- [6] Cuttle, K. (1983). People and windows in workplaces. In *Proceedings of the Conference on People and the Physical Environment Research* (pp. 203–212).
- [7] Hathaway, W. E., Hargreaves, J. A., Thompson, G. W., & Novitsky, D. (1992). A study into the effects of light on children of elementary school age—A case of daylight robbery. Alberta Education, Policy and Planning Branch.
- [8] Newton, I. (1704). *Opticks: Or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*.
- [9] Laszlo, C. (s.f.). *Interior lighting manual*.
- [10] Born, M., & Wolf, E. (2019). *Principles of optics* (7th ed.).
- [11] Young, H. D., & Freedman, R. A. (2020). *University physics* (15th ed.).
- [12] Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson.
- [13] Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2017). *Introduction to optics*(3rded.).
- [14] Fowles, G. R. (1975). *Introduction to modern optics*. Holt, Rinehart and Winston.
- [15] Luetich, J. J. (2002). Snell's Law, Descartes' formalization, and Fermat's Principle. Luventicus Adolescentes, Academy of Sciences Luventicus, Rosario, Argentina.
- [16] Erlichson, H. (1999). Johann Bernoulli's brachistochrone solution using Fermat's principle of least time. *European Journal of Physics*, 20(5), 299–304.
- [17] Herzberg, G. (1950). *Atomic spectra and atomic structure*. Dover.
- [18] Bellia, L., Pedace, A., & Fragliasso, F. (2017). Indoor lighting quality: Effects of different wall colours.

- [19] Ohno, Y. (2014). Spectral design considerations for white LED color rendering.
- [20] Rea, M. S., & Figueiro, M. G. (2018). Light as a circadian stimulus for architectural lighting.
- [21] Brainard, G. C., & Hanifin, J. P. (2005). Photons, clocks, and consciousness.
- [22] Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2019). Fundamentals of photonics (3rd ed.).
- [23] Palmer, C., & Loewen, E. (2005). Diffraction grating handbook. Newport Corporation.
- [24] Jenkins, F. A., & White, H. E. (2017). Fundamentals of optics (5th ed.).
- [25] Barreiro, J. J., Pons, A., Barreiro, J. C., Castro-Palacio, J. C., & Monsoriu, J. A. (2014, March). Diffraction by electronic components of everyday use.
- [26] Instituto Nacional de Energía Renovable (NREL). (2020). Best practices for solar radiation measurement.
- [27] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital image processing (4th ed.).
- [28] Russ, J. C. (2016). The image processing handbook (7th ed.).
- [29] Hecht, E. (2017). Optics (5th ed., Chap. 9: Interference).
- [30] Ockenga, W. (2011, June 9). Phase contrast.
- [31] Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). Principles of instrumental analysis (7th ed.).