

**Diseño y evaluación de un sistema de comunicación por luz visible aplicado a entornos de invernaderos  
Design and evaluation of a visible light communication system applied to greenhouse environments**

Ing. Jaime Darío Rodríguez Vizúete; Ing. Franklin Gregory Tello Canchingre; Ing. Sonia Shirley García Caicedo;  
Ing. Christopher Alexis Cuenca Meral

**APRENDIZAJE****Junio, V°4-N°1; 2023**

- ✓ **Recibido:** 31/03/2023
- ✓ **Aceptado:** 13/04/2023
- ✓ **Publicado:** 30/06/2023

**INSTITUCIÓN**

- 🏫 Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas
- 🏫 Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas
- 🏫 Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí
- 🏫 Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas

**PAIS**

- 🇪🇨 Esmeraldas – Ecuador

**CORREO:**

- ✉ [jaime.rodriguez.vizúete@utelvt.edu.ec](mailto:jaime.rodriguez.vizúete@utelvt.edu.ec)
- ✉ [fgtello@istluistello.edu.ec](mailto:fgtello@istluistello.edu.ec)
- ✉ [sgarcia@pucem.edu.ec](mailto:sgarcia@pucem.edu.ec)
- ✉ [christopher.cuenca.mera@utelvt.edu.ec](mailto:christopher.cuenca.mera@utelvt.edu.ec)

**ORCID:**

- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-1397-718X>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0004-6549-0781>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0001-6077-3222>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0002-1374-3247>

**APA.**

Rodríguez, J. Tello, F. García, S. Cuenca, C. (2023). *Diseño y evaluación de un sistema de comunicación por luz visible aplicado a entornos de invernaderos*. Revista G-ner@ndo, V°4 (N°1). 814– 844.

**Resumen**

Esta investigación cuantitativa presentó el diseño y evaluación de un sistema de comunicación por luz visible (VLC, por sus siglas en inglés), mediante simulaciones computacionales aplicadas a entornos de invernaderos simulados, para mejorar el desempeño de la comunicación interna utilizada en estos lugares. Además, este estudio descriptivo con diseño cuasiexperimental aplicó metodología de modelado analítico de sistemas de comunicación inalámbrica con topología de comunicación multiple-input y single-output (MISO), usando la herramienta MATLAB para realizar 21 simulaciones, aplicando la técnica de trazado de rayos y el método estadístico de Montecarlo. Se evaluó el desempeño del sistema mediante potencia recibida, tasa de error de bits (BER), respuesta al impulso del canal (CIR) y relación señal/ruido (SNR). Los resultados obtienen valores de intensidad luminosa en el invernadero fluctuando entre [600-900] lux, y potencia obtenida entre [0.82x10<sup>-5</sup>-3.8x10<sup>-5</sup>] W, verificando que la iluminación es adecuada porque presenta valores estables y una cobertura total del escenario para promover una comunicación eficiente. Los valores CIR y la potencia recibida son irregulares por la aleatoriedad del posicionamiento de los diodos emisores de luz (LEDs) e influencia de factores externos, siendo inferiores a otros escenarios de interiores típicos. Se infiere, en términos de capacidad de transmisión y consumo de potencia eléctrica, que el sistema VLC mejora en estos aspectos a los sistemas de radiofrecuencia en ambientes agronómicos; se recomienda extender el diseño del sistema VLC a un ambiente exterior y evaluar su desempeño.

**Palabras clave:** comunicación de luz visible, invernadero, modelo del canal, respuesta al impulso del canal

**Abstract**

This quantitative research study presented the design and analysis of a visible light communication (VLC) system through computer simulations applied to agronomic greenhouse scenarios, in order to improve the performance of internal communication in places like these. Likewise, this descriptive research study with a quasi-experimental design used analytical modeling of wireless communication systems including multi-input single-output (MISO) communication topology performed in MATLAB to carry out 21 simulations, by applying the ray tracing technique and the Monte Carlo statistical method. System performance was analyzed using the received power, bit error rate (BER), channel impulse response (CIR), and signal-to-noise ratio (SNR). The findings reveal light intensity values in the greenhouse fluctuating between [600-900] lux, and the received power between [0.82x10<sup>-5</sup>-3.8x10<sup>-5</sup>] W, which verifies that lighting is suitable because it presents stable values as well as good light coverage throughout the scenario to promote effective communication. CIR and the received power values are irregular due to the randomness of light-emitting diodes (LEDs) positioning and the influence of external factors, being lower than other typical indoor scenarios. It is inferred, in terms of power transmission capacity and electric power consumption, that the VLC system improves radiofrequency systems in agricultural environments in these aspects; extending the VLC system design to outdoor environments and evaluate its performance is recommended.

**Keywords:** visible light communication, greenhouse, channel model, channel impulse response.

## Introducción

La agricultura tradicional depende en gran medida del medio ambiente, que es poco controlable y se deteriora cada vez más. En busca de proporcionar una agricultura eficiente, los avances tecnológicos proponen soluciones para facilitar el trabajo agrícola y depender en menor medida de factores externos (Zambon et al., 2019). Por ello, los agricultores están pasando a un nuevo entorno para la agricultura, los llamados invernaderos agronómicos. Estos entornos proporcionan condiciones ambientales controladas, ya que permiten manejar factores como la temperatura, la humedad y una iluminación adecuada (Cossu et al., 2018).

Los invernaderos agronómicos son aparentemente una solución eficaz para mejorar los cultivos. Sin embargo, controlar todas las variables externas que afectan a los cultivos es un reto que debe ser analizado. Por ello, varios estudios han demostrado que el electromagnetismo de Radiofrecuencia (RF) degrada el crecimiento y la calidad de los cultivos (Zhou & Wang, 2019). Los invernaderos, según el cultivo necesitan una buena iluminación.

Todos los retos mencionados se presentan como oportunidades para que la comunidad científica busque sistemas de comunicación complementarios que optimicen tanto la comunicación como la iluminación en los invernaderos. Es aquí donde se introduce el concepto de Comunicación por Luz Visible (VLC) como sistema de comunicación para entornos de invernaderos. Son varias las ventajas que aportan los sistemas VLC : el uso de bandas espectrales sin licencia que van desde los 400 THz hasta los 800 THz, elementos transmisores y receptores con precios razonables y fáciles de obtener, y que VLC es considerada como una tecnología verde que no afecta al medio

---

ambiente ni a la naturaleza, que es la principal característica a implantar en los invernaderos (Ghassemlooy et al., 2018; P. Játiva et al., 2020).

La metodología utilizada en la propuesta de titulación, consiste en el modelado analítico de sistemas de comunicación inalámbrica, usando el método estadístico de Montecarlo y la técnica de trazado de rayos.

El resto de este manuscrito está organizado por los trabajos relacionados con los estudios más selectos, el estado del arte donde se detallan los conceptos bases de la investigación, la metodología donde se indica el proceso que se llevó a cabo para la elaboración del estudio, los resultados obtenidos, la discusión donde se constratan con otros estudios y las conclusiones y referencias bibliográficas. Para dar inicio al proceso de recopilación de información documental y estudios relacionados se definió una cadena de búsqueda de la siguiente manera: (visible light communication OR comunicación por luz visible) AND (greenhouses OR invernaderos), se inició con la búsqueda de información en las diferentes bases de datos científicas y se escogieron los estudios más selectos.

Un estudio realizado por Zambon et al. (2019) con el estudio Revolución 4.0: industria versus agricultura en el futuro Desarrollo para pymes, los autores presentaron que las empresas se enfrentan a dificultades en los procesos transformadores por el continuo progreso de innovaciones y tecnologías por lo cual se debe aplicar estrategias con el objetivo de invertir en tecnologías en el campo de la agronomía, las mismas que favorezcan la producción y competición en el mercado. Partiendo de estos problemas se desea realizar el diseño y evaluación de un sistema de comunicación por luz visible aplicado a entornos de invernaderos.

---

Según un estudio desarrollado por Henao et al. (2021) propusieron y validaron experimentalmente un esquema de codificación híbrido basado en la modulación de posición de pulsos múltiples (M-PPM) y la modulación de ancho de pulso (PWM) para el control simultáneo de la iluminación y la transmisión de datos en un sistema VLC. El sistema implementado utilizó componentes de bajo costo y fotodetectores comerciales. La codificación implementada admite la transferencia de información a una velocidad constante a pesar de los niveles de iluminación soportados por el sistema VLC. Como resultado se obtuvo una velocidad para transmitir datos de 30 kbit/s con dos LEDs RGB de 10W a 0,9 metros del fotodetector OPT101, con un rango de iluminación que va del 25% al 85% de la potencia lumínica posible de los LED.

En la misma línea, Robalino (2021) desarrolló un sistema VLC con el objetivo de realizar el control de robots móviles en entornos de interiores. El sistema se desarrolló mediante el uso de tres LEDs de 10W ubicados a un metro de la superficie de incidencia del área de trabajo, además se usó un módulo IRF522 para la codificación de datos enviada desde el microprocesador Arduino UNO. Como resultado se obtuvo que cuando el LED y el robot están alineados se recepta la mayor tasa de datos con éxito y a medida que el robot se desliza y aumenta el ángulo de visión con el LED, la tasa de datos receptada disminuye. Sin embargo, se afirma que el sistema VLC es óptimo para manipular robots móviles en escenarios de interior.

En otro contexto, Giraldo & Urquijo (2021) implementaron un sistema VLC usando modulación de amplitud de pulso (PAM) y un receptor basado en fotodiodo PIN, un Microcontrolador de 32 bits y en conjunto con una interfaz gráfica del software HTerm. Se utilizó como transmisor LED color rojo, además de la plataforma Mbed.org, la misma

---

que cuenta con su propio compilador en línea. Mediante el uso PAM se implementó un protocolo de comunicación unidireccional entre dos ordenadores, utilizando 2 scripts elaborados en la herramienta de Matlab, los mismos que permitieron el envío y recepción de un carácter ASCII. Como resultado se obtuvo un setup experimental que será una herramienta para el Laboratorio de Detectores y permitirá el desarrollo de trabajos futuros.

Por otra parte, Palacios et al. (2020) expresaron un estudio sobre las características físicas especiales y los factores externos de las minas subterráneas que afectan el desempeño de los sistemas VLC aplicados a estos ambientes. Los factores particulares considerados incluyen la orientación de los LEDs y los PDs, paredes no uniformes, sombras producidas por maquinaria pesada y dispersión producida por partículas de polvo. Se presenta la respuesta de impulso del canal óptico de minas subterráneas y la distribución de potencia recibida en el escenario de minería subterránea. Los resultados numéricos a través de simulaciones muestran y validan el efecto hostil de las características de las minas subterráneas en el canal VLC. Se enunciarán las bases teórico-científicas por medio de conceptos, ideas y experiencias de investigación sobre la propuesta diseño y evaluación de un sistema VLC aplicado a entornos de invernaderos.

Por lo tanto, se puede mencionar que existen diferentes medios para transmitir datos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Medios de comunicación alámbricos: La información viaja por medio de un cable (par trenzado, coaxial, fibra óptica, etc.) que se encargan de la conducción de las señales desde un extremo a otro. Medios de comunicación inalámbricos: La información viaja por

---

el aire, es decir propagan la información a través del uso del espectro electromagnético de ondas de radio, los tipos de comunicación pueden ser microondas, infrarrojo, bluetooth, radiofrecuencia, VLC (Vera Guevara, 2017).

Entre los medios de comunicaciones inalámbricos está la comunicación por luz visible (VLC) que es una tecnología inalámbrica óptica de rango medio que utiliza las longitudes de onda de 380 a 780 nm del espectro electromagnético, este medio de comunicación se lo considera una tecnología prometedora para las comunicaciones digitales inalámbricas óptica (OWC) de corto alcance, avanzada y altamente desarrollada que puede proporcionar simultáneamente iluminación y transmisión inalámbrica de datos de alta velocidad (Intriago et al., 2021; Khalighi & Uysal, 2014; Memedi & Dressler, 2021; Rosero, 2018; Teixeira et al., 2019; Yu et al., 2021). Además, se mencionan los componentes principales de un sistema VLC:

El LED es un dispositivo semiconductor de unión p-n que emite radiación óptica espontánea cuando se somete a excitación electrónica. (Crespo & Díaz, 2018; Ghassemlooy et al., 2013; Ryser et al., 1997). En el mismo contexto, están los Fotodiodo (Photodiode PD) Son semiconductores sensibles a la luz visible o infrarroja. Para funcionar correctamente, se despolariza y crea un flujo de corriente específico cuando es excitado por la luz. Los fotodiodos, por su estructura, se comportan como células solares (Ghassemlooy et al., 2013).

Por otra parte, se menciona el tipo de Comunicación por Radiofrecuencia (RF) , es un medio de comunicación que se efectúa a través de ondas de radio, éste se caracteriza por el movimiento de los campos eléctricos y los campos magnéticos (Salgado & Ruiz, 2020). Además, existe la comunicación híbrida que es la composición

---

de dos o más tipos de comunicaciones. Las redes híbridas explotan medios independientes para ampliar la cobertura de la red y mejorar el rendimiento (Soto et al., 2020; Zhang et al., 2018).

En este sentido, cabe recalcar que existen diferentes formas de enlaces inalámbricos simples/múltiple en los sistemas VLC, Ghassemlooy et al. (2013) los menciona a continuación:

Salida única, entrada única (SISO) es un sistema de comunicación inalámbrica en el que se utiliza una antena como transmisor y una antena como receptor. Entrada única, salida múltiple (SIMO) es un sistema donde el transmisor tiene una antena y el receptor tiene múltiples antenas. Entrada múltiple, salida única (MISO) consisten en la diversidad de transmisión, los mismos datos se transmiten de forma redundante desde las dos antenas transmisoras.

Múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO) es un método de uso común con buena eficiencia espectral para lograr altas tasas de datos en VLC.

Finalmente, se indica que existen diferentes softwares de simulaciones, en esta investigación se utilizó la herramienta Matlab. Un estudio realizado Keviczky et al. (2019) expresan que Matlab es un entorno interactivo para cálculos científicos y de ingeniería, simulaciones y visualización de datos.

## **Materiales Y Métodos**

El presente trabajo de titulación considera un enfoque de investigación cuantitativa, porque se emplean métricas de valoración de los sistemas VLC.

En la propuesta se plantea la pregunta de investigación, que consiste en:

---

¿Cómo podría mejorar la comunicación en los entornos de invernaderos la propuesta de un diseño y evaluación de un sistema VLC?

Para la validación de la pregunta de investigación se usan métricas de valorización, las cuales son : potencia recibida, respuesta al impulso del canal, tasa de errores de bit y relación señal/ruido. Los resultados se obtendrán utilizando una metodología estadística de MonteCarlo (Cardero, 2021) para darle mayor robustez y soporte estadístico.

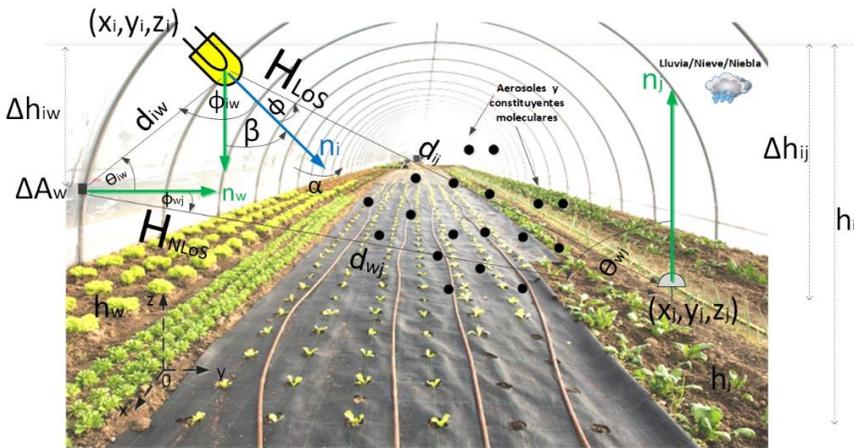
Además, se empleó la investigación cuasiexperimental, debido a que se realiza el diseño de un sistema VLC y se efectúan simulaciones computacionales del sistema aplicados a invernaderos.

En la propuesta de investigación, la configuración geométrica de la transmisión de enlace descendente se aplica a un escenario de invernadero ilustrado en la figura 1, se considera una sección del invernadero para el análisis. Esta sección es equipada con transmisores LED, y para optimizar el efecto de comunicación, la intensidad de la luz en el invernadero debe ser distribuida de la forma más uniforme posible. Por lo tanto, deben instalarse varios LEDs en todo el invernadero. Las dimensiones, la ubicación de los LEDs y los parámetros clave del sistema VLC aplicado al invernadero agronómico propuesto se detallan en la tabla 1, situada en resultados de la propuesta.

## **Figura 1**

*Esquema de componentes de sistema VLC para invernaderos*

---



*Nota:* La figura muestra un esquema de los componentes que influyen en el sistema VLC para invernaderos.

En este sentido, la propuesta de investigación consiste en diseñar un sistema de comunicación por luz visible y evaluarlo mediante simulaciones computacionales aplicado a invernaderos simulados. El modelo de sistema VLC para invernadero se basa en un sistema de comunicación multiple-input y single-output (MISO), el cual consta entrada múltiple y salida única, específicamente cuatro transmisores y un receptor para la comunicación en el invernadero.

La metodología utilizada en la propuesta de titulación, consiste en el modelado analítico de sistemas de comunicación inalámbrica. Los pasos a seguir en esta metodología consisten en: modelamiento del sistema. Se emplea el modelo matemático para el LED y el modelo matemático para el PD. Luego se realiza el modelamiento del canal, donde se incluyen los factores atmosféricos y el modelo de propagación óptica en el invernadero. Posteriormente se hace la obtención de la expresión analítica y la validación mediante simulaciones computacionales.

A continuación, se detalla paso a paso el proceso de la metodología empleada para el desarrollo de la propuesta de investigación.

Primero se debe tener el modelo del sistema, el cual se ilustra mediante la figura 1. Posteriormente se continúa con el modelo matemático para LED basado en la orientación. Es decir, para modelar matemáticamente la orientación del LED en el invernadero, se define  $\emptyset$  como el ángulo de radiación con respecto al vector normal  $n_i$  de la posición del LED y la posición del LED en el invernadero como  $(x_i, y_i, z_i)$  en el sistema de coordenadas cartesianas, donde  $i = 1, 2, \dots, I$  e  $I$  es el número total de LED.

En los invernaderos los LEDs no apuntan verticalmente hacia abajo debido a su orientación. Por lo tanto, debe describirse en base a dos ángulos distintos. Estos ángulos se definen como el ángulo de inclinación con respecto al eje  $z$ , que está representado por  $\beta$  y toma valores en el rango de  $[-90^\circ, 0^\circ)$  y el ángulo de rotación con respecto al eje  $x$ , que se denota como  $\alpha$  y se define en el intervalo  $[0^\circ, 180^\circ)$  (Ghassemlooy et al., 2018; Palacios et al., 2020), el patrón de intensidad de radiación  $S(\emptyset)$  se da como (Ghassemlooy et al., 2018; Palacios et al., 2020):

$$S(\emptyset) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\emptyset) \text{ if } \emptyset \in \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \\ 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

De lo contrario

Donde  $m$  es el número de modo lambertiano, que es función del semiángulo a mitad de potencia  $\Phi_{1/2}$  emitido por el LED;  $m$  adquiere la forma de (Ghassemlooy et al., 2018; Palacios et al., 2020):

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln[\cos(\Phi_{1/2})]} \quad (2)$$

En la propuesta, el escenario de invernadero agronómico, se asume que los PDs están instalados en el suelo sobre sensores que controlan las funciones que se aplicarán en los cultivos.

Por lo tanto, para expresar el sistema de manera general se supone el PD fijo y orientado verticalmente hacia arriba, donde su posición está representada por  $(x_j, y_j, z_j)$  en el sistema de coordenadas cartesianas con  $j=1,2,\dots,J$  y  $J$  es el número total de PDs.

El área de recopilación eficaz del PD adquiere la forma de (Ghassemlooy et al., 2018; Palacios et al., 2020):

$$A_{\text{eff}}(\theta) = \begin{cases} A_p \cos(\theta) & \text{if } -\Theta/2 \leq \theta \leq \Theta/2 \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases} \quad (3)$$

Donde  $A_p$  es el área física activa de la PD,  $\theta$  es el ángulo de incidencia con respecto al vector normal  $n_j$  de la posición del PD y  $\Theta$  es el campo de visión PD (FoV). La ganancia del concentrador óptico se puede escribir como  $g(\theta) = \eta^2 / \sin^2(\theta)$ , siendo  $\eta$  el índice de refracción interno del concentrador.

En general, los modelos de canal VLC cuentan con dos componentes ópticos principales: el componente LoS y el componente sin línea de visión (no LoS). Estos componentes varían de acuerdo a factores como ubicación del PD en el invernadero, distancia entre el LED y el PD, entre otros. En la propuesta, el componente LoS resulta directamente del LED iluminando sobre el PD. Por lo tanto, el enlace LoS depende de los parámetros LED y PD. La ganancia de corriente continua (DC) del canal inalámbrico óptico LoS se formula de la siguiente manera (Ghassemlooy et al., 2018; Palacios et al., 2020):

$$H_{\text{LoS}}(0) = \frac{(m+1)A_p}{2\pi d_{ij}^{m+2}} \left\{ [x_j - x_j, y_j - y_j, -\Delta h_{ij}] \cdot [\sin(\beta) \cos(\alpha), \sin(\beta) \cos(\alpha), -\cos(\beta)] \right\}^m \quad (4)$$

$$x \cos(\theta) G(\theta) \text{rect} \left( \frac{\theta}{\Theta} \right)$$

Considerando solo el primer rebote de las reflexiones del modelo para fines prácticos porque afecta más la respuesta de impulso del canal en magnitud y dispersión temporal. Por lo tanto, la ganancia del canal de DC del componente No-LoS se puede calcular sumando todos los componentes que llegan al PD después de reflejarse en una superficie, de la siguiente manera:

$$H_{NLOS}(0) = \frac{(m+1) A_p}{2\pi} \sum_{w=1}^W \frac{\Delta A_w p_w}{d_{iw}^2 d_{wj}^2} \cos^m(\phi_{iw}) \cos(\theta_{iw}) \cos(\phi_{wj}) \cos(\theta_{wj}) \quad (5)$$

$$x G(\theta_{wj}) \text{rect} \left( \frac{\theta_{wj}}{\Theta} \right)$$

Por otra parte, se indican los factores atmosféricos integrados en el modelo de canal VLC para invernadero. La señal óptica que se propaga a través de un canal de espacio libre es susceptible a condiciones atmosféricas como niebla, lluvia, sol, entre otras. El siguiente paso es integrarlos en el modelo de canal VLC, tanto para el componente LoS (expresión 6) como para el componente no-LoS (expresión 7), reescribiéndolas así:

$$H_{LOS}(0)$$

$$= \frac{(m+1)A_p}{2\pi d_{ij}^{m+2}} \left\{ [x_j - x_i, y_j - y_i, -\Delta h_{ij}] \cdot [\sin(\beta) \cos(\alpha), \sin(\beta) \cos(\alpha), -\cos(\beta)] \right\}^m \quad (6)$$

$$x \cos(\theta) G(\theta) \text{rect} \left( \frac{\theta}{\Theta} \right) T(d_{ij})$$

$$H_{NLOS}(0) = \frac{(m+1) A_p}{2\pi} \sum_{w=1}^W \frac{\Delta A_w p_w}{d_{iw}^2 d_{wj}^2} \cos^m(\phi_{iw}) \cos(\phi_{iw}) \cos(\phi_{wj}) \cos(\phi_{wj}) \times G(\phi_{wj}) \text{rect}\left(\frac{\phi_{wj}}{\Theta}\right) T(d_{iw}) T(d_{wj}) \quad (7)$$

Finalmente, la ganancia total de DC para el canal VLC aplicado a los invernaderos agronómicos es la suma de los componentes LoS y NLoS, a saber:

$$H_{\text{invernadero}}(0) = H_{LOS}(0) + H_{NLOS}(0) \quad (8)$$

En el mismo contexto se detalla el modelo de propagación óptica en ambientes agronómicos, el modelo de banda base equivalente que se usó para describir un sistema de modulación de intensidad/detección directa (IM/DD) de VLC para invernaderos agronómicos es el siguiente:

$$Y(t) = r\zeta X(t) \otimes h_{\text{invernadero}}(t) + N(t) \quad (9)$$

Donde  $r$  es la capacidad de respuesta de PD,  $\zeta$  es el índice de modulación LED,  $h_{\text{invernadero}}(t)$  es la respuesta de impulso del canal VLC del entorno del invernadero, y  $\otimes$  es el operador de convolución.

Para estimar el ruido total en el lado del receptor, la varianza total del ruido viene dada aproximadamente por:

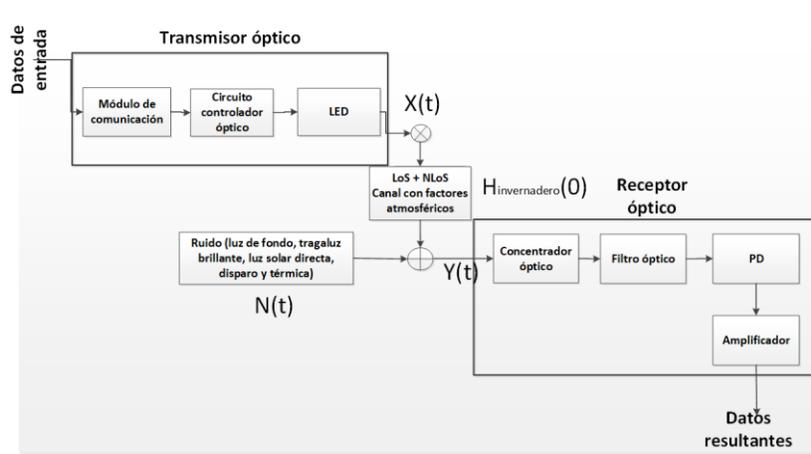
$$\sigma_{\text{total}}^2 = 2q_r P_r B_n + 2q_p A B_n + \frac{8\pi k T_k}{G} \eta A_p I_2 B_n^2 + \frac{16\pi^2 k T_k T}{G} C_{pd}^2 A_p^2 I_3 B_n^3 \quad (10)$$

En este sentido, se presenta el diagrama de bloques del sistema VLC completo en la figura

2.

## Figura 2

*Diagrama de bloques del sistema VLC aplicado a invernaderos*



*Nota.* La figura muestra un diagrama de bloques del sistema VLC aplicado a invernaderos con el transmisor óptico, el canal que contiene los factores atmosféricos y el ruido y el receptor óptico.

## Análisis de Resultados

Para la simulación, se eligió un invernadero de dimensiones 2m x 5m x 4m. Todas las evaluaciones son numéricas y se han realizado mediante simulaciones en el software Matlab. Mediante la técnica de revisión documental se obtuvieron los parámetros más relevantes utilizados para el desarrollo de las simulaciones en el software matlab, con sus respectivos valores y referencias, se pueden observar en la tabla 1 (Ahmed et al., 2019; Ghassemlooy et al., 2018; P. P. Játiva et al., 2020):

## Tabla 1

*Parámetros de simulación del sistema VLC de invernadero*

<b>Parámetros del modelo del sistema</b>	<b>Valores</b>
<b>Escenario del invernadero</b>	
Dimensiones (w x l x h)	(2x5x4) m
Coordenadas de los LEDs (x, y, z)	T <sub>1</sub> = (-0.5,-1.25,3.7), T <sub>2</sub> = (0.5,1.25,3.7), T <sub>3</sub> = (0.5, -1.25,3.7), T <sub>4</sub> = (-0.5,1.25,3.7)
<b>Parámetros del canal</b>	
Temperatura absoluta	295 K
Corriente oscura de fondo	10 nA
Constante de Boltzmann	$1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Capacidad	$112 \times 10^{-8} \text{ F/m}^2 (\text{s}^4 \text{ A}^2 \text{ m}^{-4} \text{ kg}^{-1})$
Carga electrónica	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Factor de ruido del canal FET	1.5
Transconductancia FET ancho	$0.03 \text{ S} (\text{kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ A}^2)$
Ancho de banda de ruido	100 MHz
Factor de ancho de banda de ruido I2	0.562
Factor de ancho de banda de ruido I3	0.0868

---

**Parámetros del transceptor VLC**

---

Potencia óptica de salida media	10 W
Filtro de paso de banda de transmisión	1
Ganancia del filtro óptico	1
Ángulo de rotación de LED	45°
Ángulo de inclinación de LED	45°
Modulación	OOK
Ancho de banda de modulación	50MHz
Índice de modulación	0.3
Número de PD	1
Ganancia de voltaje de bucle abierto	10
Área física de PD	1 cm <sup>2</sup>
Ancho de banda del filtro óptico	340 nm a 694.3 nm
Longitud de onda central del filtro óptico	340 ± 2nm
Filtro óptico anchura media máxima	10 ± 2nm
Índice de refracción	1.5
Coefficiente de reflexión	0.8
Capacidad de respuesta	0.53 A/W
Campo de visión de prescripción	60°
Tx semiángulo a media potencia	60°

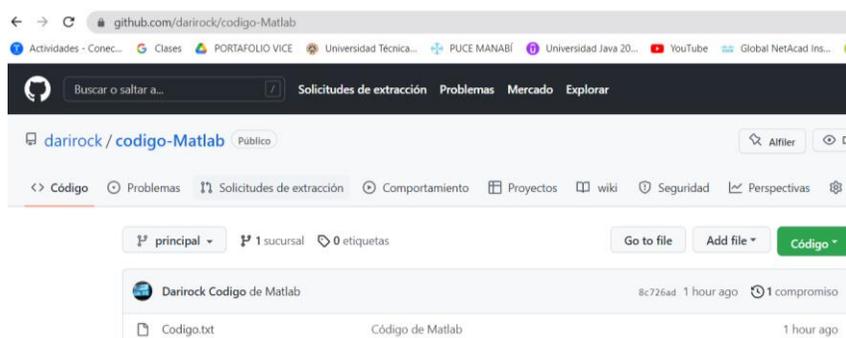
---

*Nota.* En la tabla se muestran los parámetros de simulación del sistema VLC del invernadero.

Posteriormente se desarrolló el código fuente del sistema VLC para invernaderos simulados, tal como se especifica en el la figura 3.

### Figura 3

#### Código desarrollado en el software Matlab

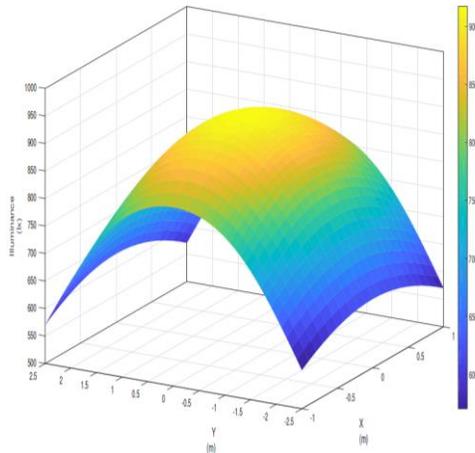


*Nota.* La figura muestra el código desarrollado en el software Matlab que se encuentra en el repositorio de Github: <https://github.com/darirock/codigo-Matlab.git>

En este sentido, se obtienen los resultados de la evaluación de las métricas aplicadas en el sistema VLC, se inicia verificando el resultado de la iluminación en el escenario del invernadero simulado y se obtiene que los valores de iluminancia oscilan entre [600-900] lux., como se muestra en la figura 4.

### Figura 4

*Distribución de la iluminancia del escenario agronómico del invernadero*

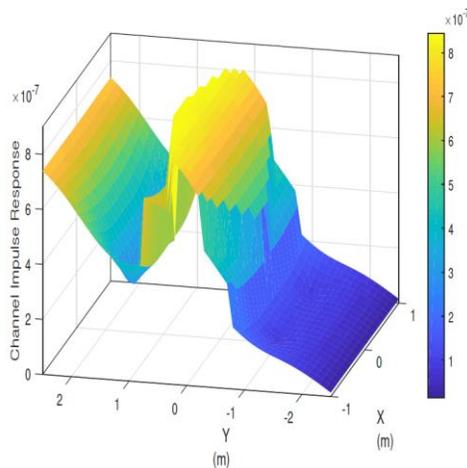


*Nota.* La figura muestra la distribución de la iluminancia del escenario agronómico del invernadero.

Por otra parte, la figura 5 muestra la distribución de la CIR en el entorno del invernadero agronómico simulado.

### Figura 5

*Distribución del CIR del escenario agronómico de los invernaderos*

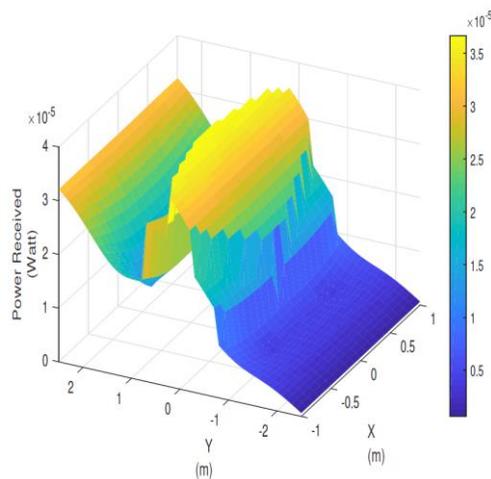


*Nota.* En la tabla se muestra la distribución del CIR del escenario agronómico de los invernaderos.

En la misma línea, la figura 6 muestra la distribución gráfica de la potencia recibida en el escenario de invernadero agronómico evaluado, la cual varía entre un rango de valores de  $[0.82 \times 10^{-5} - 3.8 \times 10^{-5}]$  W.

### Figura 6

*Distribución de la potencia recibida en el escenario agronómico del invernadero*

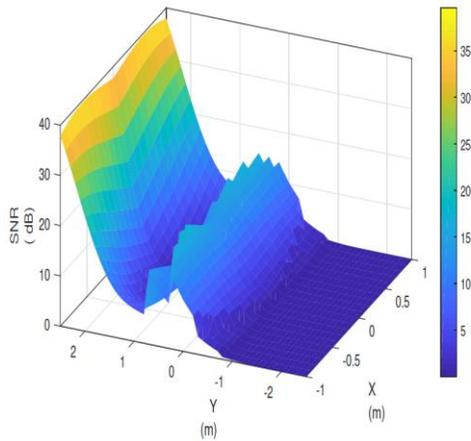


*Nota.* En la figura se muestra la distribución de la potencia recibida en el escenario agronómico de los invernaderos.

En otro contexto, la figura 7 muestra la SNR en toda el área de cobertura del invernadero bajo un clima lluvioso, que produce aerosoles y moléculas constituyentes dentro del invernadero. La SNR en el escenario completo varía entre un rango de valores de  $[3.25 - 39.32]$  dB.

### Figura 7

*Distribución SNR del escenario agronómico del invernadero*

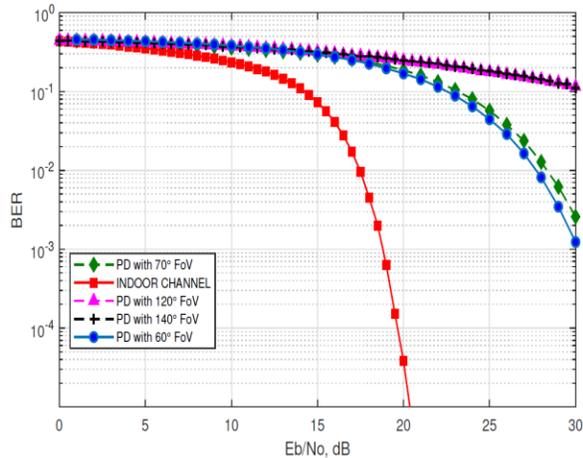


*Nota.* En la figura se muestra la distribución SNR del escenario agronómico del invernadero.

Por otra parte, las curvas BER simuladas se muestran en la figura 8 para un escenario VLC interior típico basado en un modelo de canal interior ideal y para el escenario VLC propuesto junto con el canal VLC para entornos de invernadero agronómico.

### **Figura 8**

*Curvas BER para un escenario VLC interior ideal y el escenario de invernadero propuesto, variando los FoVs del PD.*



*Nota.* En la figura se muestran las curvas BER para un escenario VLC interior ideal y el escenario invernadero propuesto, variando los FoVs del PD.

### Discusión

En la tabla 1 se detalla el escenario del invernadero y los parámetros del canal con los valores respectivos. En estudios similares donde se usa VLC como medio de comunicación se observan parámetros similares como se detalla en Játiva et al. (2020) con el estudio: Un modelo de canal VLC para entornos de minería subterránea con dispersión y sombreado. Este estudio ha sido guía como referencia para comparar parámetros aplicados en el sistema VLC propuesto.

Por otra parte, en la figura 4 se muestra la distribución de iluminancia del escenario agronómico del invernadero, donde se puede observar que los valores de iluminación se encuentran entre [600-900] lux. Entre los requisitos mínimos de intensidad luminosa para los invernaderos se encuentra que deben cumplir con una iluminación de [70-100] lux (Melgarejo et al., 2019). Por lo tanto, el resultado de iluminancia que se generó en la

investigación se encuentra en el rango establecido, la iluminación es adecuada para una comunicación eficiente en el invernadero.

En la misma línea, la figura 5 muestra la distribución de la CIR en el entorno del invernadero simulado. Se observa que la CIR en el escenario completo varía entre un rango de valores de  $[0.8 \times 10^{-7} - 8.1 \times 10^{-7}]$ . Se puede identificar que la CIR no es uniforme, y su disminución no es inversamente proporcional a la distancia entre el LED y el PD. Por otra parte, si se comparan los valores de CIR obtenidos en la investigación, con los valores de CIR obtenidos en otros entornos, como en Játiva et al.(2020) se pueden observar algunas diferencias como: los valores de CIR obtenidos en el invernadero son más bajos que los obtenidos para las minas subterráneas y, obviamente, mucho más bajos que los entornos ideales de VLC en interiores. Esta comparación da una idea de que el entorno exterior del invernadero es difícil de controlar, y sus variables atmosféricas producen un efecto perjudicial en los enlaces ópticos.

*En el mismo contexto, se evalúa la segunda métrica en el sistema VLC que consiste en la potencia recibida en el PD. Este parámetro permite verificar y analizar el comportamiento del canal óptico derivado.* En la figura 6 se observa que la potencia recibida en el escenario varía entre un rango de valores de  $[0.82 \times 10^{-5} - 3.8 \times 10^{-5}]$  W. Se puede observar que la distribución de potencia recibida que se obtiene sigue el mismo patrón que el CIR, por lo que se puede deducir que los resultados obtenidos son coherentes.

Comparando estos valores de potencia con escenarios VLC de minería subterránea o escenarios VLC de interior ideales (P. P. Játiva et al., 2020). Se puede

---

observar que las potencias recibidas en el entorno del invernadero propuesto son menores.

Además, la figura 7 muestra la SNR en toda el área de cobertura del invernadero bajo un clima lluvioso, que produce aerosoles y moléculas constituyentes dentro del invernadero.

La SNR en el escenario completo varía entre un rango de valores de [3.25-39.32] dB. Como se puede ver en el gráfico, la distribución de la SNR en el invernadero sigue la misma tendencia irregular del CIR y de la potencia recibida; los valores más altos de SNR no se encuentran en el centro del invernadero. Este efecto se debe principalmente a los factores de ruido (térmico, de disparo, entre otros) que se encuentran en mayor magnitud en el centro del invernadero. Por consiguiente, se puede observar que las distribuciones de los aerosoles y las moléculas constituyentes son aleatorias en el invernadero. Este entorno conduce a valores de SNR poco profundos en determinadas zonas cuando el efecto del clima es mayor debido a la atenuación, absorción y dispersión de la señal con respecto al ruido.

Finalmente, se puede observar que hay valores de SNR positivos en todo el escenario del invernadero, por lo que se afirma que hay cobertura de la señal óptica en todo el ambiente analizado. Por otra parte, la BER se estimó a través de simulaciones de Monte Carlo con el método de conteo directo de errores, es decir, se realizaron 21 ejecuciones de 105 bits para tener un intervalo de confianza del 95 % con un factor de incertidumbre de dos en la escala de tasa de error (Ghassemlooy et al., 2018; Guimaraes, 2009).

---

En la figura 8 se indica el resultado de la métrica de la tasa de error de bit (BER) para un escenario VLC interior ideal y el escenario de invernadero propuesto, donde existe una variación de los FoV del PD. De la figura 8, se puede observar que el escenario interior ideal presenta el mejor rendimiento en términos de BER. Este resultado podría esperarse ya que este escenario no considera los efectos que incluyeron en el canal para invernaderos agronómicos, tales como efectos ambientales, características y posicionamiento y orientación de los LEDs. Por ejemplo, para un BER de  $10^{-2}$ , el  $E_b/N_0$  obtenido es de aproximadamente 17 dB. Por otro lado, al aumentar el valor de FoV en el PD, se evidencian varios hallazgos:

En primer lugar, aumentando el rango de apertura de el FoV, el rendimiento del BER empeora. Esto se debe a que a pesar de poder tener una mayor área de recepción de la señal óptica, también se obtiene una mayor recepción de ruido.

Por lo tanto, al ser un escenario complicado en el manejo de agentes externos, produce más errores en la señal recibida. En segundo lugar, se observa que para valores de FoV de  $60^\circ$  y  $70^\circ$ , las curvas son similares, por lo que para un valor de BER de  $10^{-2}$ , se obtienen valores de  $E_b/N_0$  de aproximadamente 26 y 27 dB, respectivamente. Finalmente, para valores de FoV de 120 y 140, las curvas también son similares. Sin embargo, su rendimiento empeora mucho. Por lo tanto, no se recomendaría el uso de PD con estos FoV en ambientes de invernadero agronómico.

El presente trabajo de investigación es un aporte fundamental para el desarrollo de futuros trabajos que quieran mejorar la comunicación en entornos de invernaderos y otros entornos donde se quiera obtener mayor capacidad de transmisión de datos y sin

---

mantener el famoso cuello de botella que en la actualidad es una de las desventajas de la tecnología de radiofrecuencia.

### **Conclusiones**

En la propuesta de investigación, se propone un nuevo modelo de canal VLC aplicado a los entornos de invernaderos. El modelo derivado es diferente de los modelos tradicionales de canal VLC en interiores debido a las características únicas que se encuentran en los invernaderos. Estas características son las siguientes: LEDs girados e inclinados aleatoriamente, la presencia de partículas de aerosoles y moléculas constituyentes producidas por efectos atmosféricos que podrían causar la dispersión, absorción y atenuación de la señal óptica, y la presencia de varias fuentes de ruido que podrían crear errores en la recepción de la señal óptica.

En el invernadero evaluado, se observa que la iluminancia proporcionada por el sistema VLC en el escenario cumple con los estándares internacionales para estos entornos. En cuanto al CIR y la potencia recibida obtenidos, se observa que sus distribuciones son irregulares, y sus valores son inferiores a los de otros escenarios de interior. Esto se debe a los efectos de orientación de los LEDs y a factores ambientales que generan atenuación, dispersión y variabilidad en las magnitudes de las componentes LoS y componentes no-LoS.

Se presentaron las métricas SNR y BER en el escenario de invernadero propuesto, utilizando la modulación OOK. La discusión en profundidad de estos parámetros mostró que los efectos de los diferentes tipos de ruido y la dureza de los factores atmosféricos externos son evidentes en la magnitud de la SNR y la generación

---

de errores. Además, al variar el FoV de la PD, se observa que cuanto mayor es la apertura, el rendimiento del sistema en términos de BER empeora.

Respondiendo a la pregunta de investigación se puede inferir que el modelo del sistema VLC simulado tiene una área de cobertura que permite tener señal óptica en todo el escenario del invernadero. Por lo tanto, comparado con los sistemas de comunicaciones basados en radiofrecuencia, se puede considerar más eficiente en términos de capacidad de transmisión y consumo de potencia. Esto es importante ya que beneficia a los invernaderos, brindando luz y comunicación de forma simultánea. Para mejorar la comunicación en los entornos de invernaderos es necesario aplicar la propuesta planteada de forma experimental (física) y usar la topología MIMO para aumentar más transmisores y más receptores de forma que la comunicación sea más amplia y con mayor potencia para estos escenarios.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, Z., Zhang, L., Faulkner, G., O'Brien, D., & Collins, S. (2019). A shot-noise limited 420 Mbps visible light communication system using commercial off-the-shelf silicon photomultiplier (SiPM). *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2019 - Proceedings*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2019.8757030>
- Cardero, E. (2021). *Métodos de Montecarlo para corregir autointersecciones en ray tracing*. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/12285>
- Cossu, M., Cossu, A., Deligios, P., Ledda, L., Li, Z., Fatnassi, H., Poncet, C., & Yano, A. (2018). *Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the*
-

*main commercial 456 photovoltaic greenhouse types in Europe.*

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.001>

Crespo, C., & Díaz, J. (2018). *Simulación del comportamiento del diodo LED y de un diodo láser*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45545>

Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2013). *Optical Wireless Communications* (Vol. 148). <https://books.google.com.ec/books?id=IXzRBQAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2018). *Optical Wireless Communications*. <https://n9.cl/omn37>

Giraldo, C., & Urquijo, B. (2021). *Prototipo de sistema de comunicación con luz visible usando PAM y receptor basado en fotodiodo PIN*.

Henao, J., Guerrero, N., & Garcia, J. (2021). Experimental Validation of Inverse M-PPM Modulation for Dimming Control and Data Transmission in Visible Light Communications. *IEEE Latin America Transactions*, 19(2), 280–287. <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9443070>

Intriago, D., Ortega, B., & Oviedo, B. (2021). *Sistemas VLC para comunicaciones e iluminación interior*. Editorial Grupo Compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/652>

Játiva, P., Azurdia, C. A., Canizares, M. R., Zabala, D., & Montejo, S. (2020). Performance Analysis of OFDM-Based VLC Schemes in NLOS Channels. 2020

---

*South American Colloquium on Visible Light Communications, SACVC 2020 - Proceedings*, 3170021. <https://doi.org/10.1109/SACVLC50805.2020.9129862>

Játiva, P. P., Azurdia, C. A., Sánchez, I., Seguel, F., Zabala-Blanco, D., Firoozabadi, A. D., Gutiérrez, C. A., & Soto, I. (2020). A VLC channel model for underground mining environments with scattering and shadowing. *IEEE Access*, 8, 185445–185464. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030615>

Kadam, K., Chavan, G. T., Chavan, U., Shah, R., & Kumar, P. (2018). Smart and precision polyhouse farming using visible light communication and internet of things. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 673, 247–256. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7245-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7245-1_25)

Keviczky, L., Bars, R., Hetthéssy, J., & Bányász, C. (2019). Control engineering: MATLAB exercises. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, 1–275. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8321-1>

Khalighi, M., & Uysal, M. (2014). Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(4), 2231–2258. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501>

Memedi, A., & Dressler, F. (2021). Vehicular visible light communications: A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 23(1), 161–181. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3034224>

Moreno, W. (2017). *Modelamiento y Simulación del Diseño de un Relleno Sanitario Semi-mecanizado*.

---

[https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/20.500.12990/1721/Tesis\\_Diseño\\_Relleno\\_Sanitario.pdf?sequence=1](https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/20.500.12990/1721/Tesis_Diseño_Relleno_Sanitario.pdf?sequence=1)

Palacios, J. P., Azurdia-Meza, C. A., Canizares, M. R., Sanchez, I., & Iturralde, D. (2020). On the Performance of Visible Light Communications in Underground Mines. *Proceedings - 2020 IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2020*. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM50620.2020.9282338>

Robalino, G. (2021). *Desarrollo de un Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Control de Robots Móviles en Ambientes Interiores*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11163>

Rosero, V. (2018). Universidad católica de santiago de guayaquil. *Análisis y Estudio Del Uso de La Tecnología Li-Fi En Sistemas de Reproducción Multimedia Mediante Streaming Para La Utilización a Mediano Plazo En El Ecuador.*, 1–125.

Ryer, A., Light, U., & Light, V. (1997). *Light measurement handbook*.

Salgado, V., & Ruiz, W. (2020). Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil DIRECTOR. *Revista EIA, ISSN 1794-1237, Volumen 17, 1–323*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10070>

Soto, I., Rodrigues, R. N., Massuyama, G., Seguel, F., Játiva, P. P., Azurdia-Meza, C. A., & Krommenacker, N. (2020). A hybrid VLC-RF portable phasor measurement unit for deep tunnels. *Sensors (Switzerland)*, 20(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20030790>

Teixeira, L., Loose, F., Brum, J. P., Barriquello, C. H., Reguera, V. A., & Costa, M. A. D.

---

(2019). On the LED Illumination and Communication Design Space for Visible Light Communication. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 3264–3273. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2900209>

Vera Guevara, D. G. (2017). *Análisis Comparativo de la Tecnología Lifi: Comunicaciones por luz Visible con otras Tecnologías de Comunicación*. 93(I), 259. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/16963/1/UG-FCMF-B-CINT-PTG-N.139.pdf>

Yu, T. C., Huang, W. T., Lee, W. Bin, Chow, C. W., Chang, S. W., & Kuo, H. C. (2021). Visible light communication system technology review: Devices, architectures, and applications. *Crystals*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/cryst11091098>

Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/pr7010036>

Zhang, J., Hasandka, A., Wei, J., Shafiul Alam, S. M., Elgindy, T., Florita, A. R., & Hodge, B. M. (2018). Hybrid communication architectures for distributed smart grid applications. *Energies*, 11(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en11040871>

Zhou, X., & Wang, S. (2019). Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review. *Drying Technology*, 37(3), 271–286. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>

---