










Arquitecturas ópticas compresivas para la adquisición de datos: caso transmisivo y reflectivo

Compressive optical architectures for data acquisition: transmissive and reflective cases

Maytee Zambrano^{1,2}, Naneth Solís¹, Katherine Galvez¹, Ameth Valdespino¹, Diego Bouche¹, Fernando Arias^{1,2}, Edson Galagarza¹

¹Grupo de Investigación en Tecnologías Avanzadas de Telecomunicación y Procesamiento de Señales (GITTS), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, ²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT-AIP), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

*Autor de correspondencia: maytee.zambrano@utp.ac.pa

RESUMEN. El crecimiento de la óptica y la electrónica, junto con algoritmos de aprendizaje más robustos, ha impulsado la implementación del sensado compresivo en arquitecturas más económicas para la adquisición de datos, como las arquitecturas de un solo píxel. Al aprovechar estos avances, se presenta una solución novedosa aplicable a múltiples sectores. Un ejemplo de esto son los sensores hiperespectrales compactos, los cuales poseen baja adopción en la industria e investigación, por sus altos costos. Este trabajo se presenta como un tutorial práctico y teórico sobre el diseño e implementación de arquitecturas de un solo píxel hiperespectrales con sensado compresivo. Se detalla la teoría fundamental y se guía el proceso de construcción de dos sistemas: uno basado en un modulador reflectivo y otro en uno transmisivo. Se explica paso a paso cómo integrar estos elementos para adquirir datos hiperespectrales y realizar la reconstrucción de imágenes. Se evaluó la eficiencia de ambos montajes, obteniendo valores de Error Medio Absoluto (Mean Absolute Error MAE) menores a 0.15 al compararse con una cámara hiperespectral comercial, demostrando un nivel de precisión promedio aceptable; un valor SAM (Mapeador del Ángulo Espectral) menor a 0.3, métricas consideradas apropiadas para aplicaciones prácticas en distintos contextos, como el análisis de alimentos, materiales o estructuras. Se confirma que, siguiendo los lineamientos de diseño óptico y las herramientas de sensado compresivo expuestas en este trabajo, es factible desarrollar sensores hiperespectrales funcionales de bajo costo y alta accesibilidad.

Palabras clave. *Arquitectura de un solo píxel, detector hiperespectral, modulador de luz, reconstrucción de imágenes, sensado compresivo, diseño de trayectoria óptica*

ABSTRACT. The growth of optics and electronics, together with more robust learning algorithms, has driven the implementation of compressive sensing in more economical architectures for data acquisition, such as single-pixel architectures. Taking advantage of these advances, a novel solution applicable to multiple sectors is presented. An example of this is compact hyperspectral sensors, which have low adoption in industry and research due to their high costs. This work is presented as a practical and theoretical tutorial on the design and implementation of single-pixel hyperspectral architectures with compressive sensing. The fundamental theory is detailed, and guidance is provided on the process of constructing two systems: one based on a reflective modulator and the other on a transmissive modulator. Step-by-step instructions are provided on how to integrate these elements to acquire hyperspectral data and reconstruct images. The efficiency of both assemblies was evaluated, obtaining Mean Absolute Error (MAE) values of less than 0.15 when compared to a commercial hyperspectral camera, demonstrating an acceptable average level of accuracy; a Spectral Angle Mapper (SAM) value of less than 0.3, metrics considered appropriate for practical applications in different contexts, such as the analysis of food, materials, or structures. It is confirmed that, following the optical design guidelines and compressive sensing tools presented in this work, it is feasible to develop functional hyperspectral sensors that are low cost and highly accessible.

Keywords. *Single-pixel architecture, hyperspectral detector, light modulator, image reconstruction, compressive sensing, design of optical path*

Citación: M. Zambrano, N. Solís, K. Galvez, A. Valdespino, D. Bouche, F. Arias, E. Galagarza, "Arquitecturas ópticas compresivas para la adquisición de datos: caso transmisivo y reflectivo", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 22, no. 1, pp. (0), 2026.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 17 de enero de 2026. **Recibido con correcciones:** 31 de marzo de 2026. **Aceptado:** 31 de marzo de 2026.

DOI.

Copyright: 2026 M. Zambrano, N. Solís, K. Galvez, A. Valdespino, D. Bouche, F. Arias, E. Galagarza. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

A nivel mundial, la complejidad inherente al diseño e implementación de arquitecturas ópticas capaces de adquirir simultáneamente información espacial y espectral [1] constituye una barrera técnica significativa para la obtención eficiente de datos. Los desafíos asociados a la configuración de estos sistemas de instrumentación dificultan la aplicación práctica de algoritmos de procesamiento avanzado. En el contexto de Panamá, esta barrera tecnológica en la adquisición de datos multidimensionales ha restringido el desarrollo de investigaciones de alto nivel, limitando la innovación en sectores estratégicos como el análisis y la calidad de alimentos [2] [3], la biotecnología [4] [5], la agricultura de precisión [6] [7], el monitoreo ambiental de la contaminación en ríos [8], o la visión artificial para la identificación de medicamentos [9].

Las cámaras digitales convencionales basadas en sensores CCD y CMOS se fabrican en silicio, un semiconductor que convierte fotones en electrones en el rango visible del espectro electromagnético, permitiendo la formación de imágenes [10]. Sin embargo, captar información en longitudes de onda fuera del rango visible requiere el uso de semiconductores avanzados de mayor costo y complejidad [11], como ocurre en las cámaras hiperespectrales, en las que cada píxel se asocia a valores de radiación en bandas espectrales estrechas. Las imágenes hiperespectrales se diferencian de las multiespectrales, monocromáticas y RGB, porque registran un mayor número de bandas espectrales por cada píxel espacial, alcanzado una resolución espectral mayor [12]. La figura 1, muestra un ejemplo comparativo del número de bandas espectrales que posee cada tipo de imagen.

La evolución tecnológica ha permitido superar las limitaciones de costos y resolución espectral de los equipos comerciales. Se han desarrollado diversas técnicas ópticas y métodos matemáticos que permiten emplear equipos ópticos menos costosos, implicando mayor complejidad computacional. Las arquitecturas de un solo píxel permiten construir sistemas ópticos versátiles y eficientes, adaptados a requerimientos específicos. Consolidándose como una alternativa moderna gracias a la integración de actualizados recursos ópticos, electrónicos y robustos algoritmos, capaz de registrar datos hiperespectrales.

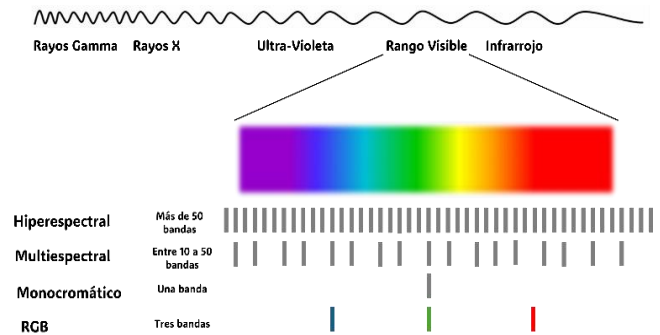


Figura 1. Representación del espectro electromagnético

Al integrar métodos como el sensado compresivo, estos sistemas utilizan un único detector para registrar secuencialmente proyecciones de la escena, a diferencia de las cámaras convencionales [13] [14]. La imagenología de un solo píxel plantea ser una metodología competitiva para posicionar sus sistemas dentro del conjunto de sensores de visión empleados en tecnologías autónomas no tripuladas, que emplean equipos como: LiDAR, radar y cámaras térmicas. Representando una plataforma útil para aplicaciones en visión artificial, ya que pueden operar a diferentes longitudes de onda y bajo condiciones adversas de iluminación, así como en presencia de niebla o lluvia [15].

Este trabajo se presenta como un tutorial técnico acelerado para la implementación de arquitecturas de un solo píxel capaces de reconstruir imágenes hiperespectrales. Se detallan dos metodologías experimentales: una configuración de tipo reflectiva y otra transmisiva. El aporte principal radica en ofrecer una guía práctica para la puesta en marcha de ambos métodos, analizando comparativamente las ventajas y desventajas inherentes a cada arquitectura.

2. Metodología

El presente trabajo establece un marco teórico sobre los principios fundamentales de la imagenología de un solo píxel y su aplicación en la reconstrucción de imágenes mediante métodos compresivos. Se describen las arquitecturas ópticas que habilitan esta técnica, los métodos para la adquisición de imágenes hiperespectrales y los componentes requeridos tanto para sistemas reflectivos como transmisivos. Posteriormente, en la sección de análisis y resultados, se presentan los resultados experimentales obtenidos bajo ambas configuraciones. Por último, se exponen las conclusiones

derivadas del estudio, discutiendo la validación de los experimentos y los desafíos técnicos identificados.

3. Marco Teórico

En esta sección se presenta la base teórica que explica el funcionamiento de las arquitecturas de un solo píxel. Se incluye en la explicación técnica de imagen computacional, se describen los principales elementos ópticos encontrados en estos sistemas e importantes aspectos de diseño para ambos enfoques de arquitecturas de un solo píxel desarrollados.

3.1. Principio de la imagenología con un solo píxel.

Una cámara de un solo píxel, a diferencia de las cámaras convencionales de arreglo matricial, forman imágenes sin necesidad de un sensor compuesto por millones de detectores individuales. Su funcionamiento se basa en la modulación espacial de la luz proveniente de la escena mediante un modulador espacial de luz (SLM por sus siglas en inglés). La explicación matemática de estos sistemas se explica a continuación. Las intensidades I que provienen de la escena, donde se ubica el objeto, se modulan con una máscara P_i proyectada sobre el SLM, donde $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN}]$ es un arreglo unidimensional. El conjunto de máscaras necesario para muestrear el objeto es igual al número N de píxeles que posee la imagen. Cuando se completan las M mediciones, el proceso se escribe como un sistema lineal:

$$S = P \times I$$

Donde $S = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$ es un arreglo unidimensional de M valores de medición recolectadas secuencialmente por el detector de un solo píxel, $P = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T$ es una matriz de medición de tamaño $M \times N$. Para reconstruir la imagen de la escena es necesario conocer los N valores incógnitos, utilizando el conjunto de M ecuaciones lineales. Considerando siempre que $M = N$ y que las máscaras P son ortogonales. Satisfaciendo esas dos condiciones, la imagen se recupera mediante:

$$I = P^{-1} \times S$$

Aprovechar la redundancia presente en las escenas, que se describen eficientemente mediante bases ortogonales reduce el número de mediciones necesarias para la reconstrucción de las imágenes [16]. De acuerdo con estas condiciones, la reconstrucción de la imagen se logra mediante algoritmos matemáticos de sensado compresivo como el *L₁ Magic*, *NESTA* o *Tval3* [17], los cuales procesan estas medidas junto con el conocimiento

previo de los patrones aplicados. El sensado compresivo ha demostrado ser especialmente útil, ya que permite recuperar imágenes de alta resolución a partir de un número reducido de proyecciones, lo cual reduce el tiempo de adquisición y el volumen de datos necesario [18]. Si bien los algoritmos de optimización iterativa, tales como TVAL3, constituyen las técnicas convencionales para la reconstrucción de imágenes, actualmente es posible abordar este problema mediante métodos no convencionales basados en inteligencia artificial y redes neuronales profundas, los cuales disminuyen el tiempo de reconstrucción y aumentan la calidad de la imagen [19].

Las arquitecturas de un solo píxel están compuestas principalmente por una fuente de iluminación, un SLM, un fotodetector y diversos elementos ópticos auxiliares, como lentes, divisores de haz, objetivos microscópicos y diafragmas. La combinación y configuración de estos componentes determinan la resolución espacial y espectral del sistema. En el caso de las arquitecturas hiperespectrales de un solo píxel, se emplean fuentes de iluminación policromáticas, SLMs con rangos espectrales que pueden abarcar desde el visible hasta el infrarrojo cercano o incluso la región de terahercios, y detectores espectrales, como espectrómetros, capaces de registrar amplios rangos de longitud de onda. El componente crítico para la codificación de la escena es el SLM, el cual existe en diversas tecnologías siendo las más comunes los dispositivos de cristal líquido (LCD/LCoS) y los dispositivos digitales de microespejos (DMD). El DMD es un modulador de tipo reflectivo compuesto por una matriz de microespejos que rotan para crear máscaras binarias (estados de encendido y apagado), aunque permite la generación de escalas de grises mediante una programación rigurosa. Este dispositivo destaca por su velocidad de modulación superior a los 20 kHz y su amplio rango espectral en un área activa reducida. presentando como principal desventaja la necesidad de una tarjeta de control externa [20] [21]. En contraste, el SLM de tipo LCD transmisor (TNLC-SLM) basa su funcionamiento en una película de cristal líquido nemático en torsión encapsulada entre sustratos de vidrio, lo que le otorga propiedades de anisotropía óptica y obliga al uso de polarizadores en la entrada y salida para gestionar la refracción de la luz [22] [23] [24]. Aunque sus tasas de modulación son significativamente inferiores a las del DMD [21]. El LCD ofrece áreas activas de mayor tamaño y tiene la capacidad nativa de modular amplitud, fase y polarización, generando niveles de grises mediante la orientación

variable de sus moléculas entre 0° y 90° [25] [26] [27] [28] [29].



Figura 2. Arquitectura de detección estructurada

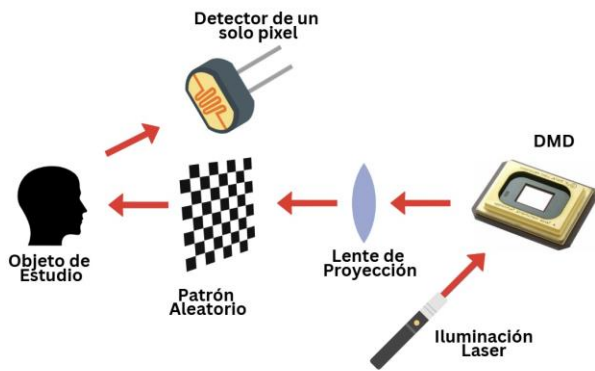


Figura 3. Arquitectura de iluminación estructurada.

Los componentes mencionados anteriormente se distribuyen en arreglos ópticos específicos llamados técnicas de imagen computacional. Las dos técnicas de imagen computacional más comunes utilizadas para sensado con un solo píxel son la detección e iluminación estructuradas. En la detección estructurada, figura 2, la luz reflejada por el objeto se proyecta sobre un dispositivo de microespejos digitales, el cual despliega una secuencia de patrones binarios predefinidos. Estos patrones actúan como máscaras espaciales que filtran selectivamente la luz proveniente del objeto. Para cada patrón de enmascaramiento, un único fotodiodo mide la intensidad total de la luz que lo atraviesa (G. M. Gibson, S. D. Johnson, M. J. Padgett, 28190). Finalmente, la imagen del objeto se reconstruye computacionalmente a partir de la serie de mediciones de intensidad registradas. En la configuración de iluminación estructurada, figura 3, la modulación espacial de la luz se realiza antes de la interacción con el objeto. En este caso, el dispositivo de microespejos digitales se utiliza para proyectar una secuencia de patrones de luz directamente sobre la superficie del objeto. Un fotodiodo único mide la intensidad

total de la luz retrodispersada por el objeto para cada patrón proyectado. De forma análoga al método anterior, la secuencia de mediciones de intensidad correlacionadas con cada patrón de iluminación permite reconstruir una imagen del objeto (Jiang, et al., 2019).

3.2. Cálculos y modelos para trayectoria de la luz

La complejidad de los sistemas ópticos para el sensado de un solo píxel exige un riguroso modelado matemático que permita predecir su comportamiento y optimizar su diseño y rendimiento. Para ello, se han desarrollado diversos métodos que buscan describir la trayectoria de la luz a través de diferentes configuraciones ópticas. Entre los enfoques más utilizados destacan la óptica de Fourier [30], aplicada al análisis de propagación y difracción de ondas, y el trazado de rayos, que ofrece una visión geométrica del recorrido de la luz [31]. En particular, el trazado de rayos en dos dimensiones es una herramienta de gran utilidad para comprender el comportamiento de elementos ópticos como lentes y espejos. Se fundamenta en principios sencillos de la óptica geométrica, especialmente en la ley de Snell, la cual describe cómo se refracta un rayo al pasar entre medios con diferente índice de refracción. Gracias a esta aproximación, es posible representar de manera clara la magnificación de los planos de imagen, cómo se desvían los rayos en los sistemas de lentes y cómo se producen fenómenos de enfoque y aberración [32] [33]. Este método, aunque simplificado respecto a modelos matemáticos basados en óptica de Fourier, permite realizar un análisis ideal basado en las necesidades del tren óptico, en este caso, las propiedades de un sistema óptico para imagenología de un solo píxel.

3.3. Arquitectura óptica de un solo píxel reflectiva hiperespectral

Se implementó un sistema de detección estructurada conformado por una fuente de luz de tungsteno-halógeno, un modulador espacial de tipo microespejos digitales y un espectrómetro como fotodetector. Esta configuración permite proyectar el objeto sobre los patrones binarios aleatorios generados en el DMD, modulando espacialmente la intensidad de la luz, que posteriormente es reflejada, colectada y medida espectralmente.

La función combinada del SLM y el detector de un solo píxel reemplaza la del sensor CCD convencional, eliminando la necesidad de emplear una cámara de matriz de píxeles. Al introducir algoritmos de sensado

compresivo, es posible reducir significativamente el número de mediciones requeridas durante la fase de muestreo, lo cual conlleva no solo una disminución del tiempo de adquisición sino también un menor costo computacional durante la etapa de reconstrucción. Desde los inicios de esta tecnología, las líneas de investigación han estado orientadas a mejorar tanto la velocidad de captura como los tiempos de reconstrucción, además de reducir métricas de error y el tamaño físico de los sistemas. El diseño óptico requiere que la formación de la imagen ocurra dentro del área activa del DMD. Esto incluye los cálculos matemáticos del trazado de rayos, así como simulaciones numéricas. Siendo muy útil cuando se trabaja con SLMs que presentan áreas activas demasiado pequeñas.

Las métricas de error calculadas para esta implementación establecen una comparación directa entre los resultados obtenidos con el prototipo de un solo píxel desarrollado y los proporcionados por un equipo comercial compacto de referencia. Se empleó una cámara hiperespectral compacta comercial, con un rango espectral de 400 nm a 1100 nm y modo de operación instantáneo. Esta cámara permitió obtener la firma espectral de referencia del objeto bajo análisis, lo cual hizo posible evaluar la robustez y precisión del prototipo reflectivo en la reconstrucción de espectros.

El uso del espectrómetro como detector otorga una ventaja adicional, ya que su rango espectral de operación es de 194 nm a 1018 nm, proporciona una resolución superior a la de la cámara comercial y convierte la arquitectura de un solo píxel en un prototipo de adquisición de datos hiperespectrales. Sin embargo, es importante tener en cuenta el rango espectral de funcionamiento del SLM, el DMD presenta un rango de eficiencia óptica limitado al espectro visible, entre los 400 nm a 700 nm.

El DMD, mostrado en la figura 4, se compone de 1024×768 microespejos capaces de rotar de $\pm 12^\circ$ respecto a la posición central. El dispositivo debe orientarse a un ángulo de 45° , respecto al eje de propagación incidente, para seguir la trayectoria de los rayos. La formación de la imagen del objeto se realiza sobre el área activa del DMD mediante los cálculos de óptica geométrica, que consideran las dimensiones físicas tanto del modulador como del lente de entrada.

El área activa del DMD, presenta un ancho de 14.008 mm y una altura de 10.5062 mm, lo que determina una relación aproximada de 1.333. El tamaño del objeto debe

limitarse según la lente de entrada del sistema óptico. Se obtiene que, colocando el objeto a una distancia superior al doble de la focal de la lente de entrada y el DMD después de la distancia focal, logramos una imagen que se ajusta al área activa disponible.



Figura 4. Modulador de luz V-7001 del proveedor Vialux

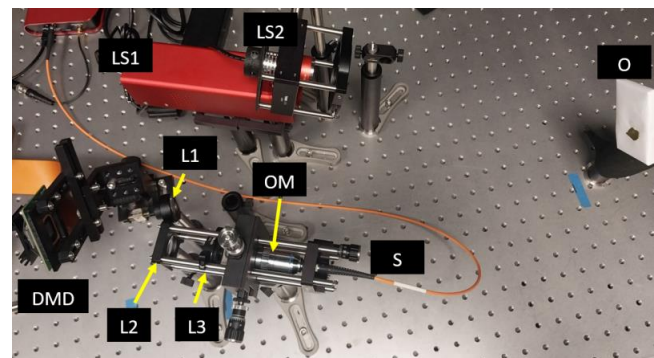


Figura 5. Camino óptico de sistema reflectivo, en donde "LS1" es la fuente de luz de tungsteno, "LS2" es una fuente de luz LED, "O" es el objeto de estudio, "L1", "L2" y "L3" son lentes de laboratorio, "DMD" es el modulador de luz reflectivo, "OM" es el objetivo de microscopio y "S" es la fibra óptica.

El recorrido de la luz en el sistema óptico construido (figura 5) es el siguiente: la fuente de tungsteno-halógeno ilumina el objeto en conjunto con una fuente de luz tipo LED, la luz se refleja sobre el objeto y atraviesa el primer lente, formando la imagen en el plano del DMD. El SLM refleja la luz modulada por los patrones binarios aleatorios que son dirigidos a $+12^\circ$ hacia un tren óptico encargado de concentrar la señal en el núcleo de una fibra óptica. Finalmente, la luz guiada por la fibra es conducida hasta el espectrómetro, donde se hace la medición.

La sincronización entre la proyección de patrones en el DMD y el registro de las intensidades en el espectrómetro se efectuó a través de un sistema de adquisición de datos

(DAQ), este debe asegurar que por cada patrón binario aleatorio se almacene una medición espectral asociada.

Este sistema hiperespectral de un solo píxel, al emplear una fuente de luz modelada como un cuerpo negro con un rango espectral de salida de 360 nm a 2600 nm, se clasifica como un sistema incoherente. Se trata de una fuente policromática espacial y temporalmente incoherente, lo que genera múltiples respuestas al impulso que varían de manera no correlacionada.

3.4. Arquitectura óptica de un solo píxel hiperespectral transmisiva

Se utiliza un TNLC-SLM en configuración de modulación en amplitud, mostrado en la figura 6. Este debe colocarse entre dos polarizadores lineales que permitan la transmisión de la luz. El modulador programable empleado, que se muestra en la figura 6, dispone de un área activa de $36.9 \text{ mm} \times 27.6 \text{ mm}$ y una resolución de 1024×768 píxeles. Posee la misma resolución que el DMD, aunque con la diferencia de que el paso de píxel en el modulador de cristal líquido es mayor. El factor de relleno, que determina la proporción del área de cada celda de cristal líquido efectiva en la modulación de la luz, junto con la transmitancia, son dos parámetros fundamentales que influyen en los resultados de la modulación por parte del TNLC-SLM. Este modelo de SLM de cristal líquido, posee un factor de relleno de 58% y una transmitancia de aproximadamente de 28%. Además, que es un SLM completamente compacto sin tarjeta de control externa.

El sistema transmisivo de un solo píxel hiperespectral desarrollado está compuesto por una fuente halógena que ilumina el objeto, la luz reflejada se dirige hacia una apertura circular que delimita los rayos, posteriormente, atraviesa un primer lente positivo, el primer polarizador y el TNLC-SLM, donde es modulada por los patrones desplegados. Luego, la luz modulada pasa a través del polarizador de salida o analizador, atraviesa un segundo lente positivo y se dirige hacia un difusor de vidrio esmerilado. Finalmente, la luz pasa por un lente esférico condensador y es acoplada a una fibra óptica que la guía hasta el espectrómetro. Para la sincronización del prototipo se utilizó una FPGA, y mediante comunicación UART, se estableció el enlace entre la LCD y el espectrómetro para lograr obtener una medición por cada patrón formado en el modulador.



Figura 6. Modulador de luz LC2012 del proveedor Holoeye.

4. Análisis y resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la implementación de ambas arquitecturas, reflectiva y transmisiva. Para extraer el espectro y/o imagen respectiva del objeto usado como muestra se utilizan algoritmos de optimización. Cabe señalar que existen diversos algoritmos para llevar a cabo este proceso, e incluso se han registrado avances significativos en el uso de redes neuronales y técnicas de aprendizaje profundo. La selección del algoritmo dependerá de la aplicación específica y de los requerimientos asociados a la extracción de la señal, ya sea para minimizar las latencias o para alcanzar una mayor resolución espacial y espectral [34].

4.1. Prototipo reflectivo

El objeto seleccionado para probar el sistema reflectivo fue una hoja de árbol. Para analizar su espectro, la hoja debe extraerse y normalizarse con un blanco de referencia profesional. El proceso requiere la elaboración de máscaras que permitan determinar las regiones de estudio de la imagen reconstruida. Es necesario primero realizar la reconstrucción espacial de la imagen, para luego obtener la firma espectral de interés. El detector utilizado tiene una resolución espectral bastante alta, mejorando la fidelidad de la reconstrucción espectral. Estas firmas espectrales deben compararse con una referencia validada. Por esta razón se hace uso de la cámara hiperespectral de fábrica, que es capaz de generar una foto del objeto y brindar la información espectral a nivel de píxeles. Este procedimiento es análogo al de la imagen reconstruida por el prototipo desarrollado, con la diferencia de que la cámara comercial no emplea algoritmos de Sensado Compresivo ni opera a distintas tasas de muestreo, como el aplicado en nuestra implementación mediante el algoritmo TVAL3. En consecuencia, tenemos resultados en materia de resolución espacial con la aplicación de la Teoría del

Sensado Compresivo y en la resolución espectral utilizando un espectrómetro.

La comparación de espectros entre la arquitectura construida y la comercial debe considerar que la primera ofrece 2656 bandas espectrales, mientras que la segunda cuenta tan solo con 122 bandas, lo que representa una diferencia del 76%. Esto demuestra la fidelidad del espectro extraído de la hoja mediante la arquitectura probada en la mesa óptica, dando a futuro la posibilidad de mejorar la resolución espectral de los sensores comerciales mediante este tipo de arquitecturas. El análisis de comparación de espectros solo utilizó 122 bandas de las 2656 bandas totales disponibles para hacer una comparación con la cámara hiperespectral comercial BaySpec GoldenEye. Esta comparativa fue aplicada para cada una de las tasas porcentuales de muestreo.

Tabla 1. Resultado de las Métricas de Error de la comparación del espectro normalizado de la hoja madura extraído de la arquitectura propuesta y de la cámara comercial.

Métricas de Error				
Porcentaje de muestras	MAE	RMSE	R ²	SAM
10%	0.107941	0.15543	0.75711	0.23434
20%	0.125892	0.17436	0.69432	0.23564
30%	0.107113	0.15420	0.76094	0.23167
40%	0.109577	0.15484	0.75894	0.23902
50%	0.110044	0.15853	0.74731	0.23463
60%	0.108880	0.15702	0.75212	0.23606
70%	0.111548	0.15976	0.74338	0.23602
80%	0.112540	0.15943	0.74444	0.23723
90%	0.112507	0.15902	0.74575	0.23818
100%	0.111180	0.15745	0.75073	0.23418

Para evaluar la robustez del prototipo de un solo píxel, se calcularon distintas métricas de error, entre ellas: error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático (RMSE), coeficiente de determinación (R²), mapa de ángulo espectral (SAM). Dichas métricas de error se estimaron para diferentes porcentajes de muestreo para una imagen de 64 por 64 píxeles de la hoja, tomando como referencia espectral el registro proporcionado por la cámara compacta comercial. Cabe señalar que la resolución espacial de la cámara comercial es superior a la del prototipo. No obstante, estas métricas de error solo contemplan la comparativa espectral.

Los resultados obtenidos para esta evaluación espectral se presentan en la tabla 1. Se observa que los mejores valores para las métricas de error se alcanzan con tasas del 10 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %. Sin embargo, la figura 7 muestra las respectivas reconstrucciones espaciales, en las que se evidencia un deterioro de la

calidad de imagen cuando la tasa de muestreo es inferior al 50 %. Dado que esto puede afectar negativamente la interpretación de los resultados, el análisis se centra en las tasas superiores al 50 %. Para la configuración propuesta y su correspondiente relación señal-ruido, una tasa de muestreo del 60 % permite alcanzar la máxima fidelidad espectral.

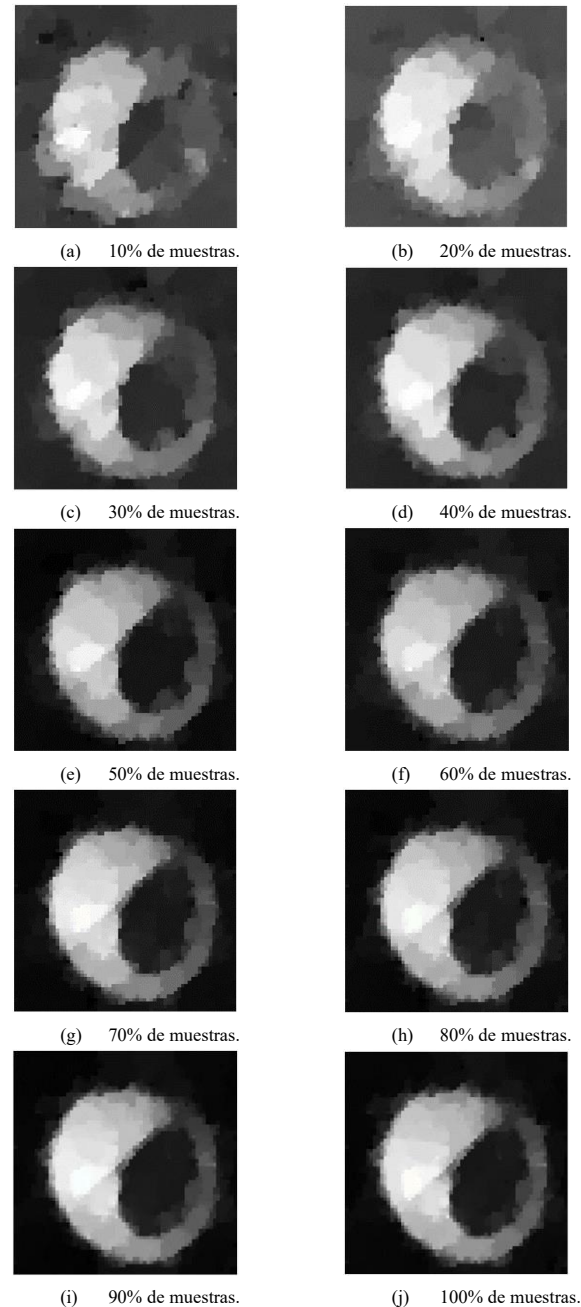


Figura 7. Reconstrucción espacial del objeto con el Prototipo Reflectivo (DMD) mediante algoritmo TVAL3.

4.2. Prototipo Transmisivo

El sistema de un solo píxel con modulador espacial de luz de cristal líquido recolectó muestras para una hoja con una resolución espacial de 32 x 32 píxeles. La resolución espacial estuvo limitada por la memoria del sistema de control del SLM. Este sistema registró intensidades muy bajas. Debido a que gran parte de los elementos ópticos utilizados atenuaron la luz propagada, principalmente, los componentes como el polarizador de entrada, LCD, polarizador de salida y el difusor. Esto fue una de las principales limitantes del prototipo, factor que impacta directamente la fidelidad de la reconstrucción espectral. Este sistema transmisivo pone a prueba el concepto de un solo píxel y señales esparzas. Desde el punto de resolución espacial cumplió con la reconstrucción de la imagen, a pesar de registrar baja iluminación. En las figuras 8 y la 9 se muestran el diseño físico del prototipo desarrollado. Es un sistema simple de menor tamaño comparado al sistema reflectivo propuesto y emplea menor cantidad de lentes, un aspecto determinante en términos de aberración cromática.

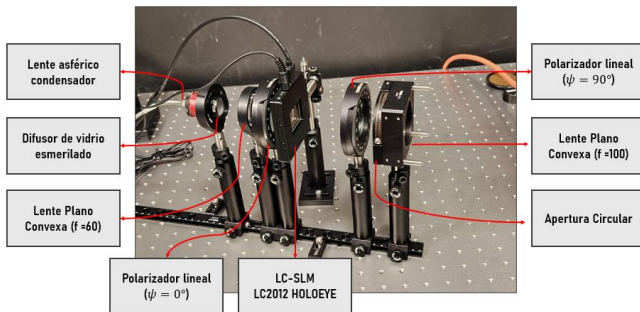


Figura 8. Elementos empleados en la Arquitectura de un Solo Píxel Transmisivo (LCD).



Figura 9. Arquitectura de un Solo Píxel Transmisiva (LCD) con su sistema de iluminación.

Tabla 2. Resultado de las Métricas de Error de la comparación del espectro normalizado de la hoja madura extraído de la arquitectura transmisiva propuesta y de la cámara comercial.

Métricas de Error				
Porcentaje de muestras	MAE	RMSE	R ²	SAM
10%	0.106339	0.14378	0.4716	0.4034
20%	0.099992	0.13727	0.5690	0.3837
30%	0.101071	0.13924	0.5716	0.3906
40%	0.097801	0.13850	0.6102	0.3873
50%	0.099985	0.14151	0.6205	0.3954
60%	0.106549	0.15009	0.6057	0.4182
70%	0.109021	0.15320	0.5900	0.4277
80%	0.108517	0.15229	0.5811	0.4270
90%	0.108139	0.15192	0.5969	0.4242
100%	0.106593	0.15066	0.5993	0.4214

Para el análisis espectral y la reconstrucción espacial se realiza un proceso análogo al del sistema reflectivo. Obtenido el espectro de interés normalizado, se procede a calcular las métricas de error, mostradas en la tabla 2. Además, en la figura 10 se observa la reconstrucción espacial. De forma similar al sistema reflectivo, un porcentaje de muestras del 60% demuestra las mejores métricas para la configuración propuesta, su respectiva razón señal-ruido y una buena calidad de reconstrucción espacial.

Existen modelos generalizados aplicados a la caracterización de las celdas de cristales líquidos. Son muchos los parámetros físicos presentes en este tipo de moduladores que son omitidos por el fabricante en el manual. Es por esto por lo que se han establecido modelos generales que explican el comportamiento físico. En muchas simulaciones se logra ver cómo, para cada longitud de onda, se establece un valor de transmitancia diferente. Es sumamente importante caracterizar este tipo de SLM, justamente, para aplicaciones hiperspectrales. En nuestra arquitectura, el prototipo cuenta con un espectrómetro, el cual recopila data espectral. El comportamiento del TNLC-SLM no es lineal y produce una modulación en amplitud establecida por el diseño óptico físico, pero es inherente el hecho que, al existir un reordenamiento de las moléculas, se produzca cierta modulación en fase que también varía para cada longitud de onda. El ancho de banda del modulador utilizado abarca desde 400 nm hasta 800 nm, menor al del detector. En la figura 10 se observa el área activa de la LCD cuando muestra un patrón binario aleatorio y la proyección de la hoja madura. Este modulador entre cada paso de píxel tiene una zona muerta de tamaño micrométrico que no logra ser captado

en la figura 11. El factor de relleno es de 58%, dejando una zona del 42 % inactiva durante la modulación. En general, el TNLC-SLM tiene una transmitancia variable para cada longitud de onda, un factor de relleno bajo y una zona muerta micrométrica que se suma a esa zona, un ancho de banda inferior al del fotodetector y durante el despliegue de las máscaras binarias el cristal líquido no se comporta lo suficientemente ideal para generar un píxel blanco que transmita el 100% de la luz incidente o un píxel negro que bloquee el 100% de la luz.

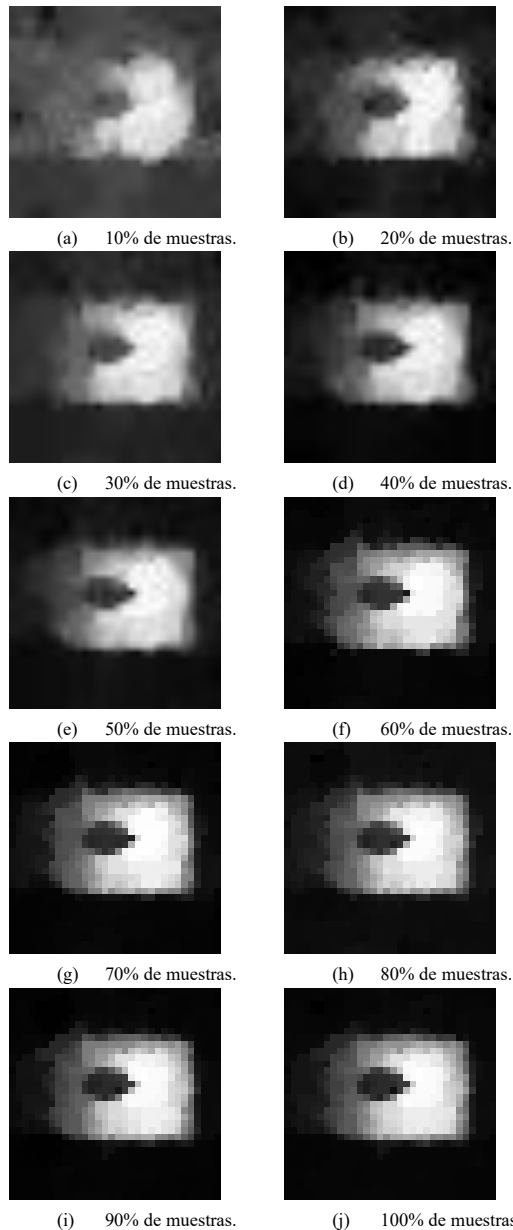


Figura 10. Reconstrucción espacial del objeto con el Prototipo Transmisivo (LCD).

Todos estos aspectos antes mencionados influyeron directamente en la data recolectada, al ser un sistema de tipo transmisivo y tener elementos como los polarizadores y el difusor, las pérdidas fueron lo suficientemente altas. Sin embargo, quedó comprobado que el detector de un solo píxel cuenta con una alta eficiencia cuántica para registrar cada medición y se corrobora una de las principales ventajas de los sistemas de un solo píxel que es la toma de muestras en entornos de baja iluminación.



Figura 11. Área activa del LC-SLM.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en los modelos transmisivo y reflectivo del camino óptico, implementados mediante arquitecturas de un solo píxel, muestran dos opciones de diseño de una etapa óptica capaz de adquirir imágenes y/o datos hiperespectrales. Los datos obtenidos mediante un sistema de un solo píxel permiten la reconstrucción de imágenes ya sea a través de algoritmos de optimización para señales esparzas o algoritmos más complejos de aprendizaje. La comparación de los datos registrados con los provenientes de una cámara hiperespectral comercial muestra una similitud suficiente para aplicaciones en rangos específicos del espectro, lo cual valida el uso de esta aproximación en distintos escenarios prácticos.

El diseño de este tipo de arquitecturas presenta retos importantes en su diseño, como pueden ser la sincronización entre el modulador y el detector, la correcta elección de los componentes ópticos en función de los anchos de banda que estos permitan, la correcta iluminación con fuentes de luz uniformes en gran parte del espectro que maneja el sistema y la elección de un

algoritmo de reconstrucción que se acople a las aplicaciones. Además de esto, la elección del modulador de luz es decisiva, ya que varía casi en su totalidad el camino óptico necesario para realizar reconstrucción de imágenes con un solo píxel y tiene variaciones considerables en la intensidad recibida y la calidad de la imagen reconstruida.

La incorporación de elementos ópticos más accesibles y adaptados a necesidades industriales específicas podría optimizar estas arquitecturas. Sin embargo, se identifican limitaciones significativas relacionadas con el tiempo de procesamiento y los recursos computacionales requeridos para la reconstrucción de imágenes. Además, la reducción del tamaño del camino óptico con el propósito de fabricar cámaras compactas incrementa de manera considerable la complejidad en el diseño de los componentes ópticos y en la construcción de un sensor/cámara compacta.

Como trabajo a futuro, se propone un proceso de miniaturización orientado al desarrollo de un prototipo de cámara hiperespectral compacta que integre las arquitecturas estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado bajo soporte de SENACYT a través de: financiamiento de los proyectos FID18-096 y FID23-158; del Sistema Nacional de investigación SNI del Dr. Fernando Arias y la Dra Zambrano; y Ameth Valdespino es becario del Programa Becas de licenciatura en áreas de ingeniería y ciencias básicas para formar capacidades en semiconductores – 2024.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

M.Z.: conceptualización, adquisición de fondos, supervisión, revisión y supervisión.

N.S.: experimentación de plataforma óptica Reflectiva, análisis formal.

K.G.: experimentación de plataforma óptica Transmisiva, análisis formal y escritura.

A.V.: validación de plataforma óptica reflectiva, validación y escritura.

D.B.: ensamblaje electrónico de control del modulador óptico, apoyo en la experimentación.

F. A.: adquisición de fondos, supervisión, reportes y supervisión de labores de reconstrucción.

E. G.: Diseño Óptico y experimentación

Todos los autores afirmamos que hemos leído y aprobado la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] M. Stuart, L. Stanger, M. Hobbs, T. Pering, D. Thio, A. McGonigle e J. Willmott, “Low-cost hyperspectral imaging system: Design and testing for laboratory-based environmental applications,” *Sensors*, vol. 20, n° 11, p. 3293, 2020.
- [2] D. Ayala Martini, “Automatización del análisis de imágenes hiperespectrales para identificación de aptitud de patatas,” 2018.
- [3] H. Huang, L. Liu e M. Ngadi, “Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety,” *Sensors*, vol. 14, n° 4, pp. 7248-7276, 2014.
- [4] G. Johnsen, F. Sigernes e Z. Volent, “Microscopic hyperspectral imaging used as a biooptical taxonomic tool for micro- and macroalgae,” *Applied Optics*, vol. 48, n° 21, pp. 4170-4176, 2009.
- [5] E. Gomez-Gonzalez e et al., “Hyperspectral image processing for the identification and quantification of lentiviral particles in fluid samples,” *Scientific Reports*, vol. 11, p. 16201, 2021.
- [6] R. J. Piedra Camacho, “Aproximación inicial a la comparación de cámaras hiperespectrales para su aplicación en agricultura,” *Revista Tecnología En Marcha*, vol. 33, n° 6, pp. 82-91, 2020.
- [7] B. Lu, P. Dao, L. J. D., Y. He e J. Shang, “Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture,” *Remote Sensing*, vol. 12, n° 16, p. 2659, 2020.
- [8] N. Scott e I. Moore, “Nonnegative matrix factorization based feature selection analysis for hyperspectral imagery of sediment-laden riverine flow,” em *SPIE Defense + Security*, Orlando, 2018.
- [9] Y. Roggo, A. Edmond, P. Chalus e P. Ulmschneider, “Infrared hyperspectral imaging for qualitative analysis of

- pharmaceutical solid forms,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 535, nº 1-2, pp. 79-87, 2005.
- [10] A. Mehta, A. Patel e J. Mehta, “CCD or CMOS image sensor for photography,” em *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, 2015.
- [11] H. Hogan, “Nonvisible imaging expands resolution, range, applications,” *Photonic Spectra*, p. 76–79, 2021.
- [12] T. Adão, J. Hruška, L. Pádua, J. Bessa, E. Peres, R. Morais e J. J. Sousa, “Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry,” *Remote Sensing*, vol. 9, nº 11, pp. 2-30, 2017.
- [13] . G. M. Gibson, S. D. Johnson, M. J. Padgett, “Single-pixel imaging 12 years on: a review,” *Optics Express*, 28190.
- [14] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly e R. G. Baraniuk, Single-pixel imaging via compressive sampling, vol. 25, IEEE Signal processing Magazine, 2008, p. 83–91.
- [15] C. A. Osorio-Quero, D. Durini, J. Rangel-Magdaleno e J. Martinez-Carranza, “Single-pixel imaging: An overview of different methods to be used for 3D space reconstruction in harsh environments,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 92, nº 11, p. 111501, 2021.
- [16] E. Matthew P., G. Graham M. e P. Miles J., “Principles and prospects for single-pixel imaging,” *Nature Photonics*, vol. 13, nº 01, pp. 13-20, 2019.
- [17] Y. Sher, “Review of Algorithms for Compressive Sensing of Images,” arXiv, 2019.
- [18] M. Rani, “A systematic Review of Compressive Sensing: Concept, Implementations and Applications,” *IEEE Xplore*, 2018.
- [19] J. W. H. J. Xian-Hua Han, “Recent Advancements in Hyperspectral Image Reconstruction from a Compressive Measurement,” *Sensors*, p. 27, 2025.
- [20] Z. Guangcan, L. Zi Heng, Q. Yi e Z. Guangya, “Single-Pixel MEMS Imaging Systems,” *Micromachines*, vol. 11, nº 02, p. 219, 2020.
- [21] S. Ming-Jie e Z. Jia-Min, “Single-Pixel Imaging and Its Application in Three-Dimensional Reconstruction: A Brief Review,” *Sensors*, vol. 19, nº 03, p. 732, 2019.
- [22] Y. Yiqian e F. y. L. C. Andrew, “A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications,” *Opto-Electronic Science*, vol. 2, nº 8, 2023.
- [23] D. Bhargab, V. Sunil, J. Joby e P. S. y. K. Singh, “Transmission type twisted nematic liquid crystal display for three gray-level phase-modulated holographic data storage systems,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, nº 11, pp. 1150-1159, 2009.
- [24] B. Martin, S. Robert, K. Vojtěch e M. y. M. J. Michal, “Accurate polarization preparation and measurement using twisted nematic liquid crystals,” *Optics Express*, vol. 29, nº 21, pp. 33037-33052, 2021.
- [25] G. y. S. M. George W., “Liquid crystals for twisted nematic display devices,” *Journal of Materials Chemistry*, vol. 9, nº 9, pp. 2037-2050, 1999.
- [26] K. S.N., K. S.V. e B. M.A., “Spatial-Light-Modulator-Based Multichannel Data Transmission by Vortex Beams of Various Orders,” *Sensors*, vol. 21, nº 9, p. 2988, 2021.
- [27] Wolfgang, Osten, K. Christian, L. Jan, K. S, S. A e Z. y. H. G. A, “Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer based topography and interferometry,” *Journal of Electronic Imaging*, vol. 38, nº 3, pp. 373-382, 2005.
- [28] Z. Zibang, S. Zijian, D. Qiwen, Y. Jiaquan e P. y. J. Z. Junzheng, “Lensless single-pixel imaging by using LCD: application to small-size and multi-functional scanner,” *Optics Express*, vol. 27, nº 3, pp. 3731-3745, 2019.
- [29] H. Gang, J. Hong e M. y. P. W. Kim, “Lensless imaging by compressive sensing,” *2013 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2013 - Proceedings*, pp. 2101-2105, 2013.
- [30] S. Perrin e P. Montgomery, “Fourier optics: basic concepts,” arXiv, 2018.
- [31] L. S. Pedrotti, “Basic Geometrical Optics (Module 1.3),” SPIE / Fundamentals of Photonics, 2008.

- [32] J. F. James, *An Introduction to Practical Laboratory Optics*, United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.
- [33] E. Hecht, *Optics*, Boston : Pearson, 2017.
- [34] C. Yang, Y. Yao, C. Jin, D. Qi, F. Cao, Y. He, J. Yao, P. Ding, L. Gao, T. Jia, J. Liang, Z. Sun e a. S. Zhang, "High-fidelity image reconstruction for compressed ultrafast photography via an augmented-Lagrangian and deep-learning hybrid algorithm," *Photon*, pp. 30-37, 2021.
- [35] . Barbara Boldrini, "Hyperspectral imaging: a review of best practice, performance and pitfalls for in-line and on-line applications," 2012.
- [36] . Anuja Bhargava, "Hyperspectral imaging and its applications: A review," *Sensors*, 2024.
- [37] Y. Zhang, *Cost-efficient Active Illumination Camera For Hyper-spectral Reconstruction*, arXiv, Ed., Florida: Cornell University, 2024, p. 16.
- [38] . S. Turtaev, I. T. Leite, K. J. Mitchell, M. J. Padgett, D. B. Phillips, T. Čižmár, "Comparison of nematic liquid-crystal and DMD based spatial light modulation in complex photonics," *Optics Express*, 29874.
- [39] R. G. Steffen Glöckner, "Analysis of a micro-optical light modulator," *Applied Optics*, n.d..
- [40] S. Jiang, X. Li, Z. Zhang, W. Jiang, Y. Wang, G. He, Y. Wang e B. Sun, "Scan efficiency of structured illumination in iterative single pixel imaging," *Optics Express*, vol. 27, pp. 22499-22507, 2019.