

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

Sistema Óptico para la Detección de Contaminantes en el Agua Orientado a Microplásticos

P R E S E N T A:

Ing. María de la Luz Medina Huerta

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes

CODIRECTORA DE TESIS:

Dra. Ma. Rosario González Mota

Aguascalientes, Ags. a 2 de Agosto de 2024



Aguascalientes, Ags, 30/julio/2024

Oficio No. DEPI 309/2024

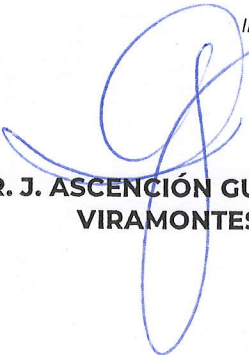
Asunto: Autorización impresión tesis MCIA

**C. MARÍA DE LA LUZ MEDINA HUERTA
PRESENTE**

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos CONSTAR que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: "Sistema Óptico para la Detección de Contaminantes en el Agua Orientación a Microplásticos", hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia*


**DR. J. ASCENCIÓN GUERRERO
VIRAMONTES**


DRA. MA. ROSARIO GONZÁLEZ MOTA


DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL

ccp. Archivo

JEJL/yevo



Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens. C.P. 20256. Aguascalientes, Aguascalientes.
Tel. 449 910 5002 ext. 127; e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | aguascalientes.tecnm.mx



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Aguascalientes, Ags., el día fecha de elaboración el que suscribe **Ing. María de la Luz Medina Huerta** alumna del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental con número de control G22153207 adscrito al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes** y cede los derechos del trabajo titulado **“Sistema Óptico para la Detección de Contaminantes en el Agua Orientado a Microplásticos”** al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin permiso expreso del autor y director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica jaguerrero@aguascalientes.tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este. Los derechos de autor y de explotación de la tecnología son propiedad del autor y responsable del proyecto J. Ascención Guerrero Viramontes en base los derechos de autor registrados u otro registro en trámite, por lo que el uso parcial o total de la información presentada en este documento está restringida por sus propietarios. En caso de que se utilice la información sin autorización de los propietarios de la tecnología, se pagará a los propietarios por daños y perjuicios, sin perjuicio de las demás acciones legales que procedan por violación a los derechos de propiedad intelectual o industrial, incluyendo el delito de revelación de secretos contemplado en los artículos 210, 211 y demás relativos del Código Penal del Distrito Federal o sus correlativos en otros estados.

Ing. María de la Luz Medina Huerta.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por llegar a donde estoy.

A mi Hogar, mi hija Elsa que es mi más grande maestra y mi esposo Adrián por inspirarme a hacer un posgrado, por todo el amor que me han dado y me han permitido darles.

A mi madre Silvia, por ser la mujer más fuerte y paciente, gracias por ser una segunda madre para mi hija, sin ti, no hubiese llegado hasta aquí.

A mis hermanos, Andrea, Valeria y Juan porque ustedes han sido mi refugio y ahora nuestro dolor se convirtió en fuerza y ya nada puede pararnos, ni hacernos daño.

Al Dr. Ascensión Guerrero y la Dra. Rosario González, por su guía, su enseñanza y toda su paciencia, por confiar en mí su proyecto y además proporcionarme todo el apoyo necesario para llevarlo a cabo.

A todas las personas que han contribuido para la realización de este proyecto.

Al TecNM por alojarme dentro de su institución y al CONAHCyT por permitirme ser parte de los beneficiarios de su programa de becas con número de CVU 1216672, ya que por el apoyo otorgado logré llevar a cabo mis estudios de maestría.

RESUMEN

Los microplásticos (MPs), son partículas menores a 5 mm que se han convertido en un problema mundial que requiere atención inmediata, ya que están presentes en medios como aire, agua, suelo, biota, este último como el resultado de la sobreexposición de los organismos a dichas partículas que pueden encontrarse en alimentos, productos de cuidado personal y agua de consumo; Es sabido que durante décadas se han realizado diversos análisis para la detección y cuantificación de MPs, dependiendo el tipo de análisis, estos brindan información distinta y su técnica e instrumentos varía, algunos resultan sumamente costosos como la microespectroscopia IR y Raman, el microscopio electrónico de barrido, espectroscopia de masas, calorimetría diferencial de barrido, etc. El análisis visual es uno de los métodos más accesibles, aunque el pretratamiento de las muestras lleva mucho tiempo, además, el error humano suele ser alto; por lo tanto, en este proyecto se desarrolló un sistema de detección y cuantificación de MPs utilizando técnicas ópticas que permitieron la obtención de imágenes de alta calidad para posteriormente analizarlas con herramientas de inteligencia artificial, logrando detectar y cuantificar MPs. Por lo que, para lograrlo fue importante realizar experimentación con distintos tipos de cámaras y fuentes de iluminación para obtener imágenes cuyos datos fueran representativos para poder procesarlas y analizarlas adecuadamente por un algoritmo; Este método además de ser novedoso, permitirá el monitoreo de MPs de una forma más asequible; y brindará a los sectores interesados de la industria información importante para en un futuro establecer metodologías y políticas de gestión de MPs.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Planteamiento Del Problema	6
1.2 Justificación	6
1.3 Objetivos.....	7
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Microplásticos	9
2.2 Técnicas Ópticas	13
2.3 Fuentes De Iluminación	13
2.4 Cámaras Fotográficas.....	15
2.5 Inteligencia Artificial	21
2.6 Procesamiento Y Análisis De Imágenes.....	21
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	23
3.1 Sistema Óptico De Detección	23
3.2 Caracterización De Sensores Y Determinación De Fuente De Iluminación.....	24
3.3 Caracterización De Espectros	30
3.4 Determinación De Cámara Digital Y Fuente De Iluminación Para Microplásticos Tintados Y No Tintados.....	32
3.5 Determinación De Arreglo Óptimo	32
3.6 Pruebas Experimentales.....	33
3.7 Análisis Y Cuantificación De Resultados	34
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
4.1 Ruido	35
4.2 ANOVA	38
4.3 Espectros De Emisión De Fuentes De Iluminación Y De Absorción De Rojo De Nilo.....	42
4.4 Arreglo Óptimo.....	48
4.5 Imágenes Capturadas.....	51
4.6 Detección Y Cuantificación De MPs	53
4.7 Precisión Del Modelo	58
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento Del Problema

En la actualidad, la producción masiva y el mal manejo de residuos plásticos ha magnificado la acumulación de plásticos en diferentes ecosistemas, que al degradarse se convierten en MPs, los cuales son difíciles de visualizar por el ojo humano, pero fácilmente transportables por el viento y el agua, causando daños graves tanto al medio ambiente como a los seres vivos que están expuestos a ellos.

La detección y cuantificación de MPs se han convertido en una necesidad para abordar el problema de omnipresencia de los MPs y aunque ya existen diversas investigaciones que reportan diferentes métodos, aun no existe una metodología estandarizada para su detección y cuantificación ni normativa sobre límites permisibles de concentraciones de MPs, además, la tecnología utilizada hasta ahora tiene costos sumamente altos y las diferentes técnicas de análisis requieren expertos para desarrollarlas, asimismo, los métodos reportados resultan inaccesibles económicamente para los distintos sectores de la industria. Debido a que el análisis de MPs se ve limitado por sus altos costos, se propone utilizar métodos ópticos con el procesamiento digital de imágenes para la detección y cuantificación de MPs.

Por lo tanto, en este proyecto se propone desarrollar un sistema de detección MPs en agua combinando técnicas ópticas e inteligencia artificial para el procesamiento de imágenes, que permita a empresas industriales, autoridades y personas interesadas detectar y cuantificar MPs.

1.2 Justificación

El desarrollo de un sistema de detección y cuantificación de MPs es necesario porque son un problema ambiental a nivel mundial ya que los MPs se encuentran

en alimentos, agua, acuíferos, suelos de cultivos y más sitios que están en contacto con organismos, además, actualmente no existe una metodología estándar para detectar y cuantificar MPs. Un sistema basado en el procesamiento digital de imágenes y la inteligencia artificial podría marcar un precedente para la estandarización y determinación de límites permisibles de MPs en distintos medios, ya que además de ser un método novedoso, podría resultar más viable económicamente a comparación de otros métodos utilizados que necesitan equipos costosos.

El uso del sistema desarrollado será de fácil comprensión y asequible en comparación con otros equipos para detección de MPs, además, permitirá el monitoreo constante de MPs y disminuirá el error humano en la cuantificación visual; otro beneficio será el tiempo de respuesta del sistema ya que en muy poco tiempo se realizará el análisis de una muestra y por lo tanto la capacidad de efectuar más estudios y obtener más resultados de forma eficaz. Este sistema de detección y cuantificación de MPs proporcionará información importante y necesaria a empresas, científicos y legisladores para la toma de decisiones adecuadas sobre la gestión y regulación de MPs. A futuro los datos obtenidos del monitoreo de MPs podrían derivar al desarrollo de políticas y estrategias para su control.

1.3 Objetivos

General:

Desarrollar y caracterizar un sistema óptico para la detección de MPs en agua mediante el uso de algoritmos de inteligencia artificial.

Específicos:

Caracterizar los sensores de imagen de las cámaras para determinar el ruido característico mediante técnicas de procesamiento de imágenes.

Determinar la fuente de iluminación del sistema para reducir las reflexiones múltiples que contribuyen con ruido en la imagen adquirida mediante diseño de experimentos.

Caracterizar el espectro de las fuentes de iluminación Láser azul, LED azul, LED RGB e Incandescente para asociarlo a cada tipo de muestra por medio de un sistema de espectroscopía.

Determinar el par cámara digital y fuente de iluminación para microplásticos tintados y no tintados mediante la técnica de diseño de experimentos y el análisis de espectro de las fuentes de iluminación.

Determinar el arreglo óptico óptimo para el montaje de los componentes del sistema a fin de reducir el ruido y reflexiones múltiples de iluminación por medio del diseño de experimentos.

Realizar pruebas experimentales para determinar la eficiencia del sistema por medio del análisis de imágenes mediante algoritmos de inteligencia artificial.

Analizar y cuantificar resultados para determinar posibles adecuaciones del sistema propuesto por medio de retroalimentación arrojada por el algoritmo de inteligencia artificial.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Microplásticos

A mediados del siglo XX la producción de plásticos comenzó a tener un gran auge y desde entonces ha crecido exponencialmente, ya que los plástico son un material de bajo costo, capaz de ser moldeado para remplazar productos de muchos materiales como la madera, el papel, la piel, el metal, entre otros, su uso sigue siendo esencial para la vida cotidiana por su gran aplicación; sin embargo, debido a esto y otros factores, como su gran persistencia en el medio ambiente y el mal manejo de los residuos, se han acumulado en ecosistemas terrestres y acuáticos donde se degradan y poco a poco se convertirse en MPs. Por otro lado, existen una gran variedad de plásticos comúnmente usados y se caracterizan principalmente por sus grandes cadenas de carbono, los tipos de plástico más comúnmente usados son: Polietileno de baja densidad (LDPE), Polietileno (PE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Poliestireno (PS), Poliestireno de alto impacto (HIPS), Cloruro de Polivinilo (PVC), Polipropileno (PP), Poliamidas (PA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Policarbonato (PES), Tereftalato de polietileno (PET); algunos de estos por sus características físicas son transparentes o altamente cristalinos y al presentarse en pequeñas partículas son difícilmente detectables.

Como se ha venido comentando, los MPs se definen como partículas de menos de 5mm provenientes de distintos materiales plásticos que son materiales poliméricos que pueden contener otras sustancias como aditivos para mejorar su rendimiento y reducir costos de producción [1], [2].

2.1.1 Clasificación de MPs

La clasificación de los MPs proviene principalmente de su fuente de obtención, ya sea que provengan de la degradación de plásticos de mayor tamaño o sean fabricados específicamente con tamaños pequeños [1], [2].

- a) MPs primarios:** Los MPs primarios han sido fabricados originalmente de un tamaño menor a 5mm, para incorporarlos usualmente a productos comerciales farmacéuticos, del cuidado de la piel, retardantes de fuego, pinturas, etc.; además, se han encontrado en altos niveles de concentración en ríos y lagos en la mayoría de los continentes [3].
- b) MPs secundarios:** Proviene de la degradación y ruptura de plástico de mayor tamaño cuando son expuestas a procesos degradativos que ocasionan la reducción de tamaño y ocasionan cambios físicos y químicos [2].

2.1.2 Características físicas y químicas de los MPs

Los MPs poseen las mismas características físicas que los plásticos de donde provienen como es la flexibilidad, durabilidad, resistencia al calor, densidad, cristalinidad, susceptibilidad a la corrosión, resistencia a la degradación, resistencia dieléctrica, flamabilidad y permeabilidad. En ocasiones, cuando se da la reducción de tamaño, algunas de las propiedades originales se pierden, pero persisten otras que los hacen sumamente resistentes en los medios en donde se encuentran. Algunos MPs por sus características físicas pueden alojar en su superficie microorganismos como virus o bacterias y sustancias químicas contaminantes como metales pesados [4].

2.1.3 Degradación de MPs

Cuando los MPs entran en contacto con algún ambiente, son propensos a una degradación a través de procesos bióticos o abióticos que pueden actuar simultáneamente; estos procesos dependen de las condiciones ambientales a los

que los MPs están expuestos y de las características físicas y químicas de las cadenas poliméricas del material. El rompimiento de su estructura molecular puede ser causada tanto por ácidos o solventes, también por elementos como el oxígeno, la degradación también puede ser causada por calentamiento, deterioro mecánico y radiación electromagnética [2], [5].

2.1.4 MPs en el ambiente

La acumulación de los MPs en los ecosistemas es generada por las grandes cantidades de desechos plásticos derivados de fuentes antropogénicas, debido a que existe una dependencia a la utilización de productos desechables, su acumulación en el medio ambiente se ha ido incrementando; además, su vida media es muy larga por la estabilidad de las largas cadenas poliméricas que los componen. En todos los ecosistemas se han encontrado MPs, entre más pequeño es el tamaño de partícula es más difícil su detección y más riesgoso para los organismos y para el equilibrio ecológico ya que se vuelven biodisponibles para pequeños y grandes organismos que llegan a tener afectaciones como bioacumulación e incluso toxicidad por los aditivos o sustancias añadidas. En los últimos años, el transporte de los MPs se ha analizado para tratar de entender el comportamiento de las partículas y su relación con la contaminación, se ha determinado que el viento, las corrientes de agua e incluso los organismos pueden transportar los MPs y depositarlos en distintos medios [6].

- a) **En agua:** Los MPs se encuentran tanto en sistemas de agua dulce, salobre y salada, su transporte en medios acuáticos es más sencillo debido a que pueden tener densidades menores a las del agua y pueden suspenderse en las corrientes de ríos o mares. Otros sistemas lenticos como lagunas, presas o lagos también presentan contaminación por MPs aun cuando su ubicación esté alejada de comunidades pobladas o zonas industriales, ya que puede haber una deposición por partículas suspendidas en el aire. En los ecosistemas marinos las grandes concentraciones de MPs son mucho más

visibles ya que debido a la conglomeración de las pequeñas partículas hace que se denoten las zonas en donde se da la acumulación, los océanos son una de las principales fuentes de MPs que se encuentran en el aire ya que la brisa marina y los aerosoles permiten que las pequeñas partículas pasen de estar en solución en el agua a suspenderse en el aire. La constante descarga de MPs a sistemas de agua hacen que funcionen como reservorios de MPs del mundo [6].

- b) **En suelo:** Debido a que el uso y consumo de plásticos en el mundo se realiza en la superficie terrestre, actividades cotidianas como la agricultura, el tránsito de vehículos y desgaste de llantas, las actividades domésticas, el uso de cosméticos, uso de ropa de fibras plásticas y su lavado, generan residuos que contienen MPs y sin un plan de manejo correcto, estos son una fuente de contaminación de ambientes terrestres que acumulan por cientos de años las partículas sin lograr una degradación total de estas, afectando el suelo negativamente como con la disminución de la fertilidad y la retención de otros contaminantes que se adhieren a la superficie de sus partículas. En sitios donde se practica el reciclaje y valorización de residuos se disminuye la cantidad de plásticos vertidos a rellenos, tiraderos y por lo tanto también la probabilidad de transporte de MPs de ecosistemas terrestres o acuáticos [6].
- c) **En aire:** el aire o la atmosfera es uno de los medios fundamentales para el transporte de MPs, debido a los gradientes de temperatura las corrientes de aire pueden llevar suspendidas partículas por miles de kilómetros y a zonas no habitadas por los humanos o donde no se tendría registro de uso o existencia de plásticos. La dispersión de MPs por medio de aire se lleva a cabo en todo el mundo y su deposición puede deberse tanto a lavados por agua como a sedimentación de partículas y así contaminando suelos y aguas. Esta transferencia de MPs a través del suelo, agua y aire se mantiene

dinámico lo cual replica el ciclo biogeoquímico de algunos elementos como el nitrógeno o carbono [6].

- d) **En biota:** Los organismos biológicos son importantes receptores de MPs ya que, al encontrarse biodisponibles en el suelo, agua y aire, los organismos se encuentran expuestos al contacto y su ingesta. El tamaño de la partícula, el tipo de plástico y sus aditivos son reconocidos como agentes tóxicos para los organismos. Debido a que el origen de los MPs puede deberse a muchas fuentes, el estudio de MPs en organismos es difícil, en algunos casos se encuentra organismos pequeños como peces son sumamente sensibles y su efecto puede derivar a la muerte, en otros casos el efecto más visible es la bioacumulación. Se ha determinado que los MPs pueden impactar en la reproducción, dinámica de poblaciones, funciones metabólicas y hepáticas, entre otros [6].

2.2 Técnicas Ópticas

La óptica es la rama de la física que estudia la luz y su naturaleza, su comportamiento, propiedades e interacciones con la materia, la luz se define como radiación electromagnética visible, infrarroja y ultravioleta. Los sistemas ópticos al cumplir ciertas limitaciones de los haces de rayos de luz que inciden en ellos revelan una imagen en un plano; el ojo según su estructura es una analogía a los aparatos fotográficos, por lo que el mecanismo del ojo humano es la base de los instrumentos ópticos [7], [8], [9].

2.3 Fuentes De Iluminación

Las fuentes de iluminación son muy diversas y con distintas características que pueden incluir el color, eficiencia luminosa y su manera de producir iluminación, estas fuentes son necesarias para obtener una imagen adecuada de un objeto, ya que la intensidad y la luz emitida son clave en los sistemas de visión [8], [10].

- a) Láser:** El láser es un acrónimo de “*Light Amplification by simulated Emission of Radiation*” y basa su funcionamiento en la emisión estimulada de radiación electromagnética de longitud de onda estrecha, una dispersión coherente, altamente direccional y de alta potencia. Existen distintos tipos de láseres y una de sus clasificaciones se basa en el medio activo que emite el haz de luz al ser excitado, entre ellos están los láseres de gas, de estado sólido, líquidos y semiconductores [11].
- i) Láser de gas:** en este tipo de láseres, se hace pasar una descarga de corriente eléctrica a través de un gas para producir luz coherente, los láseres de gas más comunes son el láser de dióxido de carbono, láser de helio-neón, láser de argón, láser de Kriptón, etc.
 - ii) Láser de estado sólido:** el medio activo para producir la radiación láser es un cristal o vidrio que funge, por ejemplo, el láser rubí, láser titanio-zafiro, láser Nd-YAG.
 - iii) Láser líquido:** El medio activo se basa en colorantes orgánicos disueltos en un solvente, algunos de sus usos se dan en la medicina láser, espectroscopia, separación de isótopos, en estos láseres se puede controlar el largo de onda.
 - iv) Láser semiconductor:** Usualmente llamado también diodo láser, emite un haz de láser en la región activa del semiconductor, tiene dimensiones milimétricas, emiten en el infrarrojo cercano, el visible y pueden ser continuos o pulsados.
- b) LED:** El led es un acrónimo de “*Light Emitting Diode*”, son diodos semiconductores y su longitud de onda dominante establece el lugar del color

del led, su funcionamiento se basa en el principio de electroluminiscencia donde la energía eléctrica produce radiación visible, con múltiples bandas de longitudes de onda y coherentes en fase, la potencia de radiación de luz disminuye al aumentar la temperatura; una de sus principales ventajas es el bajo consumo de energía y una vida útil muy larga [11].

- c) Luz incandescente:** En La lámpara de luz incandescente se genera radiación electromagnética por acción del calor, su brillo depende del calor aplicado al filamento y este a su vez depende de la potencia de la lámpara. Existen lámparas halógenas que contienen un cloro bromo o yodo, y las no halógenas que contienen un gas inerte [12], [13].

2.4 Cámaras Fotográficas

Las cámaras fotográficas son una herramienta óptica utilizadas para capturar imágenes, se trata de una caja cerrada a la luz que contiene un lente convergente que produce una imagen real y la transmite a una película o tarjeta de almacenamiento. El instrumento más común para la visión artificial es la cámara digital, esta es una cámara fotográfica que instantáneamente captura y resguarda fotos, sus sensores limitan la resolución; las características esenciales de la cámara fotográfica son el obturador, lente, abertura de lente y medio de almacenamiento. La resolución de una imagen generalmente se conoce como la cantidad de píxeles de alto por la cantidad de píxeles de ancho en una fotografía digital, un pixel representa un bloque básico de construcción de todas las imágenes, el tipo de resolución está dada por la respuesta de millones de píxeles de un sensor a la luz a la que se expone; la calidad de imagen más que la cantidad de píxeles es establecida por el tamaño, calidad y fabricación del sensor; los píxeles solo responden a una limitada longitud de onda y un color de filtro rojo, verde o azul. [7], [14], [15].

a) **WebCam:** Son una herramienta altamente utilizada en dispositivos computacionales, son cámaras que permiten capturar imágenes o videos, algunas cuentan con entradas de audio, su calidad de imagen puede llegar hasta ultra alta definición, su resolución varía según el fabricante y el modelo de la webcam y va desde 1280 x 720 pixeles en HD, 1920 x 1080 pixeles en Full HD, y 4096 x 2160 pixeles en Ultra HD 4K que se muestra en la Figura 1, usualmente cuentan con un autoenfoco, corrección de iluminación automática y distintas funciones de Zoom [16], [17].



Figura 1. Cámara Web magnética Pro 4K Logitech [17]

b) **Cámaras industriales:** Son sumamente utilizadas en múltiples aplicaciones para monitoreo e incluso como sistemas de seguridad, existen distintos tipos, como se muestra en la Figura 2, por ejemplo las cámaras matriciales cubren una área o matriz de pixeles determinada, las cámaras lineales cubren una línea y elaboran la imagen a través de un sensor lineal, las cámaras de alta velocidad pueden capturar desde cientos hasta un millón de fotogramas por segundo y reproducir imágenes en cámara lenta, las cámaras 3D tienen un tratamiento especializado de la imagen ya que intentan producir la imagen capturada en tres dimensiones, las cámaras infrarrojas trabajan en el infrarrojo y son capaces de detectar ondas de entre 900 y 5000 nm, las cámaras térmicas trabajan en el infrarrojo y miden entre 8000 y 14000 nm,

las cámaras panorámicas o de visión 360 muestran un conjunto del sitio donde son colocadas, usualmente se observa una imagen panorámica de buena calidad, las cámaras UAV por *Unmanned Aerial Vehicle* son cámaras instaladas en drones [18].



Figura 2. Cámaras Industriales [18]

c) Cámaras profesionales: Las cámaras profesionales usualmente son las más costosas al ser multipropósito, tiene la posibilidad de intercambiar lentes y tienen control de obturador para diferentes condiciones de iluminación [14]. En las cámaras profesionales destacan las digitales que tienen un autoenfoco y la capacidad de almacenar fotografías según las tarjetas de memoria externa; hay varias cámaras digitales, por ejemplo, las mostradas en la Figura 3, y una de sus clasificaciones son las réflex, que tienen un espejo abatible de modo que, cuando se toma una fotografía, se desplaza el espejo y llega la luz al sensor de imagen donde se captura para formar una fotografía. En las cámaras sin espejo, la luz llega directa al sensor de imagen y el fotógrafo puede observar la imagen que se está capturando a través de la pantalla LCD de la cámara o de un visor electrónico [15], [19].

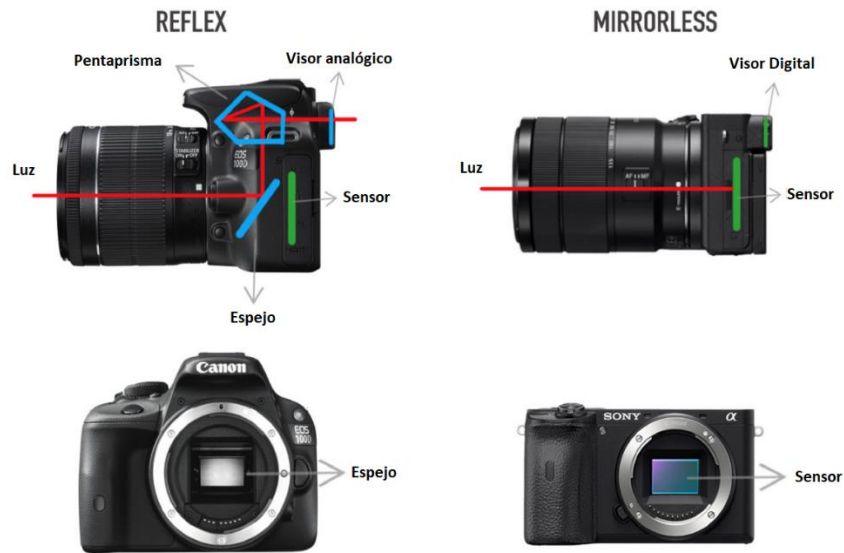


Figura 3. Cámaras con espejo y sin espejo [15]

El tipo de sensor de las cámaras profesionales puede variar dependiendo del fabricante, usualmente las más costosas contienen sensores Full Frame u otros sensores más pequeños como el APS-H, Super 35, DX, APS-C, 4/3", 2/3", 1/2", 1/3". Existe un factor de recorte para los distintos sensores utilizando como referencia el Full Frame, como se muestra en la Figura 4, ya que entre más pequeño sea el sensor abarcará menos ángulo de imagen [15].

TIPO									
	1/3"	1/2"	2/3"	4/3"	APS-C	Canon Nikon Pentax DX	Super 35	APS-H	"Full Frame" 35 mm
Sensor: W x H	4.8 x 3.6 mm	6.4 x 4.8 mm	8.8 x 6.6 mm	17.8 x 10 mm	22.2 x 14.8 mm	23.6 x 15.5 mm	24.89 x 18.66 mm	28.7 x 19.1 mm	36 x 24 mm
Longitud Diagonal	6 mm	8 mm	11 mm	20.41 mm	26.7 mm	28.4 mm	31.1 mm	34.5 mm	43.3 mm
Área del Sensor	17.3 mm ²	30.7 mm ²	58.1 mm ²	178 mm ²	329 mm ²	366 mm ²	464.44 mm ²	548 mm ²	864 mm ²
Factor de Recorte	7.21	5.41	3.93	2	1.62	1.52	1.39	1.26	1

Figura 4. Tipos de sensores [15]

A la medición de la luz que entra por el sensor se le conoce como exposición y es determinada por la velocidad de obturación, apertura de diafragma e ISO, esta relación se puede observar en la Figura 5. La velocidad de obturación indica con qué velocidad se abre y se cierra el obturador, esto le permite al sensor captar la luz mientras el obturador esté abierto, entre más rápido se cierre el obturador, el momento captado será más preciso pero la luz de entrada será menor; la apertura de diafragma, con el diafragma se puede decidir cuanta luz llega en la velocidad de obturación, se abre más cuando hay poca luz y se cierra cuando hay mucha luz, el diafragma también controla la profundidad de campo que es la zona que se enfoca en una imagen, con mayor nitidez; y la sensibilidad ISO que afecta mucho la calidad final de la foto, esta le permite al sensor ser más sensible o menos sensible a la luz, entre más alto sea la ISO la imagen tendrá más ruido y será peor su calidad [15].

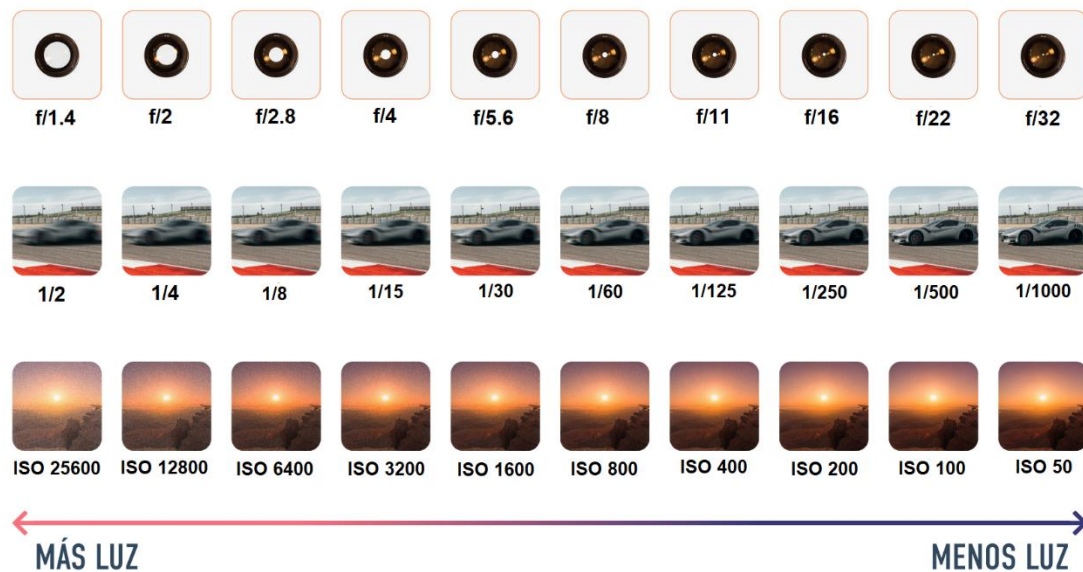


Figura 5. Exposición de una imagen: Apertura del diafragma, Velocidad de obturación, Sensibilidad [15]

La representación en milímetros de la distancia focal hace referencia al ángulo de visión que se puede captar con las lentes, estos se pueden observar en la Figura 6 y se clasifican en: grandes angulares, que permiten captar mucha escena; los objetivos normales o estándar que permiten enfocarse en un objeto y mostrar un poco el fondo; y los teleobjetivos que permiten capturar objetos a lo lejos. Existen lentes fijas que solo tienen una distancia focal y diafragmas más abiertos que permite tener una mayor luminosidad y mejor nitidez de las imágenes; y los lentes zoom que permiten variar la distancia focal, así se puede fotografiar distintas escenas con la misma lente, aunque no son tan luminosas [15].

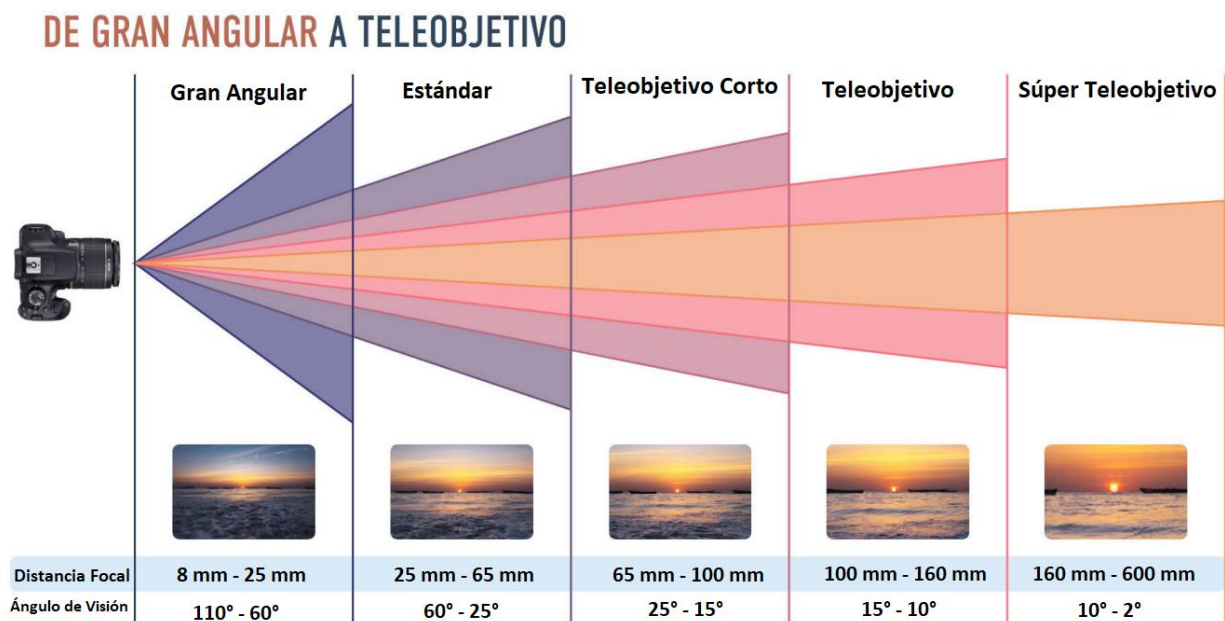


Figura 6. Distancia Focal y Ángulo de Visión respecto a un sensor Full Frame [15]

2.5 Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial es una aproximación de la inteligencia humana que equipos o máquinas desarrollan gracias a la programación, tratando de racionalizar pensamientos o decisiones en las que se espera que el resultado sea cercano a uno derivado del pensamiento humano [10], [20], [21].

Redes neuronales

Las redes neuronales tratan de simular el comportamiento neuronal de un humano mediante modelos matemáticos que establecen una red de neuronas a la que se alimenta con una entrada, procesan la información y se emite un resultado. La red neuronal también debe alimentarse con entradas de información para su entrenamiento y mejorar el procesamiento y aproximarse un resultado certero. La estructura general de una red neuronal se basa en las capas de entrada y de salida, aunque pueden agregarse capas intermedias que se mantienen ocultas [10], [20], [21], [22].

Las redes neuronales convolucionales: son un tipo de redes neuronales en las cuales se mantienen varias capas intermedias que analizan los píxeles de una imagen ya sean a escala de grises o a color, se realiza una convolución y operaciones matriciales para obtener una respuesta de salida. Su diseño tiene como objetivo el reconocimiento y la clasificación de imágenes [10], [20], [21], [22].

2.6 Procesamiento Y Análisis De Imágenes

Durante el procesamiento y análisis de las imágenes se determinan las condiciones físicas y aspectos geométricos del objeto por analizar, la información que brinda la imagen es extraída y manipulada para el reconocimiento de esta por medio de algoritmos que extraen sus características primitivas como bordes y regiones. La interpretación de las imágenes está basada en información brindada por señales de



la imagen y sus condiciones, como el movimiento, textura, sombreado, que permiten un reconocimiento sin ambigüedades [10].

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Debido al propósito de este proyecto, en esta tesis se desarrollará una investigación de campo experimental.

3.1 Sistema Óptico De Detección

Se determinó que el sistema óptico debe tener una cámara de alta resolución para tomar imágenes con precisión, una fuente de iluminación avanzada para capturar detalles con claridad, una porta celdas diseñada para sostener las muestras establemente y una base sólida con soportes ajustados para asegurar el buen funcionamiento de cada uno de los componentes, como referencia se muestra la Figura 7, donde se observa el arreglo óptico utilizado hasta ahora por el equipo de trabajo.

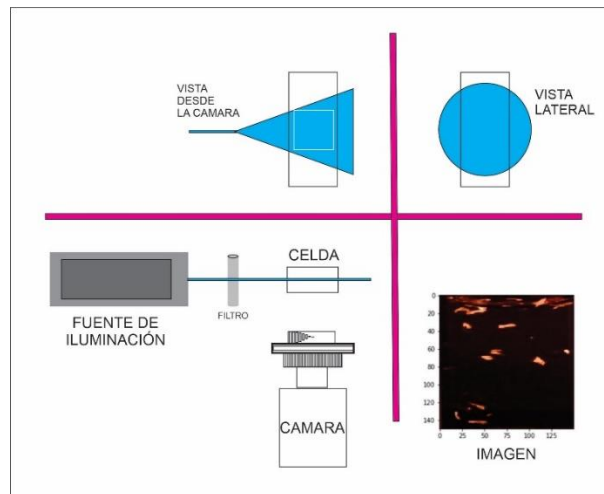


Figura 7. Arreglo óptico

3.2 Caracterización De Sensores Y Determinación De Fuente De Iluminación

Se relacionaron las cámaras digitales y la fuente de iluminación mediante un diseño de experimental para determinar el ruido en imágenes.

Caracterización de sensores de imagen de cámaras digitales: Al utilizar diversos dispositivos de adquisición de imagen, se buscó encontrar el que obtuviera los mejores resultados considerando la homogeneidad de los píxeles al captar la luz. Se midió el ruido de una imagen para caracterizar los sensores.

Determinación de fuente de iluminación del sistema: La fuente de iluminación afecta directamente a la escena capturada con la cámara digital y es por lo que se relacionó con el ruido de la imagen de la caracterización de los sensores de las cámaras digitales ya que la luz que incide en el objeto es determinante para la obtener una imagen de buena calidad.

3.2.1 Diseño experimental

La metodología empleada en este proyecto implicó la caracterización de los sensores de las cámaras y las fuentes de iluminación, así como el análisis de sus interacciones. Para ello, como se muestra en la Tabla 1, se diseñó un experimento de dos factores: la cámara digital y la fuente de iluminación, con cuatro niveles, la respuesta esperada fue el ruido, y cada combinación tuvo tres réplicas, con un total de 48 experimentos.

Tabla 1. Diseño de experimentos de dos factores y cuatro niveles

Factores		Cámaras digitales		
Fuentes de iluminación	Web cam	Industrial	Celular	Profesional
Láser azul	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
LED azul	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
LED RGB	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
Incandescente	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3

Para la realización del diseño se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H_0):

1. H_{0A} : No hay diferencias significativas en el ruido en la imagen entre los diferentes tipos de cámara.
2. H_{0B} : No hay diferencias significativas en el ruido en la imagen entre los diferentes tipos de iluminación.
3. H_{0AB} : No hay interacción significativa entre el tipo de cámara y la iluminación en cuanto al ruido en la imagen.

Hipótesis Alternativa (H_a):

1. H_{aA} : Hay diferencias significativas en el ruido en la imagen entre los diferentes tipos de cámara.
2. H_{aB} : Hay diferencias significativas en el ruido en la imagen entre los diferentes tipos de iluminación.
3. H_{aAB} : Hay una interacción significativa entre el tipo de cámara y la iluminación en cuanto al ruido en la imagen.

3.2.2 Características de las cámaras digitales y fuentes de iluminación

a) Cámaras digitales

Se optó por utilizar una variedad de cámaras para poder realizar una comparación que garantizara la obtención de la menor cantidad de ruido en las imágenes. Por ello, se empleó una cámara profesional, una industrial, un celular y una webcam, las cuales podemos observar en la Figura 8.

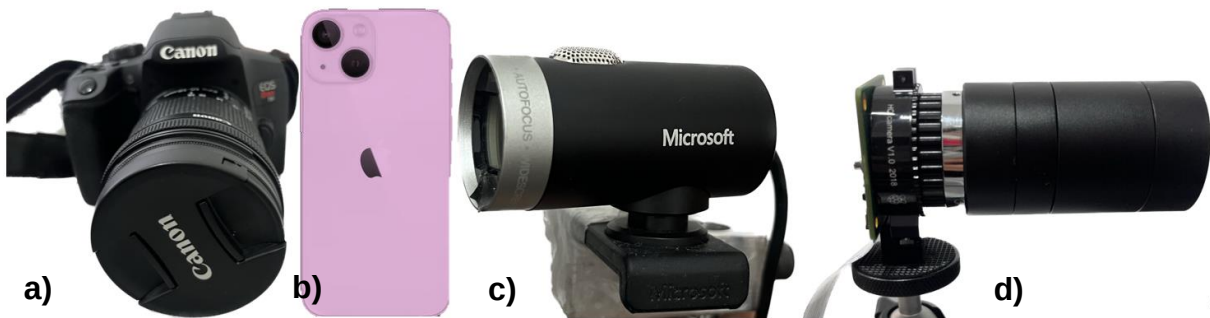


Figura 8. Cámaras utilizadas para la caracterización, a) Canon EOS Rebel T8i, b) Iphone 13 mini, c) Microsoft Lifecam Cinema, d) Raspberry Pi High Quality Camera

La marca, modelo y resolución de cada cámara se observa en la Tabla 2, aun cuando existe diferencia en la resolución, no se aplicó ningún bloque al diseño.

Tabla 2. características de cámaras digitales [23], [24], [25], [26]

Característica	Tipo de cámara			
	Celular	Web	Profesional	Industrial
Marca	Apple	Microsoft	Canon	Raspberry Pi
Modelo	Iphone 13 mini	Lifecam Cinema	Canon EOS Rebel T8i	Raspberry Pi High Quality Camera
Resolución	12 MP	5 MP	24.1 MP	12.3 MP

b) Fuentes de iluminación

Las fuentes de iluminación fueron seleccionadas debido a las necesidades de los diferentes tipos de muestra, habiendo variaciones de colores entre azules y blancos para comparar mediante el diseño cuales son los más convenientes con respecto al ruido en la imagen obtenida, En la figura 9 podemos observar las fuentes de iluminación seleccionadas, entre ellas dos azules (Láser y LED) y dos blancas (LED e Incandescente).

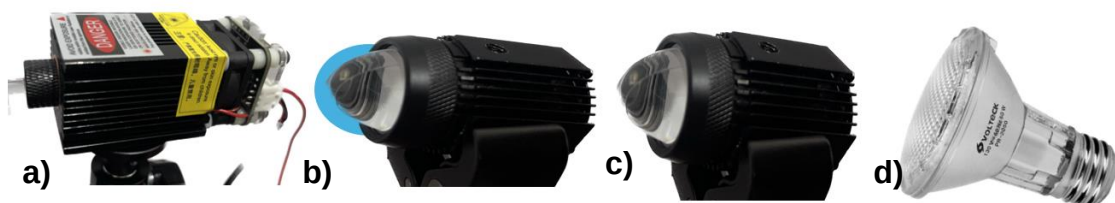


Figura 9. Fuentes de iluminación utilizadas, a) Láser Azul, b) LED Azul, c) LED RGB, d) Incandescente

La Tabla 3 muestra las características de las fuentes de iluminación, modelo, material, longitud de onda, potencia y flujo luminoso, estos datos fueron obtenidos de la información proporcionada del fabricante, en algunos casos, esta información no estaba disponible.

Tabla 3. características de Fuentes de iluminación [27], [28], [29], [30]

Característica	Tipo de fuente de iluminación			
	Laser azul	LED azul	LED RGB	Incandescente
Modelo	SN 017			
material				Halogeno
Longitud de onda o temperatura de color	445 nm	445 nm	6000K	3000K
Potencia	2.5W	3 W	12W	50 W
Flujo luminoso				450 lm

c) Escenario

La imagen patrón la cual se muestra en la Figura 10, fue usada como escenario para caracterizar las cámaras digitales y las fuentes de iluminación que, se obtuvo de un blog de estudiantes de la Universidad de San Luis Potosí [23]. Las cámaras fueron cuidadosamente dispuestas sobre un mismo eje, perpendicular a la imagen, para garantizar una captura uniforme y precisa. En la Figura 11 se muestra la vista aérea del arreglo y en la Figura 12 se puede apreciar el arreglo con la combinación de cámara profesional y la fuente incandescente. Las condiciones de la toma de cada imagen se replicaron para cada uno de las cámaras y fuentes de iluminación. Se capturaron imágenes en el espacio de color RGB utilizando cada una de las cámaras, las cuales fueron posteriormente procesadas mediante el software ImageJ. Durante el procesamiento, se convirtió el formato de las imágenes a escala de grises para facilitar el análisis. A continuación, se seleccionaron aleatoriamente píxeles de las imágenes y se determinó el valor de cada uno de ellos. Utilizando la media y la desviación estándar, se realizó el cálculo del ruido, un paso crucial para alimentar los datos necesarios al software de análisis estadístico Design Expert.

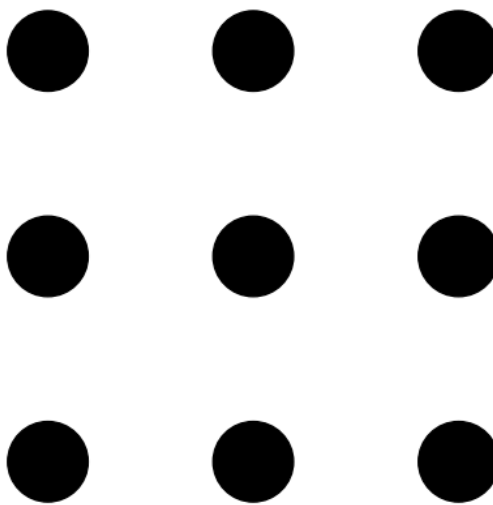


Figura 10. Imagen patrón para la determinación de ruido [23]

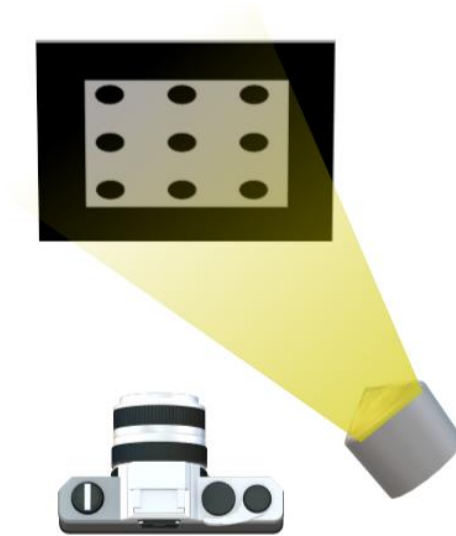


Figura 11. Arreglo óptico del diseño



Figura 12. Arreglo óptico (Con Cámara Profesional y Fuente incandescente)

d) Respuesta (ruido)

La obtención de ruido de imagen fue mediante cálculo de la media del valor de cada pixel con la ecuación 1, y la desviación estándar con la ecuación 2. El valor de pixel de la imagen patrón capturada con cada una de las cámaras y las distintas fuentes de iluminación se obtuvo mediante el software libre imageJ.

$$Ec. 1 \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}$$

Ecuación 1. Para la determinación de la media

$$Ec. 2 \quad \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Ecuación 2. Para la determinación de la desviación estándar

e) Análisis estadístico

Una vez completado el análisis, se obtuvo una ANOVA con los efectos principales y las interacciones de los factores, se analizaron los criterios de normalidad, homocedasticidad e independencia para la validación de los resultados. Se interpretaron los resultados obtenidos y se realizaron inferencias, además, se concluyó si alguno de los factores o su combinación influía en el ruido de las imágenes.

3.3 Caracterización De Espectros

Las fuentes de iluminación se analizaron mediante espectroscopia para determinar su espectro de emisión y relacionarlo con el de absorción del rojo de Nilo porque es un colorante que se adhiere en moléculas orgánicas y flúorese bajo ciertas longitudes de onda [24].

a) Espectro de emisión de las fuentes de iluminación: Se hizo una colaboración con el Centro de Investigaciones en Óptica de Aguascalientes, se hicieron incidir las fuentes de iluminación directamente en un espectroradiómetro marca *metrue* como se observa en la Figura 13, el cual registró los datos

fotométricos e hizo el grafico correspondiente de cada una de las fuentes de iluminación.



Figura 13. Espectroradiómetro

b) Espectro de absorción de las fuentes de iluminación: Se puede observar como referencia en la Figura 14 que se preparó una solución madre de rojo de Nilo en metanol de 10 ppm, esta fue utilizada para preparar disoluciones en agua para cromatografía de líquidos de alto rendimiento (HPLC) de concentraciones: 0.5, 1, 1.5 y 2 ppm mostradas en matraces aforados y cubiertos de la luz, estas fueron colocadas en celdas de cuarzo y analizadas en un espectrofotómetro Visible Hach DR 5000.

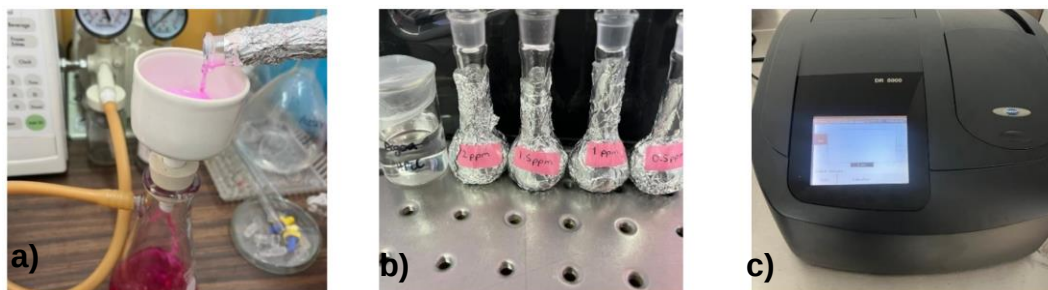


Figura 14. a) Solución Stock de Rojo de Nilo, b) Disoluciones de Rojo de Nilo de 0.5, 1, 1.5, 2 ppm, c) Espectrofotómetro Visible

3.4 Determinación De Cámara Digital Y Fuente De Iluminación Para Microplásticos Tintados Y No Tintados

Durante el análisis de muestras que contienen Mps para facilitar su procesamiento y detección se ha utilizado el tinto con rojo de Nilo ya que, al añadirse a la superficie de las moléculas orgánicas, se hace fluorescente al irradiarle luz azul.

Para determinar el par de cámara digital y fuente de iluminación para Mps tintados y no tintados se llevaron a cabo pruebas preliminares en donde se capturaron imágenes para determinar si los MPs eran visibles. Se utilizaron las cámaras y las fuentes de iluminación que el diseño de experimentos y el análisis de espectro, indicaron tener los mejores resultados, tomando en consideración para los Mps tintados, la absorción del rojo de Nilo. En este sentido, se utilizó la Raspberry Pi High Quality Camera y el led azul. El tipo de MPs utilizados fue el Polietileno de baja densidad (LDPE) con un tamaño de 500 micrómetros. La celda que se utilizó para la preparación de muestras es de vidrio con un volumen total de 4 mL, con medidas de 1x1x4 cm.

Preparación de muestras de MPs tintados: Se tintaron los Mps con una solución de rojo de Nilo en 1ppm en agua HPLC y se dejó reposar por 24 hrs, a la celda se añadieron 3.5 ml de agua HPLC y 10 MPs tintados, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.

Preparación de muestras de Mps no tintados: A la celda se añadieron 3.5 ml de agua HPLC y 10 MPs, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.

3.5 Determinación De Arreglo Óptimo

Para determinar el arreglo óptimo se considerará la apertura de 1.6, la distancia focal del lente de la cámara (6-60 mm) y la distancia entre la cámara y la celda de la muestra, en SolidWorks se diseñaron e imprimieron en una impresora 3D con

PLA, estructuras y soportes que permitían que el sistema trabajara de mejor manera, además se consideró el tipo de muestra analizada. Se capturaron imágenes de referencia para analizarlas y así hacer ajustes en el arreglo óptico para disminuir el tratamiento que se le da a la imagen, como el recorte. Se compararon imágenes con diversos acomodos de la fuente de iluminación y distintos ajustes de la cámara.

3.6 Pruebas Experimentales

Se hicieron pruebas experimentales para determinar la eficiencia del sistema mediante análisis de imágenes con algoritmos de inteligencia artificial.

Se utilizó la Raspberry Pi High Quality Camera y el led azul. El tipo de MPs utilizados fue el Polietileno de baja densidad (LDPE) con un tamaño de 500 micrómetros. La celda que se utilizó para la preparación de muestras es de vidrio con un volumen total de 52.5 mL, con medidas de 5x1.5x7 cm. Se prepararon dos tipos muestras: MPs tintados y no tintados, para cada una de ellas se prepararon concentraciones de: 0, 5, 10, 16, 20, 25, 30,40 y 45 MPs

Preparación de muestras de MPs tintados: Se tintaron los MPs con una solución de rojo de Nilo en 1ppm en agua HPLC y se dejó reposar por 24 hrs, a la celda se añadieron 40 ml de agua HPLC y MPs tintados, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.

Preparación de muestras de Mps no tintados: A la celda se añadieron 40 ml de agua HPLC y MPs, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.

Se capturaron 19,500 imágenes con 0 MPs por cada muestra divididas por partes iguales en 3 celdas, para las demás concentraciones se hizo la captura por celda de 1300 imágenes dando un total por concentración de 3900 imágenes y un total por tipo de muestra de 50,400 imágenes. Se utilizó un sistema de flujo continuo para capturar imágenes con intervalos de 1 segundo, que permitía que fluyera aire y

hubiese una agitación interna dentro de la celda, por cada 20 min de trabajo, se dejaba descansar al menos 10 min al sistema.

3.7 Análisis Y Cuantificación De Resultados mediante CNN

Previo al análisis se hizo un ajuste al tamaño de las imágenes, se recortó cada imagen al margen de la celda, después mediante en entorno spyder de Phytion se procesaron las imágenes, se renombraron, se hizo un cambio de tamaño a 150*150 pixeles, se aleatorizaron y se ordenaron en carpetas para las etapas de entrenamiento, validación y prueba las cuales fueron distribuidas por 4 modelos diferentes utilizando 3000 imágenes para entrenamiento, 1500 para validación y 1500 de prueba por cada concentración, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Etapas de análisis del algoritmo

Modelos	50% imágenes		50% imágenes	
	Entrenamiento	Prueba	Validación	
1	Entrenamiento	Prueba	Validación	
2	Entrenamiento	Validación	Prueba	
3	Prueba	Validación	Entrenamiento	
4	validación	Prueba	Entrenamiento	

Se hizo una comparación de resultados del algoritmo con la información conocida de las muestras la concentración real y la estimada por el algoritmo. Se hizo una revisión exhaustiva del modelo para verificar la precisión y la coherencia de los resultados mediante las métricas de entrenamiento y validación: la precisión media y estándar, así como la perdida media y estándar a lo largo de cada una de las épocas.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Ruido

El ruido resultante de cada una de las réplicas se ha reportado en la Tabla 5 con un orden consecutivo estándar, se puede observar el número de corrida para la combinación de los factores, los datos fueron alimentados al software Desing Expert para realizar el análisis de varianza. El rango se sitúa desde valores de 6.62 hasta 85.64.

Tabla 5. Ruido experimental

Std	Run	Factor 1: Cámara	Factor 2: Iluminación	Ruido
1	34	Web	Láser Azul	46.1339664
2	8	Web	Láser Azul	33.8676579
3	35	Web	Láser Azul	47.1777456
4	12	Industrial	Láser Azul	19.1864701
5	23	Industrial	Láser Azul	20.4512584
6	42	Industrial	Láser Azul	20.2215507
7	31	Celular	Láser Azul	18.2395872
8	22	Celular	Láser Azul	20.6514537
9	39	Celular	Láser Azul	21.1337952
10	44	Profesional	Láser Azul	24.7106911
11	18	Profesional	Láser Azul	31.4988914
12	2	Profesional	Láser Azul	25.7065707
13	1	Web	LED Azul	41.9117743

14	11	Web	LED Azul	43.6146455
15	21	Web	LED Azul	29.8956386
16	38	Industrial	LED Azul	11.2361025
17	41	Industrial	LED Azul	6.90082811
18	17	Industrial	LED Azul	7.32439932
19	46	Celular	LED Azul	11.3371142
20	13	Celular	LED Azul	13.7393826
21	5	Celular	LED Azul	13.3883093
22	27	Profesional	LED Azul	34.4972969
23	28	Profesional	LED Azul	33.4334093
24	32	Profesional	LED Azul	34.5802953
25	36	Web	LED RGB	85.0640095
26	43	Web	LED RGB	85.6466115
27	48	Web	LED RGB	83.079652
28	24	Industrial	LED RGB	41.5172081
29	16	Industrial	LED RGB	45.8602691
30	7	Industrial	LED RGB	38.5944626
31	29	Celular	LED RGB	37.4010016
32	14	Celular	LED RGB	34.6916005
33	25	Celular	LED RGB	41.5172081
34	9	Profesional	LED RGB	46.707771

35	40	Profesional	LED RGB	40.6151411
36	10	Profesional	LED RGB	43.6146455
37	3	Web	Incandescente	21.8032144
38	15	Web	Incandescente	29.0747716
39	47	Web	Incandescente	35.6242293
40	19	Industrial	Incandescente	13.2354248
41	37	Industrial	Incandescente	13.5171555
42	20	Industrial	Incandescente	13.086131
43	45	Celular	Incandescente	34.4001661
44	4	Celular	Incandescente	24.3573104
45	30	Celular	Incandescente	30.2146159
46	33	Profesional	Incandescente	7.25996852
47	26	Profesional	Incandescente	6.62241264
48	6	Profesional	Incandescente	8.61500168

4.2 ANOVA

Con los resultados de ruido del diseño se obtuvo un ANOVA (Análisis de Varianza) que se puede observar en la Tabla 6 e indica que el p-value es menor a 0.5 por lo tanto se rechaza H_0 para cada uno de los factores y las interacciones y se infiere que los factores de cámara y fuente de iluminación como sus combinaciones tiene un efecto significativo en el ruido en la imagen capturada.

Tabla 6. ANOVA de factores e interacciones

ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	p-value Prob> F	
Model	16083.75	15	1072.25	69.91	<0.0001	significant
A-CAMARA	5435.43	3	1811.81	118.13	<0.0001	
B-ILUMINACION	7632.21	3	2544.07	165.87	<0.0001	
AB - NTERACCION	3016.11	9	335.12	21.85	<0.0001	
Pure Error	490.8	32	15.34			
Cor Total	16574.55	47				

La Figura 15 muestra el grafico de ruido de la interacción de los factores que indica que los menores valores de ruido se obtuvieron con la combinación de la fuente de iluminación del LED azul así como la cámara industrial Raspberry Pi high quality camera.

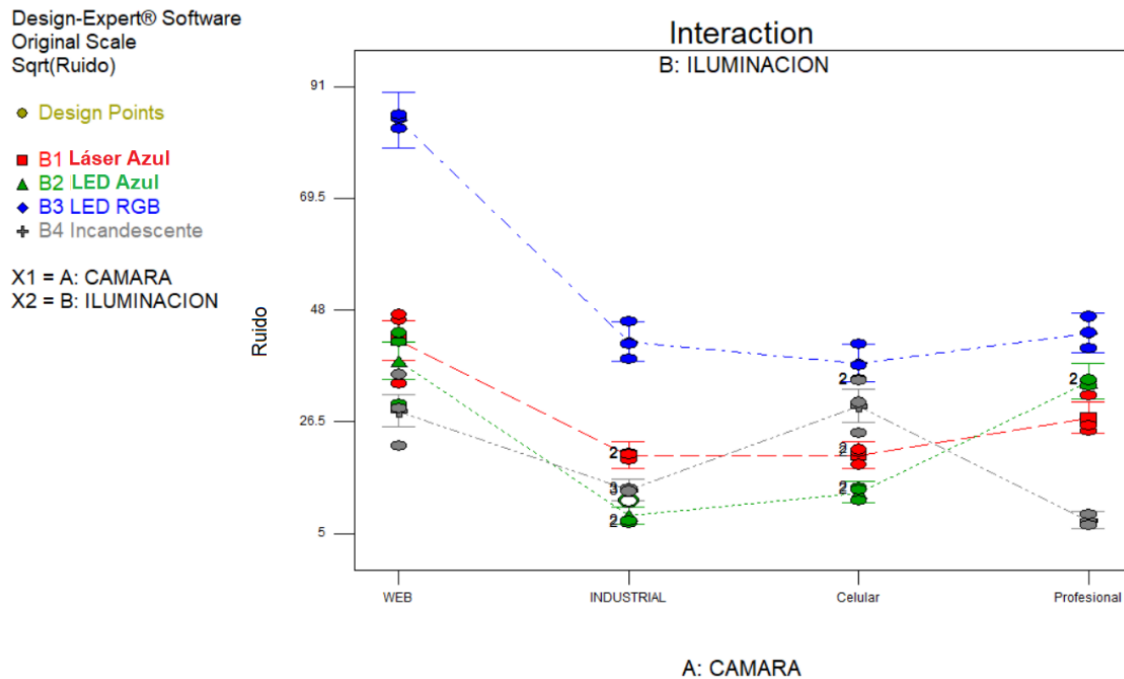


Figura 15. Gráfico de Ruido de las interacciones de los factores

Los diagnósticos indican que los resultados son válidos y se puede tener certeza de que se hizo un análisis correcto. El grafico de Normalidad de los residuales que se muestra en la Figura 16, indica que se cumple con el criterio de normalidad ya que los puntos se encuentran alineados a la línea diagonal.

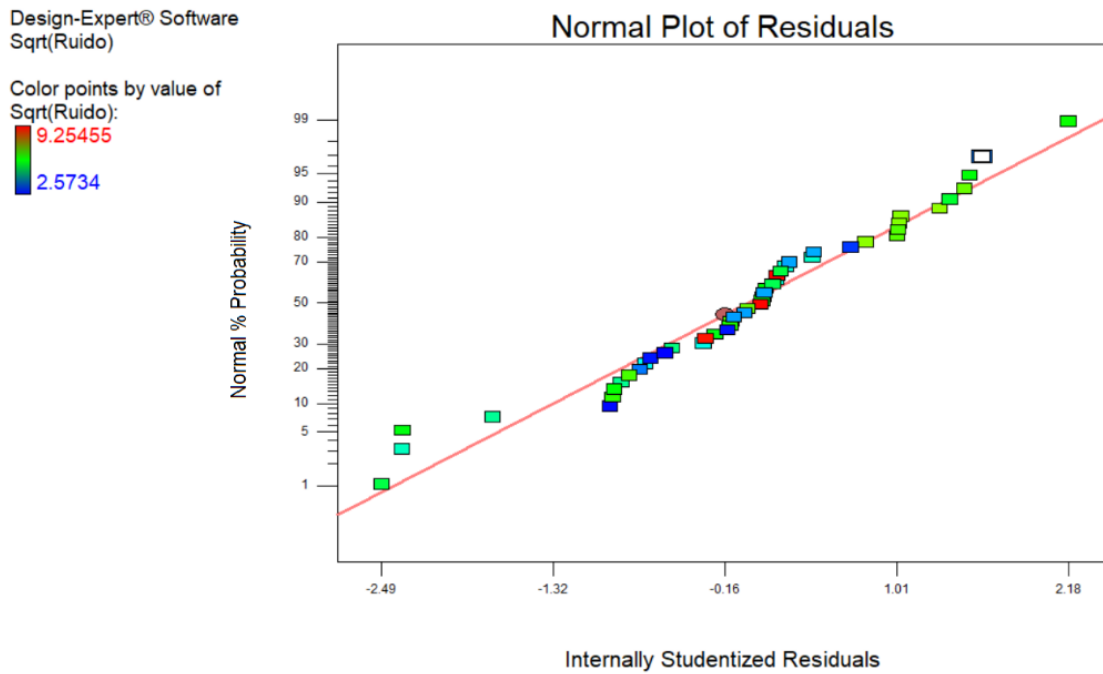


Figura 16. Grafica de Normalidad de residuales

La Figura 17 donde se observa el grafico de Residuales vs Predichos, indica que no se encuentran patrones o estructuras en los residuales así que se cumplen con los criterios de homocedasticidad.

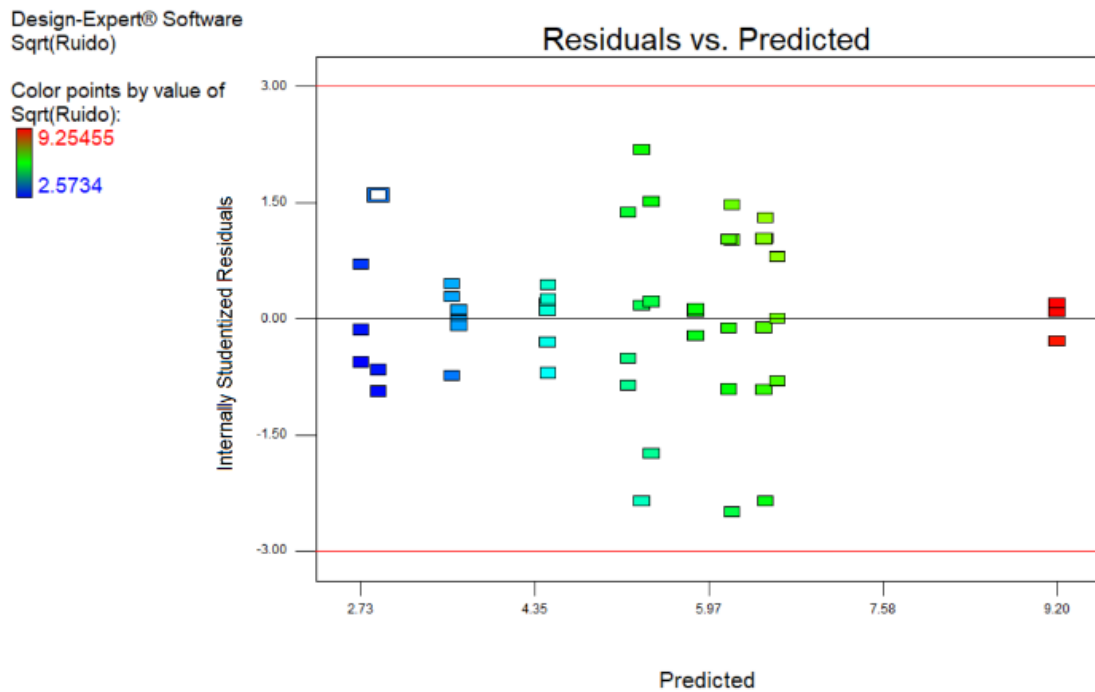


Figura 17. Gráfico de residuales vs predichos

El grafico que corresponde a Residuales vs Corridas que se muestra en la Figura 18 indica una distribución aleatoria de los puntos lo cual denota que no existe una autocorrelación de los residuales.

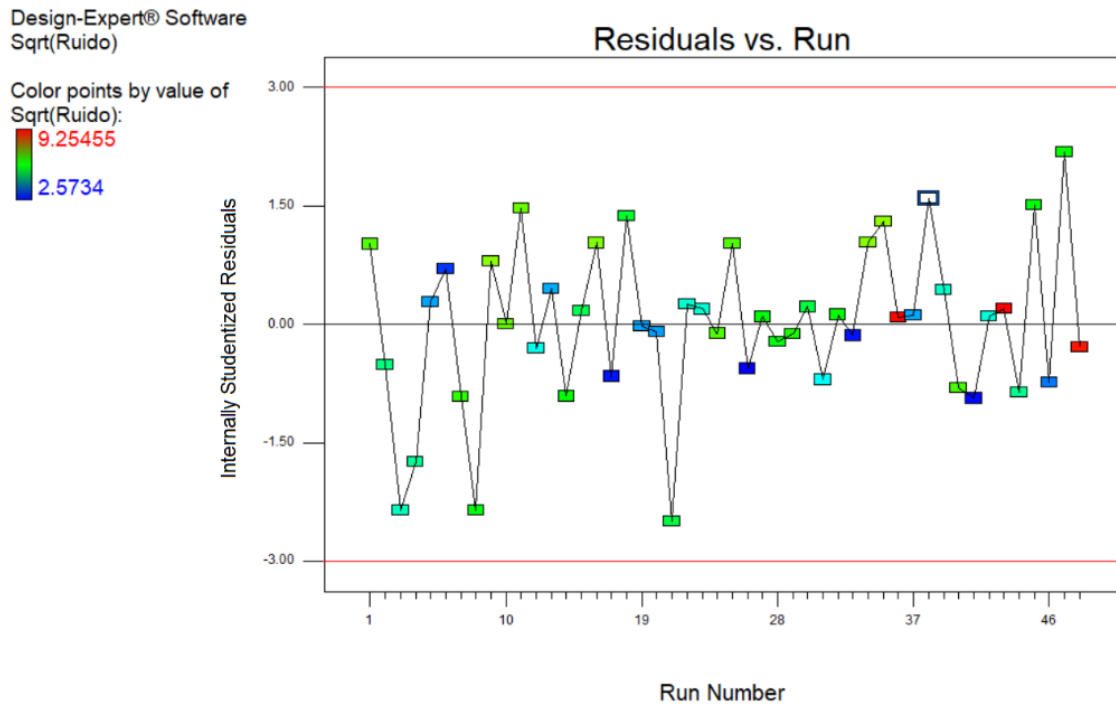


Figura 18. Gráfico de Residuales vs Corridas

4.3 Espectros De Emisión De Fuentes De Iluminación Y De Absorción De Rojo De Nilo

Se obtuvieron los datos fotométricos de las fuentes de iluminación que se muestran en la Tabla 7, se pueden observar los siguientes parámetros: el CIE x y CIE y que representan coordenadas cromáticas de los colores perceptibles para el ojo humano, CIE u' y CIE v' para la uniformidad perceptual de los colores, la temperatura de color (T_c) en Kelvin donde se aprecia la apariencia del color de la luz emitida, longitud de onda pico (L_p) en nanómetros (nm), donde la luz emite su máxima intensidad, ancho de banda (HW) media altura en nm, longitud de onda dominante (L_d), el color que se percibe de la fuente de luz, pureza del color (Pur) en porcentaje e índice de reproducción cromática (IRC). Para este proyecto se tomaron en cuenta la temperatura de color para luces blancas, así como longitudes

de onda dominantes y pico para las luces azules. En caso del LED RGB se observa una temperatura de color fría, en los azules, en la fuente incandescente los datos de temperatura de color indican colores cálidos como el amarillo. El láser azul mantiene una longitud de onda pico y dominante dentro de los 441 nm con pequeña una variación de 0.7 nm, mientras que el LED azul tiene una longitud de onda pico en 455 nm y una longitud de onda dominante en los 458.9 con un mayor margen, pero, manteniéndose en el azul.

Tabla 7. Datos Fotométricos de Fuentes de Iluminación

Nombre	CIE x	CIE y	CIE u'	CIE v'	Tc (K)	Lp (nm)	HW (nm)	Ld (nm)	Pur (%)	IRC (Ra)
Incandescente	0.462	0.4123	0.2631	0.5283	2683	780	185.3	584.1	62.5	99.6
Láser Azul	0.1618	0.0089	0.2326	0.0287	100000	441	11.3	441.7	100	0
LED Azul	0.146	0.0285	0.1915	0.0841	100000	455	23	458.9	99.8	-87.6
LED RGB	0.2741	0.2572	0.198	0.418	14496	444	28.3	470.8	28	70.9

Los datos fotométricos están representados en los gráficos del 19 al 22, donde se observan las curvas espectrales relativas que se obtuvieron de indicar las fuentes de iluminación al espectroradiómetro, estas curvas, en este proyecto son utilizadas como una herramienta para el análisis de la emisión de la luz de cada una de las fuentes de iluminación ya que brindan datos certeros y precisos. Se realizó un análisis individual de cada fuente de iluminación, pero también a lo largo del análisis se hicieron comparaciones entre los datos extraídos de los gráficos para determinar la mejor opción de iluminación del sistema óptico.

La curva espectral relativa de la fuente de iluminación incandescente representada en la Figura 19, muestra la distribución de la intensidad de la luz a lo largo del

espectro visible, desde 380 nm hasta 780 nm. La intensidad relativa de la luz aumenta con la longitud de onda, alcanzando su máximo en 780 nm en el rojo, se muestra un espectro continuo sin picos específicos, podemos decir que hay una emisión en un rango amplio de longitudes de onda de forma uniforme.

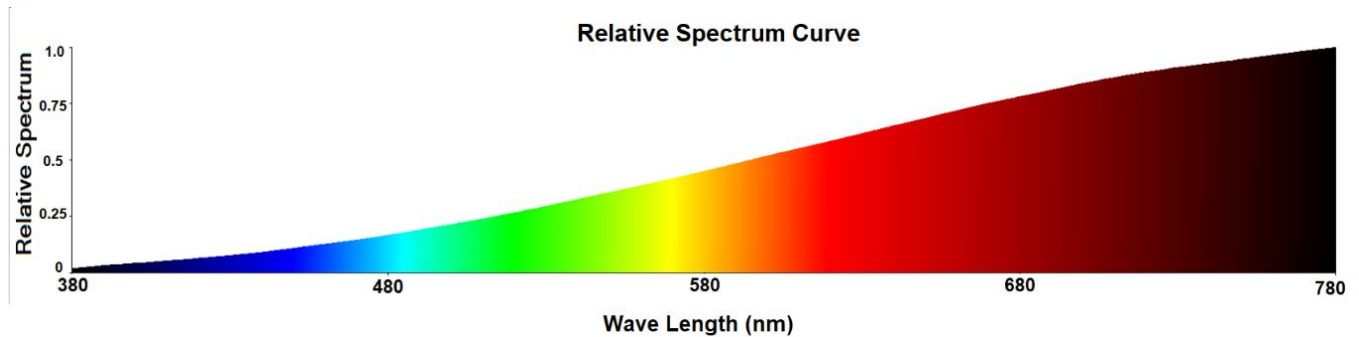


Figura 19. Curva espectral relativa fuente Incandescente

La curva espectral relativa del LED RGB que se observa en la Figura 20, muestra la distribución de la intensidad de la luz a lo largo del espectro visible, desde 380 nm hasta 780 nm. La curva presenta un pico principal con la emisión máxima relativa alrededor de los 450 nm en el azul y una segunda área de intensidad relativa en un rango de 500-550 nm en el verde. La intensidad va disminuyendo gradualmente hacia el rango rojo alrededor de 580-780 nm.

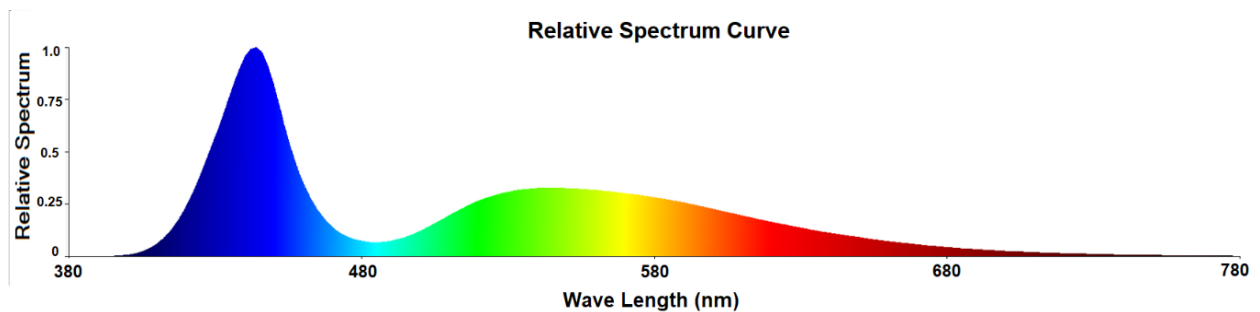


Figura 20. Curva espectral relativa LED RGB

La curva espectral relativa del láser azul que se puede observar en la Figura 21 indica la distribución de la intensidad de la luz a lo largo del espectro visible, desde 380 nm hasta 780 nm. La curva presenta un pico principal muy definido alrededor de los 450 nm en el azul, lo que indica que el láser emite fuertemente en esta región, además podemos observar una emisión muy baja en la región de 700 nm en el rojo que es casi imperceptible en comparación con el pico principal.

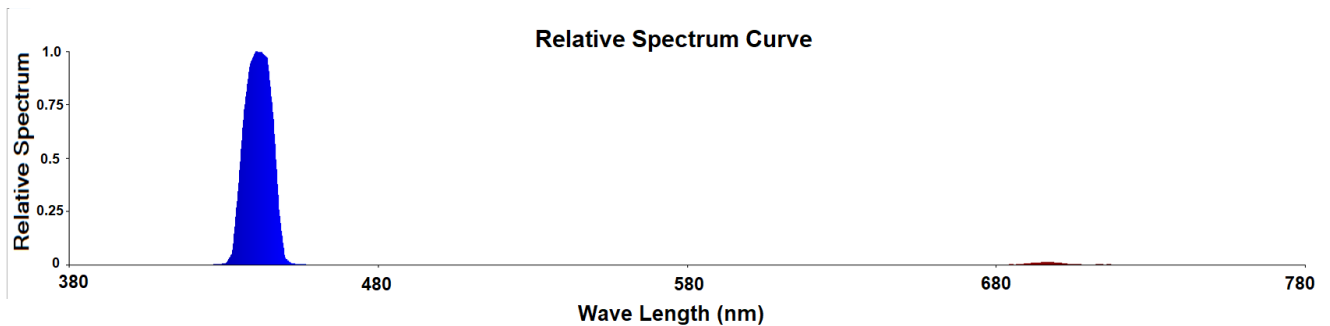


Figura 21. Curva espectral relativa Láser Azul

La curva espectral relativa del LED azul, en la Figura 22, muestra cómo varía la intensidad de la luz emitida o reflejada por una fuente a lo largo del espectro visible desde 380 hasta 780 nm. En este gráfico, el máximo de intensidad se encuentra alrededor de 450 nm, indicando que la luz es predominantemente azul aunque con un gradiente de color que va de azul intenso a cian, reflejando la distribución de la luz en diferentes longitudes de onda con un ancho de banda desde los 400 nm hasta los 500 nm sin observarse ningún pico secundario.

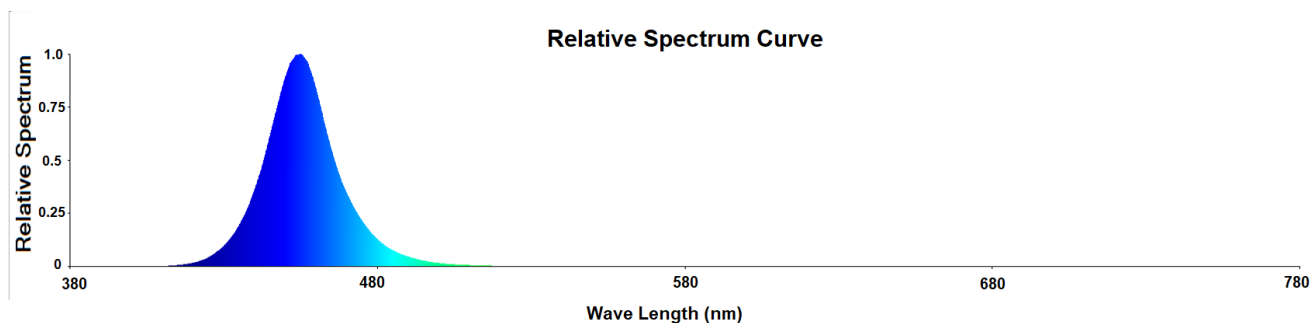


Figura 22. Curva espectral relativa LED Azul

La Figura 23 presenta los espectros de absorción del colorante Rojo de Nilo en varias concentraciones conocidas: 0.5 ppm, 1 ppm, 1.5 ppm, 2 ppm y 10 ppm. En el eje x se representa la longitud de onda de la luz en nanómetros (nm), abarcando un rango desde 0 hasta 1200 nm. En el eje y se muestra la absorbancia, que indica la cantidad de luz absorbida por la muestra en cada longitud de onda.

Los espectros exhiben un pico característico de absorción alrededor de la región de 550 nm, indicando la longitud de onda donde el Rojo de Nilo presenta mayor absorción de luz. A concentraciones más bajas, como 0.5 ppm y 1 ppm, la absorbancia es menor, pero la forma del espectro se mantiene similar. A medida que la concentración aumenta hasta 10 ppm, se observa un incremento notable en la absorbancia, reflejando una absorción de luz proporcionalmente mayor. Se empleo un código de colores para diferenciar cada concentración, se puede hacer comparación visual de cómo la absorbancia varía con el incremento en la concentración. La consistencia en la posición de los picos sugiere que las propiedades de absorción del Rojo de Nilo se mantienen constantes a través de las diferentes concentraciones analizadas, por lo tanto, la concentración utilizada para teñir los MPs, mantiene también las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la fluorescencia y se logre facilitar la visualización de los MPs.

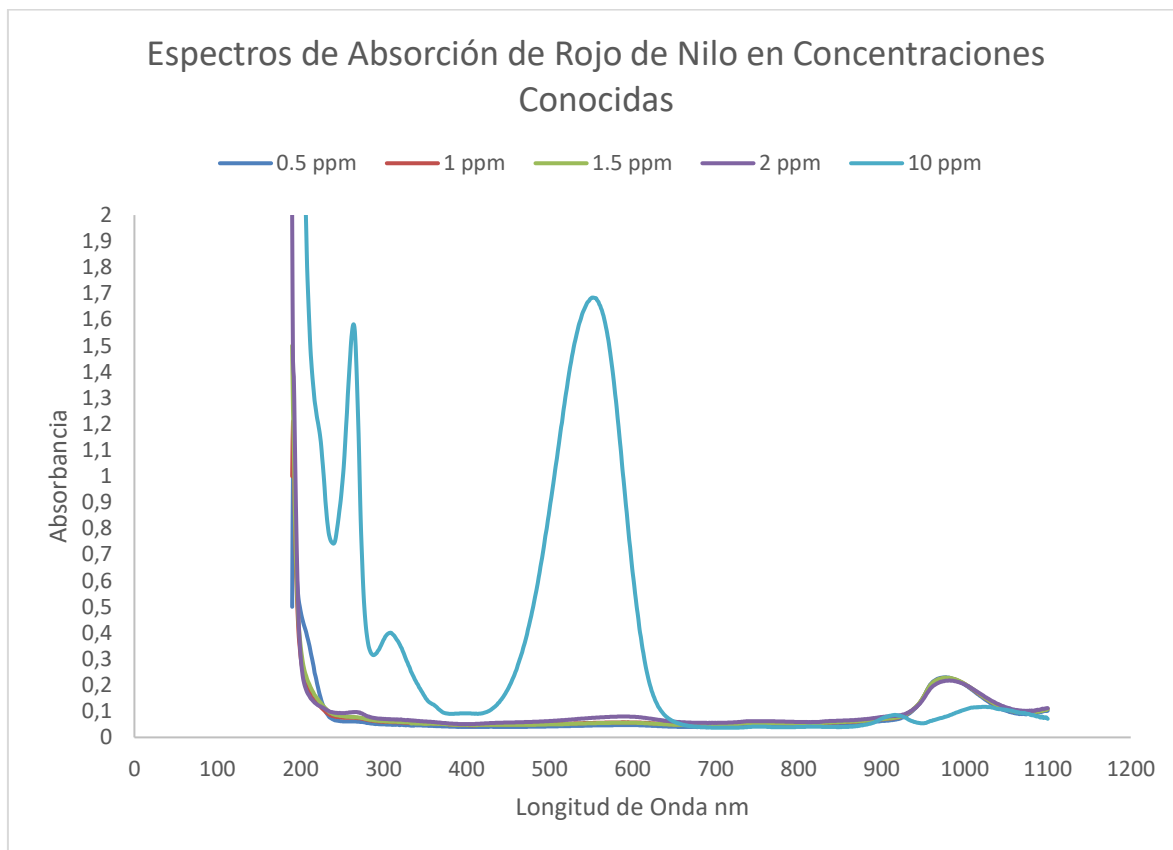


Figura 23. Espectros de Absorción de Rojo de Nilo

Se hizo una comparación del espectro obtenido del Láser azul y del LED azul con los datos de absorbancia del rojo de Nilo para determinar qué fuente de iluminación es más eficiente para excitar la sustancia y provocar fluorescencia, los datos fotométricos de la Tabla 7 y los gráficos de la curva espectral relativa, indican que las longitudes de onda pico y dominantes del LED azul que se encuentra en 455 y 458.9 nm respectivamente y se acercan más al pico de absorción del Rojo de Nilo que las longitudes de onda pico y dominantes del láser azul. Esto implica que se requiere menos intensidad del LED azul para que su luz sea absorbida por el colorante y permita su fluorescencia. En el estudio para detección y cuantificación de MPs de Nalbone en muestras de biota degradada, fue utilizado el colorante rojo

de Nilo sobre un filtro con las muestras y expuesto a un LED azul como fuente de iluminación con longitudes de onda de entre 420 y 470 nm, debido a la materia orgánica se dificultó la visualización, pero el colorante fue excitado lo suficiente para permitir que las partículas fuesen reconocidas más fácilmente [25].

4.4 Arreglo Óptimo

Se estableció que la cámara Raspberry Pi HQ, en la Figura 24 a), como el LED azul fueron la mejor opción para los MPs tintados como no tintados, aunque se estableció un arreglo por tipo de muestra analizada debido a sus características. Para los dos tipos de muestras se utilizó una apertura de 1.6, con una velocidad de obturación de 1/60s, la distancia focal se posicionó manualmente entre 6 y 60 mm, así como el enfoque, la celda a una distancia de 35 cm del sensor de la cámara, con una porta celdas adaptado con una tira de LED azul como se muestra en la Figura 24 b).

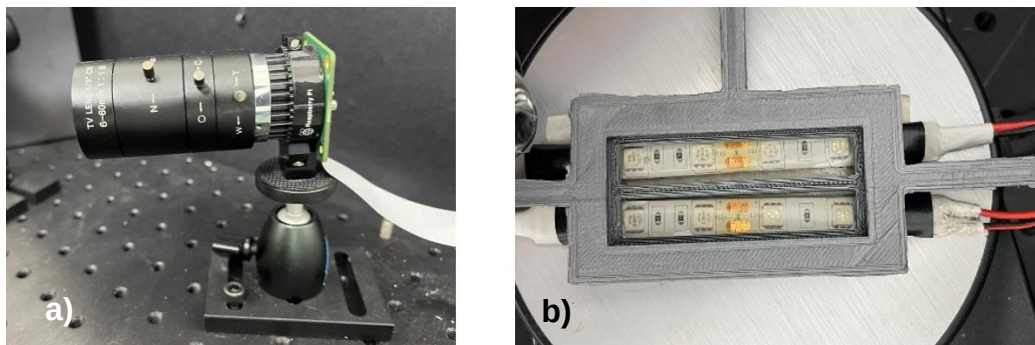


Figura 24. a) Cámara RaspBerry Pi High Quality, b) Porta celdas adaptado con tiras de LED Azul

Se colocó un faro de LED azul con distintas variaciones del ángulo con respecto al sensor de la cámara, en la Figura 25 a) se puede observar el arreglo simplificado para las muestras de MPs tintados, mientras que en la Figura 25 b) se observa el arreglo óptimo simplificado para las muestras de MPs no tintados

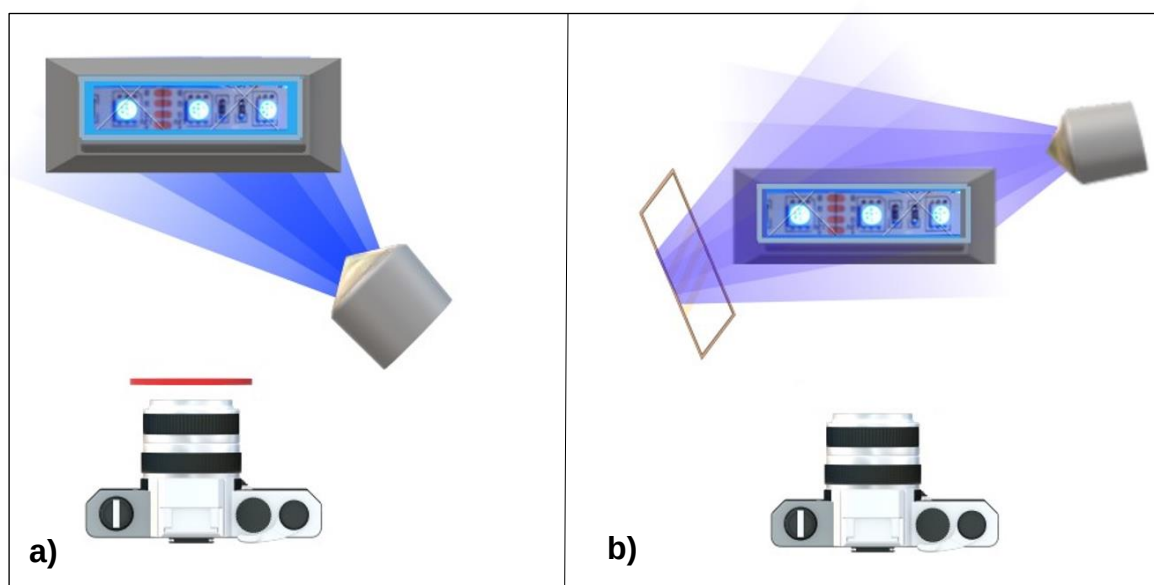


Figura 25. a) Arreglo Óptimo de MPs Tintados, b) Arreglo Óptimo de MPs no tintados

Para el arreglo de MPs tintados se añadió un filtro naranja después del lente de la cámara, para filtrar la luz azul y facilitar la visualización de las partículas tintadas, en la Figura 26 se puede observar el arreglo óptico desde una vista aérea. Es importante señalar que como se ve en la figura, se utilizó un agitador magnético, una parrilla de agitación, una bomba de aire y tapas adecuadas con mangueras para hacer fluir aire, debido a que se este proyecto se realizó a la par de un proyecto de un sistema de flujo continuo.

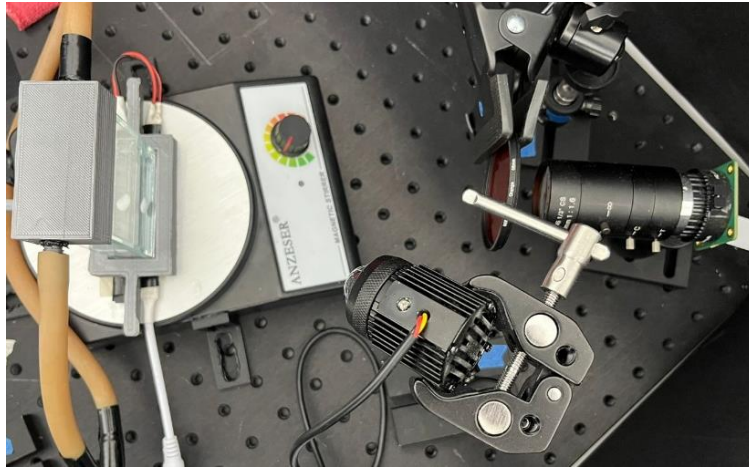


Figura 26. Vista Aérea de Arreglo Óptimo de MPs Tintados

En el caso del arreglo de los MPs no tintados se colocó un espejo que contribuyó al incremento en la intensidad de fuente de iluminación que incide en la celda, en la Figura 27 a), se puede observar una vista aérea del arreglo óptimo, la Figura 27 b), permite observar más fácilmente desde una vista lateral el ensamble del espejo.

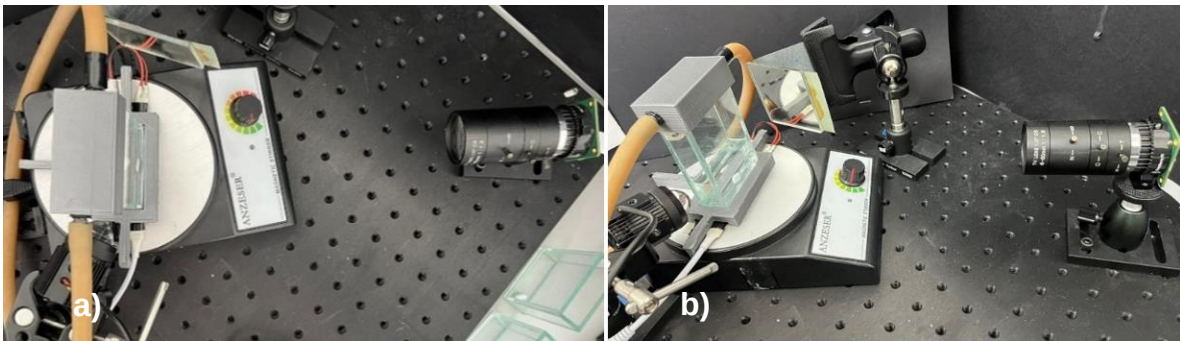


Figura 27. a) Vista Aérea de Arreglo Óptimo de MPs no tintados b) Vista lateral de Arreglo Óptimo de MPs no tintados

El sistema óptico obtenido permite la captura de imágenes de alta calidad en donde se pueden observar partículas de 500 micrómetros en un medio acuoso y en constante movimiento, aunque hasta la fecha no se han hecho estudios sobre la detección y cuantificación en medios acuosos con flujos continuos existen trabajos donde se buscó utilizar cámaras digitales para cuantificar y caracterizar MPs, en el

estudio de Nalbone fue utilizada una Cámara Canon EOS-760D con un lente macro y un filtro amarillo, así como un LED azul, dichos componentes del arreglo fueron para un medio sólido y para muestras tintadas, en el caso del estudio de Lorenzo-Navarro, para la cuantificación y clasificación de MPs utilizó tres tipos diferentes de cámaras, una Olympus OM-D EM-10, una Sony α 6400 y un Samsung A5, junto con iluminación LED tubular en partículas de MPs 1 a 5 mm obtenidas de una playa las cuales fueron pretratadas pero no se utilizó ningún colorante, en ambos casos los arreglos se adaptaron al tipo de muestra y las imágenes obtenidas permitían la visualización de partículas en medios sólidos [32], [33] .

4.5 Imágenes Capturadas

Como resultado de las pruebas experimentales se obtuvieron un total de 100,800 imágenes, las cuales se clasificaron en MPs tintados y MPs no tintados, de los cuales se creó una subclasificación para cada una de las concentraciones, de 0, 5, 10, 16, 20, 25, 30, 40 y 45 MPs.

En la Figura 28 se observan las imágenes de MPs tintados capturadas con el sistema de 5 y 45 MPs respectivamente, se pueden visualizar las partículas de plástico en un color naranja que se encuentran en movimiento, algunas con una forma definida y otras con forma más alargada, esto se debe a la alta velocidad que toman las partículas por el flujo de agua y aire al que están expuestas, aun así, es posible visualizar de una manera clara los MPs.

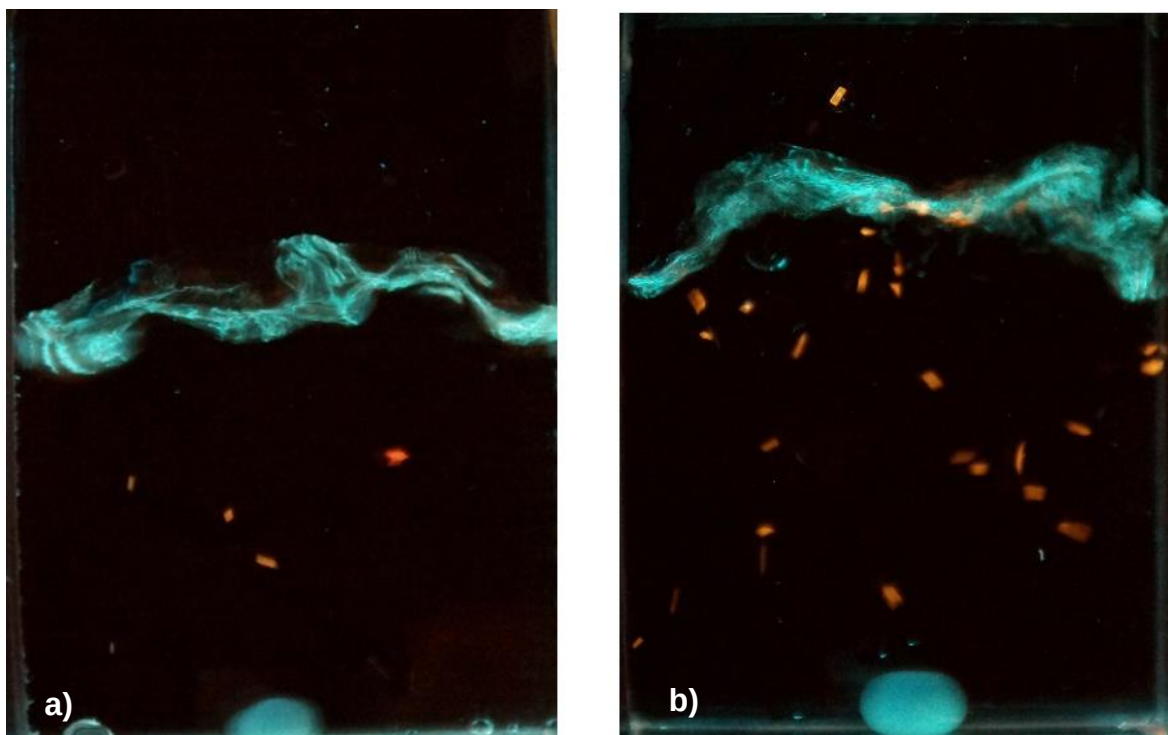


Figura 28. a) Imagen capturada de 5MPs tintados, b) Imagen Capturada de 45 MPs tintados

Es importante reconocer que es más fácil identificar a simple vista los MPs tintados en comparación con los no tintados, en la Figura 29, se observan las imágenes capturadas con el sistema de los MPs no tintados, de 10 y 15 MPs respectivamente, su visualización es menor a la de los tintados debido a que existe en el otro tipo de muestra un marcador que facilita, aun así, considerando que el tamaño de la partícula promedio es de 500 micrómetros y que se utiliza LDPE transparente, se pueden observar en la imagen las partículas de MPs y por lo tanto evidenciar que existe una buena visualización en las muestras no tintadas.

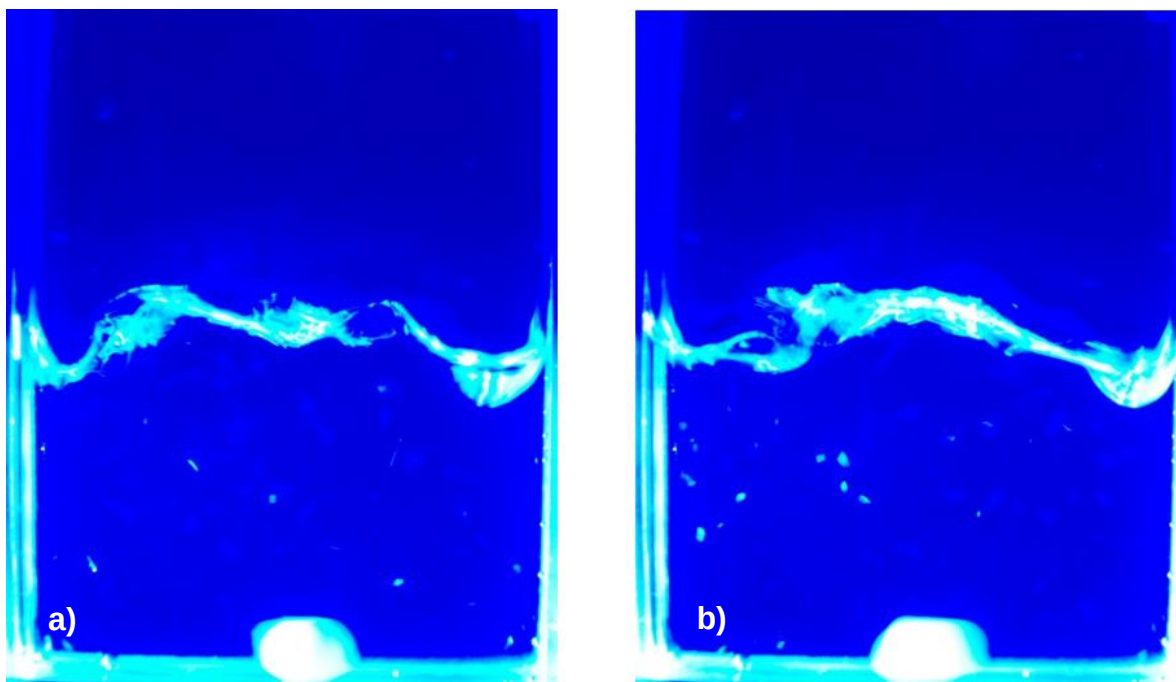


Figura 29. a) Imagen Capturada de 10 MPs no tintados, b) Imagen Capturada de 15 MPs no tintados

4.6 Detección Y Cuantificación De MPs

Se realizaron entrenamientos para las muestras tintadas, no tintadas y para la mezcla de las muestras tintadas y no tintadas, las imágenes alimentadas al algoritmo dieron como resultado concentraciones estimadas, las cuales al compararlas con las reales calculamos el error promedio de cada una de las muestras. En general al comparar los resultados que se describen a detalle con las tablas y los gráficos, observamos que el error promedio de estimación es de 0.89 para los tintados, 1.34 para los no tintados y 1.01 para la mezcla de las dos muestras, los resultados son bastante prometedores y podemos asociarlos con la calidad de las imágenes que se obtuvieron del sistema desarrollado.

Para los MPs tintados se puede observar que el error promedio de estimación 0.89 en la Tabla 8, la Figura 30 muestra el grafico comparativo de las concentraciones reales y estimadas de los MPs tintados, la tendencia de los datos estimados se

aproxima mucho a las concentraciones reales y se puede observar que solo existe una variación que sale de la media en la concentración de 40 MPs, es posible que debido a las condiciones del tipo de muestra la predicción tenga más variaciones en una que en otra, ya que el colorante utilizado en las muestras tintadas permite que los MPs sean visualizados más fácilmente y por lo tanto que el procesamiento de información de la imagen sea más certero.

Tabla 8. Cuantificación Global en muestras de MPs tintados

Cuantificación Global en muestras con MPs Tintados		
Concentración (MPs)	Estimación Promedio (MPs)	Error Promedio (MPs)
0	0.28	0.28
5	5.18	0.18
10	10.74	0.76
16	15.79	0.28
20	19.98	0.16
25	24.10	0.90
30	29.42	0.79
40	35.55	4.45
45	44.78	0.22
Error promedio		0.89 MPs

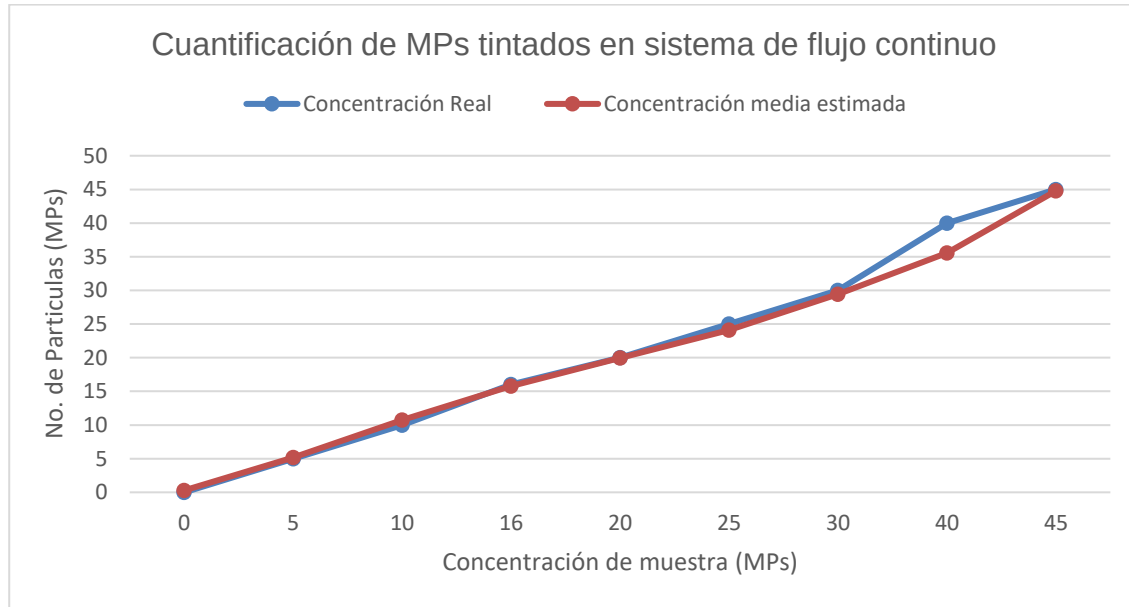


Figura 30. Gráfico de concentraciones reales y estimadas en MPs tintados

En el caso de las muestras de los MPs no tintados, se puede observar en la Tabla 9 que el error promedio es de 1.34 y que los valores reales como estimados, son sumamente cercanos, por excepción de las concentraciones de 20 MPs y 30 MPs, en el grafico comparativo que se muestra en la Figura 31, se observa una tendencia de las concentraciones estimadas muy semejante a las concentraciones reales, para las concentraciones de 20 y 30, se puede observar una leve sobre estimación de partículas, es posible que debido a la mayor complejidad de los datos extraídos de las imágenes, sea necesario aumentar el tamaño de datos para el entrenamiento y validación.

Tabla 9. Cuantificación Global en muestras de MPs no tintados

Cuantificación Global en muestras con MPs no tintados		
Concentración (MPs)	Estimación Promedio (MPs)	Error Promedio (MPs)
0	0.02	0.02
5	5.30	0.30
10	11.04	1.09
16	16.84	2.69
20	23.45	3.45
25	25.13	0.36
30	33.87	3.88
40	40.01	0.27
45	44.97	0.03
Error Promedio		1.34 MPs

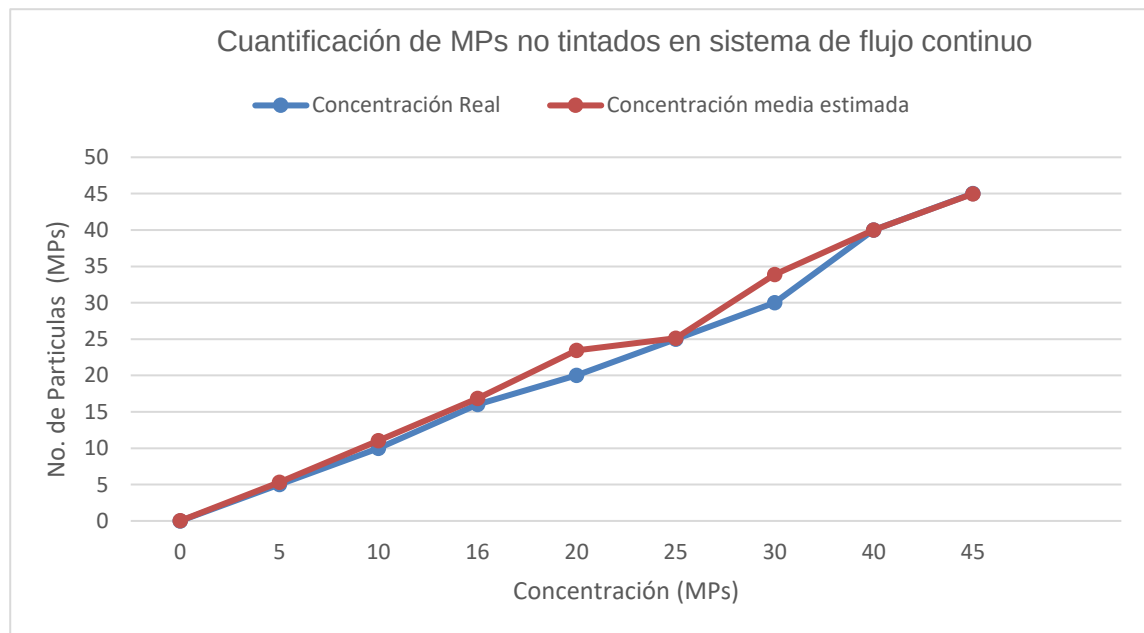


Figura 31. Gráfico de concentraciones reales y estimadas en MPs no tintados

Los resultados de las mezclas de las muestras se pueden observar en la Tabla 10, con un error global promedio de 1.01 Mps, las concentraciones de 16 y 20 Mps tuvieron una pequeña sobre estimación, aunque el grafico 32 muestra que la concentración real como la estimada, siguen la misma tendencia, lo que sugiere que las estimaciones son certeras y el hecho de que los errores en la mayoría de las concentraciones son bajos indica que el modelo puede seguir ajustándose para seguir disminuyendo el error.

Tabla 10. Cuantificación Global en la mezcla de muestras de MPs tintados y no tintados

Cuantificación Global en muestras con mezclas de MPs		
Concentración	Estimación Promedio	Error Promedio
0	0.18	0.18
5	5.00	0.58
10	10.52	0.53
16	18.42	2.42
20	22.96	2.96
25	24.51	0.60
30	29.78	0.44
40	39.31	0.76
45	44.36	0.64
Error promedio Global		1.01 MP

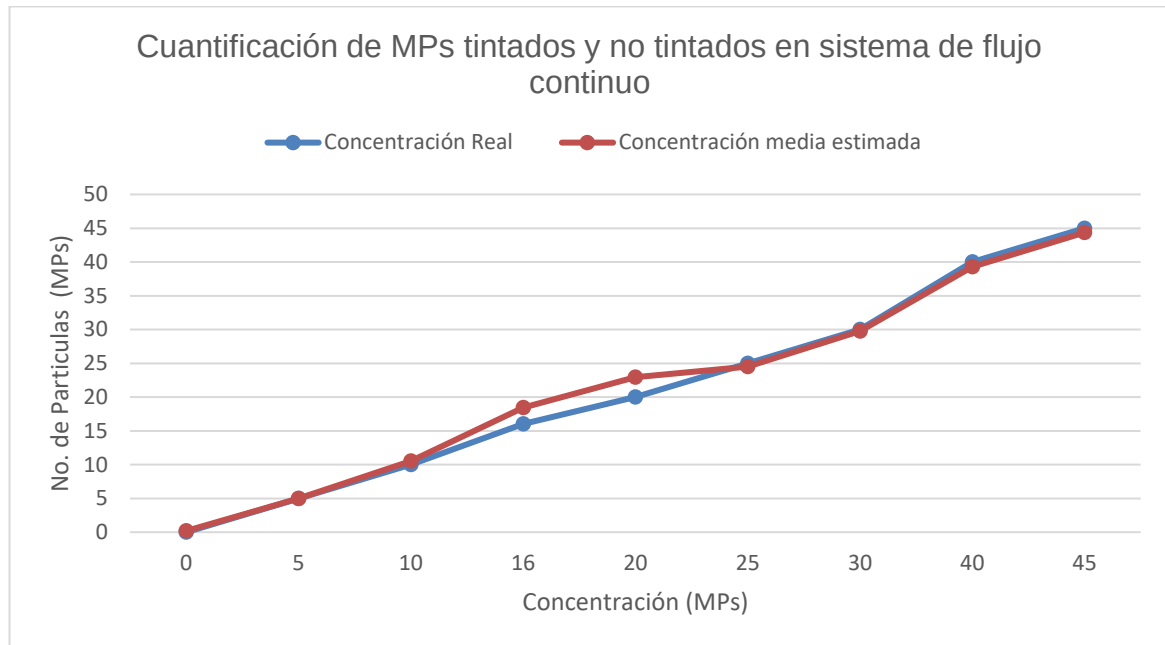


Figura 32. Gráfico de concentraciones reales y estimadas en mezcla de muestras de MPs tintados y no tintados

4.7 Precisión Del Modelo

Las métricas de entrenamiento y validación que se presentan en la Tabla 11 muestran que el modelo clasificó correctamente el 94.36% de los ejemplos de entrenamiento de MPs tintados y el 93.2% de los ejemplos de entrenamiento de MPs no tintados. En la fase de validación, el modelo obtuvo una precisión de 94.7% para los MPs tintados y 89.17% para los MPs no tintados, lo que sugiere que el modelo es ligeramente más efectivo en clasificar muestras tintadas. La desviación estándar de la precisión durante el entrenamiento y durante la validación fue baja pero ligeramente mayor en los MPs no tintados, indicando que la precisión del modelo fue bastante consistente, especialmente para las muestras tintadas.

Se realizó un entrenamiento con la mezcla de los dos tipos de muestra, los resultados son sumamente prometedores ya que los valores obtenidos están dentro

del rango de las muestras tintadas y no tintadas, en el entrenamiento se obtuvo un 93.9% de precisión media y en la fase de validación un 90.65%.

La media de la pérdida tanto de entrenamiento como de validación, indica qué tan bien el modelo se está ajustando a los datos y los valores menores indican un mejor ajuste, los valores de pérdida para los dos tipos de muestra indican que el modelo obtuvo un buen desempeño. La desviación estándar de la pérdida durante el entrenamiento y validación sugiere que la pérdida fue bastante consistente a lo largo de las diferentes épocas de entrenamiento y validación, con ligeramente una mayor consistencia en las muestras tintadas. El modelo se entrenó durante 120 épocas para los MPs tintados y 135 épocas para los MPs no tintados, y 120 épocas para las mezclas, lo que indica que el modelo tuvo suficientes ciclos de entrenamiento para aprender patrones complejos en todos los casos.

Tabla 11. Comparativa de métricas de entrenamiento y validación

Métrica/Muestra	Valores tintados	Valores no tintados	Valores de mezcla
Training Accuracy mean	0.9436	0.9320	0.9390
Training Accuracy std	0.0027	0.0071	0.0059
Training Loss mean	0.2022	0.2335	0.2271
Training Loss std	0.0209	0.0286	0.0166
Validation Accuracy mean	0.9470	0.8917	0.9065
Validation Accuracy std	0.0112	0.0430	0.0073
Validation loss mean	0.1832	0.2998	0.2622
Validation loss std	0.0326	0.1203	0.0211
Epochs mean	120.0	135.0	120.0
Epochs std	0.0	8.6603	0.0

4.7.1 Métricas de entrenamiento y validación para MPs tintados

El gráfico de *training accuracy* promedio que se muestra en la Figura 33, indica la precisión promedio del entrenamiento a lo largo de 120 épocas para los MPs tintados. En este gráfico se puede observar claramente un aumento constante en la precisión del modelo, alcanzando valores superiores a 0.9 y cercanos al 0.95, logrando estabilizarse a partir de la época 80, esto indica una mejora continua del modelo en la clasificación correcta de los datos de entrenamiento.

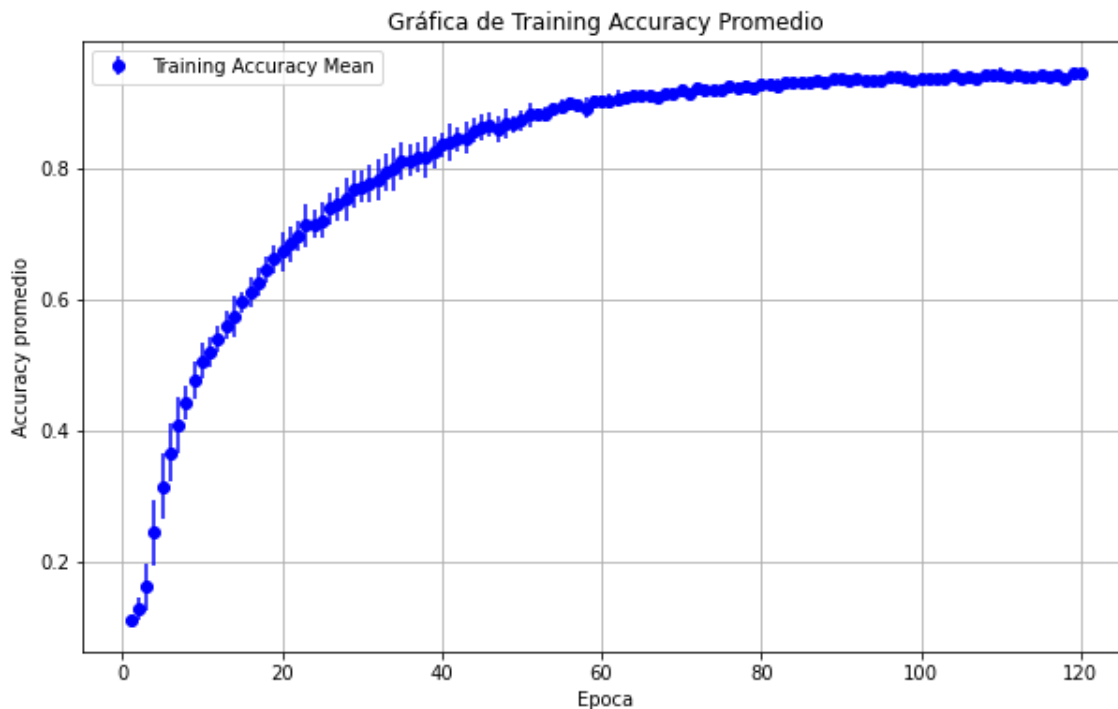


Figura 33. Gráfico de Training Accuracy Promedio para MPs Tintados

El grafico de *training loss* promedio que se observa en la Figura 34, ilustra la pérdida promedio del entrenamiento a lo largo de las 120 épocas. Esta pérdida disminuye de manera constante y progresiva, acercándose a cero, lo cual indica que el modelo está minimizando correctamente el error en los datos de entrenamiento.

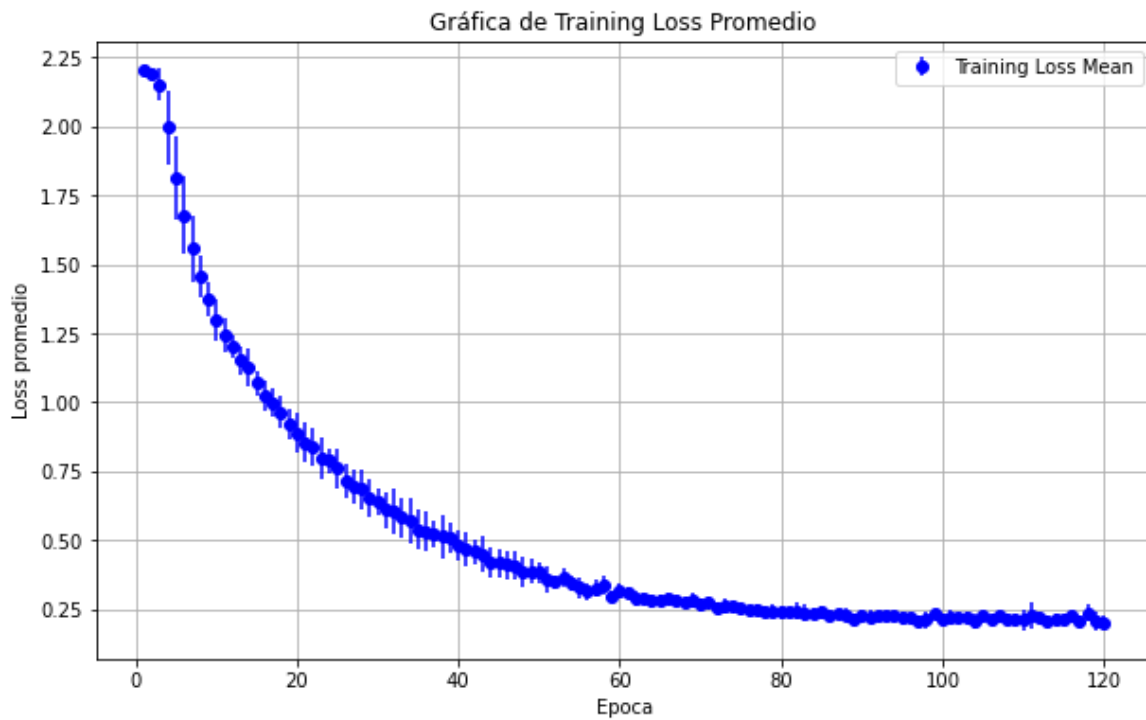


Figura 34. Gráfico de Training Loss Promedio para MPs Tintados

La precisión promedio de validación se observa en el grafico 35, se muestra en el conjunto de datos de los MPs tintados que la precisión de validación incrementa de manera constante a través de las 120 épocas, se observa la tendencia a estabilizarse por encima de 0.90 llegando casi al 0.95, se observan también algunas fluctuaciones, pero ninguna por debajo de 0.8 lo que indica que el modelo mantiene un buen rendimiento en la clasificación de datos de validación.

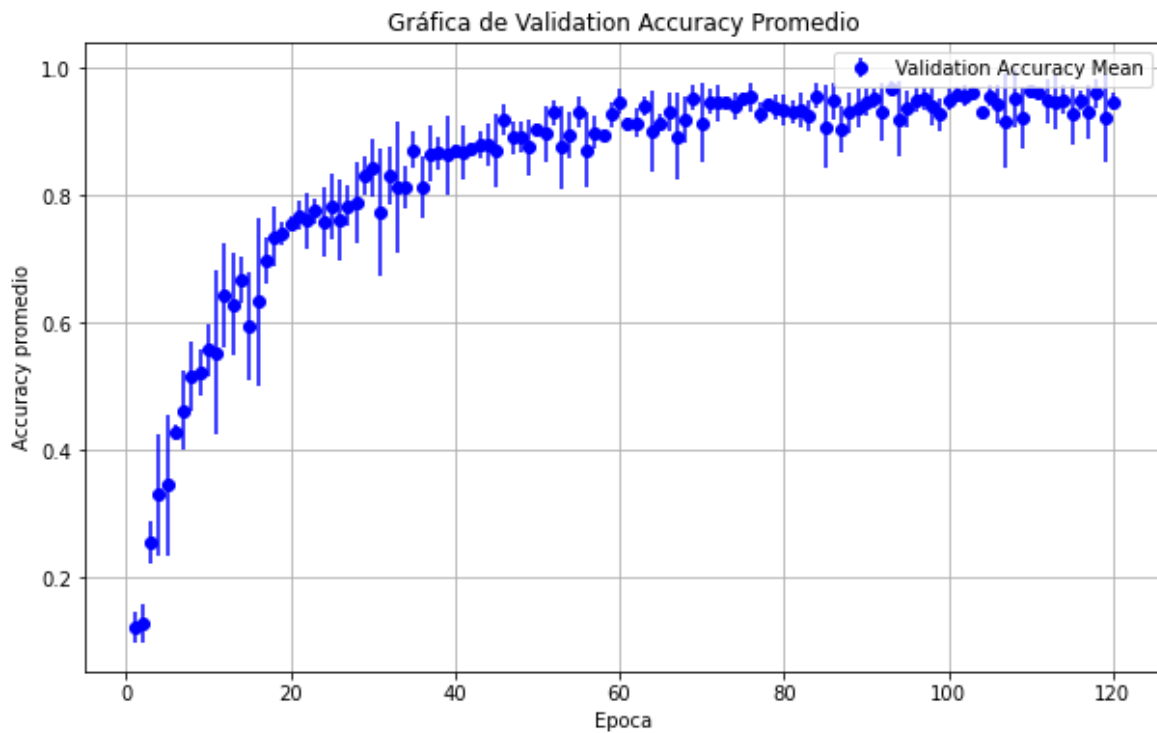


Figura 35. Gráfico de Validation Accuracy Promedio para MPs Tintados

El gráfico de la Figura 36 presenta la pérdida promedio de validación de las 120 épocas para los MPs tintados. La pérdida de validación se ve disminuida con el tiempo, tomando en promedio alrededor de los valores debajo de 0.25, se observan fluctuaciones que indican que el modelo tiene inestabilidades en cómo generaliza a datos no vistos o que es posible que necesite más datos de entrenamiento y

validación. Aunque se observa una tendencia a la baja en el gráfico y esto sugiere que el modelo mejora su rendimiento en datos no vistos a lo largo del entrenamiento.

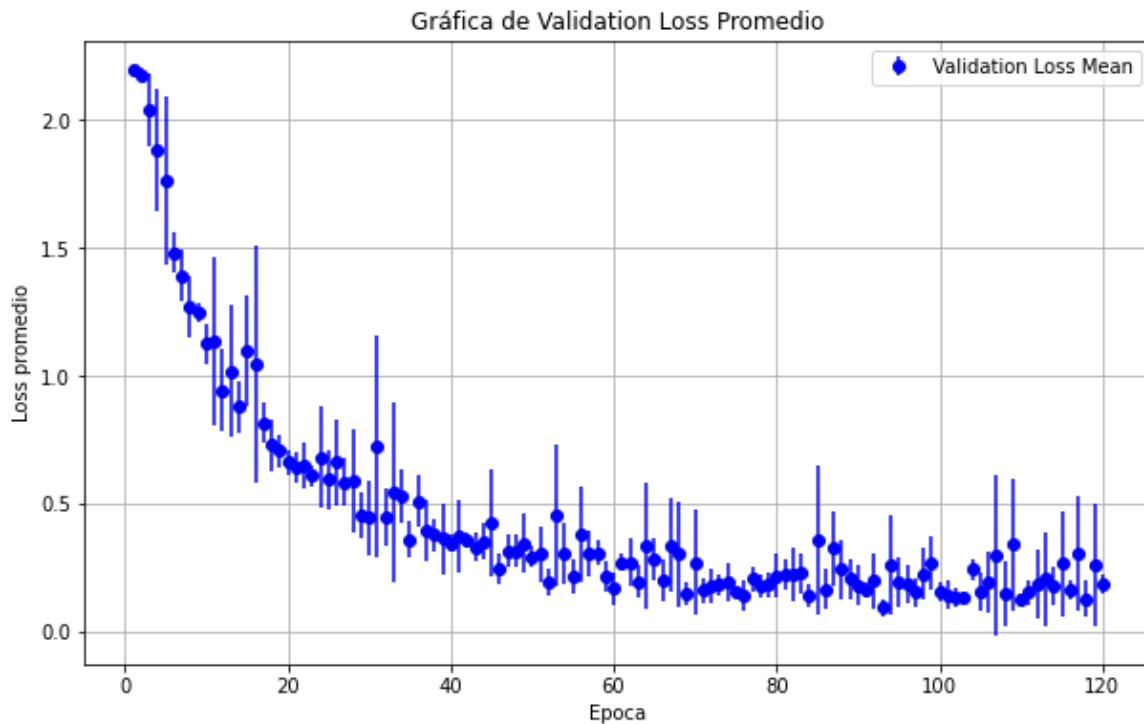


Figura 36. Gráfico de Validation Loss Promedio para MPs Tintados

4.7.2 métricas de entrenamiento y validación para MPs no tintados

El gráfico de training accuracy promedio en la Figura 37, muestra la precisión promedio del entrenamiento a lo largo de 140 épocas en los MPs no tintados. Se puede observar una mayor variabilidad en la precisión en las primeras épocas, aunque también se ve una tendencia de aumento constante en la precisión y el alcance de la estabilidad en la época 100 con valores superiores a 0.9, lo que indica una mejora continua del modelo en la clasificación correcta de los datos de entrenamiento.

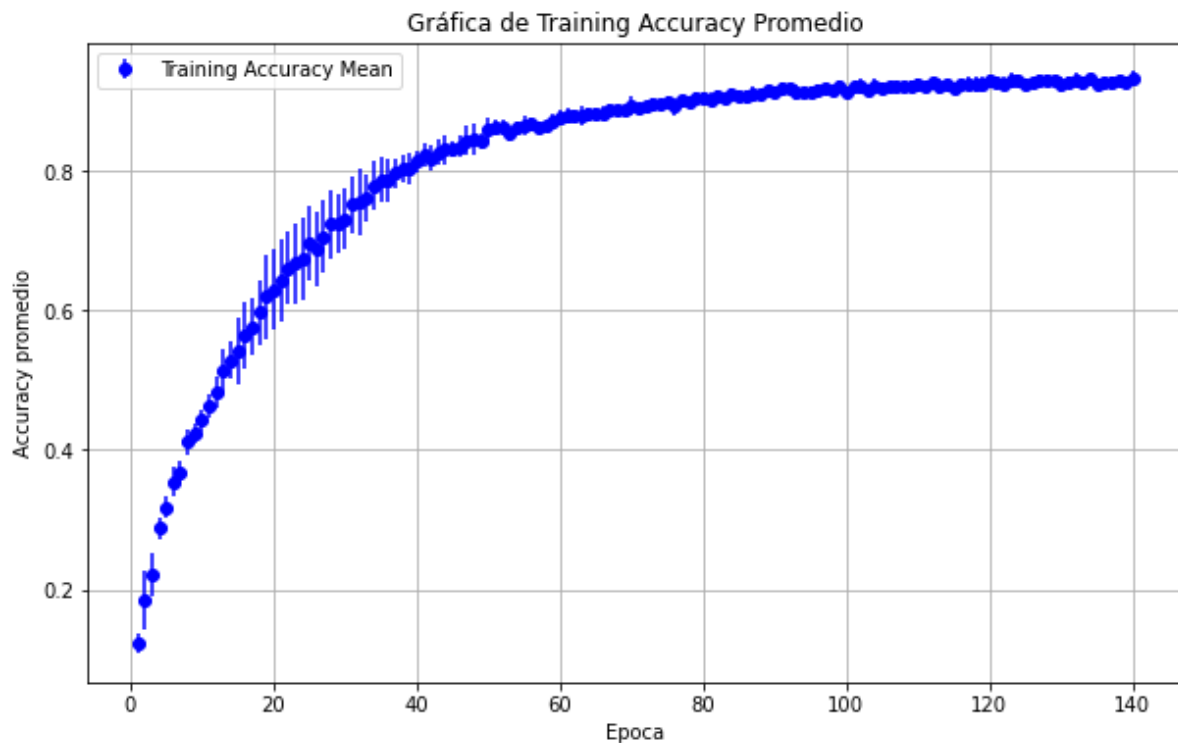


Figura 37. Gráfico de Training Accuracy Promedio para MPs No Tintados

El grafico de *training loss* promedio en la Figura 38, ilustra la pérdida promedio del entrenamiento a lo largo de 140 épocas para los MPs no Tintados. La pérdida disminuye de manera constante y progresiva, acercándose a un valor de 0.25 con algunas fluctuaciones y una variación más marcada después de la época 120 lo que podría indicar un error en los datos de entrenamiento o un sobre ajuste, dejando de lado este hallazgo se observa una buena tendencia hacia valores pequeños, lo cual

es indicativo de que el modelo está minimizando efectivamente el error en los datos de entrenamiento.

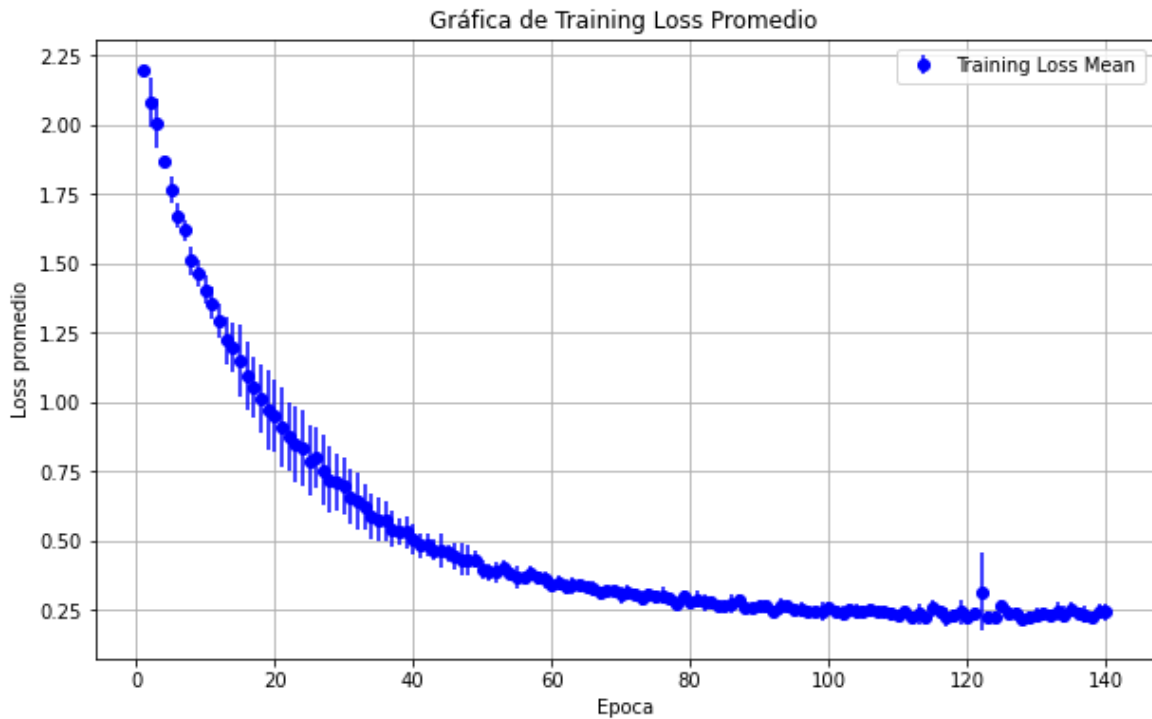


Figura 38. Gráfico de Training Loss Promedio para MPs No Tintados

El gráfico de *validation accuracy promedio* en la Figura 39 presenta la precisión promedio de validación durante 140 épocas para los MPs no tintados. La precisión de validación aumenta de manera constante, aunque existen fluctuaciones con variaciones muy visibles, estas se van viendo disminuidas a lo largo de las épocas, se aprecia una tendencia a estabilizarse cerca de la época 130 con valores cercanos

al 0.9, esto indica que el modelo puede mejorarse, pero mantiene un buen rendimiento en la clasificación de datos de validación.

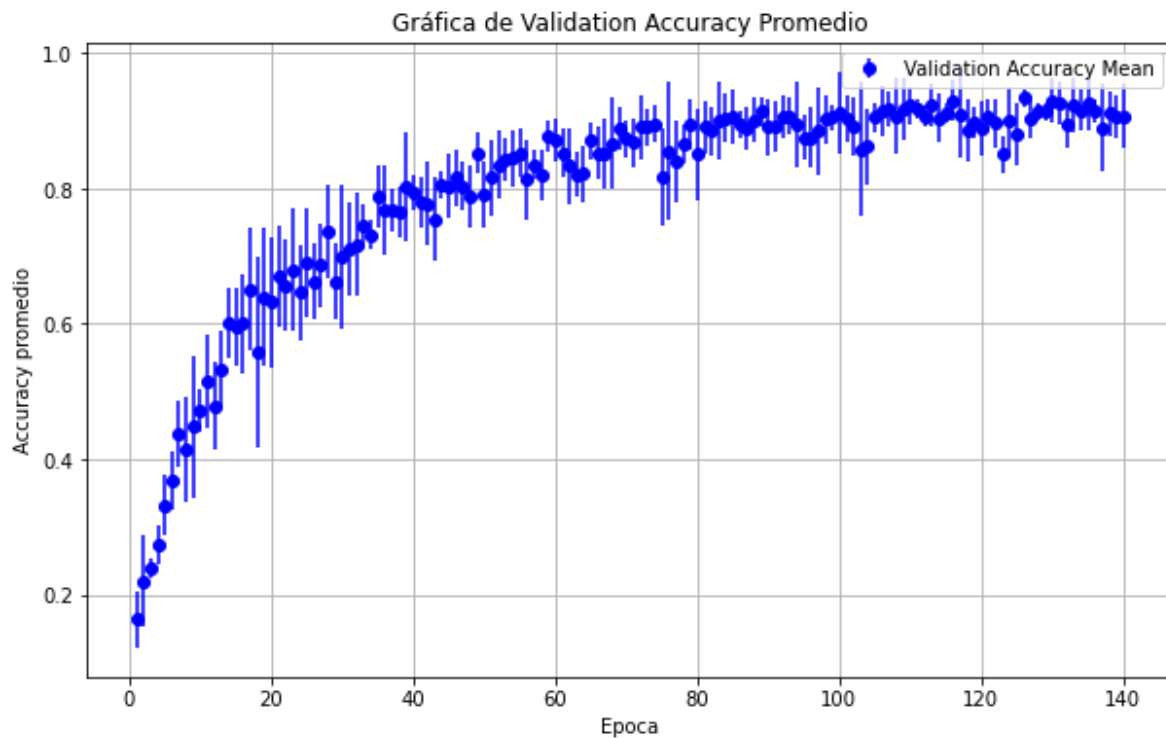


Figura 39. Gráfico de Validation Accuracy Promedio para MPs No Tintados

El gráfico de *validation loss promedio* en la Figura 40, muestra la pérdida promedio de validación a lo largo de 140 épocas para los MPs no tintados. La pérdida de validación muestra una tendencia a disminuir con las épocas, sin embargo, existen fluctuaciones que denotan la variabilidad de la pérdida por ejemplo entre las épocas 60 y 80, logrando, estabilizándose alrededor de un valor debajo del 0.3. esto sugiere que pueden existir fallas en la generalización debido a ruido o errores en los datos de validación, indicando que se puede optimizar el modelo por ejemplo añadiendo más datos para que sean lo suficientemente representativos para reducir la variabilidad, aun así, el modelo muestra que mejora su rendimiento en datos no vistos a lo largo del entrenamiento.

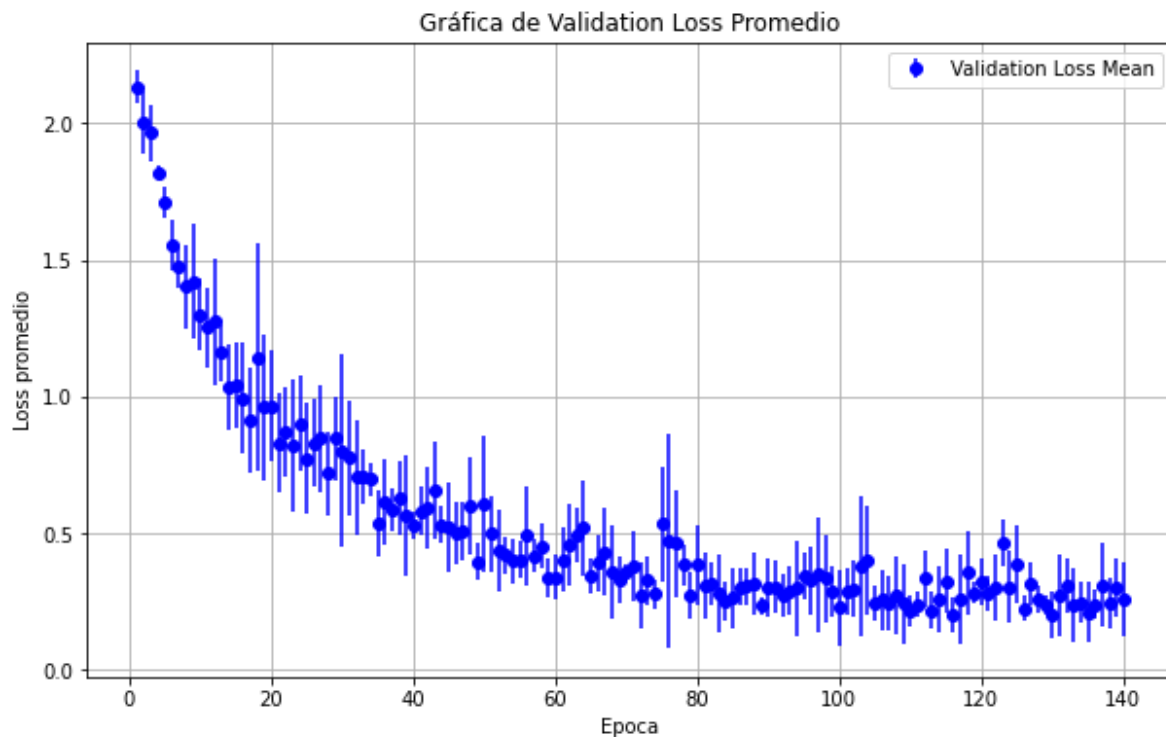


Figura 40. Gráfico de Validation Loss Promedio para MPs No Tintados

4.7.3 Métricas de entrenamiento y validación para las mezclas de MPs tintados y no tintados.

La gráfica 41 muestra el comportamiento de la precisión promedio del modelo durante el entrenamiento a lo largo de 120 épocas. Se observa que la precisión incrementa rápidamente en las primeras 20 épocas, alcanzando aproximadamente el 0.8 para la época 20. Después de este punto, el incremento en la precisión es más gradual y con muy poca variación, se observa la estabilización en la época 60 a más del 0.9 hasta llegar a las épocas finales. Este comportamiento sugiere que el modelo está aprendiendo de manera efectiva y alcanzando un buen rendimiento conforme avanza el entrenamiento.

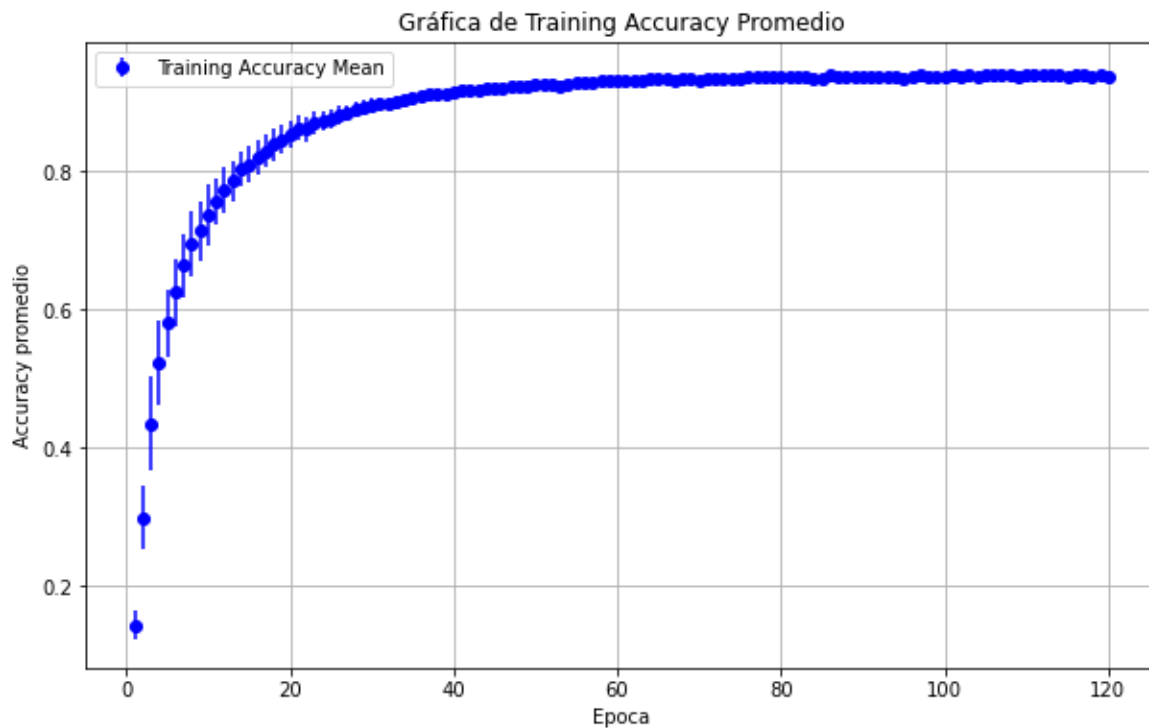


Figura 41. Gráfico de Training Accuracy Promedio para mezclas de MPs tintados y no tintados

El gráfico de pérdida promedio del entrenamiento se muestra en la Figura 42 e ilustra la disminución de la pérdida promedio del modelo durante el entrenamiento a lo largo de 120 épocas. La pérdida disminuye rápidamente durante las primeras 20 épocas, pasando de un valor inicial por encima de 2.0 a aproximadamente 0.5. A partir de la época 20, disminución de la pérdida se vuelve más lenta, logra estabilizarse por valores cercanos 0.2 en las últimas épocas. Este patrón indica que el modelo está mejorando su capacidad de predicción al reducir el error de manera consistente durante el entrenamiento.

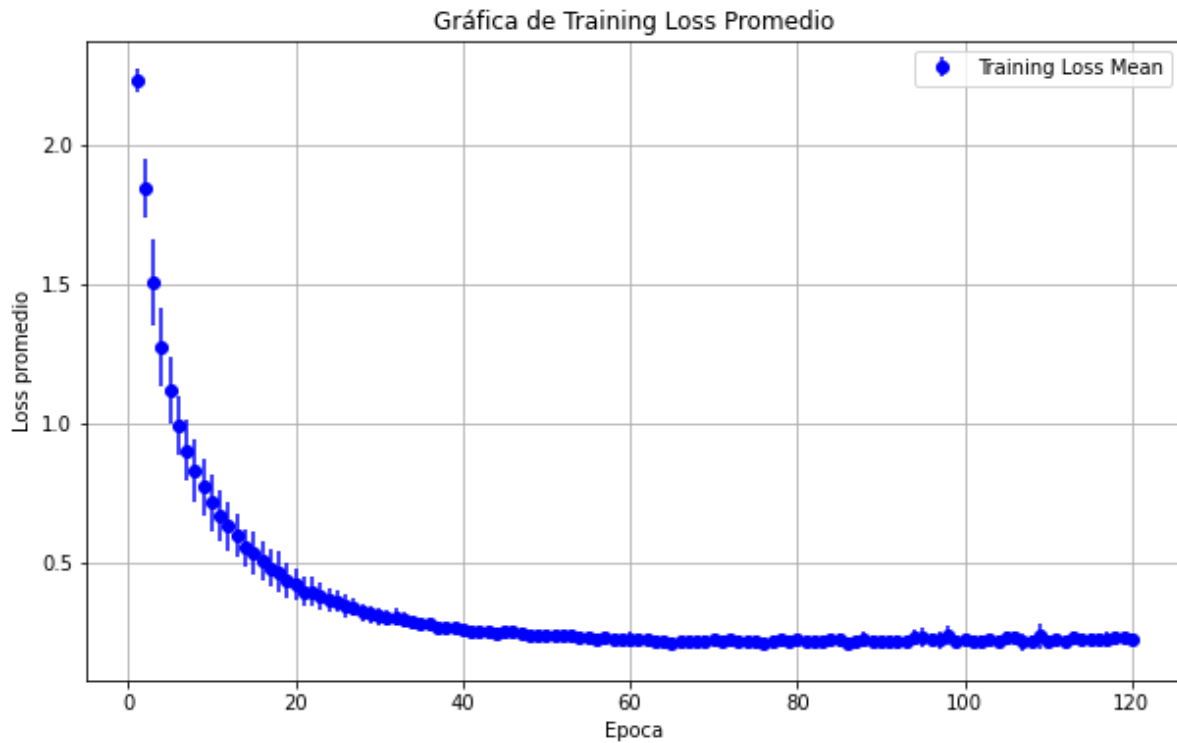


Figura 42. Gráfico de Training Loss Promedio para mezclas de MPs tintados y no tintados

El gráfico 43, muestra el comportamiento de la precisión promedio del modelo en el conjunto de validación a lo largo de las 120 épocas. Se observa que la precisión incrementa rápidamente en las primeras épocas, alcanzando un valor mayor a 0.8 para la época 30. Después de este punto, el incremento es más gradual y con pequeñas variaciones en las épocas finales. Este comportamiento sugiere que el modelo mantiene un buen rendimiento en el conjunto de validación conforme avanza el entrenamiento.

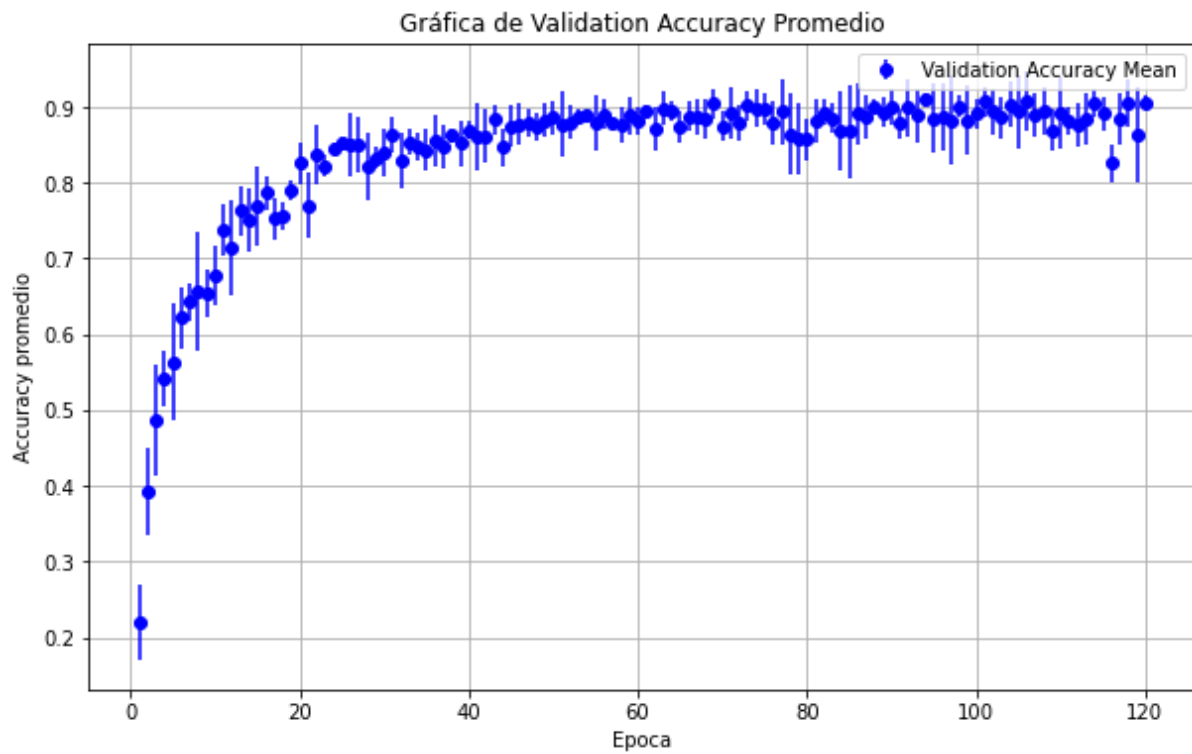


Figura 43. Gráfico de Validation Accuracy Promedio para mezclas de MPs tintados y no tintados

La pérdida de validación promedio se ve ilustrada en el gráfico 44 que muestra disminución de la pérdida promedio del modelo en el conjunto de validación a lo largo de 120 épocas. La pérdida disminuye rápidamente durante las primeras épocas, pasando de un valor inicial por encima de 2.0 a aproximadamente 0.5. A partir de la época 20, la disminución de la pérdida se vuelve más lenta, en las últimas épocas se observan pequeñas fluctuaciones y variabilidad en los valores de pérdida, estos puntos indican que, aunque la pérdida promedio se ha estabilizado en gran medida, hay ligeras variaciones que pueden atribuirse a factores como ruido en los datos de validación o posible sobreajuste del modelo, A pesar de estas fluctuaciones, la estabilidad general de la pérdida sugiere que el modelo ha aprendido a generalizar bien en el conjunto de validación.

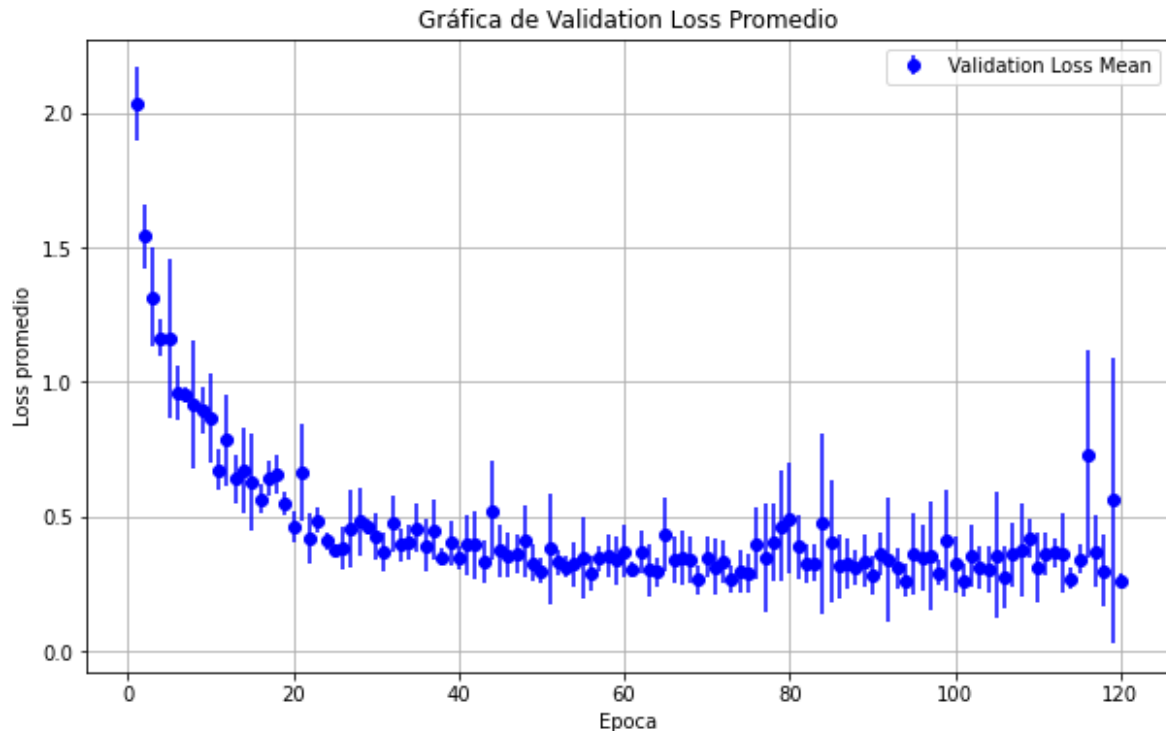


Figura 44. Gráfico de Validation Loss Promedio para mezclas de MPs tintados y no tintados

Los resultados indican que el modelo funciona mejor con las muestras tintadas en términos de precisión y consistencia, mostrando menor pérdida y variabilidad. Las muestras no tintadas y la mezcla de las muestras, ya que estas presentan mayor variabilidad y un ajuste ligeramente inferior, lo que sugiere que el modelo podría estar mejor optimizado para las muestras tintadas.

Los modelos para MPs tintados parecen aprender más rápido, alcanzando valores estables de precisión y pérdida en menos épocas en comparación con los MPs no tintados, aunque la mezcla de las muestras tiene valores que se aproximan a los MPs tintados. La mezcla de ambas muestras indica que el modelo es más eficiente, en cuanto al número de épocas necesarias para alcanzar esa estabilidad. Aunque todos los modelos logran un rendimiento similar en términos de precisión y pérdida

al final del entrenamiento y validación, se tiene la certeza que los tres modelos han logrado un buen rendimiento y una correcta clasificación.

CONCLUSIONES

En este estudio, se implementó un sistema óptico para la detección y cuantificación de MPs mediante un diseño de experimentos de dos factores, el cual permitió explorar exhaustivamente las distintas combinaciones de cámaras y fuentes de iluminación. Este análisis proporcionó una comprensión detallada de su desempeño y sus interacciones, se determinó que la combinación de una cámara industrial, la Raspberry Pi High Quality Camera y una fuente LED azul generaba la menor cantidad de ruido en una imagen.

El polímero utilizado en las muestras fue el polietileno de baja densidad transparente, es por lo que se consideró tener dos tipos de muestra, una con MPs no tintados y otra con MPs tintados con Rojo de Nilo. Debido a que el colorante fluórese con luz azul, se decidió hacer una comparación de los espectros de emisión de las fuentes de iluminación utilizadas en el diseño de experimentos, con el espectro de absorción del Rojo de Nilo, se identificó al LED azul como la fuente óptima para inducir la fluorescencia de las partículas tintadas.

A fin de establecer una configuración del sistema óptico como punto de partida, se definieron los siguientes parámetros; Para la cámara: apertura de $f/1.6$, la cual es la máxima apertura que permitió la lente que contribuyó a lograr una mayor entrada de luz al sensor, velocidad de obturación de $1/60$ s, ya que se necesitaba una captura rápida de las partículas ya que estas se encontraban en constante movimiento y se quería evitar el obtener imágenes con partículas traslapadas; y una distancia promedio de 35 cm entre la celda y el sensor. Para la fuente de iluminación: Se determinó para ambas muestras una tira de LED azul por debajo de la celda, el ángulo de incidencia del faro LED azul de en las muestras tintadas fue de 25° con respecto a la cámara ya que, debido a la fluorescencia del tinte, la iluminación reflejada por las partículas con ese ángulo permitió su visualización en las imágenes capturadas y para las muestras no tintadas se estableció un ángulo de incidencia de 125° respecto a la cámara, ya que este arreglo permitía obtener

una mayor iluminación de las partículas, la transparencia de las partículas dificultaba su visualización y debido a ello y a su tamaño era necesario aumentar la intensidad luminosa.

A fin de separar la iluminación de la fuente, de la iluminación que emiten las partículas, se colocó un filtro naranja frente a la lente, así la imagen capturada resaltó los MPs en color naranja y evitó el color azul de fondo, en el caso de las muestras no tintadas debido a la transparencia de las partículas y el requerimiento de una mayor iluminación, se colocó un espejo posterior a la celda, frente al LED, para reflejar la iluminación de regreso a la celda y tener mayor iluminación favoreciendo la visualización de las partículas.

La celda de contención de partículas fue hecha con vidrio y tenía dimensiones de 5 x 1.5 x 7 cm, el área de la cara capturada era de 35 cm² y fue necesario tener especial cuidado con la limpieza de la celda para evitar añadir ruido por suciedad en las paredes de la celda, en la imagen capturada.

Se determinó entonces que la configuración final del sistema óptico está conformado por una cámara Raspberry Pi HQ con una resolución de 12 MP que captura la imagen de una celda de vidrio que encuentra al frente a 35 cm de distancia de la cámara, también, por LEDs azules que se encuentran iluminando en un rango de 25° a 125° con respecto a la cámara y debajo de la base de la celda, un filtro naranja colocado frente al lente de la cámara que contribuyó a la visualización de las partículas tintadas y un espejo colocado después de la celda, frente al faro LED que permitió una mayor cantidad de iluminación, tanto la nitidez de las imágenes como la cantidad de iluminación recibida fueron fundamentales ya que determinó la cantidad de detalle que se podía capturar en las imágenes, esto permitió que las partículas de 500 micrómetros en movimiento, pudiesen ser visualizadas, es por lo que, con esta configuración general, se logró obtener imágenes adecuadas para su posterior procesamiento.

Finalmente, mediante la etapa de detección y cuantificación con redes neuronales convolucionales, demostró que el algoritmo fue capaz de detectar y cuantificar MPs en muestras de MPs tintados y no tintados, con concentraciones de 0, 5, 10, 16, 20, 25, 30, 35, 45, con un error promedio en la cuantificación, de 1.34 partículas para MPs no tintados, 0.89 partículas para MPs tintados y 1.01 partículas para las mezclas de ambas muestras. La precisión obtenida en las métricas tanto de entrenamiento como de validación indica la efectividad del sistema óptico configurado en este trabajo para la detección de MPs.

La obtención de imágenes de adecuada resolución en este sistema óptico es crucial por varias razones: se capturan detalles finos y características precisas de los MPs, lo que permite un análisis detallado. Esto es esencial para realizar evaluaciones más fiables, reduciendo el riesgo de errores en la identificación y cuantificación. Además, las imágenes obtenidas del sistema facilitarán el procesamiento y análisis posterior, mejorando la efectividad de técnicas como el reconocimiento de patrones y la visión por computadora. Los datos de las imágenes obtenidas del sistema podrían utilizarse para futuros análisis, referencias y comparaciones, debido a que, este sistema óptico respalda la obtención y presentación de la información de manera clara, esto también podría ayudar a facilitar la toma de decisiones informadas en la detección y análisis de MPs.

La implementación de este sistema, aunque fue diseñado para MPs, puede tener diversas aplicaciones para la detección de más sustancias, como medicamentos, fibras, microfibras, sólidos suspendidos, algunos metales pesados en partículas como cadmio, plomo y mercurio, residuos agrícolas como herbicidas y fertilizantes, etc. El área de aplicación es vasta y puede ayudar a contribuir a la detección de contaminantes que pueden afectar la calidad del agua y tener impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente. La detección y monitoreo de estas partículas es crucial para la gestión y protección de los recursos hídricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. E. Newton, "Plastics and microplastics : a reference handbook", p. 311.
- [2] "Characterization and Analysis of Microplastics", p. i, 2017, doi: 10.1016/S0166-526X(17)30014-4.
- [3] "Handbook of Microplastics in the Environment", *Handbook of Microplastics in the Environment*, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-39041-9.
- [4] H. K. Karapanagioti y I. K. Kalavrouziotis, "Microplastics in water and wastewater", p. 213.
- [5] R. J. (Roy J. Crawford, *Plastics engineering*. Pergamon Press, 1987.
- [6] M. S. Bank, Ed., *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*. en Environmental Contamination Remediation and Management. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-78627-4.
- [7] R. G. González-Acuña, H. A. Chaparro-Romo, y I. Melendez-Montoya, *Optics and Artificial Vision*. IOP Publishing, 2021. doi: 10.1088/978-0-7503-3707-6.
- [8] Malacara Daniel, *Óptica básica* , 3a edición. Fondo de Cultura Económica , 2015.
- [9] G. S. Landsberg, *Óptica*. Mir, 1983.
- [10] S. J. Russell y P. Norvig, *Inteligencia artificial: un enfoque moderno* , 2a. ed. ALHAMBRA, 2004.
- [11] "▷ Diferencia entre un diodo LED y un diodo láser ✓ 2022". Consultado: el 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://fesiluz.com/cuales-la-diferencia-entre-un-diodo-led-y-un-diodo-laser>
- [12] M. Freeman, *Compendio de fotografía digital*. Evergreen, 2009. Consultado: el 17 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com/books/about/Compendio_de_fotograf%C3%ADa_digital.html?hl=es&id=kf7aPwAACAAJ
- [13] J. Garcia Fernandez, "Lámparas incandescentes." Consultado: el 17 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/lincan.html>
- [14] R. A. Serway, *Física* , Cuarta edición., vol. tomo 2. McGraw-Hill, 1982.
- [15] K. Arnaiz, *Fotografía desde cero* . Independiente, 2020.
- [16] "Cámara web empresarial Logitech C920e para reuniones profesionales". Consultado: el 27 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.logitech.com/es-mx/products/webcams/c920e-business-webcam.960-001401.html#specs>
- [17] "Cámara web magnética Pro 4K Logitech para Apple Pro Display XDR". Consultado: el 30 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.logitech.com/es-mx/products/webcams/4k-pro-magnetic-webcam.960-001292.html>
- [18] "▷ Cámaras Industriales: 8 tipos, características para la industria". Consultado: el 27 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.edsrobotics.com/blog/camaras-industriales/>

- [19] “¿Qué es una cámara DSLR? | Adobe”. Consultado: el 27 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://www.adobe.com/cl/creativecloud/photography/discover/dslr-camera.html>
- [20] Javier Martínez Llamas, “RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES”, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2018.
- [21] R. Venkatesan y B. Li, “Convolutional Neural Networks in Visual Computing : A Concise Guide”, *Convolutional Neural Networks in Visual Computing*, oct. 2017, doi: 10.4324/9781315154282.
- [22] S. Khan, H. Rahmani, S. A. A. Shah, y M. Bennamoun, “A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision”, *Synthesis Lectures on Computer Vision*, vol. 8, núm. 1, pp. 1–207, feb. 2018, doi: 10.2200/S00822ED1V01Y201712COV015.
- [23] “Comprar iPhone 13 rosa 128gb | MacStore Online”. Consultado: el 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.macstoreonline.com.mx/apple/iphone-13/iphone478-iphone-13-rosa-128gb?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auryBhDzARIsALIo6v-PwDGBA2uIPQj1Ro_8ALat__0i04Nwzb8kd5nPj7ZLjNvI0GqifXAaAjQsEALw_wcB
- [24] “Compra Microsoft LifeCam Cinema con Micrófono, USB 2.0, Negro H5D-00013 | Cyberpuerta.mx”. Consultado: el 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cyberpuerta.mx/Computadoras/Webcam-Audio/Webcams/Microsoft-LifeCam-Cinema-con-Microfono-1280-x-720-Pixeles-USB-2-0-Negro.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auryBhDzARIsALIo6v9f8_mrn4qb07Cv09JDVGRMhda0OxWzaqjUbKSbmRwi-fzA4BkelQcaAlwPEALw_wcB
- [25] “Cámara Canon Rebel T8i EF-S 18-55mm IS STM | Canon Tienda Online”. Consultado: el 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.tiendacanon.com.mx/es/catalogo/rebel-t8i-ef18-55mm?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auryBhDzARIsALIo6v9xPI7DltIry8vB2ijpRIsZGPEHKnLGH8rGklkGGPaju9XUmY6YTz0aAsA8EALw_wcB
- [26] “Cámara oficial Raspberry Pi (solo cuerpo de cámara, sin lente) : Amazon.com.mx: Electrónicos”. Consultado: el 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com.mx/C%C3%A1mara-oficial-Raspberry-Pi-cuerpo/dp/B08CVPYR3C>
- [27] “2.5W 445nm TTL Módulo Láser Azul de Enfoque Ajustable 100-240V Cabeza de Láser Grabado Modulewith Disipador de Calor para DIY Máquina Grabadora Láser : Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar”. Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.amazon.com.mx/dp/B076KKQK41/?coliid=I3O6FR5E4LJQLI&colid=O7TR9Y9OCY8T&psc=1&ref_=lv_ov_lig_dp_it
- [28] “Volteck MR-1650X, Lámpara de halógeno : Amazon.com.mx: Hogar y Cocina”. Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://www.amazon.com.mx/Volteck-MR-1650X-Foco-Hal%C3%B3geno-MR/dp/B011VPS6TY/ref=sr_1_3?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=LIJ56Z02DMST&keywords=lampara+de+halogeno&qid=1679590969&s=tools&sprefix=lapara+de+halogeno%2Chi%2C129&sr=1-3

- [29] “(2) Led Smd 3w Azul Real Royal Blue Con Disipador | MercadoLibre”. Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-579869334-led-smd-3w-azul-real-royal-blue-con-disipador-_JM
- [30] “(2) Faros Luces Led Para Motos Auto Doble Color Impermeable Par | MercadoLibre”. Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1855933519-faros-luces-led-para-motos-auto-doble-color-impermeable-par-_JM
- [31] E. Coronado, “Patrones de calibración para OpenCV – Mecatrónica UASLP”. Consultado: el 17 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://mecatronicauaslp.wordpress.com/2014/03/08/patrones-de-calibracion-para-opencv/>
- [32] L. Nalbone, A. Panebianco, F. Giarratana, y M. Russell, “Nile Red staining for detecting microplastics in biota: Preliminary evidence”, *Mar Pollut Bull*, vol. 172, p. 112888, nov. 2021, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112888.
- [33] J. Lorenzo-Navarro *et al.*, “Deep learning approach for automatic microplastics counting and classification”, *Science of The Total Environment*, vol. 765, p. 142728, abr. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142728.