

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Facultad de Ciencias e Ingeniería**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**MÓDULO DE AUTOMATIZACIÓN DEL TIEMPO DE  
EXPOSICIÓN DE UNA CÁMARA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Frank Henry Montalván Sánchez**

ASESOR: Ing. Carlos Saito Villanueva

**Lima, Septiembre de 2020**

## Resumen

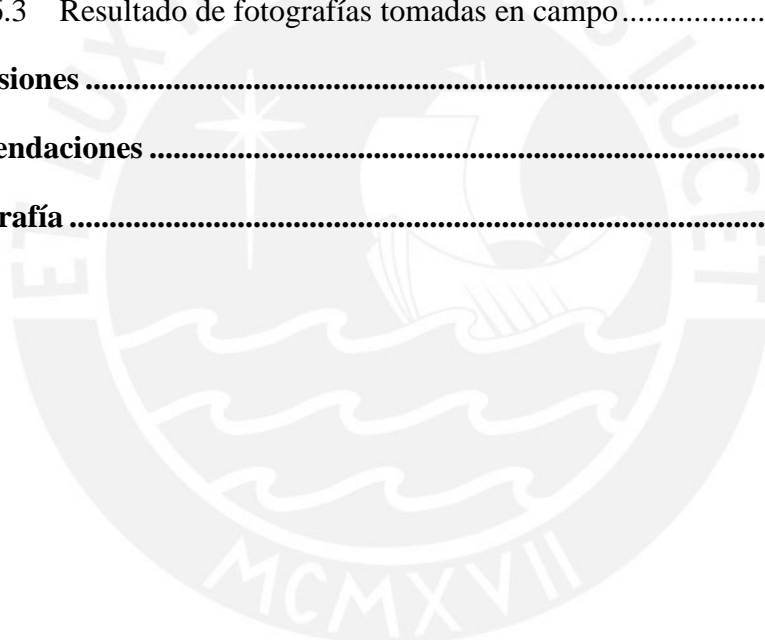
En la actualidad, cada vez se hace más frecuente el uso de drones para la recopilación de imágenes. Debido a la accesibilidad que poseen estos para sobrevolar espacios aéreos. Sin embargo, en esta tarea de recopilación de imágenes se dan los efectos de subexposición y sobreexposición. Los cuales dependiendo de su intensidad llegan a la saturación de diferentes píxeles de la imagen en las tonalidades negras y blancas respectivamente. Esta saturación conlleva a la pérdida de información en dichas imágenes.

La presente tesis se basa en el diseño de un módulo que automatice la regulación del tiempo de exposición de un par de cámaras de la marca Point Grey. Esta regulación se dará mediante el uso de un sensor de luminosidad, el cual medirá los niveles de flujo luminoso incidentes a la cámara por parte del escenario a fotografiar. La metodología seguida será la de integración por partes, desarrollando primero la comunicación del sensor de luminosidad con el controlador. Luego, se desarrollará la comunicación de las cámaras con el controlador haciendo una regulación manual del tiempo de exposición. Finalmente, se integrará ambas partes y se reemplazará la regulación manual por una automática en base a las medidas que registre el sensor de luminosidad. La lógica que relaciona la iluminación y el tiempo de exposición se condensa en una ecuación, la cual será ajustada mediante las pruebas realizadas para reducir los efectos de subexposición y sobreexposición.

# Índice

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I .....</b>	<b>3</b>
<b>Marco Problemático.....</b>	<b>3</b>
1.1 Problemática.....	3
1.2 Justificación del Estudio .....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Alcances .....	6
<b>Capítulo II.....</b>	<b>7</b>
<b>Marco Teórico .....</b>	<b>7</b>
2.1 Conceptos Principales .....	7
2.1.1 Cámaras digitales .....	7
2.1.1.1 Partes de una cámara.....	8
2.1.1.2 Principales funciones de una cámara fotográfica.....	9
2.1.2 Sensor de luz .....	12
2.1.3 Número f .....	12
2.1.4 Valor de Exposición.....	13
2.2 Antecedentes.....	14
2.2.1 Controlador automático.....	14
2.2.2 Controlador usando el brillo promedio de la imagen.....	16
2.2.3 Controlador Difuso .....	16
2.2.4 Controlador usando un sensor de luz .....	17
<b>Capítulo III .....</b>	<b>18</b>
<b>Diseño del módulo de automatización propuesto.....</b>	<b>18</b>
3.1 Consideraciones .....	18
3.2 Requerimientos .....	18
3.3 Comparación de componentes .....	19
3.3.1 Sensor de Luz.....	19
3.3.2 Controlador .....	20
3.4 Descripción del módulo de automatización .....	20
3.5 Software del módulo de automatización .....	22
3.5.1 Descripción de la lógica del programa del módulo de automatización ..	22
3.5.2 Desarrollo del programa del módulo de automatización .....	23
Sensor de Luminosidad .....	23
Relación entre valor de exposición y lux .....	23
Relación entre valor de exposición y tiempo de exposición .....	25

<b>Capítulo IV .....</b>	<b>27</b>
<b>Implementación y resultados .....</b>	<b>27</b>
4.1 Consideraciones de implementación.....	27
4.2 Hardware del módulo de automatización.....	27
4.2.1 Componentes.....	27
4.2.2 Diagrama de conexiones .....	30
4.3 Configuraciones .....	31
4.3.1 Configuración del sensor de luminosidad.....	32
4.3.2 Configuración manual del tiempo de exposición y ganancia.....	32
4.4 Integración del módulo de automatización .....	33
4.5 Pruebas para determinar la constante k.....	34
4.6 Resultados .....	47
4.6.1 Resultados con la cámara A .....	47
4.6.2 Comparación entre sistema automático y sistema propuesto.....	51
4.6.3 Resultado de fotografías tomadas en campo .....	55
<b>Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>59</b>



## Índice de Figuras

Figura 1: (a) imagen subexpuesta, (b) imagen deseada y (c) imagen sobreexpuesta.	5
Figura 2: Convirtiendo luz en archivo digital.	8
Figura 3: Partes de una cámara digital.	9
Figura 4: Tiempo Exposición 1/60 seg.	10
Figura 5: Tiempo de exposición 1/2 seg.	10
Figura 6: Apertura f4.      Figura 7: Apertura f16.	11
Figura 8: Efecto del ISO.	11
Figura 9: Enfoque en la Roca del centro.	15
Figura 10: Enfoque en la superficie del agua.	15
Figura 11: Brillo promedio vs Shutter Speed.	16
Figura 12: Diagrama de bloques del sistema.	21
Figura 13: Diagrama de flujo del Programa.	22
Figura 14: EV vs Lux. Relación logarítmica.	24
Figura 15: EV vs $\text{Log}_2(\text{Lux})$ . Relación lineal.	25
Figura 16: Cámara Point Grey (CMLN-13S2M-CS).	27
Figura 17: Lente 8.5mm de Edmund Optics.	28
Figura 18: Filtro Rojo.      Figura 19: Filtro Infrarrojo.	29
Figura 20: Sensor de luz (TSL-2561)	29
Figura 21: PcDuino v2 A10.	30
Figura 22: Diagrama de conexión del sistema.	31
Figura 23: (a) $t=10\text{ms}$ $\text{gain}=10\text{dB}$ , (b) $t=30\text{ms}$ $\text{gain}=10\text{dB}$ y (c) $t=50\text{ms}$ $\text{gain}=10\text{dB}$	32
Figura 24: Parte delantera del módulo (lentes, filtro y sensor de luminosidad).	33
Figura 25: Parte posterior del módulo (conexión física).	33
Figura 26: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.	35
Figura 27: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.	35
Figura 28: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.	36
Figura 29: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.	36
Figura 30: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.	36
Figura 31: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.	37
Figura 32: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.	37
Figura 33: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.	37
Figura 34: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.	38
Figura 35: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.	38
Figura 36: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.	38
Figura 37: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.	39

Figura 38: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	39
Figura 39: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	39
Figura 40: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	40
Figura 41: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	40
Figura 42: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma. ....	41
Figura 43: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma. ....	41
Figura 44: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma. ....	42
Figura 45: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma. ....	42
Figura 46: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma. ....	42
Figura 47: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma. ....	43
Figura 48: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma. ....	43
Figura 49: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma. ....	43
Figura 50: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma. ....	44
Figura 51: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma. ....	44
Figura 52: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma. ....	44
Figura 53: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma. ....	45
Figura 54: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	45
Figura 55: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	45
Figura 56: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	46
Figura 57: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma. ....	46
Figura 58: A la Izquierda, imagen tomada 10:38h y a la derecha su histograma. ....	47
Figura 59: A la Izquierda, imagen tomada 11:45h y a la derecha su histograma. ....	47
Figura 60: A la Izquierda, imagen tomada 12:53h y a la derecha su histograma. ....	48
Figura 61: A la Izquierda, imagen tomada 13:26h y a la derecha su histograma. ....	48
Figura 62: A la Izquierda, imagen tomada 13:47h y a la derecha su histograma. ....	48
Figura 63: A la Izquierda, imagen tomada 14:11h y a la derecha su histograma. ....	49
Figura 64: A la Izquierda, imagen tomada 14:50h y a la derecha su histograma. ....	49
Figura 65: A la Izquierda, imagen tomada 15:43h y a la derecha su histograma. ....	49
Figura 66: A la Izquierda, imagen tomada 16:00h y a la derecha su histograma. ....	50

Figura 67: Evolución de las fotografías con el sistema automático propio de las cámaras.....	50
Figura 68: Obtención de porcentajes de píxeles oscuros y claros.....	53
Figura 69: Obtención de porcentajes mínimos y máximos de variación. ....	54
Figura 70: Imágenes tomadas a las 11:00am. ....	56
Figura 71: Imágenes tomadas a las 12:10pm. ....	56
Figura 72: Imágenes tomadas a las 05:03pm. ....	56

## Índice de Tablas

Tabla 1: Relación de EV, tiempo de exposición y número f para ISO 100 .....	14
Tabla 2: Consideraciones para el valor de exposición .....	18
Tabla 3: Comparación de Sensores de Luz .....	19
Tabla 4: Puntaje de los Sensores .....	20
Tabla 5: Comparación entre Raspberry Pi3 y PcDuino v2 .....	20
Tabla 6: Espectro de medición por canal .....	23
Tabla 7: Correspondencia entre EV y Lux.....	24
Tabla 8: Características de lente 8.5mm Edmund Optics .....	28
Tabla 9: Características de los filtros .....	28
Tabla 10: Pines de Conexión Sensor de luz y PcDuino v2 .....	30
Tabla 11: Denominación de las cámaras.....	34
Tabla 12: Comparación de Píxeles oscuros y claros.....	52
Tabla 13: Comparación de la variación de fotografías .....	54

## Introducción

Actualmente el Grupo de Investigación de Sistemas Aéreos no Tripulados (GI-SANT) cuenta con dos cámaras Point Grey modelo CMLN-13S2M-CS que permiten la adquisición de imágenes captadas por un dron. Antes que el dron inicie el recorrido, un operario del GI-SANT regula el “tiempo de exposición”. Este término hace referencia al tiempo durante el cual el sensor de imagen de la cámara queda expuesto a la luz; la calidad de las imágenes depende de la relación entre la luminosidad del área a fotografiar y el tiempo de exposición. Por ello, una calibración errónea de este último llevará a que las imágenes salgan sobreexpuestas o subexpuestas.

El principal problema es la carencia de un ajuste automático del tiempo de exposición del sensor de imagen de las cámaras Point Grey. Esta carencia origina la sobreexposición o subexposición de las imágenes capturadas durante el vuelo del dron. Como consecuencia de ello, aumenta la probabilidad de obtener resultados erróneos en un posterior procesamiento de las imágenes.

La solución que se propone para resolver este problema es implementar un módulo de control electrónico que permita regular el tiempo de exposición de las cámaras Point Grey modelo CMLN-13S2M-CS de manera automática durante el recorrido de los drones. De esta manera, se espera reducir los efectos de subexposición y sobreexposición producidos por los cambios de luminosidad del ambiente. Para lograrlo tenemos la siguiente metodología.

- Realizar la comunicación I<sup>2</sup>C entre el sensor de luz (TSL-2561) y el PcDuino.
- Implementar el algoritmo que permita calcular el tiempo de exposición a partir de los datos leídos del sensor de luz.
- Establecer la comunicación entre el PcDuino y las cámaras Point Grey.
- Realizar la integración del sensor de luz, PcDuino y cámara fotográfica en un solo módulo.



La presente tesis busca complementar el trabajo realizado por el GI-SANT y mejorar la autonomía en la tarea de recopilación de imágenes. Para ello, se pretende disminuir los efectos de la variabilidad de luminosidad haciendo que el tiempo de exposición de las cámaras varíe conforme cambia la luminosidad del ambiente.

Existen varias alternativas para la automatización del tiempo de exposición de las cámaras, por ejemplo, esta puede hacerse mediante el empleo del controlador automático propio de la cámara, el controlador difuso o el controlador delta. De las 2 últimas opciones se puede apreciar que el controlador delta obtiene mejores resultados que el controlador difuso según la investigación de (Baca, 2013). En consecuencia esta tesis aportará un enfoque distinto que servirá de ayuda en la investigación del tema de automatización del tiempo de exposición en cámaras fotográficas.

La presente tesis se organiza de la siguiente manera. El capítulo 1 contiene la problemática, justificación, objetivos, y alcances. El capítulo 2 contiene los términos relevantes y los antecedentes. El capítulo 3 muestra el diseño del módulo de automatización. Por último, el capítulo 4 contiene los resultados y tablas comparativas con las diferentes tecnologías existentes.

# Capítulo I

## Marco Problemático

En esta sección se expone el principal problema a resolver. Luego, se justificará el presente trabajo de tesis. También, se mencionarán los objetivos, los cuales permitirán resolver la problemática con una metodología establecida. Por último, se presentarán las limitaciones de este trabajo.

### 1.1 Problemática

La representación de la realidad plasmada en una imagen ha sido facilitada por la fotografía. Sin embargo, desde los inicios de la fotografía, las cámaras requerían mecanismos que les permitieran ajustarse a las diferentes características de las escenas a fotografiar (p.e.: ambiente opaco, ambiente iluminado, etc.). Es así que surgen los mecanismos regulables en las cámaras fotográficas (p.e.: diafragma, tiempo de exposición, ISO, etc.). Estos mecanismos atenúan o acentúan aspectos de la escena a fotografiar (estas características serán explicadas con mayor detalle en el capítulo II). Con el paso de los años estos mecanismos, en su mayoría electromecánicos, han sido automatizados.

Con los avances tecnológicos, actualmente se tiene a los drones con los cuales se realizan múltiples tareas, entre ellas, la de monitorear zonas geográficas de diversos tipos como: ciudades, zonas agrícolas, etc. Actualmente el grupo de investigación de sistemas aéreos no tripulados (GI-SANT) se encarga, dentro de muchas labores, de monitorear espacios geográficos; y para ello, se tiene como etapa inicial la recolección de imágenes. Estas son tomadas desde los drones durante el recorrido de los mismos. El GI-SANT usa un par de cámaras Point Grey de manera manual. Previo al recorrido del dron se regula el tiempo de exposición de las cámaras dependiendo de la luminosidad del ambiente en ese instante. Debido a que el tiempo de exposición de las cámaras queda fijo, un cambio en la luminosidad de la escena a fotografiar causará que las fotografías queden sobreexpuestas o subexpuestas.

A lo largo del tiempo se fueron estudiando diversas formas de automatizar el tiempo de exposición para lograr un resultado óptimo y no perder información de las imágenes en este proceso. Uno de los primeros controladores que automatizan el ajuste del tiempo de exposición fue el controlador de brillo promedio, como su nombre lo menciona es fijado a un brillo determinado. La cámara aumentará o disminuirá el tiempo de exposición para que el brillo promedio de la imagen llegue a este valor de brillo fijado previamente, este método toma en cuenta el brillo de toda la imagen por ello ante escenas con fondo luminoso tenderán a salir subexpuestas. Otro sistema es el controlador difuso que en base a una previa clasificación de las escenas a fotografiar el sistema determinará si debe aumentar, disminuir o mantener el tiempo de exposición, sin embargo, este sistema es muy estático ante cambios en las escenas a fotografiar. También, tenemos al controlador automático que actualmente está presente en la mayoría de cámaras, este sistema regula el tiempo de exposición dependiendo de la zona de enfoque que uno elige, trabaja sobre un área específica de la escena este sistema podría sobreexponer o subexponer las fotografías si se enfoca un objeto muy oscuro o muy claro respectivamente. Cada uno de estos sistemas de automatización del tiempo de exposición poseen ventajas y desventajas de acuerdo a la escena a fotografiar.

## 1.2 Justificación del Estudio

Esta tesis busca resolver un problema en concreto que se presenta en el GI-SANT y es controlar el tiempo de exposición de dos cámaras Point Grey; y hacer de este, un proceso automático. Sin embargo, esta tesis también ayudará a futuros estudios relacionados a la automatización del tiempo de exposición. La regulación del tiempo de exposición se realizará en base a las medidas de luminosidad del ambiente usando un sensor de luz. Es importante tener una regulación adecuada del tiempo de exposición para retratar las escenas de forma realista. De lo contrario, se perderán detalles de las escenas, lo cual dificultará el proceso de monitoreo. En la Figura 1 se muestra los efectos del tiempo de exposición en las imágenes.

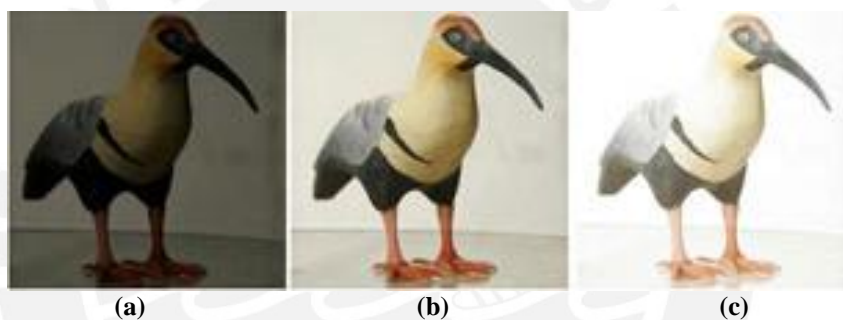


Figura 1: (a) imagen subexpuesta, (b) imagen deseada y (c) imagen sobreexpuesta. <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Fuente: Gonzáles Rodrigo. (2011). Guioteca. [www.guioteca.com/fotografia/entendiendo-la-exposicion-en-fotografia-1ª-parte/](http://www.guioteca.com/fotografia/entendiendo-la-exposicion-en-fotografia-1ª-parte/)

### 1.3 Objetivos

Generales:

Implementar un módulo de control electrónico que permita regular el tiempo de exposición de las cámaras Point Grey modelo CMLN-13S2M-CS de manera automática durante el recorrido de los drones.

Específicos:

- Realizar la comunicación I<sup>2</sup>C entre el sensor de luz (TSL-2561) y el PcDuino.
- Implementar el algoritmo que permita calcular el tiempo de exposición a partir de los datos leídos del sensor de luz.
- Establecer la comunicación entre el PcDuino y las cámaras Point Grey
- Realizar la integración, en un módulo, del sensor de luz, PcDuino y cámara fotográfica.

### 1.4 Alcances

La presente tesis trabajará con el modelo de cámaras CMLN-13S2M-CS de la marca Point Grey, con lo cual solo será aplicable a este modelo de cámaras. Sin embargo, la aplicación para otro modelo de cámara podrá realizarse sujeto a modificaciones dependiendo de las características que tenga la cámara.

# Capítulo II

## Marco Teórico

Esta sección se divide en dos subíndices: conceptos principales y antecedentes. En el primer subíndice se definirán los conceptos relevantes, para tener las nociones básicas del funcionamiento de una cámara digital. En el segundo subíndice se presentan estudios previos sobre la automatización del tiempo de exposición.

### 2.1 Conceptos Principales

A continuación, se explicará las partes y funciones de una cámara y como estas ayudan en la obtención de las imágenes, luego se tiene una explicación general de los sensores de luz. Finalmente, se describen conceptos teóricos relacionados al mundo de la fotografía.

#### 2.1.1 Cámaras digitales

Las cámaras digitales, a diferencia de las cámaras convencionales, usan un sensor de imagen sensible a la luz. Este sensor está compuesto por una malla de componentes fotosensibles, como fotodiodos o fototransistores, los cuales emiten niveles de corriente dependiendo de la cantidad de luz que captan. Según estos niveles de corriente se puede determinar la tonalidad de color que tendrá la imagen en cada unidad de coloración o pixel. En la figura 2 se muestra el proceso de obtención de un archivo digital de una imagen.

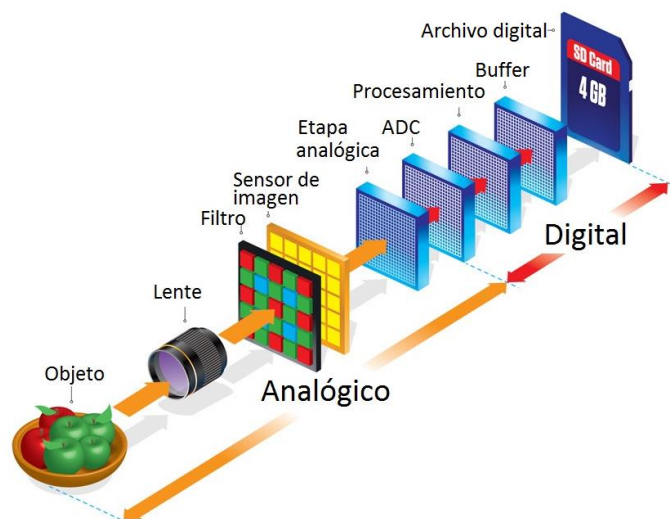


Figura 2: Convirtiendo luz en archivo digital.<sup>2</sup>

### 2.1.1.1 Partes de una cámara

Las partes de la cámara han ido variando a lo largo del tiempo. También, varían dependiendo del modelo de cámara. A continuación, se muestran las partes principales de una cámara profesional standard, como se muestra en la figura 3.

**Sensor de imagen:** El sensor responde a los estímulos luminosos produciendo cargas eléctricas y actúa como un transductor de energía lumínica a energía eléctrica (Martín, 2010). Estas cargas son interpretadas como tonalidades de color.

**Filtro del sensor de imagen:** Elemento que modifica las propiedades de la luz que incide en el sensor. Los filtros más usados son el filtro infrarrojo y el filtro Bayer (García, 2015). Este último separa los colores rojo, verde y azul que luego serán interpolados para formar un pixel.

**Diafragma:** Dispositivo que regula la cantidad de luz que ingresa a la cámara mediante la variación del tamaño de su agujero. Además, la variación de la apertura del diafragma varía la profundidad del campo (Busch, 2008).

<sup>2</sup> Fuente: Adaptado de digitalcamera. <http://www.digitalcameraworld.com>

**Obturador:** Dispositivo que impide que ingrese luz al sensor de imagen de la cámara, controlando el momento de captura del objeto a fotografiar. La velocidad con la que este mecanismo se mueve, descubriendo al sensor, determina el tiempo de exposición del sensor a la luz.

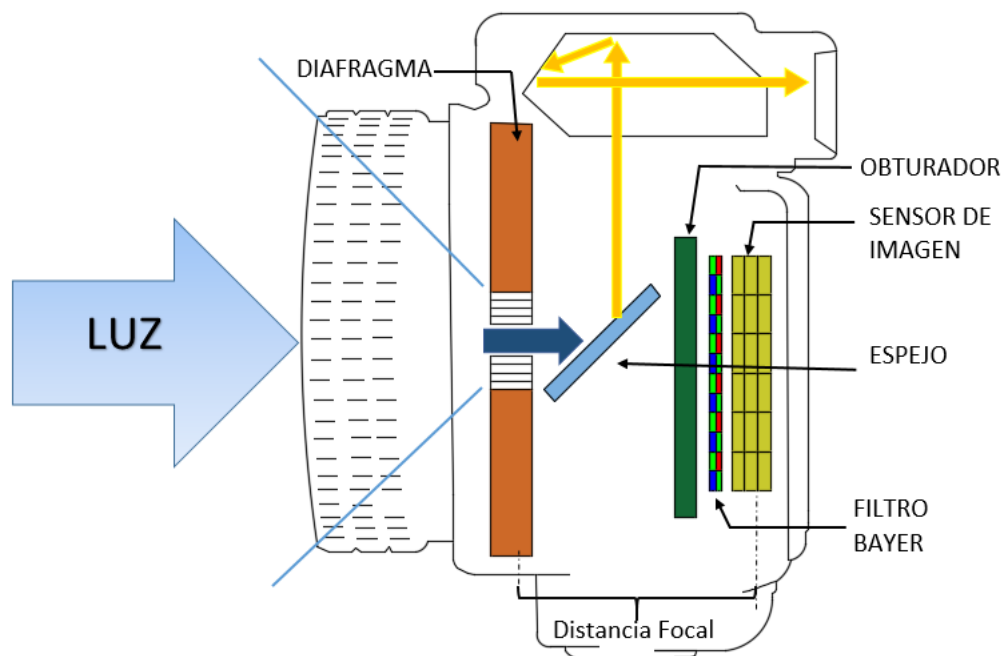


Figura 3: Partes de una cámara digital.<sup>3</sup>

#### 2.1.1.2 Principales funciones de una cámara fotográfica

La calidad de una imagen está sujeta a condiciones externas que presenta el objetivo que se quiere retratar. Dentro de estas condiciones se tiene a la luminosidad y a la movilidad. Para ello, las cámaras digitales cuentan con mecanismos regulables que disminuyen o acentúan los efectos que producen dichas condiciones.

**Tiempo de exposición o velocidad de obturación.** Es el tiempo que el obturador deja pasar la luz al sensor de la cámara fotográfica mientras mayor sea el tiempo de exposición, más luz ingresará al sensor y se podrá captar mejor las escenas con poca luminosidad. Sin embargo, al tener mayor tiempo de exposición, las escenas con movimiento saldrán borrosas (Ospina, 2017). En las Figuras 4 y 5 se muestran los efectos producidos por diferentes valores del tiempo de exposición.

<sup>3</sup> Fuente: Propia





Figura 4: Tiempo Exposición 1/60 seg.<sup>4</sup>

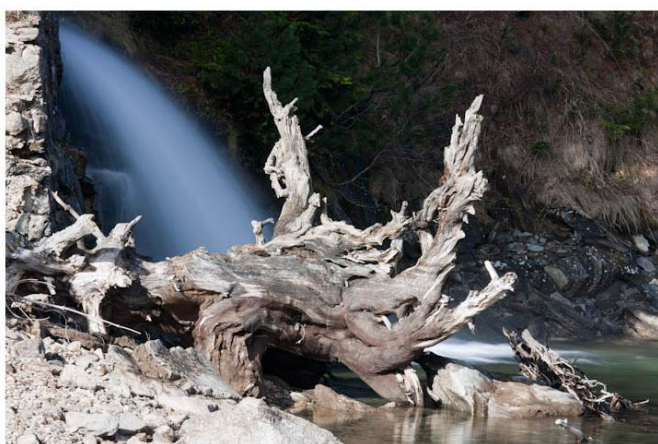


Figura 5: Tiempo de exposición 1/2 seg.<sup>5</sup>

**Profundidad del campo:** Es la distancia que hay entre el objeto enfocado y el resto de la escena que es capturada en la fotografía. Zona de la escena que aparece nítida (Langford, 1990).

**Apertura del diafragma:** El mecanismo consta de un orificio que aumenta o disminuye de tamaño permitiendo regular la cantidad de luz que ingresará a la cámara. Su principal efecto es la variación de la profundidad del campo. A mayor apertura del diafragma, mayor cantidad de luz ingresará a la cámara y se tendrá menos profundidad de campo (García, 2017). En las Figuras 6 y 7 se aprecia los efectos de la apertura del diafragma.

---

<sup>4, 5</sup> Fuente: García. (2017). Dgpfotografia. <http://dgpfotografia.com/tag/tiempo-de-exposicion/>



Figura 6: Apertura f4.<sup>6</sup>



Figura 7: Apertura f16.<sup>7</sup>

**ISO o sensibilidad:** En las cámaras digitales el sensor de imagen está compuesto por una malla de celdas fotosensibles que producen una señal dependiendo de la cantidad de luz que incide en esta. El ISO amplifica esta señal haciendo “más sensible” el sensor de imagen a la luz que incide en él. Sin embargo, al amplificar las señales de las celdas fotosensibles también amplificará el ruido que hay en ellas (León, 2017). Los efectos se muestran en la Figura 8.

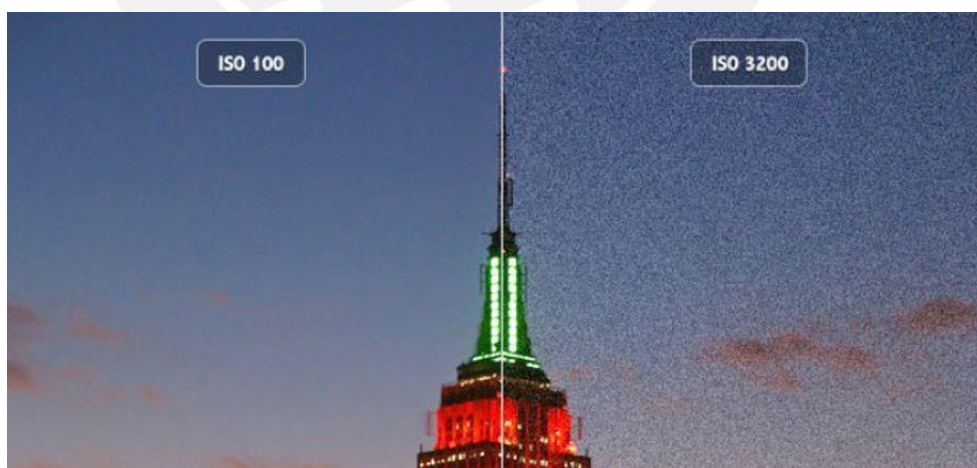


Figura 8: Efecto del ISO.<sup>8</sup>

<sup>6</sup> Fuente: García. (2017). Dgpfotografía. <http://dgpfotografia.com/tag/tiempo-de-exposicion/>

<sup>7</sup> Fuente: García. (2017). Dgpfotografía. <http://dgpfotografia.com/tag/tiempo-de-exposicion/>

<sup>8</sup> Fuente: Newzziper. (2017). [www.newzziper.com/2017/02/02/como-utilizar-el-iso-o-la-sensibilidad-a-la-luz/](http://www.newzziper.com/2017/02/02/como-utilizar-el-iso-o-la-sensibilidad-a-la-luz/)

### 2.1.2 Sensor de luz

Dispositivo que transforma la energía luminosa en una señal eléctrica. Compuesto de materiales que reaccionan ante la absorción de un fotón; por lo general, los electrones pasan de un nivel bajo a un nivel superior (Wilson, 2003).

**Iluminancia:** Cantidad de flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área (Ferrer, 1981). Se mide en lux=lumen/m<sup>2</sup>.

**Emitancia luminosa:** Cantidad de flujo luminoso que irradia una superficie por unidad de área, cuando esta es irradiada por alguna fuente luminosa (Desmarais, 1997). Se mide en lux=lumen/m<sup>2</sup>.

### 2.1.3 Número f

El número f (N) es usado para estandarizar en un mismo valor la intensidad de luz que pasa a través de cualquier lente de cámara, sin importar la variación de tamaño y forma que tenga la lente. Para ello, se tiene en cuenta que el área de apertura es proporcional al cuadrado del diámetro D. Este es un factor que afecta la intensidad de luz que puede ingresar por la lente. A mayor área mayor cantidad de luz ingresará, a menor área sucederá lo contrario. La intensidad de luz es una medida de la tasa con la que la energía llega al sensor CCD por unidad de área. Debido a que el área de la imagen es proporcional a la distancia focal f, cuando el objeto a fotografiar está a una distancia mucho mayor que f. Se concluye que la intensidad es proporcional a 1/f<sup>2</sup>. Por lo tanto, se concluye que I es proporcional a D<sup>2</sup>/f<sup>2</sup> (Serway, 2013). Por ello, Según (Castillo J. M., 2012) el número f (N) queda definido por la ecuación (1).

$$N = \frac{f}{D} \quad (1)$$

*I: intensidad de luz*

*D: diámetro efectivo del lente*

*f: distancia focal*

### 2.1.4 Valor de Exposición

El valor de exposición (EV por sus siglas en inglés) muestra las diferentes combinaciones entre tiempo de exposición y número  $f$  que dan la misma exposición. Esta misma exposición es representada a través de un número. Formalmente definido por (Ray, 2000):

$$Ev = \log_2 \frac{N^2}{t} \quad (2)$$

$N$ : Número  $f$

$t$ : Tiempo de exposición

Como se aprecia en la ecuación (2), el valor de exposición está en escala logarítmica esto implica que un cambio de 1 en el valor de exposición representa el aumento o disminución en un factor de 2 en el factor  $N^2/t$  (Douglas, 2007).

En la Tabla 1 se tiene la relación entre tiempo de exposición y número  $f$  que presentan el mismo valor de exposición. Por ejemplo, si para un día soleado se determina que el valor de exposición correcto es  $EV = 19$  usamos un número  $f/8$  y fijamos el tiempo de exposición en  $1/8000$  seg. Si de ahí se decide usar una apertura de diafragma de  $f/11$  entonces debemos aumentar en el doble el tiempo de exposición fijándolo en  $1/4000$  seg. Con esto se obtendrá la misma exposición.

La definición anterior de valor de exposición está dada para una sensibilidad de ISO 100. Sin embargo, no se ha descrito aun como afectó el aumento de la sensibilidad en el valor de exposición. Aumentar la sensibilidad al doble, esto es pasar del ISO 100 al ISO 200, aumentará el valor de exposición en uno y si volvemos a duplicar la sensibilidad, pasar de ISO 200 a ISO 400, volveremos a aumentar el EV en una unidad (Ray, Jacobson, Attridge, & Axford, 2000). Esto se resume en la ecuación (3).

$$EV = EV_{100} + \log_2 \left( \frac{ISO}{100} \right) \quad (3)$$

El valor de exposición también puede ser determinado midiendo la luz incidente (Ray, Jacobson, Attridge, & Axford, 2000). Como se muestra en la ecuación (4).

$$EV = \log_2 \left( \frac{E * ISO}{C} \right) \quad (4)$$

$E$ : iluminancia

$C$ : Constante de calibración del medidor de luz

**Tabla 1: Relación de EV, tiempo de exposición y número f para ISO 100 (Präkel, 2013)**

EV	Número f								
	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16
-1	2	4	8	15	30	60	2 min	4 min	8 min
0	1	2	4	8	15	30	60	2 min	4 min
1	1/2	1	2	4	8	15	30	60	2 min
2	1/4	1/2	1	2	4	8	15	30	60
3	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	15	30
4	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	15
5	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8
6	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4
7	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2
8	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1
9	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2
10	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4
11	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8
12	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15
13	1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30
14		1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60
15			1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125
16				1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250
17					1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500
18						1/8000	1/4000	1/2000	1/1000
19							1/8000	1/4000	1/2000

## 2.2 Antecedentes.

A continuación, se presentan algunos trabajos y estudios realizados para la automatización del tiempo de exposición.

### 2.2.1 Controlador automático

El modo de operación automático es propio de las cámaras fotográficas tanto para aficionados como para profesionales. En este modo de operación la cámara calcula los parámetros de apertura del diafragma y velocidad de obturación (FotoNavia, 2013). Este proceso toma en cuenta el enfoque de la cámara y dependiendo de este realiza los ajustes. Si en el enfoque se tiene un objeto oscuro, aumentará el tiempo de exposición de la cámara para captar mejor este objeto. Por el contrario, si se enfoca un objeto que refleja mucha luz, este sistema de control reducirá el tiempo de exposición. Al tener

en cuenta a los objetos que se enfocan, los objetos fuera de enfoque serán los más afectados dependiendo del contraste que exista entre estos objetos (enfocados y no enfocados). Este efecto se aprecia en las Figuras 9 y 10.

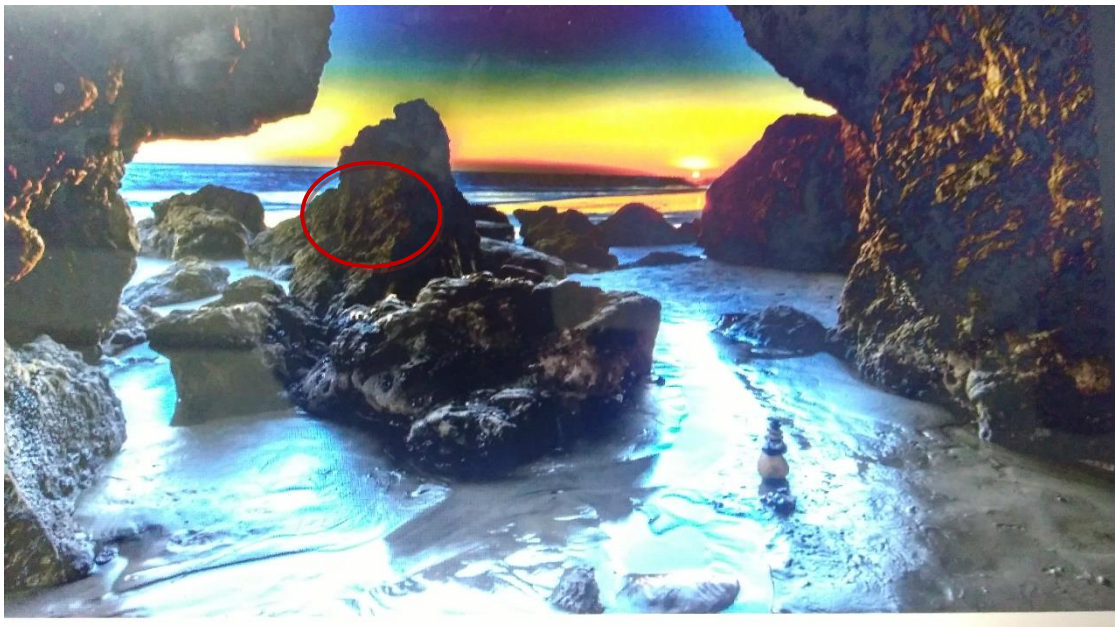


Figura 9: Enfoque en la Roca del centro.<sup>9</sup>

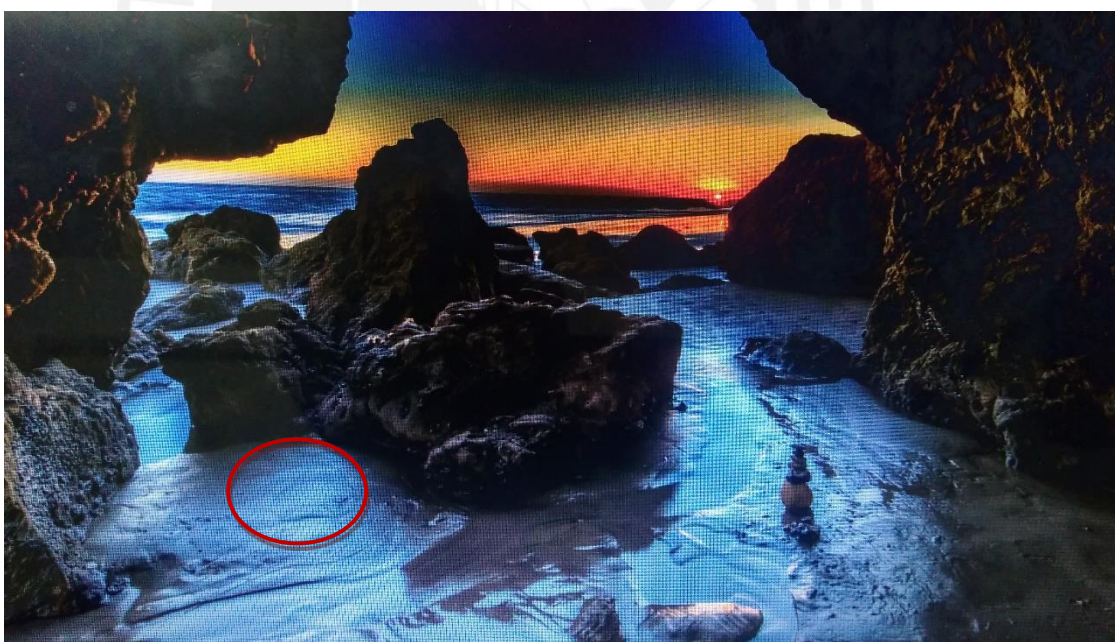


Figura 10: Enfoque en la superficie del agua.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> Fuente: Propia.

<sup>10</sup> Fuente: Propia.

### 2.2.2 Controlador usando el brillo promedio de la imagen

Este controlador de tiempo de exposición utiliza procesamiento de imagen para calcular el brillo promedio de la imagen en tiempo real, con este brillo promedio se calcula un error teniendo como referencia un brillo y un tiempo de exposición determinados. A partir del valor del error en el brillo promedio se determina si el tiempo de exposición de la cámara debe aumentar, disminuir o permanecer igual (Keun Woo Park, 2010). Como se muestra en la figura 11. Este método es considerado desfasado ya que puede obviar alguna zona principal de la imagen (Baca, 2013). Esto se da cuando el fondo y el objeto a fotografías presentan una alta diferencia de luminancia (Murakami & Honda, 1996).

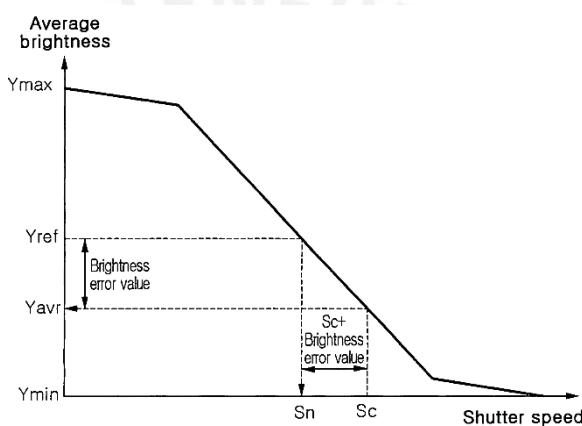


Figura 11: Brillo promedio vs Shutter Speed.<sup>11</sup>

### 2.2.3 Controlador Difuso

La lógica difusa se ha implementado en el control del tiempo de exposición aprovechando su lógica lingüística para describir este sistema de control (Kim, Reid, & Zhang, 2008). Para ello, se basa en un previo conocimiento de ajustes en las cámaras y de la escena a fotografiar, que posteriormente se ven reflejado en tablas o registros. Al tomarse una fotografía esta será categorizada como buena, opaca, oscura, etc. Y dependiendo de dicha clasificación se realizarán los ajustes necesarios para aumentar, disminuir o mantener el tiempo de exposición. Como ejemplo se tiene el trabajo de (Shimizu, Kondo, Kohashi, Tsurata, & Komuro, 1992). Donde su objetivo es compensar el tiempo de exposición para disminuir los efectos de subexposición y

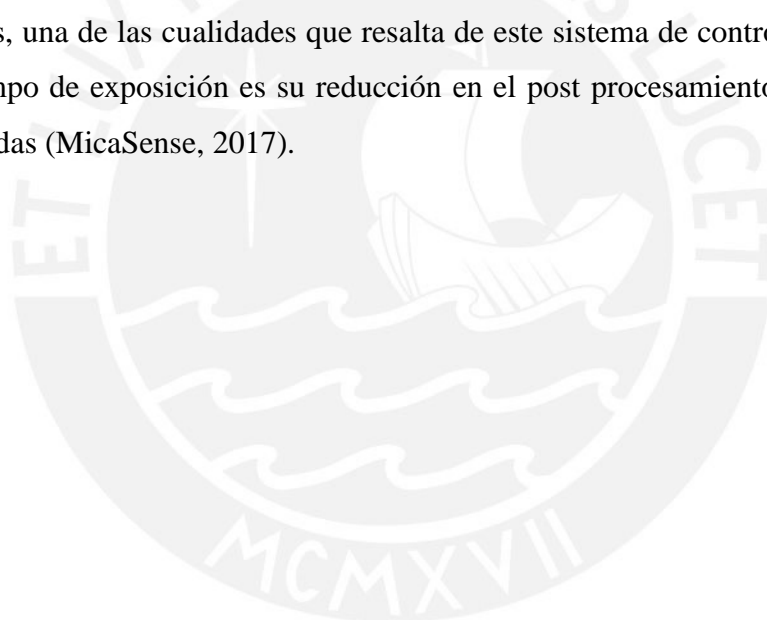
<sup>11</sup> Fuente: Keun Woo Park. (2010).

sobreexposición que se da cuando existe un contraste muy elevado entre el fondo y el objetivo a fotografiar. Sin embargo, la principal desventaja es que la lógica difusa no se adapta ante situaciones cambiantes (Castillo & Melin, 2008).

#### **2.2.4 Controlador usando un sensor de luz**

Este controlador monitorea la cantidad de luz incidente, a mayor luz captada por el sensor el tiempo de exposición debe ser menor para no sobreexponer el sensor de imagen de la cámara y posteriormente no tener una fotografía saturada en la tonalidad blanca. A menor cantidad de luz sensada el sensor de imagen de la cámara debe exponerse más para poder captar los detalles en la fotografía. Este sistema es ampliamente usado para la fotografía de vegetación pues los sensores de luz que se usan son multiespectrales los cuales aparte de sensar la luz visible, también captan la luz infrarroja (Al-Ali, Abdullah, Asadalla, & Gholoum, 2020).

Además, una de las cualidades que resalta de este sistema de controlador automático del tiempo de exposición es su reducción en el post procesamiento de las imágenes capturadas (MicaSense, 2017).





# Capítulo III

## Diseño del módulo de automatización propuesto

### 3.1 Consideraciones

La recolección de imágenes que realiza el GI-SANT se enfoca en los accidentes geográficos del Perú y zonas agrícolas. Las fotografías son tomadas por los drones a una distancia promedio de 100m. Debido a esto, la primera consideración es la fijación del rango de enfoque de la lente al infinito, de lo contrario se reduce la profundidad de campo y las imágenes saldrían borrosas. La segunda consideración a tomar en cuenta es la apertura del diafragma, la cual también interviene en la profundidad de campo, mediante pruebas se determinó que a partir de un  $f/2$  se obtiene imágenes aceptables. La tercera consideración es el ruido producto de aumentar la sensibilidad del sensor de imagen. Por ello, se fija la ganancia en 0dB para obtener el menor ruido posible. Los valores de las consideraciones se muestran en la Tabla 2. Una vez fijado estos valores, el tiempo de exposición es el único valor que determinará el valor de exposición.

**Tabla 2: Consideraciones para el valor de exposición**

Rango de Enfoque lente	$\infty$
Apertura de Diafragma (N)	$\geq 2$
Sensibilidad (Gain)	0dB
Tiempo de exposición (t)	Variable controlada

Por último, se debe tomar en cuenta que para estas aplicaciones se suele usar dos cámaras a la vez, una de las cámaras tendrá un filtro rojo y la otra cámara tendrá un filtro infrarrojo.

### 3.2 Requerimientos

Los siguientes requerimientos son la base para el diseño del módulo de automatización:

- Regular automáticamente el tiempo de exposición de las cámaras. Con un tope máximo del tiempo de exposición de 66ms.

- Aumentar la ganancia en 1dB en caso no se obtenga el brillo adecuado y el tiempo de exposición sobrepase los 66ms.
- Rango de operación del sistema debe ser entre las 9:30am y las 5pm.
- Usar los componentes (sensor de luminosidad, PcDuino y cámaras) del laboratorio del GI-SANT.

### 3.3 Comparación de componentes

#### 3.3.1 Sensor de Luz

Se realizará un estudio comparativo de los sensores de luminosidad que existen actualmente en el mercado y se determinará cual es el mejor de ellos en base a sus características eléctricas, costo y facilidad de obtención. Esta comparación se muestra a en la tabla 3.

**Tabla 3: Comparación de Sensores de Luz**

	Salida	Medición	error	Visible	Infrarrojo	Costo	Tiempo de obtención	Legenda
BH1680FVC	analógica	50K lux	+/- 15%	si	no	S/4.50	1mes importación	1 punto
TSL2561	digital (I2C)	65K lux	+/- 30%	si	si	S/5.20	inmediato	2 puntos
TSL4531	digital (I2C)	220K lux	+/- 20%	si	no	S/7.63	1mes importación	3 puntos
MAX44009	digital (I2C)	188K lux	15%	si	si	S/12.25	1mes importación	

Como se puede apreciar en la Tabla 4 el sensor que tuvo mayor puntaje es el TSL2561. Este es el sensor con el que el GI-SANT cuenta, tuvo mayor puntaje debido al costo y a la facilidad de obtención, pues como lo muestra la Tabla 3 el sensor MAX44009 posee mejores características en cuanto a error y medición máxima de cantidad de lux del ambiente. Por las facilidades, de tener a la mano el sensor TSL2561 y debido a sus características, como: comunicación i2C que reduce el ruido, medición del espectro visible que servirá para regular el tiempo de exposición de la cámara con filtro rojo y la medición del espectro infrarrojo que servirá para regular el tiempo de exposición de la cámara con filtro infrarrojo. Se eligió al sensor de luz TSL2561.

**Tabla 4: Puntaje de los Sensores**

	Puntaje
BH1680FVC	12
TSL2561	18
TSL4531	15
AX44009	17

### 3.3.2 Controlador

El controlador realizará la tarea de calcular el tiempo exposición en base a las señales de lux que el sensor de luminosidad detecte. Además, debe de ser capaz de comunicarse con las cámaras. En esta comparación tenemos a la Raspberry pi3 y al PcDuino v2, como se puede apreciar en la tabla 5 sus características son similares. Por lo tanto, se usará el PcDuino v2, el cual es un mini computador que el GI-SANT lo puede proporcionar de manera gratuita para la realización de esta tesis.

**Tabla 5: Comparación entre Raspberry Pi3 y PcDuino v2**

	Alimentación	Lenguajes de Programación	Comunicación	Costo	Tiempo de obtención
RASPBERRY PI 3 MODEL B	5V, <2.5A	Phyton, C++, C	I2C, SPI	S/.210.00	inmediato
PcDuino v2	5V, 2A	Phyton, C++, C	I2C, SPI	S/.260.00	inmediato

### 3.4 Descripción del módulo de automatización

El sistema de control actuará cuando el PcDuino mande la señal de tomar una fotografía. Cuando esto suceda, el sensor de luz mandará la señal de la cantidad de luminosidad existente en el ambiente. Esta señal será procesada por el PcDuino y con ella se regulará el tiempo de exposición. Finalmente, la cámara tomará la fotografía con el nuevo tiempo de exposición. Tal como se muestra en el diagrama de bloques en la figura 12.

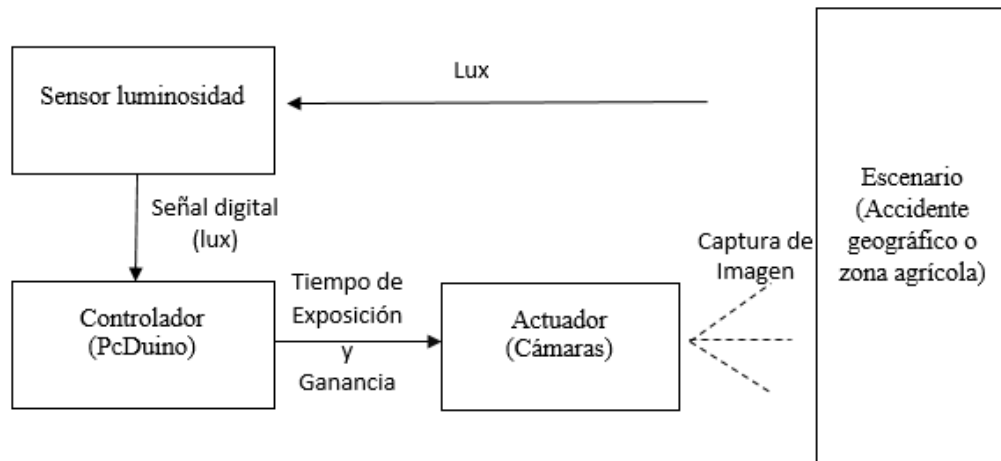


Figura 12: Diagrama de bloques del sistema.<sup>12</sup>

**Sensor de luminosidad:** Este sensor será ubicado de forma paralela al sensor de imagen de la cámara. Como no se tiene acceso al sensor de imagen se tomará como referencia el área transversal del lente. Con esto nos aseguramos de medir la incidencia de luz a la cual estará expuesto el sensor de imagen una vez que se abra el obturador de la cámara.

**Controlador:** Una vez que se indique el inicio de la toma de fotografías y le llegue la señal del sensor de luminosidad, el controlador realizará el cálculo de tiempo de exposición y de la ganancia. Luego de este cálculo, transmite esta información a las cámaras.

**Cámaras:** Las cámaras reciben los parámetros de tiempo de exposición y de ganancia correspondiente y toman las fotografías del escenario.

**Escenario:** Los accidentes geográficos o zonas de cultivos están expuestos a diferentes niveles de incidencia de luz dependiendo de las condiciones climáticas del día. Debido a esto la cantidad de luz reflejada será variable, esta variación será detectada por el sensor de luminosidad.

<sup>12</sup> Fuente: Propia.

### 3.5 Software del módulo de automatización

#### 3.5.1 Descripción de la lógica del programa del módulo de automatización

El programa del módulo de automatización implementado en el PcDuino v2 sigue una lógica secuencial. El programa inicia esperando la señal para tomar un número N de fotografías. Luego que se manda la señal, se activa el sensor de luminosidad por un intervalo de tiempo menor a 0.5 seg. Tiempo suficiente para la lectura de luminosidad del ambiente y guardar este valor en una variable. Finalmente, con este valor de luminosidad se regula el tiempo de exposición de las cámaras, luego estas últimas tomarán un número N de fotografías. Después de terminar volverá al modo espera, de esta manera completa un ciclo repetitivo del programa, como se puede apreciar en la Figura 13.

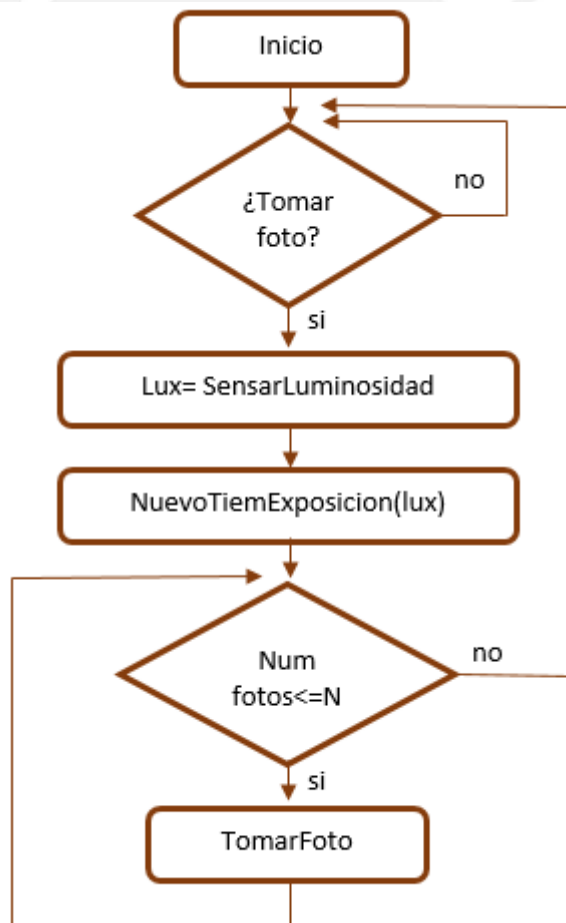


Figura 13: Diagrama de flujo del Programa.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Fuente: Propia.

### 3.5.2 Desarrollo del programa del módulo de automatización

#### Sensor de Luminosidad

El sensor de luz TSL-2561 convierte internamente la cantidad de lux en valores digitales y realiza su transmisión por la interfaz I2C. Para obtener la medición de iluminancia de luz visible se resta el canal 0 con el canal 1. Estos datos se aprecian a continuación en la Tabla 6.

**Tabla 6: Espectro de medición por canal**

Canal 0	Visible + IR
Canal 1	IR

Las mediciones erróneas siempre están presentes al sensar los datos, para reducir este problema se toma la medición de 15 datos. Para la elección de los datos se toma la mediana de ambos canales y con los datos seleccionados se obtiene la cantidad de luminosidad en el espectro visible e infrarrojo.

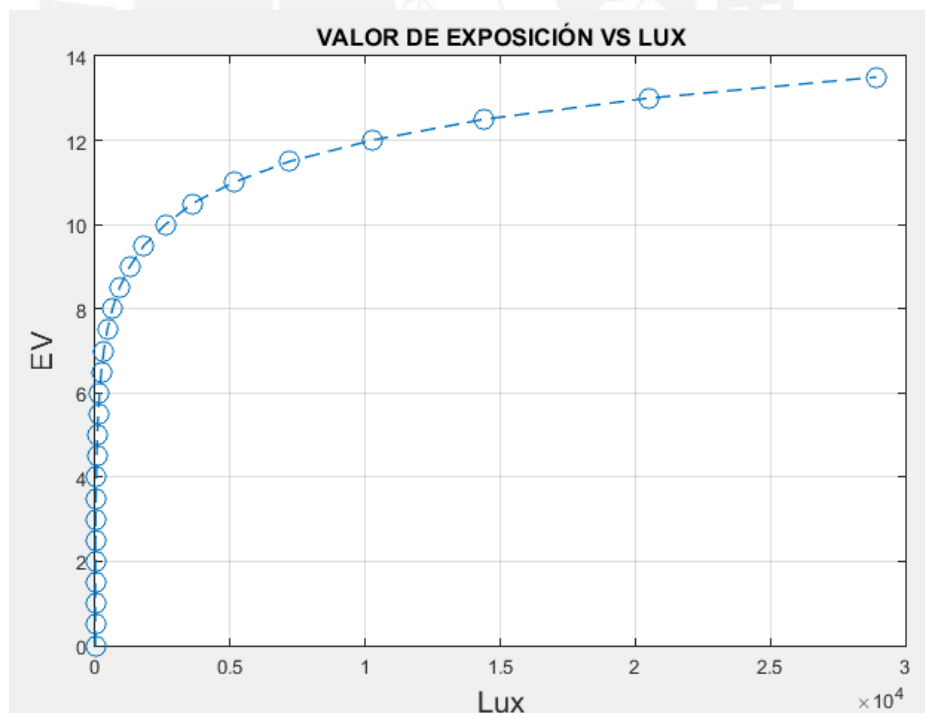
#### Relación entre valor de exposición y lux

El valor de exposición muestra la relación que existe entre la apertura de diafragma, tiempo de exposición y la ganancia de una cámara fotográfica. En esta sección relacionaremos el valor de exposición con la iluminancia medida. Se usó la Tabla 7 proporcionada por la empresa Sekonic para obtener la relación deseada, esta tabla se basa en la ecuación (4) con un ISO = 100 y un C = 250. Con los puntos obtenidos se obtuvo la Figura 14 donde se puede apreciar la relación logarítmica entre el valor de exposición y la iluminancia. Esta relación se muestra en la Figura 15 donde se linealiza la relación entre el valor de exposición y el  $\log_2$  (iluminancia). A partir de estos datos se pasa de tener puntos discretos a tener una función continua con la iluminancia como variable independiente y el valor de exposición como variable dependiente. Esto se refleja en la ecuación (5):

$$EV = \log_2(\text{lux}) - \log_2(164000) + 16 \quad (5)$$

**Tabla 7: Correspondencia entre EV y Lux (Thomas, 2013)**

EV	Lux
-1	1.25
0	2.5
1	5
2	10
3	20
4	40
5	80
6	160
7	320
8	640
9	1280
10	2600
11	5120
12	10240
13	20480
14	40960
15	81900
16	164000
17	328000
18	656000



**Figura 14: EV vs Lux. Relación logarítmica.<sup>14</sup>**

<sup>14</sup> Fuente: Propia

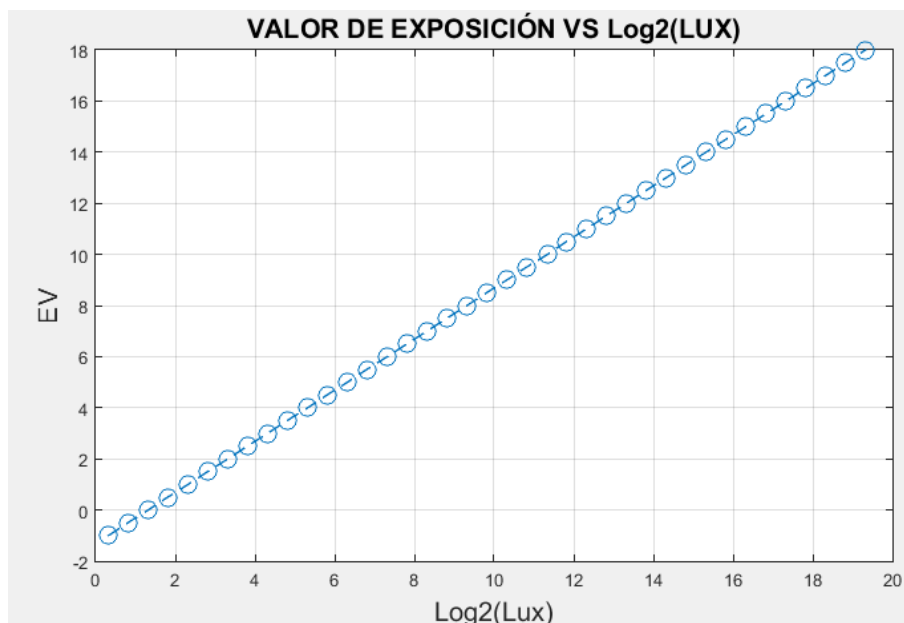


Figura 15: EV vs Log<sub>2</sub> (Lux). Relación lineal.<sup>15</sup>

### Relación entre valor de exposición y tiempo de exposición

La definición del valor de exposición está relacionada directamente con el tiempo de exposición y la apertura del diafragma esto se vio en el capítulo II.

Dada la ecuación (2) falta añadirle el factor de la ganancia. Debido a que en las cámaras Point Grey la sensibilidad del sensor no se regula cambiando valores de ISO, en vez de ello la sensibilidad de estas cámaras se regula variando la ganancia la cual es medida en decibelios. La ganancia base es 0dB y por cada 6dB se dobla la ganancia, por ello cada +6dB equivale a aumentar en 1 el EV (Manriquez, 2014).

De manera análoga la ecuación (3) se describe en términos de la ganancia en dB en la ecuación (6).

$$Ev_{gain} = EV + \frac{Gain}{6} \quad (6)$$

Despejando el tiempo de exposición de la ecuación (2) se tiene la ecuación (7):

$$t = \frac{N^2}{2^{Ev_{gain}}} \quad (7)$$

<sup>15</sup> Fuente: Propia.



Dado que N se mantiene fijo en un valor de N=4 y la ganancia inicialmente se mantiene en 0dB. El valor del tiempo de exposición depende únicamente del valor de exposición que a su vez depende de la iluminancia medida. Esto se muestra en la ecuación (8).

$$t = \frac{N^2}{2^{\log_2(lux) - \log_2(164000) + 16 + \frac{Gain}{6}}} \quad (8)$$

Reduciendo la ecuación (8) obtenemos la ecuación (9):

$$t = \frac{2.5 * N^2}{lux * 2^{\left(\frac{Gain}{6}\right)}} \quad (9)$$

La constante 2.5 de la ecuación (9) se debe a que se tomó un C=250 e ISO=100 en la ecuación (4). Este valor de 2.5 se remplazará por una constante k, la cual será determinada experimentalmente, con esto obtenemos ecuación (10):

$$t = \frac{k * N^2}{lux * 2^{\left(\frac{Gain}{6}\right)}} \quad (10)$$

El tiempo de exposición en estas cámaras Point Grey tiene un límite de 66ms, si el tiempo de exposición para determinado valor de iluminancia supera este valor la ganancia aumentará en 1dB y se recalcula el tiempo de exposición. Este proceso se repite hasta tener un valor del tiempo de exposición menor al límite.

# Capítulo IV

## Implementación y resultados

### 4.1 Consideraciones de implementación

La implementación del programa se realizó en el lenguaje de programación C++.

### 4.2 Hardware del módulo de automatización

#### 4.2.1 Componentes

A continuación, se presentan los componentes usados para el presente trabajo de tesis. Todos los componentes han sido proporcionados por el GI-SANT.

#### Cámara Point Grey

Las cámaras usadas por el GI-SANT son de la marca Point Grey modelo CMLN-13S2M-CS (Point Grey, Richmond BC, Canadá). Estas cámaras cuentan con un puerto mini USB tipo B por el cual pueden ser controlados y alimentados. Esto hace que estén sujetas a funcionar con una mini-computadora que le indique los momentos en los cuales deben tomar las fotografías. La información técnica de las cámaras se encuentra en el anexo A. Esta cámara se muestra en la figura 16.



Figura 16: Cámara Point Grey (CMLN-13S2M-CS).<sup>16</sup>

#### Lente

El lente permite enfocar y regular la cantidad de luz que ingresara al sensor. En esta tesis se usará el lente 58000 (Edmund Optics) como se muestra en la figura 17. Algunas de las características se presentan en la Tabla 8. Para mayor información revisar el anexo B.

---

<sup>16</sup> Fuente: Point Grey (2013)

**Tabla 8: Características de lente 8.5mm Edmund Optics**

Apertura:	f/1.3-f/16
Distancia focal:	8.5mm
Distancia mínima de trabajo:	100mm
Rango de enfoque:	100mm - $\infty$
Peso:	54g

**Figura 17: Lente 8.5mm de Edmund Optics.<sup>17</sup>**

### Filtros

Se usa un filtro para cada cámara, ambos son filtros pasa banda. Uno de ellos es un filtro rojo (figura 18) modelo 650FS80-25 (Andover Corporation), dejando pasar la banda 650nm. El otro, es un filtro infrarrojo (figura 19) modelo 850FS00-25 (Andover Corporation); el cual deja pasar la banda de 850nm. En la tabla 9 se muestran algunas de las características de los filtros. Para información más detallada revisar el anexo C.

**Tabla 9: Características de los filtros**

	Filtro Rojo (650FS80-25)	Filtro Infrarrojo (850FS00-25)
Banda Central:	650.0+20/-10 nm	850.0+20/-10 nm
Ancho de Banda:	80.0+16/-16 nm	100.0+20/-20 nm
Transmisión	70%	65%

<sup>17</sup> Fuente: Edmund Optics



Figura 18: Filtro Rojo.<sup>18</sup>



Figura 19: Filtro Infrarrojo.<sup>19</sup>

### Sensor de Luz

El sensor de luz con el que se va a trabajar es el TSL2561 (Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc, Texas), mostrado en la figura 20. Este sensor de luz puede aproximarse a la respuesta del ojo humano. Además, su salida es serial y transmitida en el protocolo I<sup>2</sup>C. Esto hace que la señal de salida obtenida por el sensor sea menos sensible al ruido que si se usará un sensor de luz con salida analógica. El datasheet se muestra en el anexo D.

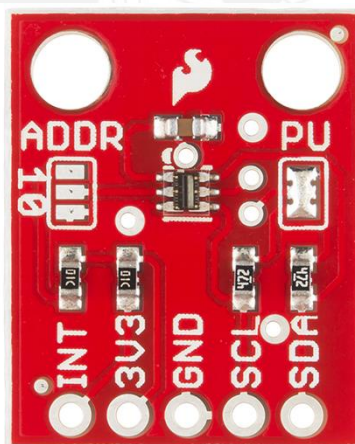


Figura 20: Sensor de luz (TSL-2561)<sup>20</sup>

<sup>18</sup> Fuente: Propia

<sup>19</sup> Fuente: Propia

<sup>20</sup> Fuente: Sparkfun, tutorials, TSL2561

## PcDuino

Se usará el PcDuino v2, como se muestra en la figura 21. El cual es una minicomputadora y será el encargado de realizar la regulación del tiempo de exposición de las cámaras.

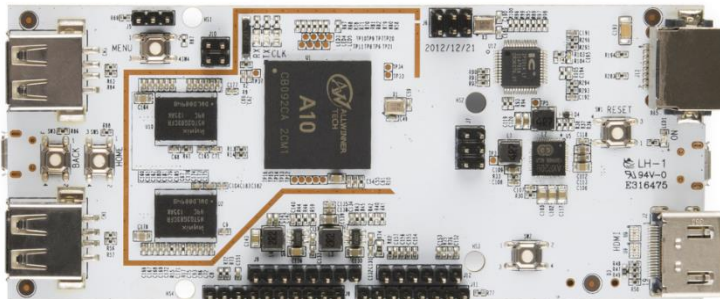


Figura 21: PcDuino v2 A10.<sup>21</sup>

### 4.2.2 Diagrama de conexiones

La conexión de las cámaras se realiza mediante un hub USB, debido a que el PcDuino v2 solo cuenta con una entrada USB. El puerto de la cámara es mini USB tipo B, el puerto del HUB y del PcDuino son USB estándar. En la figura 22 se muestra el diagrama de conexiones. La conexión entre el sensor de luminosidad y el PcDuino v2 se describe en la Tabla 10. (Ver el anexo E, el cual contiene los detalles de los pines del PcDuino).

Tabla 10: Pines de Conexión Sensor de luz y PcDuino v2

Sensor (TSL-2561)	PcDuino v2
3.3v	Puerto J9 PIN4
GND	Puerto J9 PIN6
SCL	Puerto J11 PIN10
SDA	Puerto J11 PIN9

<sup>21</sup> Fuente:Link Sprite (2013)

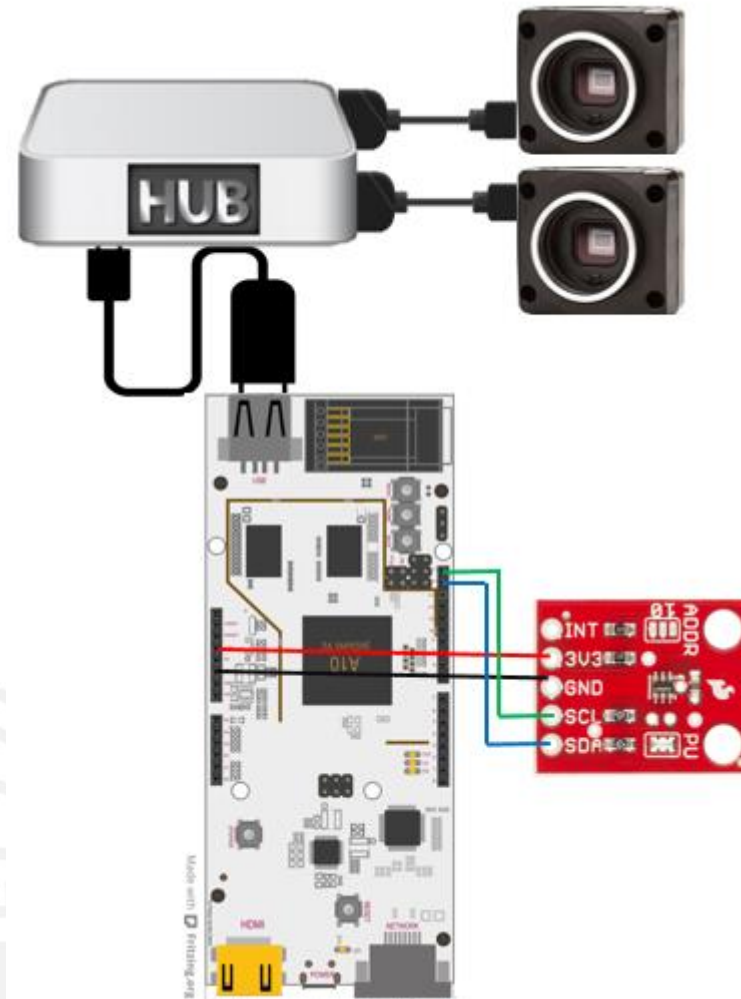


Figura 22: Diagrama de conexión del sistema.<sup>22</sup>

### 4.3 Configuraciones

Antes de la integración del sistema de regulación automática del tiempo de exposición se realizará configuraciones y pruebas de partes aisladas del sistema. Una de ellas es la configuración de sensor de luminosidad y su simulación independiente del sistema. Otra parte del sistema es la configuración del tiempo de exposición y ganancia de las cámaras; la cual se realizó de manera independiente. A continuación, se detalla cómo se hicieron estas configuraciones.

<sup>22</sup> Fuente: Propia.

### 4.3.1 Configuración del sensor de luminosidad

Se realizó un programa que permitiera comunicar al PcDuino con el sensor de luminosidad. Para esto se estableció y configuro la dirección que tendría el sensor, como se ve en la figura 22 el pin ADDR está al aire. Esa configuración da el valor de 0x39 como dirección del sensor de luminosidad. Una vez que se conoce la dirección se establece la comunicación I2C entre sensor y PcDuino. Luego se procede a configurar el tiempo de integración del sensor de luminosidad. Finalmente se empieza a leer los datos y convertir los valores de los registros en valores que reflejen la cantidad de lux a los cual corresponde dichos valores.

### 4.3.2 Configuración manual del tiempo de exposición y ganancia

La realización de este programa fue en base a un programa demo de las cámaras Point Grey. Este programa demo realiza la captura de N imágenes por cámara conectada al computador (en este caso al PcDuino). Luego de ejecutar este programa, se tiene  $2*N$  fotografías, pues se tiene conectada dos cámaras. El programa demo realiza la regulación del tiempo de exposición y ganancia de forma automática. Lo que se hizo fue crear variables que almacenen los valores de tiempo de exposición (t) y ganancia (gain). Luego se deshabilitó la función de regulación automática del tiempo de exposición y ganancia, para poder habilitar la función de regulación manual del tiempo de exposición y ganancia. Se hizo que el programa una vez sea ejecutado interactúe con el usuario y le pida que fije, mediante teclado, el tiempo de exposición y ganancia. En la figura 23, se aprecia imágenes tomadas con diferentes tiempos de exposición (10ms, 30ms y 50ms) y ganancia fijada en 10dB.

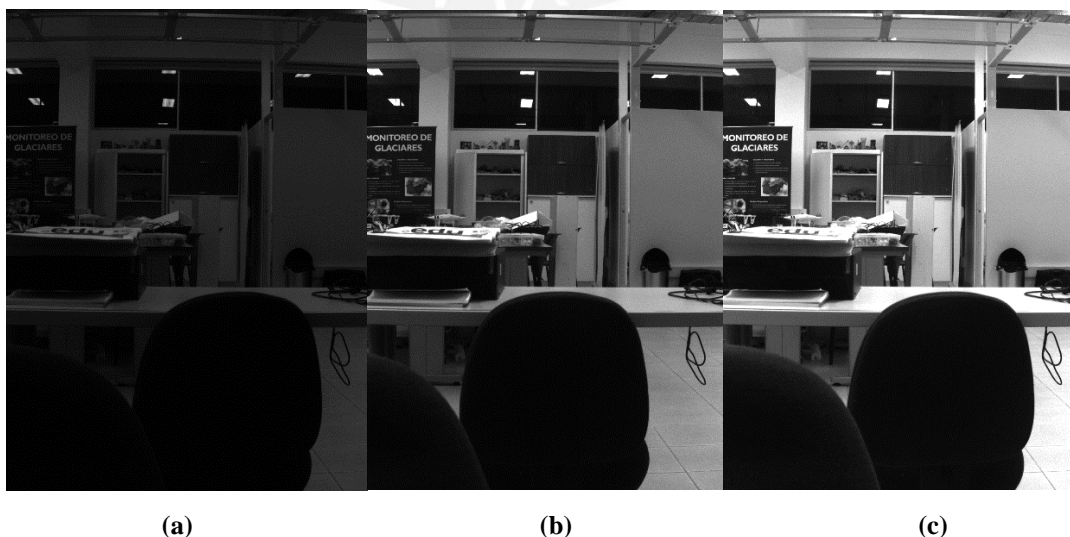


Figura 23: (a)  $t=10\text{ms}$   $\text{gain}=10\text{dB}$ , (b)  $t=30\text{ms}$   $\text{gain}=10\text{dB}$  y (c)  $t=50\text{ms}$   $\text{gain}=10\text{dB}$

#### 4.4 Integración del módulo de automatización

Teniendo como base el programa del sensor de luminosidad y el programa que regula manualmente el tiempo de exposición y ganancia de las cámaras se junta ambos programas en uno. La lógica que relaciona ambos programas (lux – tiempo de exposición y ganancia) fue realizada en el capítulo III. Esta lógica captará la información del sensor y cambiará la regulación manual, por teclado, del tiempo de exposición y ganancia por la asignación automática de estas variables mediante software. Físicamente el módulo se puede apreciar en las Figuras 24 y 25.

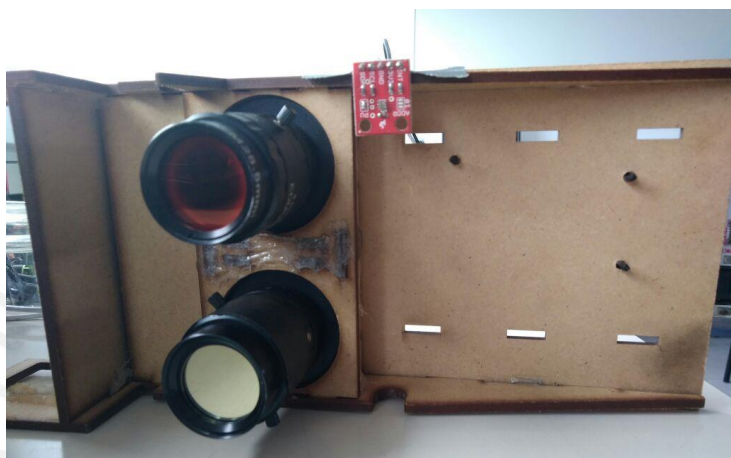


Figura 24: Parte delantera del módulo (lentes, filtro y sensor de luminosidad).

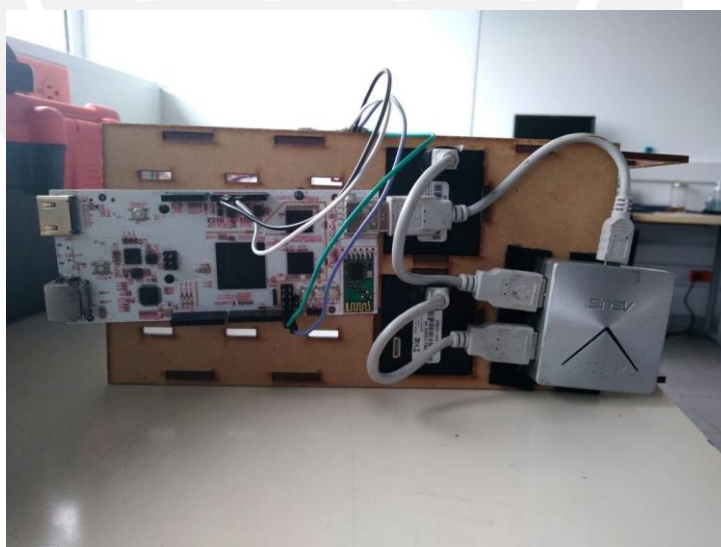


Figura 25: Parte posterior del módulo (conexión física)



#### 4.5 Pruebas para determinar la constante k

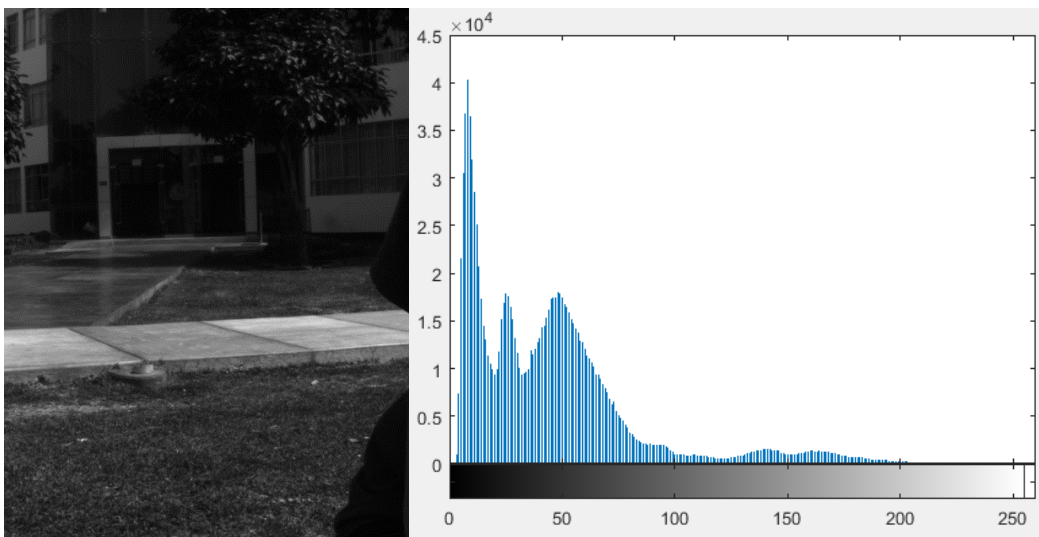
Las siguientes pruebas se realizaron con la finalidad de determinar el valor de la constante k de la ecuación (10). La metodología fue la siguiente: En determinado momento del día se procedió a tomar 4 fotografías con el sistema automático de las cámaras (2 con filtro rojo y 2 con filtro infrarrojo). Inmediatamente después se procedía a tomar otras 4 fotografías con el sistema propuesto en esta tesis, 2 fotografías con la cámara con filtro rojo y 2 con filtro infrarrojo. Este método se realizó durante 4 momentos del día (a las 13:58h, a las 14:44h, 15:50h y a las 16:50h). Estos momentos fueron elegidos al azar, durante periodos en los que se contaba con disponibilidad para realizar las fotografías. Para ambas cámaras se fijó un valor de  $k=2.5$ . El escenario a fotografiar son los jardines del exterior del pabellón V y parte de este edificio. Las fotografías se realizaron desde la mesa solar ubicada al exterior del pabellón V. Las cámaras se denominan según la Tabla 11. En adelante se hará referencia al modo automático de las cámaras como sistema automático o sistema automático propio de las cámaras.

**Tabla 11: Denominación de las cámaras**

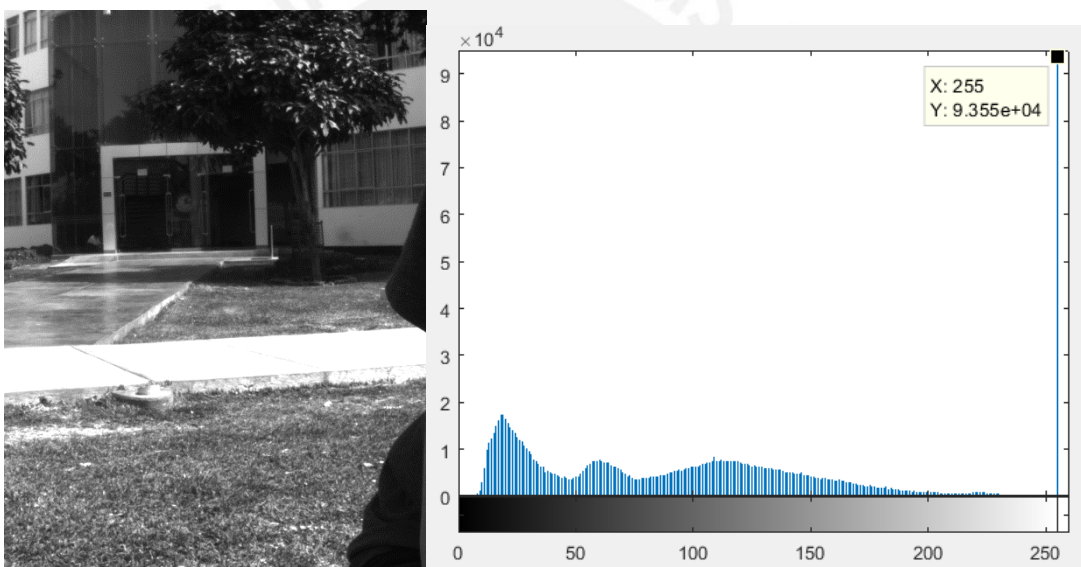
Cámara A	Filtro Rojo
Cámara B	Filtro Infrarrojo

Las fotografías obtenidas con la cámara con filtro rojo (Cámara A) se muestran desde la Figura 26 hasta la Figura 41.

Un patrón que se observa en este modo automático propio de las cámaras Point Grey es la variación entre una toma y otra. Esto lo realiza con tal de alcanzar un brillo promedio determinado en la fotografía. Se podrá apreciar este patrón a lo largo de todas las pruebas. En el histograma de la Figura 27 existe saturación en la tonalidad blanca.



**Figura 26: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.**



**Figura 27: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.**

Como se puede apreciar en las Figuras 28 y 29 la variación entre una toma y otra es menor a la variación que se presenta en las Figuras 26 y 27. Esto se esperaba, debido a que ambas fotografías fueron tomadas con los mismos valores de tiempo de exposición y ganancia. Sin embargo, existe una mayor saturación en la tonalidad blanca de las Figuras 28 y 29 comparadas con la saturación existente de la Figura 27. Con el sistema propuesto se tiene 107400 píxeles blancos, mientras que en la Figura 27 se tiene 93550 píxeles blancos. Esta saturación en las fotografías realizadas con el sistema propuesto con las cámaras con filtro rojo se aprecia a lo largo de las fotografías realizadas en ese día.

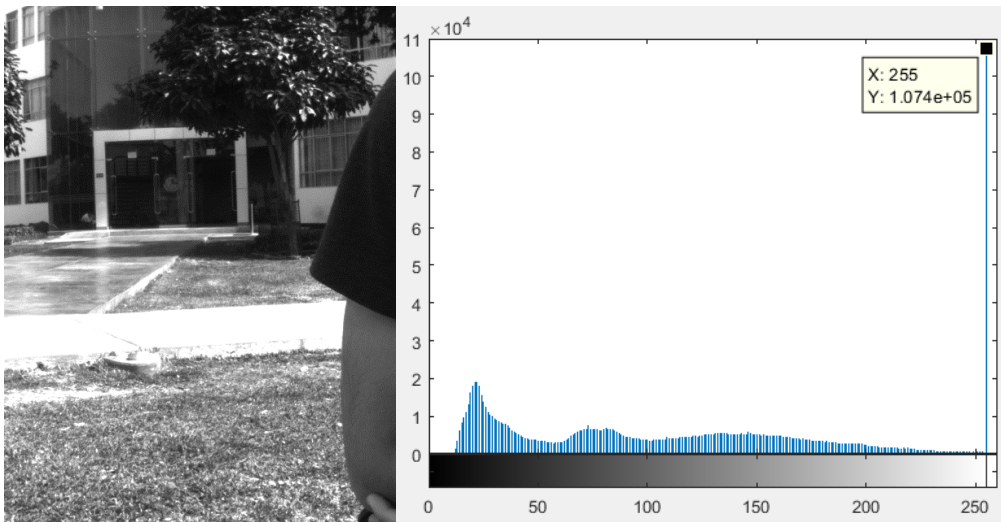


Figura 28: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.

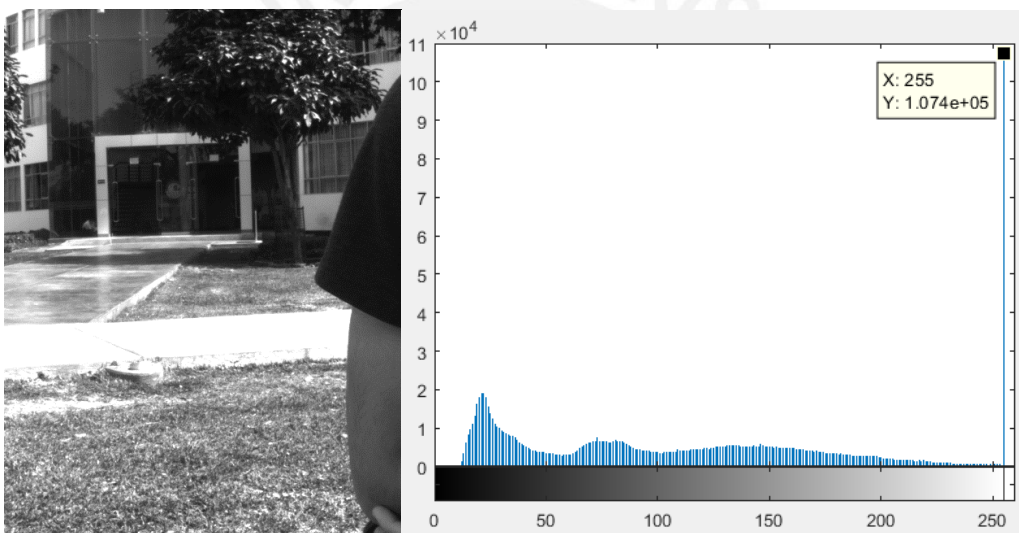


Figura 29: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.

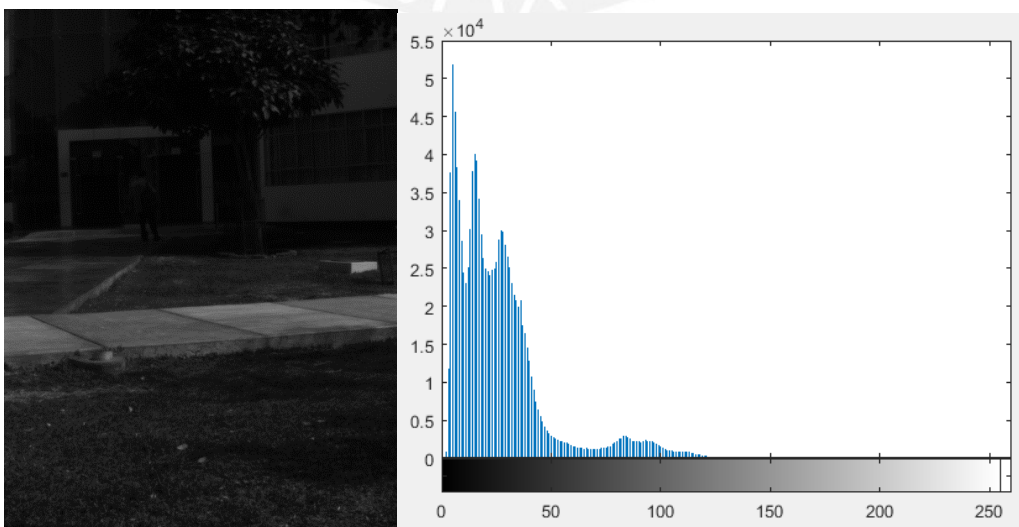


Figura 30: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

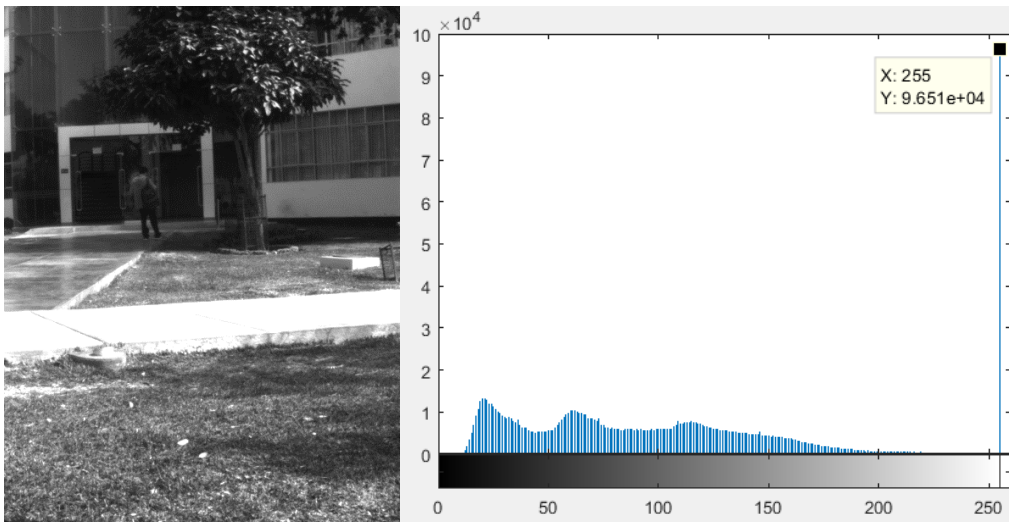


Figura 31: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

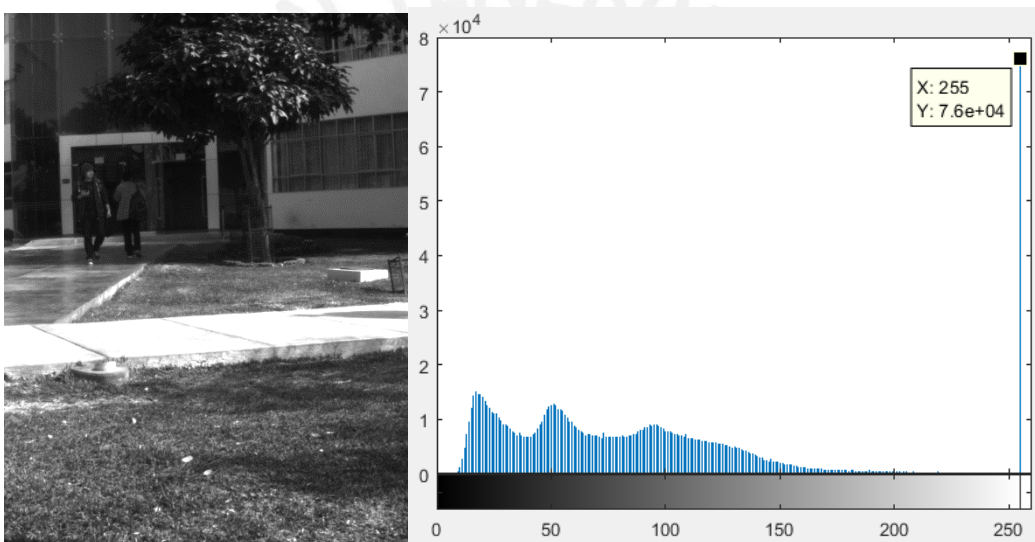


Figura 32: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

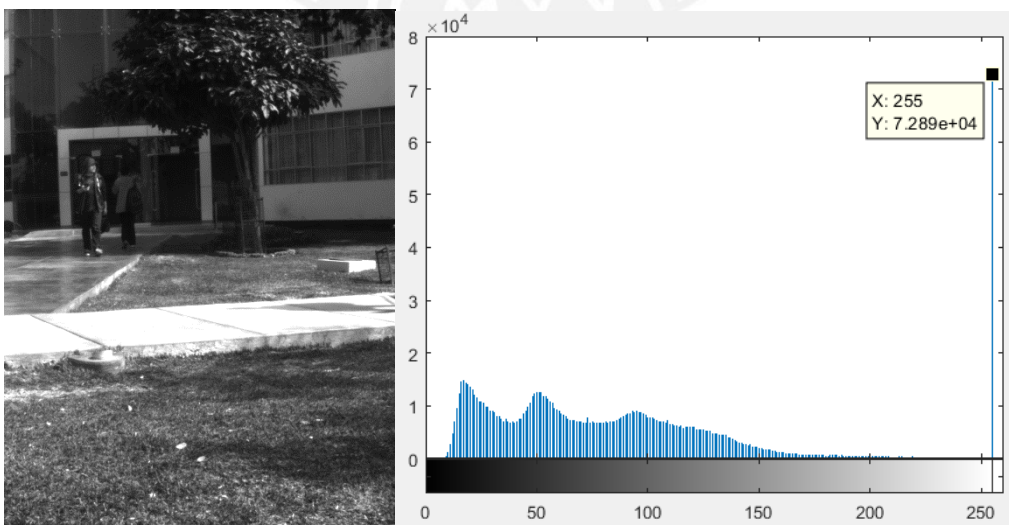


Figura 33: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

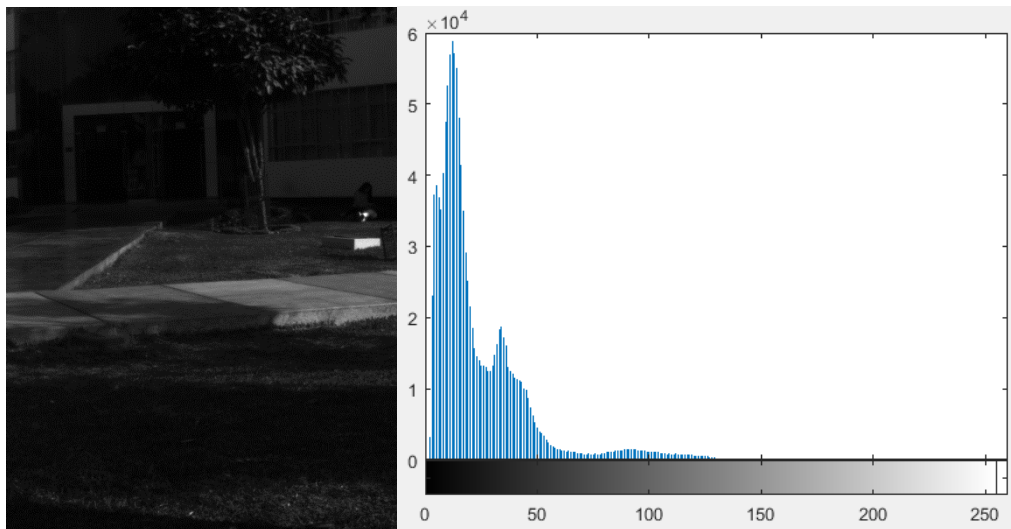


Figura 34: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

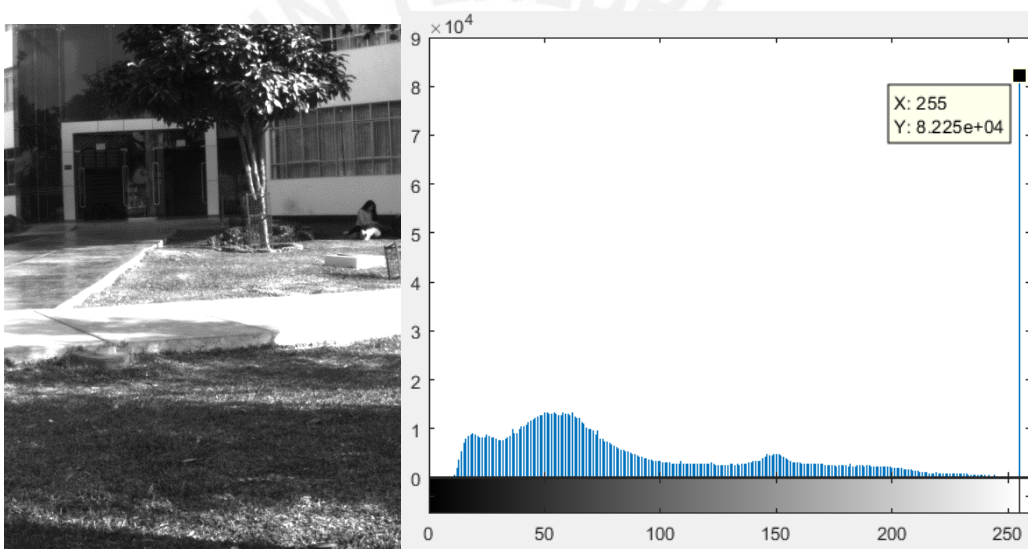


Figura 35: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

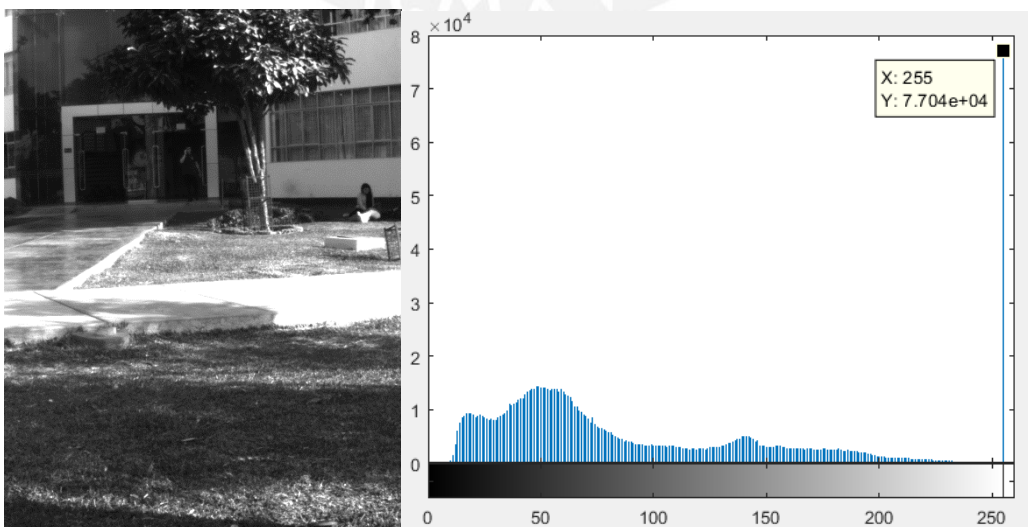


Figura 36: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

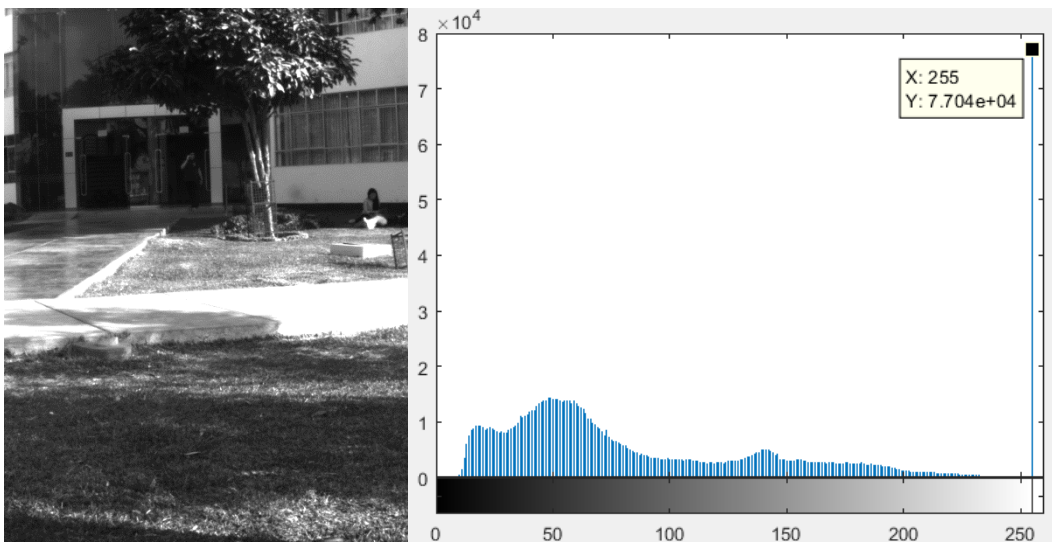


Figura 37: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

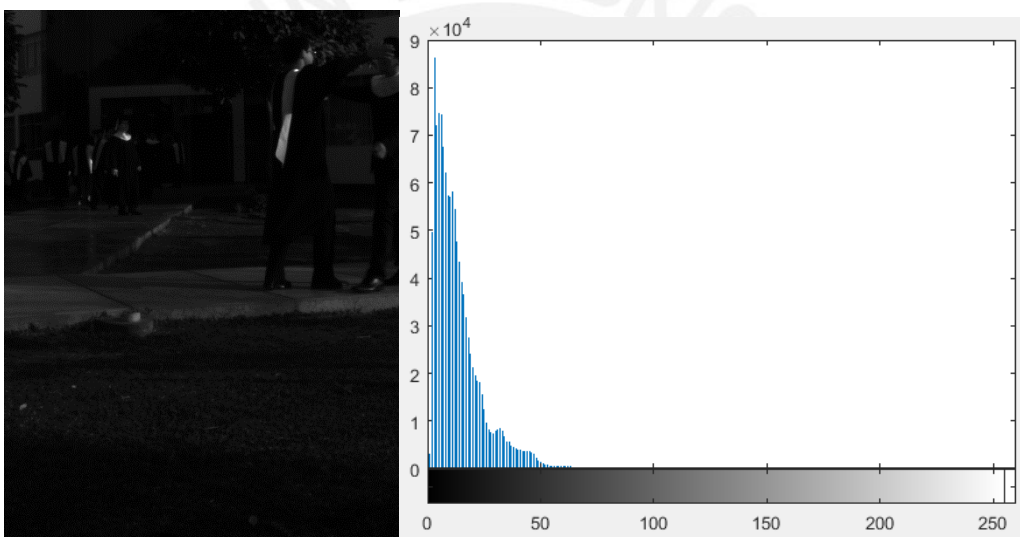


Figura 38: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.

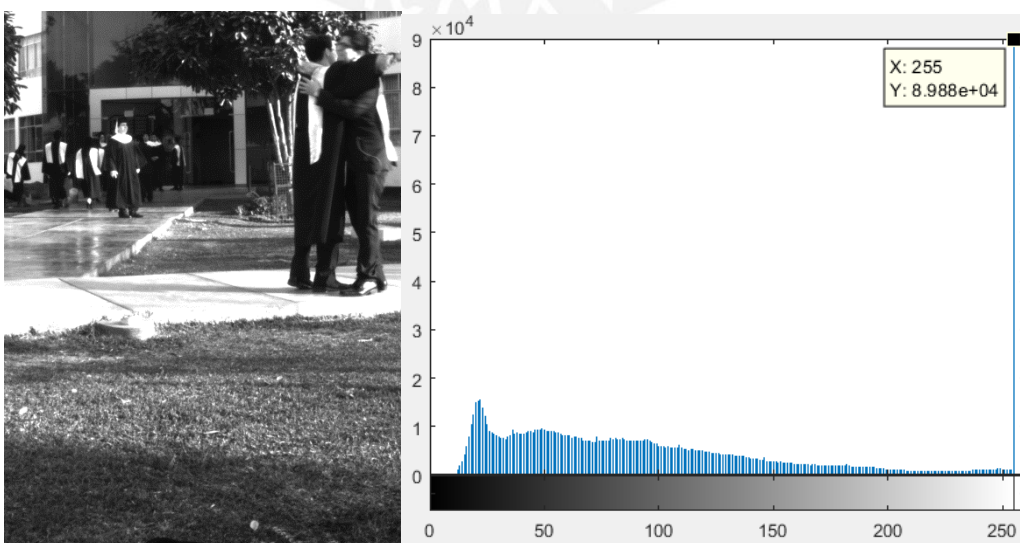
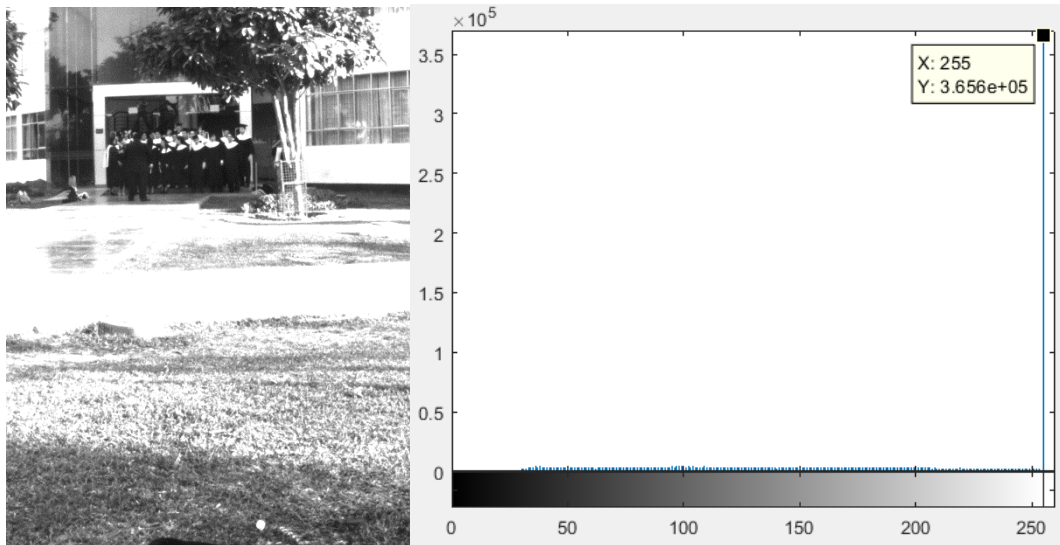
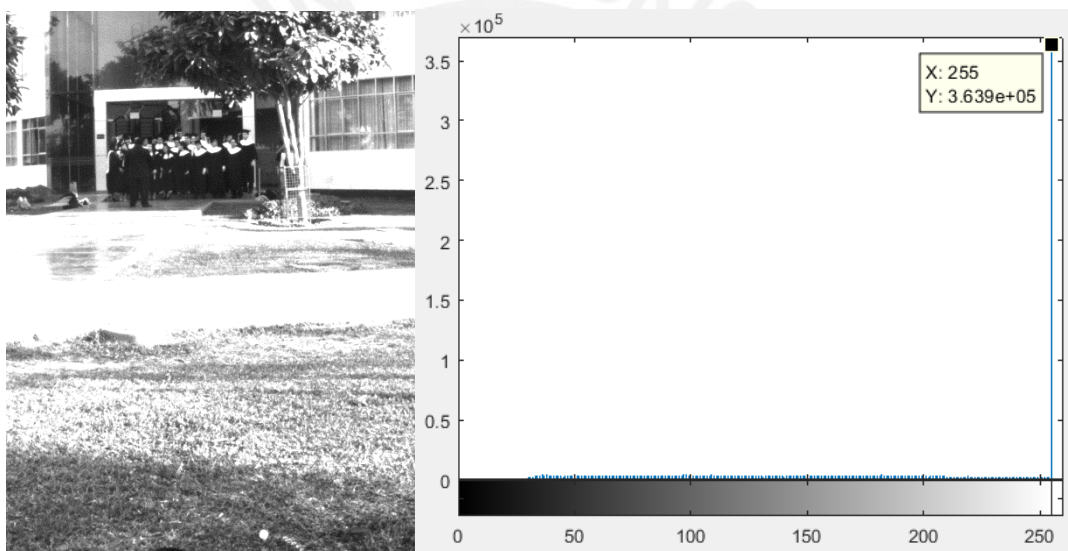


Figura 39: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.



**Figura 40: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.**



**Figura 41: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara A tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.**

Luego de analizar los resultados obtenidos en este día de prueba, se decidió reducir el valor de la constante  $k$  de la ecuación (10) al valor de 1.2 para la cámara A. Al reducir esta constante reduciremos el valor del tiempo de exposición para una misma cantidad de lux detectada por el sensor. Con esto se espera reducir la sobreexposición obtenida en esta prueba.

Las fotografías obtenidas con la cámara con filtro infrarrojo (Cámara B) se muestran desde la Figura 42 hasta la Figura 57.

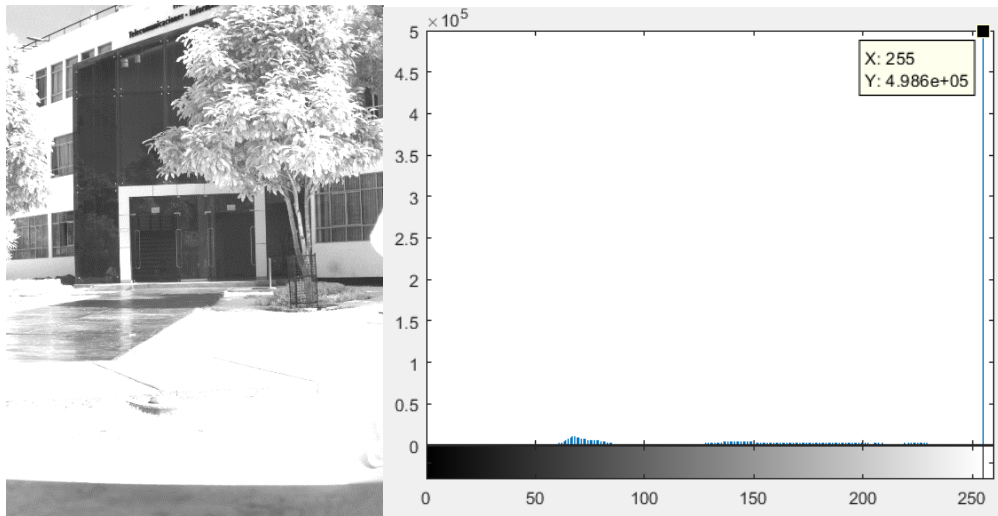


Figura 42: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.

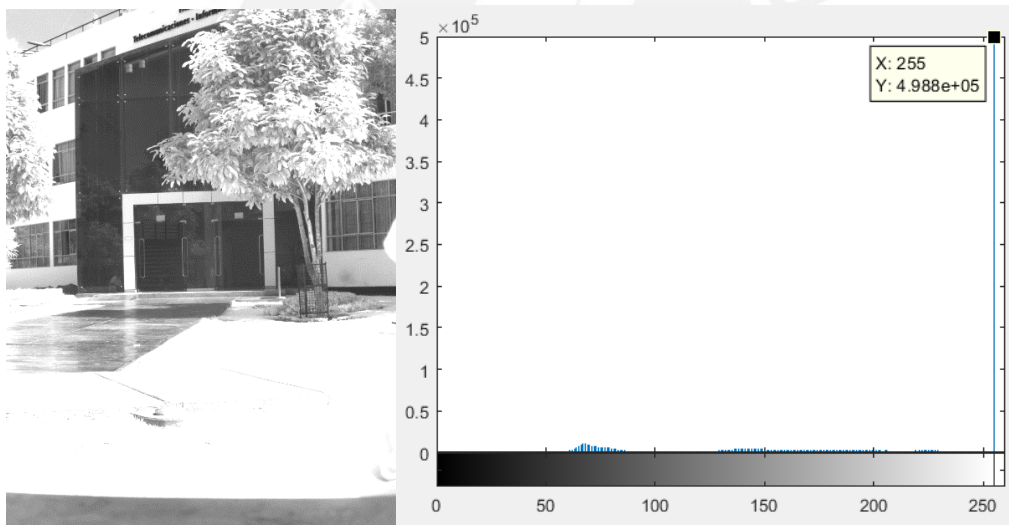


Figura 43: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.



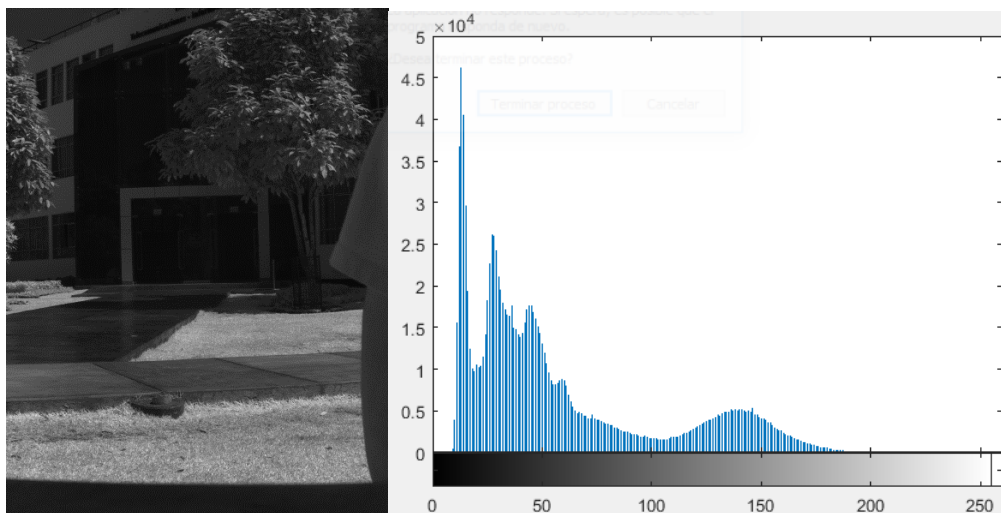


Figura 44: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.

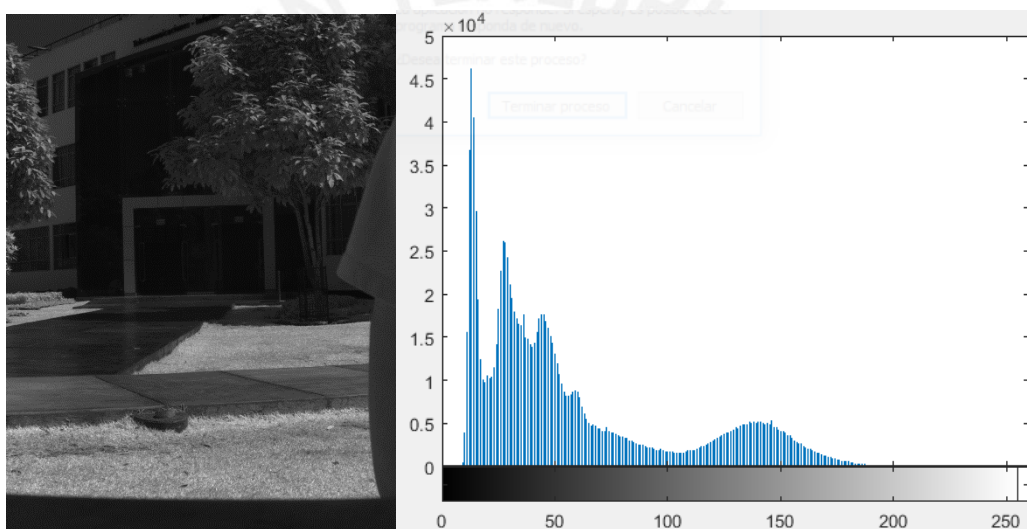


Figura 45: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 13:58h y a la derecha su histograma.

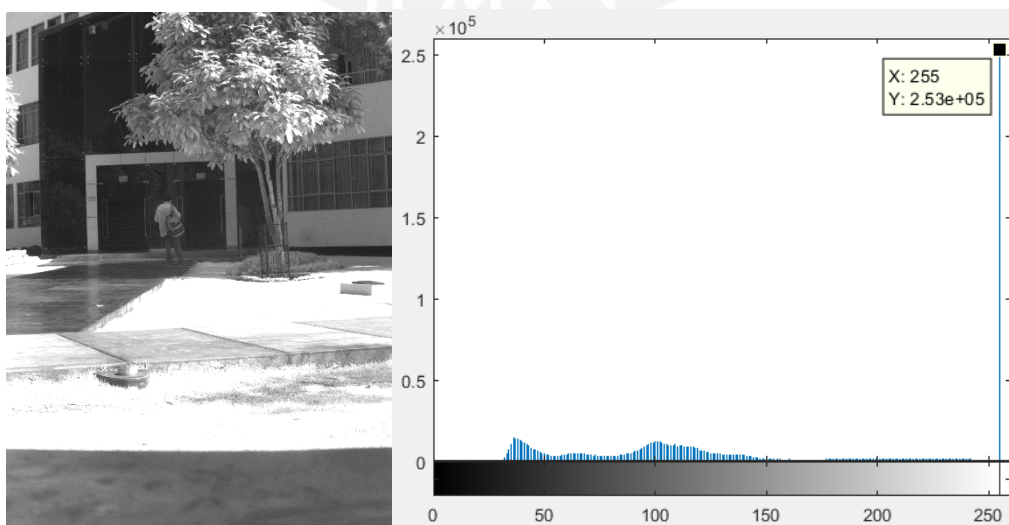


Figura 46: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

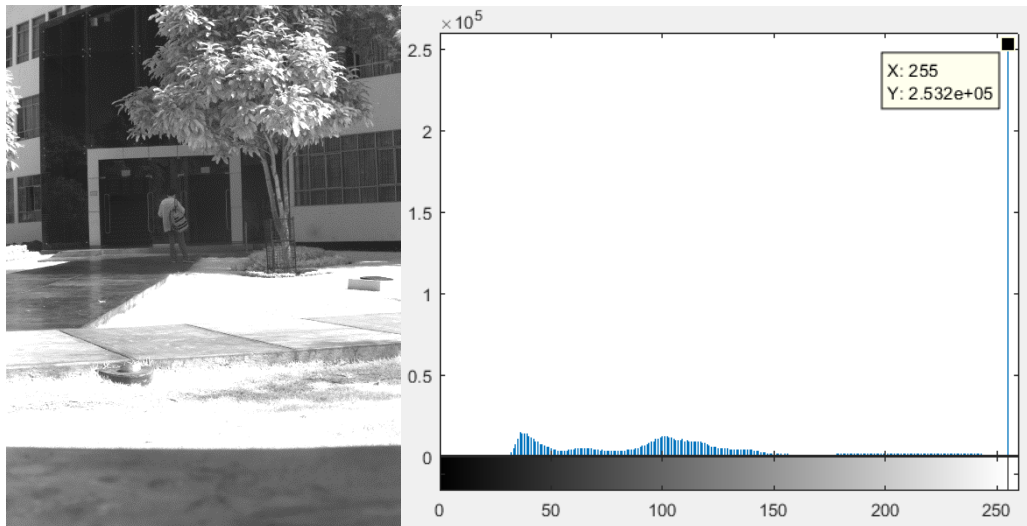


Figura 47: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

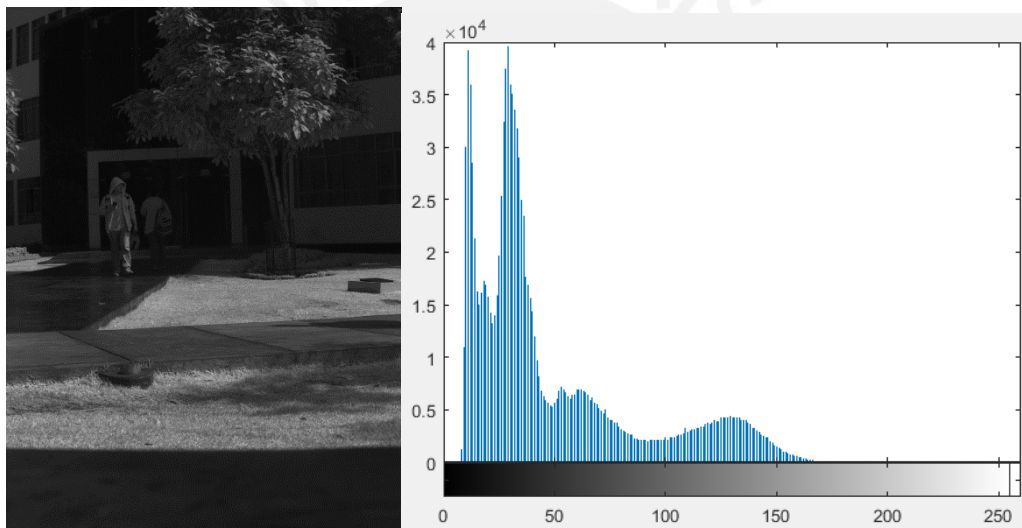


Figura 48: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

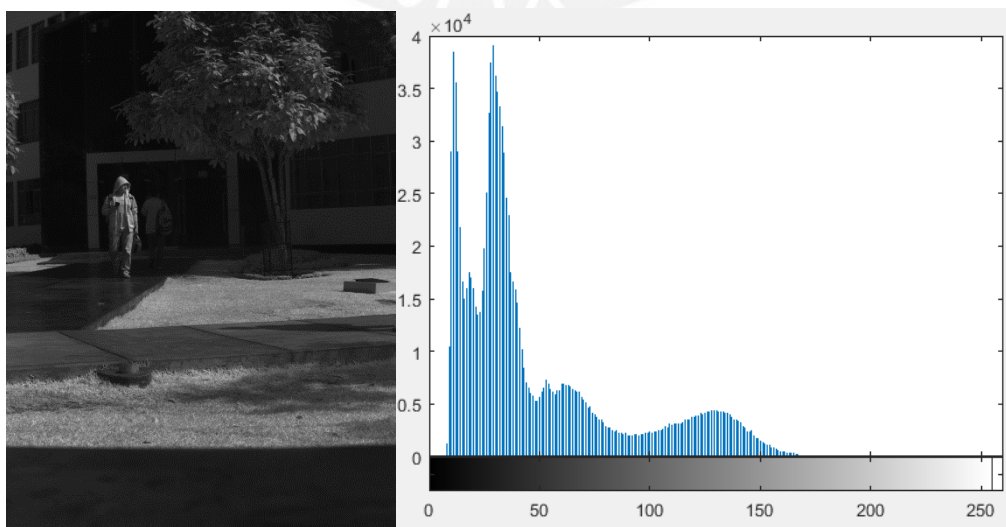


Figura 49: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 14:44h y a la derecha su histograma.

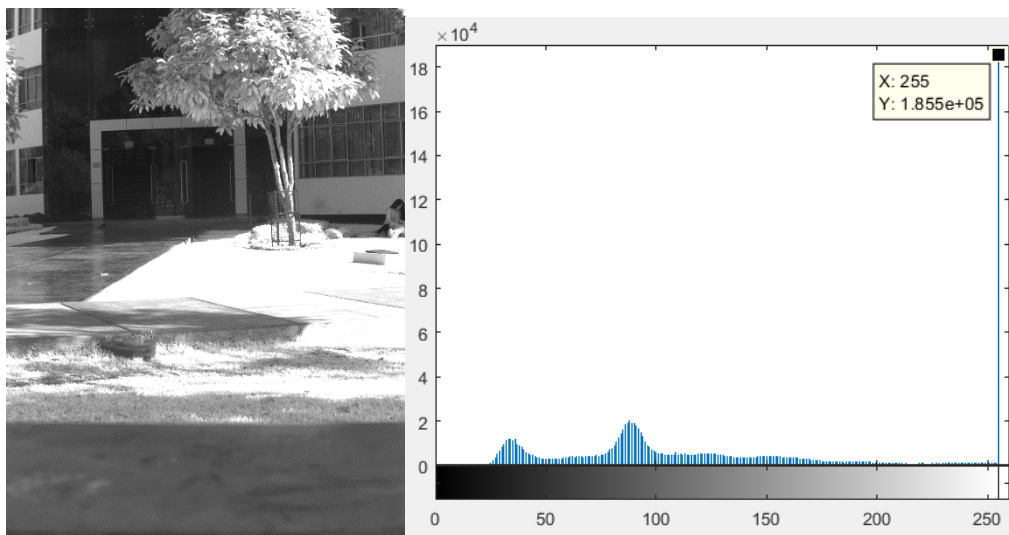


Figura 50: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

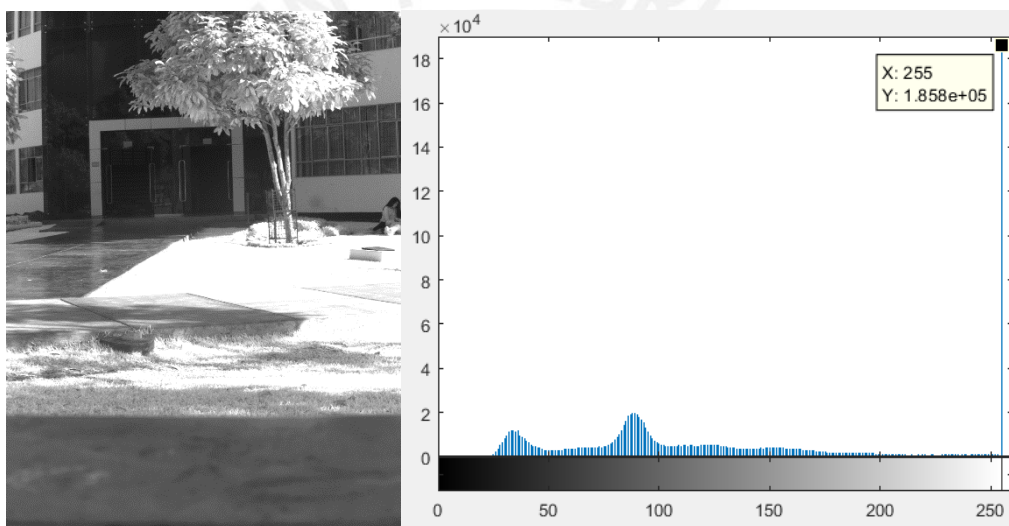


Figura 51: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

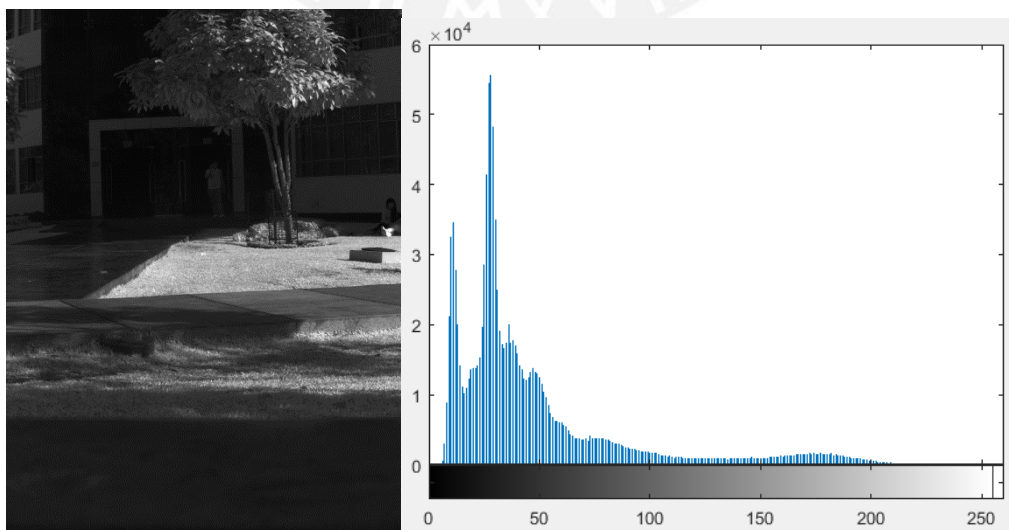


Figura 52: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

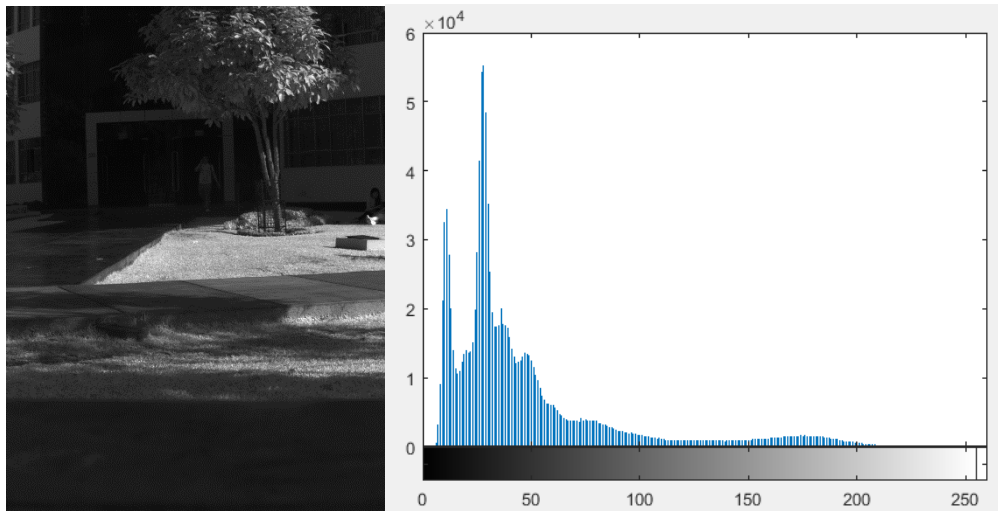


Figura 53: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 15:50h y a la derecha su histograma.

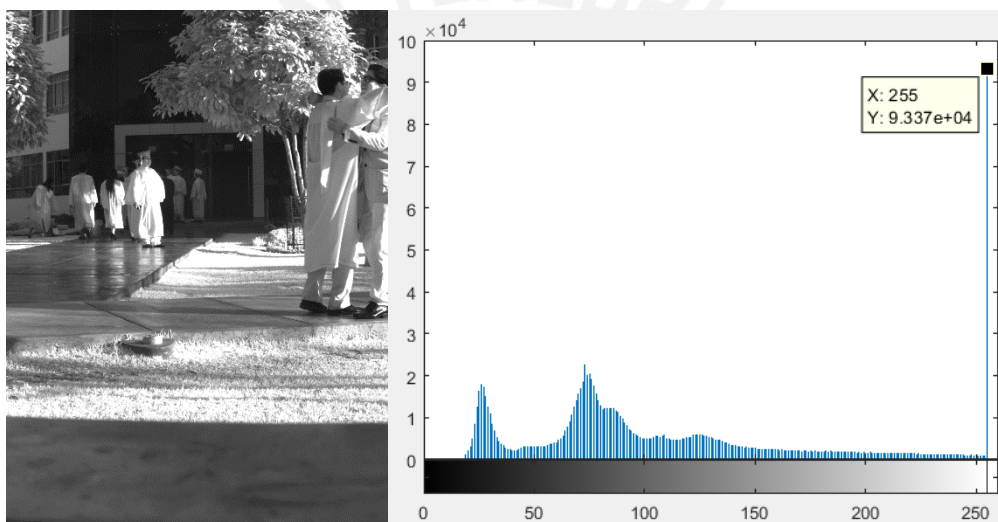


Figura 54: Sistema automático, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.

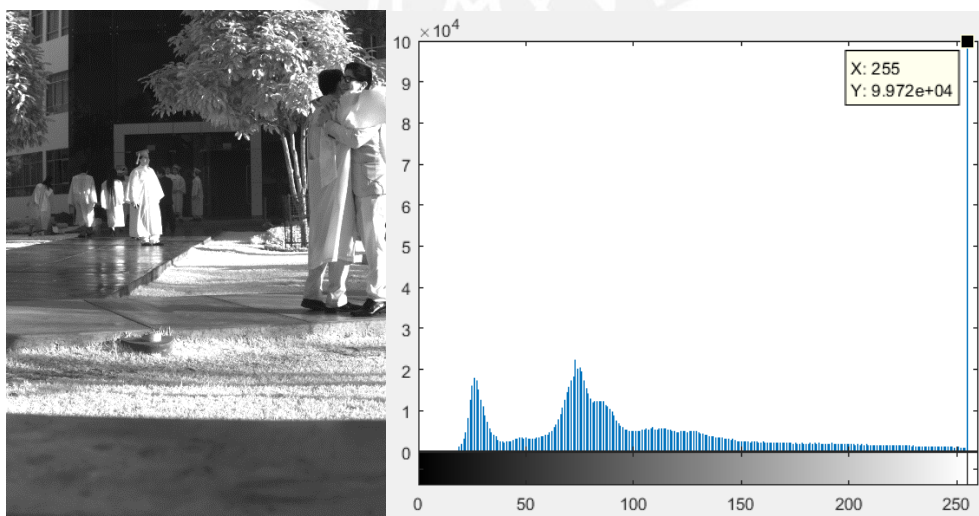
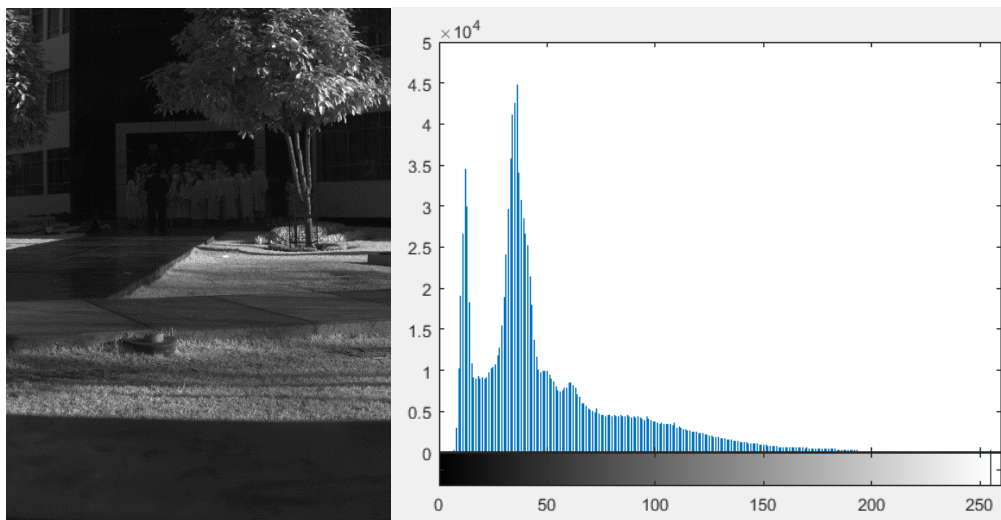
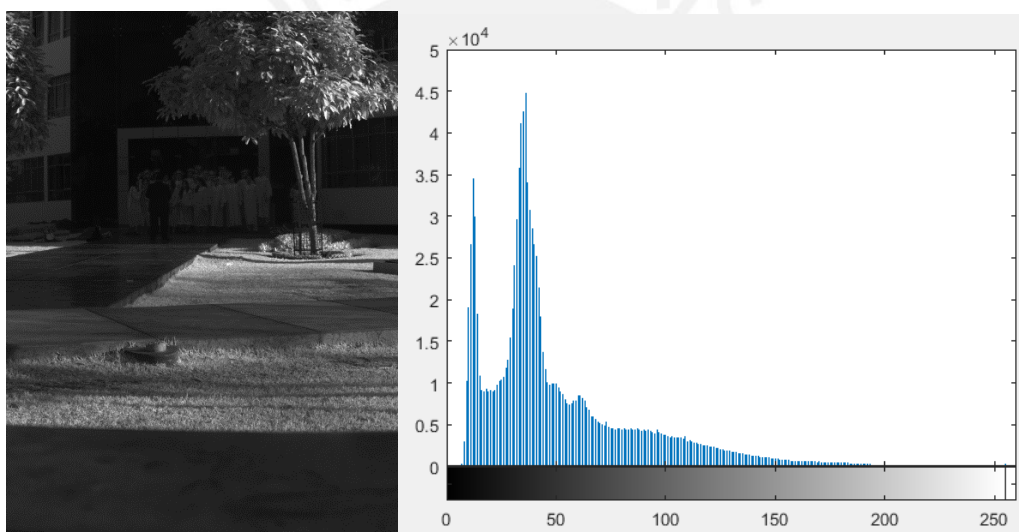


Figura 55: Sistema automático, a la izquierda fotografía 2 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.



**Figura 56: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.**



**Figura 57: Sistema propuesto, a la izquierda fotografía 1 con cámara B tomada a las 16:50h y a la derecha su histograma.**

En estas pruebas realizadas con la cámara B se aprecia que no hay variación entre fotografías tomadas por el sistema automático de las cámaras. Algo diferente a lo que si sucedía con la cámara A. Otra cosa que se observa es que hay saturación, en la tonalidad blanca, con el sistema automático de las cámaras (sobreexposición). Por otro lado, las fotografías tomadas con el sistema propuesto como se ve en su histograma no presentan saturación ni en la tonalidad negra ni en la tonalidad blanca (no hay subexposición ni sobreexposición) por lo tanto, se mantendrá el valor de la constante  $k=2.5$  para la cámara B.

## 4.6 Resultados

Las cámaras usadas se dividen en cámara A y cámara B según lo descrito en la Tabla 11.

### 4.6.1 Resultados con la cámara A

Estas fotografías fueron obtenidas luego de fijar el valor de la constante  $k$  de la ecuación (10) a un valor de 1.2. Esto con la finalidad de reducir la saturación que existía en las imágenes.

A continuación, se presentan las fotografías obtenidas con el sistema propuesto desde la Figura 58 a la Figura 66.

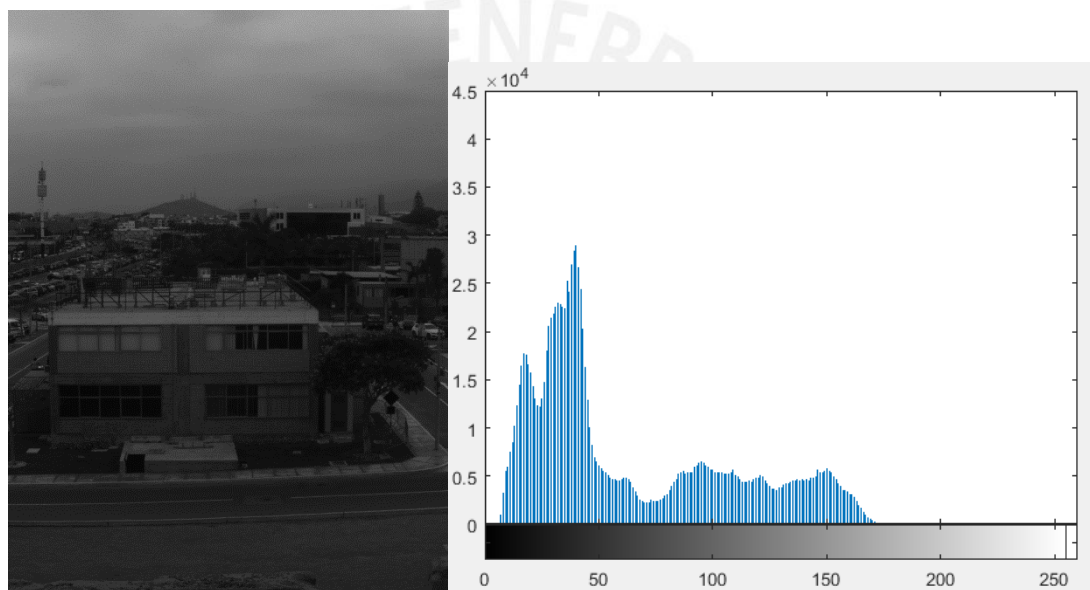


Figura 58: A la Izquierda, imagen tomada 10:38h y a la derecha su histograma.

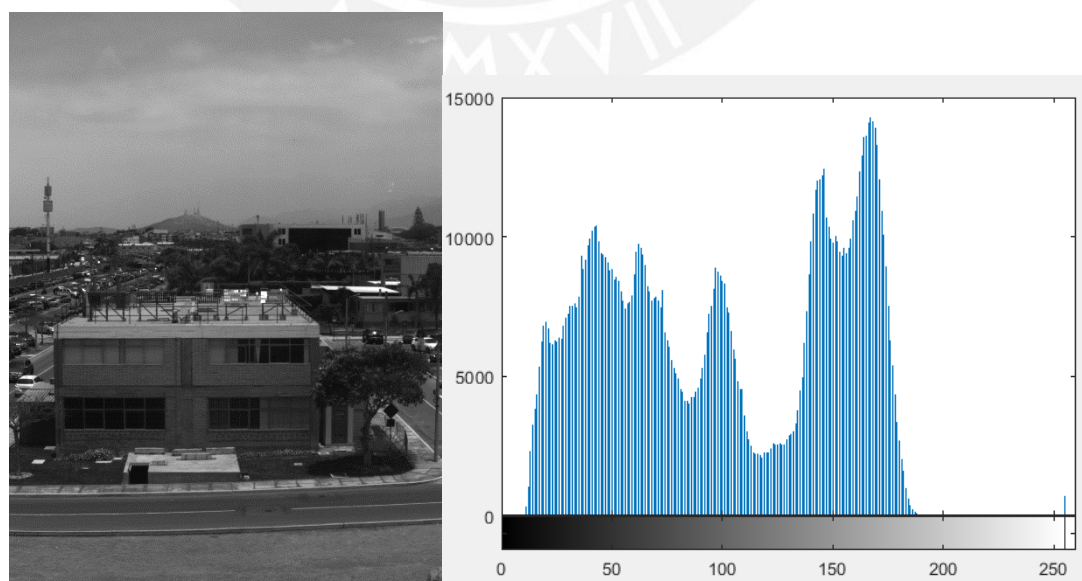


Figura 59: A la Izquierda, imagen tomada 11:45h y a la derecha su histograma.

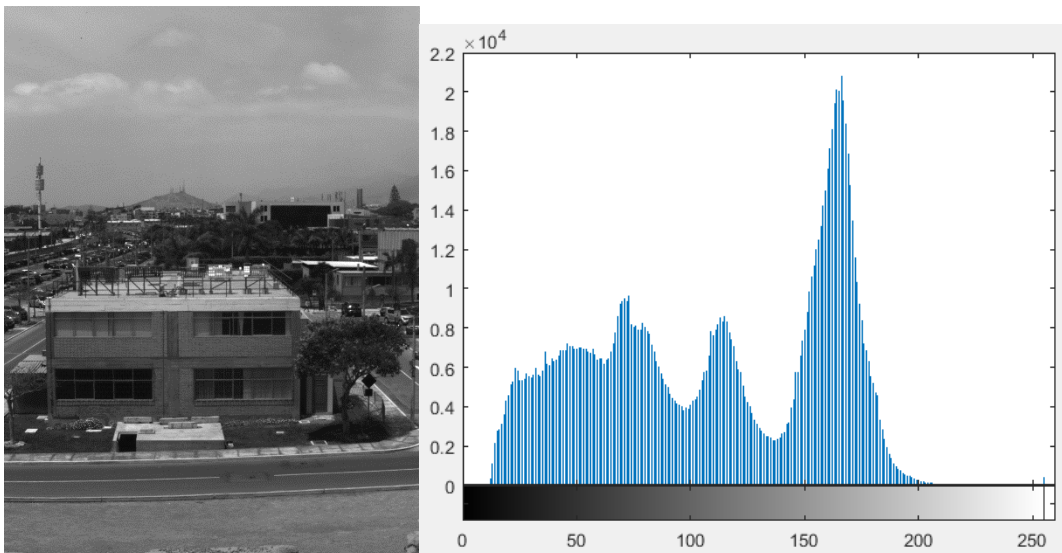


Figura 60: A la Izquierda, imagen tomada 12:53h y a la derecha su histograma.

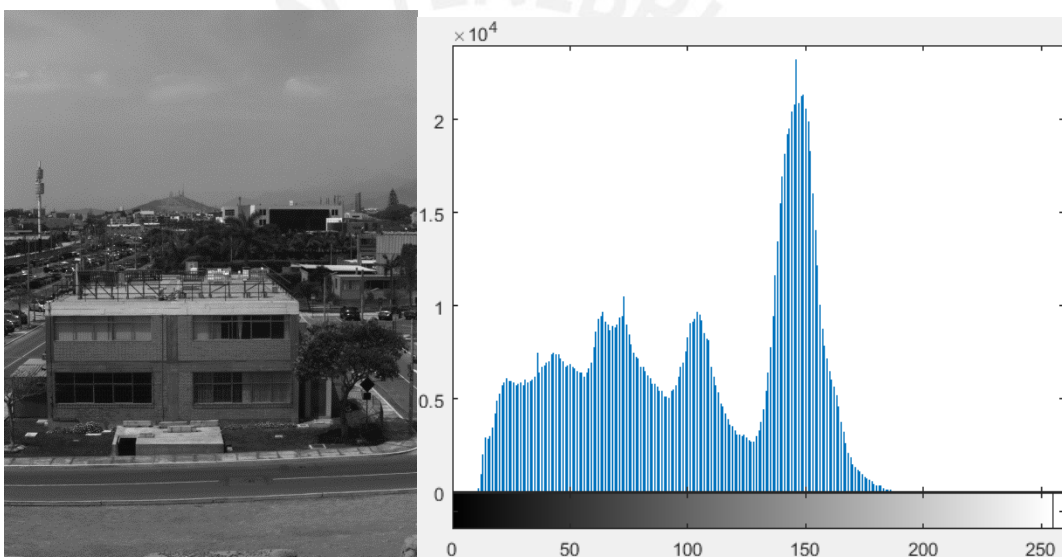


Figura 61: A la Izquierda, imagen tomada 13:26h y a la derecha su histograma.

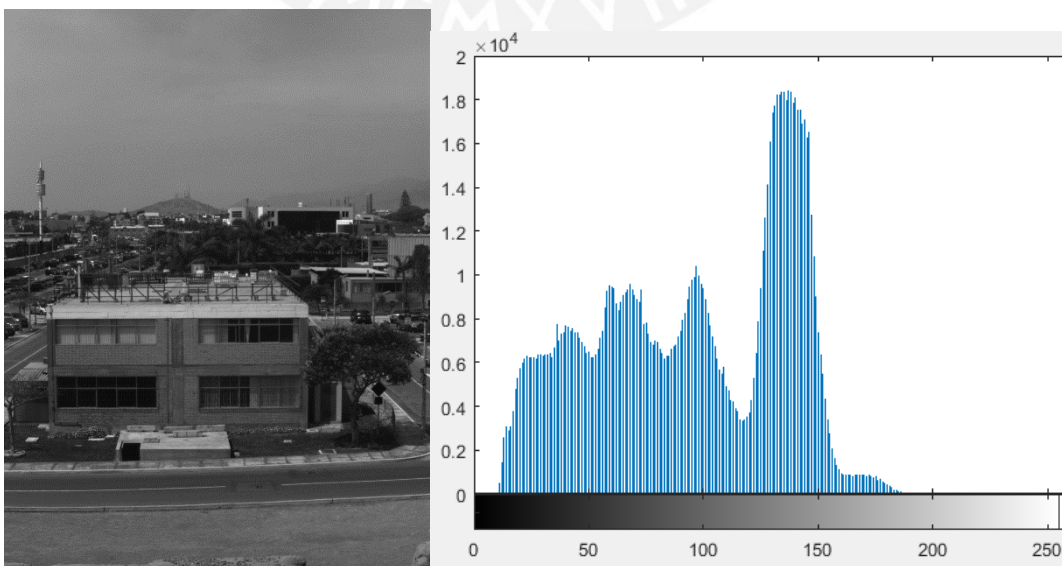


Figura 62: A la Izquierda, imagen tomada 13:47h y a la derecha su histograma.

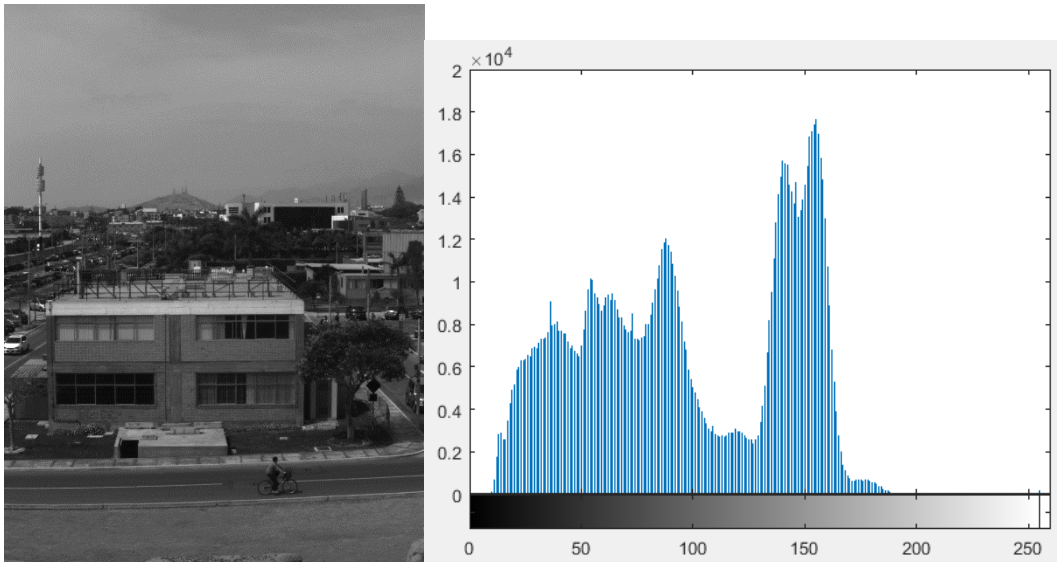


Figura 63: A la Izquierda, imagen tomada 14:11h y a la derecha su histograma.

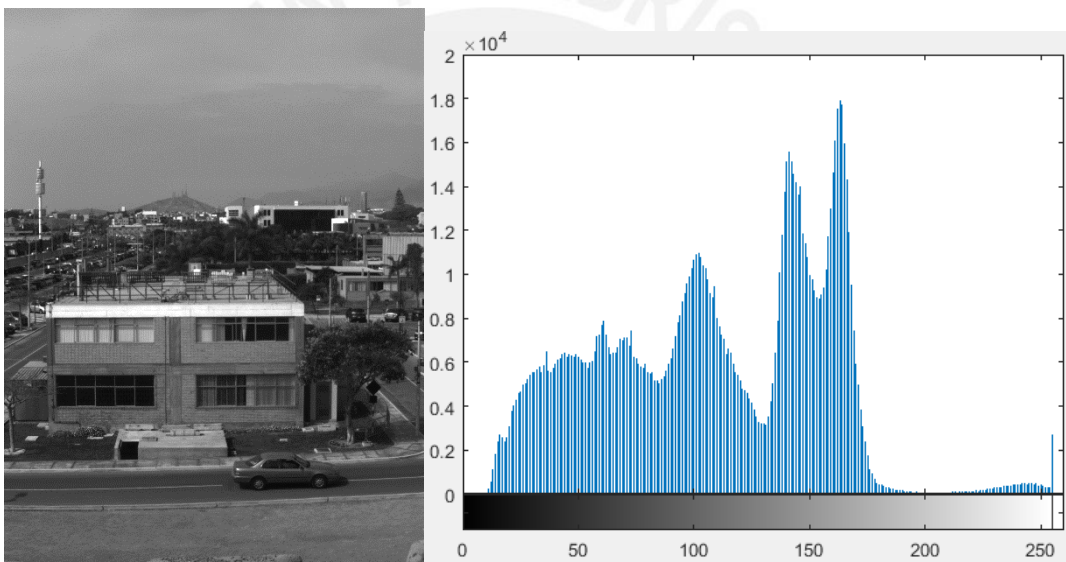


Figura 64: A la Izquierda, imagen tomada 14:50h y a la derecha su histograma.

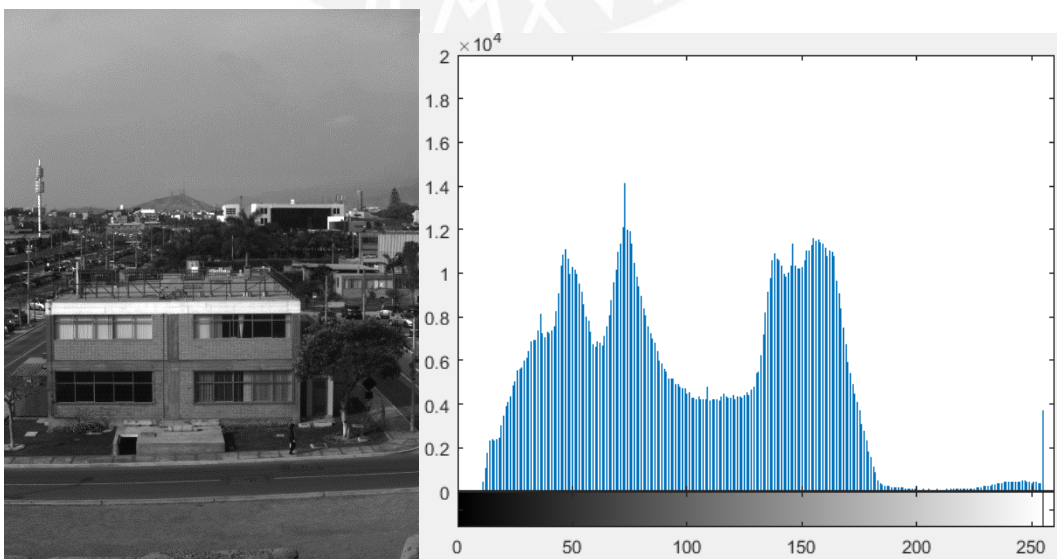
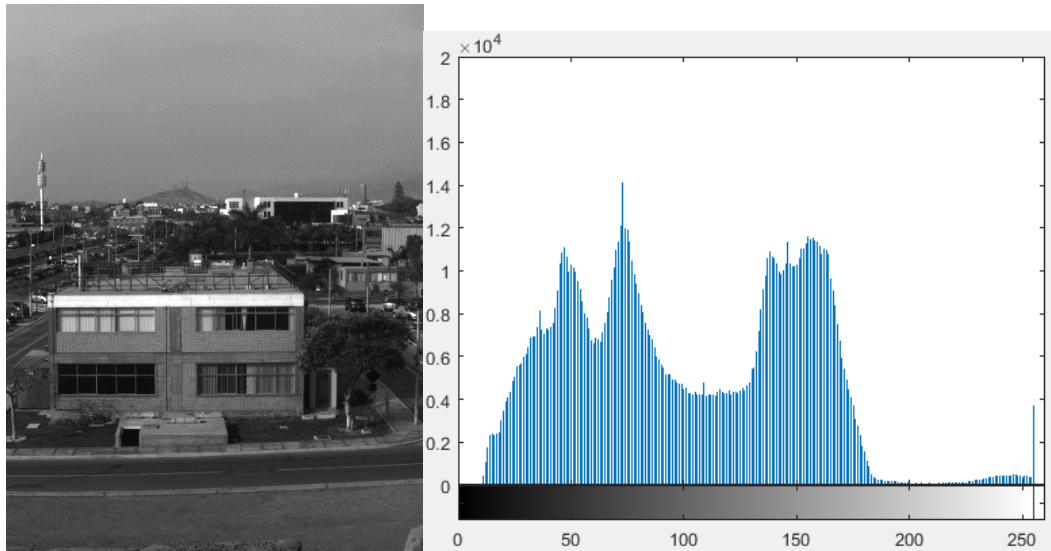


Figura 65: A la Izquierda, imagen tomada 15:43h y a la derecha su histograma.

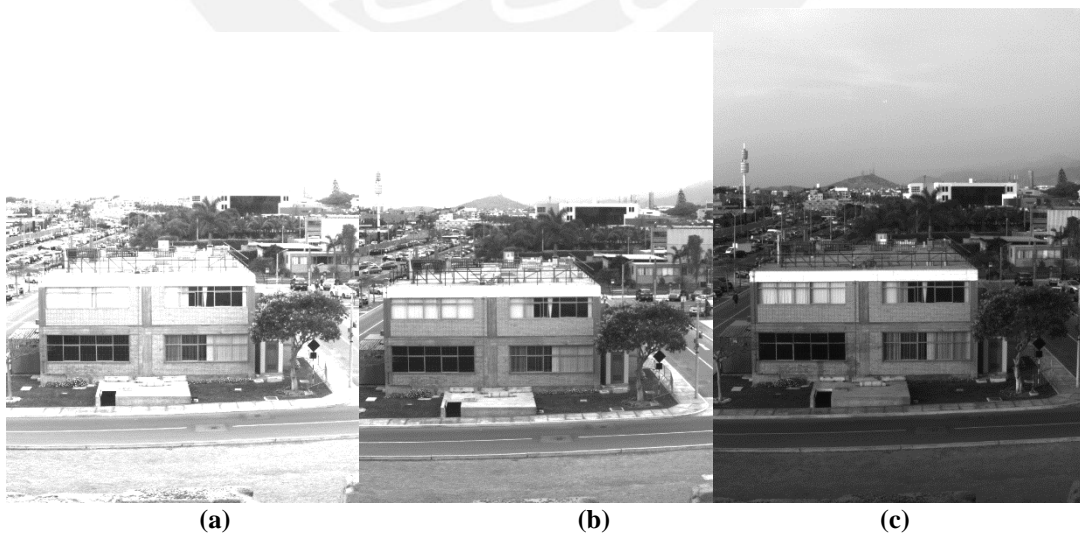




**Figura 66:** A la Izquierda, imagen tomada 16:00h y a la derecha su histograma.

A continuación, se presentan las fotografías tomadas con el sistema automático propio de las cámaras.

La tendencia mostrada en la Figura 67 es variable dependiendo de la apertura de diafragma que se fije. En esta ocasión se fijó un valor de  $f/4$  y con esto necesito de 3 fotografías para llegar a su valor de brillo promedio. Sin embargo, como mínimo necesita 2 fotografías para llegar a su valor de brillo promedio. Por lo tanto, el sistema propuesto es más eficiente debido a que el sistema propio de las cámaras necesita de 2 o más fotografías para llegar a su valor de brillo promedio, mientras que el sistema propuesto solo necesita de 1 fotografía.



**Figura 67:** Evolución de las fotografías con el sistema automático propio de las cámaras.  
(a) 1° fotografía, (b) 2° fotografía y (c) 3° fotografía.

#### 4.6.2 Comparación entre sistema automático y sistema propuesto

Los siguientes parámetros son usados para la comparación cuantitativa entre el sistema automático propio de las cámaras y el sistema propuesto:

Porcentaje de Píxeles Oscuros (%Po): Las cámaras Point Grey toma fotografías en la escala de grises de 0-255. Para determinar %Po se consideró los píxeles con valor menor e igual a 10 dividido por la cantidad total de píxeles.

Porcentaje de Píxeles Claros (%Pcla): Se consideró los píxeles con valor mayor e igual a 250 dividido por la cantidad total de píxeles.

Estas 2 variables (%Po y % Pcla) definen el grado de subexposición y sobreexposición respectivamente, mientras mayor sean estos parámetros se estará más lejos de una exposición adecuada (Torres & Menéndez, 2015).

Se tomaron fotografías en tres horarios del día: Mañana 9:30am – 11:30am, Mediodía 11:30am-2:30pm y Tarde 2:30pm-5:00pm.

En el sistema automático propio de las cámaras solo se tuvo en cuenta las fotografías que llegaron al valor de brillo promedio (como el de la fotografía “c” de la figura 67).

En la Tabla 12 se muestra los valores máximos en porcentaje de los píxeles oscuros y claros de ambos sistemas y ambas cámaras (A y B) obtenidos en el respectivo horario. La forma en la que se obtuvieron estos resultados se ejemplifica en la Figura 68, donde se muestra que se tomaron N fotografías en la mañana del día 1. Para cada una de las N fotografías se calcula el porcentaje de píxeles oscuros y claros. Luego de estos resultados, se determina el máximo porcentaje de píxeles oscuros y claros obteniendo %Po 1 y %Pcla 1. Este proceso se repite para los días siguientes para obtener %Po 2, %Pcla 2 hasta %Po X y %Pcla X, por último, se determina el máximo valor de %Po 1, %Po 2 hasta %Po X siendo este el que se muestra en la Tabla 12 en la fila del horario de la Mañana, de la misma manera se obtiene %Pcla.

Como se puede apreciar en la Tabla 12 el porcentaje de píxeles claros presenta su máxima variación, en la tarde (0.0089%), para las cámaras A entre el sistema automático actual y el sistema propuesto. Respecto a la cámara B (filtro infrarrojo) la variación entre un sistema y otro es de 0.0004% al mediodía, por lo tanto, no hay diferencia considerable en este parámetro para ambos sistemas. A demás, los valores de %Pcla para la mañana, mediodía y tarde tienen a 0% lo cual es un resultado importante, pues nos indica que las fotografías no presentan sobreexposición.

Sin embargo, en el porcentaje de píxeles oscuros si hay una diferencia notoria entre un sistema y otro. En cuanto a las cámaras A, el sistema automático propio de las cámaras presenta un máximo de 22.1809% de píxeles oscuros en el horario de la tarde mientras que el sistema propuesto tiene un máximo de 6.8787% de píxeles oscuros en el horario de mediodía. Por ello, se tiene una mejora del 15.3022% para las cámaras A. Mientras que, para las cámaras B el sistema automático propio de las cámaras presenta un máximo de 11.0630% de píxeles oscuros en el horario de la tarde y el sistema propuesto presenta 4.5854% de píxeles oscuros en el horario de mediodía. Por lo tanto, se tiene una mejora de 6.4776%. Estos resultados respecto a %Po validan la mejora del sistema propuesto pues, cuantifican la disminución del nivel de subexposición tanto para la cámara A como para la cámara B. Mientras que también se verifica que ambos sistemas son eficientes en el nivel de sobreexposición de las fotografías como se puede apreciar ambos sistemas presenta aproximadamente 0% de píxeles claros.

Tabla 12: Comparación de Píxeles oscuros y claros

	Sistema Automático Propio de las Cámaras				Sistema Propuesto			
	Cámara A		Cámara B		Cámara A		Cámara B	
	%Po	%Pcla	%Po	%Pcla	%Po	%Pcla	%Po	%Pcla
Mañana	5.8621	0.0002	2.6956	0.0001	3.7893	0.0008	0.7262	0.0003
Mediodía	5.6585	0.0211	1.3760	0.0063	6.8787	0.0220	4.5854	0.0059
Tarde	22.1809	0.0507	11.0630	0.0230	5.4488	0.0596	2.1227	0.0231

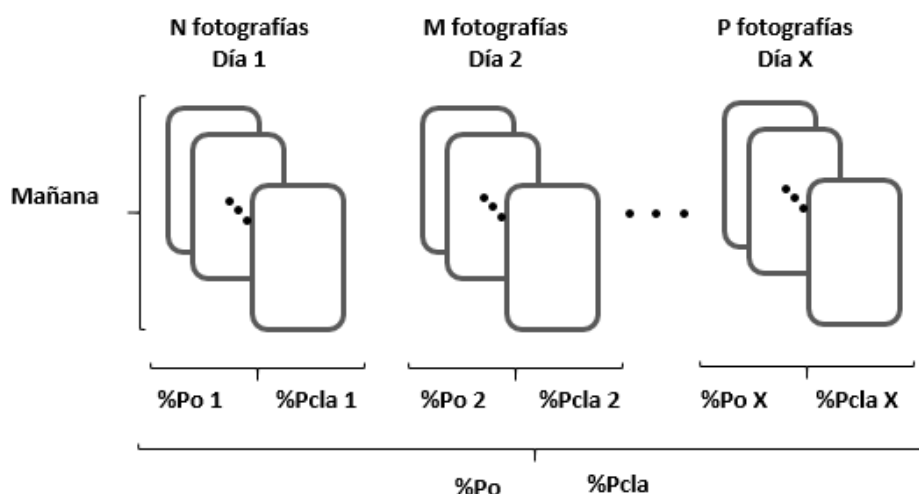


Figura 68: Obtención de porcentajes de píxeles oscuros y claros.

En la Tabla 13 se muestra el porcentaje de variación mínimo y máximo entre fotografías dentro del respectivo horario, así como también, en la Tabla 14 se muestra los porcentajes de variación mínima y máxima durante todo el día. La forma en la que se obtuvo los resultados se ejemplifica en la Figura 69, para este ejemplo se tiene N fotografías en la mañana del día 1, para obtener % VarMin1 y % VarMax1 se toma estas N fotografías y se realiza una combinatoria de N en 2, con cada uno de estos grupos de 2 fotografías se realiza una resta pixel a pixel, se suma los valores absolutos de los resultados y se divide entre el número total de pixeles. El número total de grupos de N fotografías tomadas en grupos de 2 se calcula mediante la ecuación (11).

$$\binom{N}{2} = \frac{N!}{2! * (N - 2)!} \quad (11)$$

Por lo tanto, de la ecuación (11) se obtendría el número total de variaciones para las N fotografías de la mañana del día 1, de este total de variaciones se calcula el mínimo y máximo valor de variación y se obtiene % VarMin 1 y % VarMax 1 respectivamente, de la misma forma obtenemos % VarMin 2 y % VarMax 2 para las fotografías de la mañana del día 2 hasta los % VarMin X y % VarMax X de las fotografías de la mañana del día X. De estos resultados preliminares calculamos el mínimo y máximo porcentaje de variación y obtenemos % VarMin y % VarMax que figuran en la Tabla 13 en la fila del horario de la Mañana, de la misma forma obtenemos los resultados de los horarios del mediodía y de la tarde.

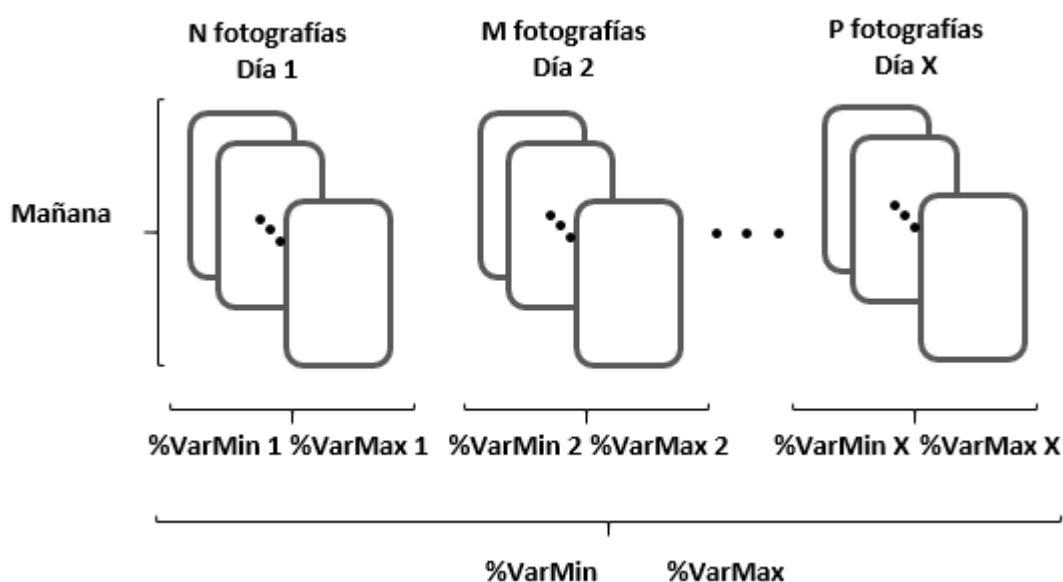
En la tabla 13 se realiza la comparación de cuanta variación existe entre fotografías tomadas en diferentes momentos del día. Como se puede apreciar para ambos sistemas la variación máxima ocurre durante la Tarde, para la cámara A el sistema propio de las cámaras presenta un máximo de variación de 7.84% mientras que para el sistema propuesto su máxima variación es de 4.78% obteniendo una reducción de 3.06% en este horario. Para la cámara B, el sistema propio de las cámaras presenta un máximo de variación de 5.63% mientras que para el sistema propuesto su máxima variación es de 3.58% obteniendo una reducción de 2.05%.

Los resultados de la tabla 13 demuestran que tanto el sistema propio de las cámaras como el sistema propuesto en las mañanas y al mediodía no superan el 3% de variación entre fotografías en la cámara A mientras que la cámara B no supera el 2%, esto nos indica que ambos sistemas regulan su tiempo de exposición para poder mantener la misma tonalidad en las fotografías. En la tarde, debido a la variación de luz en el

ambiente (atardecer) se espera ver esta variación reflejada en las fotografías, sin embargo, como se evaluó líneas arriba el sistema propuesto atenúa mejor este cambio de iluminación, producto del atardecer, manteniendo la misma tonalidad en las fotografías.

**Tabla 13: Comparación de la variación de fotografías**

	Sistema Automático Propio de las Cámaras				Sistema Propuesto			
	Cámara A		Cámara B		Cámara A		Cámara B	
	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max
Mañana	0.0052	2.6900	0.0073	2.4800	0.0511	1.5600	0.2800	0.7600
Mediodía	0.2400	1.8200	0.2000	1.1190	0.0659	1.7400	0.0196	1.4400
Tarde	0.0032	7.8400	0.0018	5.6300	0.1000	4.7800	0.1300	3.5800



**Figura 69: Obtención de porcentajes mínimos y máximos de variación.**

En la Tabla 14 a diferencia de la Tabla 13 ya no se agrupa por horario sino se toma en cuenta el total de fotografías tomadas en el día, la combinatoria para el día 1 sería el total de fotografías tomadas el día 1 (mañana + mediodía + tarde) agrupadas en grupo de 2, posterior a esta agrupación la forma de obtener % VarMin y % VarMax de la Tabla 14 es de la misma forma que en la Tabla 13.

En la Tabla 14 se realiza la comparación de cuanta variación existe en las fotografías tomadas tanto con el sistema automático propio de las cámaras como con el sistema propuesto, esta variación es obtenida por el total de fotografías tomadas en un día. Como se puede apreciar la menor variación se encuentra en el sistema automático propio de la cámara, sin embargo, también es el sistema que presenta mayor variación. Para las cámaras A presenta 8.76% de variación mientras el sistema propuesto presenta 6.58% de variación. Obteniendo una mejora de 2.18%.

Respecto a las cámaras B, el sistema automático propio de la cámara presenta 6.2% de variación mientras que el sistema propuesto presenta 5.62% de variación. Obteniendo una mejora de 0.58%.

Estos resultados validan la mejora del sistema propuesto pues, sin importar el momento del día, dentro de los horarios establecidos previamente, el sistema propuesto regulará el tiempo de exposición para tomar fotografías donde los cambios de iluminación del ambiente sean atenuados; y entre una y otra fotografía para la cámara A no superará el 7% de variación, mientras que para la cámara B no superará el 6% de variación.

**Tabla 14: Comparación de la variación de fotografías durante todo el día**

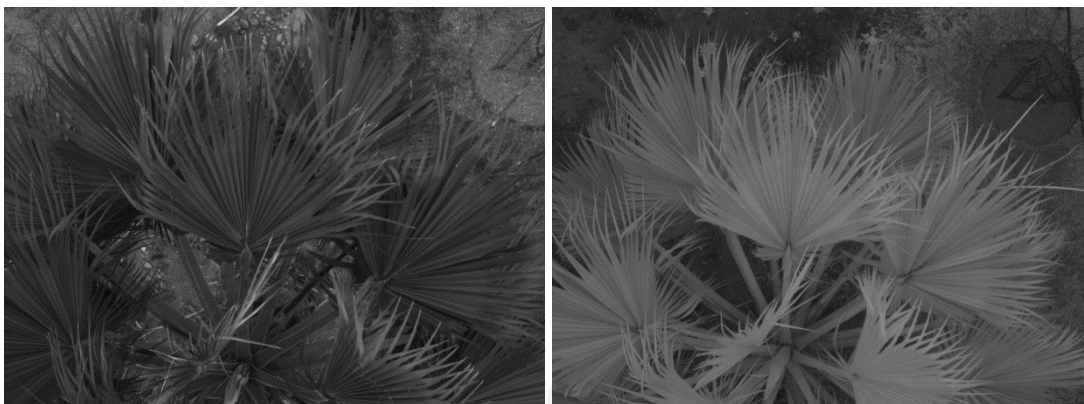
	Sistema Automático Propio de las Cámaras				Sistema Propuesto			
	Cámara A		Cámara B		Cámara A		Cámara B	
	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max	% Var. Min	% Var. Max
<b>DIA TOTAL</b>	0.0032	8.7600	0.0018	6.2000	0.0511	6.5800	0.0196	5.6200

#### 4.6.3 Resultado de fotografías tomadas en campo

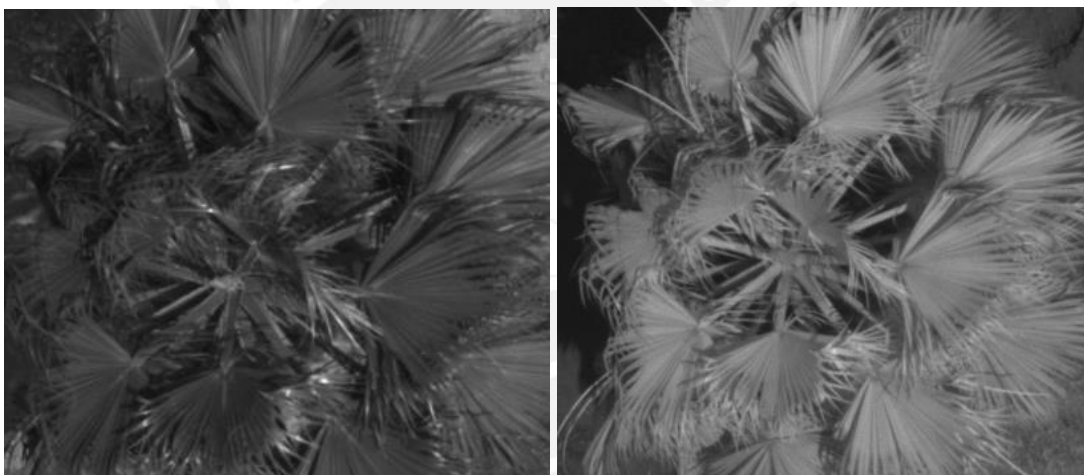
A continuación, se muestran las fotografías tomadas desde un dron en vuelo entre las canchas de rugby y fútbol a las afueras del polideportivo. Las fotografías fueron tomadas en 3 momentos y días diferentes.

Las figuras 70,71 y 72 muestran las fotografías de las hojas de una palmera tomadas con la cámara A y con la cámara B. Todas las fotografías fueron tomadas con el sistema propuesto en la presente tesis. A diferencia de la figura 67, con el sistema propuesto

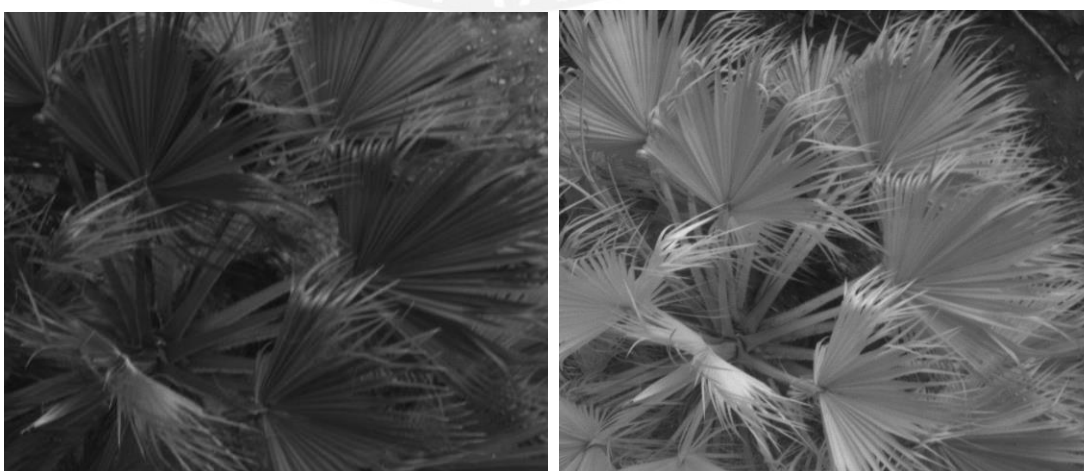
se logra obtener fotografías con los parámetros de pixeles oscuros y claros dentro de los rangos de la Tabla 12 en la primera captura con lo cual se logra mejoras de eficiencia.



(a) (b)  
**Figura 70: Imágenes tomadas a las 11:00am.**  
(a) Cámara A (b) Cámara B



(a) (b)  
**Figura 71: Imágenes tomadas a las 12:10pm.**  
(a) Cámara A (b) Cámara B



(a) (b)  
**Figura 72: Imágenes tomadas a las 05:03pm.**  
(a) Cámara A (b) Cámara B

## Conclusiones

- Se implementó un módulo de control electrónico para la regulación del tiempo de exposición de las cámaras Point Grey modelo CMLN-13S2M-CS de manera automática durante el recorrido de los drones.
- Se consiguió realizar la integración del sensor de luminosidad, cámaras y PcDuino. Esto implica la realización de comunicación I2C del sensor de luminosidad y PcDuino. Así como también, la comunicación entre el PcDuino y las cámaras.
- Se consiguió implementar el algoritmo que relaciona los datos leídos por el sensor (lux) y el tiempo de exposición. Este algoritmo posee una constante que permite regular la variación del tiempo de exposición respecto a la cantidad de lux leída por el sensor de luminosidad.
- Se redujo en un 15.3022% la cantidad de píxeles oscuros (subexposición) en la cámara A y un 6.4776% en la cámara B. En cuanto a la variación en las fotografías en la cámara A se redujo en un 2.18% y en la cámara B se redujo en un 0.58%
- Existe una mejora en cuanto a recurso en el uso del sistema de automatización propuesto, pues en una sola fotografía consigue llegar a resultados similares al del modo automático de la cámara, el cual necesita tomar más de una foto para llegar a su mejor resultado.
- Se consiguió mejoras apreciables en la cámara B, debido a que en la mayoría de fotografías tomadas con el modo automático de las cámaras presenta los efectos de sobreexposición.
- El Rango de operación de las cámaras se ve afectado debido al efecto de subexposición que se da durante las mañanas nubladas.



## Recomendaciones

- Es recomendable analizar y solucionar la subexposición existente en las tomas de fotografía que se dan en las mañanas como se aprecia en la Figura 58. Este efecto se da durante las mañanas nubladas. Una posible solución es incorporar otro sensor de luminosidad. Este nuevo sensor de luminosidad se encargaría de sensar la luminosidad del cielo. Con esto se esperaría encontrar un patrón entre mañanas con cielo despejado, parcialmente nublado y completamente nublado. Una vez obtenido este patrón se realizaría ajustes en la constante  $k$  de la ecuación (10) para contrarrestar los efectos que se dan durante las mañanas nubladas.
- En la utilización del sensor, no se le comparó con ningún sensor certificado y calibrado, debido a que no se cuenta con uno. Es recomendable hacer una comparación entre el sensor usado y un equipo certificado.
- Un aspecto importante es la precisión de los dispositivos. Para saber que tanto afecta este factor se podría adquirir un sensor, con una precisión mejor que el sensor actual, como el descrito en la Tabla 3 y realizar la comparación entre las fotografías obtenidas con diferentes sensores implementados en el módulo de automatización realizado.

## Bibliografía

- Al-Ali, Z. M., Abdullah, M. M., Asadalla, N. B., & Gholoum, M. (2020). A comparative study of remote sensing classification methods for monitoring and assessing desert vegetation using a UAV-based multispectral sensor. Springer.
- Baca, W. (2013). Diseño de un Sistema de Cálculo de Tiempo de Exposición Aplicado a un Sistema de Adquisición de Imágenes Multiespectrales. Tesis de titulación. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Busch, D. D. (2008). Instantánea de la fotografía digital Réflex (SLR): una guía rápida y concisa para los usuarios de cámaras réflex digitales. Paraninfo Cengage Learning.
- Castillo, J. M. (2012). La composición de la imagen. Paraninfo.
- Castillo, O., & Melin, P. (2008). Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications. Springer.
- Cuevas, J. (2010). Fotografía y conocimiento. La imagen científica en la era electrónica (desde los orígenes hasta 1975). Complutense, S.A.
- Desmarais, L. (1997). Applied Electro Optics. Pearson Education.
- Douglas, A. (15 de Mayo de 2007). Setting Camera Exposure in Terms of Ev. Obtenido de [http://www.dougkerr.net/Pumpkin/articles/Setting\\_Exposure\\_Ev.pdf](http://www.dougkerr.net/Pumpkin/articles/Setting_Exposure_Ev.pdf)
- Fernández, J., & Pujal, M. (1981). Iniciación a la física (Vol. 2). Reverté.
- FotoNavia. (15 de Diciembre de 2013). Los Modos de Exposición. Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de FotoNavia: [http://www.fotonavia.com/?page\\_id=172](http://www.fotonavia.com/?page_id=172)
- García, A. (2015). Iluminación y Contraste. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=bQbmBgAAQBAJ&pg=PT7&dq=Iluminaci%C3%B3n+y+Contraste&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiZkdKVvt7UAhWITCYKHV-uDiIQ6AEIIDA#v=onepage&q=Iluminaci%C3%B3n%20y%20Contraste&f=false>
- García, D. P. (8 de Abril de 2017). Tiempo de Exposición. Recuperado el 7 de Mayo de 2017, de dgpfotografia: <http://dgpfotografia.com/tag/tiempo-de-exposicion/>

- Grey, P. (20 de Abril de 2017). USB2 Cameras. Recuperado el 7 de Mayo de 2017, de Point Grey: <http://www.ptgrey.com/support/downloads/10114>
- Kim , Y., Reid, J., & Zhang, Q. (2008). Fuzzy logic control of a multispectral imaging sensor for in-field plant sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 279-288.
- Langford, M. (1990). *La fotografía paso a paso*. Hermann Blume Ediciones.
- León, N. (12 de Abril de 2017). ISO en Fotografía: Qué es y Cómo Se Usa. Recuperado el 7 de Mayo de 2017, de dzoom: <https://www.dzoom.org.es/sensibilidad-iso-que-es-y-como-funciona/>
- Manriquez, A., & McCluskey, T. (2014). *Video Production 101: Delivering the Message*. Pearson Education.
- MicaSense. (s.f.). Comparación de Sensores. Recuperado el 7 de Mayo de 2017, de micasense: <https://www.micasense.com/sensorcomparison>
- Murakami, M., & Honda, N. (1996). An exposure control system of video cameras based on fuzzy logic using color information. *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*, 2181-2187 vol.3.
- Ospina, S. (4 de Abril de 2017). ¿Cómo utilizar mi cámara semiprofesional en modo manual? Recuperado el 7 de Mayo de 2017, de enter.com: <http://www.enter.co/cultura-digital/el-popurri/camara-semiprofesional-en-modo-manual/>
- Präkel, D. (2013). *Basics Photography 02: Lighting*. AVA Publishing.
- Ray, S., Jacobson, R., Attridge, G., & Axford, N. (2000). *Manual of Photography*. Taylor & Francis.
- Serway, R., & Jewett, J. (2013). *Physics for Scientists and Engineers*. Cengage Learning.
- Shimizu, S., Kondo, T., Kohashi, T., Tsurata, M., & Komuro, T. (1992). A new algorithm for exposure control based on fuzzy logic for video cameras. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 617-623.
- Thomas, J. (2013). *Nikon D5200 Digital Field Guide*. Jhon Wiley & Sons.
- Torres, J., & Menéndez, J. M. (2015). Optimal camera exposure for video surveillance systems by predictive control of shutter speed, aperture, and gain. *International Society for Optics and Photonics*, 238 - 251.

Wilson, R. A., Yotter, & M., D. (2003). A review of photodetectors for sensing light-emitting reporters in biological systems. *IEEE Sensors Journal*, 3(3), 288-303.

Woo Park, K., Soon Kang, B., Hyun Kim, J., Sik Kim, H., Joo Kim, K., & Eung Kim, T. (23 de Febrero de 2010). Estados Unidos Patente nº 7,668,452.

Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de google:

<https://www.google.com/patents/US7668452>

