

# Memorias



Sociedad Latinoamericana en  
Percepción Remota y Sistemas  
de Información Espacial  
Capítulo Colombia

**30**  
AÑOS

Medellín, Colombia  
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



Corrección radiométrica de una cámara multiespectral para aplicaciones en caña de azúcar

Radiometric correction of a multispectral camera for applications in sugarcane crops

Paulo José Murillo Sandoval <sup>1,2</sup>, Fabio Andrés Herrera Rozo<sup>1</sup>, Jean Pierre Díaz <sup>3</sup>,

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia – CENICAÑA<sup>1</sup>

Calle 58 Norte No. 3BN-110 Cali - Colombia.

Universidad del Tolima<sup>2</sup>

Universidad del Valle<sup>3</sup>

[faherrera@cenicana.org](mailto:faherrera@cenicana.org) <sup>1</sup>, [pjmurillos@ut.edu.co](mailto:pjmurillos@ut.edu.co) <sup>2</sup>, [jean.diaz@correounivalle.edu.co](mailto:jean.diaz@correounivalle.edu.co) <sup>3</sup>

Las cámaras multiespectrales miniaturizadas, instaladas en aeronaves de vuelo bajo, han incrementado su aplicabilidad en labores de percepción remota aérea para el seguimiento de cultivos. Estas cámaras aún cuentan con limitaciones tecnológicas inherentes a su construcción ya que, para posibilitar su bajo costo y peso, se reduce la calidad del sensor y algunos componentes. Las imágenes generadas con estos sensores deben ser corregidas en sus componentes geométricos y radiométricos para que la información contenida en ellas sea apropiada para las aplicaciones. Este documento describe una serie de técnicas de procesamiento para la corrección de imágenes derivadas de una cámara multiespectral Tetracam® Mini-MCA de 6 bandas espectrales, en donde se emplea un modelo empírico de calibración radiométrica ajustado a mediciones hechas en campo con un espectralradiómetro. Adicionalmente una rutina computacional fue desarrollada para la corrección de las imágenes obtenidas usando software GNU el cual logra agilizar el procesamiento de un gran volumen de imágenes mejorando así la calidad de las escenas crudas facilitando su aplicación en el desarrollo de futuros análisis cuantitativos sobre el cultivo de caña de azúcar.

Palabras clave: *cámara multiespectral, calibración, radiometría, percepción remota, caña de azúcar.*

Mini multi-spectral cameras placed on small airplanes have increased their practical applicability for crop monitoring from aerial remote sensing. Notwithstanding, those cameras have some technological limitations own even, in order to reduce their cost and weight, those cameras must reduce sensor's quality and other physical components during their manufacturing. Therefore, every image obtain must be corrected in their geometric and radiometric components, This paper describes a series of processing techniques for the correction of images derived from a multispectral camera Mini-MCA by Tetracam® with six spectral bands, where an empirical model of radiometric calibration set to field measurements with a spectroradiometer was employed. Additionally, a computer routine was written to correct the images obtained using GNU software which manages expedite the processing of a large volume of images thereby improving the quality of RAW scenes facilitating their application in the development of future quantitative analysis of the sugar cane crops.

Keywords: *multispectral camera, radiometric calibration, radiometry, remote sensing, sugar cane.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La percepción remota aérea basada en cámaras miniaturizadas ha mostrado resultados comerciales para prácticas de agricultura de precisión como la generación mosaicos georreferenciados y modelos digitales de terreno a partir de cámaras RGB montadas principalmente en VANT (vehículo aéreo no tripulado). Sin embargo para el seguimiento de la vegetación es necesario el uso de regiones espectrales como el infrarrojo cercano. Por ejemplo, la modificación de cámaras convencionales ha permitido generar índices como el NDVI y GNDVI con los cuales se han desarrollado sistemas de bajo costo para el seguimiento del trigo [1,2]. Pero hoy en día, existen cámaras miniaturizadas multiespectrales e hiperespectrales que montadas sobre una gran variedad de plataformas no tripuladas tienen un futuro promisorio para su uso continuo en la estimación de variables biofísicas y bioquímicas sobre los cultivos.

La disponibilidad de VANT ha crecido rápidamente así como su aceptación como plataformas para la adquisición de imágenes de calidad para diversas aplicaciones sobre la vegetación [3]. Aunque nuevas constelaciones satelitales han emergido (RapidEye y DMCii) de acuerdo con Berni *et al.*, [4], cuentan con dos limitaciones para el manejo en tiempo real de los cultivos: 1) carencia de resolución espacial y espectral, y 2) una desfavorable resolución temporal para la detección oportuna de problemas de estrés en los cultivos. Una alternativa es emplear aeronaves tripuladas como plataformas de los sensores ópticos necesarios, sin embargo tiene un alto costo operacional. De esta forma los VANT, al contar con una elevada resolución espacial y una temporalidad definida por el usuario se consolidan como una de las mejores opciones para la adquisición de información espacial de manera oportuna a bajo costo.

Las cámaras miniaturizadas montadas en VANT son un buen complemento para la entrega de información a un costo efectivo [1] pero requieren de calibraciones geométricas y radiométricas que permitan un seguimiento confiable de los fenómenos ocurridos sobre la dinámica terrestre, particularmente sobre los cultivos. Adicionalmente con el fin de obtener datos cuantitativos útiles, es necesario innovar con herramientas computacionales que agilicen la corrección de grandes volúmenes de información.

El uso de cámaras multispectrales e hiperspectrales en cultivos ha mostrado resultados prometedores para la estimación de factores de estrés en cultivos, como la detección de estrés por déficit de agua [5, 6,7], el seguimiento de enfermedades [8], salinidad [9], así como la estimación de variables biofísicas y bioquímicas como índice de área foliar, biomasa, pigmentos fotosintéticos [10]. Pero para lograr estimaciones precisas de dichos factores, es necesaria la corrección radiométrica de las imágenes a partir de la combinación de métodos físicos y empíricos.

Los acercamientos para la corrección radiométrica son realizados en: laboratorio, a bordo de la plataforma, usando referencias en campo (del inglés *vicarious calibration*) y calibraciones propias (del inglés *self-calibración*) [11]. Para cada acercamiento diferentes equipos y métodos son usados, así como diferentes niveles de exactitud son obtenidos. Para la calibración en laboratorio se debe emplear esferas integradoras con las cuales se obtienen diferentes niveles de radiación conocida, lo cual permite conocer la relación lineal entre niveles digitales y radiancia. Para la calibración a bordo, se deben emplear sensores en condiciones de vuelo. Para la calibración usando referencias es necesario usar lonas en campo, naturales o artificiales y calcular su radiancia exacta, adicionalmente se requiere tener exactitud sobre las condiciones atmosféricas y la reflectancia o radiancia de las lonas

usando espectroradiómetros de campo. En este trabajo se empleó un acercamiento basado en una calibración vicaría, debido a que se relaciona directamente con los reales cambios de las condiciones atmosféricas y de iluminación y se cuenta con los equipos necesarios para la obtención de medidas confiables de radiancia e irradiancia en campo.

Los modelos obtenidos fueron usados para crear una herramienta práctica para el procesamiento de una gran cantidad de imágenes derivadas de la cámara multiespectral. Una sencilla interface usando el software libre GNU Octave (<http://www.gnu.org/software/octave/>) resume el desarrollo de las rutinas computacionales que permiten el procesamiento en lote de las imágenes crudas adquiridas por la cámara hasta imágenes corregidas en su componente radiométrico. Este desarrollo permite agilizar y mejorar la calidad de las imágenes crudas permitiendo su futuro uso en aplicaciones cuantitativas.

## 2. El modelo radiométrico

Cuando un objeto interactúa con la radiación electromagnética, la potencia incidente  $P_{\text{incidente}}$  se descompone en tres factores; una parte reflejada  $P_{\text{reflejada}}$  en dirección opuesta al flujo incidente, una parte absorbida  $P_{\text{absorbida}}$  para cambiar el estado de energía del cuerpo, y una parte transmitida  $P_{\text{transmitida}}$  a través del cuerpo como se muestra en la (ecuación 1).

Debido a que los elementos usados en la aplicación son opacos (sin transmisión) puede desprejarse la componente transmitida de la potencia incidente, y puede suponerse que la

potencia radiada por estos cuerpos está compuesta por una parte reflejada y una parte emitida debida a su propia temperatura. Puede despreciarse la potencia emitida debido a que la temperatura del objeto se presenta principalmente en longitudes de onda diferentes a las que son de interés en este experimento. Por lo anterior se supone que la potencia radiada desde el objeto corresponde únicamente a la potencia reflejada por él mismo (**ecuación 2**).

El sensor CMOS compuesto por un arreglo de transistores sensibles a la luz y parte central de la cámara usada, se apoya en el efecto fotoeléctrico para generar un aumento de voltaje con una razón de cambio proporcional a la potencia instantánea captada por el sensor y a la sensibilidad del sensor. El número digital  $ND_{obj}$  de una imagen corresponde a la cuantización de la energía radiada desde un objeto y es capturada por el sensor después de haber atravesado la atmósfera, los filtros y las lentes de la cámara (**ver figura 1**).

En la construcción de la cámara MCA de Tetracam, se ha reemplazado el obturador por una función de inicio y fin de la acumulación en el CMOS denominada también tiempo de integración obteniendo de esta forma el  $ND_{obj}$  como se observa en (**ecuación 3**).

Considerando que el tiempo de integración  $T_i$  es lo suficientemente pequeño, es correcto suponer que las variables no presentan cambios significativos durante el periodo de la captura de la imagen, por lo cual la expresión puede re-escribirse como en la (**ecuación 4**):

Los parámetros relacionados con el lente, el filtro y el sensor CMOS conforman el modelo de la cámara que corresponde a un arreglo en serie de distintos elementos y pueden ser concentrados en un solo parámetro al suponer la función de los filtros como la de un filtro

pasa bandas que se aproxima a un impulso frecuencial en  $\lambda_0$  de la manera mostrada en la (ecuación 5):

Obteniendo entonces las expresiones (ecuación 6 y ecuación 7) que representan la relación funcional entre la radiancia  $Rad_{obj}$  y el número digital  $ND_{obj}$  en la longitud de onda  $\lambda$ .

La cámara genera una imagen de acuerdo con la energía total  $Ener_{obj}$  recibida en cada celda del arreglo CMOS correspondiente con la acumulación de la radiancia a lo largo del tiempo de integración, lo cual permite reducir la cantidad de variables del modelo (ecuación 8).

### 3. MATERIALES

Para ajustar el modelo de la (ecuación 8), y encontrar los parámetros  $K$  y  $C_0$  apropiados para cada banda espectral de la cámara, que sean coherentes con la ecuación para el modelo inverso de la (ecuación 5), se plantea el experimento diagramado en la (Figura 2) a partir del cual se estiman las variables  $Ener_{obj}(\lambda)$  y  $ND_{obj}(\lambda)$  en cada banda.

#### 3.1 Referencias de campo

Se seleccionaron 5 lonas plásticas opacas de diferentes colores de tamaño 20x15cm (figura 3), como patrones o referencias de campo. Se escogieron estas para hacer válido el supuesto de transmisión despreciable.

### **3.2 Cámara Multiespectral**

Fue usada la cámara Tetracam Mini MCA, que consiste de un arreglo matricial de seis cámaras, cada una con un filtro óptico diferente, que permite obtener imágenes monocromáticas en distintas longitudes de onda. La información detallada sobre la cámara se puede encontrar en [www.tetracam.com](http://www.tetracam.com).

### **3.3 Espectro radiómetro de campo**

Los datos de reflectancia e irradiancia solar fueron adquiridos usando un espectro radiómetro APOGEE PAR-NIR (400 - 950 nm). Un medidor de radiación global PAR portátil fue empleado para medir la radiación incidente con el objetivo de definir el tiempo de integración adecuado para la toma de las imágenes en trabajos prácticos.

## **4. MÉTODOS**

Se captura una serie de imágenes con la MCA ajustada de manera que el tiempo de integración  $T_i$  de todas las cámaras sea igual; variando el tiempo de integración en cada toma, y simultáneamente se mide la irradiancia en la escena con el espectro radiómetro de campo, la cabeza correctora de coseno y una fibra óptica de 400  $\mu\text{m}$  de diámetro. Cada curva obtenida con el espectro radiómetro corresponde al espectro de la potencia incidente en los objetos en el instante de captura y se estima entonces la radiancia desde los objetos como el producto entre la irradiancia en la escena y la reflectancia de cada objeto.

La adquisición de imágenes y mediciones espectrales fueron realizadas de manera simultánea en condiciones de campo obteniendo imágenes de los objetos, de donde se

extrajeron los números digitales de ROIs. Estos números digitales se comparan con las radiancias. Para obtener los valores de radiancia, es necesario tener los patrones de reflectancia para cada lona de calibración y su respectivo valor de irradiancia solar asumiendo que: (**ver Figura 4**). Finalmente para obtener radiancia en el sensor se tomaron diversas imágenes con tiempos de integración entre los 0.5 y 12 ms asumiendo que: (**ver ecuación 10**)

## 5. RESULTADOS

Con los datos de irradiancia, reflectancia, números digitales y tiempos de integración, se encuentran los parámetros concentrados  $K$  y  $C_0$  mediante una aproximación de mínimos cuadrados en la ecuación anterior obteniendo ajustes de rectas como la **Figura 5** para cada banda o longitud de onda de la cámara.

Al repetir este proceso con todas las bandas se obtienen las expresiones que modelan radiométricamente la MCA con un factor  $R^2$  de 0.98. Estas expresiones consideradas en la (**ecuación 11**) permiten obtener la radiancia en cada longitud de onda a partir de los valores digitales en la imagen.

Con base en los modelos ajustados se desarrolló, sobre OCTAVE, la rutina computacional esquematizada en la **Figura 6** para un pre-procesamiento en lote.

Las imágenes generadas por cada cámara de mini MCA son guardadas en archivos de extensión .RAW. Estos archivos son leídos teniendo en cuenta su encabezado para extraer

el tiempo de integración con el cual fue adquirida la imagen, el formato en que está escrita la imagen; 8 o 10 bits, y las coordenadas de captura. Con la imagen y el tiempo de integración se calcula la radiancia correspondiente a cada píxel y se concatena en orden de acuerdo con las longitudes de onda del filtro asociado a cada banda. Para el posterior uso de las imágenes en un ambiente SIG se escriben en el formato Hierarchical Data Format (hdf).

Un ajuste geométrico se aplica a cada imagen teniendo en cuenta el modelo de lentes de cada cámara correspondiente, y posteriormente se realiza la alineación de imágenes tomando la rotación y desplazamiento de cada altura de vuelo. Estos puntos son tomados de manera interactiva en la primera imagen y se aplica el modelo a todas las imágenes en la misma carpeta.

## **6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES**

Se obtuvo un modelo radiométrico por banda con un  $R^2$  mínimo de 0.965. Se desarrolló una herramienta computacional en código libre para el pre procesamiento de grandes volúmenes de información capturados por la Tetracam Mini MCA que permite la obtención de imágenes en radiancia y ajustadas geométricamente.

Es necesario medir o simular la irradiancia en vuelo, de manera que los datos de radiancia sean procesados para obtener datos de reflectancia sobre la superficie. Lo cual es vital para estimaciones cuantitativas de fenómenos ocurridos en la superficie terrestre.

La calibración de laboratorio a partir de esferas integradoras y el uso de equipos portátiles para la medición de espesores de aerosoles permiten al momento de los vuelos ajustar mejor los parámetros de tiempo de integración y asegurar una mejor calidad radiométrica.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Centro de investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) por el apoyo financiero a esta investigación.

## **8. REFERENCIAS**

[1] Lelong, C.C.D.; Burger, P.; Jubelin, G.; Roux, B.; S. Labbe, S.; Baret, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors* 2008, 8, 3557-3585.

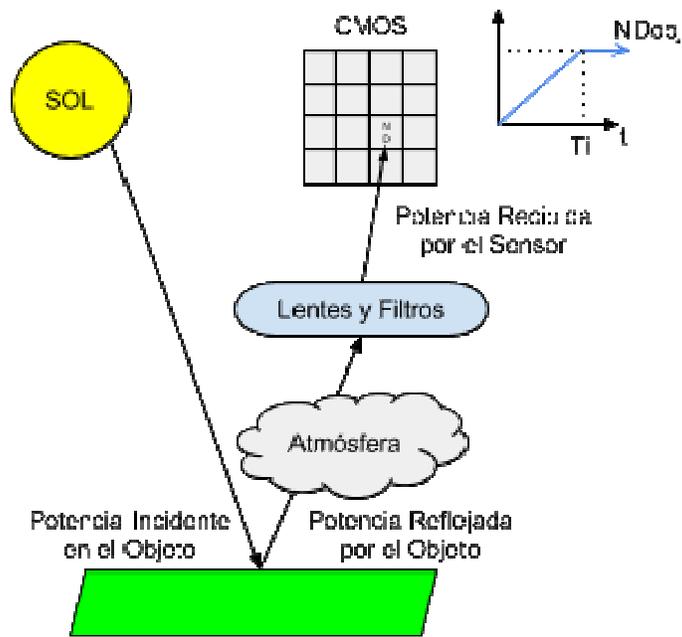
[2] Hunt, E.R., Jr.; Hively, W.D.; Fujikawa, S.J.; Linden, D.S.; Daughtry, C.S.T.; McCarty, G.W. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sens.* 2010, 2, 290-305

[3] Laliberte, A.S.; Goforth, M.A.; Steele, C.M.; Rango, A. Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments. *Remote Sens.* 2011, 3, 2529-2551.

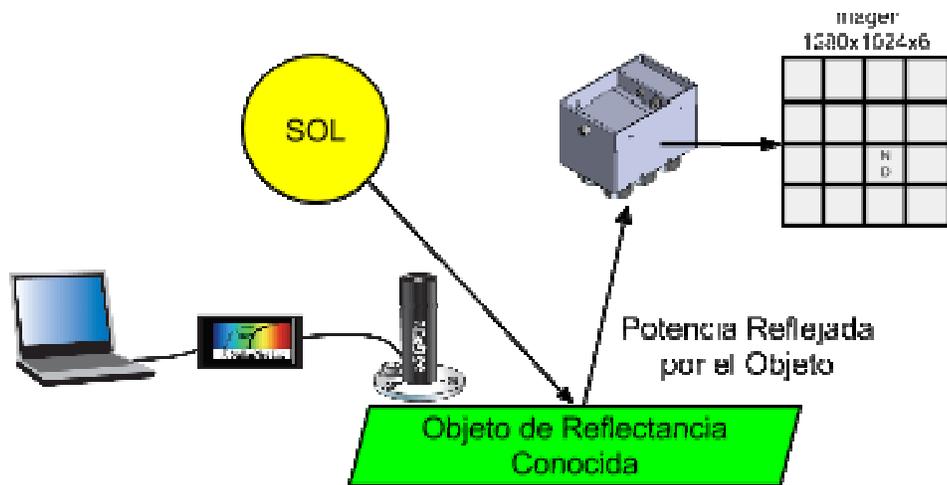
- [4] Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E., 2009. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (3), 722–738.
- [5] Zarco-Tejada, P.J.; Berni, J.A.J.; Suárez, L.; Sepulcre-Cantó, G.; Morales, F.; Miller, J.R. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, 1262-1275.
- [6] Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., González-Dugo, V., Fereres, E., 2009. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment* 113 (4), 730–744.
- [7] Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Berni, J.A.J., Sagardoy, R., Morales, F., Fereres, E., 2010. Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment* 114 (2), 286–298.
- [8] Jianwei Yue , Tianjie Lei , Changchun Li & Jiangqun Zhu (2012) The Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing in Quickly Monitoring Crop Pests, *Intelligent Automation & Soft Computing*, 18:8,1043-1052, DOI: 10.1080/10798587.2008.10643309
- [9] Hamzeh, S., Naseri, A. A., AlaviPanah, S. K., Mojaradi, B., Bartholomeus, H. M., Clevers, J. G. P. W., & Behzad, M. (2012). Estimating salinity stress in sugarcane fields

with spaceborne hyperspectral: Vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1), 282-290.

[10] Monteiro, P. F. C., Filho, R. A., Xavier, A. C., & Monteiro, R. O. C. (2013). Vegetation indices simulated from different sensors for the estimation of biophysical variables of common bean. [Índices de vegetação simulados de diferentes sensores na estimativa das variáveis biofísicas do feijoeiro] *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 48(4), 433-441.



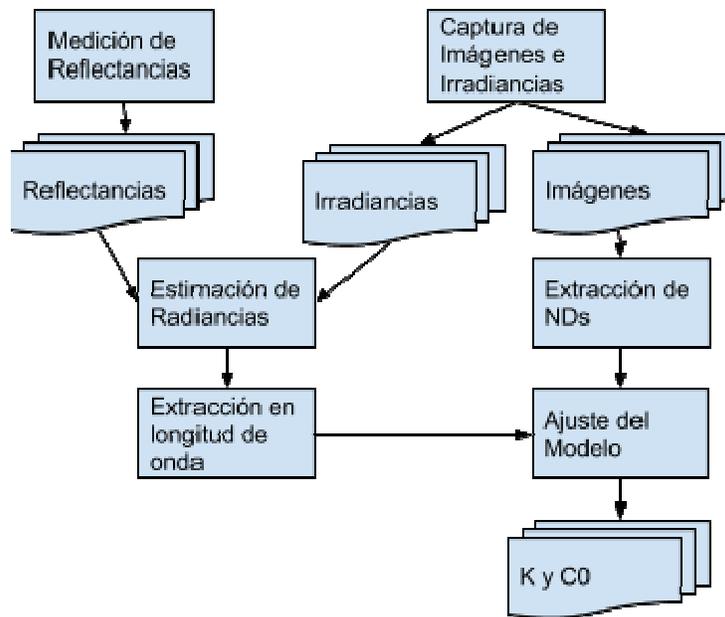
**Figura 1.** Componentes de la percepción remota pasiva



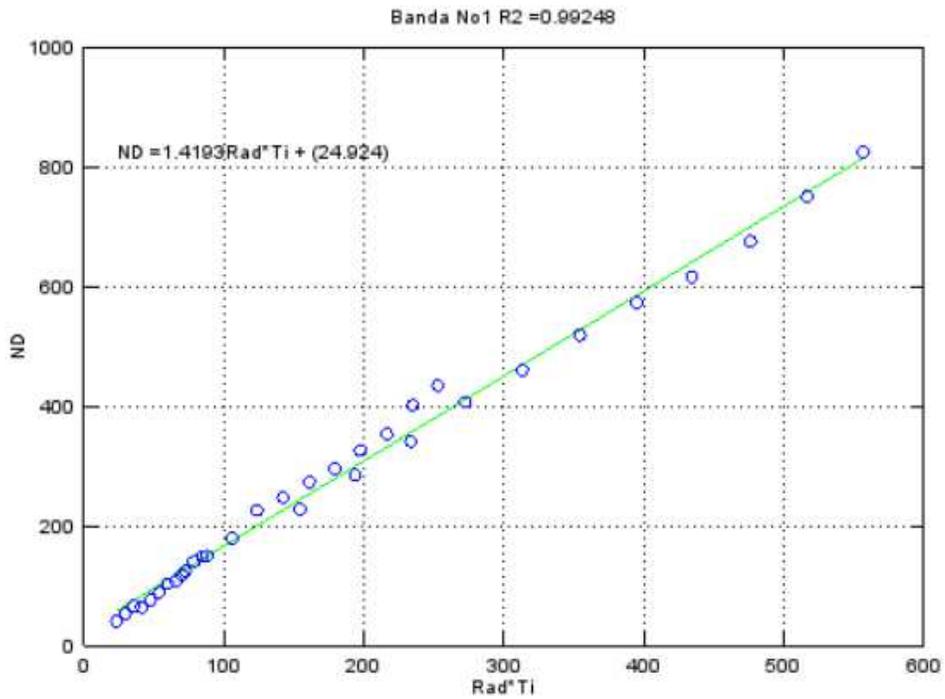
**Figura 2.** Esquema de adquisición de datos de irradiancia e imágenes



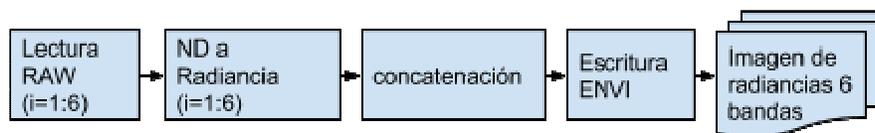
**Figura 3.** Lonas plásticas usadas como patrones o referencias de campo



**Figura 4.** Diagrama metodológico de calibración radiométrica



**Figura 5.** Relación lineal entre Radiancia x Tiempo de integración y Niveles digitales para la banda 1 (Azul)



**Figura 6.** Diagrama de computación de implementación

(Ecuación 1)	$P_{\text{incidente}} = P_{\text{reflejada}} + P_{\text{absorbida}} + P_{\text{transmitida}}$ $P_{\text{incidente}} = P_{\text{reflejada}} + P_{\text{absorbida}} + P_{\text{transmitida}}$
(Ecuación 2)	$P_{\text{radiada}} \simeq P_{\text{reflejada}}$ $P_{\text{radiada}} \simeq P_{\text{reflejada}}$
(Ecuación 3)	$ND_{\text{obj}} = K \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{T_i} \text{Rad}_{\text{obj}}(t, \lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Lente}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Filtro}}(\lambda) \cdot \text{Sens}_{\text{CMOS}}(\lambda) \cdot dt \cdot d\lambda + C_0$ $ND_{\text{obj}} = K \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{T_i} \text{Rad}_{\text{obj}}(t, \lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Lente}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Filtro}}(\lambda) \cdot \text{Sens}_{\text{CMOS}}(\lambda) \cdot dt \cdot d\lambda + C_0$ <p><math>\text{Rad}_{\text{obj}}</math> <math>\text{Rad}_{\text{obj}}</math> Corresponde a la radiancia que sale del objeto.</p> <p><math>\text{Trans}_{\text{Lente}}</math> <math>\text{Trans}_{\text{Lente}}</math> Corresponde a la transmitancia del lente.</p> <p><math>\text{Trans}_{\text{Filtro}}</math> <math>\text{Trans}_{\text{Filtro}}</math> Corresponde a la transmitancia del filtro.</p> <p><math>\text{Sens}_{\text{CMOS}}</math> <math>\text{Sens}_{\text{CMOS}}</math> Corresponde a la sensibilidad del sensor CMOS.</p> <p><math>K</math> <math>K</math> Corresponde al factor de cuantización y ganancia del sistema.</p> <p><math>T_i</math> <math>T_i</math> Corresponde al tiempo de integración de la cámara digital.</p>
(Ecuación 4)	$ND_{\text{obj}} = K \cdot T_i \cdot \left( \int_0^{\infty} \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Lente}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Filtro}}(\lambda) \cdot \text{Sens}_{\text{CMOS}}(\lambda) \cdot d\lambda \right) + C_0$ $ND_{\text{obj}} = K \cdot T_i \cdot \left( \int_0^{\infty} \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Lente}}(\lambda) \cdot \text{Trans}_{\text{Filtro}}(\lambda) \cdot \text{Sens}_{\text{CMOS}}(\lambda) \cdot d\lambda \right) + C_0$
(Ecuación 5)	$ND_{\text{obj}} = T_i \cdot \int_0^{\infty} \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \delta(\lambda - \lambda_0) \cdot d\lambda + C_0 \approx T_i \cdot \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_0) \cdot K(\lambda_0) + C_0$ $ND_{\text{obj}} = T_i \cdot \int_0^{\infty} \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \delta(\lambda - \lambda_0) \cdot d\lambda + C_0 \approx T_i \cdot \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_0) \cdot K(\lambda_0) + C_0$
(Ecuación 6)	$ND_{\text{obj}} = T_i \cdot \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_{\text{obj}}) \cdot K(\lambda_{\text{obj}}) + C_0$ $ND_{\text{obj}} = T_i \cdot \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_{\text{obj}}) \cdot K(\lambda_{\text{obj}}) + C_0$
(Ecuación 7)	$\frac{ND_{\text{obj}} - C_0}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} = \frac{1}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} \cdot ND_{\text{obj}} - \frac{C_0}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} = \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_{\text{obj}})$ $\frac{ND_{\text{obj}} - C_0}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} = \frac{1}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} \cdot ND_{\text{obj}} - \frac{C_0}{T_i \cdot K(\lambda_{\text{obj}})} = \text{Rad}_{\text{obj}}(\lambda_{\text{obj}})$

<b>(Ecuación 8)</b>	$ND_{obj}(\lambda) = Ener_{obj}(\lambda) \cdot K(\lambda) + C0$ $ND_{obj}(\lambda) = Ener_{obj}(\lambda) \cdot K(\lambda) + C0$
<b>(Ecuación 9)</b>	$Rad_{obj}(\lambda) \approx Ref_{obj}(\lambda) \cdot Irrad_{esc}(\lambda)$ $Rad_{obj}(\lambda) \approx Ref_{obj}(\lambda) \cdot Irrad_{esc}(\lambda)$
<b>(Ecuación 10)</b>	$ND_{obj}(\lambda) = Ref_{obj}(\lambda) \cdot Irrad_{esc}(\lambda) \cdot Ti \cdot K(\lambda) + C0$ $ND_{obj}(\lambda) = Ref_{obj}(\lambda) \cdot Irrad_{esc}(\lambda) \cdot Ti \cdot K(\lambda) + C0$
<b>(Ecuación 11)</b>	$ND_1 = 1.4193 Rad_1 \cdot Ti + 24.924 \Rightarrow Rad_1 = \frac{ND_1 - 24.924}{1.4193}$ $ND_2 = 0.93636 Rad_2 \cdot Ti - 10.996 \Rightarrow Rad_2 = \frac{ND_2 + 10.996}{0.93636}$ $ND_3 = 1.0745 Rad_3 \cdot Ti + 12.111 \Rightarrow Rad_3 = \frac{ND_3 - 12.111}{1.0745}$ $ND_4 = 0.9839 Rad_4 \cdot Ti + 3.8111 \Rightarrow Rad_4 = \frac{ND_4 - 3.8111}{0.9839}$ $ND_5 = 0.97843 Rad_5 \cdot Ti + 11.033 \Rightarrow Rad_5 = \frac{ND_5 - 11.033}{0.97843}$ $ND_6 = 0.9619 Rad_6 \cdot Ti + 15.222 \Rightarrow Rad_6 = \frac{ND_6 - 15.222}{0.9619}$