



MAESTRÍA EN INSTRUMENTOS SATELITALES

TESIS

**“Modelización y análisis de una cámara hiperespectral
para su calibración espectral y radiométrica”**

Tesista: Ing. Rocco, Leandro Fabian

Director de tesis: Dr. Masuelli, Sergio

Co-Director de tesis: Lic. Labanda, Martín Fernando



Córdoba, 2 de Noviembre de 2017

TESIS DE MAESTRÍA EN INSTRUMENTOS SATELITALES

*Modelización y análisis de una cámara hiperespectral para su calibración espectral y
radiométrica*

Ing. Leandro Fabian Rocco

Tesista

Dr. Sergio Masuelli

Director

Lic. Martín Fernando Labanda

Co-Director

Miembros del Tribunal revisor

Ing. Héctor Antonio Raimondo

Dr. Julián Antonio Pucheta

Dr. Roberto Daniel Pérez

2 de Noviembre de 2017

©UFS-CONAE 2017

Unidad de Formación Superior
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza
Comisión Nacional de Actividades Espaciales
Argentina

Este trabajo está dedicado a mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos aquellos que de una u otra forma me acompañaron durante estos dos años de maestría, y en particular, quiero expresar los siguientes agradecimientos:

- A mi director Sergio, por las charlas que hemos tenido, las cuales me ayudaron a llevar adelante la tesis y comprender mejor los temas relacionados a la misma.
- A mi codirector Martín, cuyas charlas, comentarios y opiniones me ayudaron a comprender mejor los procesos, métodos y mejores prácticas relacionadas a la caracterización y calibración de instrumentos satelitales. Además, quiero agradecer su aporte en las campañas de calibración, ya que con su ayuda se pudo completar las mediciones exitosamente.
- A Antonio, por brindar la mayor parte del material necesario para llevar a cabo este trabajo y por su buena predisposición.
- A María, compañera durante el desarrollo de esta tesis, con quien he compartido varias horas en el laboratorio diseñando las configuraciones del instrumental, procedimientos, compartiendo frustraciones y éxitos.
- A Marco, por su buena predisposición y por brindar su soporte a lo largo de las campañas de mediciones en el laboratorio de óptica de la UFS.
- A Ivanna, por su participación en las campañas de mediciones en el laboratorio, ya que su aporte fue clave para llevar adelante este trabajo.
- A CONAE. No sólo es el lugar donde pude llevar a cabo mi maestría sino también es el lugar donde pude desarrollarme y crecer profesionalmente, y donde todos los días he aprendido algo nuevo.
- A todos los que forman parte de la Unidad de Formación Superior, por estar siempre al pendiente de los alumnos.
- A la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, la cual proveyó las lámparas de descarga de gases de baja presión utilizadas en este trabajo.
- Por último, pero no menos importante, a mis compañeros de maestría, con quienes he compartido estos dos últimos años, compartiendo experiencias y conocimientos.

Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en presentar la modelización y caracterización de una cámara hiperspectral sensible al espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR), para llevar a cabo su calibración espectral y radiométrica.

Se utilizó instrumental del laboratorio de óptica de la Unidad de Formación Superior (UFS) de la CONAE y se realizó una caracterización del mismo utilizando un espectrorradiómetro, instrumento de medición de referencia de la CONAE, y posteriormente se desarrollaron los procedimientos para realizar las mediciones con la cámara.

Para la caracterización de la cámara se propuso un modelo de respuesta lineal y se realizaron mediciones con el instrumental del laboratorio con el objetivo de determinar los parámetros de la cámara que influyen directa o indirectamente en su calibración.

La calibración espectral se llevó a cabo utilizando lámparas de descarga de gases de baja presión, identificando las líneas espectrales observadas por la cámara y comparándolas con las longitudes de onda teóricas correspondientes a cada una, lo cual permitió estimar los errores espectrales y aberraciones debidas al sistema óptico de la cámara.

Por otro lado, la calibración radiométrica se realizó mediante ajustes lineales de las radiancias espectrales medidas con el espectrorradiómetro frente a la esfera integradora en función de los números digitales de cada uno de los píxeles del sensor de la cámara.

Palabras Claves: Cámara hiperspectral; Caracterización; Calibración radiométrica; Calibración espectral.

Abstract

The aim of this work is to present the modeling and characterization of a hyperspectral camera sensitive to Visible and Near Infrared (VNIR) spectrum, to carry out its spectral and radiometric calibration.

Optical instruments of optical laboratory of Unidad de Formación Superior (UFS) of CONAE was used, and was performed a characterization of these instruments using a spectroradiometer, reference measuring instrument used for CONAE, and afterwards was developed the procedures to perform the measurements with the hyperspectral camera.

For the camera characterization was proposed a mathematical linear model and then measurements was made with the aim to determine the camera parameters that influence directly or indirectly in its calibration.

Spectral calibration was perform using low pressure gas discharge lamps, through the identification of its spectral lines observed by the camera and comparing them with its theoretical wavelengths, wich was made possible estimate the spectral error and the aberrations produced by camera optical system.

On the other hand, radiometric calibration was performed through linear fittings of spectral radiances measured with the spectroradiometer in front of an integrating sphere, as a function of digital numbers of each camera sensor pixel.

Keywords: Hyperspectral camera; Characterization; Radiometric calibration; Spectral calibration.

Tabla de Contenidos

Lista de figuras	XVII
Lista de tablas	XXIII
Acrónimos y abreviaciones	XXV
1 Introducción	1
1.1 Presentación del problema y justificación del trabajo	1
1.2 Objetivos y aportes del trabajo	2
1.2.1 Objetivos	3
1.2.2 Aportes del trabajo	3
1.3 Metodologías y técnicas aplicadas	4
1.4 Principales resultados y conclusiones	5
1.5 Estructura de la tesis	5
1.6 Terminología empleada en la tesis	6
2 Marco teórico y conceptos generales	7
2.1 Imágenes hiperespectrales	7
2.2 Estado del arte	10
2.3 Características del sistema aerotransportado de CONAE	11
3 Cámara hiperespectral VNIR	15
3.1 Arquitectura de la cámara VNIR	15
3.1.1 Lente objetivo	16
3.1.2 Espectrógrafo	18
3.1.2.1 Rendija de entrada	18
3.1.2.2 Lente colimadora	18
3.1.2.3 Elemento dispersivo	18
3.1.2.4 Lente de enfoque	20
3.1.2.5 Resumen de las características del espectrógrafo	21

3.1.3	Cámara	21
3.2	Componentes del sistema de adquisición de imágenes	26
3.2.1	Cámara pco.1600	27
3.2.2	Controlador	28
3.2.3	PC	28
3.3	Diagramas temporales	28
3.4	Desarrollo de un software orientado a la calibración	30
4	Instrumental de laboratorio	35
4.1	Espectrorradiómetro	35
4.2	Espectrómetro	38
4.3	Esfera integradora	38
4.3.1	Generalidades sobre la esfera integradora	39
4.3.2	Calibración realizada por el fabricante	40
4.3.3	Caracterización de la esfera	41
4.4	Monocromador	45
4.4.1	Descripción del monocromador	46
4.4.2	Caracterización y calibración del monocromador	47
4.4.3	Resultados de la caracterización del monocromador	48
4.5	Lámparas de descarga de gases	50
4.6	Discusión de los resultados obtenidos	52
5	Caracterización de la cámara hiperespectral	55
5.1	Modelo lineal de la cámara	55
5.1.1	Modelo de señal	56
5.1.2	Modelo de ruido	57
5.2	Evaluación de la linealidad del sensor	58
5.2.1	Configuración del instrumental para análisis de linealidad	59
5.2.2	Linealidad con la radiancia	60
5.2.3	Linealidad con el tiempo de integración	62
5.2.4	Análisis de los resultados del estudio de linealidad	64
5.3	Factor de conversión, ruido de lectura y saturación	65
5.3.1	Configuración del instrumental para análisis de parámetros	65
5.3.2	Análisis y resultados de la presente sección	66
5.4	Señal oscura	74
5.4.1	Configuración del instrumental para análisis de señal oscura	75
5.4.2	Corriente oscura en función del tiempo de integración	75
5.4.3	Corriente oscura en función de la temperatura	78

5.5	Relación Señal-Ruido y sensibilidad	78
5.6	Rango dinámico	80
5.7	Píxeles anómalos	82
5.7.1	Configuración del instrumental para análisis de píxeles anómalos	83
5.7.2	Análisis y resultados	83
5.8	Anomalías en el sensor	87
5.9	Resumen de los resultados de este capítulo	88
6	Calibración Espectral	91
6.1	Procedimiento de calibración	91
6.1.1	Determinación de los máximos de las líneas espectrales	91
6.1.2	Polinomios de calibración	93
6.1.3	Determinación de la resolución espectral	94
6.2	Configuraciones de medición	95
6.3	Resultados	97
6.3.1	Anomalías en las líneas espectrales	97
6.3.2	Obtención de los polinomios de calibración	98
6.3.3	Estimación de errores	102
6.3.4	Resolución espectral	103
6.3.5	Bandas espectrales efectivas y rango espectral	107
6.4	Resumen de las características espectrales	108
7	Calibración radiométrica	111
7.1	Modelo matemático y procedimiento de calibración	111
7.2	Configuración del instrumental y la cámara	113
7.3	Resultados obtenidos	114
8	Conclusiones y trabajo futuro	121
8.1	Conclusiones	121
8.2	Trabajo futuro	122
A	Determinación de la cantidad de píxeles a promediar	125
B	Líneas espectrales de las lámparas de descarga	127
	Bibliografía	131

Lista de figuras

2.1	Comparación entre imágenes multispectrales e hiperespectrales. (a) Imagen multispectral con 4 bandas, (b) Imagen hiperespectral con varias bandas contiguas.	8
2.2	Formación de imágenes hiperespectrales (adaptado de [19]).	9
2.3	Descripción general del sistema de captura de imágenes hiperespectrales aerotransportado. (a) Vista isométrica; (b) Vista lateral; (c) Gabinete destapado; (d) Gabinete tapado y sus conectores.	12
2.4	Funcionamiento de un sensor push broom aerotransportado.	13
2.5	Solapamiento de píxeles entre imágenes consecutivas.	14
3.1	Cámara, espectrógrafo y lente objetivo.	15
3.2	Elementos de una cámara hiperespectral.	16
3.3	Cálculo del FOV de la cámara.	17
3.4	Lente colimadora.	18
3.5	Red de difracción transmisiva.	19
3.6	Eficiencia de difracción de la red.	20
3.7	Lente de enfoque que redirige los haces de luz sobre el sensor.	20
3.8	Transferencia de carga en el CCD. (a) Transferencia de carga al registro de desplazamiento vertical; (b) Desplazamiento de las cargas hacia el registro de desplazamiento horizontal.	22
3.9	Estructura del sensor KAI-2001.	23
3.10	Eficiencia cuántica del sensor.	24
3.11	Imagen formada por el espectrógrafo sobre el CCD.	25
3.12	Imagen hiperespectral capturada con la cámara VNIR frente a una lámpara de descarga de gases de Nitrógeno.	26
3.13	Diagrama en bloques del sistema.	27
3.14	Diagrama temporal. $t_{int} = t_{read}$	29
3.15	Diagrama temporal. $t_{int} > t_{read}$	29
3.16	Diagrama temporal. $t_{int} < t_{read}$	30

3.17	Capas de comunicación entre la aplicación y la cámara pco.1600.	31
3.18	Ventana principal de la aplicación.	31
3.19	Ventana secundaria de configuración de la cámara.	32
3.20	Ventana secundaria para el segundo modo de funcionamiento.	32
4.1	Partes del espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hig-Res. (a) Espectrorradiómetro y fibra óptica; (b) Agarre para fibra óptica; (c) Receptor de $FOV = 8^\circ$ (lente objetivo del espectrorradiómetro); (d) Vista lateral del sensor de 8°	36
4.2	Curvas de error del espectrorradiómetro, extraídas de su certificado de calibración.	37
4.3	Espectrómetro CCS200. (a) Espectrómetro recién sacado de su caja; (b) Espectrómetro CCS200 junto al receptor del espectrorradiómetro, frente a la esfera integradora. Puede verse su fibra óptica (cable naranja) precintada al lado del receptor del espectrorradiómetro.	38
4.4	Esfera integradora iluminada internamente con 10 lámparas halógenas de tungsteno. (a) Corte de vista lateral; (b) Disposición de lámparas alrededor del puerto de salida.	39
4.5	Radiancias medidas por el fabricante en el centro del puerto de salida de la esfera integradora.	40
4.6	Matriz de 69 puntos definida por el fabricante para medir la luminancia y determinar la uniformidad espacial en el puerto de salida de la esfera.	41
4.7	Espectrorradiómetro frente a la esfera integradora. (a) Espectrorradiómetro en la parte inferior y sensor sobre el soporte mecánico frente a al puerto de salida de la esfera; (b) Vista lateral donde se ve el sensor del espectrorradiómetro, el puerto de salida de la esfera y sus lámparas internas.	42
4.8	Radiancia espectral en el centro de la boca de la esfera para 1 a 8 lámparas encendidas	43
4.9	Área medida en el puerto de salida de la esfera donde se ve la matriz de 13 puntos medida.	43
4.10	Uniformidad espacial de la radiancia en el puerto de salida de la esfera integradora.	44
4.11	Uniformidad espacial de la radiancia en el puerto de salida de la esfera integradora en el rango de longitudes de onda de la cámara hiperespectral.	44
4.12	Uniformidad para (a) 1 lámpara; (b) 3 lámparas; (c) 5 lámparas; (d) 8 lámparas.	45

4.13	Monocromador utilizado en este trabajo. (a) Monocromador desarmado; (b) Arquitectura Czerny-Turner.	46
4.14	Caracterización y alineación del monocromador. (a) Láser incidiendo en la rendija de entrada; (b) Sensor del espectrorradiómetro en la rendija de salida.	48
4.15	Resultado de la calibración espectral realizada con el monocromador, lo que lleva a concluir erróneamente que existe una desalineación entre espectrógrafo y cámara pco.1600.	49
4.16	Espectros de lámparas de descarga (a) Helio; (b) Hidrógeno; (c) Criptón; (d) Mercurio-Argón; (e) Neón; (f) Nitrógeno.	52
5.1	Modelo lineal de la cámara.	56
5.2	Circuito simplificado típico de la región de un píxel que convierte los electrones capturados en los pozos de potencial en un voltaje.	59
5.3	Configuración utilizada para capturar imágenes con la cámara VNIR frente a la esfera integradora. (a) Vista lateral; (b) Vista lejana del sistema soporte, cámara y esfera.	60
5.4	Desviación de la linealidad δ_{L_λ} con la radiancia para la columna 800.	61
5.5	Desviación de la linealidad $\delta_\lambda(max)$ con la radiancia.	62
5.6	Desviación de la linealidad $\delta_\lambda(min)$ con la radiancia.	62
5.7	Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}$ con el tiempo de integración para la columna 800.	63
5.8	Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}(max)$ con el tiempo de integración.	63
5.9	Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}(min)$ con el tiempo de integración.	63
5.10	Gráfico de los DNs en función de la longitud de onda para la columna 800, para 1 y 8 lámparas encendidas, con un $t_{int} = 10ms$	64
5.11	Gráfica de σ_y^2 en función de $(\mu_y - \mu_{y,dark})$	68
5.12	Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 10MHz y 1 ADC.	68
5.13	Error en la estimación de K_{ADC} en función de la señal.	70
5.14	Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 40MHz y 1 ADC.	70
5.15	Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 10MHz y 2 ADC. (a) Mitad izquierda; (b) Mitad derecha.	71
5.16	Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 40MHz y 2 ADC. (a) Mitad izquierda; (b) Mitad derecha.	72
5.17	Cámara VNIR tapada para las capturas de los Dark Frames.	75

5.18	Media y varianza de la señal oscura en función del tiempo de integración para 1 ADC.	76
5.19	Media y varianza de la señal oscura en función del tiempo de integración para 2 ADC.	77
5.20	Media y desviación estándar de la señal oscura en función de la temperatura para 1 ADC.	78
5.21	Relación señal-ruido del sensor.	79
5.22	Sensibilidad de la cámara hiperespectral considerando la transmitancia de la lente de 0.85.	80
5.23	Mapas de píxeles con sensibilidad anormal.	84
5.24	Mapas de los offset anormales para un dark frame.	85
5.25	Perfil de los HotPixels en fila 320.	86
5.26	Análisis de los hotpixels para $t_{int} = 10s$	86
5.27	Análisis de los hotpixels para $t_{int} = 10ms$	87
5.28	Anomalías detectadas en el sensor CCD. (a) Fila 180; (b) Fila 980; (c) Fila 1080.	88
6.1	Imágenes capturadas con la cámara VNIR frente a las lámparas de descarga para la columna central. (a) Mercurio-Argón (b) Hidrógeno; (c) Helio; (d) Criptón.	92
6.2	Comparación entre las funciones Gaussiana y doble Gaussiana.	93
6.3	Función de ajuste polinómica.	94
6.4	Función de ajuste sobre los datos de uno de las líneas espectrales.	95
6.5	Configuraciones de medición implementadas. (a) Mercurio-Argón (b) Hidrógeno; (c) Helio; (d) Criptón.	96
6.6	Setup de la cámara frente al monocromador.	96
6.7	Comparación de los ajustes de una línea de emisión de la lámpara de Helio para distintas columnas. (a) Columna 600; (b) Columna 601.	97
6.8	Error de ajuste en función del grado del polinomio.	98
6.9	Ajuste polinómico y residuos para la columna 800.	99
6.10	Ajuste polinómico y residuos para la columna 800 utilizando la función peso.	99
6.11	Coefficientes de polinomios de calibración. (a) $a_{3,j}$; (b) $a_{2,j}$; (c) $a_{1,j}$; (d) $a_{0,j}$	100
6.12	Aberración producida por el sistema óptico del espectrógrafo.	101
6.13	Aberración producida por el sistema óptico del espectrógrafo, aquí es más evidente el fenómeno del smile.	101
6.14	Smile en todo el sensor CCD.	102

6.15	Variación del smile en función de la longitud de onda.	102
6.16	Errores absolutos y relativos máximos en función de la longitud de onda.	103
6.17	Resolución espectral calculada con el monocromador para distintas longitudes de onda centrales en la columna 800 del sensor.	105
6.18	Resolución espectral calculada con la lámpara de HgAr para distintas longitudes de onda centrales en la columna 800 del sensor.	106
6.19	Rango espectral determinado a partir de la lámpara de Helio.	108
7.1	Configuración utilizada para capturar imágenes con la cámara VNIR frente a la esfera integradora. (a) Vista lateral; (b) Vista lejana del sistema soporte, cámara y esfera.	113
7.2	Vista 3D de la imagen hiperespectral si calibrar. $t_{int} = 5ms$, 3 lámparas encendidas.	114
7.3	Vignetting en la fila 600 del sensor ($t_{int} = 5ms$).	115
7.4	Coefficientes de calibración a_i ($t_{int} = 5ms$).	115
7.5	Coefficientes de calibración b_i ($t_{int} = 5ms$).	116
7.6	Coefficientes de calibración para la fila 600 ($t_{int} = 5ms$).	116
7.7	Vista 3D de la calibración realizada. $t_{int} = 5ms$, 3 lámparas encendidas.	117
7.8	Calibración realizada en una imagen con $t_{int} = 5ms$, y 1 lámpara encendida en la esfera (columna 800).	118
7.9	Calibración realizada en una imagen con $t_{int} = 5ms$, y 8 lámparas encendidas en la esfera (columna 800).	118
7.10	Error relativo de la radiancia, 1 y 8 lámparas, 5ms. (columna 800). . .	119
7.11	Variación de la constante K_t en función de la longitud de onda para la columna 800 del sensor y 8 lámparas de la esfera integradora encendidas. (a) Constante K_t ; (b) Error porcentual σ_{K_t}	120
A.1	Grafica de la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$	126
A.2	Gráfica de la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ ampliada.	126

Lista de tablas

3.1	Características de la lente objetivo ¹	17
3.2	Características del espectrógrafo.	21
3.3	Características del sensor CCD.	24
3.4	Configuraciones de la cámara VNIR.	26
5.1	Resumen de los parámetros calculados.	73
6.1	Resoluciones espectrales de la cámara hiperespectral extraídas del certificado de alineación.	104
6.2	Resoluciones espectrales de la cámara hiperespectral.	107
6.3	Características espectrales de la cámara.	109
B.1	Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm].	127
B.2	Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm] (Continuación).	128
B.3	Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm] (Continuación).	129

Acrónimos y abreviaciones

ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analog to Digital Converter</i>)
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada (<i>Charge Coupled Device</i>)
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DLR	Agencia Espacial Alemana (<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>)
DN	Número Digital (<i>Digital Number</i>)
DS	Señal Oscura (<i>Dark Signal</i>)
FaMAF	Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación
FOV	Ángulo de Visión (<i>Field Of View</i>)
FPN	Ruido de Patrón Fijo (<i>Fixed Pattern Noise</i>)
FPS	Cuadros por segundo (<i>Frames Per Second</i>)
FWHM	Ancho Total a Mitad del Máximo (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
GSD	Distancia de la muestra de tierra (<i>Ground Sample Distance</i>)
HID Lamps	Lámparas de descarga de alta intensidad (<i>High-Intensity Discharge Lamps</i>)
HSI	Imágenes Hiperespectrales (<i>Hyper Spectral Imaging</i>)
IFOV	Ángulo de Visión Instantáneo (<i>Instantaneous Field Of View</i>)
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)

NIST	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (<i>National Institute of Standards and Technology</i>)
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio (<i>Random Access Memory</i>)
RMSE	Root Mean Squared Error
ROI	Región de interés (<i>Region of Interest</i>)
SDK	Kit de Desarrollo de Software (<i>Software Development Kit</i>)
SNR	Relación Señal-Ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SWIR	Infrarrojo de Onda Corta (<i>Short Wave Infra-Red</i>)
TDC	Corriente oscura térmica (<i>Thermal Dark Current</i>)
UFS	Unidad de Formación Superior
VNIR	Visible e Infrarrojo Cercano (<i>Visible and Near Infra-Red</i>)

Capítulo 1

Introducción

El propósito de este primer capítulo es el de exponer los contenidos generales del trabajo realizado, con el objetivo de brindar al lector una idea general de las tareas llevadas a cabo durante el desarrollo del trabajo. Se presenta primero el problema que se intenta resolver y la justificación de la misma. Se plantean los objetivos de la tesis y sus principales aportes. Se realiza una descripción general de las metodologías y técnicas aplicadas para llevar a cabo las tareas y se presentan los principales resultados y conclusiones. Por último, se realiza una descripción de la estructura de la tesis y la terminología utilizada para facilitar su comprensión durante su lectura.

1.1 Presentación del problema y justificación del trabajo

El desarrollo y aplicación de métodos de caracterización y calibración radiométrica de instrumentos ópticos para la industria espacial, constituyen una fase fundamental para el desarrollo de un instrumento satelital funcional de observación de la tierra y para teledetección de determinadas características de la superficie terrestre, la atmósfera o el agua [1].

Estos instrumentos poseen sensores que están constituidos por un arreglo de cientos, miles, o incluso millones de pequeños detectores de luz sensibles a una determinada banda de longitudes de onda, definida por los materiales con los cuales se construyen o que se depositan sobre ellos y su proceso de fabricación [2].

Una etapa fundamental para obtener un instrumento óptico funcional, capaz de cumplir con una misión satelital o aerotransportada, es la caracterización de los sensores, su electrónica asociada y su sistema óptico en las posibles configuraciones de operación que serán utilizadas en una misión [3].

El avance de la tecnología en cuanto a los dispositivos electrónicos, materiales y sistemas ópticos, ha permitido aumentar enormemente la cantidad de bandas de

longitudes de onda que puede detectar una cámara espectral. La cantidad de bandas varía desde unas pocas (cámaras multiespectrales) hasta algunos cientos (cámaras hiperspectrales). Estas últimas, están siendo cada vez más utilizadas en el ámbito científico y particularmente, en el ámbito espacial.

En la bibliografía se cuenta con mejores prácticas para la caracterización y calibración radiométrica de cámaras hiperspectrales y recomendaciones para realizar estas tareas desarrolladas por agencias espaciales internacionales, pero la falta de estándares impide que esta tecnología alcance su máximo potencial, debido a las técnicas dispares y a la falta de uniformidad en las interpretaciones sobre el rendimiento de estos instrumentos y sus aplicaciones [4].

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) está desarrollando un sistema de captura y procesamiento de información hiperspectral aerotransportado, como paso previo al desarrollo e integración de un sistema espacial para continuar con el Plan Espacial Nacional [5]. A tal efecto se adquirieron dos cámaras hiperspectrales, una sensible al espectro Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR, Visible and Near Infra-Red) abarcando el rango radiométrico que se extiende desde los 400nm a los 1000nm, y otra cámara que trabaja en el rango del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR, Short Wave Infra-Red) entre los 1000nm y 2500nm [6].

El objetivo de este sistema, es desarrollar la capacidad de adquirir datos en un amplio espectro radiométrico, realizar las correcciones geométricas y radiométricas necesarias para generar productos multiespectrales estándar, a partir de los cuales será posible realizar la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones orientadas al uso científico y de la producción.

La necesidad actual de este proyecto, es contar con una cámara hiperspectral caracterizada y calibrada espectral y radiométricamente, de manera de poder disponer por primera vez con un sistema hiperspectral funcional que puede ser utilizado, por ejemplo, para validar otros instrumentos espectrales que serán incorporados en futuras plataformas satelitales.

Este tipo de instrumentos permitirá obtener firmas espectrales de la escena observada, las cuales pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, como por ejemplo, la identificación de materiales y sus concentraciones en la superficie de la escena.

El desarrollo de un sistema de este tipo representa un gran desafío tecnológico para la CONAE debido a que no hay antecedentes en este tipo de instrumentos en el país.

1.2 Objetivos y aportes del trabajo

En esta sección se enumeran los objetivos y aportes del presente trabajo.

1.2.1 Objetivos

Como objetivo general del presente trabajo se pretende realizar la modelización, análisis funcional y caracterización de la cámara hiperespectral VNIR para poder realizar su calibración espectral y radiométrica.

Por otro lado, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un software de configuración, adquisición y almacenamiento de imágenes para la cámara VNIR que esté orientado a su calibración en el laboratorio, que permita automatizar la captura continua de imágenes y generar los archivos de salida listos para su procesamiento y análisis.
- Diseñar las configuraciones del laboratorio que serán implementadas para realizar las mediciones con la cámara hiperespectral frente a los instrumentos que serán utilizados para su caracterización y calibración.
- Realizar la caracterización del instrumental del laboratorio de óptica para determinar cómo y de qué manera pueden ser utilizados para calibrar la cámara VNIR.
- Desarrollar los procedimientos y herramientas necesarias para caracterizar y calibrar la cámara hiperespectral.
- Realizar la calibración, tanto espectral como radiométrica, de la cámara VNIR y determinar los errores de calibración.

1.2.2 Aportes del trabajo

El sistema de captura de imágenes hiperespectrales aerotransportado representa un desafío tecnológico ya que en la CONAE no hay antecedentes en cuanto a este tipo de instrumentos, sus capacidades y aplicaciones. El aporte original de esta tesis radica en que es la primera vez que se realiza la calibración de un instrumento de este tipo en la CONAE. Este trabajo permite obtener un modelo funcional de la cámara que permita el desarrollo de procedimientos para su caracterización y su posterior calibración radiométrica.

El hecho de contar con una cámara hiperespectral caracterizada y calibrada, hace posible el diseño, generación de prototipos de productos y calibración en vuelo de cámaras multispectrales, es decir, permite mejorar un proyecto de cámara multispectral en las etapas de desarrollo de requerimientos, diseño, calibración radiométrica y Cal/Val (Calibración/Validación) en vuelo [7, 8].

1.3 Metodologías y técnicas aplicadas

La metodología aplicada deriva de un relevamiento de las técnicas y mejores prácticas para la calibración de cámaras espectrales y particularmente, las hiperspectrales.

Esta tesis tiene una importante componente experimental, por lo cual se hace énfasis en los procedimientos, mediciones y buenas prácticas utilizadas para llevar a cabo todo el proceso de caracterización, medición, análisis funcional, modelización y calibración de una cámara hiperspectral.

El trabajo comienza con la familiarización con la cámara VNIR, sus componentes principales y parámetros de configuración. Se desarrolló un software de control y configuración de la cámara orientado a la calibración en laboratorio que permite modificar todos los parámetros de configuración del instrumento con una mínima intervención del usuario, y permite reducir los tiempos de adquisición de imágenes para optimizar el tiempo en el laboratorio.

Así mismo, para el diseño de las experiencias de laboratorio se realizó un relevamiento del instrumental disponible, se estudiaron sus características y se analizó su estado general para determinar si es posible utilizarlos para caracterizar y calibrar la cámara. El laboratorio cuenta con una esfera integradora (entre otros dispositivos), instrumento fundamental usado en la calibración de esta familia de cámaras. Sin embargo dicha esfera integradora tiene varios problemas y no se encuentra en un estado como para ser utilizada como patrón de calibración, por lo que esta función fue cumplida por un espectrorradiómetro, usando a la esfera como instrumento de transferencia.

La caracterización de la cámara, ya sea de su sensor, su electrónica y su sistema óptico, comienza con el estudio y la determinación de los parámetros de la cámara que influyen directa o indirectamente en su correcta calibración. A partir de este análisis, se idearon diversos test y se desarrollaron los procedimientos y herramientas para realizar la caracterización de este tipo de cámaras en particular, y se los aplicó para realizar la adquisición de imágenes frente al instrumental de laboratorio y realizar el procesamiento de las imágenes adquiridas.

Se realizó la calibración de la cámara hiperspectral dividiendo el proceso en dos partes: la calibración radiométrica y la espectral. La primera permite establecer la correspondencia entre un Número Digital (DN, Digital Number) generado por el instrumento y la variable física que está midiendo. Por otro lado, es necesario realizar también una calibración espectral que involucra la determinación de sus características espectrales, tales como su rango espectral, resolución espectral, cantidad de bandas

efectivas, entre otros parámetros.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Un estudio detallado de las características de la cámara hiperespectral permitió comprender su funcionamiento, conocer cuales son sus componentes constituyentes, determinar sus modos de operación y sus parámetros característicos.

La caracterización del instrumental de laboratorio fue una tarea de suma importancia para realizar la caracterización y calibración de la cámara, ya que permitió no solo conocer las características del instrumental, sino también desarrollar los procedimientos para realizar las mediciones necesarias con la cámara y poder así realizar su caracterización y calibración.

Se propuso un modelo matemático para modelar la cámara hiperespectral y se logró determinar sus parámetros fundamentales para cada uno de sus modos de operación. Los análisis de linealidad del sensor permitieron conocer que existen desviaciones de la linealidad, tanto con la radiancia como con el tiempo de integración, cuando los niveles de señal son pequeños en comparación con el ruido, lo cual produce que en los extremos del rango espectral de la cámara se incrementen los errores de calibración.

La calibración espectral de la cámara permitió obtener los polinomios de calibración que permiten realizar la asignación de una longitud de onda a cada uno de los píxeles del sensor. Además, se logró cuantificar la aberración producida por el sistema óptico de la cámara llamada Smile, la cual produce una variación de la longitud de onda a lo largo de las filas del sensor.

Se realizó la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral obteniendo las matrices de calibración, las cuales permiten convertir los DN generados por cada detector en unidades de radiancias espectrales.

1.5 Estructura de la tesis

Para una mejor lectura de esta tesis se han organizado el texto en 3 partes. Los capítulos 2, 3 y 4 explican las bases teóricas y características de todos los instrumentos usados para realizar la experiencia, mientras en que los capítulos siguientes se presentan los trabajos realizados, el análisis de los resultados y las conclusiones. Además se han agregado 2 anexos con información complementaria de interés.

En el Capítulo 2 se presentan los conceptos generales relacionados al trabajo de tesis y el estado del arte en el tema. Además, se describe de forma general el sistema de captura y procesamiento de imágenes aerotransportado en desarrollo por la CONAE.

El Capítulo 3 presenta una descripción detallada de la cámara VNIR, sus características constructivas, elementos que la componen, sus posibles configuraciones y los dispositivos necesarios para su configuración y control.

El Capítulo 4 describe el instrumental utilizado para realizar el presente trabajo de tesis y además, explica los procedimientos y resultados obtenidos al realizar la caracterización de los mismos.

El Capítulo 5 es el más largo de la tesis, y presenta los modelos matemáticos propuestos para la cámara hiperespectral, el análisis de la validez de dichos modelos, la caracterización de algunos de los parámetros más importantes de la cámara y resultados.

En el Capítulo 6 se describen los procedimientos desarrollados para realizar la calibración espectral de la cámara VNIR y se analizan los polinomios de calibración obtenidos, los errores y aberraciones.

En el Capítulo 7 se describen los procedimientos para realizar la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral y se presentan los resultados de aplicar dicha calibración. Se realiza un análisis de los errores en la calibración y se explica cómo se arman y aplican las matrices de calibración del instrumento.

Las conclusiones y trabajo futuro se detallan en el Capítulo 8.

Los capítulos anexos de este trabajo son dos:

- Anexo A: describe el procedimiento llevado a cabo para determinar la zona del sensor que fue utilizada para determinar la constante de conversión de la cámara, el nivel de saturación y el ruido de lectura.
- Anexo B: presenta una tabla con las longitudes de onda teóricas correspondientes a las lámparas de descarga utilizadas para realizar la calibración espectral de la cámara.

Por último, al final de la tesis, se presentan las referencias utilizadas durante el transcurso del presente trabajo.

1.6 Terminología empleada en la tesis

En la tesis se utilizan como sinónimos las palabras **detector** y **píxel**, haciendo referencia a cada elemento individual del sensor CCD que detecta la luz incidente y la convierte en un DN. Así mismo se emplean de forma equivalente los términos **sensor** y **arreglo** para referirse al Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, Charge Coupled Device), el cual es un conjunto integrado de detectores.

Cuando se habla de **señal**, se refiere a la salida de cada detector expresada en DN, sin importar cual sea la fuente que los genera, es decir, sin importar que incida o no luz sobre el detector (los DN pueden ser generados por efecto térmico sin luz incidente).

Marco teórico y conceptos generales

En este capítulo se presentan los conceptos generales sobre imágenes hiperespectrales, su formación y especificaciones típicas. Además, se describe de forma general el estado del arte en el tema y se presenta una descripción general del sistema de captura de imágenes hiperespectrales aerotransportado de CONAE.

2.1 Imágenes hiperespectrales

La tecnología de Imágenes Hiperespectrales (HSI, Hyper Spectral Imaging) es el resultado de la convergencia entre dos tecnologías distintas pero relacionadas: la teledetección y la espectroscopia de imagen. La teledetección es una ciencia que se encarga de obtener información acerca de la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con ella. Esto se realiza detectando la energía emitida o reflejada por la superficie en determinados rangos de longitudes de onda o bandas, cuantificando estos datos, almacenándolos y procesándolos para extraer información [9]. Por otro lado, la espectroscopia de imagen es el estudio de la luz emitida o reflejada por los materiales en función de las distintas longitudes de onda. Esta rama de la ciencia aplicada al campo de la teledetección, estudia el espectro de la luz solar reflejada por los materiales de la superficie de la Tierra [10].

Las HSI han sido ampliamente utilizadas en las últimas décadas en áreas como la agricultura, astronomía, física, geología, vigilancia, procesos de manufactura, entre otras aplicaciones [11–15]. La enorme demanda de imágenes hiperespectrales en estas áreas y el gran potencial que presentan para la teledetección espacial, ha permitido desarrollar sensores sensibles a una amplia cantidad de bandas espectrales y que pueden ser utilizados en plataformas aerotransportadas o satelitales.

Las cámaras espectrales utilizadas para la teledetección se pueden clasificar en dos grandes grupos: las cámaras multispectrales y las hiperespectrales [16]. Las primeras detectan la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra en unas pocas bandas de longitudes de onda, generalmente entre 2 y 20, y dichas

bandas no necesariamente son contiguas. Por otro lado, las cámaras hiperespectrales se caracterizan por contar con más de 20 bandas espectrales estrechas y contiguas unas a otras [17].

Con una imagen multiespectral se puede obtener valores de intensidad en las longitudes de onda discretas en la que el sensor capte radiación, mientras que con una imagen hiperespectral se puede obtener un espectro cuasi continuo o firma espectral de la escena que está siendo observada.

La Fig. 2.1(a) muestra a la izquierda una gráfica con la respuesta espectral ideal de tres tipos de superficies (en línea continua) y las cuatro bandas utilizadas por un sensor multiespectral, mientras que a la derecha se observa la respuesta medida por dicho sensor. Por otro lado, en la Fig. 2.1(b) se ven las mismas gráficas, pero utilizando un sensor hiperespectral con una cantidad de bandas significativamente mayor. Se puede ver en éste último caso que la curva obtenida con el sensor hiperespectral reproduce con mayor fidelidad a la curva de reflectividades emitidas por las superficies, en comparación con el sensor multiespectral.

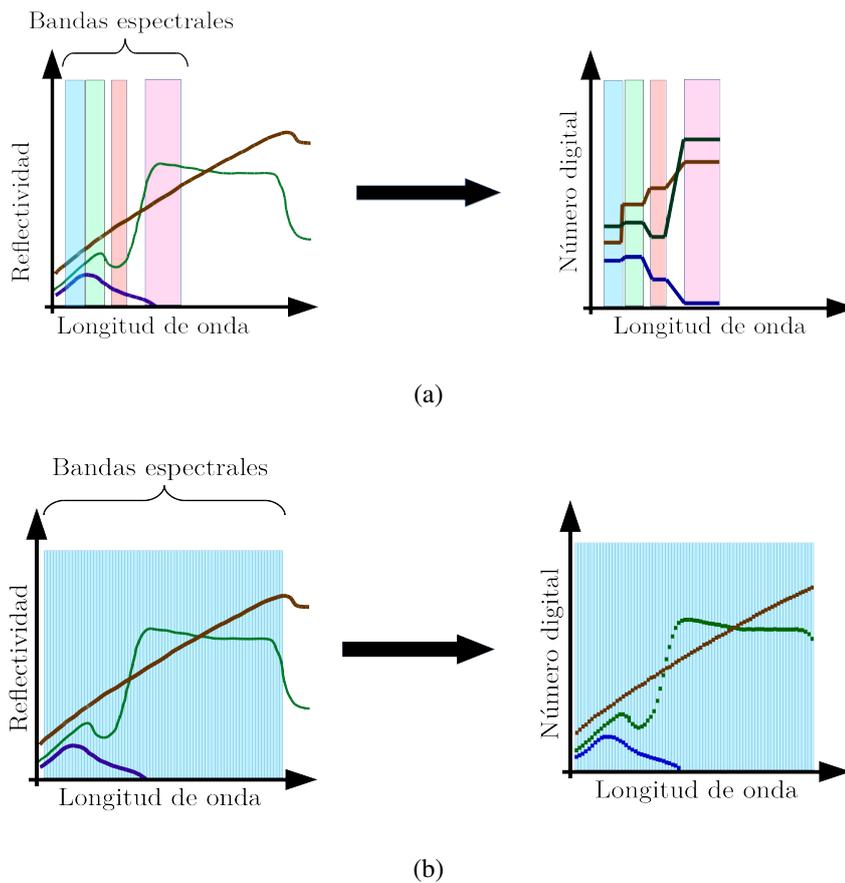


Fig. 2.1: Comparación entre imágenes multiespectrales e hiperespectrales. (a) Imagen multiespectral con 4 bandas, (b) Imagen hiperespectral con varias bandas contiguas.

En la Fig. 2.2 se observa el concepto de formación de imágenes hiperespectrales. El sensor es del tipo Push broom compuesto por un detector que se comporta como un sensor de línea, el cual captura imágenes a medida que la aeronave avanza. Cada uno de los píxeles de la escena contiene un espectro completo de la superficie observada, compuesto por tantos puntos como bandas espectrales disponga el sensor. La imagen hiperespectral de la escena está compuesta entonces por tres dimensiones: dos espaciales determinadas por el avance de la aeronave y el ancho del swath, y una espectral determinada por las bandas del sensor hiperespectral. A esta imagen tridimensional se la denomina Hipercubo [18].

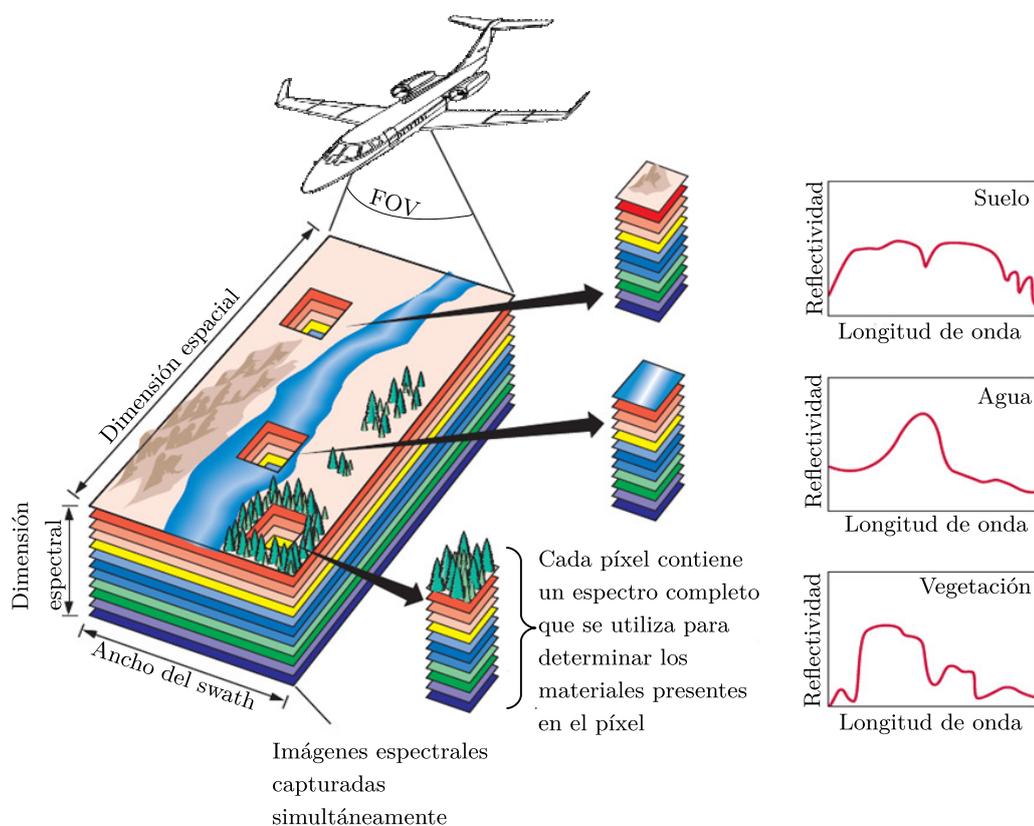


Fig. 2.2: Formación de imágenes hiperespectrales (adaptado de [19]).

Toda la radiación electromagnética, antes y después de la interacción con la superficie de la Tierra, debe atravesar la atmósfera previamente a ser detectada por un sensor remoto. Este paso a través de la atmósfera puede alterar la radiación en lo que respecta a velocidad, frecuencia, intensidad, distribución espectral y difracción. Todo ello es resultado de los fenómenos de dispersión, absorción y refracción siendo muy significativos en las regiones del espectro visible e infrarrojo cercano [20]. Estos procesos producen efectos no deseados en la señal que incide sobre el sensor.

Por otro lado, la energía que atraviesa la atmósfera e incide sobre la lente objetivo

vuelve a sufrir modificaciones debido al sistema óptico del instrumento, el sensor detector de luz y su electrónica asociada.

Dicho lo anterior, se define a estos efectos no deseados que influyen sobre la variable física que se quiere medir como fuentes de ruido, donde se diferencian dos tipos: 1) los ruidos generados antes de que la energía electromagnética incida sobre la lente objetivo del instrumento, es decir, todos aquellos que se generan por los efectos atmosféricos; 2) y los ruidos generados luego de la lente objetivo, que involucran parámetros tales como las eficiencias de los sistemas ópticos, los ruidos en el sensor y su electrónica asociada, aberraciones producidas por el sistema óptico, entre otros parámetros. En este trabajo sólo se abarca la segunda fuente de ruidos, es decir, todo lo que sucede luego que la señal electromagnética incida sobre la lente de la cámara.

Una cámara hiperespectral requiere de dos tipos de calibración: una calibración espectral que se encarga de establecer la correspondencia entre la longitud de onda y cada uno de los píxeles del arreglo, y una calibración radiométrica que consiste en establecer la correspondencia entre los DN que genera el sensor y la variable física que se desea medir, tal como la radiancia o irradiancia [21].

2.2 Estado del arte

El avance de la tecnología en cuanto al desarrollo de los dispositivos electrónicos y dispositivos ópticos, ha permitido instalar cámaras hiperespectrales en distintos tipos de plataformas espaciales o aerotransportadas. La implementación de esta tecnología en cualquier tipo de plataforma requiere de una caracterización y calibración del instrumento antes de su puesta en operaciones, para lo cual es necesario realizar un estudio de las técnicas y metodologías aplicadas normalmente para caracterizar y calibrar estos instrumentos.

Un ejemplo de un instrumento hiperespectral aerotransportado es AVIRIS [22], en operación desde 1989, el cual consiste en una cámara que mide la radiancia reflejada en 220 bandas espectrales, en el rango de longitudes de onda que va desde los 400nm a los 2450nm.

La calibración en laboratorio de este instrumento está dividida en dos. Por un lado, la calibración espectral llevada a cabo mediante la utilización de un monocromador, lámparas patrón colocadas a su entrada y acoplamientos ópticos, permite establecer la correspondencia entre la longitud de onda y cada uno de los canales o bandas del instrumento. Por otro lado, la calibración radiométrica realizada utilizando espectrorradiómetros y una esfera integradora, permite realizar la conversión entre DN y radiancia [23, 24]. Estas tareas de calibración son realizadas luego de una adecuada

caracterización y calibración de los instrumentos de laboratorio.

En cuanto a las plataformas satelitales se encuentra Hyperion [25] de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, National Aeronautics and Space Administration), el cual forma parte de una misión de demostración tecnológica que buscaba evaluar el rendimiento de estos sistemas de espectroscopia de imágenes en el entorno espacial. El instrumento cuenta con 220 bandas en el rango de 400nm a 2500nm, con una resolución espectral de 10nm. La caracterización y calibración de pre-vuelo de este instrumento fue realizada también utilizando instrumental tales como monocromador, esfera integradora y espectrorradiómetro [26].

Una misión satelital con una cámara hiperspectral a lanzarse en los próximos años es EnMAP, de la Agencia Espacial Alemana (DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). La plataforma satelital consiste en una cámara hiperspectral que cubre el rango de 420nm a 2450nm, con una resolución espectral de 6.5nm para la banda VNIR y 10nm para la banda SWIR, con 244 bandas espectrales. La calibración espectral y radiométrica en este instrumento se realizará utilizando fuentes de luz que emiten en longitudes de onda conocidas y una esfera integradora para la calibración radiométrica [27].

En el país, hasta la actualidad, no hay antecedentes concretos en cuanto a cámaras hiperspectrales sobre plataformas aerotransportadas o satelitales.

2.3 Características del sistema aerotransportado de CONAE

El sistema de captura de imágenes hiperspectrales aerotransportado en desarrollo por la CONAE se muestra en la Fig. 2.3, donde se ven los modelos 3D del sistema.

El sistema consiste en dos cámaras hiperspectrales, una SWIR y otra VNIR, montadas en un gabinete que contiene mecanismos que permiten la alineación entre ambas cámaras para permitir que ambas vean exactamente la misma porción de la escena. Cada cámara tiene un Ángulo de Visión (FOV, Field Of View) distinto, determinado por la geometría de sus sistemas ópticos y sus respectivos sensores.

El gabinete de cámaras dispone además de otros dispositivos necesarios para el funcionamiento del sistema, tales como termostatos y ventiladores para controlar la temperatura interna del gabinete, sensores de temperatura y datalogger para almacenar los datos, interfaces eléctricas entre el gabinete y la computadora, entre otros dispositivos. Los controladores, las fuentes de alimentación y la PC que almacena las imágenes capturadas se encuentran montadas sobre otro gabinete, aparte del mostrado en la Fig. 2.3.

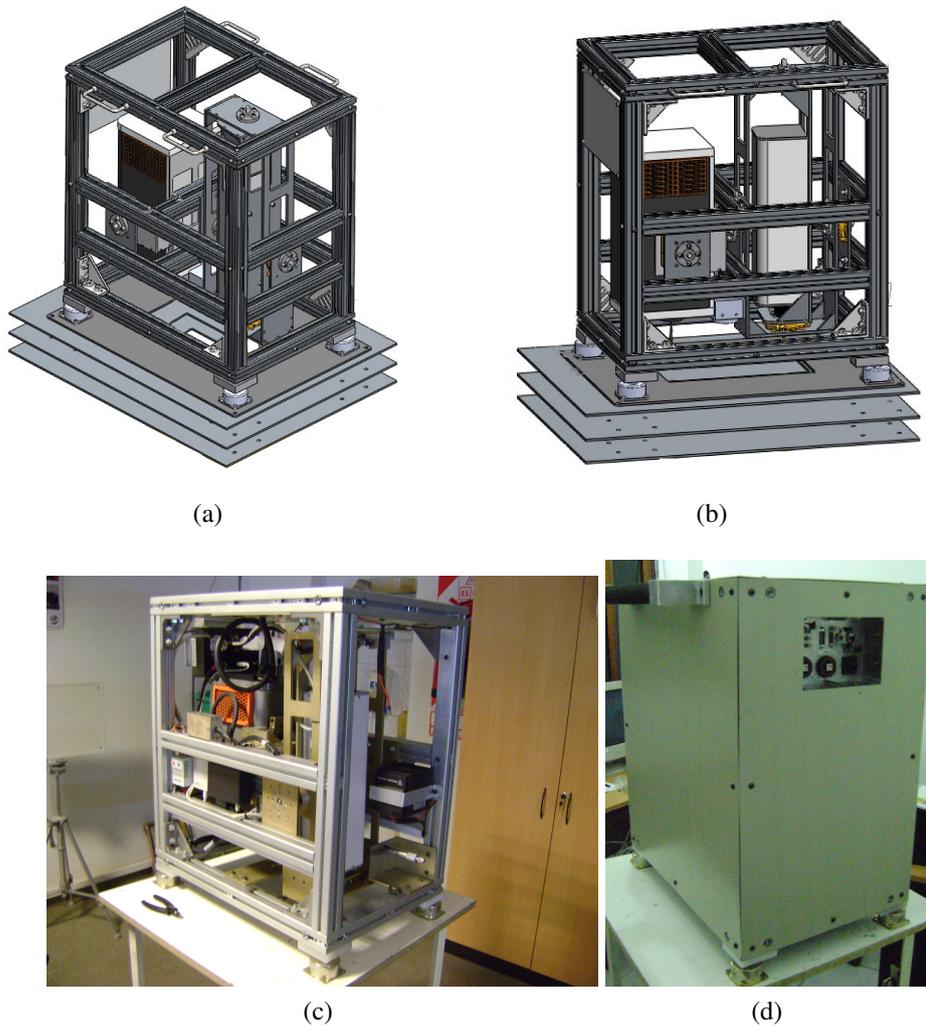


Fig. 2.3: Descripción general del sistema de captura de imágenes hiperespectrales aerotransportado. (a) Vista isométrica; (b) Vista lateral; (c) Gabinete destapado; (d) Gabinete tapado y sus conectores.

El funcionamiento del sistema es del tipo push broom, tal como se muestra en la Fig. 2.4 donde se ilustra una aeronave con el sistema hiperespectral a bordo.

A medida que el vehículo avanza, se realiza la medición de una franja de la superficie de la Tierra por cada imagen capturada, cuya longitud en la dirección perpendicular al movimiento de la aeronave queda determinada por el FOV del instrumento (en unidades de grados sexagesimales), mientras que el ancho de la franja en la dirección del desplazamiento (GSD_x) se encuentra definido por el tiempo de integración y la velocidad de la aeronave.

Por otro lado, la Distancia de la muestra de tierra (GSD, Ground Sample Distance) en la dirección perpendicular al desplazamiento (GSD_y) queda determinado por el Ángulo de Visión Instantáneo (IFOV, Instantaneous Field Of View), el cual está definido

como el FOV dividido por la cantidad de píxeles que posee el sensor en la dimensión espacial [28].

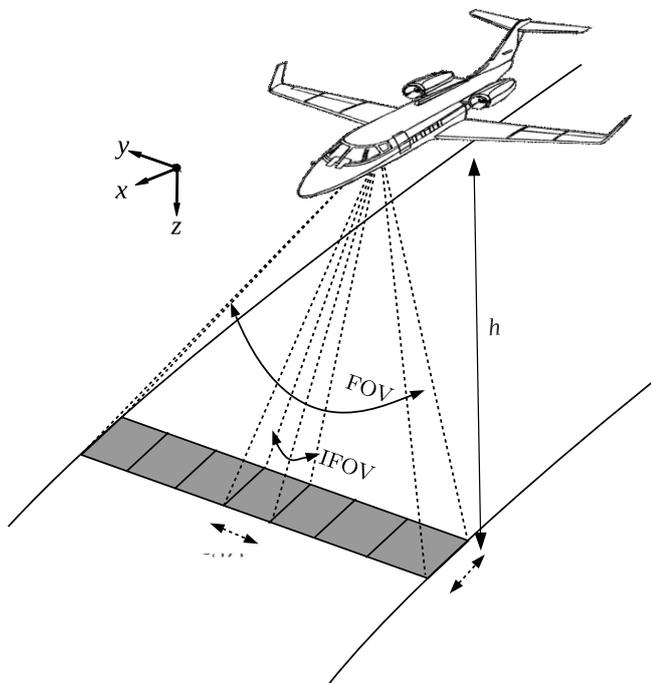


Fig. 2.4: Funcionamiento de un sensor push broom aerotransportado.

El tamaño del píxel proyectado en tierra en la dirección y queda determinado por la siguiente ecuación:

$$GSD_y = \frac{p_y h}{f}, \quad (2.1)$$

donde p_y es el tamaño del detector en la dirección y ; h es la altura de la aeronave respecto a la superficie; y f es la distancia focal de la cámara. Análogamente, el tamaño del píxel proyectado en tierra en la dirección x queda definido por la siguiente ecuación:

$$GSD_x = \frac{p_x h}{f}, \quad (2.2)$$

donde p_x es el tamaño del píxel del sensor en la dirección x (en el caso del sensor de la cámara VNIR se cumple que $p_y = p_x$).

El tiempo que le lleva a la aeronave cubrir el GSD_x se define de la siguiente manera:

$$t_{GSD} = \frac{GSD_x}{v}, \quad (2.3)$$

donde v es la velocidad de la aeronave en la dirección de desplazamiento¹. Cada tiempo de integración comienza inmediatamente después de cada t_{GSD} , por lo cual si este

tiempo es demasiado largo, habrá un gran solapamiento entre los píxeles proyectados en tierra. A este solapamiento entre píxeles se lo denomina como Smear [28]. El smear entre píxeles existirá siempre, por lo cual se configura el tiempo de integración del instrumento para disminuirlo en el porcentaje que sea necesario en base a una aplicación determinada.

La Fig. 2.5 ejemplifica el efecto de smear entre líneas de píxeles proyectadas en tierra, capturadas consecutivamente.

¹ **NOTA:** en [28] se define como t_{dwell} al tiempo que le lleva a la aeronave cubrir el GSD_x , pero aquí se lo denomina como t_{GSD} por conveniencia.

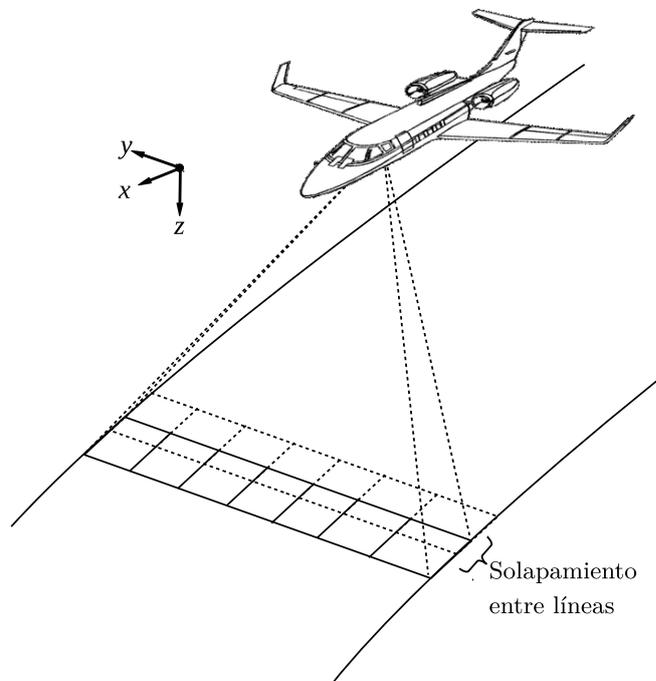


Fig. 2.5: Solapamiento de píxeles entre imágenes consecutivas.

El estudio de los tiempos de integración utilizables para el sistema aerotransportado de la CONAE lo realizó Pereyra en [29]. Este tiempo determina el rango en el cual se deberán realizar las tareas de caracterización y calibración de la cámara. Los rangos de tiempos de integración se calculan considerando el porcentaje de smear que se permite entre cada línea consecutiva proyectada en tierra. De esta forma, considerando un 10 % de smear entre píxeles, los tiempos de integración varían desde los 600ns a los 5ms. Por otro lado, considerando un smear del 20 %, los tiempos varían entre 1ms y 9ms.

Cámara hiperespectral VNIR

Este capítulo presenta en detalle las características de la cámara hiperespectral VNIR. Se describe la arquitectura de la cámara con todas sus partes funcionales. Se realiza una descripción del sistema de adquisición de imágenes presentando el diagrama en bloques de la cámara, controladores y PC. Se describen las configuraciones disponibles de la cámara y se dan los detalles de su sensor y diagramas temporales. Por último, se da una breve descripción del software desarrollado para el control y la configuración de la cámara, orientado a su calibración.

3.1 Arquitectura de la cámara VNIR

La cámara hiperespectral VNIR consiste en tres elementos principales: una lente objetivo, un espectrógrafo y la cámara propiamente dicha. En la Fig. 3.1 se muestra un ejemplo de una cámara hiperespectral similar a la utilizada en este trabajo, donde se ven las tres partes antes mencionadas.

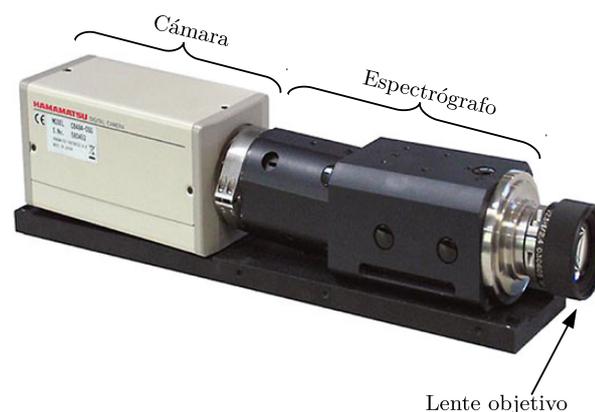


Fig. 3.1: Cámara, espectrógrafo y lente objetivo.

Tanto la lente objetivo como el espectrógrafo son desmontables, lo cual permite separar cada elemento y analizarlo por separado. Sin embargo, realizar el montaje del

espectrógrafo con la cámara requiere de un procedimiento de alineación para que su rendija de entrada (explicada más adelante) se encuentre alineada con el sensor de la cámara.

Debido a que la cámara utilizada ya se encuentra alineada con el espectrógrafo, gracias al procedimiento de alineación ejecutado por su fabricante, se decidió no separar el espectrógrafo de la cámara y considerarlos como una sola cosa. Esto permite reducir el tiempo de las campañas de mediciones en el laboratorio, siendo este un punto crítico en la realización de la presente tesis.

La lente objetivo, el espectrógrafo y la cámara están formados por distintos componentes ópticos que, en conjunto, conforman el instrumento de captura de imágenes hiperespectrales. La Fig. 3.2 presenta un esquema de los componentes ópticos que conforman el instrumento, y en las siguientes secciones se realiza la descripción de cada uno.

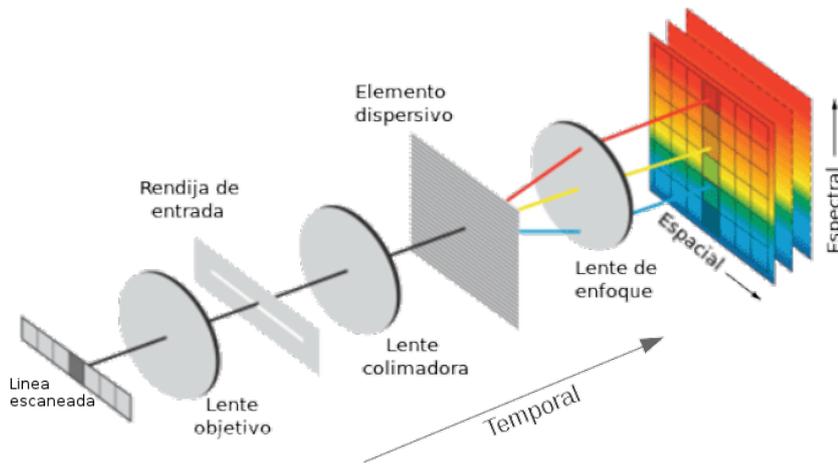


Fig. 3.2: Elementos de una cámara hiperespectral.

3.1.1 Lente objetivo

La lente objetivo recolecta la luz que incide sobre ella en un FOV determinado y enfoca los haces de luz sobre la rendija de entrada del espectrógrafo.

El FOV de la cámara queda determinado por la distancia focal de la lente y el tamaño de los píxeles del CCD, como se muestra en la Fig. 3.3, a partir de la siguiente fórmula:

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{0.5 \times p_x \times N_C}{f} \right), \quad (3.1)$$

donde p_x es el tamaño del píxel; N_C es la cantidad de columnas del sensor y f es la distancia focal de la lente. Tomando como datos el ancho del píxel de $7.4\mu m$, las 1600

columnas del sensor, la distancia focal de 18.5mm , y que $FOV = 2\theta$, se obtiene un FOV de 35.5° .

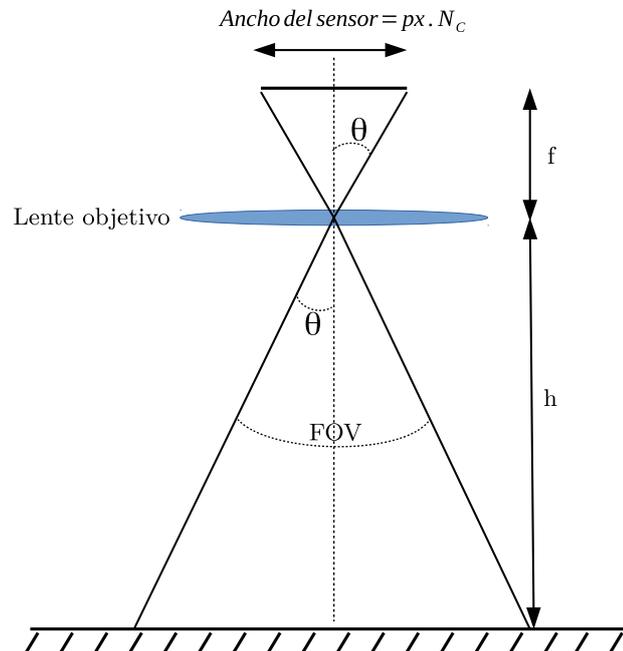


Fig. 3.3: Cálculo del FOV de la cámara.

Las especificaciones de la lente objetivo fueron extraídas de su hoja de datos [30], y se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características de la lente objetivo¹.

Parámetro	Valor
Tipo	Telecéntrica
Diámetro del lente	48mm
Transmitancia	> 82 %
$F\#$	2.4
Montaje	Standard C-mount
Distancia focal	18.5 mm
Tamaño espacial de imagen (max)	12.4mm
Rango espectral nominal	400-1000 nm

¹**NOTA:** Se denomina como “F-number” al símbolo $F\#$, y se define como la relación entre la distancia focal de un sistema óptico y el diámetro de la pupila de entrada [31], es decir:

$$F\# = \frac{f}{D} \quad (3.2)$$

3.1.2 Espectrógrafo

El espectrógrafo está constituido por varios de los elementos que se ven en la Fig. 3.2, los cuales son la rendija de entrada, la lente colimadora, el elemento dispersivo y la lente de enfoque. Cada uno de estos elementos se explican en las siguientes subsecciones, en donde se detallan sus características principales y la función que cumple cada uno.

3.1.2.1 Rendija de entrada

La rendija de entrada es una apertura rectangular de ancho w y longitud h colocada en el plano focal de la lente objetivo. La rendija de entrada es crítica para la performance del espectrógrafo, limita la cantidad de luz que ingresa al dispositivo y, junto con otros factores como la cantidad de ranuras de la red de difracción (elemento dispersivo) y el tamaño de los píxeles del sensor CCD, determina la resolución espectral del instrumento [32].

El tamaño de la rendija de entrada es de $w = 30\mu m$ y $h = 14.2mm$ [33]. Por otro lado, el tamaño de la zona activa del sensor en el eje espacial es de $11.84mm$ (resultado de multiplicar el ancho del píxel por las 1600 columnas), por lo cual la longitud de la rendija es lo suficientemente larga como para permitir la formación de imagen en todo el ancho del sensor sin degradar el FOV calculado en la sección anterior.

3.1.2.2 Lente colimadora

Los haces de luz a la salida de la rendija de entrada divergen, por lo cual se utiliza la lente colimadora para producir que a su salida los haces de luz salgan de forma paralela al eje óptico, tal como muestra la Fig. 3.4.

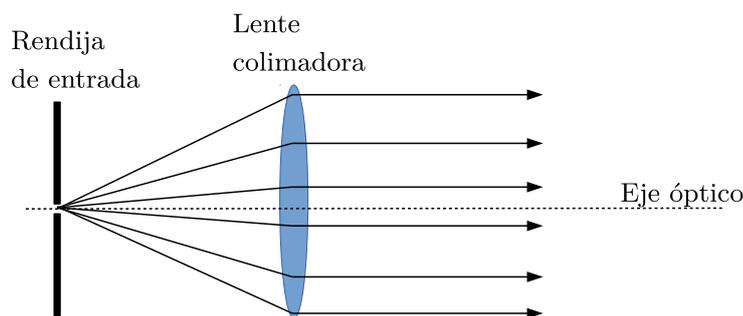


Fig. 3.4: Lente colimadora.

3.1.2.3 Elemento dispersivo

El elemento dispersivo consiste en una red de difracción por transmisión, cuyo funcionamiento se encuentra esquematizado en la Fig. 3.5.

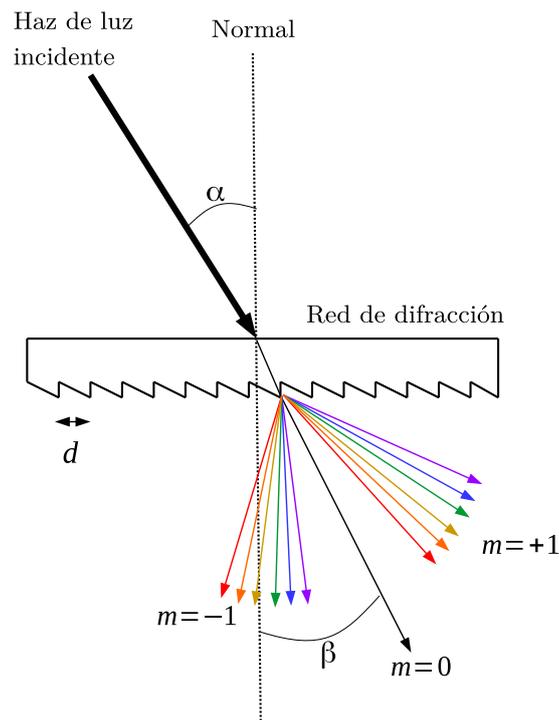


Fig. 3.5: Red de difracción transmisiva.

La red de difracción consiste en una estructura periódica de surcos (mejor conocidos como grooves en Inglés), que tienen forma de dientes de sierra, los cuales se encuentran separados una distancia d entre sí. Esta estructura produce la dispersión de un haz de luz incidente de manera que los haces de luz transmitidos son separados espacialmente en función de su longitud de onda [34].

La ecuación característica de una red de difracción es la siguiente:

$$m \lambda = d \operatorname{sen}(\alpha) + d \operatorname{sen}(\beta) \quad (3.3)$$

donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ es una constante que se denomina orden de difracción, la cual determina que tan desviados se transmiten los haces de luz difractados respecto al haz de luz donde $m = 0$; d es la separación entre ranuras de la red como se dijo anteriormente; mientras que α y β son los ángulos de incidencia y transmisión, respectivamente [34].

La red de difracción interna del espectrógrafo, se encuentra orientada de manera tal que la dispersión se realiza en el eje y , o sea, en la dirección perpendicular a las filas del CCD, ésto produce que cada fila del sensor reciba una longitud de onda ligeramente diferente.

Un parámetro importante de las redes de difracción es el que se denomina *Eficiencia de Difracción*, la cual se define como el flujo de energía de una luz monocromática

difractada para un orden m , relativa al flujo de energía del haz de luz incidente (eficiencia absoluta en el caso de redes reflectivas) o al flujo de energía transmitido en el sustrato (en el caso de redes transmisivas) [34]. La Fig. 3.6 muestra una gráfica de la eficiencia de difracción de la red dada por el fabricante en función de la longitud de onda. En dicha figura se observa que la eficiencia máxima alcanzada por la red de difracción es del 60 %, y es uno de los parámetros de la cámara hiperespectral que determina la sensibilidad del instrumento completo (cámara + lente objetivo + espectrógrafo) en función de la longitud de onda.

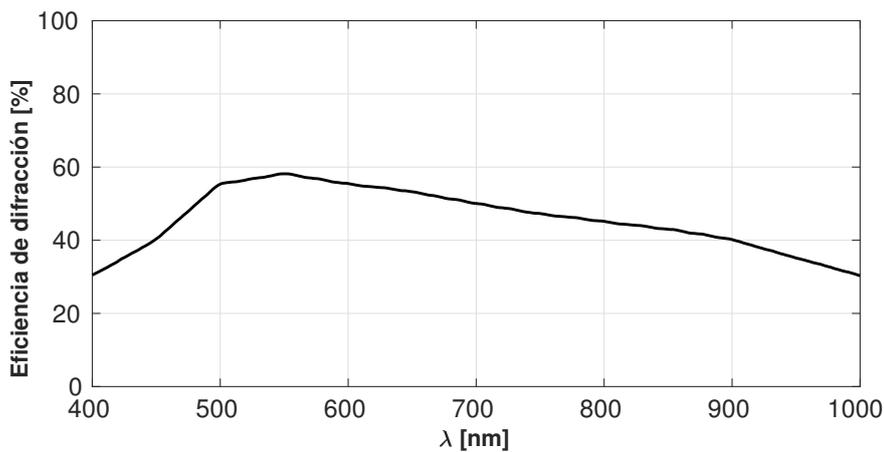


Fig. 3.6: Eficiencia de difracción de la red.

3.1.2.4 Lente de enfoque

La lente de enfoque cumple la función de enfocar cada uno de los haces con diferentes longitudes de onda sobre el sensor CCD de la cámara, de manera que incidan en forma perpendicular (a esto se lo denomina telecentricidad), tal como se muestra en la Fig. 3.7 [32].

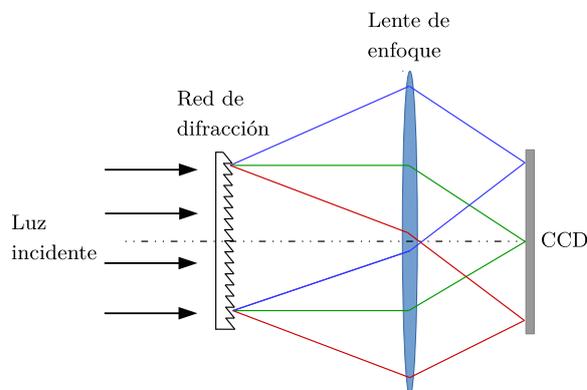


Fig. 3.7: Lente de enfoque que redirige los haces de luz sobre el sensor.

3.1.2.5 Resumen de las características del espectrógrafo

El espectrógrafo utilizado es un V10E de la empresa Specim [33], el cual tiene las características que se enumeran en la Tabla 3.2.

Este dispositivo se encuentra fijado a la cámara y alineado con el sensor CCD, de manera que la rendija de entrada del espectrógrafo se encuentre alineada de forma paralela a las filas del sensor [35].

Debido a que la alineación entre el espectrógrafo y la cámara ya fue realizada por el fabricante, y que es un procedimiento que necesita de una configuración especial del instrumental de laboratorio y ciertos instrumentos especiales, se decidió no quitar el espectrógrafo para caracterizar la cámara, y en lugar de eso, realizar la caracterización completa de estos dispositivos considerándolos como una sola cosa, tal como se explicará en el Capítulo 5.

Tabla 3.2: Características del espectrógrafo.

Parámetro	Valor
Modelo	Inspector V10E
Tamaño de la imagen	6.15mm (espectral); 14.2mm (espacial)
$F\#$	2.4
Longitud de la rendija	14.2 mm
Ancho de la rendija	$30\mu m$
Smile	$<1.5\mu m$
Resolución espectral	2.8nm
Rango espectral	400-1000nm

3.1.3 Cámara

La cámara es una **pco.1600** de la empresa PCO (Pioneer in Cameras and Optoelectronics) [36] y contiene un sensor CCD que genera un voltaje a partir de la incidencia de luz sobre él. Este sensor consiste en un CCD KAI-2001 de transferencia de carga inter-línea [37], construido sobre una pastilla de silicio. En este tipo de sensores, cada píxel está dividido en dos partes: una zona fotosensible sobre la cual inciden los fotones que generan cargas en dicha zona, y una celda de almacenamiento de carga que almacena los electrones generados, las cuales se encuentran recubiertas por un óxido semiconductor que evita que se generen electrones en dicha celda. En la Fig. 3.8 se muestra el funcionamiento general del sensor CCD, en donde se ve que las columnas compuestas por las celdas de carga forman parte de un registro de desplazamiento vertical, mientras que las celdas de carga inferiores conforman un registro de desplazamiento horizontal.

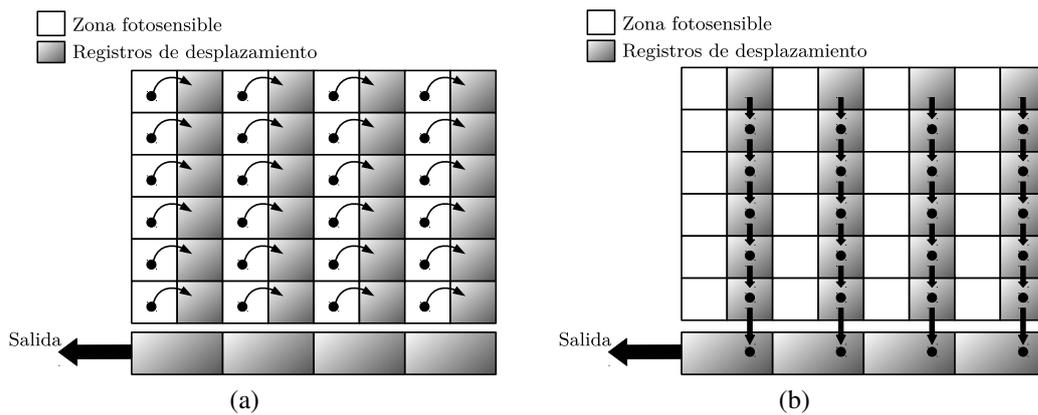


Fig. 3.8: Transferencia de carga en el CCD. (a) Transferencia de carga al registro de desplazamiento vertical; (b) Desplazamiento de las cargas hacia el registro de desplazamiento horizontal.

Durante el tiempo de integración, los fotones que inciden sobre cada píxel generan electrones que quedan atrapados en los pozos de potencial generados en el material semiconductor. Al finalizar el tiempo de integración, la generación de electrones por efecto fotoeléctrico se detiene y las cargas atrapadas en los pozos de potencial son desplazadas hacia la celda de carga de cada píxel (Fig. 3.8(a)). Luego, las cargas presentes en los registros de desplazamiento verticales son desplazadas hacia abajo una fila a la vez, de manera que las que se encuentran almacenadas en la fila inferior se transfieren al registro de desplazamiento horizontal. Es en este momento cuando los electrones en el registro horizontal comienzan a desplazarse hacia la salida de la izquierda (Fig. 3.8(b)), para ser convertidos a un voltaje. Este proceso se repite hasta que los registros de desplazamiento verticales se vacían. Luego comienza el proceso nuevamente al iniciar un nuevo tiempo de integración, para una nueva captura de imagen [38–40].

En la Fig. 3.9 se muestra una representación de la arquitectura del CCD y las distintas zonas que conforman el sensor.

Los 1600x1200 píxeles centrales se denominan píxeles activos y son los utilizados para formar la imagen. Las filas y columnas de píxeles sombreados que se ven en la Fig. 3.9 son píxeles oscuros o dark pixels, los cuales están cubiertos con un óxido semiconductor que bloquea la incidencia de luz sobre los fotodiodos. Los píxeles buffer se utilizan para separar la zona activa de la zona oscura y disminuir la difusión de cargas entre ellas. Las cuatro primeras y cuatro últimas columnas son píxeles dummy que no cumplen ninguna función y no deben ser utilizados ya que su comportamiento es indeterminado. Todas las zonas antes mencionadas dan como resultado 1648 columnas y 1214 filas de píxeles.

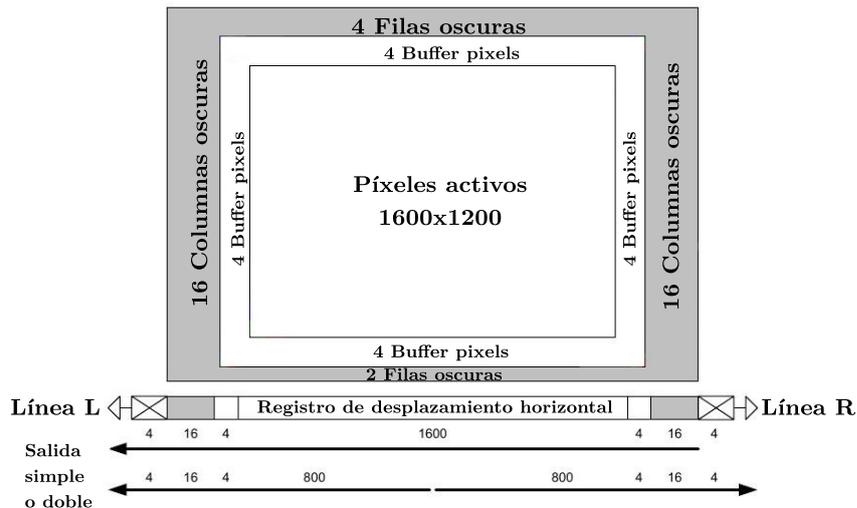


Fig. 3.9: Estructura del sensor KAI-2001.

El registro de desplazamiento horizontal en la parte inferior del sensor es un tipo especial de registro con dos líneas de salida, y que permite los siguientes dos modos de funcionamiento:

- **Salida simple:** cada una de las cargas presentes en el registro de desplazamiento horizontal son desplazadas hacia la línea de salida L y son convertidas a un voltaje, y luego a un DN, por medio de un único conjunto de amplificador y Conversor Analógico-Digital (ADC, Analog to Digital Converter).
- **Salida doble:** las cargas presentes en las 824 columnas izquierdas del sensor son extraídas por la línea de salida L, mientras que las 824 columnas derechas son extraídas por la línea de salida R. Las cargas que salen a través de cada línea de salida son amplificadas y convertidas por una electrónica distinta en forma paralela, de manera que este modo permite duplicar la velocidad de lectura de los píxeles en el sensor.

Por otro lado, se puede seleccionar la frecuencia de lectura de los píxeles por medio de la configuración de la cámara. Se encuentran disponibles dos velocidades: 10Mps y 40Mps (Mega píxel por segundo).

El efecto fotoeléctrico es el responsable de la generación de cargas eléctricas cuando los fotones incidentes en el material interactúan con el semiconductor. La eficiencia cuántica es un parámetro de rendimiento que dice qué tan bien esta tarea se lleva a cabo, es decir, qué tan bien el material semiconductor genera fotoelectrones a partir de la incidencia de los fotones sobre él. Este parámetro depende de varios factores, tales como el ancho de la capa fotosensible depositada sobre la pastilla de silicio, la dirección en la cual el material es iluminado (iluminación frontal o trasera), pérdidas por absorción, entre otros [38].

Una forma de determinar la eficiencia cuántica es mediante la relación entre los fotoelectrones generados que quedan atrapados en los pozos de potencial del material semiconductor y los fotones que inciden sobre el material.

En la Fig. 3.10 se muestra la gráfica de la eficiencia del sensor. Se ve que la mayor sensibilidad del sensor a los fotones incidentes con el material semiconductor ocurre en el espectro visible, mientras que al acercarse al infrarrojo cercano ésta va disminuyendo.

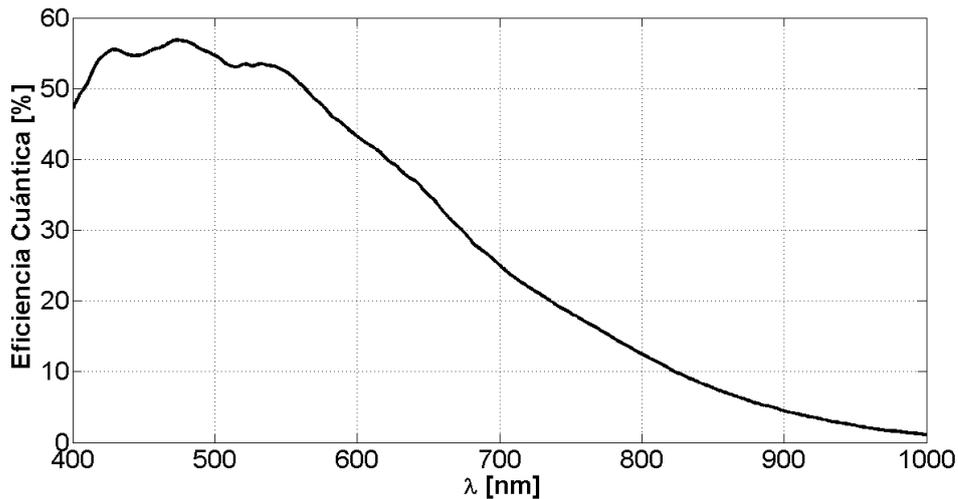


Fig. 3.10: Eficiencia cuántica del sensor.

En la Tabla 3.3 se enumeran algunas de las características más importantes del CCD que se extraen de su hoja de datos.

Tabla 3.3: Características del sensor CCD.

Parámetro	Valor
Modelo	KODAK KAI-2001
Cantidad total de píxeles	1648 (columnas) x 1214 (filas)
Tamaño del píxel	$7.4\mu m (H) \times 7.4\mu m (V)$
Máxima señal de saturación	$40000 e^-$
Corriente oscura	$< 0.5 nA/cm^2$
Rango dinámico	60dB
Eficiencia de transferencia de carga	> 0.99999
Ruido total máximo	$40e^- (40MHz); 23e^- (20MHz)$

Un dato interesante surge de comparar los datos del tamaño de la imagen formada por el espectrógrafo que se muestran en la Tabla 3.2 con los datos del tamaño del sensor de la Tabla 3.3. Dado que la parte activa del sensor tiene un tamaño de 1600 columnas por 1200 filas y que los píxeles tienen un tamaño de $7.4\mu m$, las dimensiones efectivas

del sensor resultan ser de 11.84mm de ancho y de 8.88mm de alto. La imagen formada por el espectrógrafo sobre el sensor tiene un ancho de 14.2mm , con lo cual es suficiente para cubrir el ancho del sensor, sin embargo, la altura de la imagen que el espectrógrafo forma sobre el sensor es inferior a la altura del CCD, por lo cual varias de sus filas quedan sin iluminar.

En la Fig. 3.11 se muestra este efecto, donde se puede ver las zonas del sensor que quedan sin iluminar. Las medidas colocadas en dicha figura se calcularon bajo la suposición que la imagen que el espectrógrafo forma sobre el sensor esté perfectamente centrada y alineada respecto al CCD.

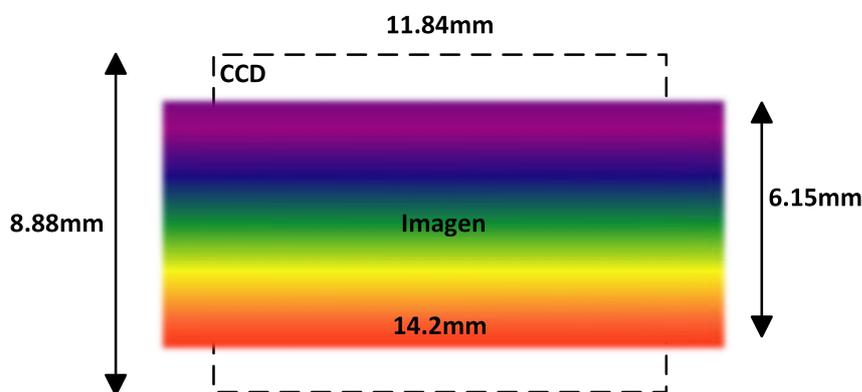


Fig. 3.11: Imagen formada por el espectrógrafo sobre el CCD.

Considerando sólo la parte activa del sensor (1200×1600 píxeles), en base a un criterio definido en el Capítulo 6, las filas que se consideran funcionales van desde la 180 a la 1125. Por esta razón en el presente texto, de aquí en adelante, sólo se va a considerar este rango de filas para realizar los análisis de los próximos capítulos.

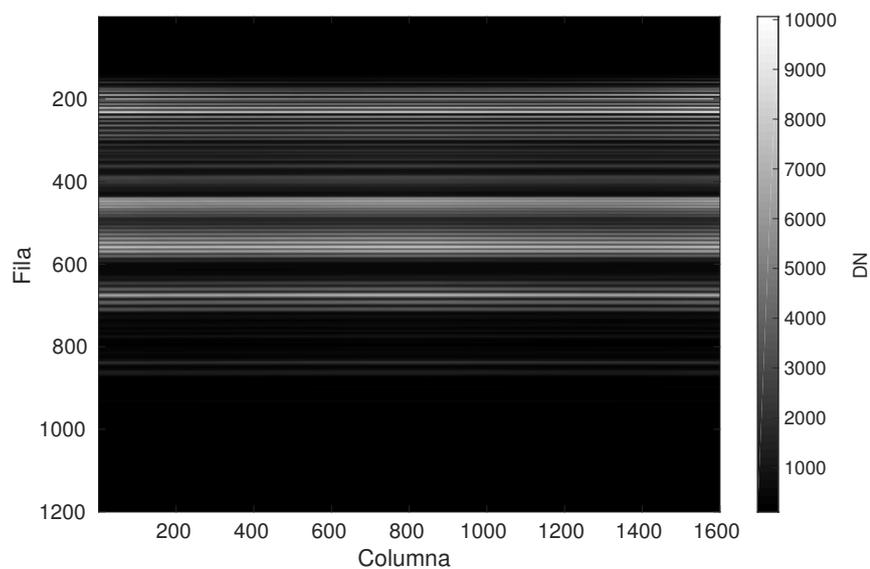
La cámara hiperespectral **pco.1600** tiene una serie de configuraciones disponibles además de las ya mencionadas, las cuales se resumen en la Tabla 3.4.

Un ejemplo de una imagen hiperespectral capturada con la cámara VNIR se muestra en la Fig. 3.12, la cual corresponde al espectro de emisión de una lámpara de descarga de gases de baja presión de Nitrógeno, donde en el eje y se grafican las filas 1200 del sensor, en el eje x las 1600 columnas, y en escala de grises se representa los DN generados por cada detector.

Un dato importante a tener en cuenta acerca de la cámara hiperespectral VNIR es que el instrumento tiene un offset fijo de 100DN incorporado por el fabricante, el cual se encuentra en cada uno de los píxeles del sensor y no puede ser modificado ni anulado. Por este motivo, cada uno de los píxeles del sensor tiene un valor mínimo de 100DN, aún habiendo capturado una imagen en ausencia de luz incidente al sensor. La razón de este offset es poder realizar una caracterización de los ruidos involucrados al CCD [36].

Tabla 3.4: Configuraciones de la cámara VNIR.

Configuración	Valor	Descripción
Tiempo de integración	500ns a 49 días	Tiempo durante el cual se almacenan las cargas en los detectores.
Temperatura del CCD	$(T_{\text{ambiente}} - 50^{\circ}\text{C})_{\text{min}}$	Setpoint de la temperatura del sensor relativa al ambiente.
Cantidad de ADC	1 / 2	Se pueden utilizar 1 o 2 conversores.
Pixel Clock	10MHz / 40MHz	Frecuencia del reloj de lectura de píxeles.
Región de interes (ROI)	1,2,3,4,...,n	Selecciona la región de interés que se quiere leer.
Binning	1,2 (horizontal); 1,2,4,8 (vertical)	Selecciona el binning que se quiere utilizar.

**Fig. 3.12:** Imagen hiperespectral capturada con la cámara VNIR frente a una lámpara de descarga de gases de Nitrógeno.

3.2 Componentes del sistema de adquisición de imágenes

En la Fig. 3.13 se muestra un diagrama en bloques del sistema completo de adquisición de imágenes hiperespectrales, necesario para poner en funcionamiento la cámara hiperespectral VNIR.

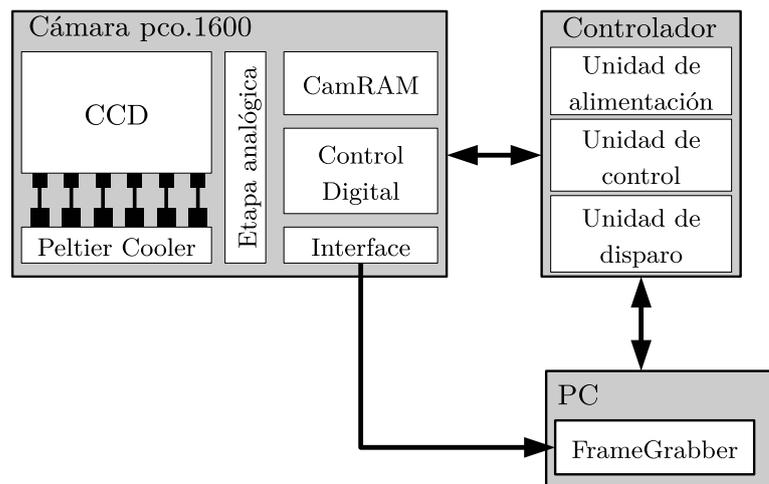


Fig. 3.13: Diagrama en bloques del sistema.

El sistema consiste en tres partes fundamentales, las cuales serán explicadas en las siguientes subsecciones:

1. La cámara propiamente dicha, que captura las imágenes, las almacena y las envía a la PC.
2. El controlador, el cual le provee alimentación y controla la temperatura del CCD.
3. La PC que ejecuta el software de control, recibe las imágenes que la cámara le envía y las almacena en el disco rígido.

3.2.1 Cámara pco.1600

La cámara que compone al instrumento hiperespectral es una **pco.1600**, como se dijo anteriormente, y está constituida por los bloques funcionales que se muestran en la Fig. 3.13. El sensor CCD realiza la conversión de los fotones que inciden sobre él en un voltaje por cada uno de sus píxeles. En íntimo contacto con el CCD, se encuentra un refrigerador termoeléctrico del tipo Peltier que controla la temperatura del sensor y lo enfría a bajas temperaturas alcanzando hasta 50°C por debajo de la temperatura ambiente. Esto produce que la generación de cargas debidas a la agitación térmica de los átomos del material semiconductor sea despreciable para tiempos de integración pequeños, generalmente menores a un segundo (ver Capítulo 5). El seteo de la temperatura del sensor se realiza a partir de comandos de configuración enviados desde la PC del usuario.

La etapa analógica se encarga de realizar el acondicionamiento de la señal generada por el CCD y realiza la conversión de los voltajes a números digitales.

Luego de que los voltajes sean convertidos a DN, éstos son transferidos a una Memoria de Acceso Aleatorio (RAM, Random Access Memory) que funciona a altas

velocidades de transferencia de datos, llamada *CamRAM*. En esta memoria los datos son almacenados y ya considerados como imágenes, en lugar de sólo píxeles o DN individuales. Esto quiere decir que la unidad mínima de información que puede ser extraída de la cámara una vez que las imágenes se cargaron en la *CamRAM* es una imagen, y no se puede por ejemplo, extraer uno o varios píxeles individuales de una imagen almacenada en la memoria. Éstas pueden ser transferidas a la PC luego de cada captura o durante la misma, este comportamiento es configurable por el usuario.

El control digital se encarga de interpretar los comandos enviados por el controlador, generar las señales necesarias para el manejo del CCD, el Peltier y la memoria. Por otro lado, la interface se encarga gestionar la transferencia de datos entre la cámara y la PC.

3.2.2 Controlador

El controlador de la cámara que se muestra en la Fig. 3.13 cumple tres funciones importantes:

- Proveerle alimentación a la cámara **pco.1600**.
- Posee las conexiones necesarias para realizar el disparo de la cámara de forma externa.
- Controla la temperatura pre-seteada del sensor.

3.2.3 PC

La PC ejecuta el software de configuración y control de la cámara, y es a través de la cual el usuario interactúa con la misma. El protocolo de transmisión de datos desde la cámara a la PC es *CameraLin* [41]. El FrameGrabber que se ve en la Fig. 3.13 sirve de interfaz entre la cámara y la PC para que esta última pueda recibir las imágenes transmitidas por la cámara. Este FrameGrabber es una placa que se conecta en el puerto PCI de la PC, la cual le proporciona una capa física para poder comunicarse con la cámara.

3.3 Diagramas temporales

La cámara hiperespectral VNIR captura imágenes en dos modos: captura única y captura secuencial. En el modo captura única, una señal de disparo produce la captura de una única imagen, y luego la cámara queda en reposo hasta el próximo disparo forzado por el usuario. En el modo captura secuencial, la cámara genera los disparos por software automáticamente de forma secuencial hasta que el usuario detenga el proceso de captura. Este último caso es de interés por lo cual será explicado en más detalle.

El tiempo de integración t_{int} es el tiempo en el cual los detectores comienzan a almacenar las cargas generadas en el material semiconductor, mientras que el tiempo de lectura t_{read} es el tiempo durante el cual estas cargas son convertidas a un valor digital. Se pueden diferenciar tres casos que determinan la velocidad de captura de imágenes máxima en Cuadros por segundo (FPS, Frames Per Second) que se puede obtener con esta cámara:

- **Tiempo de integración igual al tiempo de lectura:** la Fig. 3.14 ejemplifica este caso. Un disparo inicia la integración y al finalizar este tiempo, se inicia el proceso de lectura. La velocidad de captura de imágenes en este caso será $FPS = 1/t_{int} = 1/t_{read}$.

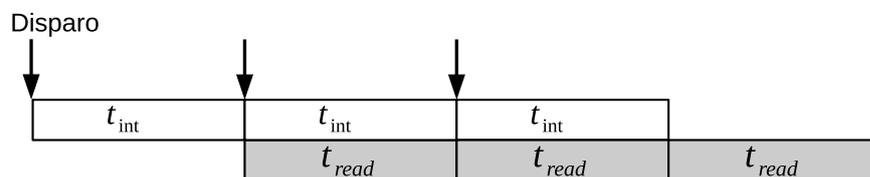


Fig. 3.14: Diagrama temporal. $t_{int} = t_{read}$.

- **Tiempo de integración mayor al tiempo de lectura:** en este caso la velocidad de captura de imágenes está limitada por el tiempo de integración, de manera que $FPS = 1/t_{int}$, tal como se muestra en la Fig. 3.15.

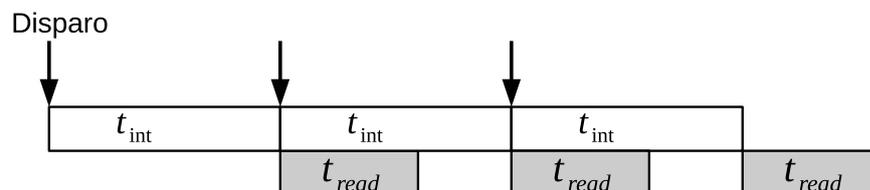


Fig. 3.15: Diagrama temporal. $t_{int} > t_{read}$.

- **Tiempo de integración menor al tiempo de lectura:** en este caso, como el tiempo de integración es menor al tiempo de lectura, se debe esperar hasta que el proceso de lectura finalice para realizar otro disparo. Para esto, la electrónica de la cámara produce de forma automática un retardo entre la finalización de t_{int} y el comienzo del próximo, de manera que el siguiente tiempo de integración finalice justo al final del tiempo de lectura del disparo anterior, tal como se muestra en la Fig. 3.16. La velocidad se encuentra limitada en este caso por el tiempo de lectura de las imágenes de manera que $FPS = 1/t_{read}$.

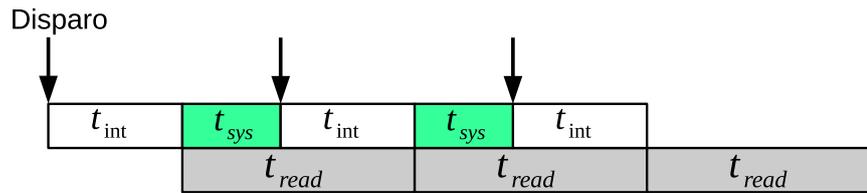


Fig. 3.16: Diagrama temporal. $t_{int} < t_{read}$.

De los tres casos explicados antes se puede extraer una importante conclusión: aún utilizando el mínimo tiempo de integración permitido por la cámara, la velocidad de captura de imágenes se ve limitada por el tiempo de lectura t_{read} . De esta forma, configurando la cámara para funcionar con su máxima performance, es decir utilizando dos ADC y la máxima frecuencia del reloj de lectura de 40MHz, y considerando además los retardos de activación de los transistores de los detectores, retardos de transferencia de carga, retardo de conversión, entre otros, se puede lograr como máximo una velocidad de captura de imágenes (a máxima resolución) de 30 *fps*.

3.4 Desarrollo de un software orientado a la calibración

Para facilitar la configuración de la cámara y la captura de imágenes en el laboratorio durante la caracterización y calibración de la misma, fue necesario desarrollar un software personalizado que se adapte a la metodología implementada. Este software fue necesario debido a que el proporcionado por el fabricante de la cámara es meramente demostrativo, y no se adapta adecuadamente a las condiciones de una campaña de calibración. Fue desarrollado en lenguaje C# utilizando el Kit de Desarrollo de Software (SDK, Software Development Kit) proporcionado por el fabricante de la cámara [42], y funciona bajo el sistema operativo Windows.

La Fig. 3.17 muestra un diagrama de las capas de comunicación entre la aplicación y la cámara **pco.1600**.

En la capa superior se ejecuta el software de calibración y configuración desarrollado. Se utilizan las librerías (archivos dll) proporcionadas por el fabricante de la cámara, las cuales tienen todas las funciones necesarias para el control y configuración de la misma. Las librerías dll se comunican con los controladores del FrameGrabber. Estos controladores crean un puerto de comunicación entre el FrameGrabber y la cámara, de manera que las imágenes que transmite ésta última sean recibidas por el FrameGrabber y almacenadas en la PC.

La aplicación desarrollada tiene una interfaz de usuario que se muestra en la Fig. 3.18, la cual consiste en una ventana donde se puede visualizar las imágenes capturadas en tiempo real, botones para comenzar y detener la captura de imágenes, botones de acceso

para acceder a una ventana de configuración de la cámara como la que se muestra en la Fig. 3.19, y una zona donde se visualizan las temperaturas del sensor CCD, la electrónica de la cámara y la fuente de alimentación.

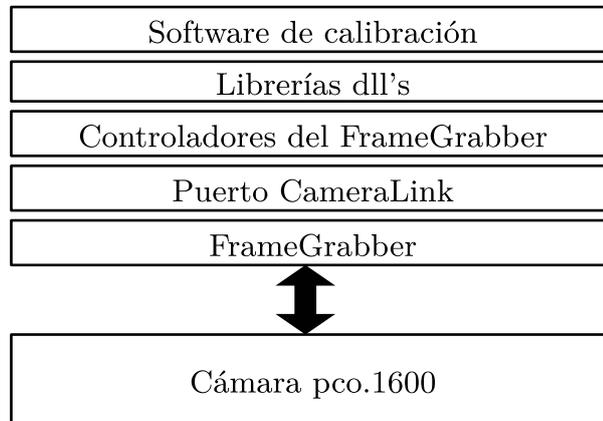


Fig. 3.17: Capas de comunicación entre la aplicación y la cámara pco.1600.

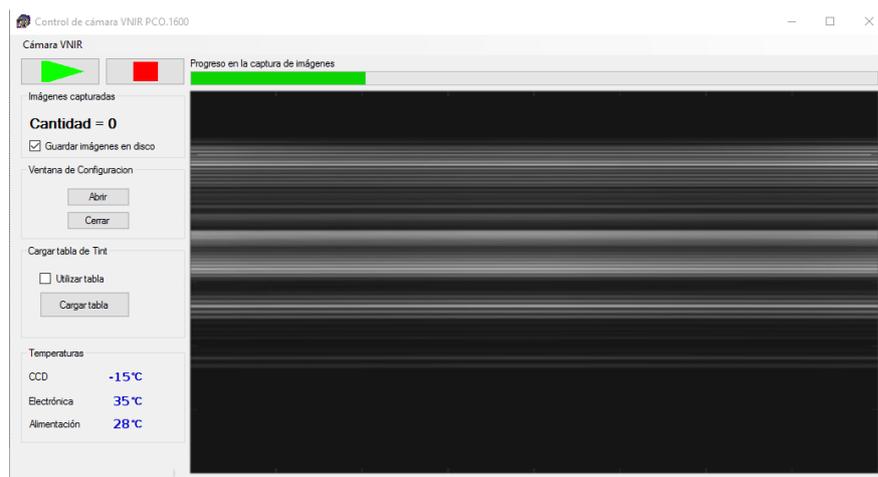


Fig. 3.18: Ventana principal de la aplicación.

La aplicación permite los siguientes dos modos de funcionamiento:

1. **Tiempo de integración único:** el usuario selecciona un tiempo de integración que será configurado en la cámara mediante la ventana que se muestra en la Fig. 3.19, de manera que cada una de las imágenes será capturada con el mismo tiempo de integración. Dicha ventana le permite al usuario configurar otras opciones de configuración de la cámara, tales como la Región de interés (ROI, Region of Interest), la velocidad de reloj, la temperatura del sensor, entre otras cosas. La aplicación además le permite seleccionar al usuario guardar las imágenes en el disco o sólo visualizarlas y luego descartarlas.

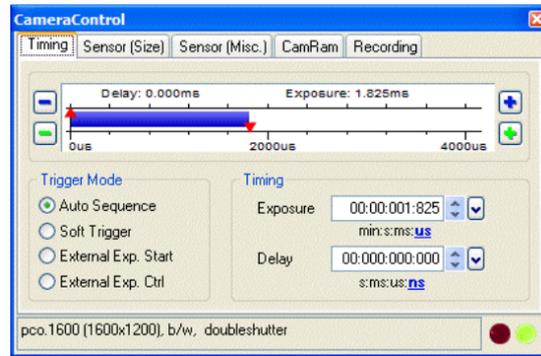


Fig. 3.19: Ventana secundaria de configuración de la cámara.

2. **Tiempo de integración variable:** el usuario ingresa una tabla de tiempos de integración y la cantidad N de imágenes que desea obtener por cada tiempo, por medio de la ventana que se muestra en la Fig. 3.20. La aplicación automáticamente realiza la configuración de cada uno de los tiempos y captura las N imágenes ingresadas por cada t_{int} . Al igual que en el caso anterior, el usuario decide si desea almacenar las imágenes en el disco o descartarlas. Es posible también configurar una temperatura del CCD por cada set de imágenes para cada tiempo de integración. De esta manera, la aplicación configura cada nueva temperatura del setpoint del CCD, espera un tiempo determinado para que la temperatura se estabiliza, configura el nuevo tiempo de integración y comienza la nueva captura. También permite cargar un archivo de texto que contenga los datos de configuración para evitar ingresarlos manualmente uno por uno en el caso que sean demasiados.

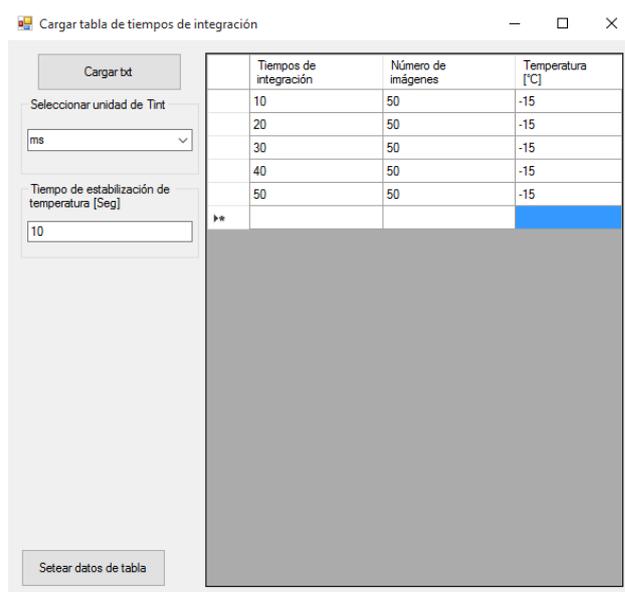


Fig. 3.20: Ventana secundaria para el segundo modo de funcionamiento.

Cada uno de los conjuntos de imágenes capturadas y guardadas en el disco de la PC, es almacenada junto con un archivo de texto que muestra la configuración de la cámara con la cual fue capturado ese conjunto de imágenes, de manera que el usuario disponga fácilmente de dicha información.

La aplicación genera también un archivo .log donde se guardan todas las acciones realizadas sobre la ventana de la aplicación durante cada sesión realizada, indicando la hora y fecha, desde el momento que el programa se abre hasta el momento en que se cierra. Esto permite tener un registro de las acciones llevadas a cabo durante una sesión de captura de imágenes.

Instrumental de laboratorio

Para realizar la caracterización y calibración de una cámara, es necesario contar con cierto tipo de instrumental de laboratorio que se encuentre debidamente calibrado.

La caracterización y calibración de la cámara hiperespectral requiere, por un lado, de una fuente de luz de radiancias conocidas y espacialmente uniformes; por otro lado, es necesario contar con una fuente de luz que emita en varias longitudes de onda bien conocidas.

Luego de un relevamiento del instrumental disponible en CONAE, se dispuso de dos instrumentos que cumplen las funciones antes mencionadas: una esfera integradora y un monocromador. Ambos dispositivos han estado fuera de servicio durante un tiempo prolongado, por lo cual sus certificados de calibración se encuentran vencidos. Esto planteó una interrogante: ¿Cómo y de qué manera estos instrumentos podrían ser utilizados para calibrar la cámara?. Para contestar la pregunta anterior, se propuso realizar una caracterización de este instrumental para determinar la factibilidad de su utilización mediante el uso de un espectrorradiómetro, instrumento de medición de referencia utilizado por la CONAE, y además, un espectrómetro recientemente adquirido por el laboratorio de óptica de la UFS de la CONAE.

Por otro lado, para la calibración espectral, se pudo contar durante las campañas en el laboratorio con un conjunto de lámparas de descarga de gases de baja presión, las cuales emiten en longitudes de onda bien conocidas. Estas lámparas fueron prestadas por la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF).

El presente capítulo describe las características del instrumental utilizado, los procedimientos de caracterización llevados a cabo y los resultados obtenidos.

4.1 Espectrorradiómetro

El espectrorradiómetro utilizado para la caracterización de los instrumentos es un FieldSpec 4 Hi-Res [43, 44], el cual mide radiancias ($W/m^2 nm sr$) en las bandas VNIR y SWIR con resoluciones que van desde los $3nm$ (@ $700nm$) a los $8nm$

(@1400nm/2100nm), cubriendo los rangos de longitudes de onda que abarcan los 350nm a los 2500nm. En la Fig. 4.1 se muestran las distintas partes del dispositivo de medición.

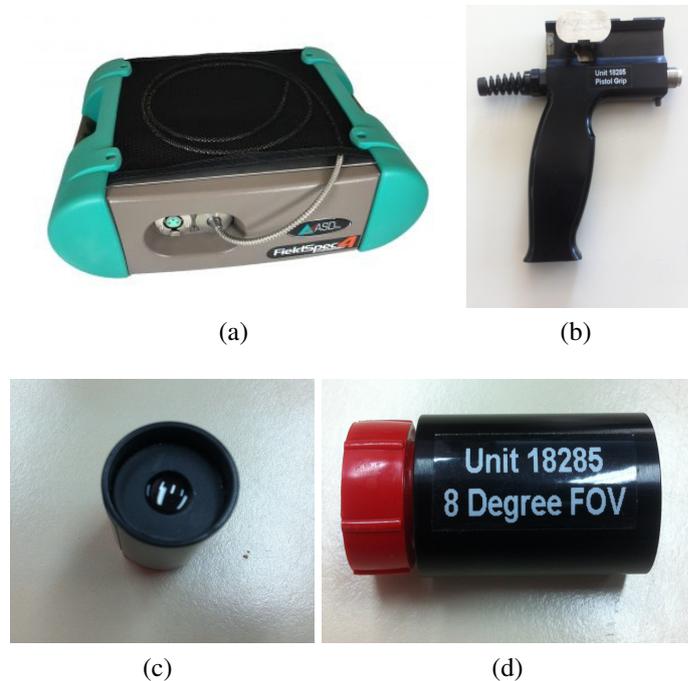


Fig. 4.1: Partes del espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hig-Res. (a) Espectrorradiómetro y fibra óptica; (b) Agarre para fibra óptica; (c) Receptor de $FOV = 8^\circ$ (lente objetivo del espectrorradiómetro); (d) Vista lateral del sensor de 8° .

El instrumento consiste en una fibra óptica que recolecta la energía electromagnética que incide por su extremo en un FOV de 25 grados y la redirige hacia los sensores internos del aparato. Se cuenta con un suplemento que permite sujetar la fibra óptica (Fig. 4.1(b)) e incorporarle un dispositivo óptico que reduce el FOV de la fibra óptica a 8 grados (Fig. 4.1(c) y Fig. 4.1(d)). Este suplemento es utilizado para fijar el sensor a un soporte de tipo fotográfico o al soporte mecánico del laboratorio de óptica utilizado en este trabajo.

A continuación se describen algunos conceptos relacionados con este dispositivo, necesarios para entender los capítulos siguientes:

- **Sensores:** el espectrorradiómetro consiste en tres sensores, uno VNIR que cubre el rango de 350 a 1000nm; uno SWIR1 que abarca desde 1000 a 1800nm; y otro SWIR2 que cubre el rango de 1800 a 2500nm. Debido al cambio de sensores en las longitudes de onda antes mencionadas, es decir en 1000 y 1800nm, existe un salto en las curvas obtenidas por el instrumento debido a las diferencias entre los sensores, las cuales son corregidas por el proceso de calibración aplicado al

espectrorradiómetro. Estos saltos no son perceptibles a simple vista, a menos que se agrande lo suficientemente las gráficas de radiancias obtenidas con el espectrorradiómetro.

- **Optimización:** la optimización es un proceso que el espectrorradiómetro ejecuta automáticamente cuando el usuario lo indique, el cual consiste en configurar los parámetros de los sensores VNIR (tiempo de integración) y SWIR (offset y ganancia) de manera que los sensores no saturen ante una fuente de luz de gran intensidad. Este proceso se realiza antes de cada medición.
- **Dato:** es una medición del dispositivo, que consiste en 2151 pares de longitudes de onda y radiancias (350nm a 2500nm separados 1nm).
- **Repetición:** es el número de mediciones que se toman por cada dato. En el caso que se configure el instrumento para utilizar N repeticiones, éste adquiere N datos, los promedia y arroja como salida un dato promediado de las N mediciones adquiridas. Utilizar varias repeticiones permite disminuir los errores en las mediciones.

En la Fig. 4.2 se muestra una gráfica extraída del certificado de calibración del espectrorradiómetro, la cual muestra las curvas de error absoluto de calibración del dispositivo. En dicha figura se puede ver que el error máximo de medición cometido por el dispositivo alcanza casi el 4 %.

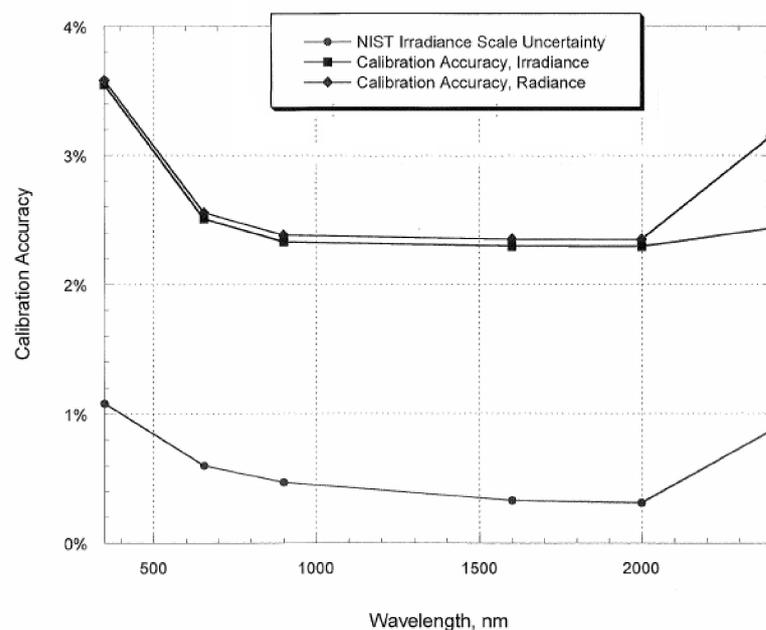


Fig. 4.2: Curvas de error del espectrorradiómetro, extraídas de su certificado de calibración.

El certificado de calibración fue emitido en Agosto del 2015, y tiene una validez de un año, por lo cual al momento de realizar este trabajo el mismo se encuentra vencido, esto implica que la calibración realizada a la cámara VNIR no tiene trazabilidad con ningún estándar. Sin embargo, esto no invalida de ninguna manera el procedimiento llevado a cabo para calibrarla.

4.2 Espectrómetro

Se dispuso de un espectrómetro CCS200 de la empresa Thorlabs [45], el cual es un dispositivo que mide intensidades en función de la longitud de onda para el rango de los 200nm a los 1000nm, con una resolución de 2nm.

Debido a que la calibración de este dispositivo realizada por el fabricante no es una calibración absoluta sino relativa, no puede ser utilizado para medir intensidades absolutas tales como potencia, radiancia o irradiancia. Sin embargo, es útil para realizar mediciones de amplitudes relativas entre líneas espectrales y determinar la posición de dichas líneas en el rango espectral del instrumento, así como tener un elemento más de comparación y mejorar la caracterización de todo el instrumental disponible.

En la Fig. 4.3 se muestran imágenes del espectrómetro utilizado, en donde se ve a la derecha el extremo de su fibra óptica precintada junto al receptor del espectrorradiómetro, con el fin de realizar una comparación cualitativa de los espectros medidos por cada uno de los instrumentos.



Fig. 4.3: Espectrómetro CCS200. (a) Espectrómetro recién sacado de su caja; (b) Espectrómetro CCS200 junto al receptor del espectrorradiómetro, frente a la esfera integradora. Puede verse su fibra óptica (cable naranja) precintada al lado del receptor del espectrorradiómetro.

4.3 Esfera integradora

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la calibración de una cámara hiperspectral puede dividirse en dos partes: la calibración espectral y la radiométrica.

Para la calibración radiométrica es necesario contar con una fuente de luz que emita en radiancias conocidas para cada longitud de onda y además, debe ser espacialmente uniforme de manera de iluminar todo el sensor con la misma radiancia. Un instrumento que cumple con estas características es una esfera integradora como la que se dispone en el laboratorio de óptica de CONAE, aunque lamentablemente no se encuentra calibrada y presenta ciertos deterioros, por lo que se requiere de una caracterización previa a su uso. A continuación se describe de forma general una esfera integradora y los procedimientos llevados a cabo para su caracterización y los resultados obtenidos.

4.3.1 Generalidades sobre la esfera integradora

El puerto de salida de una esfera integradora internamente iluminada sirve como una fuente de luz difusa de gran área. Se utilizan generalmente lámparas halógenas de tungsteno debido a que proveen un espectro continuo libre de líneas de emisión y con gran estabilidad temporal cuando son alimentadas con fuentes de corriente reguladas de precisión [46]. Estas lámparas, en el caso de la esfera utilizada en este trabajo, se colocan en su interior, alrededor del puerto de salida, tal como se muestra en la Fig. 4.4.

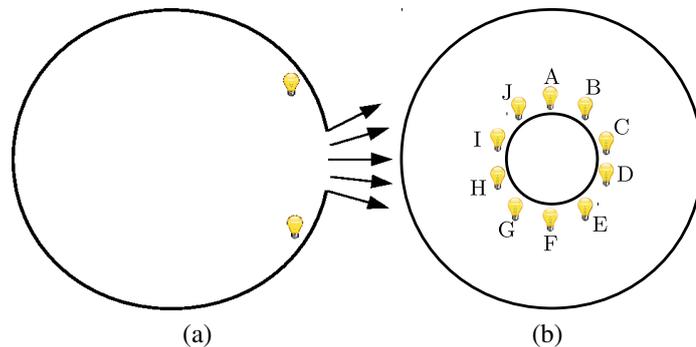


Fig. 4.4: Esfera integradora iluminada internamente con 10 lámparas halógenas de tungsteno. (a) Corte de vista lateral; (b) Disposición de lámparas alrededor del puerto de salida.

La radiancia en el puerto de salida queda determinada por la siguiente ecuación [46]:

$$L_{\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}}{\pi A_e} \cdot \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)(1 - f)} \quad (4.1)$$

donde A_e es el área interna de la esfera; $\rho(\lambda)$ es la reflectancia espectral en la superficie de la esfera; $f = A_s/A_e$ es la relación entre el área del puerto de salida y el área interna de la esfera; y ϕ_{λ} es el flujo espectral radiante de las lámparas determinado por [46]:

$$\phi_{\lambda} = N_{lamps} \cdot \frac{\phi_0}{\sigma T^4} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (4.2)$$

donde N_{lamps} es la cantidad de lámparas encendidas; ϕ_0 es la potencia nominal de las lámparas; σ , c_1 y c_2 son las constantes de cuerpo negro; y T es la temperatura del filamento en grados Kelvin [47]. De esta forma, la radiancia L_λ en el puerto de salida de la esfera varía en pasos discretos en función de la cantidad de lámparas que se encuentren encendidas.

4.3.2 Calibración realizada por el fabricante

La calibración de la esfera integradora es realizada por el fabricante en dos pasos [48]:

- **Calibración de radiancia espectral:** se mide la radiancia espectral de salida en función de la longitud de onda con un espectrorradiómetro, justo en el centro del puerto de salida de la esfera, obteniendo 26 pares de puntos (Radiancia/longitud de onda). Estas mediciones se llevaron a cabo con la totalidad de las lámparas encendidas y alimentadas con una corriente de 6 Amperes.
- **Calibración de luminancia en el puerto de salida:** se divide el puerto de salida de la esfera en una matriz de 69 puntos y se realiza la medición de luminancia en cada uno de ellos, con el sensor a una distancia de 15 centímetros del puerto de salida. Se determina la variación de la luminancia medida respecto al punto central de la matriz (uniformidad espacial).

En la Fig. 4.5 se muestra la gráfica de radiancias medidas en función de la longitud de onda extraídas del certificado de calibración, mientras que en la Fig. 4.6 se muestra el diagrama de uniformidades medido en la matriz de 69 puntos que se realizó sobre el área del puerto de salida de la esfera.

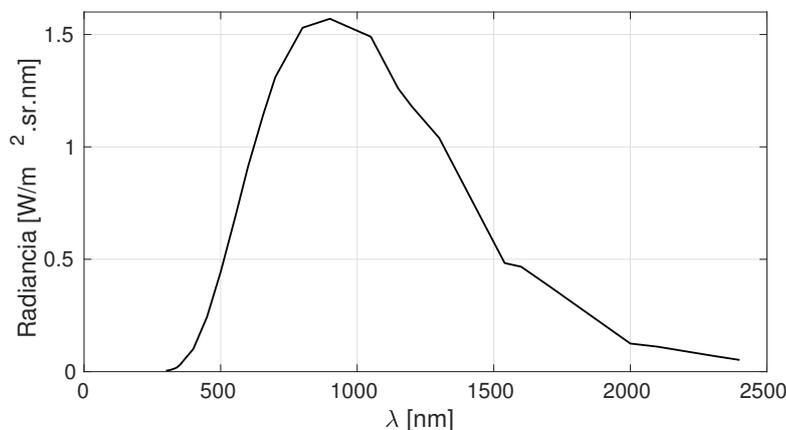


Fig. 4.5: Radiancias medidas por el fabricante en el centro del puerto de salida de la esfera integradora.

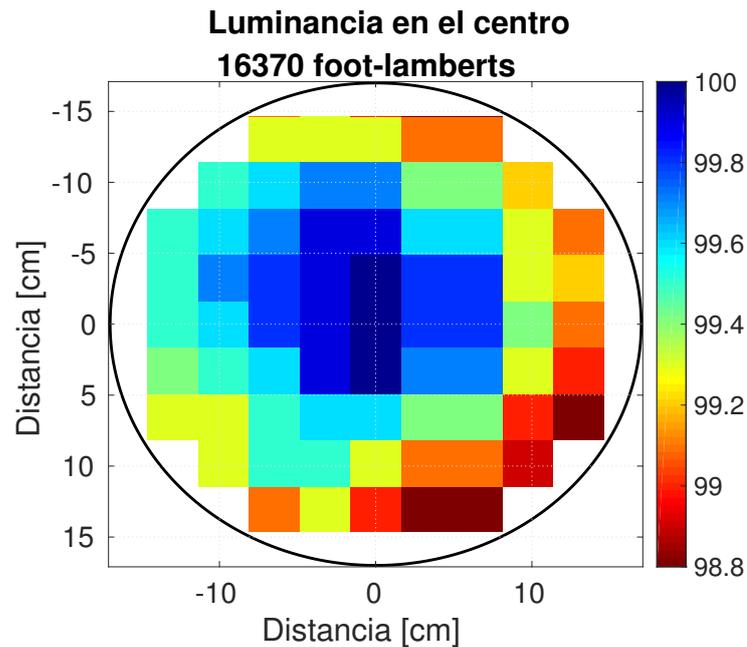


Fig. 4.6: Matriz de 69 puntos definida por el fabricante para medir la luminancia y determinar la uniformidad espacial en el puerto de salida de la esfera.

Se puede ver en la Fig. 4.6 que la uniformidad espacial de la radiancia medida por el fabricante respecto al centro del puerto de salida de la esfera, se encuentra por encima del 98.8 %.

4.3.3 Caracterización de la esfera

La esfera integradora utilizada es una *Labsphere USS-4000* de 40 pulgadas (100cm) de diámetro, con 10 lámparas HLS-DM-150 ubicadas alrededor del puerto de salida de 14 pulgadas (35cm) de diámetro [46]. La distribución de las lámparas se muestra en la Fig. 4.4. De las diez lámparas que dispone la esfera, las lámparas B y G se encuentran fuera de operación debido a que sus fuentes de alimentación se encuentran dañadas. Esto significa que sólo se pueden seleccionar 8 niveles de radiancias mediante el encendido y apagado de las lámparas internas¹.

¹**NOTA:** se pueden obtener más niveles de radiancia modificando la corriente de alimentación de las lámparas internas de la esfera. Sin embargo, esto no se recomienda ya que se producen desplazamientos espectrales del espectro de emisión de la esfera integradora [46].

Se realizaron mediciones de la esfera con el espectrorradiómetro para determinar su radiancia espectral en el centro del puerto de salida y su uniformidad espacial.

La configuración de medición se muestra en la Fig. 4.7, donde se ve el sensor del espectrorradiómetro alineado con el centro del puerto de salida. Las fuentes de alimentación de todas las lámparas se configuraron en 5.7 Amperes. El sensor del espectrorradiómetro se encuentra montado sobre un soporte que permite su movimiento en los ejes x e y , de manera de poder barrer gran parte del área del puerto de salida.

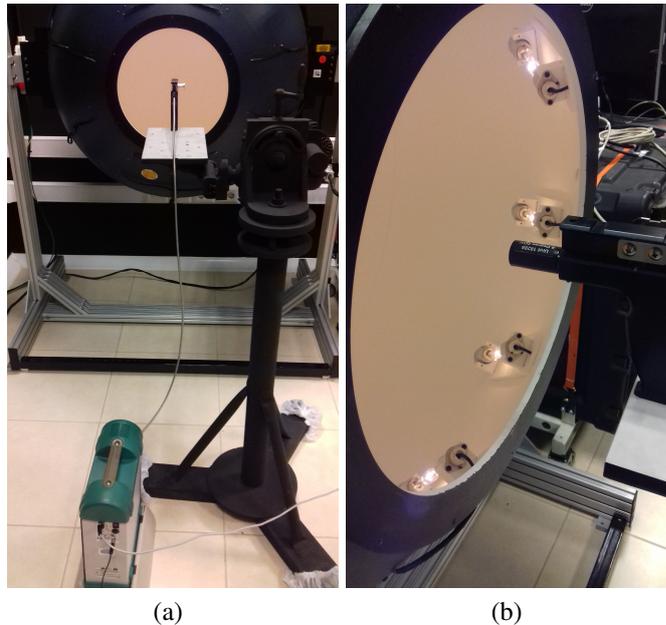


Fig. 4.7: Espectrorradiómetro frente a la esfera integradora. (a) Espectrorradiómetro en la parte inferior y sensor sobre el soporte mecánico frente a al puerto de salida de la esfera; (b) Vista lateral donde se ve el sensor del espectrorradiómetro, el puerto de salida de la esfera y sus lámparas internas.

Primero se realizaron mediciones de radiancia espectral en el centro de la boca de la esfera, encendiendo una lámpara a la vez y realizando una optimización en el espectrorradiómetro cada vez que se encendía una lámpara.

La Fig. 4.8 muestra un gráfico de las radiancias medidas, en el rango de longitudes de onda de 350 a 2500nm. Cada una de estas ocho curvas fue obtenida a partir del promedio de 14 mediciones con el espectrorradiómetro, donde cada medición fue realizada con 5 repeticiones. En dicha gráfica se observa que los perfiles de radiancias espectrales mantienen prácticamente la misma forma para distinta cantidad de lámparas encendidas.

Por otro lado, se realizaron las mediciones de radiancia espectral para determinar la uniformidad espacial. Por cuestiones de practicidad, y debido a limitaciones en la movilidad del pie, en lugar de realizar mediciones en toda el área abarcada por el puerto de salida, se midió solamente una pequeña área circular de 5 centímetros de diámetro en el centro del puerto, la cual abarca el diámetro de la lente objetivo de la cámara

hiperespectral. Esta área se dividió en una matriz de 13 puntos separados un centímetro cada uno entre sus centros. La Fig. 4.9 muestra a escala esta matriz de puntos con el fin de dar una idea de las dimensiones del área medida y el puerto de salida.

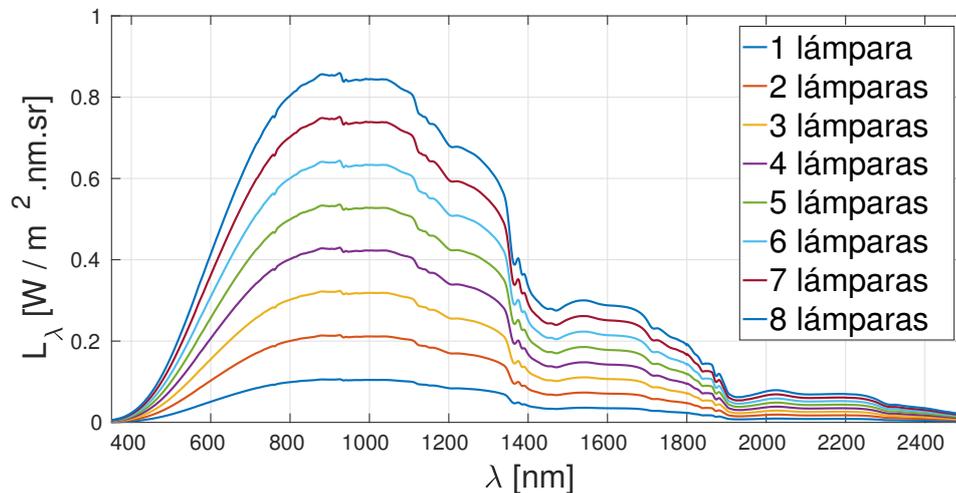


Fig. 4.8: Radiancia espectral en el centro de la boca de la esfera para 1 a 8 lámparas encendidas

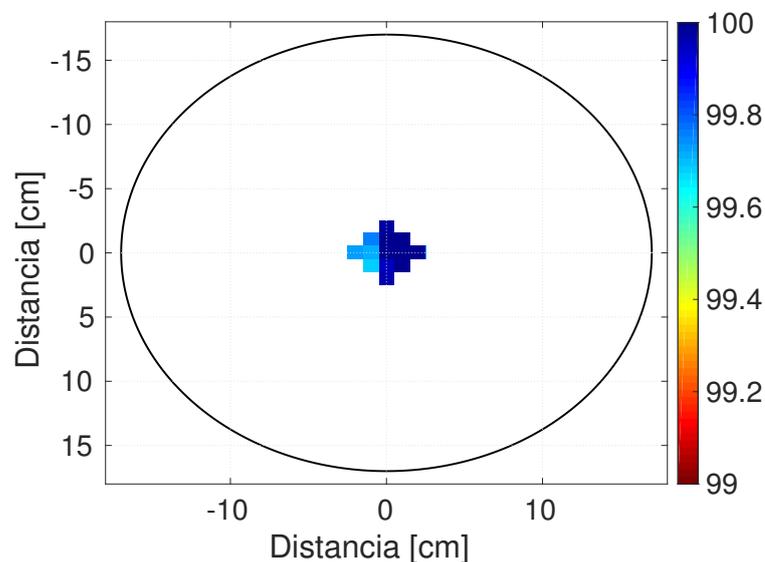


Fig. 4.9: Área medida en el puerto de salida de la esfera donde se ve la matriz de 13 puntos medida.

Se realizaron un conjunto de mediciones de los 13 puntos de la matriz cada vez que se encendió una lámpara, desde 1 hasta 8. Cada medición consistió en 14 datos y 5 repeticiones en el espectrorradiómetro, obteniendo 14 archivos por medición, los cuales

fueron promediados nuevamente. El porcentaje de uniformidad se cuantifica con:

$$\Delta L_\lambda = \frac{\max(L_\lambda) - \min(L_\lambda)}{\mu_{L_\lambda}} \quad (4.3)$$

donde $\max(L_\lambda)$ y $\min(L_\lambda)$ son las radiancias máxima y mínima de cada matriz de puntos; y μ_{L_λ} es la media de las radiancias medidas en la matriz. Aplicando la ecuación (4.3) a los datos obtenidos, se obtienen las curvas que se muestran en la Fig. 4.10. En dicha figura se observa que la no uniformidad espacial de la radiancia espectral alcanza el 8% en el peor de los casos. Sin embargo, en el rango de longitudes de onda de la cámara VNIR, se observa que la no uniformidad se mantiene por debajo del 1%, tal como se muestra en la Fig. 4.11 donde se ve la región ampliada de 400nm a 1000nm.

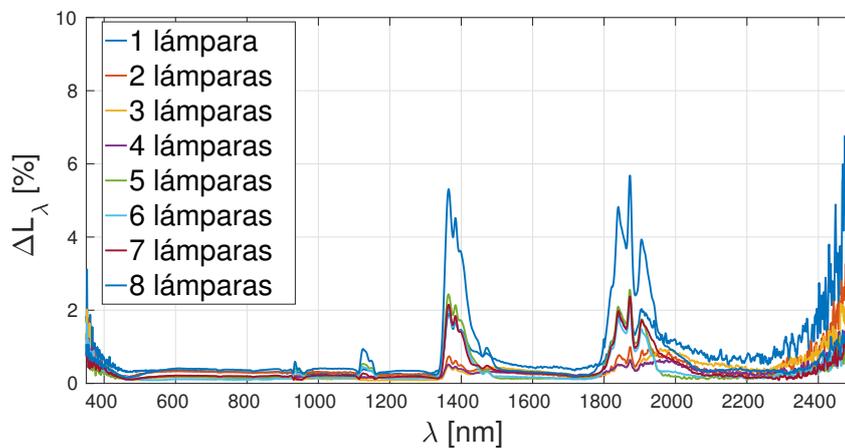


Fig. 4.10: Uniformidad espacial de la radiancia en el puerto de salida de la esfera integradora.

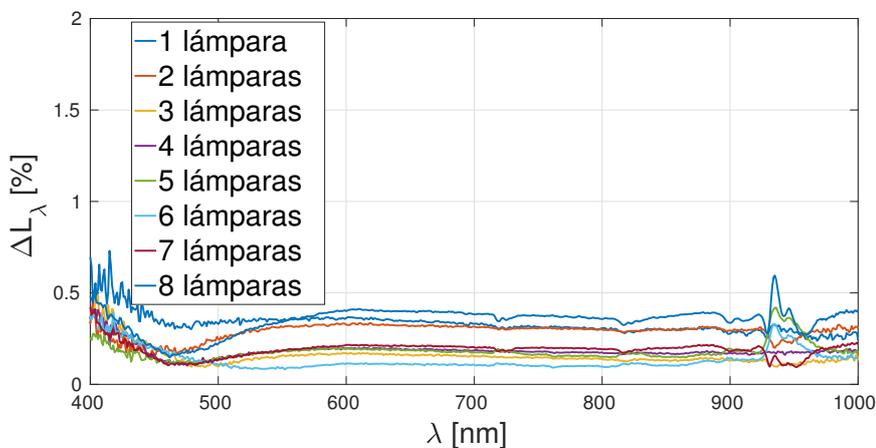


Fig. 4.11: Uniformidad espacial de la radiancia en el puerto de salida de la esfera integradora en el rango de longitudes de onda de la cámara hiperspectral.

A modo de ejemplo, en la Fig. 4.12 se muestran las matrices de puntos obtenidas para 1, 3, 5 y 8 lámparas encendidas simultáneamente, para la longitud de onda donde las curvas de la Fig. 4.11 tienen su máximo. En estas figuras se puede ver el porcentaje de uniformidad de cada curva respecto al punto central, donde todos los puntos medidos tienen un apartamiento menor al 1 %.

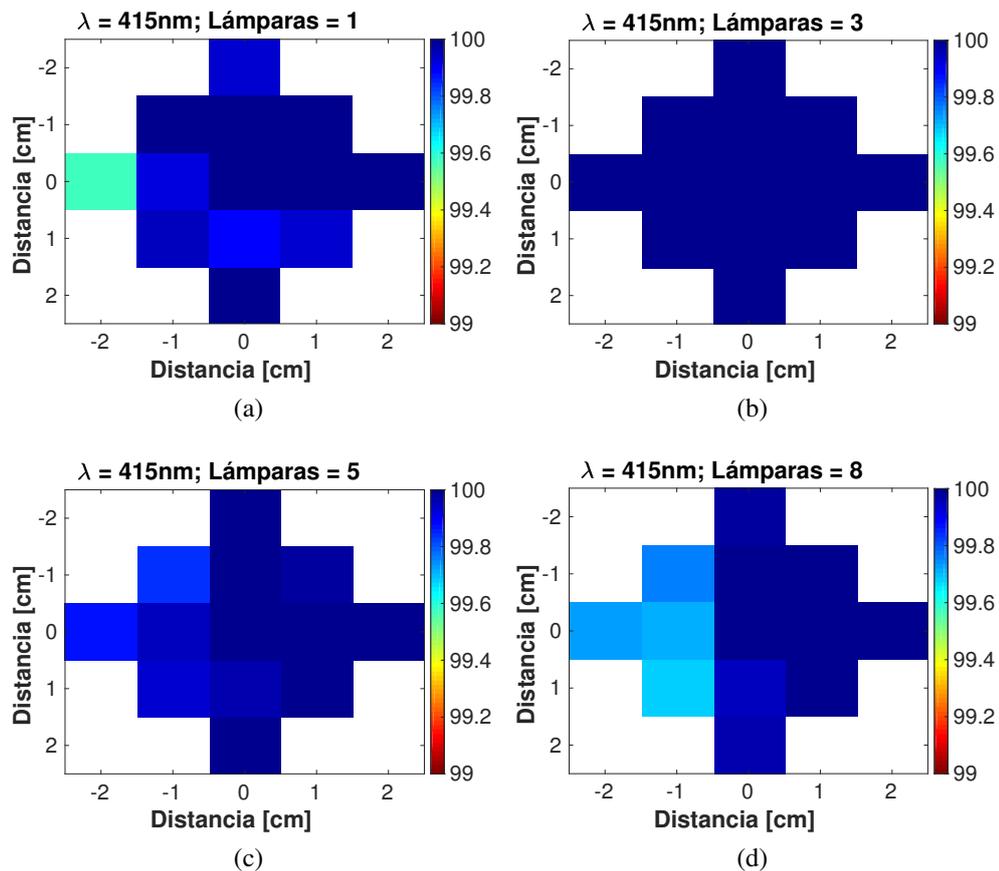


Fig. 4.12: Uniformidad para (a) 1 lámpara; (b) 3 lámparas; (c) 5 lámparas; (d) 8 lámparas.

4.4 Monocromador

La calibración espectral de la cámara hiperespectral VNIR consiste en establecer la correspondencia entre filas de píxeles del sensor y longitudes de onda, por lo cual se necesita una fuente que emita en longitudes de onda conocidas. Para esto se utilizó un monocromador, dispositivo que permite obtener en su salida diferentes longitudes de onda de ancho de banda muy estrecho, configurables por el usuario. En las siguientes subsecciones se realiza una descripción del funcionamiento de este dispositivo, la caracterización realizada y los resultados obtenidos.

4.4.1 Descripción del monocromador

Un monocromador es un dispositivo óptico que transmite una banda angosta de longitudes de onda a partir de una fuente de luz que posea un amplio ancho de banda. En la Fig. 4.13(a) se muestra el monocromador utilizado sin su tapa, donde se pueden ver los distintos componentes ópticos que contiene, mientras que en la Fig. 4.13(b) se muestra un esquema de estos elementos para ilustrar el recorrido de la luz a través del instrumento. La arquitectura del monocromador corresponde a una Czerny-Turner [49].

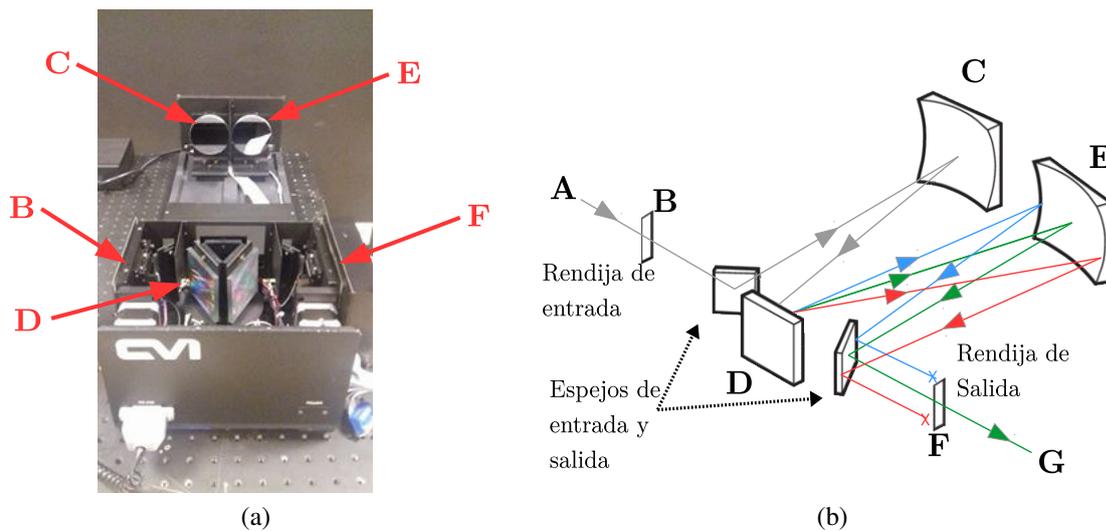


Fig. 4.13: Monocromador utilizado en este trabajo. (a) Monocromador desarmado; (b) Arquitectura Czerny-Turner.

Un haz de luz de amplio ancho de banda ingresa a la entrada del monocromador (A) y pasa a través de la rendija de entrada (B). El haz de luz luego incide sobre un espejo colimador (C) y se refleja hacia la red de difracción (D). La red de difracción produce la separación en longitudes de onda del haz de luz que incide sobre ella. Estos haces reflejados en la red inciden sobre un segundo espejo de enfoque (E) y luego sobre la rendija de salida del monocromador (F). La red de difracción se encuentra montada sobre un plato giratorio que permite variar el ángulo de incidencia de la luz respecto a su normal, y por ende el ángulo de los haces de luz reflejados, esto permite que sobre la rendija de salida incida una longitud de onda distinta que depende del ángulo en el cual la red de difracción se encuentre. La posición del plato giratorio es variada a través de un motor paso a paso controlado por el microprocesador del monocromador. En el ejemplo de la Fig. 4.13(b), sólo el haz de luz verde atraviesa la rendija de salida (G), mientras que las otras longitudes de onda son bloqueadas y no se ven a la salida.

Las rendijas de entrada y salida del dispositivo tienen un ancho configurable por medio de motores paso a paso, permitiendo variar su apertura desde los $10\mu\text{m}$ hasta

los 3mm . De esta forma, las aperturas de las rendijas de entrada y salida determinan el ancho de banda del haz de luz de salida, mientras que el ángulo en el que se encuentra la red de difracción determina su longitud de onda central.

El monocromador utilizado es un DK480 [50], el cual posee tres redes de difracción en su interior con distintas características, como la cantidad de ranuras, el *Blaze Angle* [34] y su resolución espectral. El usuario puede seleccionar la red de difracción que desea utilizar.

La performance del haz de luz de salida depende de varios factores, tales como la alineación de los elementos ópticos, la calidad de estos elementos y el diseño del instrumento. Debido a que el monocromador tiene varias partes móviles tales como las rendijas de entrada y salida y la red de difracción, una alineación deficiente en estos elementos puede producir una diferencia entre la longitud de onda configurada en el instrumento respecto a la longitud de onda central del haz de luz en su salida. Además, en el caso que esta deficiencia en la alineación sea extrema, puede ocurrir que directamente no se observe nada en la salida del instrumento. En la siguiente sección se explica cómo se realizó la caracterización del instrumento y el proceso de alineación.

4.4.2 Caracterización y calibración del monocromador

Debido a que las redes de difracción no estaban colocadas dentro del monocromador durante su tiempo fuera de servicio y además se encontraban sucias, fue necesario realizar un procedimiento de calibración luego de colocar las mismas. En la Fig. 4.14 se muestra la configuración del instrumental implementada, donde se puede ver en la Fig. 4.14(a) un láser de 665nm frente a la rendija de entrada, y en la Fig. 4.14(b) el sensor del espectrorradiómetro frente a la rendija de salida.

El procedimiento de calibración consiste en dos pasos:

- **Calibración de cero:** se utiliza un láser para iluminar la rendija de entrada, asegurándose de iluminar de forma perpendicular a la misma. Se configura el ancho de las rendijas de entrada y salida al mínimo permitido ($10\mu\text{m}$) y se ajusta el monocromador para que vaya a la posición de $\lambda = 0$, en esta posición la red de difracción debe comportarse como un espejo, de manera que en la salida debería poder verse el haz de luz del láser. Mientras que se observa la pantalla de visualización de las mediciones del espectrorradiómetro, se realiza saltos finos en longitud de onda en el monocromador hasta observar que la intensidad de la línea espectral medida por el espectrorradiómetro alcance su máximo. Cuando suceda esto, se configura el cero del monocromador en esta posición. Este procedimiento configura la memoria interna del monocromador, indicándole que la posición en la cual el plato giratorio que soporta las redes de difracción se encuentra, es la

posición de $\lambda = 0$.

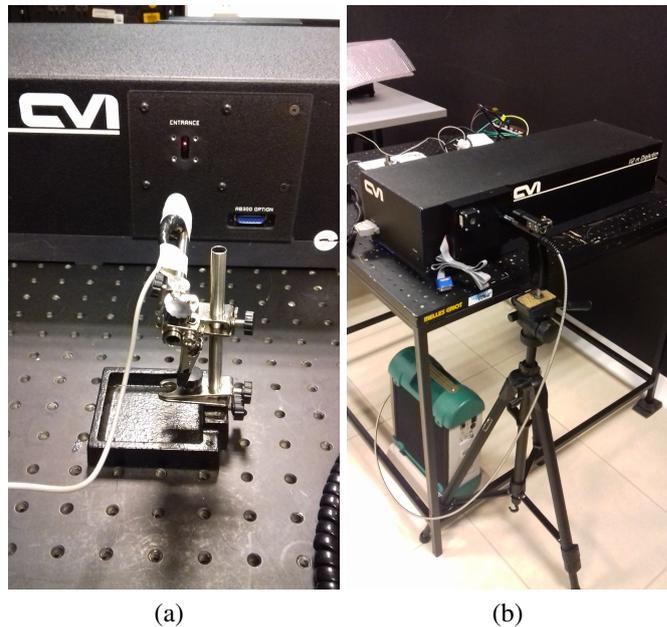


Fig. 4.14: Caracterización y alineación del monocromador. (a) Láser incidiendo en la rendija de entrada; (b) Sensor del espectrorradiómetro en la rendija de salida.

- **Calibración de longitud de onda:** utilizando nuevamente el láser se ilumina la rendija de entrada. Se configura el monocromador en la longitud de onda del láser, en este caso 665nm . Si la alineación está correcta o muy cerca del valor de longitud de onda del láser, debería verse un pico de intensidad alrededor de esta longitud de onda en la pantalla del espectrorradiómetro. Se varió la longitud de onda del monocromador a pasos finos hasta observar el máximo de intensidad de la línea espectral, y cuando sucedió esto se configuró la longitud de onda del láser en el monocromador. Este procedimiento configura la longitud de onda en el monocromador, y esto permite que el instrumento calcule la cantidad de pasos que tiene que avanzar con sus motores para obtener a su salida, la longitud de onda configurada por el usuario.

4.4.3 Resultados de la caracterización del monocromador

Para las mediciones que involucraron al monocromador, no se realizaron debidamente los montajes de los instrumentos de medición, tales como fuentes de luz, la cámara hiperespectral y el espectrorradiómetro, debido principalmente a limitaciones y a la falta del instrumental disponible en el laboratorio. Además, como se mencionó en la sección anterior, las redes de difracción no se encontraban colocadas en el

monocromador al momento de que el mismo ingrese al laboratorio de óptica, por lo tanto es de esperar que al colocar las redes de difracción nuevamente en su lugar, el sistema óptico del dispositivo deba ser alineado nuevamente antes de su utilización, cosa que tampoco se realizó ya que no se contaba con el instrumental necesario para hacerlo.

Los problemas de alineación mencionados pueden causar que se le atribuya una falta de alineación al conjunto cámara-espectrógrafo, cuando en realidad el problema es debido tanto a la alineación interna de los dispositivos ópticos del monocromador como a la alineación del instrumental externo utilizado. De hecho, esto fue lo que paso al tratar de realizar la calibración espectral de la cámara VNIR con el monocromador.

Se colocó la cámara hiperespectral frente a la rendija de salida del monocromador sin su lente objetivo colocada para iluminar la mayor parte del sensor, y se configuró la aplicación para capturar imágenes seteando distintas longitudes de onda en el monocromador.

En la Fig. 4.15 se observa una curva de la longitud de onda en función de las columnas del sensor, obtenida a partir de aplicar los polinomios de calibración espectral obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes capturadas con la cámara hiperespectral frente a la salida del monocromador (ver Capítulo 6). En dicha figura se observa que la curva de longitudes de onda en función de las columnas del sensor se encuentra inclinada, lo que podría ser causado, por ejemplo, por una rotación del espectrógrafo respecto a la cámara pco.1600.

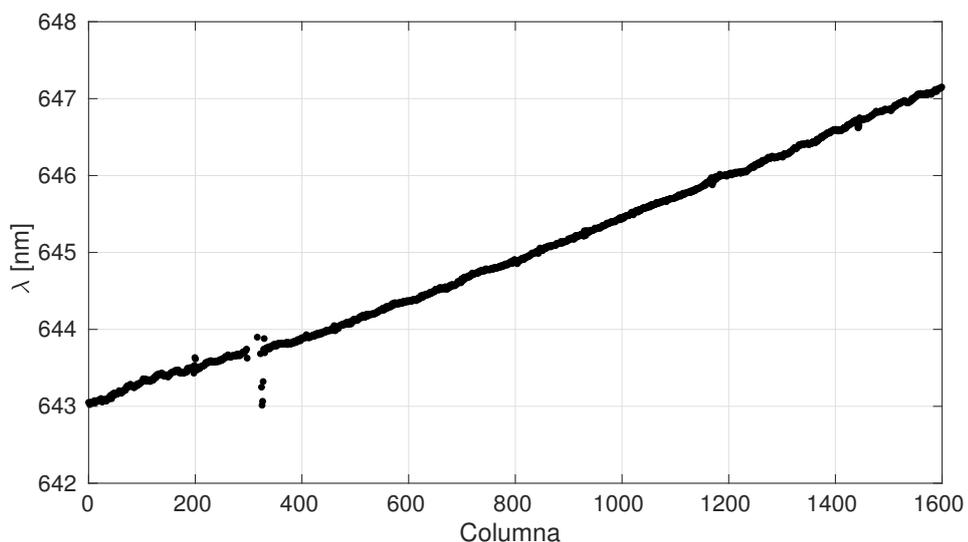


Fig. 4.15: Resultado de la calibración espectral realizada con el monocromador, lo que lleva a concluir erróneamente que existe una desalineación entre espectrógrafo y cámara pco.1600.

La inclinación observada en la Fig. 4.15 se encuentra en el orden de los $4nm$, siendo este valor aproximado a la resolución espectral nominal de la cámara dada por su fabricante [51] y a las calculadas en este trabajo (ver Capítulo 6).

Como se verá en el Capítulo 6, en la calibración espectral llevada a cabo con las lámparas de descarga que se describen en la siguiente sección, no se observa el efecto mostrado en la Fig. 4.15, por lo tanto se decidió no utilizar el monocromador para realizar la calibración espectral de la cámara hiperespectral, ya que por las limitaciones mencionadas no fue posible identificar las verdaderas causas de este efecto.

4.5 Lámparas de descarga de gases

Como se explica en [52], las lámparas de descarga utilizan una descarga eléctrica que pasa a través de un gas ionizado para generar luz. Generalmente, estas lámparas contienen gases nobles tales como Argón, Neón, Criptón, entre otros, o una mezcla de estos gases, y varias lámparas de este tipo también contienen vapor de Mercurio, Sodio, y halogenuros metálicos. Existen diferentes tipos, las cuales se pueden dividir en dos grupos: lámparas de baja presión y de alta presión, también llamadas Lámparas de descarga de alta intensidad (HID Lamps, High-Intensity Discharge Lamps). Las lámparas de descarga de baja presión son tubos de vidrio que contienen un gas a una presión menor a la atmosférica. Por otro lado, las lámparas de descarga de alta presión consisten en un tubo de vidrio con un gas presurizado en su interior a una presión mayor a la atmosférica.

Cuando un campo eléctrico se aplica al gas inerte contenido en la lámpara, el gas parcialmente ionizado produce plasma conductivo, el cual contiene electrones libres, iones y partículas neutras. Los electrones, acelerados por el campo eléctrico aplicado, colisionan y excitan a los átomos del gas y el vapor de los metales contenidos en la lámpara, de manera que sus electrones pasan a estados de energía superiores. Luego estos electrones excitados decaen nuevamente a un nivel de energía inferior liberando fotones en el espectro visible y ultravioleta.

Las lámparas de descarga de gases de alta presión y alta corriente producen un espectro continuo amplio con características de líneas espectrales pronunciadas dependiente de la composición química del gas. A menor presión y corriente, emiten líneas espectrales más nítidas con menos ruido de fondo. Las características espectrales de este tipo de lámparas para un dado tipo de gas, depende de la frecuencia, intensidad y tensión con la cual se las alimenta, de manera que cada tipo de gas requiere de una fuente de alimentación con características específicas para que estas alcancen el régimen estable.

Hay dos razones principales para utilizar este tipo de lámparas en la calibración de instrumentos ópticos: la primera es que emiten líneas espectrales cuyas longitudes de onda son conocidas y se encuentran tabuladas; la segunda es que generalmente estas líneas espectrales tienen anchos muy chicos, llegando hasta los $0.001nm$ en algunos casos (dependiente del tipo de gas, fuentes de alimentación de las lámparas, etc), por lo cual son muy adecuadas para determinar la resolución espectral de los dispositivos ópticos [53].

En este trabajo se utilizaron lámparas de descarga de baja presión de Mercurio-Argón, Nitrógeno, Helio, Hidrógeno, Neón y Criptón. En la Fig. 4.16 se muestran los espectros de estas lámparas medidos con el espectrómetro².

²**NOTA:** las campañas de mediciones con el espectrorradiómetro se realizaron antes de que estén disponibles las lámparas prestadas por FaMAF, por lo tanto sólo se midieron dichas lámparas con el espectrómetro CCS200. La única lámpara que fue medida con el espectrorradiómetro fue la de Mercurio-Argón.

Dado que las líneas espectrales son constantes y se pueden encontrar en tablas, la comparación con la respuesta dada por la cámara permitiría su calibración. En el Anexo B se puede encontrar una tabla con las líneas espectrales teóricas de los picos de emisión de las lámparas utilizadas en este trabajo.

Al realizar la comparación de la posición de los máximos de las líneas espectrales medidas por el espectrómetro y las longitudes de onda teóricas tabuladas, se logró realizar una identificación exitosa de estas líneas excepto para las lámparas de Nitrógeno y Neón. Las líneas espectrales de la lámpara de Nitrógeno medidas con el espectrómetro no coincidieron con las longitudes de onda tabuladas. Por otro lado, la gran cantidad de líneas espectrales muy cerca una de otras de la lámpara de Neón dificultó su identificación. Por estas razones, estas dos últimas no fueron consideradas para realizar la calibración espectral de la cámara.

Un detalle a tener en cuenta es que la lámpara de HgAr tiene su propia fuente de alimentación de continua, mientras que el resto de las lámparas se alimentan con otra fuente de alimentación de alterna. Por otro lado, las lámparas de He, Kr y H prestadas por la FaMAF comparten otra fuente de alimentación con otras características. Este detalle es importante ya que, como se verá en el Capítulo 6, esto podría ser una causa del porqué se observan variaciones o saltos en la posición de los máximos, a lo largo del eje espacial, de las líneas espectrales observadas en las imágenes capturadas con la cámara hiperespectral.

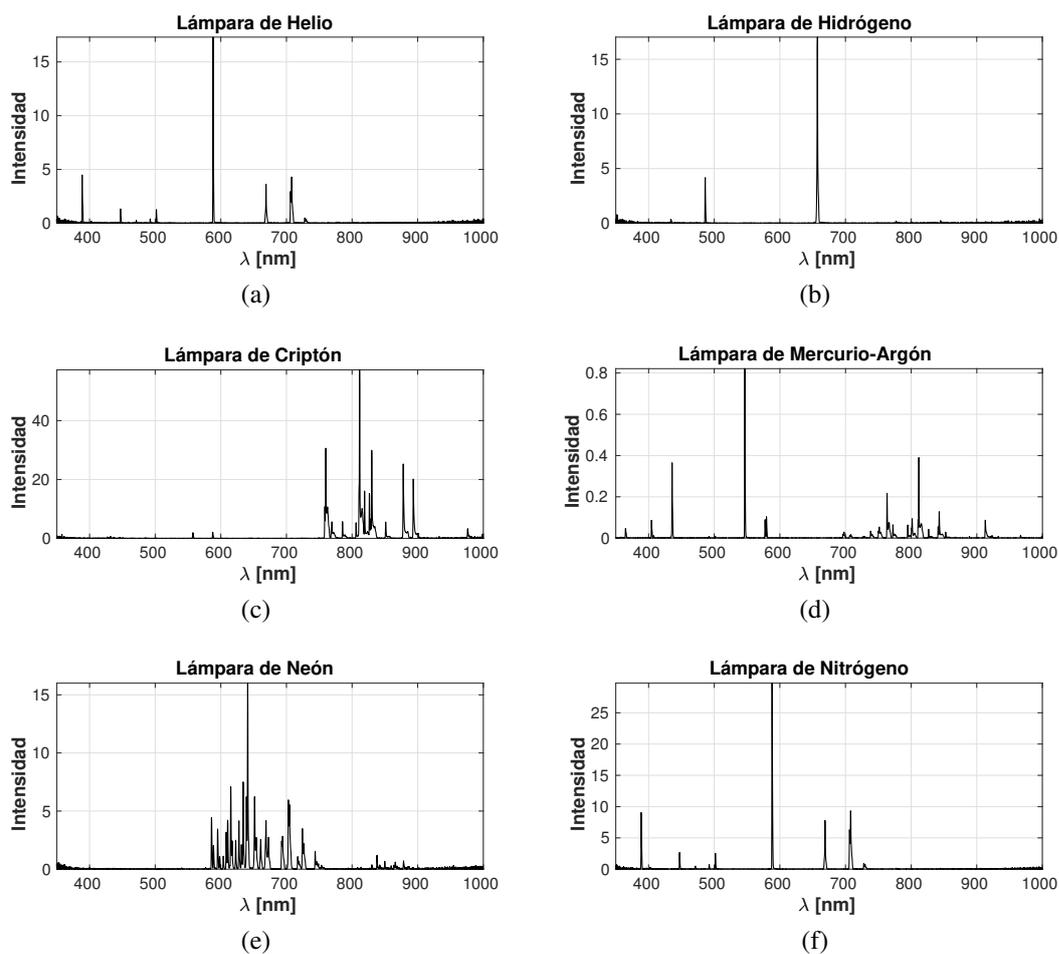


Fig. 4.16: Espectros de lámparas de descarga (a) Helio; (b) Hidrógeno; (c) Criptón; (d) Mercurio-Argón; (e) Neón; (f) Nitrógeno.

4.6 Discusión de los resultados obtenidos

La caracterización realizada a la esfera integradora permite su utilización como fuente de referencia para realizar la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral, ya que sus radiancias espectrales en función de la cantidad de lámparas encendidas pudieron ser determinadas con la ayuda del espectrorradiómetro. La uniformidad espacial de la radiancia resultó ser superior al 99 % en todo el rango espectral de la cámara hiperespectral.

El problema de alineación del monocromador impuso una limitación en su uso para la calibración espectral de la cámara. Sin embargo, aún con esta limitación, puede ser utilizado, en principio, para la determinación de la resolución espectral de la cámara en función de la longitud de onda y el número de columnas del sensor. Esto se realiza aprovechando la particularidad de este instrumento que produce un haz de luz de salida

con un ancho de banda muy estrecho (comparado con el producido por las lámparas de descarga), según las especificaciones de su hoja de datos.

Sin embargo, en el análisis que se realiza en el Capítulo 6 se verá que el problema de alineación que tiene el monocromador también presenta inconvenientes al utilizarlo para determinar la resolución espectral de la cámara VNIR.

Caracterización de la cámara hiperespectral

En este capítulo se realiza la caracterización de la cámara hiperespectral considerándola como una caja negra, donde el espectrógrafo y la cámara pco.1600 son inseparables. Se lo consideró así para evitar tener que separar el espectrógrafo de la cámara y arruinar la alineación del mismo con el CCD realizada por el fabricante, de esta forma se evita tener que realizar un nuevo procedimiento de alineación. Por otro lado, para determinar algunos de los parámetros de la cámara, sí es necesario quitar la lente objetivo para eliminar algunos efectos que influyen en los datos obtenidos, como por ejemplo, vignetting [54].

Se comienza con una descripción del modelo matemático propuesto y la presentación de las ecuaciones principales que lo describen. Cada parámetro del sensor se determina mediante una serie de mediciones y análisis de datos particulares según qué parámetro se esté analizando, implementando una determinada configuración del instrumental de laboratorio. Por esta razón, en cada una de las secciones de este capítulo se explica cual fue la configuración del instrumental implementada para determinar los parámetros de la cámara.

5.1 Modelo lineal de la cámara

Para esta cámara se asume un modelo lineal extraído del estándar EMVA1288 [55], por lo tanto la relación entre los electrones (también llamados fotoelectrones debido a que son los generados por los fotones incidentes sobre el material semiconductor, como se explicó en la Subsección 3.1.3) y los fotones incidentes es la siguiente:

$$\eta_q(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_f}, \quad (5.1)$$

donde η_q es la denominada eficiencia cuántica del CCD dependiente de la longitud

de onda; μ_e es la media de fotoelectrones generados y μ_f es la media de fotones que inciden sobre el semiconductor.

La ecuación que describe el valor medio de los fotones que inciden sobre un detector es la siguiente:

$$\mu_f = k_f A \eta_e t_{int} L_\lambda, \quad (5.2)$$

donde k_f es una constante que tiene unidades de [*fotones.m.sr/W.s*]; A es el área del píxel; η_e es la eficiencia del espectrógrafo; t_{int} es el tiempo de integración y L_λ es la radiancia espectral en unidades de [*W/m² nm sr*]. Los parámetros k_f , η_e y L_λ son dependientes de la longitud de onda, y por ende, del número de fila del CCD. Utilizando las ecuaciones (5.1) y (5.2), la media de fotoelectrones generados es la siguiente:

$$\mu_e = \eta_q \mu_f = \eta_q k_f A \eta_e t_{int} L_\lambda. \quad (5.3)$$

5.1.1 Modelo de señal

Los sensores CCD utilizados en las cámaras digitales, sobre todo los de uso científico, son diseñados de manera que tengan un comportamiento lineal con la luz que incide sobre cada detector que compone al sensor. Los CCD han sido ampliamente estudiados a lo largo de los años y existe mucha bibliografía relacionada a ellos, por lo cual no es el objetivo de este trabajo realizar una nueva definición y estudio del modelo aplicable al sensor de la cámara VNIR, sino que en su lugar se adopta un modelo lineal y se analiza, en la próxima sección, el apartamiento que tiene el sensor respecto al modelo lineal.

La Fig. 5.1 muestra el modelo matemático lineal propuesto extraído de [55].

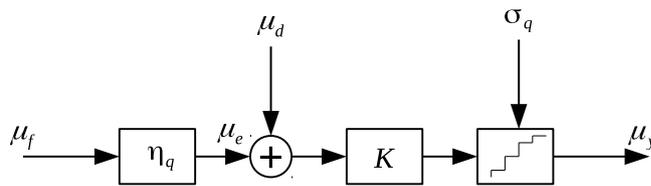


Fig. 5.1: Modelo lineal de la cámara.

En la figura anterior, la señal de salida μ_y es el DN medio generado por el detector, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\mu_y[DN] = K (\mu_e + \mu_d) = K \mu_e + \mu_{y,dark}, \quad (5.4)$$

donde K es la ganancia promedio del sistema en unidades de DN/e^- ; μ_d es la contribución de electrones generados en el material semiconductor en ausencia de

luz; y $\mu_{y,dark} = K \mu_d$ es lo que se denomina señal oscura. Los parámetros $\mu_{y,dark}$ y μ_d representan el mismo efecto, sólo que el primero tiene unidades de DN mientras que el segundo tiene unidades de electrones¹.

La ecuación que define entonces el valor de señal generado por cada detector en unidades de DN es la siguiente:

$$\mu_y[DN] = \mu_{y,dark} + K \eta_q k_f A \eta_e t_{int} L_\lambda. \quad (5.5)$$

Se debe tener en cuenta que la ecuación (5.5) no considera la transmitancia τ_l de la lente objetivo.

¹**NOTA:** varios de los parámetros de los cuales se habla en este capítulo pueden estar dados tanto en unidades de DN como en electrones. Por esta razón, para evitar confusiones en los casos donde el cambio de unidades no es tan evidente, en el resto del presente trabajo se hará explícita su unidad entre corchetes al lado de cada término, por ejemplo $\mu_y[DN]$ es la media de señal en unidades de DN, mientras que $\mu_y[e^-]$ es el mismo parámetro en unidades de electrones.

5.1.2 Modelo de ruido

El número de fotoelectrones generados por los fotones que inciden sobre el detector varía de forma estadística con una distribución de Poisson; este ruido es conocido como Shot Noise [56]. La varianza de los fotoelectrones es entonces la siguiente:

$$\sigma_e^2[e^-] = \sigma_{shot}^2[e^-] = \mu_e. \quad (5.6)$$

Todas las fuentes de ruido relacionadas con el proceso de lectura de los píxeles en el sensor y los amplificadores de la electrónica pueden ser descritos mediante una fuente de ruido con distribución normal con varianza $\sigma_d^2[DN^2]$. Además, se considera el ruido producido por el proceso de conversión de voltaje a DN del ADC, el cual se suma al ruido total y tiene un valor de $\sigma_q^2 = 1/12 DN^2$ [57]. Entonces, el ruido a la salida queda descrito por la siguiente ecuación:

$$\sigma_y^2[DN^2] = K^2 (\sigma_d^2 + \sigma_e^2) + \sigma_q^2. \quad (5.7)$$

Utilizando las ecuaciones (5.4), (5.6) y (5.7) se obtiene el ruido a la salida en función de la señal media:

$$\sigma_y^2[DN^2] = K^2 \sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y,dark}). \quad (5.8)$$

Usualmente se utiliza el término “*Factor de conversión A/D*”, cuyo símbolo es K_{ADC} , el cual determina la cantidad de fotoelectrones generados por cada DN, y que resulta ser la inversa de la ganancia promedio K . Debido a que este factor es comúnmente utilizado en la bibliografía y en las hojas de datos de los fabricantes de sensores [56, 58], se reescribe la ecuación (5.8) de la siguiente forma:

$$\sigma_y^2[DN^2] = \frac{\overbrace{\sigma_d^2}^{\text{ordenada}}}{K_{ADC}^2} + \sigma_q^2 + \underbrace{\frac{1}{K_{ADC}}}_{\text{pendiente}} (\mu_y - \mu_{y,dark}). \quad (5.9)$$

La ecuación (5.9) resulta de la contribución de la varianza de dos ruidos:

- La varianza del ruido de lectura definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{read}^2[DN^2] = \frac{\sigma_d^2}{K_{ADC}^2} + \sigma_q^2. \quad (5.10)$$

- La varianza del ruido shot producido por los fotones incidentes en el semiconductor:

$$\sigma_{shot}^2[DN^2] = \frac{1}{K_{ADC}} (\mu_y - \mu_{y,dark}). \quad (5.11)$$

5.2 Evaluación de la linealidad del sensor

El análisis de la linealidad es un parámetro importante que se debe realizar en un sensor CCD que será utilizado para realizar mediciones absolutas de variables físicas. En un sensor real, existen pequeñas desviaciones de la linealidad que deben ser tenidas en cuenta, y en el caso extremo que sean significativas, deben ser corregidas.

En la Fig. 5.2 se muestra un circuito simplificado de la región que sensa las cargas en un CCD [56]. El capacitor C_{SN} representa la capacidad en la juntura del diodo que recolecta los electrones generados produciendo una diferencia de potencial V_{SN} entre sus placas; el amplificador seguidor amplifica el voltaje V_{SN} que luego es convertido a un DN por el conversor ADC.

Existen dos fuentes principales de no linealidades en un sensor CCD:

- **No linealidad V/V:** es una no linealidad debida principalmente al amplificador seguidor de voltaje del píxel. Esto produce una desviación de la pendiente en las curvas obtenidas con la ecuación (5.9), de manera que K_{ADC} es dependiente del nivel de señal.
- **No linealidad V/e⁻:** está relacionada con la capacidad del diodo sensor de

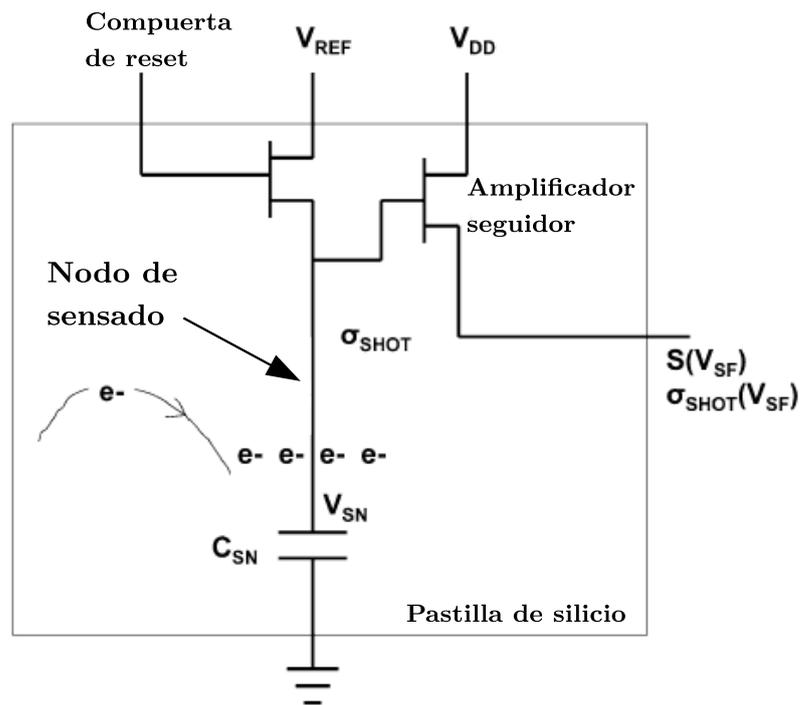


Fig. 5.2: Circuito simplificado típico de la región de un píxel que convierte los electrones capturados en los pozos de potencial en un voltaje.

luz, la cual aumenta a medida que la carga en el capacitor también lo hace. Sin embargo, en el caso de los sensores CCD la no linealidad V/e^- no es significativa en comparación con la no linealidad V/V .

Para determinar la no linealidad del sensor, se utiliza la ecuación (5.5) y se la reescribe de la siguiente forma:

$$\mu_y[DN] = \mu_{y,dark} + K_t t_{int} L_\lambda, \quad (5.12)$$

donde se condensa el producto de las constantes $K \eta_q k_f A \eta_e$ en una única constante K_t por practicidad. Se utiliza la ecuación (5.12) para determinar la linealidad en función del tiempo de integración y la radiancia dejando uno de estos parámetros constantes y variando el otro.

5.2.1 Configuración del instrumental para análisis de linealidad

La captura de imágenes para este análisis se realiza con la cámara VNIR frente a la esfera integradora con la lente objetivo colocada, tal como se muestra en las Fig. 5.3. En dicha figura se ve que la cámara se encuentra montada sobre un soporte que permite colocar la cámara frente al centro del puerto de salida de la esfera.



Fig. 5.3: Configuración utilizada para capturar imágenes con la cámara VNIR frente a la esfera integradora. (a) Vista lateral; (b) Vista lejana del sistema soporte, cámara y esfera.

Se implementaron dos procedimientos para capturar las imágenes que fueron analizadas para estudiar la linealidad de la cámara:

- **Linealidad con la radiancia:** se configura un tiempo de integración de 10ms elegido de forma arbitraria y se lo deja constante para capturar todas las imágenes. Se varía la radiancia de la esfera integradora encendiendo una a una sus lámparas, de manera de obtener 8 niveles de radiancias distintos. Se capturan 50 imágenes por cada radiancia y se las promedia.
- **Linealidad con el tiempo de integración:** se enciende una sola lámpara de la esfera integradora y se varía el tiempo de integración de la cámara, capturando todas las imágenes con el mismo nivel de radiancia. Los tiempos de integración utilizados varían desde $1ms$ a $20ms$ a pasos de $1ms$, y se capturan 50 imágenes con cada t_{int} y se las promedia.

5.2.2 Linealidad con la radiancia

La ecuación que se utiliza para determinar la linealidad con la radiancia es la siguiente [55]:

$$y[n] \equiv (\mu_y - \mu_{y,dark}) = a_1 L_\lambda[n] + a_0, \quad (5.13)$$

donde a_1 es el producto $K_t t_{int}$; a_0 es el offset residual que queda luego de restar $\mu_{y,dark}$ a la señal μ_y ; y el índice n representa a cada punto utilizado para el análisis. El análisis de linealidad se realiza en cada píxel individual del sensor, realizando un ajuste lineal en los datos obtenidos para determinar las constantes a_1 y a_0 de cada píxel. El ajuste es por mínimos cuadrados pesados donde la función peso que minimiza los residuos

relativos es la siguiente:

$$w[n] = 1/y[n]^2. \quad (5.14)$$

Para determinar entonces la desviación de la linealidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$\delta_{L_\lambda}[n] = \frac{y[n] - (a_1 L_\lambda[n] + a_0)}{a_1 L_\lambda[n] + a_0}, \quad (5.15)$$

la cual determina la desviación relativa de la linealidad con respecto a la radiancia para cada uno de los píxeles del sensor. En la Fig. 5.4 se muestra una gráfica del $\max(\delta_{L_\lambda})$ y el $\min(\delta_{L_\lambda})$ respecto a la longitud de onda para la columna central del sensor, donde se ve un aumento en la no linealidad en los extremos del rango espectral, mientras que en la zona central del espectro, la no linealidad se mantiene por debajo del 1%, aproximadamente en el rango entre $500nm$ y $900nm$.

En las Fig. 5.5 y Fig. 5.6 se observan la máxima y la mínima desviación de la linealidad, respectivamente, para todo el sensor, donde se ve que el comportamiento descrito en la Fig. 5.4 es el mismo en el resto de las columnas.

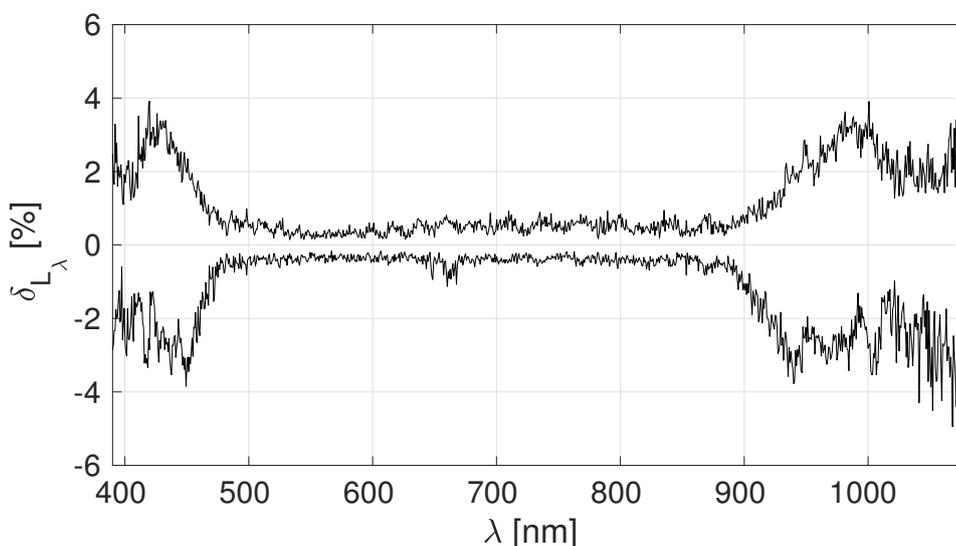


Fig. 5.4: Desviación de la linealidad δ_{L_λ} con la radiancia para la columna 800.

Al mirar detenidamente las Fig. 5.5 y Fig. 5.6, se puede notar un patrón que se asemeja a ondas con interferencia impresas sobre estas gráficas. Este efecto se verá con más detalle en la Sección 5.7.

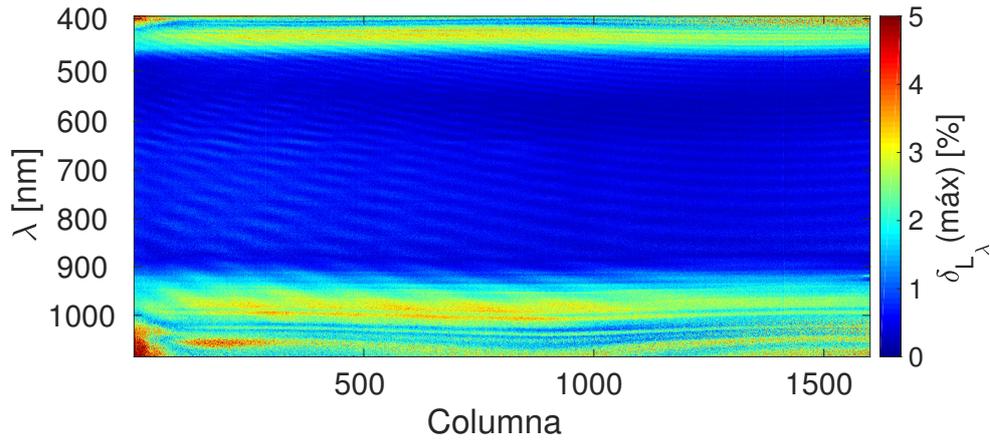


Fig. 5.5: Desviación de la linealidad $\delta_\lambda(max)$ con la radiancia.

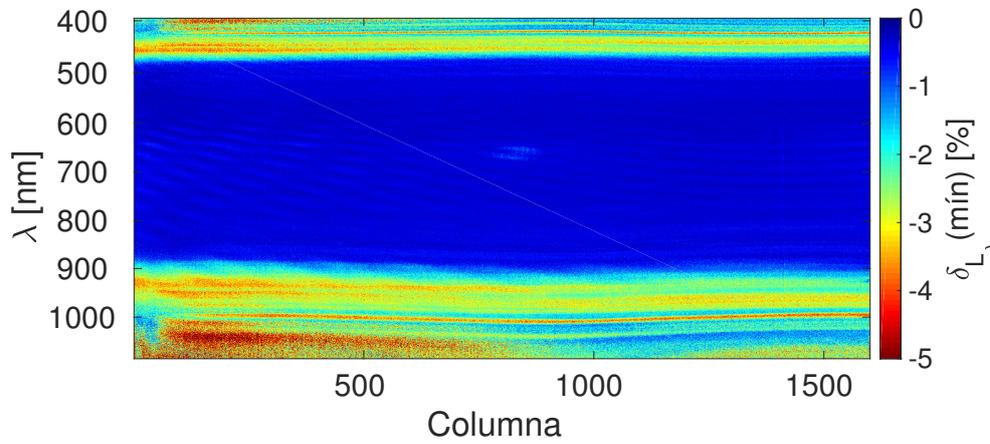


Fig. 5.6: Desviación de la linealidad $\delta_\lambda(min)$ con la radiancia.

5.2.3 Linealidad con el tiempo de integración

Análogamente a la sección anterior, se realiza el análisis de la linealidad con el tiempo de integración utilizando la siguiente ecuación [55]:

$$y[n] \equiv (\mu_y - \mu_{y,dark}) = a_1 t_{int}[n] + a_0, \quad (5.16)$$

de manera que la desviación de la linealidad en este caso se calcula con la expresión:

$$\delta_{t_{int}}[n] = \frac{y[n] - (a_1 t_{int}[n] + a_0)}{a_1 t_{int}[n] + a_0}, \quad (5.17)$$

donde los ajustes realizados en este caso también están pesados por $w[n] = 1/y[n]^2$.

En la Fig. 5.7 se observa la gráfica de la desviación de la linealidad en función de la longitud de onda, en donde se ve un aumento significativo de la no linealidad respecto al tiempo de integración en comparación con la calculada respecto a la radiancia.

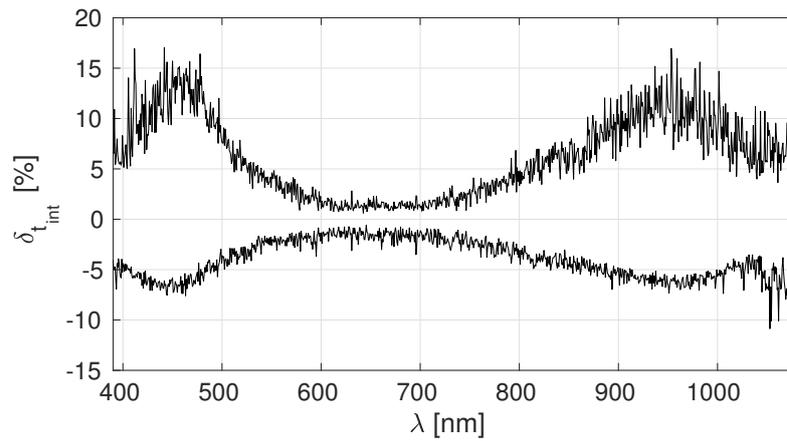


Fig. 5.7: Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}$ con el tiempo de integración para la columna 800.

Las Fig. 5.8 y Fig. 5.9 muestran la no linealidad con t_{int} en todo el sensor.

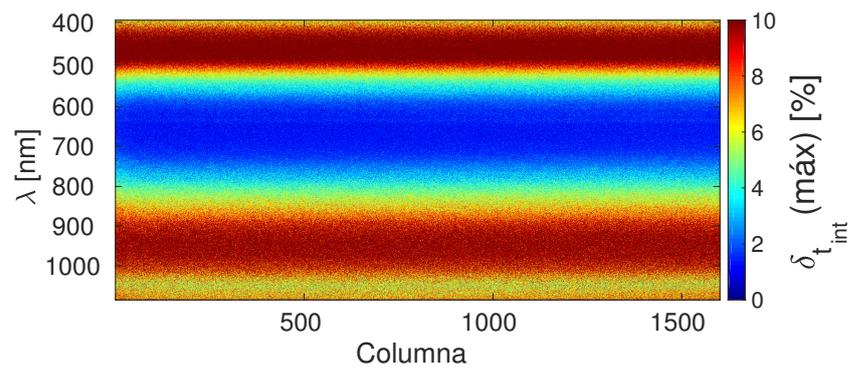


Fig. 5.8: Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}(max)$ con el tiempo de integración.

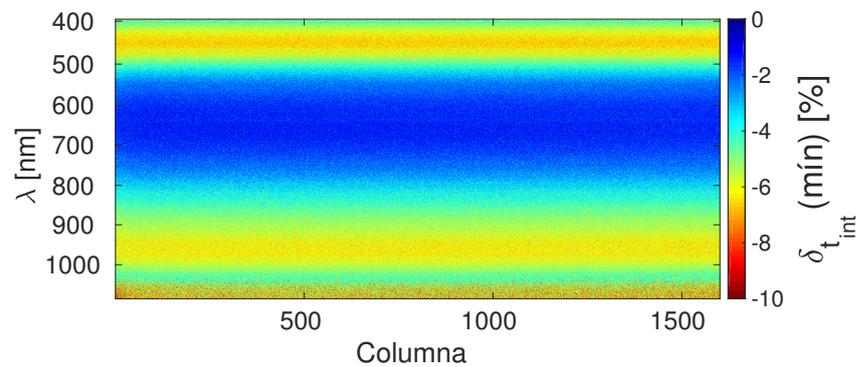


Fig. 5.9: Desviación de la linealidad $\delta_{t_{int}}(min)$ con el tiempo de integración.

5.2.4 Análisis de los resultados del estudio de linealidad

En la Fig. 5.10 se muestra una gráfica donde se ven dos curvas: la menor corresponde a los DN de la columna 800 en función de la longitud de onda de una imagen frente a la esfera integradora con una lámpara encendida, para un tiempo de integración de 10ms; por otro lado, la curva de mayor amplitud corresponde a los DN de la misma columna, pero en este caso la imagen fue capturada frente a la esfera con las 8 lámparas encendidas, y para el mismo tiempo de integración.

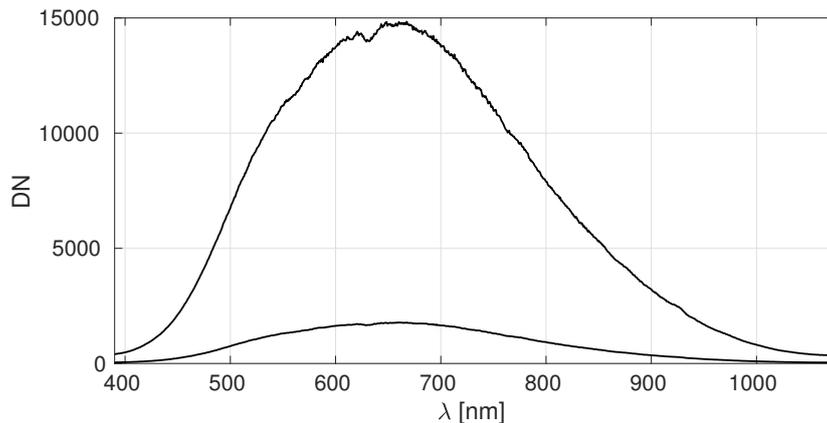


Fig. 5.10: Gráfico de los DN en función de la longitud de onda para la columna 800, para 1 y 8 lámparas encendidas, con un $t_{int} = 10ms$.

En dicha figura es evidente que para las longitudes de onda centrales, se puede alcanzar niveles de señal mayores que en los extremos del rango espectral. Esto se debe a dos razones: la primera es que la radiancia de la esfera es chica en longitudes de onda en el entorno de los $400nm$, y va en aumento hasta los $1000nm$, tal como se mostró en la Fig. 4.8 del Capítulo 4; por otro lado, la eficiencia cuántica del CCD graficada en la Fig. 3.10 del Capítulo 3, tiene su máximo en longitudes de onda en el extremo inferior del rango espectral y decrece significativamente en el extremo superior.

Los resultados obtenidos al realizar los ajustes lineales para determinar la linealidad tanto con el tiempo de integración como con la radiancia, en principio sugieren una gran alinealidad en los extremos del sensor (en el eje espectral). Sin embargo esto no es estrictamente así, ya que el aumento en δ_λ en los gráficos mostrados no se deben exactamente a la alinealidad de los detectores, sino más bien al pequeño nivel de señal que fue posible obtener para realizar los ajustes lineales. Esto implica que para radiancias bajas y/o tiempos de integración chicos, la señal no es lo suficientemente alta respecto a la dispersión del ruido del sensor, y esto introduce errores significativos en la determinación de la linealidad en estas zonas del CCD.

Como se verá en capítulos posteriores, esto presenta una limitación ya que en la

calibración radiométrica, por ejemplo, habrá errores significativos en los extremos del rango espectral, en las curvas de radiancias obtenidas luego de aplicar las matrices de calibración a las imágenes capturadas con la cámara (Ver Fig. 7.8 y Fig. 7.9 en Sección 7.3).

5.3 Factor de conversión, ruido de lectura y saturación

La estimación del factor K_{ADC} , el ruido de lectura y la saturación del sensor se realizan a partir de un mismo conjunto de gráficas y datos obtenidos con la cámara VNIR frente a la esfera integradora. En esta sección se explica los procedimientos realizados para determinar estos parámetros y los resultados obtenidos.

5.3.1 Configuración del instrumental para análisis de parámetros

La ecuación (5.9) se aplica para calcular el factor de conversión K_{ADC} realizando una gráfica de $\sigma_y^2[DN^2]$ en función de $(\mu_y - \mu_{y,dark})$. Este factor es un parámetro característico del CCD y es independiente de la longitud de onda de la luz incidente, por lo tanto es único y no depende del número de fila.

Para la determinación de estos parámetros, es necesario iluminar el sensor con una fuente de luz espacialmente uniforme, de manera de que incida la misma energía sobre cada uno de los detectores, de esta forma se asegura que cualquier variación de los datos obtenidos son debidos al sensor y no a la fuente de luz utilizada. Para esto, se coloca la cámara hiperespectral justo en el centro del puerto de salida de la esfera integradora luego de quitar la lente objetivo de la misma, tal como se muestra en la Fig. 5.3 de la sección Sección 5.2.

Es necesario barrer todo el rango dinámico desde el mínimo nivel de señal posible en DN hasta el máximo que produzca la saturación del sensor, ésto se puede lograr mediante dos métodos diferentes:

1. Tiempo de integración constante: se configura un tiempo de integración en la cámara y se varía la radiancia que incide sobre el sensor de manera de obtener distintos niveles de señal.
2. Radiancia constante: se deja la radiancia que incide sobre el sensor constante y se varía el tiempo de integración de la cámara desde el mínimo posible hasta el máximo que produzca la saturación del sensor.

En este caso se utilizó el método 2, es decir, se capturó un conjunto de imágenes por cada tiempo de integración configurado en la cámara con una radiancia de la esfera constante.

El mínimo valor de señal se logró mediante el encendido de una única lámpara de la esfera integradora y el mínimo tiempo de integración que permite la cámara, el cual es de $500ns$. Por otro lado, para lograr la saturación de la mayor cantidad de filas del sensor², se incrementó el tiempo de integración a pasos de $1ms$ hasta lograr dicha saturación en la zona central del sensor (eje espectral), la cual ocurrió a $t_{int} = 200ms$.

De esta forma, se realizó la captura de dos imágenes por cada tiempo de integración, comenzando con $t_{int} = 500ns$ y luego desde $1ms$ hasta $200ms$ en pasos de $1ms$, de manera de contar con 201 puntos de datos.

²**NOTA:** no se aumenta el tiempo de integración hasta lograr la saturación de todo el sensor debido a la muy baja eficiencia cuántica que tiene en los extremos del rango espectral, lo que provoca que se deban utilizar tiempos de integración excesivamente largos, haciendo demasiado extensas las campañas en el laboratorio.

5.3.2 Análisis y resultados de la presente sección

La media μ_y se calcula realizando un promedio de M píxeles de la zona activa del sensor utilizando la siguiente ecuación [55]:

$$\mu_y[DN] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Y[m], \quad (5.18)$$

donde Y es la imagen capturada. Para calcular $\mu_{y,dark}$ se utiliza la misma ecuación que (5.18) excepto que para este caso se promedian sólo los píxeles oscuros del sensor.

Para calcular la varianza de la señal, se debe tener en cuenta que al promediar M píxeles del sensor, la varianza total calculada estará compuesta por tres fuentes de ruido: los primeros dos son el ruido de lectura y el ruido shot antes mencionados, mientras que la tercera fuente de ruido es la que se llama Ruido de Patrón Fijo (FPN, Fixed Pattern Noise), el cual es un parámetro que varía linealmente con la señal y es debido a la variación en la sensibilidad de cada píxel individual respecto a sus vecinos. Esta sensibilidad característica de cada píxel no varía de imagen a imagen ya que es inherente a cada detector, por lo tanto realizando la resta de dos imágenes se elimina esta fuente de ruido, dejando únicamente los ruidos σ_{shot} y σ_{read} .

Dicho lo anterior, se asume que el ruido es estacionario y homogéneo, de manera que es suficiente calcular la media del cuadrado de la diferencia de dos imágenes Y^A e Y^B capturadas con el mismo tiempo de integración [38, 56]:

$$\sigma_y^2[DN^2] = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M (Y^A[m] - Y^B[m])^2, \quad (5.19)$$

donde el 2 en el denominador se debe a que la varianza de la resta es la suma de las varianzas, por lo tanto se divide por dos para obtener la varianza σ_y^2 de una imagen.

Una pregunta importante que responder ahora es la siguiente: ¿Qué grupo de M píxeles del sensor se deben promediar para realizar los cálculos? Esta pregunta surge debido a que, como se dijo al comienzo del presente capítulo, el espectrógrafo y la cámara son considerados como una sola cosa, por lo tanto cada fila del sensor producirá un valor medio de DN distinto debido a la eficiencia de difracción del espectrógrafo, la eficiencia cuántica del CCD y a la fuente de luz de la entrada. Esto produce que las filas centrales del sensor saturen mucho antes que las filas de los extremos, impidiendo que se puedan promediar todos los píxeles activos del sensor ya que los distintos valores máximos de DN de cada fila degradarán el promedio calculado.

La respuesta más rápida e intuitiva a la pregunta anterior es la de realizar un promedio por filas para calcular μ_y y σ_y^2 , y de esta forma utilizar $M = 1600$ píxeles para los cálculos. El problema de esto es, como se verá más adelante, que el error de estimación de la constante K_{ADC} varía inversamente con la cantidad de píxeles promediados, y utilizar una sola fila de detectores arroja un error de K_{ADC} de alrededor del 3.5 %. Luego de un análisis de los datos obtenidos que se detalla en el Anexo A, se decide utilizar sólo 20 filas del sensor alrededor de la zona central (filas 536 a 555) que alcanzaron su saturación prácticamente en el mismo tiempo de integración, con lo cual se promedian $M = 32000$ píxeles. Utilizando esta cantidad de píxeles se obtiene un error en la determinación de K_{ADC} menor al 1 %.

La Fig. 5.11 muestra la curva obtenida a partir de las imágenes capturadas utilizando las ecuaciones (5.18) y (5.19). Algo interesante a notar es la región donde σ_y^2 alcanza su máximo para luego caer abruptamente, esta región es la llamada zona de saturación. En esta zona los píxeles comienzan a alcanzar su máxima capacidad de almacenamiento de cargas, momento en el cual los electrones comienzan a difundirse hacia sus píxeles vecinos provocando una disminución abrupta en el ruido. El valor de saturación, al cual se lo va a llamar μ_{sat} , se obtiene entonces como el valor de $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ donde σ_y^2 alcanza su máximo valor.

Para calcular K_{ADC} se realiza un ajuste lineal en la curva de la Fig. 5.11 entre el 4 y el 70 % del rango dinámico del sensor (en la Sección 5.8 se describe el porqué se utilizó este rango para realizar el ajuste). Realizando la inversa de la pendiente del ajuste se obtiene el factor K_{ADC} , mientras que la ordenada al origen es el llamado Read Noise.

Debido a que la cámara puede ser configurada para funcionar con dos frecuencias de reloj de píxel distintas y con uno o dos conversores ADC, se debe analizar las cuatro combinaciones. En la Fig. 5.12 se muestran los resultados obtenidos para el caso de utilizar un ADC y un reloj de 10MHz. En dicha figura se muestran los resultados

obtenidos para el ruido de lectura σ_{read} , K_{ADC} y μ_{sat} .

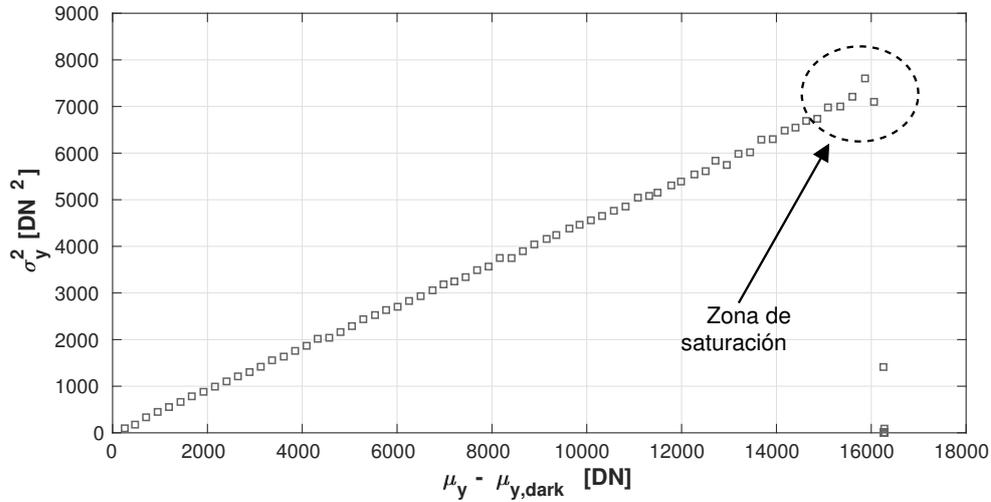


Fig. 5.11: Gráfica de σ_y^2 en función de $(\mu_y - \mu_{y,dark})$.

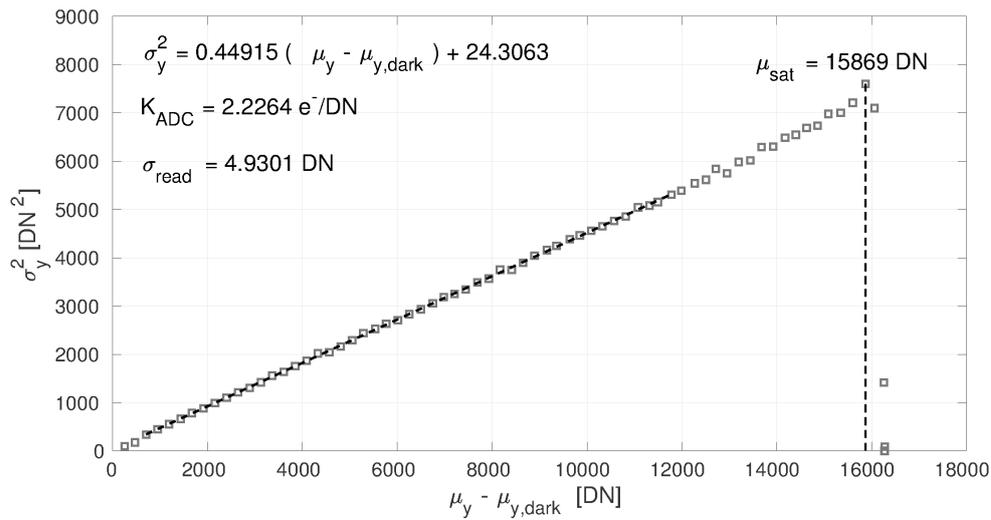


Fig. 5.12: Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 10MHz y 1 ADC.

Una vez obtenida la constante de conversión se desea ahora estimar su error en todo el rango. Se hace notar que ese error que podría obtenerse mediante la regresión lineal, mostrada en la figura anterior, corresponde a un rango menor.

A partir de la ecuación (5.9) se puede hacer una estimación del error en K_{ADC} . Definiendo $S = (\mu_y - \mu_{y,dark})$, $N = \sigma_y$ y $R = \sigma_{read}$, y despejando K_{ADC} queda lo siguiente [38, 56]:

$$K_{ADC} = \frac{S}{N^2 - R^2}. \quad (5.20)$$

Aplicando propagación de errores a la ecuación anterior y considerando la independencia de los términos, se puede obtener una cota del error de estimación del factor de conversión, quedando la siguiente ecuación [56]:

$$\sigma_{K_{ADC}}^2 = \left[\frac{\partial K_{ADC}}{\partial N} \right]^2 \sigma_N^2 + \left[\frac{\partial K_{ADC}}{\partial R} \right]^2 \sigma_R^2 + \left[\frac{\partial K_{ADC}}{\partial S} \right]^2 \sigma_S^2, \quad (5.21)$$

donde

$$\sigma_S^2 = \frac{S}{K_{ADC} M}, \quad (5.22)$$

$$\sigma_N^2 = \frac{N^2}{2M}, \quad (5.23)$$

y

$$\sigma_R^2 = \frac{R^2}{2M}. \quad (5.24)$$

Reemplazando las ecuaciones (5.22), (5.23) y (5.24) en la ecuación (5.21) y haciendo las derivadas parciales se llega a la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_{K_{ADC}}^2 = \frac{1}{M} \left(\frac{2 \left(\frac{S}{K_{ADC}} + R^2 \right)^2 K_{ADC}^4}{S^2} + \frac{2 R^4 K_{ADC}^4}{S^2} + \frac{K_{ADC}}{S} \right), \quad (5.25)$$

en donde se ve que el error es inversamente proporcional a la cantidad de píxeles utilizados para calcular los promedios, tal como se dijo anteriormente. El error porcentual en K_{ADC} se calcula entonces con la siguiente expresión:

$$\sigma_{K_{ADC}} [\%] = \frac{\sigma_{K_{ADC}}}{K_{ADC}} \times 100. \quad (5.26)$$

La Fig. 5.13 muestra cómo varía este error en función de la señal para el caso de la Fig. 5.12. Se ve que el mayor error se obtiene para valores bajos de señal, donde el Read Noise es predominante. Debe tenerse en cuenta que la cota de error estimada se toma desde el valor de señal mínima en el cual se realizó el ajuste para calcular K_{ADC} .

En la Fig. 5.14 se muestran las mismas curvas que en la Fig. 5.12 pero para un reloj de 40MHz y un ADC. En este caso se ve que el ruido de lectura tiene un aumento debido al incremento en la velocidad de lectura de los píxeles del sensor, provocando que los puntos de la curva se encuentren más dispersos.

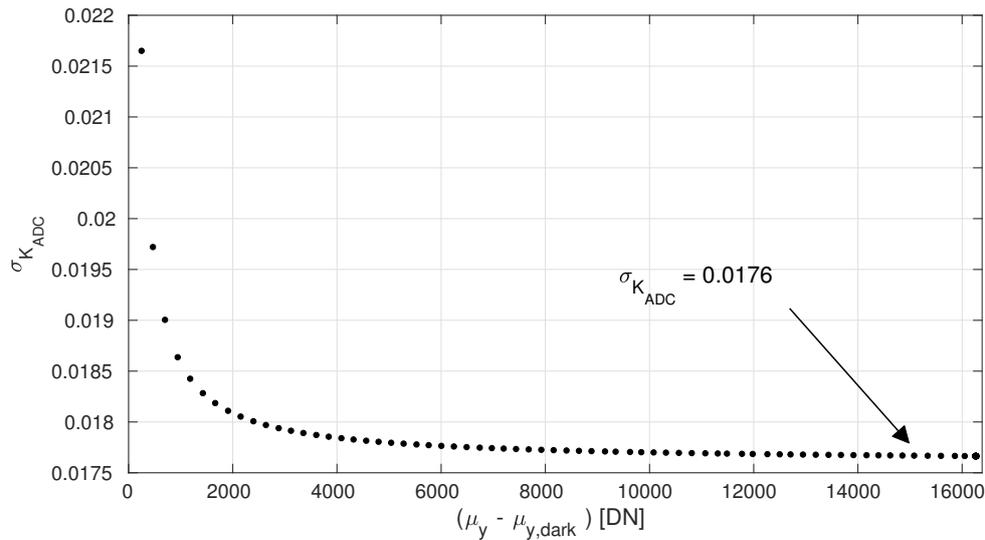


Fig. 5.13: Error en la estimación de K_{ADC} en función de la señal.

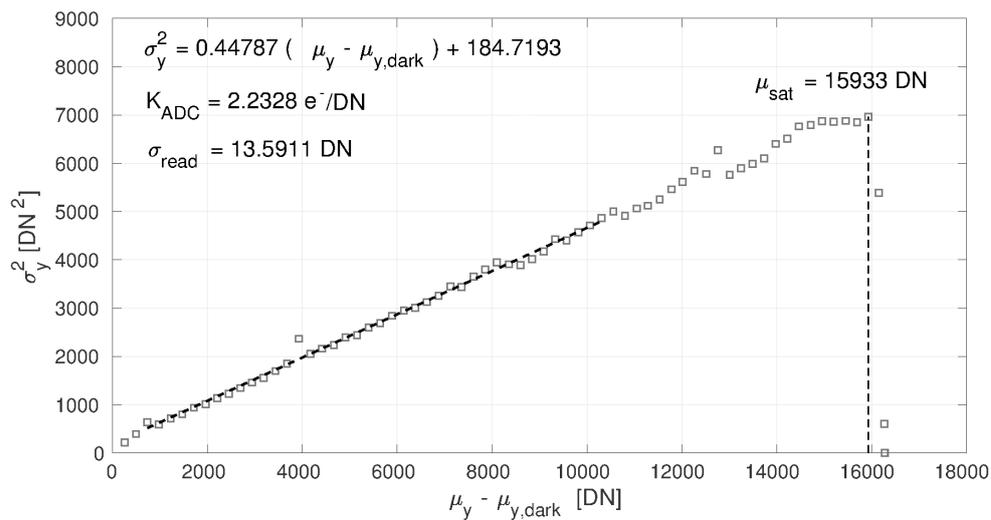
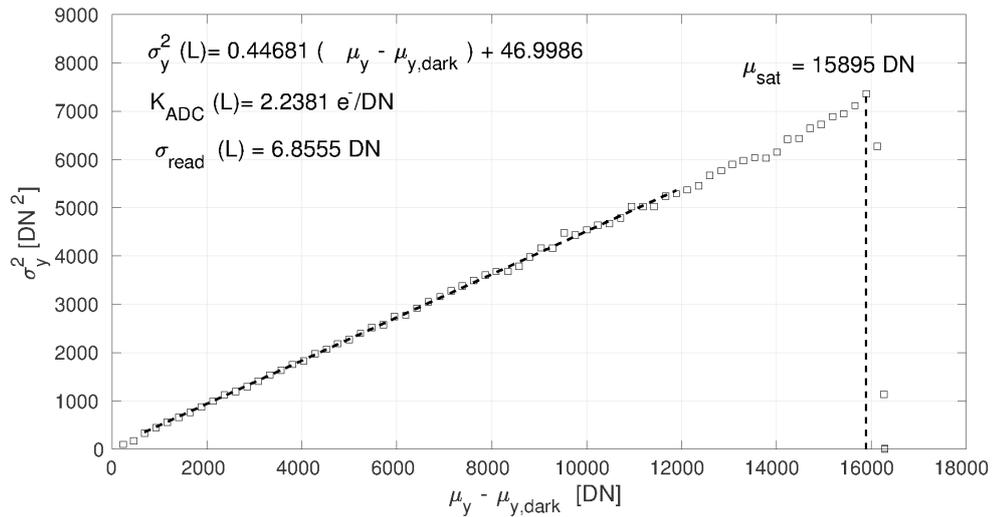
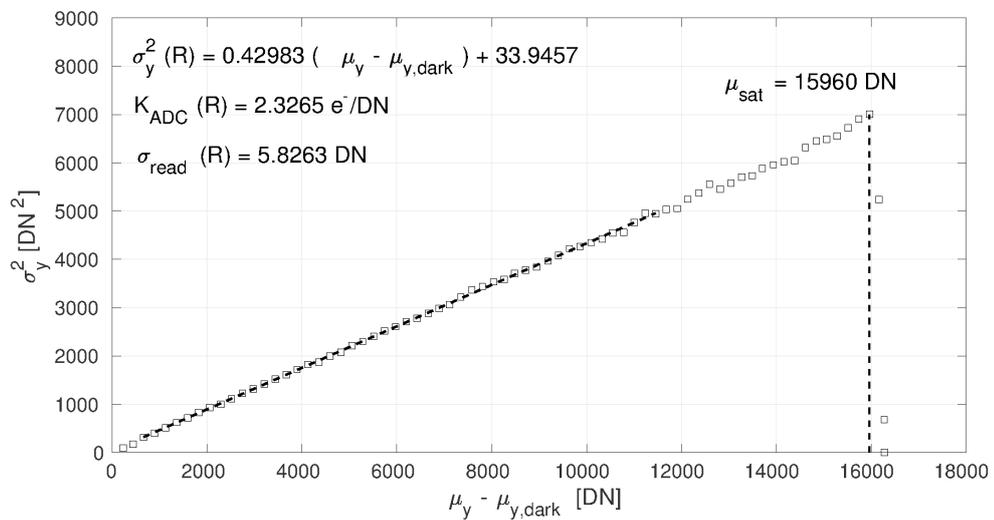


Fig. 5.14: Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 40MHz y 1 ADC.

En el caso de utilizar dos ADC, se realizan los cálculos separando el sensor en dos partes iguales, ya que los píxeles de las 800 columnas izquierdas se digitalizan con un convertor, mientras que las 800 columnas derechas se digitalizan con otro ADC. En las Fig. 5.15 y Fig. 5.16 se muestran las curvas obtenidas, en las cuales se hace la diferencia entre la parte izquierda del sensor (L) y la parte derecha (R). En dichas figuras se ve que el ruido de lectura de las dos mitades de la imagen es distinto debido a las diferencias constructivas entre los dos convertores, y esto afecta al valor de la ganancia de conversión K_{ADC} .



(a)



(b)

Fig. 5.15: Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 10MHz y 2 ADC. (a) Mitad izquierda; (b) Mitad derecha.

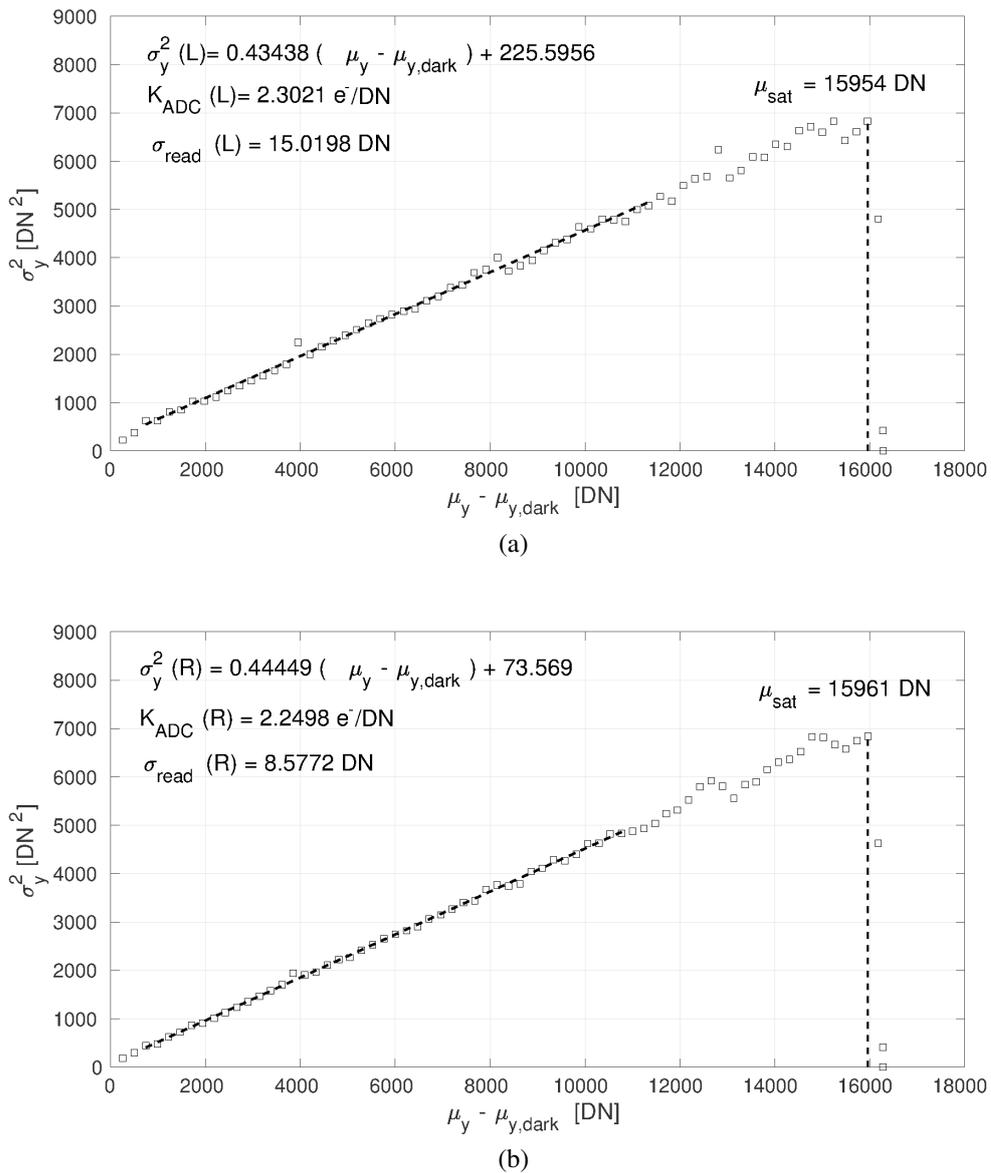


Fig. 5.16: Estimación de la ganancia K_{ADC} , Read Noise y μ_{sat} para un pixel clock de 40MHz y 2 ADC. (a) Mitad izquierda; (b) Mitad derecha.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos en la presente sección para los cuatro modos de funcionamiento de la cámara hiperespectral. Como se ve en dicha tabla, se han obtenido diferentes valores de K_{ADC} , σ_{read} y μ_{sat} para cada modo de operación de la cámara. El objetivo ahora es definir qué valores utilizar en cada caso.

El valor de la constante K_{ADC} debe ser único para cada salida del sensor CCD, por lo tanto deben haber dos valores de K_{ADC} . Estos valores se determinan calculando el promedio de los datos obtenidos para cada salida y, mediante propagación de errores, se calcula el error del promedio obtenido [59]. Esto da como resultado dos valores de la

constante de conversión con sus respectivos errores para cada salida del sensor:

$$\begin{cases} K_{ADC} = 2.25 \pm 0.018e^- / DN & \text{para la salida L} \\ K_{ADC} = 2.29 \pm 0.018e^- / DN & \text{para la salida R} \end{cases}$$

Tabla 5.1: Resumen de los parámetros calculados.

		Cantidad de ADCs	
		1 ADC	2 ADC
Frecuencia de reloj	10MHz	$\sigma_{read} = 4.93 DN$	$\sigma_{read}(L) = 6.85 DN$ $\sigma_{read}(R) = 5.83 DN$
		$K_{ADC} = 2.22 \frac{e^-}{px s}$	$K_{ADC}(L) = 2.24 \frac{e^-}{px s}$ $K_{ADC}(R) = 2.33 \frac{e^-}{px s}$
		$\mu_{sat} = 15869 DN$	$\mu_{sat}(L) = 15895 DN$ $\mu_{sat}(R) = 15960 DN$
	40MHz	$\sigma_{read} = 13.59 DN$	$\sigma_{read}(L) = 15.02 DN$ $\sigma_{read}(R) = 8.58 DN$
		$K_{ADC} = 2.23 \frac{e^-}{px s}$	$K_{ADC}(L) = 2.30 \frac{e^-}{px s}$ $K_{ADC}(R) = 2.25 \frac{e^-}{px s}$
		$\mu_{sat} = 15933 DN$	$\mu_{sat}(L) = 15954 DN$ $\mu_{sat}(R) = 15961 DN$

El valor de saturación es una característica intrínseca del sensor y el diseño de la electrónica asociada, por lo cual no depende del modo de funcionamiento, por lo tanto este valor debe ser único. El valor que se adopta es el mayor que se muestra en la Tabla 5.1 para no subestimar el rango dinámico (y corresponde al mejor caso que se pudo estimar), por lo tanto se obtiene:

$$\mu_{sat} = 15961 DN = 35912 e^-$$

Por otro lado, el ruido de lectura sí depende del modo de operación. Debido a que la salida izquierda es utilizada tanto para el modo de operación con uno o dos ADC, para ser conservativos se adopta el peor caso, el cual se da para el modo de operación con dos ADC, de esta manera se obtienen los siguientes valores:

$$\begin{cases} \sigma_{read}(L) = 6.85 DN = 15.4 e^- & \text{para 10MHz} \\ \sigma_{read}(L) = 15.02 DN = 33.8 e^- & \text{para 40MHz} \\ \sigma_{read}(R) = 5.83 DN = 13.3 e^- & \text{para 10MHz} \\ \sigma_{read}(R) = 8.58 DN = 19.6 e^- & \text{para 40MHz} \end{cases}$$

5.4 Señal oscura

Todos los píxeles generan de forma natural electrones no deseados que quedan atrapados en los pozos de potencial del material semiconductor y que contribuyen al piso de ruido total, aún en ausencia de luz. Esto produce que los píxeles generen una señal distinta de cero a pesar que no hay luz incidiendo sobre ellos.

Vale la pena hacer la distinción entre dos parámetros utilizados en este trabajo: el denominado como Corriente oscura térmica (TDC, Thermal Dark Current) y Señal Oscura (DS, Dark Signal). La TDC se refiere a los electrones que quedan atrapados en los pozos de potencial, que fueron generados por efecto de agitación térmica de los átomos del material semiconductor. Este parámetro varía exponencialmente con la temperatura, de manera que a mayor temperatura, mayor es la cantidad de cargas atrapadas que suman al piso de ruido del sensor CCD [60, 61].

La DS en cambio, definida como μ_d anteriormente, es un parámetro que considera todas las cargas no deseadas que quedan atrapadas en los pozos de potencial del material semiconductor en ausencia de luz, incluida la TDC antes mencionada. Este parámetro es proporcional al tiempo de integración ya que cuanto mayor sea este tiempo, mayor es la cantidad de electrones atrapados en los pozos de potencial. Además, debido a que la DS contiene a la TDC, también presenta una variación exponencial con la temperatura [62].

Dicho lo anterior, el término μ_d varía según la siguiente ecuación [55, 56]:

$$\mu_d = \mu_{d0} + \mu_{TDC} t_{int}, \quad (5.27)$$

donde el término μ_{TDC} es la TDC antes mencionada la cual tiene unidades de electrones por píxel por segundo ($e^-/pixel/s$); y μ_{d0} es un factor constante que tiene en cuenta el resto de los ruidos que incrementan el piso de ruido aún en ausencia de luz. La TDC se encuentra descrita por la siguiente ecuación:

$$\mu_{TDC} = 2.5 \times 10^{15} A D_{FM} T^{1.5} e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (5.28)$$

donde A es el área del píxel en cm^2 ; D_{FM} es el factor de mérito de la corriente oscura definida a la temperatura de $300K$ (nA/cm^2); T es la temperatura del semiconductor; k es la constante de Boltzmann ($8.62 \times 10^{-5} eV/K$); y E_g es el salto de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción del material semiconductor, la cual se puede determinar mediante la siguiente fórmula empírica [63]:

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} T^2}{1108 + T}, \quad (5.29)$$

en unidades de eV . Con las ecuaciones anteriores y los datos de la hoja de datos del

sensor se puede calcular cual es la TDC y cuánto afecta ésta a la señal oscura μ_d .

Se puede expresar la ecuación (5.27) en términos de las varianzas mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_d^2 = \sigma_{d0}^2 + \sigma_{ter}^2 = \sigma_{d0}^2 + \mu_{TDC} t_{int}, \quad (5.30)$$

debido a que los electrones generados térmicamente pueden ser descriptos por una distribución de Poisson, por lo tanto $\sigma_{ter}^2 = \mu_{ter} = \mu_{TDC} t_{int}$ [55].

5.4.1 Configuración del instrumental para análisis de señal oscura

La Fig. 5.17 muestra la cámara VNIR con la tapa que bloquea la luz. Esta configuración se utilizó para capturar las imágenes oscuras o Dark Frames. Además, se apagaron las luces del laboratorio durante la adquisición de imágenes de manera que quede completamente a oscuras.



Fig. 5.17: Cámara VNIR tapada para las capturas de los Dark Frames.

5.4.2 Corriente oscura en función del tiempo de integración

Se configuraron 9 tiempos de integración y se capturaron 100 imágenes por cada uno, las cuales luego se promediaron antes de realizar el análisis de datos. Los tiempos son $500ns$, $1\mu s$, $10\mu s$, $100\mu s$, $1ms$, $10ms$, $100ms$, $1s$ y $10s$. La temperatura del CCD se ajustó a la predeterminada de $-15^\circ C$ para capturar todas las imágenes. Con esta temperatura se puede calcular la TDC generada por el sensor utilizando los datos de su

hoja de datos [37] de la siguiente manera:

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} (-15 + 273)^2}{1108 + (-115 + 273)} = 1.1215 \text{ eV}, \quad (5.31)$$

y reemplazando en ecuación (5.28) se obtiene:

$$\mu_{TDC} = 0.64 \frac{e^-}{px \ s}. \quad (5.32)$$

La TDC calculada se puede convertir en unidades de DN utilizando el factor de conversión K_{ADC} (ver Tabla 5.1):

$$\mu_{TDC} = \frac{1}{2.2} \times 0.64 = 0.29 \frac{DN}{px \ s}, \quad (5.33)$$

de forma que la corriente oscura, para una temperatura de -15°C , incrementa el piso de ruido promedio en un detector en 0.29DN por cada segundo de tiempo de integración.

En la Fig. 5.18 se puede ver la gráfica de la señal oscura en función del tiempo de integración obtenida a partir de las imágenes capturadas. En dicha gráfica se realiza la comparación entre dos curvas, la primera obtenida promediando todos los píxeles de la zona activa del sensor, y la segunda promediando sólo los píxeles oscuros.

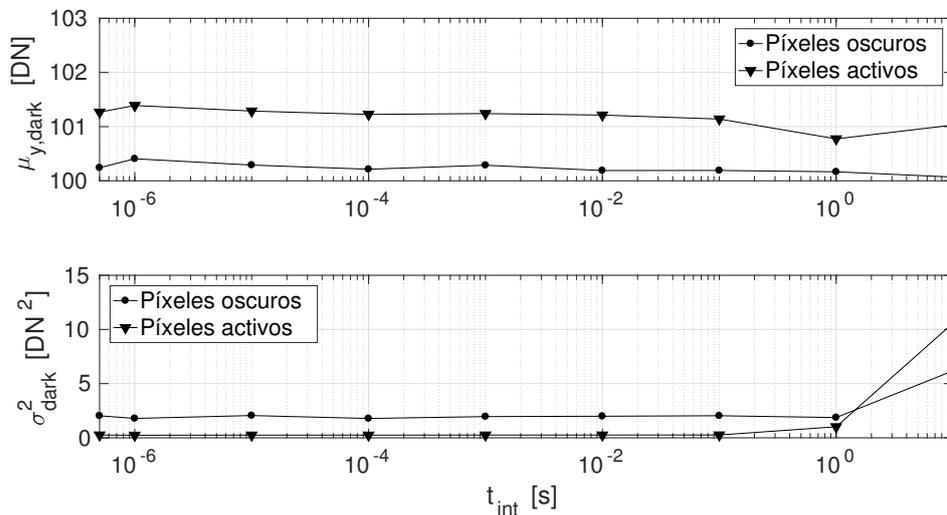


Fig. 5.18: Media y varianza de la señal oscura en función del tiempo de integración para 1 ADC.

Se observa que la curva correspondiente a los píxeles oscuros se mantiene constante alrededor de los 100DN, y no presenta un incremento lineal en función del tiempo de integración en el rango de tiempos graficado, debido a la muy baja TDC del sensor a la temperatura de -15°C en la cual se encontraba durante la adquisición de imágenes. El μ_{TDC} calculado anteriormente indica que los DN medios obtenidos para un tiempo de

integración de 10 segundos incrementan apenas en 3DN el piso del ruido del sensor. Sin embargo, para el orden de tiempos de integración en los cuales usualmente una cámara aerotransportada deberá funcionar en el ambiente operativo, la TDC es despreciable respecto al ruido de lectura, siendo éste último la fuente de ruido principal en el CCD, para esta temperatura de trabajo y rangos de tiempos de integración.

En la Fig. 5.18 se puede ver también el comportamiento exponencial de la varianza de la DS que comienza a ser importante para tiempos de integración mayores a un segundo, mientras que para tiempos menores a éste, la DS es prácticamente constante.

Este nivel constante que tiene la curva de píxeles oscuros de la Fig. 5.18 evidencia que el offset de 100DN incorporado por el fabricante se mantiene estable en el rango de tiempos de integración medido, por lo cual es equivalente adoptar el promedio de los píxeles oscuros a adoptar el promedio del sensor activo cubierto para no incida luz sobre él.

En la Fig. 5.19 se muestra la gráfica similar que la Fig. 5.18 pero para el caso de utilizar dos sensores ADC, donde se realizaron los promedios de la parte izquierda de los píxeles activos y oscuros por separado a los de la parte derecha del sensor. En dicha figura se puede ver que no existe diferencia significativa en las medias de $\mu_{y, \text{dark}}$ para las dos mitades del sensor. Al igual que en el caso de un sólo ADC, el comportamiento de la varianza de la DS se mantiene constante para tiempos de integración menores al segundo, mientras que para tiempos mayores a éste, la DS comienza a comportarse exponencialmente.

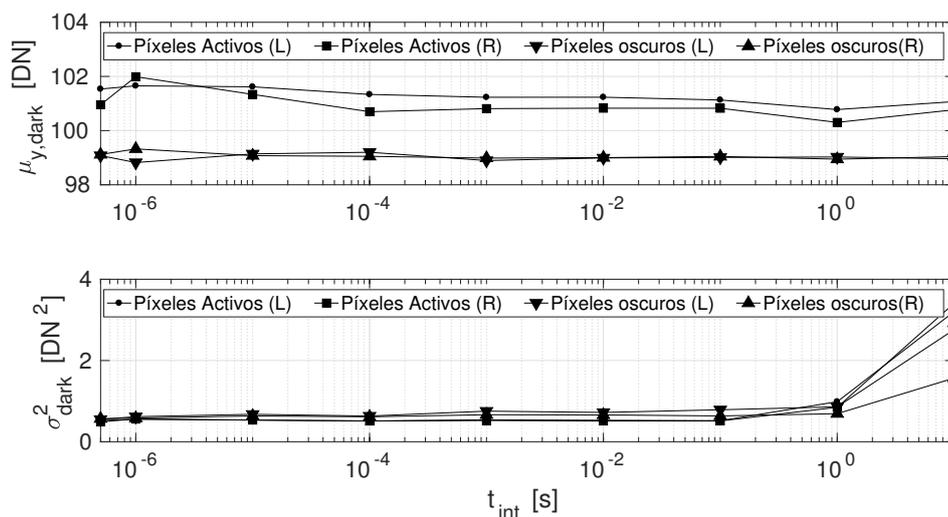


Fig. 5.19: Media y varianza de la señal oscura en función del tiempo de integración para 2 ADC.

5.4.3 Corriente oscura en función de la temperatura

Para determinar la variación de la TDC en función de la temperatura, se configuró la cámara para capturar imágenes con un tiempo de integración arbitrario fijo de un segundo y se varió la temperatura del CCD desde -20°C hasta 10°C , en pasos de 1°C , y se capturaron 100 imágenes para cada temperatura para realizar los promedios. En la Fig. 5.20 se muestran las curvas obtenidas.

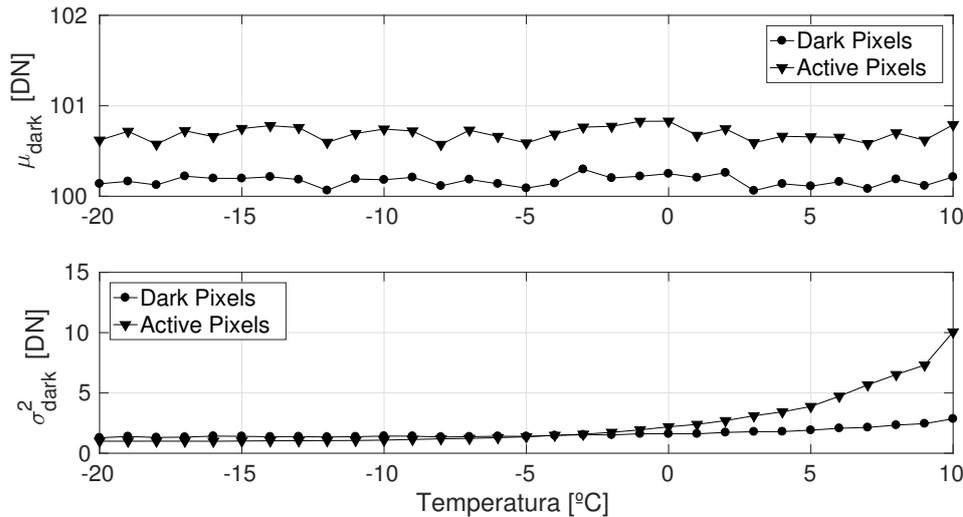


Fig. 5.20: Media y desviación estándar de la señal oscura en función de la temperatura para 1 ADC.

Se puede ver que $\mu_{y,\text{dark}}$ prácticamente no varía en el rango de temperaturas medidas, mientras que la varianza σ_{dark}^2 sí lo hace de forma exponencial, ya que la dispersión aumenta a mayores temperaturas. También se puede notar que la curva correspondiente a los píxeles activos se incrementa más rápido que la curva de los píxeles oscuros.

Una conclusión que se puede extraer de los resultados anteriores es que en los rangos de temperaturas y tiempos de integración medidos, el piso de ruido se mantiene prácticamente constante y no presenta variaciones significativas con la temperatura o el tiempo de integración. Esto implica que el ruido que tiene más relevancia en esta cámara es el ruido de lectura σ_{d0} , siendo el ruido térmico despreciable frente a este.

5.5 Relación Señal-Ruido y sensibilidad

La Relación Señal-Ruido (SNR, Signal to Noise Ratio) se define como la relación entre la señal media (sin offset) y el ruido generado mediante la siguiente ecuación [55]:

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{\sigma_y}. \quad (5.34)$$

La Fig. 5.21 muestra la SNR obtenida, donde se ve que la curva sigue una tendencia que varía con la raíz cuadrada de la señal, alcanzando un máximo de 183 antes que los detectores entren en la región de saturación.

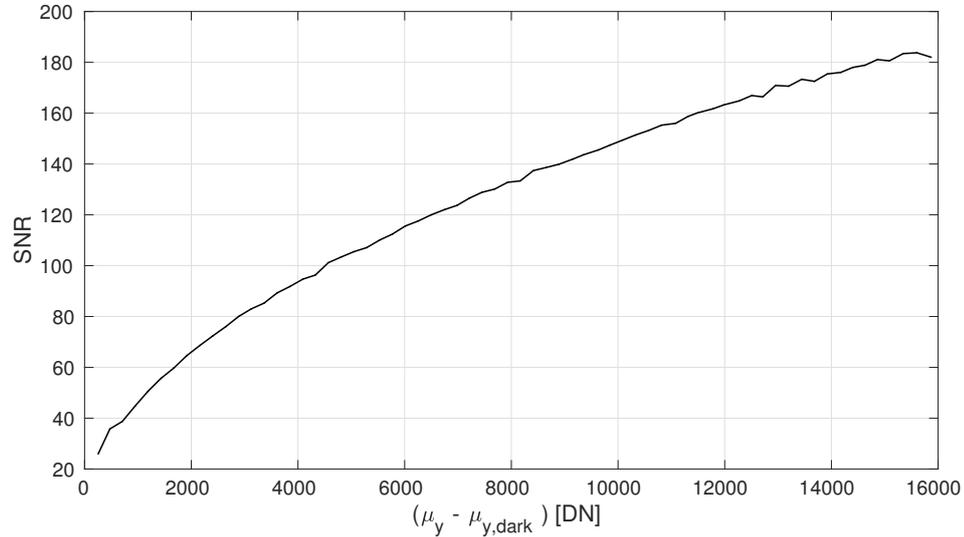


Fig. 5.21: Relación señal-ruido del sensor.

Utilizando (5.4) y (5.9) y reemplazándolas en la ecuación (5.34) se obtiene una expresión para la SNR en función de los fotones que inciden sobre el sensor:

$$SNR = \frac{\eta_q \mu_f}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2 K_{ADC}^2 + \eta_q \mu_f}}, \quad (5.35)$$

donde la cantidad μ_f en esta ecuación corresponde al valor medio de fotones luego de ser afectados por la eficiencia de difracción del espectrógrafo y por la transmitancia de la lente. Para determinar la sensibilidad de la cámara se realiza el despeje de μ_f de la ecuación anterior, y usando la ecuación (5.10), se obtiene la siguiente expresión:

$$\mu_f = \frac{SNR^2}{2\eta_q} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\sigma_{read}^2 K_{ADC}^2}{SNR^2}} \right]. \quad (5.36)$$

La sensibilidad se define como la cantidad mínima de fotones incidentes necesaria para obtener en el detector una señal discernible del nivel de ruido. Este límite se da cuando la SNR es igual a uno. Como se dijo antes, la ecuación (5.36) corresponde a los fotones luego de haber atravesado la lente objetivo y el espectrógrafo, por lo tanto, para calcular la cantidad media mínima de fotones que deben incidir sobre la lente de la cámara para producir un DN mínimo discernible del ruido en el detector, se divide la (5.36) por la transmitancia de la lente y la eficiencia de difracción del espectrógrafo,

quedando la siguiente ecuación:

$$\mu_{min}[n^{\circ} \text{ fotones}] = \frac{SNR^2}{2\eta_q \eta_e \tau_l} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\sigma_{read}^2 K_{ADC}^2}{SNR^2}} \right] \Big|_{SNR=1}, \quad (5.37)$$

donde η_e y τ_l son la eficiencia de difracción y la transmitancia de la lente objetivo, respectivamente.

La Fig. 5.22 muestra la curva de sensibilidad obtenida para el modo de funcionamiento con 1 ADC y para las dos frecuencias del reloj (10MHz y 40MHz), donde se grafica la cantidad mínima de fotones incidentes sobre la lente en función de la longitud de onda.

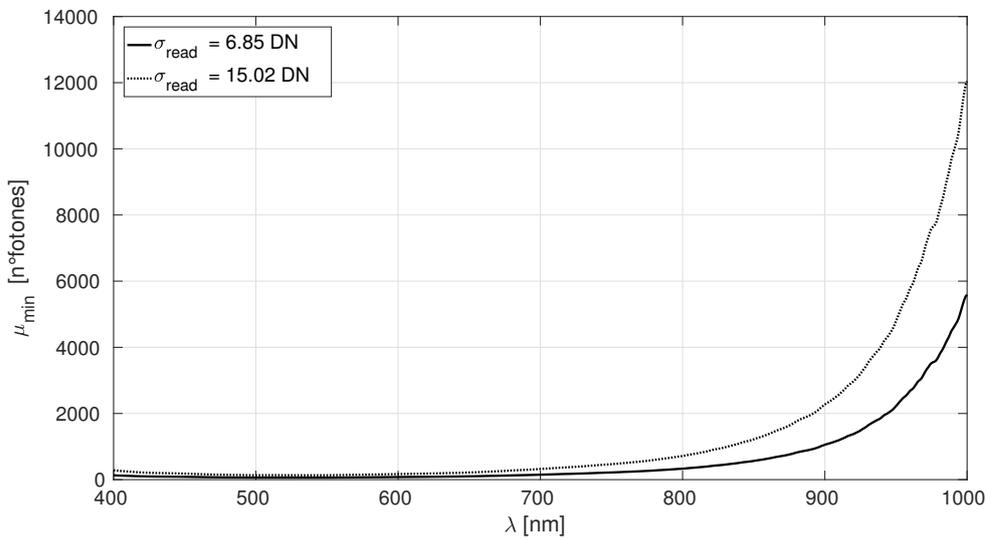


Fig. 5.22: Sensibilidad de la cámara hiperspectral considerando la transmitancia de la lente de 0.85.

En la Fig. 5.22 se observa que debido a la baja eficiencia cuántica del sensor para longitudes cercanas a los 1000nm, la cantidad mínima de fotones que deben incidir para producir un nivel de señal lo suficientemente grande como para discernirla del nivel de ruido, es mayor que para las longitudes de onda inferiores.

5.6 Rango dinámico

El rango dinámico de una cámara se calcula como la relación entre el valor de saturación μ_{sat} y el valor de sensibilidad μ_{min} dado por la siguiente fórmula [55]:

$$RD = \frac{\mu_{sat}}{\mu_{min}}, \quad (5.38)$$

donde se lo puede calcular tanto en unidades de DN como en electrones. El rango dinámico normalmente es expresado en unidades de decibeles por medio de la siguiente ecuación:

$$RD_{dB} = 20 \log \left(\frac{\mu_{sat}}{\mu_{min}} \right). \quad (5.39)$$

En la Sección 5.3 se determinó el valor de saturación μ_{sat} del sensor. Por otro lado, la ecuación (5.36) de la Sección 5.5 permite calcular el mínimo valor de fotones necesarios para discernir la señal incidente del ruido del sensor, por lo tanto, se puede expresar este valor en DN mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_{min}[DN] = \frac{1}{2 K_{ADC}} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \sigma_{read}^2 K_{ADC}^2} \right], \quad (5.40)$$

donde se evaluó $SNR = 1$. El valor μ_{min} también depende del modo de operación de la cámara, por lo tanto, se lo calcula considerando el modo de funcionamiento con dos ADC para las dos frecuencias de reloj, adoptando el ruido máximo (para no sobreestimar el rango dinámico) que corresponde a la salida izquierda (L), por lo tanto se obtiene para $10MHz$:

$$\mu_{min}[10MHz] = \frac{1}{2 \times 2.25} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \times (6.85)^2 \times (2.25)^2} \right] = 7.08 DN,$$

mientras que para $40MHz$ se obtiene:

$$\mu_{min}[40MHz] = \frac{1}{2 \times 2.25} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \times (15.02)^2 \times (2.25)^2} \right] = 15.24 DN.$$

Por lo tanto, se obtienen dos rangos dinámicos determinados por la frecuencia de reloj:

$$RD[10MHz] = \frac{15961}{7.08} = 2254.38 \equiv 67.1 dB,$$

$$RD[40MHz] = \frac{15961}{15.24} = 1047.31 \equiv 60.4 dB.$$

5.7 Píxeles anómalos

Se define la respuesta normal de los píxeles del CCD con la siguiente ecuación:

$$\mu_y = S_{signal} t_{int} + b, \quad (5.41)$$

donde S_{signal} es la señal en DN que debería ser generada por el píxel, t_{int} es el tiempo de integración y b es el offset del píxel.

Un sensor CCD ideal contiene cientos de miles o millones de detectores de luz exactamente idénticos, con las mismas características de sensibilidad, linealidad, saturación, entre otros parámetros. Sin embargo, esto está lejos de la realidad, ya que en un sensor real existen diferencias de S_{signal} en detectores individuales respecto a sus vecinos y diferencias en el offset b . Esto implica que se deban identificar los píxeles para los cuales estas variaciones sean significativas o anómalas, y analizar el impacto que tienen en la correcta formación de imágenes para que se pueda extraer información de ellas [64–67].

Una vez identificados estos píxeles anómalos, se deberá adoptar algún criterio para decidir si es necesario aplicar alguna corrección a estos píxeles antes de realizar los procedimientos de calibración de la cámara hiperespectral.

En este trabajo se definen tres tipos de anomalías que provocan que los detectores se aparten del funcionamiento normal descrito por la ecuación (5.41), las cuales se definen a continuación:

- **Píxel quemado (Stuck-pixel):** son aquellos píxeles que producen un valor constante independientemente del tiempo de integración o la luz incidente sobre ellos. El valor constante que producen puede ser cualquiera entre 0 y el máximo posible. La ecuación que define a estos píxeles es la siguiente:

$$\mu_y = c, \quad (5.42)$$

donde c es una constante que varía entre cero y 16383, ya que el ADC es de 14 bits.

- **Píxeles con sensibilidad anormal:** son aquellos que tienen una sensibilidad mayor o menor que las de sus vecinos. La ecuación que los modela es la siguiente:

$$\mu_y = k S_{signal} t_{int} + b, \quad (5.43)$$

donde $k > 1$ y es una constante que multiplica al valor normal S_{signal} .

- **Hotpixel:** normalmente cuando los detectores no son iluminados (el sensor se encuentra cubierto para que no incida luz sobre él), los píxeles tienen un

comportamiento que obedece a la siguiente ecuación:

$$\mu_y = S_{dark} t_{int} + b, \quad (5.44)$$

donde S_{dark} son los DN generados por el píxel en ausencia de luz incidente. Un hotpíxel es un detector que tiene una sensibilidad muy superior a la de sus vecinos, para tiempos de integración prolongados. Estos píxeles quedan descritos por la siguiente ecuación:

$$\mu_y = k S_{dark} t_{int} + b, \quad (5.45)$$

donde $k > 1$.

5.7.1 Configuración del instrumental para análisis de píxeles anómalos

Los análisis de píxeles anómalos se realizaron utilizando dos conjuntos de imágenes: el mismo utilizado para la determinación de la constante de conversión, ruido de lectura y saturación descrito en la Sección 5.3, capturado con la cámara frente a la esfera integradora, y el otro es el conjunto de imágenes utilizado para la determinación de la corriente oscura de la sección Sección 5.4, con la cámara tapada.

5.7.2 Análisis y resultados

Primero se analizaron las imágenes capturadas con la cámara hiperespectral frente a la esfera integradora para determinar si existen píxeles quemados en las mismas. Este análisis se llevó a cabo comparando píxel a píxel las imágenes para distintos tiempos de integración y buscando aquellos detectores que no presentaban variación alguna imagen a imagen. Una vez realizado este análisis se determinó que no existen en todo el sensor píxeles que presenten este comportamiento.

El siguiente análisis realizado fue la identificación de los píxeles con sensibilidad anormal. Para ello, se utilizaron las imágenes capturadas frente a la esfera integradora con la lente objetivo colocada, y se capturaron imágenes para varios tiempos de integración. Se realizaron ajustes lineales, píxel a píxel, de los DN en función del tiempo de integración, y se realizó la comparación de las pendientes obtenidas mediante estos ajustes de cada píxel respecto al resto de su misma fila, utilizando el siguiente criterio:

1. Si la pendiente del píxel i -ésimo se separa $\pm 1\sigma$ de la media de las pendientes de la fila, se le asigna a ese píxel el valor 0.

2. Si la pendiente del píxel i -ésimo se encuentra dentro del intervalo cuyos límites son $\pm 1\sigma$ de la media de las pendientes de la fila, se le asigna el valor 1.

Este criterio de $\pm 1\sigma$ se utilizó para realzar el efecto observado en la Fig. 5.23, donde se muestra la gráfica obtenida, donde cada píxel de color negro corresponde al primer caso mencionado antes, mientras que los píxeles color blanco corresponden al segundo caso.

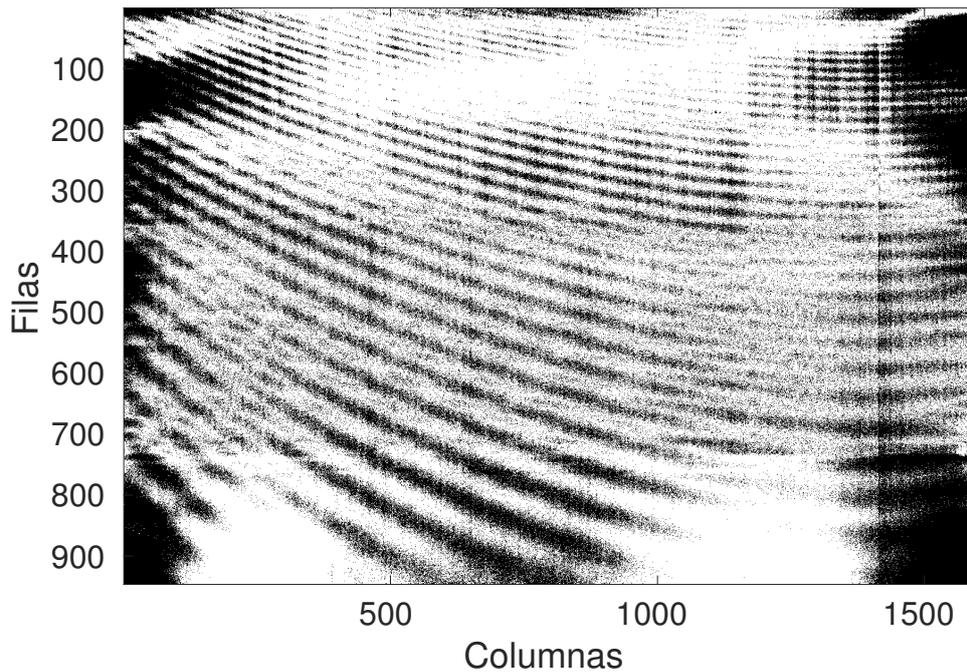


Fig. 5.23: Mapas de píxeles con sensibilidad anormal.

En la Fig. 5.23 se puede ver el efecto mencionado en la Subsección 5.2.4, el cual se asemeja a un patrón de interferencia impreso sobre la imagen. Además, se puede ver que entre las filas 380 y 740 aproximadamente hay una zona marcadamente más ruidosa que en el resto del sensor.

Una posible causa del patrón de interferencia observado en la Fig. 5.23 puede ser las reflexiones internas de la luz entre la superficie del sensor CCD y la ventana óptica [37] que se encuentra frente a él (ver página 33 de [56]). Por otro lado, la zona con excesivo ruido puede ser un efecto constructivo del propio sensor CCD.

Sin embargo, al no haber realizado la caracterización de la cámara y el espectrógrafo por separado, no es posible adjudicarle el problema a alguno de los dispositivos con total certeza. La determinación de las causas que provocan estos efectos queda para trabajo futuro³.

³**NOTA:** en el análisis anterior, el cual da como resultado la Fig. 5.23, se identificó a los píxeles que forman dicha figura como anómalos. Sin embargo, no necesariamente son anómalos en el sentido estricto de la palabra, sino más bien, responden de forma anormal debido a efectos externos a ellos.

Se utilizaron las imágenes oscuras (dark frames) para realizar el análisis tanto del offset como de los hotpixels, cuyo tiempo de integración se varió desde los 500ns a los 10s. En la Fig. 5.24 se puede ver un dark frame para $t_{int} = 10s$, donde se observa una deficiencia del offset de los detectores en el extremo izquierdo del sensor. En la Fig. 5.25 se grafica la fila 320 en función de las columnas, donde es más evidente esta disminución del offset en las primeras columnas del CCD. Además, en dicha figura se pueden ver los hotpixels que se apartan significativamente del resto para este tiempo de integración, los cuales se ven como líneas verticales en DN para varias columnas del sensor, muy por encima respecto a sus vecinos.

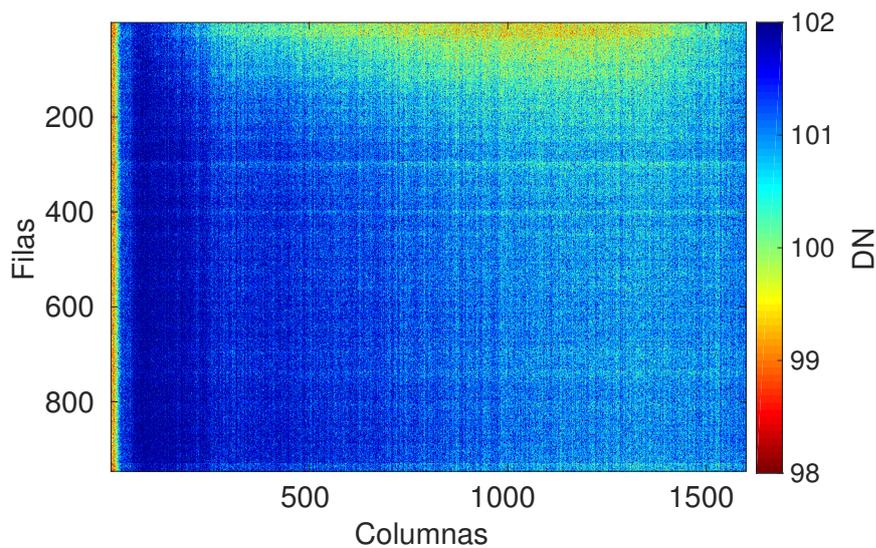


Fig. 5.24: Mapas de los offset anormales para un dark frame.

Para analizar los hotpixels, se realizó la división del sensor en secciones de 50(H)x43(V) píxeles (tamaño seleccionado arbitrariamente), de manera de realizar la comparación de cada detector con el resto de los detectores que se encuentran en la misma sección. Se realizaron nuevamente ajustes lineales a cada uno de los detectores para determinar sus pendientes y ordenadas, y se utiliza el mismo criterio de selección explicado anteriormente, excepto que en este caso se compara la pendiente de cada píxel con los detectores de su misma sección. Al hacer esto, se obtuvo una matriz que contiene las coordenadas de los hotpixels identificados.

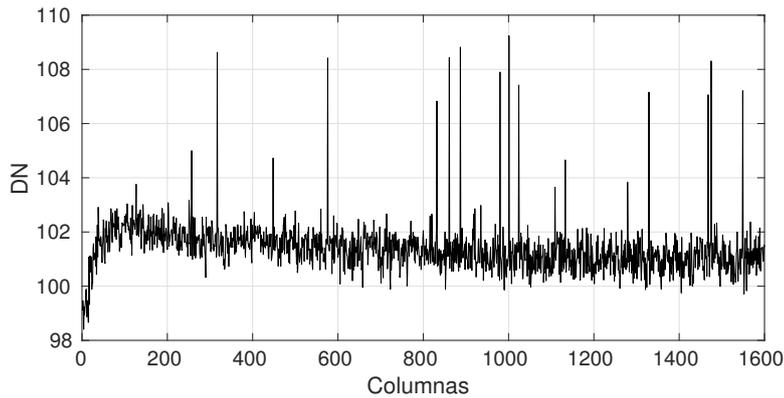


Fig. 5.25: Perfil de los HotPixels en fila 320.

Para analizar los hotpixels, se realizó la división del sensor en secciones de 50(H)x43(V) píxeles (tamaño seleccionado arbitrariamente), de manera de realizar la comparación de cada detector con el resto de los detectores que se encuentran en la misma sección. Se realizaron nuevamente ajustes lineales a cada uno de los detectores para determinar sus pendientes y ordenadas, y se utiliza el mismo criterio de selección explicado anteriormente, excepto que en este caso se compara la pendiente de cada píxel con los detectores de su misma sección. Al hacer esto, se obtuvo una matriz que contiene las coordenadas de los hotpixels identificados.

En la Fig. 5.26 se muestra una gráfica de una de las secciones del sensor analizadas junto con su histograma en escala semilogarítmica, para un tiempo de integración de 10s. En ella se ve tres píxeles muy por encima del resto, cuyos valores superan en 100DN a los correspondientes valores de los otros píxeles. En el histograma de la derecha se puede ver la distribución de los DN en esta zona y los píxeles apartados de dicha distribución.

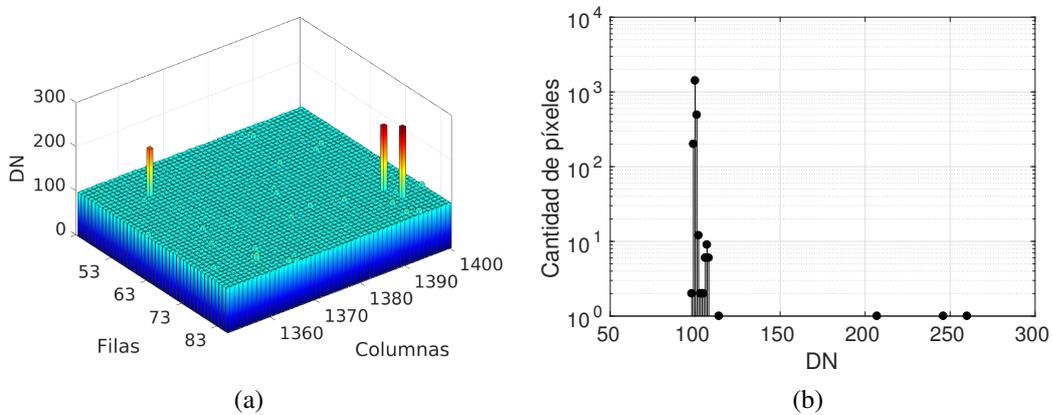


Fig. 5.26: Análisis de los hotpixels para $t_{int} = 10s$.

Por otro lado, en la Fig. 5.27 se observa la misma gráfica anterior, pero para un tiempo de integración de 10ms, donde se ve que los hotpixels de la Fig. 5.26 ya no aparecen. Esto implica que sólo se deben considerar estas anomalías como problemáticas para casos en los que de deban utilizar tiempos de integración largos, superiores generalmente a un segundo.

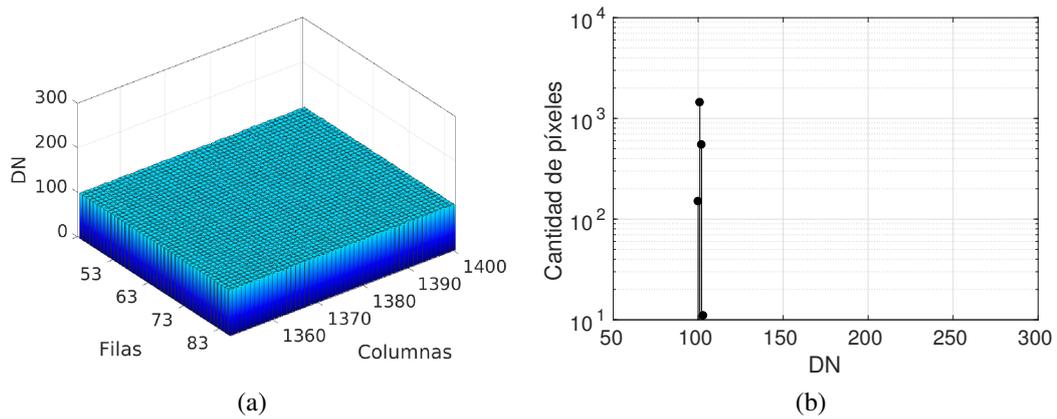


Fig. 5.27: Análisis de los hotpixels para $t_{int} = 10ms$.

5.8 Anomalías en el sensor

Las curvas que se muestran en las gráficas de la Sección 5.3 presentan un comportamiento particular para niveles de señal que se encuentran entre los $500DN$ y los $600DN$. En estos niveles de señal, la recta de ajuste de los puntos presenta un cambio de offset en la varianza del ruido total σ_y^2 , tal como se muestra en la Fig. 5.28. En dicha figura se grafican las curvas de σ_y^2 en función de $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ calculadas a partir de los píxeles de filas individuales del sensor, para tres casos diferentes utilizados para ejemplificar el efecto mencionado, ya que este efecto está presente en todos los casos.

Estas figuras muestran que el sensor tiene un comportamiento levemente diferente para niveles de señales superiores a los $500DN$ que para los niveles de señal inferiores. Este comportamiento produce errores en los ajustes de la recta para determinar la constante K_{ADC} , por lo tanto se realiza el ajuste considerando únicamente niveles superiores a los $600DN$, evitando utilizar los datos inferiores a este valor, pues si miden menos de $600DN$ no es representativo el ajuste.

Por otro lado, en la zona de saturación los datos ya no se comportan de forma lineal, por lo tanto, el límite superior de señal en DN para realizar los ajustes se toma como el 70 % del valor μ_{sat} [55].

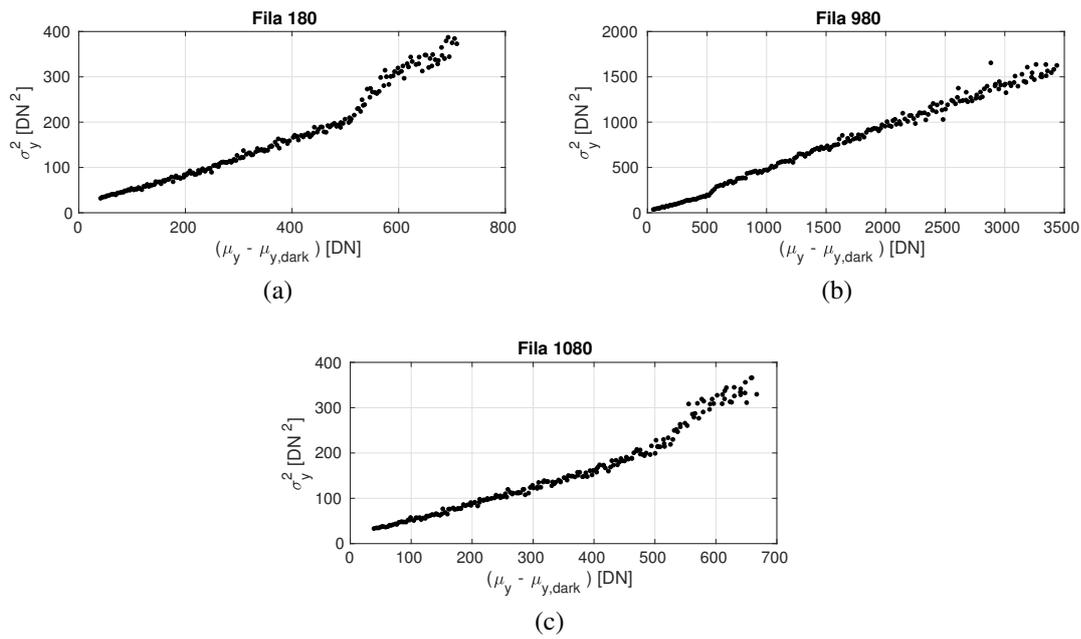


Fig. 5.28: Anomalías detectadas en el sensor CCD. (a) Fila 180; (b) Fila 980; (c) Fila 1080.

5.9 Resumen de los resultados de este capítulo

Al realizar el análisis de la linealidad del sensor con la radiancia y con el tiempo de integración, se determinó que para las longitudes de onda centrales (filas centrales del CCD) la linealidad alcanza valores cercanos al 99 %, mientras que en los extremos del rango espectral, la linealidad disminuye. Esto se debe principalmente al pequeño nivel de señal que es posible obtener en los extremos del rango, donde la eficiencia cuántica del sensor tiene niveles muy bajos, lo cual introduce errores en los ajustes lineales utilizados para realizar los cálculos.

Los cálculos realizados para obtener el ruido de lectura, la constante de conversión y el nivel de saturación del sensor, permitieron obtener distintos valores para cada modo de funcionamiento del CCD. Se obtuvieron dos valores de la constante de conversión, una para cada línea de lectura del sensor:

$$K_{ADC} = 2.25 \pm 1.05 \% \quad \text{para la salida L,}$$

$$K_{ADC} = 2.29 \pm 1.86 \% \quad \text{para la salida R.}$$

Se encontró que el valor de saturación del sensor CCD alcanza los $35912e^-$, equivalente a unos $15961DN$.

Se determinó que la fuente predominante de ruido del sensor es el ruido de lectura, siendo la TDC despreciable frente a este ruido. Esto se debe al sistema de refrigeración

del tipo Peltier que dispone la cámara, que permite reducir su temperatura de trabajo de manera de disminuir significativamente la generación de electrones por efecto de la agitación térmica de los átomos del material semiconductor, lo cual produce que para tiempos de integración menores al segundo, esta generación de cargas sea despreciable.

Los valores de ruido de lectura obtenidos dependen de la velocidad de lectura del sensor y de la cantidad de líneas utilizadas para la lectura de los píxeles, de esta forma se obtuvo lo siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_{read}(L) &= 6.85 \text{ DN} = 15.4 e^- \quad \text{para } 10\text{MHz}, \\ \sigma_{read}(L) &= 15.02 \text{ DN} = 33.8 e^- \quad \text{para } 40\text{MHz}, \\ \sigma_{read}(R) &= 5.83 \text{ DN} = 13.3 e^- \quad \text{para } 10\text{MHz}, \\ \sigma_{read}(R) &= 8.58 \text{ DN} = 19.6 e^- \quad \text{para } 40\text{MHz}.\end{aligned}$$

Un aumento en la velocidad de lectura de los detectores implica un aumento en el piso del ruido del sensor, lo cual produce que disminuya el rango dinámico del mismo. El análisis de este parámetro arrojó los siguientes resultados:

$$RD[10\text{MHz}] = \frac{15961}{7.08} = 2254.38 \equiv 67.1 \text{ dB},$$

$$RD[40\text{MHz}] = \frac{15961}{15.24} = 1047.31 \equiv 60.4 \text{ dB}.$$

En el análisis de píxeles anómalos se encontraron una gran cantidad de detectores que tienen un comportamiento de sensibilidad anormal. Sin embargo, esto no quiere decir que este comportamiento anormal se deba intrínsecamente a los detectores, sino más bien que su respuesta anormal es causada por otros efectos, tales como reflexiones internas de la luz que ingresa al sistema óptico, o entre la ventana del sensor y su superficie.

También se determinó que se hace necesario tener en cuenta los hotpixels para tiempos de integración largos, mayores al segundo, mientras que para los tiempos de integración generalmente utilizados para misiones aerotransportadas, el efecto de estos píxeles es despreciable.

Las columnas izquierdas del sensor tienen una sensibilidad inferior al resto de las columnas, provocando una respuesta inferior en esta zona en comparación al resto del sensor.

Además se encontraron anomalías en el sensor que producen que entre los 500DN y 600DN haya un cambio en la pendiente del ruido total en función del nivel de señal sin offset.

Calibración Espectral

Como se describió en el Capítulo 3, el sensor CCD de la cámara VNIR consiste en un arreglo de 1200 filas y 1600 columnas de detectores, en donde las filas representan el eje espectral mientras que las columnas representan el eje espacial. La red de difracción del espectrógrafo dispersa la luz en la dirección del eje y perpendicular a las filas, por lo tanto sobre cada fila del sensor incide una longitud de onda distinta y con estrecho ancho de banda. La calibración espectral consiste en establecer la correspondencia entre longitud de onda y filas del sensor, de manera de poder asignarle una longitud de onda a cada uno de los detectores. Para esto, es necesario utilizar fuentes de luz que emitan en longitudes de onda bien conocidas y establecer un procedimiento de calibración adecuado a las características de la cámara y del instrumental disponible en el laboratorio.

En este capítulo se describen los procedimientos realizados para la calibración espectral de la cámara, las configuraciones utilizadas para realizar las mediciones con el instrumental de laboratorio y los resultados obtenidos. Además, se realiza una comparación de los resultados con los datos proporcionados por los fabricantes de la cámara y el espectrógrafo.

6.1 Procedimiento de calibración

En esta sección se describen los procedimientos llevados a cabo para realizar la calibración espectral de la cámara VNIR. Este procedimiento está dividido en tres partes: determinación de los máximos de las líneas espectrales, obtención de los polinomios de calibración y determinación de la resolución espectral.

6.1.1 Determinación de los máximos de las líneas espectrales

El procedimiento de calibración comienza con la captura de imágenes con la cámara frente a las lámparas de descarga de gases. Consideremos primero una única columna

del sensor. Al graficar los DN en función de las filas, se obtiene una curva donde se ven las líneas de emisión espectrales de la lámpara, tal como se muestra en la Fig. 6.1 donde se grafican estas curvas para la columna 800 del sensor. Sobre cada una de estas líneas o picos espectrales, se realiza un ajuste con una función que modele adecuadamente el comportamiento de estos picos.

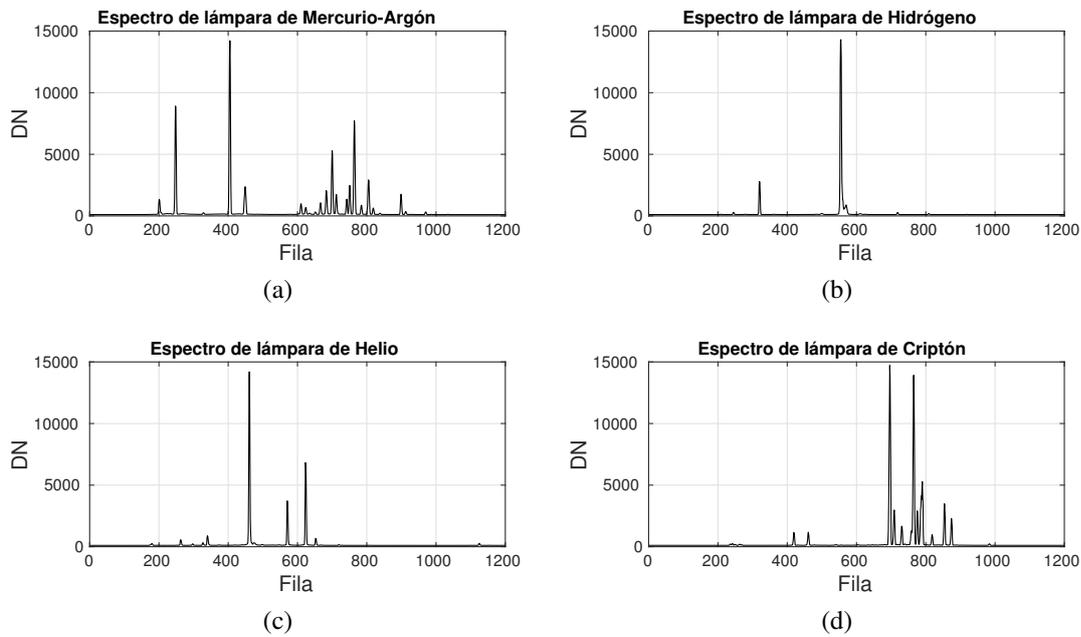


Fig. 6.1: Imágenes capturadas con la cámara VNIR frente a las lámparas de descarga para la columna central. (a) Mercurio-Argón (b) Hidrógeno; (c) Helio; (d) Criptón.

En la bibliografía se encuentran procedimientos de calibración espectral que utilizan generalmente funciones de ajuste Gaussianas o doble Gaussianas ya que se adaptan bien a los datos obtenidos [4, 68]. En este trabajo se analizaron cada uno de los picos de la Fig. 6.1 ensayando las dos funciones mencionadas descritas por las siguientes ecuaciones:

$$y = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + d_1, \quad (6.1)$$

$$y = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + d_1, \quad (6.2)$$

donde a_i , b_i , c_i son los coeficientes de las Gaussianas que deben ser calculados, mientras que d_1 es una constante incorporada para modelar el offset de $100DN$ del sensor agregado por el fabricante de la cámara.

En la Fig. 6.2 se observa como ejemplo una comparación entre las funciones de ajuste de (6.1) y (6.2) realizados en uno de los picos de la lámpara de Mercurio-Argón,

donde se puede ver que la (6.2) es la que mejor predice el comportamiento de los datos obtenidos y además, es con la cual se logra minimizar los residuos de los ajustes.

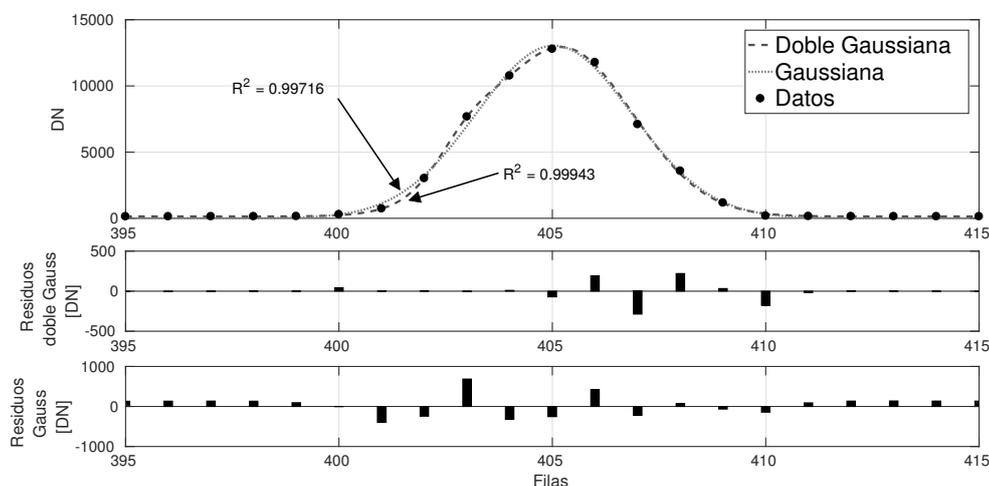


Fig. 6.2: Comparación entre las funciones Gaussiana y doble Gaussiana.

Para todas las líneas espectrales de la columna, se realiza el ajuste de la ecuación (6.2) y se obtiene la coordenada del máximo del ajuste realizado, este valor corresponde a la fila del sensor (número real) en la cual se encuentra el máximo de la función de ajuste de la línea espectral analizada.

Este procedimiento se aplica para cada una de las columnas del sensor, ya que la posición de los máximos de las líneas espectrales varía en el eje espacial debido al efecto de aberraciones en el sistema óptico de la cámara.

6.1.2 Polinomios de calibración

Luego de haber obtenido las coordenadas de los máximos de todos los picos espectrales, se realiza una gráfica de longitud de onda en función de estos máximos, tal como se muestra en la Fig. 6.3. Las longitudes de onda teóricas correspondientes a cada uno de los máximos se obtienen a partir de las tablas mostradas en el Anexo B, las cuales fueron extraídas de los documentos del fabricante de lámparas ORIEL [69] y la base de datos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, National Institute of Standards and Technology) [70]. De esta manera se establece la correspondencia entre la longitud de onda teórica y la fila del sensor.

Se realiza un ajuste polinómico entre los puntos obtenidos con el objetivo de interpolar en el resto de las filas del CCD. El grado óptimo del polinomio, llamado polinomio de calibración, se determina minimizando el error estándar del ajuste (o

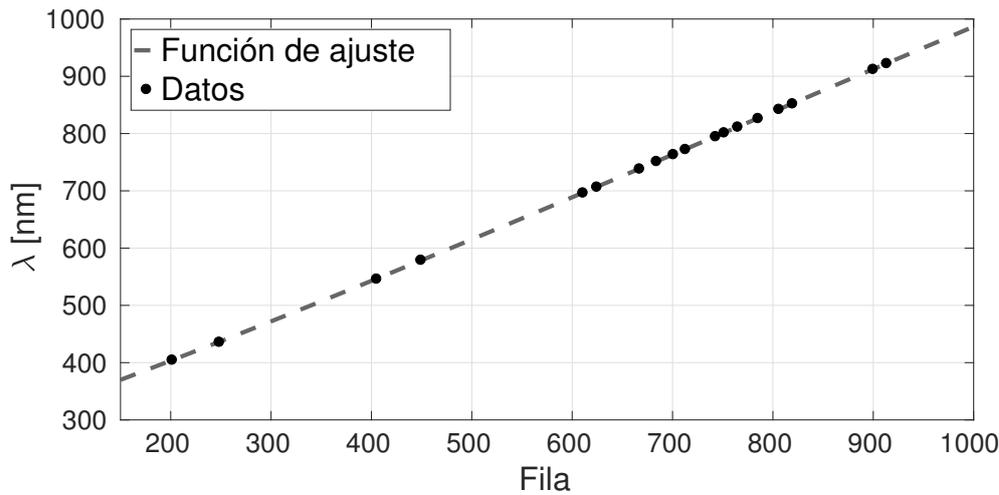


Fig. 6.3: Función de ajuste polinómica.

desviación estándar de los residuos) dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m - 1}}, \quad (6.3)$$

donde σ_{RMSE} es el Root Mean Squared Error (RMSE); w_i son los pesos utilizados para realizar el ajuste; y_i son las ordenadas de los datos; \hat{y}_i son los valores de las ordenadas estimadas; n es la cantidad de datos y m es el grado del polinomio de ajuste. Haciendo ésto, se obtiene un polinomio de calibración de grado N que tiene la siguiente forma:

$$\lambda(i, j) = a_{N,j} i^N + a_{N-1,j} i^{N-1} + \dots + a_{2,j} i^2 + a_{1,j} i + a_{0,j}, \quad (6.4)$$

donde los $a_{i,j}$ son los coeficientes del polinomio de calibración; i y j representan a las filas y columnas respectivamente; y $\lambda(i, j)$ es la longitud de onda correspondiente al píxel de la fila i y columna j . De esta forma, una vez calculados los coeficientes del polinomio de calibración, introduciendo el número de la fila i -ésima al polinomio de calibración se obtiene su longitud de onda correspondiente.

Al igual que se hizo para la obtención de los máximos, este procedimiento se realiza para cada una de las columnas del sensor, de manera que se obtendrán tantos polinomios de calibración como columnas tenga el CCD.

6.1.3 Determinación de la resolución espectral

Para calcular la resolución espectral de la cámara se propone utilizar el monocromador, aprovechando su particularidad de generar señales muy monocromáticas, con un ancho que según su hoja de datos alcanza los 0.01nm [50], y

en longitudes de onda configurables. Esta resolución se estima calculando el Ancho Total a Mitad del Máximo (FWHM, Full Width at Half Maximum), tal como se muestra en la Fig. 6.4, para varias longitudes de onda y varias columnas del sensor, ya que la resolución espectral de la cámara puede variar a lo largo de las columnas debido a aberraciones en el sistema óptico.

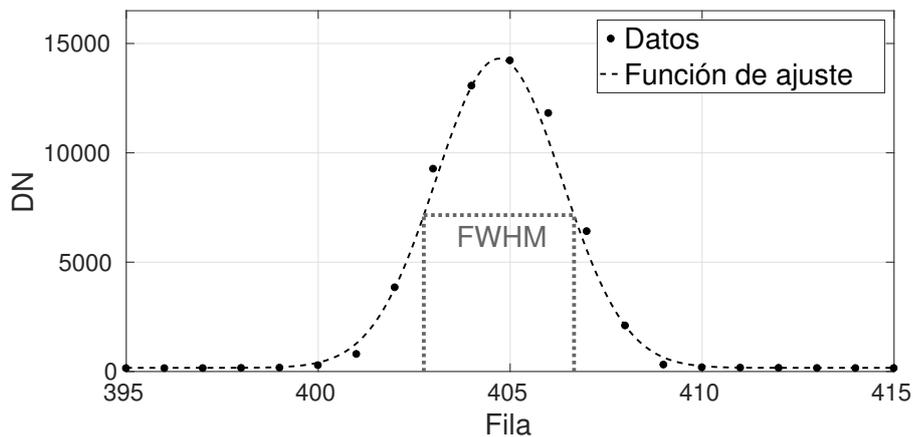


Fig. 6.4: Función de ajuste sobre los datos de uno de las líneas espectrales.

6.2 Configuraciones de medición

Se utilizaron dos configuraciones para realizar la calibración espectral de la cámara VNIR, una con la cámara frente a las lámparas de descarga y otra con la cámara a la salida del monocromador.

Configuración Lámpara-Cámara: se colocó la cámara directamente frente a la lámpara de descarga de manera que la rendija de entrada del espectrógrafo quede alineada de forma paralela con el tubo de la lámpara, de forma de iluminar todo el FOV de la misma, tal como se muestra en la Fig. 6.5 para cada una de las lámparas utilizadas. En la 6.1(a) se observa la lámpara de HgAr en posición horizontal, mientras que en el resto de las imágenes de la misma figura se ven el resto de las lámparas de descarga en posición vertical, para lo cual se tuvo que rotar la cámara 90 grados para alinear su rendija de entrada con las lámparas. Esto fue necesario debido a que la lámpara de HgAr tiene una configuración distinta al resto.

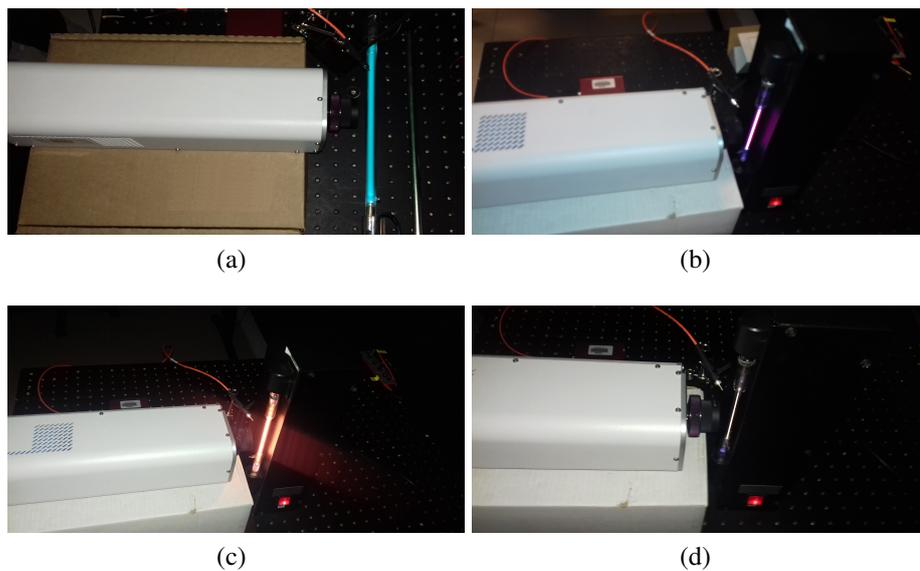


Fig. 6.5: Configuraciones de medición implementadas. (a) Mercurio-Argón (b) Hidrógeno; (c) Helio; (d) Criptón.

Configuración Monocromador-Cámara: el setup utilizado con el monocromador se muestra en la Fig. 6.6, donde se ve la cámara VNIR a la salida del monocromador y la lámpara halógena utilizada como fuente a su entrada. La lámpara se encuentra montada sobre un soporte óptico sobre el cual se colocan dos ventiladores para disipar el calor generado por la misma. En este caso, las mediciones se realizaron sin la lente objetivo colocada debido a que con dicha lente, el área iluminada del sensor CCD era muy pequeña y no se podía determinar la resolución espectral a lo largo del eje espacial. Se considera que la lente no influye en la resolución espectral del instrumento.



Fig. 6.6: Setup de la cámara frente al monocromador.

6.3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la calibración espectral al aplicar los procedimientos descritos en las secciones anteriores.

6.3.1 Anomalías en las líneas espectrales

Al realizar el ajuste de las funciones doble Gaussianas en las líneas espectrales correspondientes a las lámparas de Helio, Hidrógeno y Criptón se detectaron anomalías como las que se muestran en la Fig. 6.7 para el caso de la lámpara de Helio, en donde se puede ver el problema de ajuste que ocurre en dos columnas consecutivas del sensor para una misma línea espectral, lo cual produce un salto brusco en el máximo calculado.

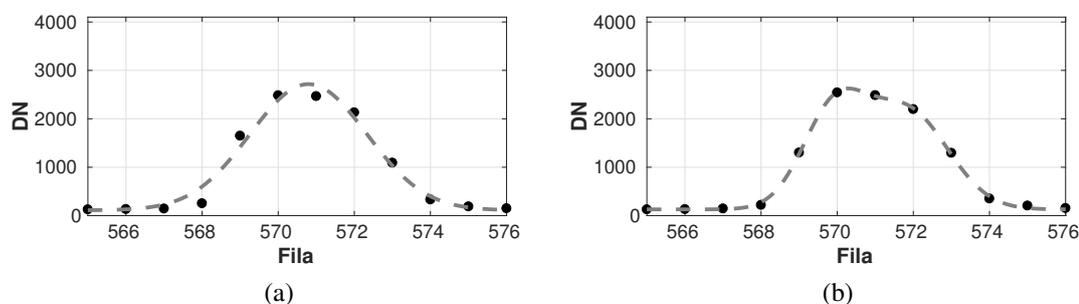


Fig. 6.7: Comparación de los ajustes de una línea de emisión de la lámpara de Helio para distintas columnas. (a) Columna 600; (b) Columna 601.

El algoritmo desarrollado para la determinación de estos máximos recorre las 1600 columnas de sensor por cada línea espectral de cada lámpara y va almacenando los máximos calculados en un vector de forma automática. El salto brusco en el máximo debido al deficiente ajuste en las curvas de la Fig. 6.7 genera errores significativos en la determinación de la resolución espectral y la cuantificación de las aberraciones ópticas producidas.

Los ruidos calculados en la Sección 5.3 en este caso son minimizados mediante el promediado de varias imágenes, por esta razón, los saltos en los máximos no pueden ser atribuidos al ruido del sensor. Sin embargo, sí pueden estar relacionados con un patrón de no uniformidad de los píxeles del sensor, ya que el método aplicado para la estimación de los ruidos elimina esa posible componente.

Otra posible causa de la aparición de estas anomalías podría estar vinculada al instrumental utilizado, ya que por ejemplo, estos efectos no se observan con la lámpara de HgAr. Como se mencionó en el Capítulo 4, las lámparas de Helio, Hidrógeno y Criptón se alimentan con una fuente de alterna, mientras que la lámpara de HgAr se

alimentaba con una fuente de continua, por lo tanto las primeras presentan variaciones en su intensidad que quedan registradas en las imágenes capturadas para determinados tiempos de integración, mientras que con la lámpara de HgAr esto no sucede.

Se realizaron análisis de estas líneas utilizando distintas funciones de ajuste, sin embargo, dado que no se obtuvieron resultados prometedores y que no se dispone del tiempo suficiente para realizar un análisis más profundo de estas lámparas y sus líneas espectrales, se decidió continuar con la calibración espectral utilizando sólo la lámpara de Mercurio-Argón, y se deja como trabajo futuro realizar un estudio más profundo de las lámparas de descarga de gases descartadas.

6.3.2 Obtención de los polinomios de calibración

Una vez determinados los máximos de las líneas espectrales de la lámpara de HgAr, se realizaron los ajustes polinomiales para determinar los polinomios de calibración. La Fig. 6.8 muestra la variación del error de ajuste en función del grado del polinomio. En dicha figura se ve que para un polinomio de grado 4, sólo se obtiene una reducción del 1 % en el error respecto a uno de grado menor, por lo cual no se justifica utilizar un polinomio de grado mayor a tres.

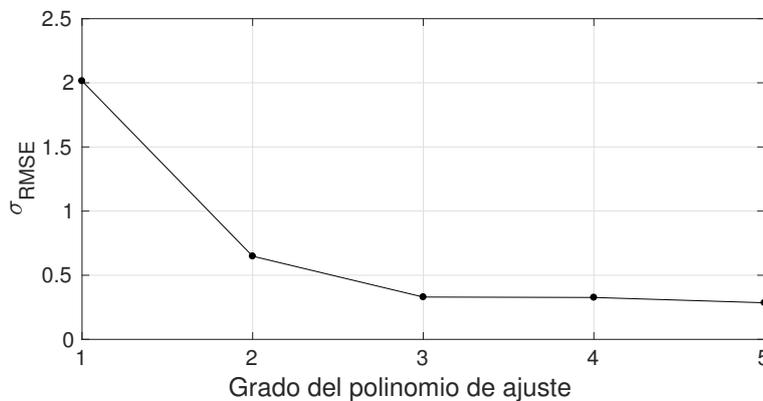


Fig. 6.8: Error de ajuste en función del grado del polinomio.

Los polinomios de calibración obtenidos entonces tienen la siguiente forma:

$$\lambda(i, j) = a_{3,j} i^3 + a_{2,j} i^2 + a_{1,j} i + a_{0,j}, \quad (6.5)$$

donde un conjunto de coeficientes $\{a_{3,j}, a_{2,j}, a_{1,j}, a_{0,j}\}$ se obtienen para cada columna j del sensor.

En la Fig. 6.9 se muestra como ejemplo una gráfica de la longitud de onda en función del número de filas para la columna 800 del sensor. En ella se pueden ver los

máximos para 17 líneas espectrales seleccionadas de la lámpara de HgAr, el ajuste del polinomio de grado 3 y sus respectivos residuos.

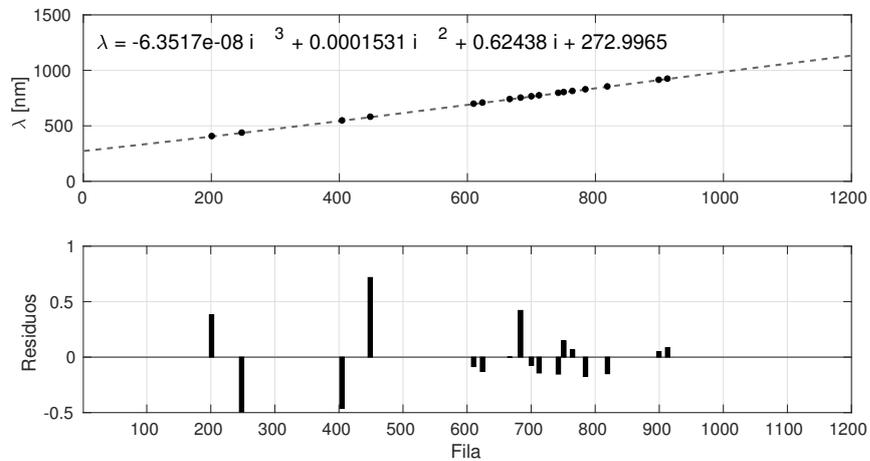


Fig. 6.9: Ajuste polinómico y residuos para la columna 800.

Con el objetivo de reducir los residuos de los datos que se encuentran más apartados del resto, se utiliza un ajuste pesado donde la función peso se determina calculando la densidad de puntos a lo largo del eje x de manera que, por ejemplo, los primeros 4 puntos de la Fig. 6.9 (entre las filas 200 y 500) tendrán un peso mayor que los últimos (entre las filas 600 y 850).

La Fig. 6.10 muestra nuevamente el ajuste polinómico pesado, donde se puede apreciar que no hay una reducción significativa de los residuos en los datos más apartados del conjunto. Sin embargo, la función peso fue aplicada de todas formas para determinar los polinomios de calibración de todas las columnas del sensor.

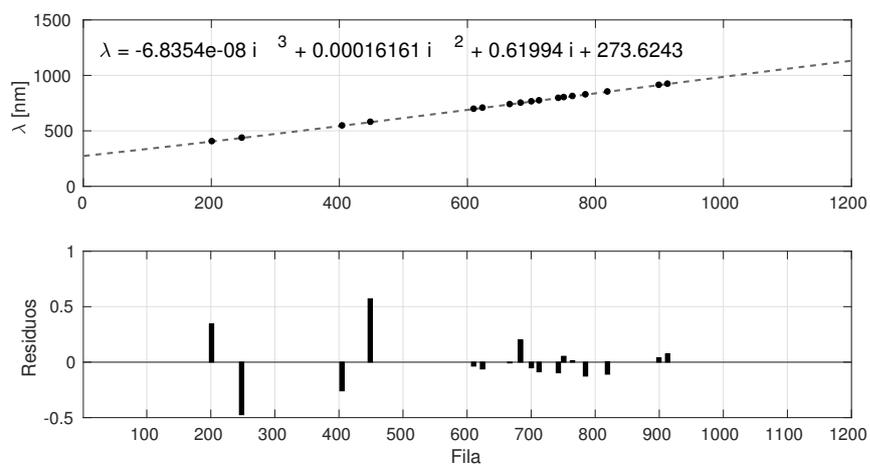


Fig. 6.10: Ajuste polinómico y residuos para la columna 800 utilizando la función peso.

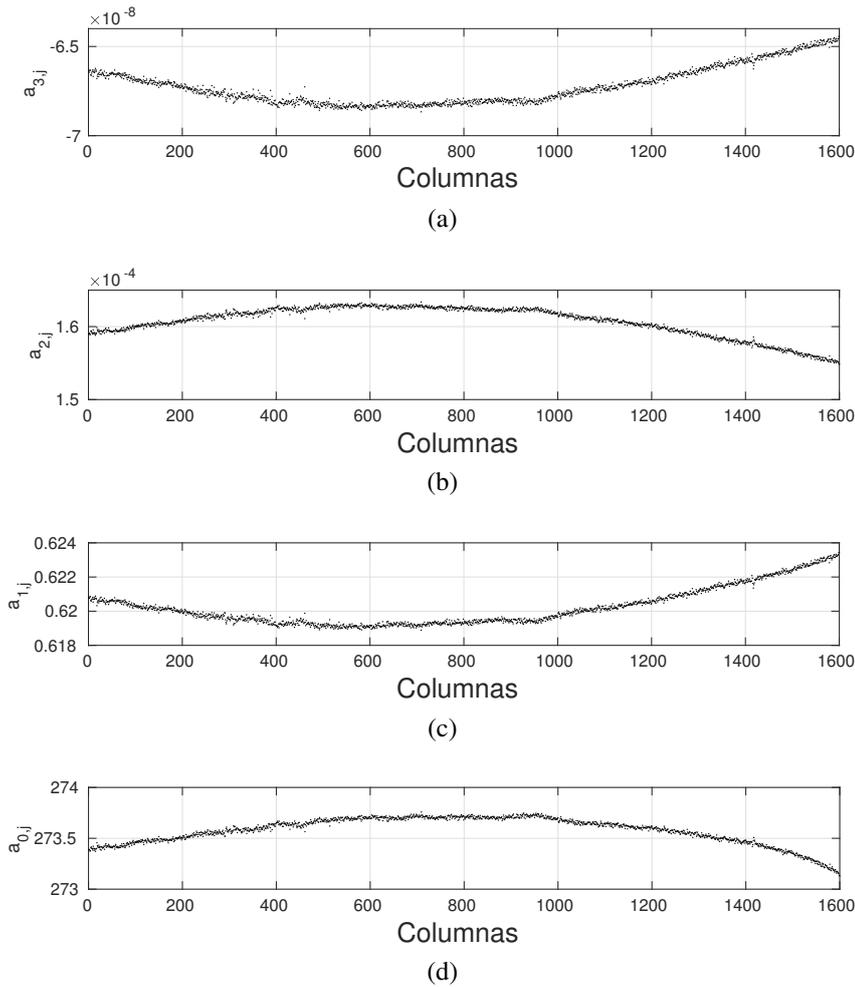


Fig. 6.11: Coeficientes de polinomios de calibración. (a) $a_{3,j}$; (b) $a_{2,j}$; (c) $a_{1,j}$; (d) $a_{0,j}$.

La Fig. 6.11 muestra las gráficas de los coeficientes $\{a_{3,j}, a_{2,j}, a_{1,j}, a_{0,j}\}$ obtenidos en función de las columnas del CCD. En dicha gráfica se ve que los términos cúbico y cuadrático son los que menos aportan a la longitud de onda final.

Las aberraciones producidas por el sistema óptico del espectrógrafo producen deformaciones en la imagen que se forma sobre el sensor. Estas deformaciones se puede observar evaluando los polinomios de calibración de cada columna en una misma fila i , y graficando la longitud de onda obtenida en función de las columnas del sensor, esto se ve en las Fig. 6.12 y Fig. 6.13 para las filas 400 y 1000, respectivamente. Los puntos grises corresponden a los valores de λ obtenidos a partir de cada polinomio, mientras que la línea negra punteada corresponde a un ajuste polinómico utilizado para ajustar dichos puntos con el objetivo de cuantificar la aberración. Se puede ver en estas gráficas que una misma fila del CCD, a lo largo del eje espacial, no recibe exactamente la misma longitud de onda debido a la aberración óptica. Esta aberración recibe el nombre de *Smile* debido a que, generalmente, tiene la forma de una sonrisa invertida en este caso.

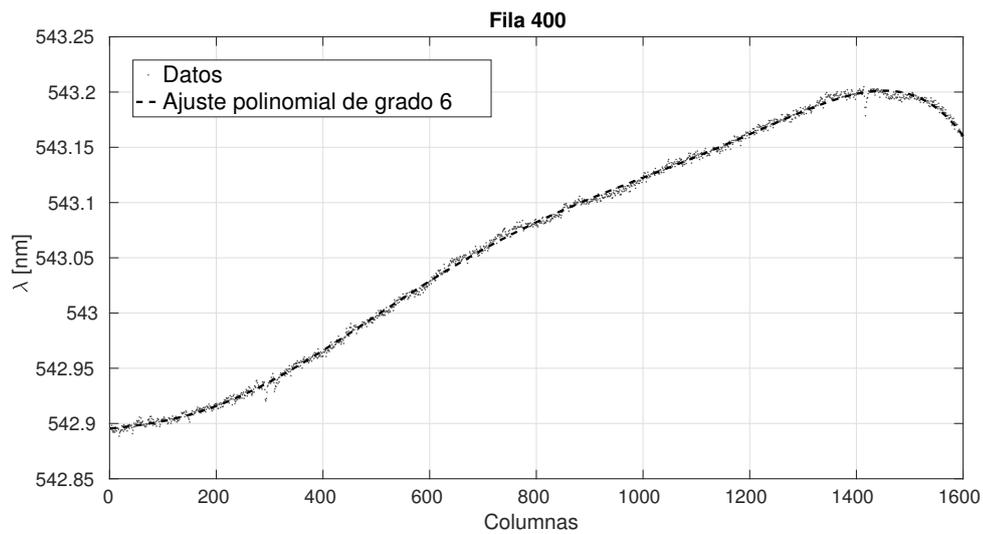


Fig. 6.12: Aberración producida por el sistema óptico del espectrógrafo.

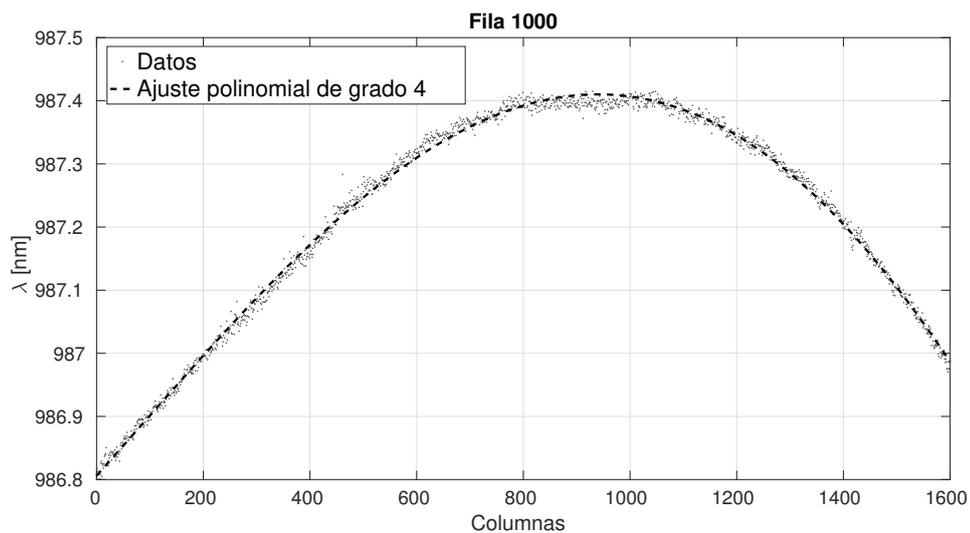


Fig. 6.13: Aberración producida por el sistema óptico del espectrógrafo, aquí es más evidente el fenómeno del smile.

La Fig. 6.14 muestra el efecto del smile en todo el sensor utilizando una gráfica bidimensional. Dicha gráfica muestra la diferencia entre cada columna del sensor menos la columna central.

El smile se cuantifica realizando los ajustes mostrados en las Fig. 6.12 y Fig. 6.13 para cada una de las filas del sensor y aplicando la siguiente ecuación:

$$smile = max(\lambda) - min(\lambda) \quad (6.6)$$

donde $max(\lambda)$ y $min(\lambda)$ son las longitudes de onda máxima y mínima de cada fila. En

la Fig. 6.15 se ve la variación del smile en función de la longitud de onda, alcanzando un máximo de 0.6nm en longitudes de onda cercanas a los 1000nm.

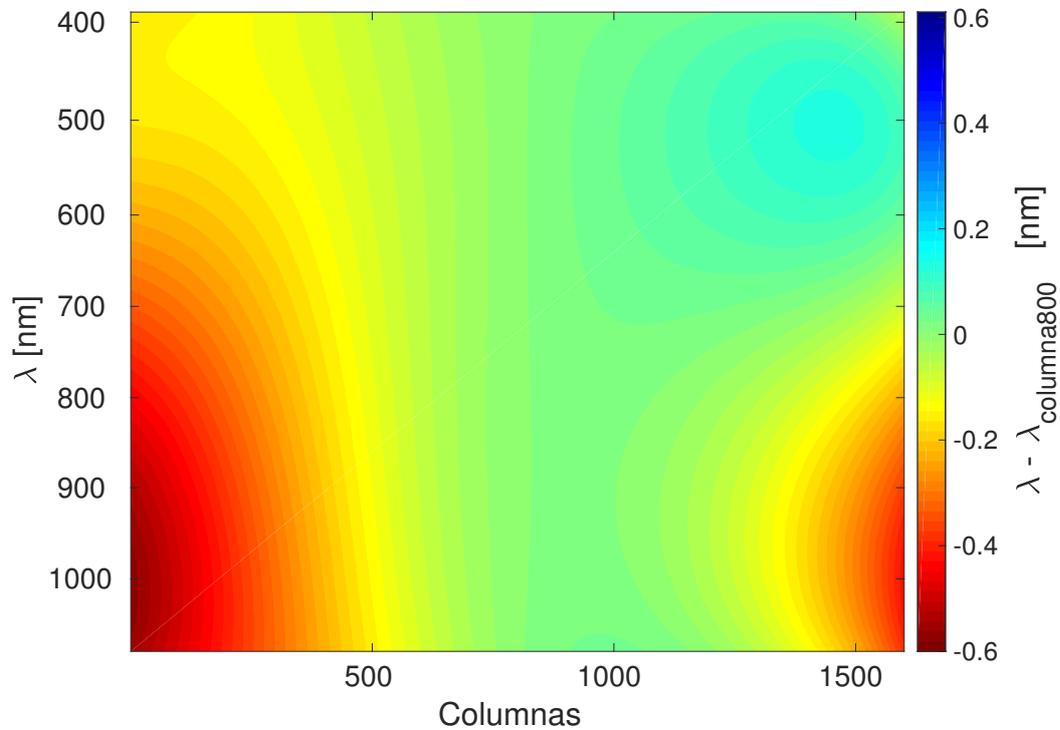


Fig. 6.14: Smile en todo el sensor CCD.

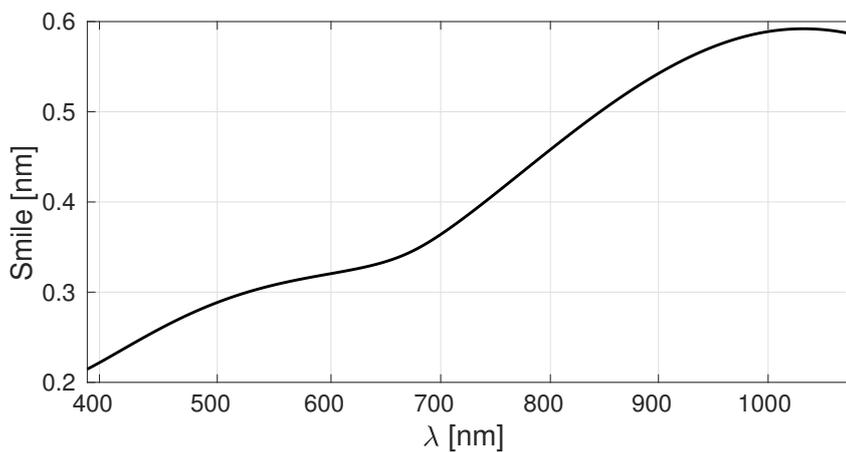


Fig. 6.15: Variación del smile en función de la longitud de onda.

6.3.3 Estimación de errores

Comparando la longitud de onda del máximo calculado de cada línea espectral con la longitud de onda teórica conocida que le corresponde, se determina el error a lo

largo del eje espectral de la cámara [4, 23]. En la Fig. 6.16 se puede ver las gráficas del error absoluto y relativo como resultado de la calibración espectral de la cámara, determinados en las líneas espectrales utilizadas para calibrar. Este error no es constante en el eje espectral del sensor, sino que varía de columna a columna, por este motivo, la Fig. 6.16 muestra los errores máximos obtenidos a lo largo de cada fila. Se ve que el error es mayor en longitudes de onda menores, debido a que la calibración espectral que se llevó a cabo tenía poca concentración de líneas espectrales en estas zonas del sensor, ocasionando un error de ajuste mayor en estos puntos.

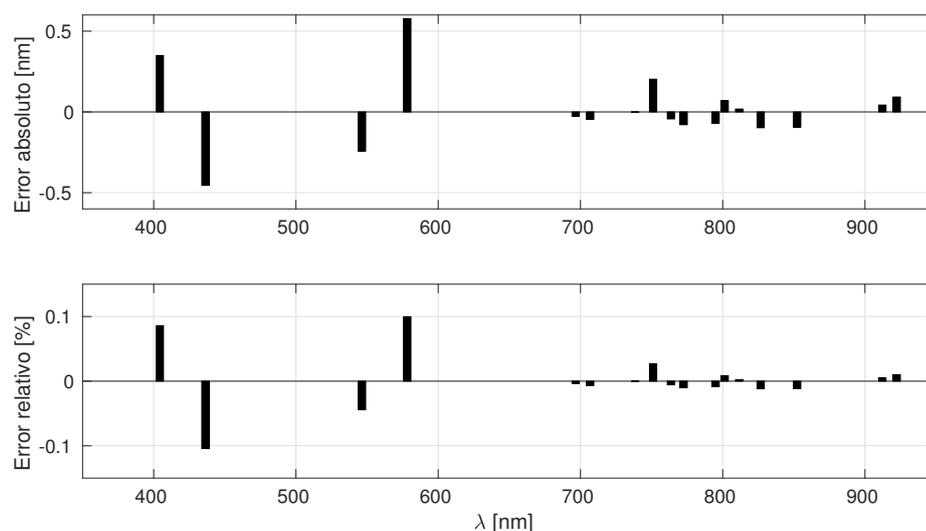


Fig. 6.16: Errores absolutos y relativos máximos en función de la longitud de onda.

Se puede notar que los errores absolutos obtenidos en ninguno de los casos es menor al ancho natural de las líneas de emisión de la lámpara de HgAr, comentadas en la Sección 4.5.

6.3.4 Resolución espectral

Como se mencionó en la Subsección 6.1.3, se utilizó el monocromador para determinar la resolución espectral de la cámara. Para ello, se lo configuró en longitudes de onda desde 400nm a 1000nm a pasos de 50nm, y se capturaron un conjunto de 10 imágenes para cada longitud de onda, y luego se promediaron esas imágenes para obtener una imagen promedio. Se aplicaron los polinomios de calibración obtenidos para convertir número de filas a longitud de onda y se analizaron los datos obtenidos.

La Fig. 6.17 muestra algunas de las curvas obtenidas, en donde se ven los puntos de datos y los ajustes realizados. Se utilizó nuevamente la función doble Gaussiana ya que es la que mejor predice el comportamiento de los datos obtenidos. En dichas gráficas,

se puede ver que la resolución espectral varía con la longitud de onda con una tendencia a reducirse a medida que la longitud de onda aumenta.

Los datos extraídos del certificado de alineación del espectrógrafo y la cámara realizado por la empresa Specim se muestran en la Tabla 6.1, en donde se ve que las resoluciones espectrales son menores a las calculadas que se muestran en la Fig. 6.17. Con el objetivo de verificar que el monocromador sea una fuente confiable para determinar la resolución espectral de la cámara, se realizó una comparación entre las resoluciones espectrales calculadas con el monocromador respecto a las calculadas a partir de las líneas espectrales de la lámpara de HgAr. Estas gráficas se muestran en la Fig. 6.18.

Tabla 6.1: Resoluciones espectrales de la cámara hiperespectral extraídas del certificado de alineación.

Res. [nm]	λ_C [nm]
3.13	435.8
3.42	696.5
3.75	912.3

En las curvas de la Fig. 6.18 se puede ver que las resoluciones espectrales determinadas con la lámpara de descarga son en promedio, menores a las calculadas con el monocromador. Esto lleva a la conclusión que el monocromador, luego de haber realizado el procedimiento de alineación básico, no es una buena fuente para determinar la resolución espectral de la cámara debido a que no cumple con su especificación de resolución dada en su hoja de datos. Esto no es un problema de la cámara propiamente dicha, sino más bien de una deficiente calibración y alineación del dispositivo que impide que se alcance la máxima resolución espectral del haz de luz de salida. Dicho esto, la resolución espectral de la cámara se determina utilizando las mismas líneas espectrales de la lámpara de descarga de HgAr que se usó para determinar los polinomios de calibración, debido a que no se cuenta con otra fuente que produzca un haz de luz con un ancho de banda lo suficientemente estrecho.

En la Tabla 6.2 se resumen los valores de resolución espectral (Res.[nm]) obtenidos utilizando ambas fuentes (monocromador y lámpara), donde λ_C es la longitud de onda central en la cual la resolución fue determinada.

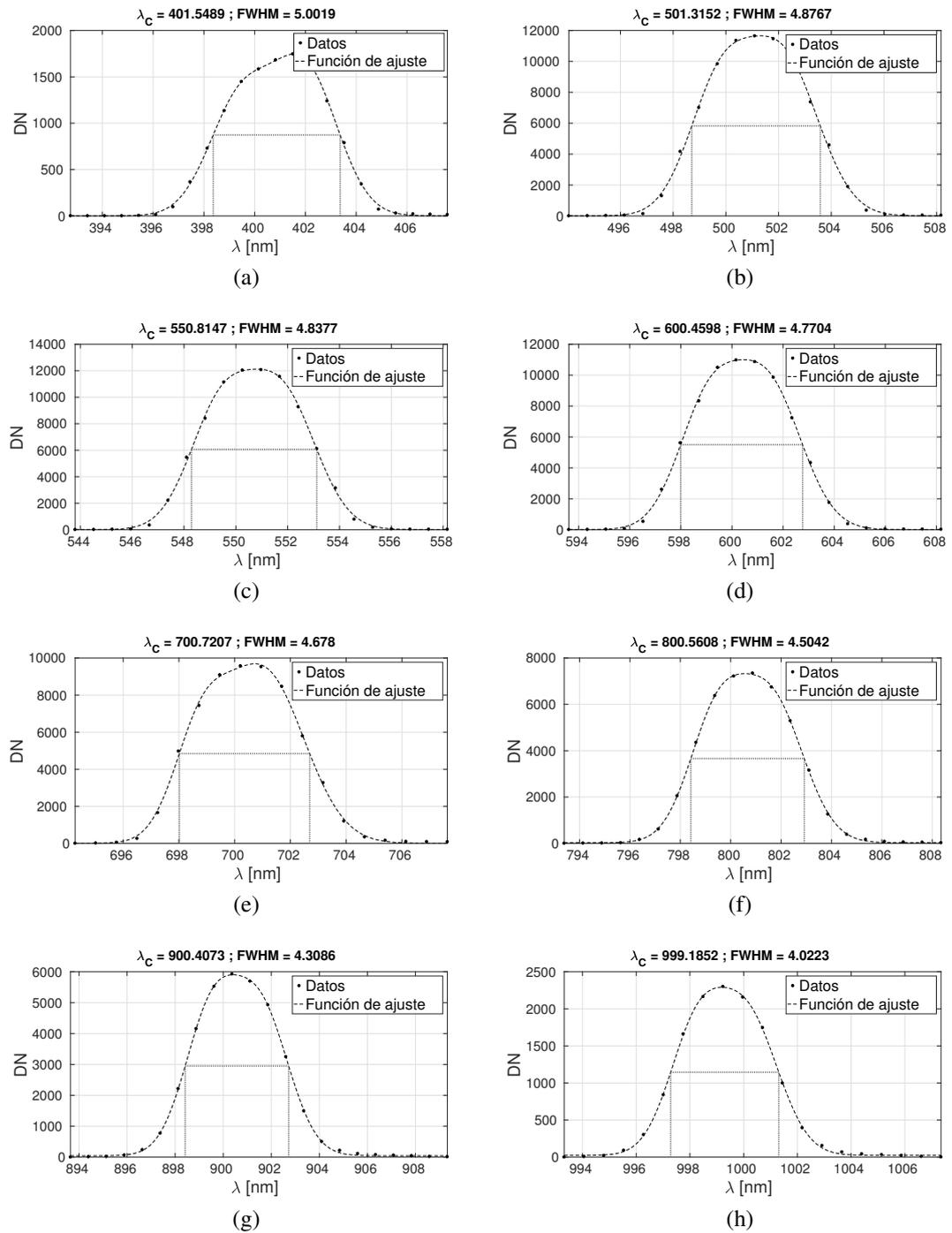


Fig. 6.17: Resolución espectral calculada con el monocromador para distintas longitudes de onda centrales en la columna 800 del sensor.

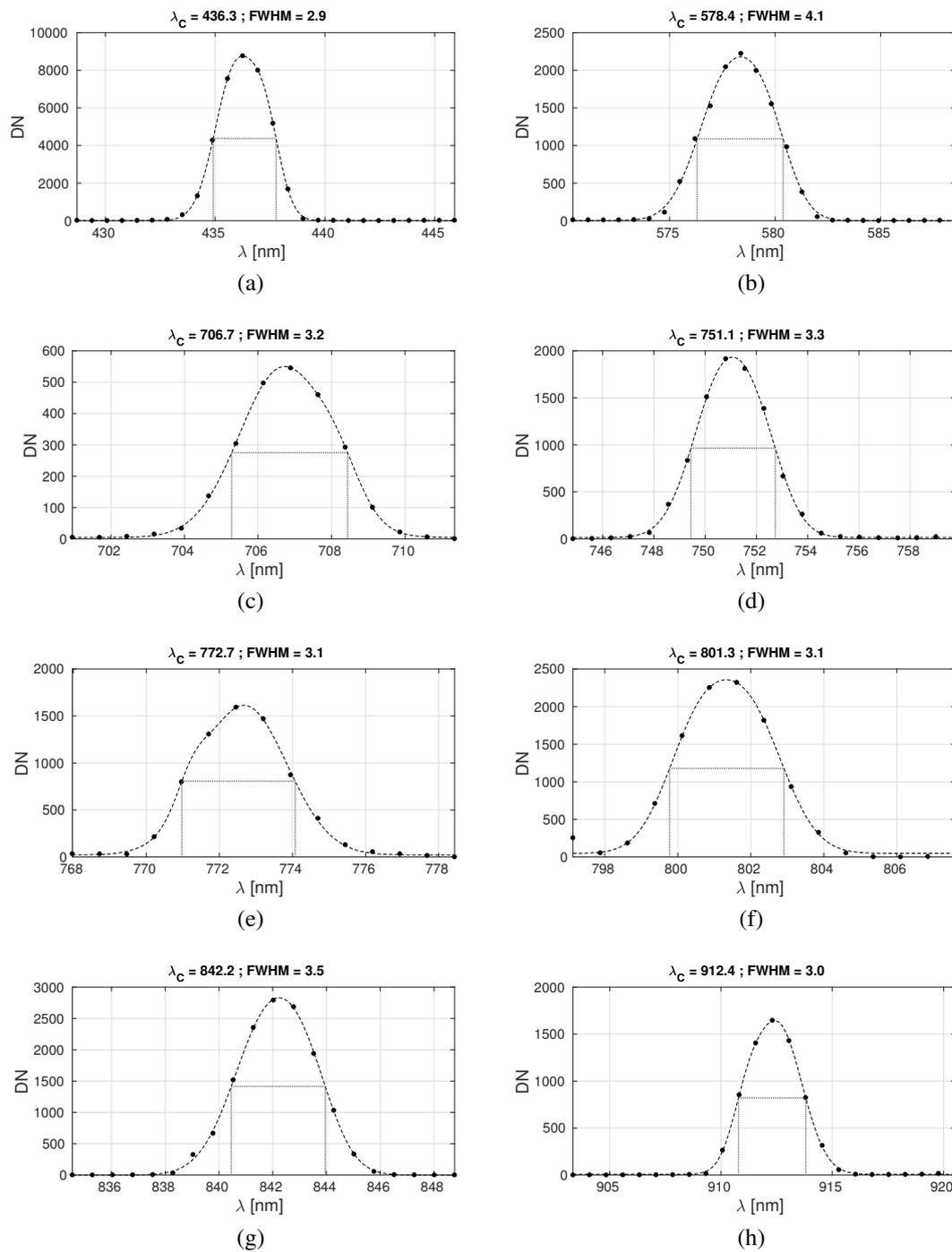


Fig. 6.18: Resolución espectral calculada con la lámpara de HgAr para distintas longitudes de onda centrales en la columna 800 del sensor.

Tabla 6.2: Resoluciones espectrales de la cámara hiperespectral.

(a) Monocromador		(b) Lámpara de descarga	
Res. [nm]	λ_C [nm]	Res. [nm]	λ_C [nm]
4.6	400.9	2.9	436.3
4.6	451.5	4.1	578.4
4.5	501.2	3.2	706.7
4.5	550.7	3.3	751.1
4.4	600.4	3.1	763.8
4.2	650.2	3.1	772.7
4.3	700.4	3.0	794.9
4.3	750.5	3.1	801.3
4.2	800.7	3.3	811.6
3.9	850.8	3.2	826.7
4.0	900.6	3.5	842.2
3.7	950.2	3.1	852.3
3.7	999.3	3.0	912.4

6.3.5 Bandas espectrales efectivas y rango espectral

Un parámetro característico de las cámaras hiperespectrales es la cantidad de bandas efectivas que posee, la cual se determina con la siguiente ecuación:

$$N_{bandas} = \frac{\text{rango espectral}}{\text{resolución espectral}}, \quad (6.7)$$

donde N_{bandas} es el número de bandas del instrumento. Para determinar N_{bandas} , se utiliza el dato del peor caso de resolución espectral calculado. Por otro lado, el rango espectral de la cámara se determina buscando la mínima y la máxima longitud de onda que el instrumento puede detectar. Para esto, se analizaron los espectros de las lámparas de descarga observados por la cámara y se identificaron aquellas líneas que se encuentran más hacia los extremos del espectro. Las coordenadas de estas líneas en longitud de onda corresponden a los extremos del rango espectral de la cámara. En la Fig. 6.19 se muestran estas líneas espectrales para el caso de la lámpara de Helio, ya que es la que presenta los picos o líneas espectrales más extremas.

El número de bandas queda definido entonces por el rango espectral de la cámara y la peor resolución espectral, por lo tanto se calcula lo siguiente:

$$N_{bandas} = \frac{1080 - 390}{4.1} = 168, \quad (6.8)$$

donde el peor caso dio como resultado una resolución espectral de 4.1nm, con lo cual se obtienen 168 bandas efectivas.

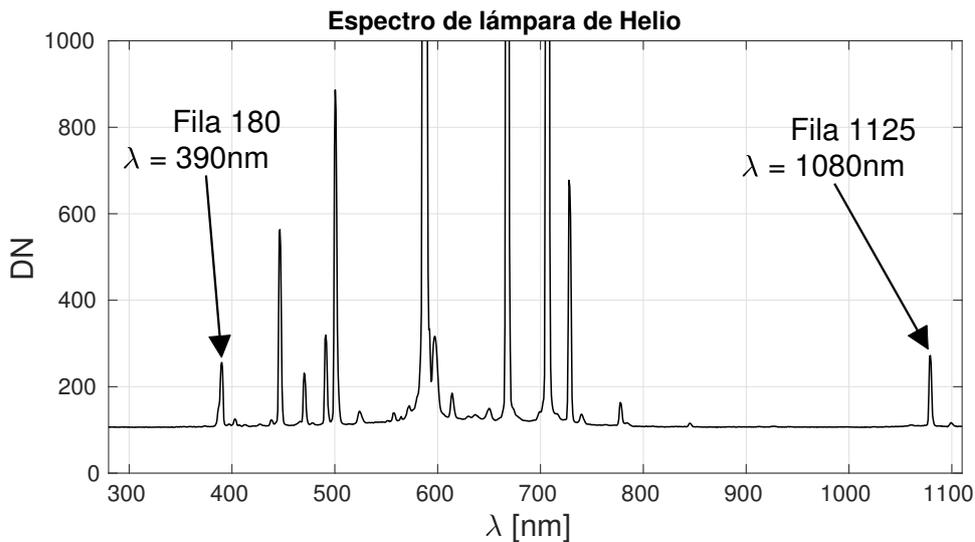


Fig. 6.19: Rango espectral determinado a partir de la lámpara de Helio.

El fabricante de la cámara especifica en su Test Report los siguientes datos [51]:

- Resolución espectral mínima a $912.3nm$: $3.13nm$.
- Rango espectral: $259nm$ a $1138nm$.
- Polinomio de calibración: $y = 3.9199 \times 10^{-5} x^2 + 0.68622 x + 258.214$.

Al calcular el número de bandas de la cámara a partir de estos datos, se obtiene un total de 234 bandas efectivas, valor superior al obtenido en este trabajo. Sin embargo, es importante notar que estos valores consideran la totalidad de las filas del sensor CCD, incluso aquellas que no están siendo iluminadas por el espectrógrafo, por lo cual el rango espectral y el número de bandas efectivas que se obtienen a partir de los datos del Test Report no son representativos.

El número de bandas que tiene la cámara VNIR y el rango espectral que cubre es evidentemente menor al especificado por el fabricante.

6.4 Resumen de las características espectrales

En la Tabla 6.3 se resumen las características espectrales de la cámara hiperespectral determinadas en el presente capítulo, y se realiza la comparación con las especificaciones dadas por el fabricante, extraídas del Test report de la cámara VNIR [51].

El rango espectral determinado es más pequeño en comparación al dado por el fabricante. Esto se debe a que los datos utilizados por el fabricante para obtener el rango espectral consideran las 1200 filas del sensor, sin tener en cuenta que, cómo se describió en la Subsección 3.1.3, existen filas sin iluminar en el sensor CCD. Lo mismo sucede con el cálculo de la cantidad de bandas espectrales efectivas de la cámara, ya que se

considera el rango obtenido mediante la consideración de las 1200 filas del sensor, por esta razón el número real de bandas espectrales resultó ser menor al especificado.

Tabla 6.3: Características espectrales de la cámara.

Parámetro	Valor obtenido	Valor especificado por el fabricante
Rango espectral	$390nm - 1080nm$	$259nm - 1138nm$
Resolución espectral (mín)	$4.1nm$	$3.75nm$
Cantidad de bandas espectrales efectivas	168	234
Smile máximo	$0.6nm$	No especifica

La resolución espectral obtenida en este trabajo, en cambio, es peor que la dada en el Test Report de la cámara. En dicho documento no dan especificaciones de cómo se realizó este análisis, pero una causa posible de esto se puede deber a diferencias en los modelos de ajuste de las líneas espectrales utilizados.

En cuanto al smile, el fabricante no da especificaciones de ningún tipo.

Calibración radiométrica

Mediante la calibración espectral, se logró establecer la correspondencia entre la coordenada de cada píxel y su longitud de onda. El siguiente paso para obtener una cámara hiperespectral completamente calibrada consiste en establecer la correspondencia entre los DN obtenidos por cada detector y la variable física que se está midiendo, en este caso la radiancia espectral.

En el presente capítulo se describe los modelos matemáticos, procedimientos y resultados obtenidos al realizar la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral. Al final del capítulo se describe también los pasos a seguir para aplicar las calibración espectral y radiométrica a las imágenes capturadas por la cámara.

7.1 Modelo matemático y procedimiento de calibración

En el Capítulo 5 se presentó la ecuación (5.5) que representa el modelo matemático propuesto de la cámara. En este capítulo se incorpora un termino más, el cual corresponde a la transmitancia de la lente objetivo, de forma que dicha ecuación tiene ahora la siguiente forma:

$$\mu_y = \mu_{y,dark} + K \eta_q k_f A \eta_e \tau_l t_{int} L_\lambda, \quad (7.1)$$

donde τ_l es la transmitancia de la lente objetivo. Al igual que se hizo en el Capítulo 5, se condensan las constantes de la ecuación (7.1) en una única constante K_t de la siguiente forma:

$$\mu_y = \mu_{dark} + K_t t_{int} L_\lambda, \quad (7.2)$$

donde K_t es el producto de las constantes $K \eta_q k_f A \eta_e \tau_l$ (ver Sección 5.1), la cual es función de la longitud de onda.

Con el objetivo de realizar la calibración radiométrica de la cámara, se realiza una inversión de la ecuación (7.2) para despejar la radiancia espectral, quedando de la

siguiente forma:

$$L_\lambda = \frac{\mu_y - \mu_{dark}}{K_t t_{int}} = \frac{\overbrace{1}^{a_{i,j}}}{K_t t_{int}} \mu_y + \frac{-\mu_{dark}}{\underbrace{K_t t_{int}}_{b_{i,j}}}, \quad (7.3)$$

donde se puede ver que la radiancia espectral está dada por una ecuación lineal donde las constantes $a_{i,j}$ y $b_{i,j}$ representan a la pendiente y la ordenada al origen, respectivamente para el píxel de la fila i y la columna j . Se ve en esta ecuación que la radiancia espectral es función de dos variables: el tiempo de integración y el número digital μ_y del píxel.

El primer paso del procedimiento de calibración radiométrica consiste en la captura de un conjunto de imágenes con la cámara frente a la esfera integradora para diferente cantidad de lámparas encendidas al mismo tiempo, desde 1 hasta 8.

Se debe seleccionar un tiempo de integración para realizar la captura de imágenes teniendo en cuenta dos cosas: la primera es la aplicación en la cual será utilizada la cámara, la cual determina el rango de tiempos de integración que deberán ser utilizados (ver Sección 2.3); la segunda es el nivel de señal, ya que se deben obtener niveles de señales lo suficientemente grandes como para que la dispersión de los datos debida al ruido no afecte en gran medida a los ajustes lineales realizados en cada píxel.

Para cada uno de los píxeles del sensor se realiza un ajuste lineal de las radiancias espectrales medidas con el espectrorradiómetro en función de los DN obtenidos. Este procedimiento permite obtener dos matrices, una matriz **A** que contiene las pendientes de los ajustes, y otra matriz **B** que contiene las ordenadas:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,J} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I,1} & a_{I,2} & \dots & a_{I,J} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,J} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{I,1} & b_{I,2} & \dots & b_{I,J} \end{pmatrix},$$

donde $I = 946$ es el número de filas efectivas que tiene el sensor, mientras que $J = 1600$ es el número de columnas (ver Subsección 6.3.5). De esta forma, la radiancia espectral del sensor se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{L}_\lambda = (\mathbf{A} \otimes \mathbf{U}_y) \oplus \mathbf{B}, \quad (7.4)$$

donde los símbolos \otimes y \oplus representan a la multiplicación y la suma componente a componente, respectivamente, mientras que las matrices \mathbf{L}_λ y \mathbf{U}_y son las matrices de radiancias y DN que están definidas de la siguiente forma:

$$\mathbf{L}_\lambda = \begin{pmatrix} L_\lambda(1,1) & L_\lambda(1,2) & \dots & L_\lambda(1,J) \\ L_\lambda(2,1) & L_\lambda(2,2) & \dots & L_\lambda(2,J) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_\lambda(I,1) & L_\lambda(I,2) & \dots & L_\lambda(I,J) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{U}_y = \begin{pmatrix} \mu_y(1,1) & \mu_y(1,2) & \dots & \mu_y(1,J) \\ \mu_y(2,1) & \mu_y(2,2) & \dots & \mu_y(2,J) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_y(I,1) & \mu_y(I,2) & \dots & \mu_y(I,J) \end{pmatrix}.$$

7.2 Configuración del instrumental y la cámara

La configuración de medición utilizada es la misma que se implementó para el análisis de la linealidad del sensor, la cual se muestra nuevamente en la Fig. 7.1. Se colocó la cámara hiperespectral frente a al puerto de salida de la esfera integradora y se colocó la lente objetivo de la cámara. Se realizó la alineación de la cámara para que quede justo en el centro del puerto de salida de la esfera.

Se encendieron las lámparas de la esfera integradora de a una a la vez, capturando en cada caso un conjunto de 50 imágenes para cada tiempo de integración seleccionado. Cada conjunto de imágenes se promedian para obtener una imagen promedio, la cual es utilizada para realizar el procesamiento de los datos.



Fig. 7.1: Configuración utilizada para capturar imágenes con la cámara VNIR frente a la esfera integradora. (a) Vista lateral; (b) Vista lejana del sistema soporte, cámara y esfera.

7.3 Resultados obtenidos

Como se dijo en las secciones anteriores, la captura de imágenes frente a la esfera integradora se realiza configurando un tiempo de integración seleccionado a partir del rango de tiempos generalmente utilizados en una determinada aplicación y tratando de obtener el mayor nivel de señal posible en la mayor cantidad de filas del sensor.

Tal como se explicó en la Subsección 5.2.4, resulta complicado cubrir todo el rango dinámico del sensor en cada una de las filas del sensor debido a la eficiencia cuántica del sensor y al perfil de radiancias espectrales generado por la esfera integradora. Por esta razón, se utiliza un caso particular seleccionado arbitrariamente para presentar los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento de calibración radiométrica.

El caso particular elegido consiste en utilizar un tiempo de integración de 5ms, seleccionado dentro del rango de tiempos de integración usualmente utilizados en aplicaciones (ver Sección 2.3) y tres lámparas de la esfera integradora encendida.

La Fig. 7.2 muestra una gráfica 3D de la imagen promedio capturada frente a la esfera, donde se grafica sólo la parte útil del sensor (ver Subsección 6.3.5), a la cual se le aplicó los polinomios de calibración espectral para convertir el número de fila a longitud de onda. En dicha imagen se puede observar el efecto producido por la respuesta de la lente objetivo, el cual produce una disminución en los DN hacia los bordes del sensor en el eje espacial. Este efecto es similar al vignetting, descrito ampliamente en la bibliografía [54, 71, 72] que ocasiona una pérdida de energía en la periferia del sistema óptico, lo cual produce una menor intensidad en los píxeles que se encuentran en los extremos del sensor. En el caso la cámara VNIR, este efecto se ve sólo en el eje espacial.

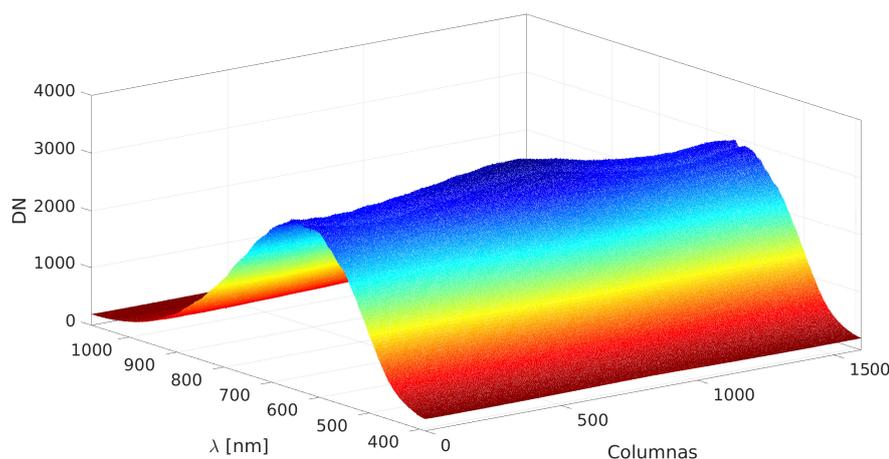


Fig. 7.2: Vista 3D de la imagen hiperespectral si calibrar. $t_{int} = 5ms$, 3 lámparas encendidas.

En la Fig. 7.3 se muestra la misma gráfica anterior pero en dos dimensiones, en donde se grafican los DN de la fila 600 en función de las columnas. En dicha figura se puede ver, además del vignetting, el efecto de ripple del cual se habló en la Sección 5.7, el cual produce una variación en los DN en el sensor, y que se encuentra “montado” sobre la respuesta de la lente objetivo que se observa en la figura.

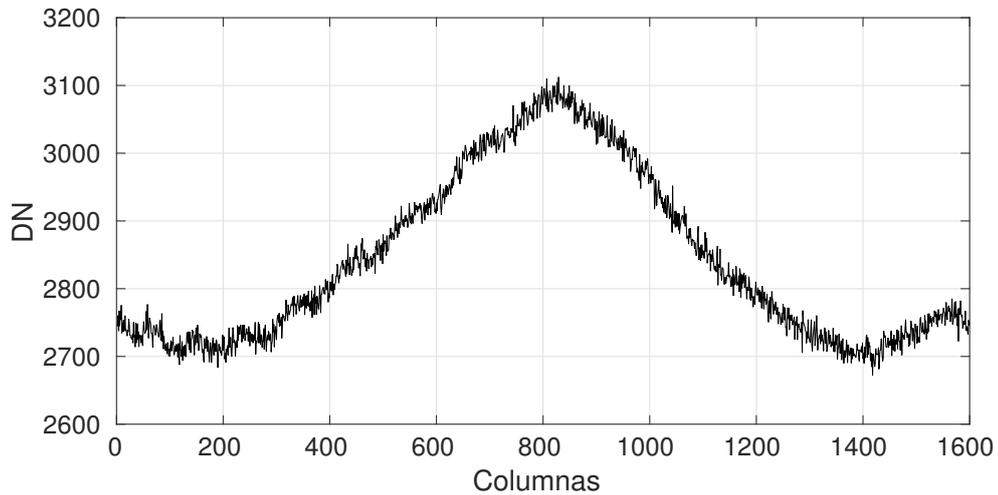


Fig. 7.3: Vignetting en la fila 600 del sensor ($t_{int} = 5ms$).

Al aplicar el procedimiento de calibración radiométrica explicado en la sección anterior, se obtienen las matrices de calibración radiométrica **A** y **B**. En las Fig. 7.4 y Fig. 7.5 se grafican estas matrices de coeficientes en función de las columnas y la longitud de onda. En dichas gráficas se puede notar cómo los coeficientes compensan el efecto de vignetting producido por la lente objetivo, lo cual evita tener que realizar una compensación previa a la calibración radiométrica.

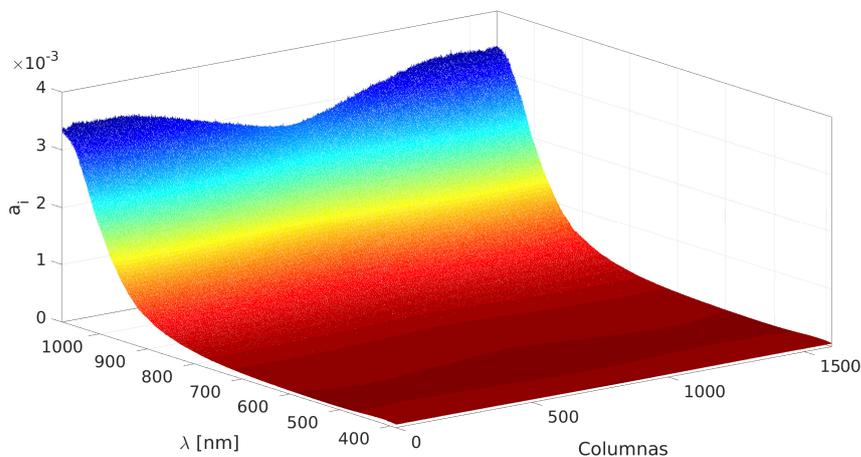


Fig. 7.4: Coeficientes de calibración a_i ($t_{int} = 5ms$).

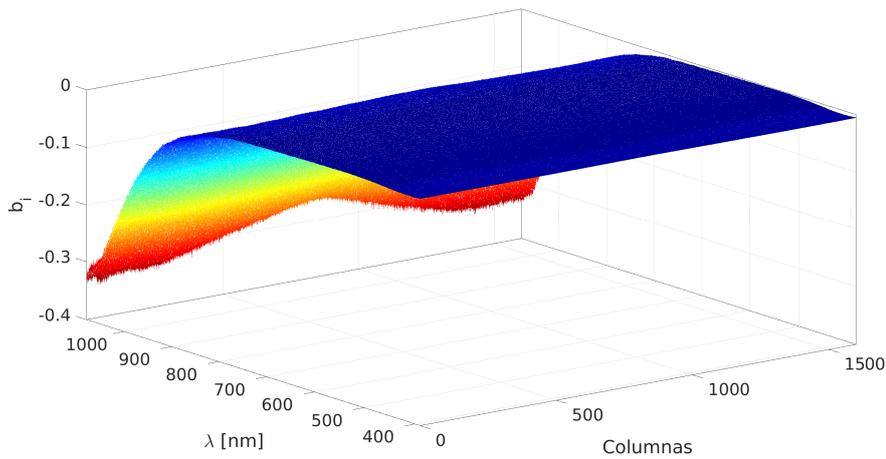


Fig. 7.5: Coeficientes de calibración b_i ($t_{int} = 5ms$).

En la Fig. 7.6 se realiza una gráfica bidimensional de los coeficientes obtenidos para la fila 600. En ella puede verse que los coeficientes, además de compensar el efecto del vignetting, compensan también el efecto del ripple descrito en la Sección 5.7, y que se observa también en la Fig. 7.3.

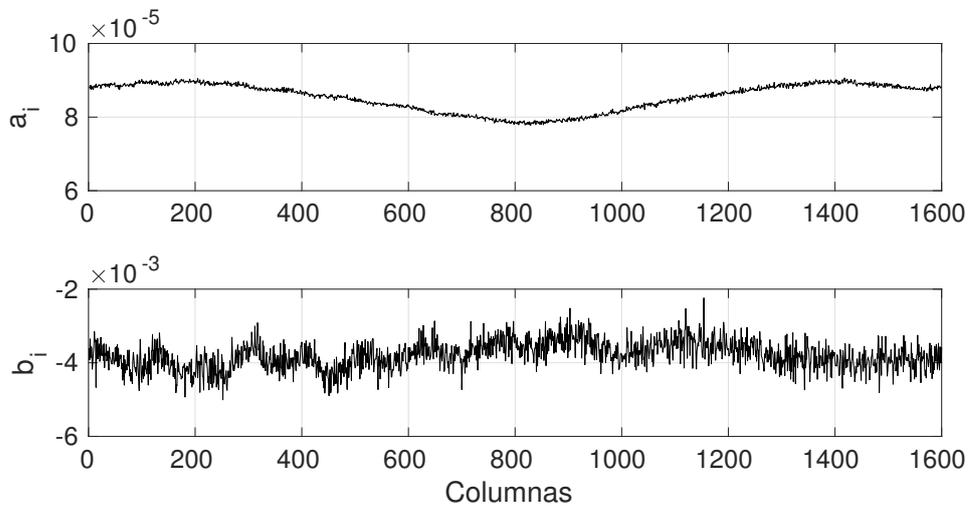


Fig. 7.6: Coeficientes de calibración para la fila 600 ($t_{int} = 5ms$).

Para realizar una verificación de la calibración radiométrica llevada a cabo, se aplican las matrices de calibración a la imagen de la Fig. 7.2, obteniendo la Fig. 7.7 donde se ve la superficie de radiancias espectrales calibradas en función de las columnas del sensor y la longitud de onda.

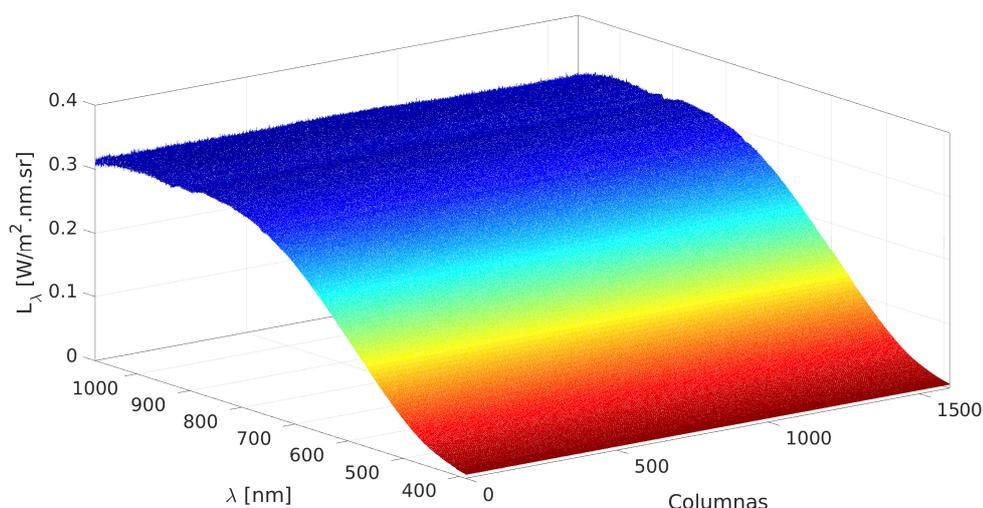


Fig. 7.7: Vista 3D de la calibración realizada. $t_{int} = 5ms$, 3 lámparas encendidas.

El error en la radiancia espectral L_λ se calcula realizando la propagación de errores en la ecuación (7.3), quedando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{L_\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 + 2 \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial a}\right) \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial b}\right) \sigma_{ab} + \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial \mu_y}\right)^2 \sigma_{\mu_y}^2}, \quad (7.5)$$

donde σ_a y σ_b son los errores en la determinación de los coeficientes de calibración obtenidos por el algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados; σ_{μ_y} es la desviación estándar de los DN obtenida en la Sección 5.3 ($\sigma_{\mu_y} = \sigma_y$); y σ_{ab} es la covarianza de los coeficientes a y b debida a la dependencia de dichos coeficientes, obtenida también por el algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados utilizado.

En la Fig. 7.8 se muestra una gráfica con las siguientes curvas obtenidas a partir de imágenes capturadas con la cámara frente a la esfera con una sola lámpara encendida: en negro la radiancia espectral medida con el espectrorradiómetro ($L_\lambda^{(m)}$); en rojo la radiancia espectral que resulta de aplicar las matrices de calibración a la imagen capturada $L_\lambda^{(c)}$; en azul la desviación estándar $\sigma_{L_\lambda^{(c)}}$ calculada a partir de la ecuación (7.5); y en la parte inferior de dicha figura se muestra la diferencia entre las curvas de radiancias espectrales medidas y calibradas ($L_\lambda^{(m)}$ es la curva de radiancias medidas con el espectrorradiómetro y $L_\lambda^{(c)}$ es la curva de radiancias obtenidas mediante el proceso de calibración). Se puede notar que el error de calibración aumenta para longitudes de onda superiores.

En la Fig. 7.9 se ve la misma gráfica que la Fig. 7.8 pero para el caso de 8 lámparas de la esfera encendidas. En este caso se ve que el error absoluto es menor respecto a la

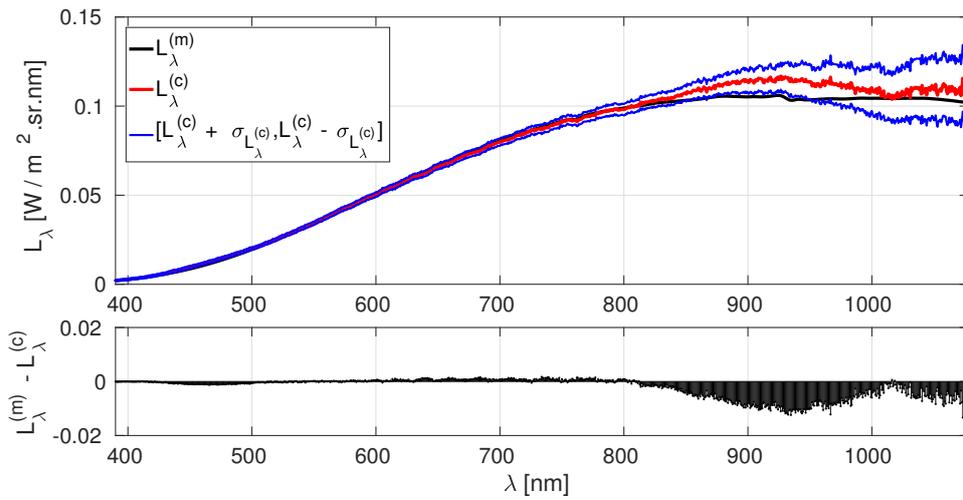


Fig. 7.8: Calibración realizada en una imagen con $t_{int} = 5ms$, y 1 lámpara encendida en la esfera (columna 800).

gráfica de la Fig. 7.8.

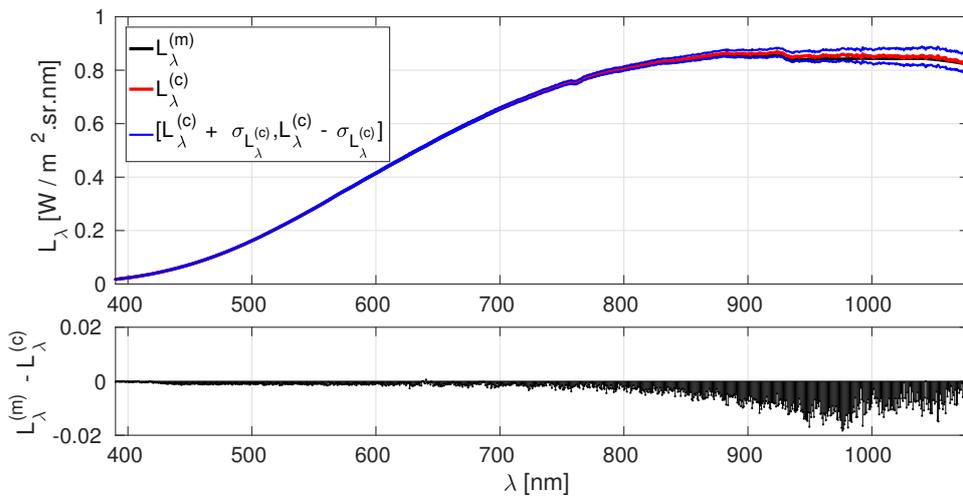


Fig. 7.9: Calibración realizada en una imagen con $t_{int} = 5ms$, y 8 lámparas encendidas en la esfera (columna 800).

El error de calibración relativo se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_{L_\lambda}}{L_\lambda^{(c)}} \times 100 \quad (7.6)$$

donde $L_\lambda^{(c)}$ es la radiancia espectral calibrada. La Fig. 7.10 muestra la curva del error de calibración relativo calculado con la ecuación anterior para el caso de 1 y 8 lámparas encendidas, a modo de comparación. Se puede ver que para el caso de las 8 lámparas, donde los valores de DN obtenidos son grandes en comparación con el ruido, el error

relativo de calibración es considerablemente menor, debido a que los niveles de señal son mayores.

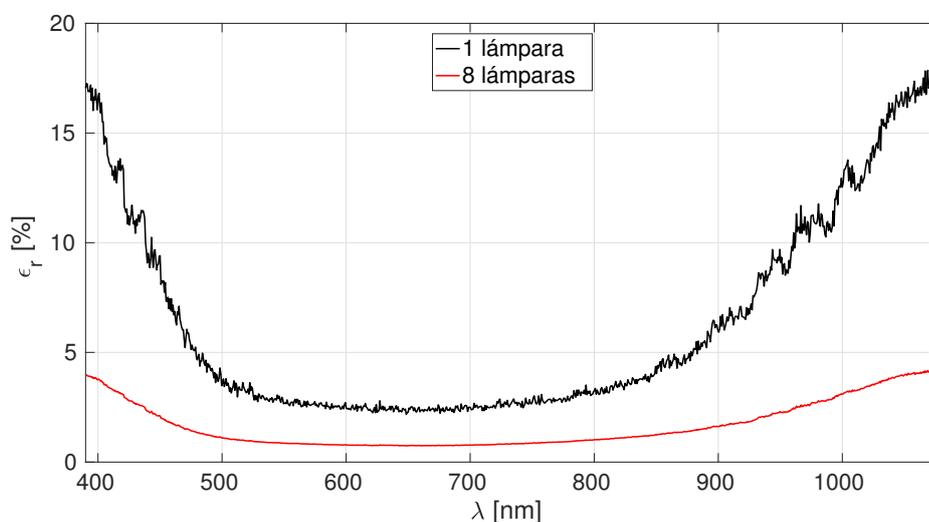


Fig. 7.10: Error relativo de la radiancia, 1 y 8 lámparas, 5ms. (columna 800).

Una vez obtenidos los coeficientes, se realiza el cálculo de la constante K_t para el caso de 8 lámparas encendidas y un tiempo de integración de 5ms, utilizando la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{1}{a t_{int}}, \quad (7.7)$$

donde la constante K_t se obtiene a partir de los coeficientes $a_{i,j}$ calculados mediante los ajustes lineales en cada detector. El error en K_t se calcula realizando la propagación de errores de la siguiente manera:

$$\sigma_{K_t} = \sqrt{\left(-\frac{1}{a^2 t_{int}}\right)^2 \sigma_a^2}, \quad (7.8)$$

donde se considera que el error en el tiempo de integración es cero. Aplicando las ecuaciones (7.7) y (7.8), se obtienen las gráficas que se muestran en la Fig. 7.11, donde se grafica la variación de K_t y su error en función de la longitud de onda.

Cada conjunto de coeficientes $a_{i,j}$ y $b_{i,j}$ y la constante K_t para cada uno de los píxeles del sensor, deben ser calculados para cada tiempo de integración. Esto hace necesario realizar la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral al comienzo de cada campaña de mediciones al exterior, para los tiempos de integración que serán utilizados durante dicha campaña.

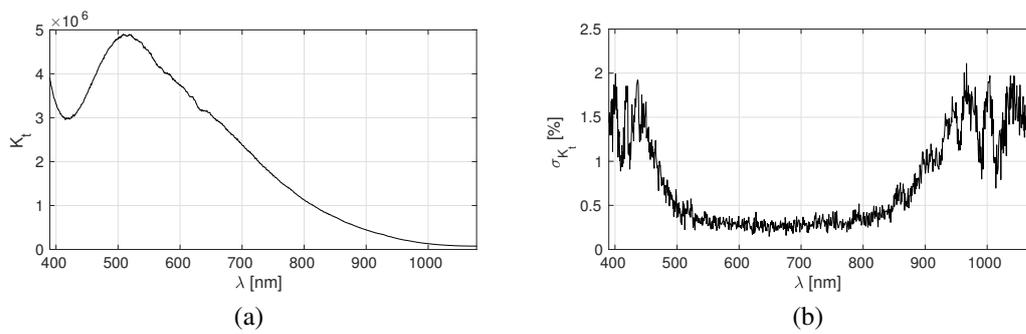


Fig. 7.11: Variación de la constante K_t en función de la longitud de onda para la columna 800 del sensor y 8 lámparas de la esfera integradora encendidas. (a) Constante K_t ; (b) Error porcentual σ_{K_t} .

Conclusiones y trabajo futuro

En esta tesis se presentó la modelización, caracterización, calibración espectral y radiométrica de la cámara hiperespectral VNIR, uno de los dos instrumentos que conforman al sistema de captura y procesamiento de imágenes hiperespectrales aerotransportado de la CONAE.

El presente capítulo se divide en dos partes: en la primera se presentan las conclusiones del trabajo realizado, mientras que en la segunda se describe de forma general las líneas de trabajo futuro que se abrieron a partir de este trabajo.

8.1 Conclusiones

Las conclusiones más importantes de este trabajo se enumeran a continuación:

- Se logró realizar la caracterización y modelización de la cámara hiperespectral VNIR, lo cual permitió identificar sus parámetros principales y determinar cómo varían en determinadas condiciones de operación.
- El software desarrollado para configuración, adquisición y almacenamiento de imágenes permitió reducir los tiempos de las campañas de mediciones en el laboratorio, ya que con una mínima intervención del usuario se pudo adquirir las imágenes con la cámara hiperespectral de forma automática, quedando listas para su procesamiento y análisis.
- Se diseñaron e implementaron las configuraciones del laboratorio de óptica para realizar las mediciones con cada uno de los instrumentos disponibles.
- La calidad del instrumental de laboratorio determina la precisión con la cual serán realizadas las mediciones, por lo tanto la caracterización de este instrumental permitió conocer el estado de éstos y determinar cómo pueden ser utilizados para caracterizar y calibrar la cámara.

- Una vez caracterizado el instrumental de laboratorio e implementadas las configuraciones de medición, se desarrollaron los procedimientos para realizar estas mediciones y las herramientas para procesar los datos obtenidos durante las campañas de medición.
- Se realizó la calibración espectral de la cámara VNIR y se determinó el error de calibración, obteniendo errores absolutos en longitud de onda menores a $1nm$, utilizando para su determinación la lámpara de Mercurio-Argón.
- Se realizó la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral utilizando las mediciones obtenidas con el espectrorradiómetro frente a la esfera integradora. Los resultados obtenidos muestran que la precisión obtenida en la calibración radiométrica de las imágenes depende fuertemente del nivel de señal, por lo que para niveles bajos de señal el error relativo será varias veces mayor que para niveles altos.

8.2 Trabajo futuro

El presente trabajo involucra las experiencias y análisis más relevantes para la caracterización de la cámara hiperespectral VNIR. Sin embargo, se propone como trabajo futuro profundizar algunos temas, tales como el análisis de la linealidad de los detectores y linealización de la respuesta en los extremos del rango espectral, análisis más detallado de las no uniformidades, otras aberraciones en el sistema óptico, entre otras.

Se propone también realizar tareas que no se hicieron en este trabajo por limitaciones en tiempo e instrumental, tales como análisis de Straylight, smear en el sensor, calibración geométrica de la cámara, entre otros.

Por otro lado, el siguiente paso para obtener un sistema de captura y procesamiento de imágenes hiperespectrales aerotransportado funcional, consiste en realizar la modelización y caracterización de la cámara SWIR, aplicando los procedimientos desarrollados en la presente tesis como base, y realizar los ajustes necesarios a estos procedimientos para adaptarlos a la calibración espectral y radiométrica de esta otra cámara hiperespectral.

Anexos

Determinación de la cantidad de píxeles a promediar

En el Capítulo 5 se realizó el cálculo para determinar la constante de conversión K_{ADC} , el ruido de lectura σ_{read} y el valor de saturación del sensor μ_{sat} , a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_y^2[DN^2] = \frac{\sigma_d^2}{K_{ADC}^2} + \sigma_q^2 + \frac{1}{K_{ADC}}(\mu_y - \mu_{y,dark}), \quad (A.1)$$

donde σ_y^2 es la varianza de la señal y $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ es el nivel de señal sin offset. Se aplicaron las siguientes ecuaciones para determinar los valores de ruido y señal:

$$\mu_y[DN] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Y[m], \quad (A.2)$$

$$\mu_{y,dark}[DN] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Y^{dark}[m], \quad (A.3)$$

$$\sigma_y^2[DN^2] = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M (Y^A[m] - Y^B[m])^2, \quad (A.4)$$

donde Y^A e Y^B son las imágenes capturadas con la cámara frente a la esfera integradora, mientras que Y^{dark} es un dark frame capturado con la cámara tapada.

Para determinar la cantidad M de píxeles a promediar, se analiza la imagen que se muestra en la Fig. A.1, donde se grafica la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ en función de las filas y el tiempo de integración del sensor CCD. En dicha figura se puede ver que las filas centrales del sensor saturan para tiempos de integración menores que las filas de los extremos. La razón de esto tiene que ver con la eficiencia cuántica del sensor y la radiancia espectral de la esfera integradora, tal como se explicó en la Subsección 5.2.4.

En base a la Fig. A.1, la determinación de las filas que serán promediadas para realizar los cálculos de los parámetros de la cámara se realiza considerando sólo la parte

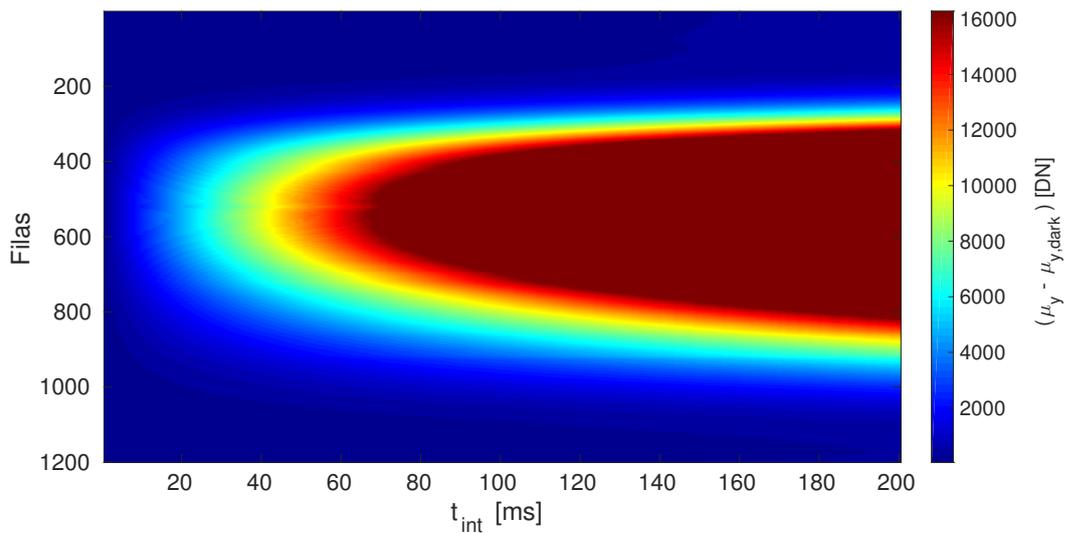


Fig. A.1: Gráfica de la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$.

central del sensor (en el eje espectral), donde la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ alcanza el valor de saturación aproximadamente en el mismo tiempo de integración.

En la Fig. A.2 la zona central ampliada de la Fig. A.1, donde se puede ver que en este rango de filas del sensor la señal satura prácticamente en el mismo tiempo de integración.

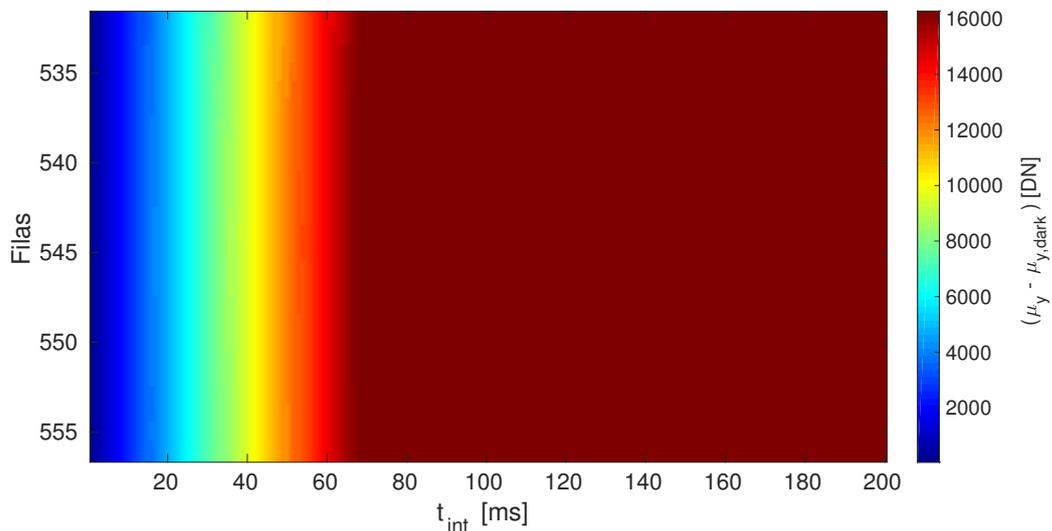


Fig. A.2: Gráfica de la señal $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ ampliada.

De esta forma, se selecciona arbitrariamente el rango de filas cuyos píxeles serán utilizados para realizar los promedios desde la fila 536 a la 555, dando un total de 32000 píxeles para promediar.

Líneas espectrales de las lámparas de descarga

Las longitudes de onda de las líneas espectrales de las lámparas de descarga de gases de baja presión analizadas en este trabajo se muestran en las Tabla B.1, Tabla B.2 y Tabla B.3 [69, 70].

Se resaltaron en color Gris las líneas espectrales correspondientes a los picos de la lámpara de Mercurio-Argón, los cuales fueron utilizados para realizar la calibración espectral de la cámara hiperespectral VNIR.

Tabla B.1: Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm].

Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]
Ar	394.9	Ar	418.19	H	434.05
H	397.00	Ar	419.1	Ar	434.52
N	399.5	Ar	419.8	Hg	434.75
He	400.93	Ar	420.07	Kr	435.14
He	402.62	N	424.19	Hg	435.84
He	402.64	Ar	425.12	Kr	436.26
N	404.13	Ar	425.94	Kr	437.61
Ar	404.44	Ar	426.63	He	438.79
Hg	404.66	Ar	427.22	Kr	440.00
Hg	407.78	Ar	427.4	Kr	442.52
H	410.17	Kr	428.3	He	443.75
He	412.08	Ar	430.01	N	444.7
He	412.1	Kr	431.96	Kr	445.39
He	414.38	Ar	432.00	Kr	446.37
Ar	415.86	Ar	433.36	He	447.15
Ar	416.4	Hg	433.92	He	447.16

Tabla B.2: Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm] (Continuación).

Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]
Kr	450.24	N	567.6	N	648.27
N	460.15	N	567.95	Ne	650.65
N	460.72	N	568.62	Ne	653.29
N	462.14	N	571.07	He	656.01
N	463.05	Ne	574.83	H	656.27
N	464.3	N	575.25	H	656.28
He	468.54	Ne	576.44	Ne	659.9
Ne	470.44	Hg	576.96	N	661.06
He	471.31	Hg	579.96	Ne	703.24
He	471.34	Ne	580.45	Ne	705.3
N	480.33	Ne	582.02	Ne	705.91
H	486.13	Kr	583.29	He	706.52
H	486.14	Nr	585.25	He	706.57
Hg	491.6	Kr	587.09	Ar	706.72
He	492.19	He	587.56	Ar	714.7
N	496.4	He	587.59	Ne	717.39
N	499.44	Kr	587.99	Kr	722.41
N	500.15	Ne	588.19	Ne	724.52
N	500.51	Ne	590.25	Ar	727.29
N	500.73	N	593.18	He	728.13
N	501.06	N	594.16	Kr	728.98
He	501.57	Ne	594.48	Ar	737.21
Ne	503.78	Ne	597.55	Ar	738.4
N	504.51	Ne	598.79	N	742.36
He	504.77	Kr	599.39	Kr	742.55
Ne	508.04	Kr	601.22	Ne	743.89
Ne	511.65	Ne	603.00	N	744.23
Ne	514.5	Kr	605.61	N	746.83
Ne	520.39	Ne	607.43	Ne	747.24
Ne	533.08	Ne	609.62	Kr	748.61
Ne	534.11	Ne	612.85	Ne	748.89
Ne	534.33	Ne	614.31	Ar	750.39
Ne	540.06	Ne	616.36	Ar	751.46
He	541.15	Ne	618.22	Ne	753.58
Hg	546.07	Ne	621.73	Ne	754.41
Kr	549.09	Ne	626.65	Kr	758.74
Kr	550.07	Ne	630.48	Kr	760.15
Kr	556.22	Ne	633.44	Ar	763.51
Kr	557.03	Ne	638.3	Kr	768.52
Kr	558.04	Ne	640.23	Kr	769.45
Kr	564.96	Ar	641.63	Ar	772.38
Ne	565.67	Kr	642.1	Kr	774.66
N	566.66	Kr	645.63	He	781.61
Kr	567.25	N	648.2	Kr	785.48

Tabla B.3: Longitudes de onda de las líneas espectrales teóricas de lámparas de descarga de gases de baja presión [nm] (Continuación).

Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]	Elemento	λ [nm]
Kr	791.34	Ne	702.41	N	862.92
Ne	794.32	Ar	703.03	N	865.59
Ar	794.62	Ar	811.53	N	868.03
Ar	800.62	Ne	813.64	N	868.34
Ar	801.48	N	818.49	N	868.62
Kr	805.95	N	818.8	N	870.32
Ne	808.25	N	821.63	N	871.17
Kr	810.01	N	822.31	N	871.88
Ar	810.37	N	824.24	Kr	877.67
Kr	810.44	Kr	826.32	Kr	892.87
Kr	811.29	Ar	826.45	He	906.32
Ne	665.21	Kr	828.11	Ar	912.30
Ar	667.73	Kr	829.81	He	921.03
He	667.82	Ne	830.03	Ar	922.45
Ne	667.83	He	836.17	N	938.68
Kr	669.92	Ne	837.76	N	939.3
Ne	671.7	Ar	840.82	He	946.36
Ar	675.28	Ne	841.84	He	951.66
Kr	681.31	Ar	842.46	He	952.62
He	686.75	N	843.87	He	952.92
Ar	687.13	Ne	849.54	H	954.6
Kr	690.47	Kr	850.89	He	960.34
Ne	692.95	Ar	852.14	He	970.26
Ar	693.77	N	856.77	He	1002.77
Ar	696.54	N	859.4	H	1004.94

Bibliografía

- [1] W. G. Rees, *Physical Principles of Remote Sensing (Topics in Remote Sensing)*. Cambridge University Press, 2001.
- [2] *High Performance Silicon Imaging: Fundamentals and Applications of CMOS and CCD sensors (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials)*. Woodhead Publishing, 2014.
- [3] H. Seth, M. P. Detroja, D. Padmanabhan, V. Raj, A. Kumar, and S. S. Sarkar, “Pre-flight radiometric and spectral calibration of resourcesat-2a-LISS3 payload,” in *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV* (X. J. Xiong, S. A. Kuriakose, and T. Kimura, eds.), SPIE, may 2016.
- [4] J. Jablonski *et al.*, “Best practices in passive remote sensing VNIR hyperspectral system hardware calibrations,” in *Hyperspectral Imaging Sensors: Innovative Applications and Sensor Standards 2016* (D. P. Bannon, ed.), SPIE-Intl Soc Optical Eng, may 2016.
- [5] CONAE, “Plan Espacial Nacional Argentina en el espacio,” 2004-2015.
- [6] “Proyecto cámara hiperespectral aerotransportada.” <http://ufs.conae.gov.ar/mis.html>. Accesado: 27-03-2017.
- [7] G. Vane *et al.*, “Spectral and radiometric calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer,” in *Imaging Spectroscopy II* (G. Vane, ed.), SPIE-Intl Soc Optical Eng, jan 1987.
- [8] G. Vane *et al.*, “The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS),” *Remote Sensing of Environment*, vol. 44, pp. 127–143, may 1993.
- [9] E. Chuvieco, *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel, S.A., 2010.
- [10] R. B. Smith, *Introduction to Hyperspectral Imaging*. MicroImages, Inc, Jan 2012.
- [11] A. Camacho-Velasco, C. A. Vargas-García, F. A. Rojas-Morales, S. F. Castillo-Castelblanco, and H. Arguello-Fuentes, “Aplicaciones y retos del sensado

- remoto hiperespectral en la geología colombiana,” *REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA*, vol. 24, p. 17, sep 2015.
- [12] D. Nouri, Y. Lucas, and S. Treuillet, “Calibration and test of a hyperspectral imaging prototype for intra-operative surgical assistance,” *Proc. SPIE 8676, Medical Imaging 2013: Digital Pathology*, Feb 2013.
- [13] T. H. Kurz, S. J. Buckley, and J. A. Howell, “Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial lidar scanning applied to rock characterisation at centimetre scale,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XXXIX-B5, pp. 417–422, jul 2012.
- [14] S. M. Arafat, M. A. Aboelghar, and E. F. Ahmed, “Crop discrimination using field hyper spectral remotely sensed data,” *ARS*, vol. 02, no. 02, pp. 63–70, 2013.
- [15] M. Zhang, Z. Qin, X. Liu, and S. L. Ustin, “Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in california, USA, using hyperspectral remote sensing,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 4, pp. 295–310, nov 2003.
- [16] G. Joseph, *Building Earth Observation Cameras*. CRC Press, 2015.
- [17] R. W. Marcus Borengasser, William S. Hungate, *Hyperspectral Remote Sensing*. CRC Press, 1 ed., 2004.
- [18] M. T. Eismann, A. D. Stocker, and N. M. Nasrabadi, “Automated hyperspectral cueing for civilian search and rescue,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, pp. 1031–1055, jun 2009.
- [19] G. A. Shaw and H. hua K. Burfke, “Spectral imaging for remote sensing,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 14, no. 1, 2003.
- [20] E. Castillo, R. Pereda, J. M. D. L. Ruiz, and J. M. Sánchez, “La corrección atmosférica en la teledetección aerotransportada,” *XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 409–412, Sep 2009.
- [21] M. Eismann, *Hyperspectral Remote Sensing (SPIE Press Monograph Vol. PM210)*. SPIE Press, 2012.
- [22] G. Vane, R. O. Green, T. G. Chrien, H. T. Enmark, E. G. Hansen, and W. M. Porter, “The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS),” *Remote Sensing of Environment*, vol. 44, pp. 127–143, may 1993.
- [23] T. G. Chrien, R. O. Green, and M. L. Eastwood, “Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer,” in *Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment* (G. Vane, ed.), SPIE, sep 1990.
- [24] G. Vane, T. G. Chrien, E. A. Miller, and J. H. Reimer, “Spectral and radiometric

- calibration of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer,” NASA, nov 1987.
- [25] M. A. Folkman, J. Pearlman, L. B. Liao, and P. J. Jarecke, “EO-1/hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration,” in *Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere* (W. L. Smith and Y. Yasuoka, eds.), SPIE-Intl Soc Optical Eng, feb 2001.
- [26] J. Pearlman, C. Segal, L. B. Liao, S. L. Carman, M. A. Folkman, W. Browne, L. Ong, and S. G. Ungar, “Development and operations of the EO-1 hyperion imaging spectrometer,” in *Earth Observing Systems V* (W. L. Barnes, ed.), SPIE, nov 2000.
- [27] L. Guanter *et al.*, “The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation,” *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 8830–8857, jul 2015.
- [28] *Digital Airborne Camera: Introduction and Technology*. Springer, 2009.
- [29] M. E. Pereyra, “Desarrollo de una metodología para la calibración radiométrica de cámaras hiperespectrales,” *Tesis de posgrado - Maestría en Tecnología Satelital*, Sep 2017.
- [30] *HYPERSPETRAL FORE LENSES*. Hiperspectral fore lenses for VNIR and SWIR.
- [31] E. Hecht, *Optics (4th Edition)*. Addison-Wesley, 2001.
- [32] J. James, *Spectrograph Design Fundamentals*. Cambridge University Press, 2007.
- [33] *Inspector VIS and VNIR*. VIS/NIR spectrographs.
- [34] C. Palmer, *Diffraction Grating Handbook*. Newport Corporation, 2005.
- [35] Ehe, *How to attach, align and calibrate spectrograph to camera?*, 2015. Technical note TN-0031.
- [36] *pco.camera - User's Manual*, 2004. User manual for pco.1200/1600/2000/4000 cameras.
- [37] *KODAK KAI-2001/KODAK KAI-2001M/KODAK KAI-2001CM Image Sensor*, 2003. Device Performance Specification.
- [38] J. R. Janesick *et al.*, “Scientific charge-coupled devices,” *Optical Engineering*, vol. 26, aug 1987.
- [39] *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras (Optical Science and Engineering)*. CRC Press, 2016.
- [40] P. Centen, “Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) and charge coupled device (CCD) image sensors in high-definition TV imaging,” in *High Performance Silicon Imaging*, pp. 373–410, Elsevier, 2014.

- [41] *Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers*, 2000. CameraLink Specifications.
- [42] PCO, *pco.sdk*, 2010. pco.sdk description.
- [43] *Analytical Spectral Devices, Inc - Technical Guide*, 1999. Spectroradiometers FieldSpec.
- [44] *FieldSpec Pro*, 2002. User's Guide Guide.
- [45] *CCS Series Spectrometer*, 2017. Operation Manual.
- [46] *Integrating Sphere Theory and Applications*. Technical Guide.
- [47] "Uss-4000 uniform calibration source." http://host.web-print-design.com/labsphere/products/integrating_sphere_systems/uss4000.htm. Accesado: 27-03-2017.
- [48] *Calibration Certificate*, 1997. USS-4000 Calibration Certificate.
- [49] M. V. Murty, "Theory and principles of monochromators, spectrometers and spectrographs," *Optical Engineering*, vol. 13, feb 1974.
- [50] *Digikrom DK 240 1/4 Meter - DK 242 Double 1/4 Meter - DK 480 1/2 Meter Monochromator/Spectrograph*, 2009. User Manual.
- [51] Specim, *Spectral camera test report*.
- [52] *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*. CRC Press, 2009.
- [53] ORIEL, *Pen-Ray Line Sources*. Application note.
- [54] J. E. Greivenkamp, *Field Guide to Geometrical Optics (SPIE Vol. FG01)*. SPIE Publications, 2003.
- [55] E. M. V. Association, "Emva standard 1288 - standard for characterization of image sensors and cameras," December 2016.
- [56] J. R. Janesick, *Photon Transfer*. SPIE-Intl Soc Optical Eng, aug 2007.
- [57] B. Jähne, *Digital Image Processing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6 ed., 2005.
- [58] PCO, *pco.1600 cooled digital 14bit CCD camera system*, 2005. Product sheet 05/2005.
- [59] J. A. Balseiro, "Mediciones físicas : cálculo de errores, aproximaciones, métodos gráficos," Hachette, 1956.
- [60] *Estimating Dark Current from Operating Temperature*, 2014. Application note.
- [61] *Application Notes and Technical Articles*. Application note.
- [62] *CCD Image Sensor Noise Sources*, 2001. Application note.
- [63] J. I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors (Dover Books on Physics)*. Dover Publications, 2012.

- [64] J. Dudas, L. M. Wu, C. Jung, G. H. Chapman, Z. Koren, and I. Koren, "Identification of in-field defect development in digital image sensors," in *Digital Photography III* (R. A. Martin, J. M. DiCarlo, and N. Sampat, eds.), SPIE, feb 2007.
- [65] PCO, *Warm/hot pixel*. App Note.
- [66] J. Leung, J. Dudas, G. H. Chapman, I. Koren, and Z. Koren, "Quantitative analysis of in-field defects in image sensor arrays," in *22nd IEEE International Symposium on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems (DFT 2007)*, IEEE, sep 2007.
- [67] J. Leung, J. Dudas, G. H. Chapman, Z. Koren, and I. Koren, "Characterization of pixel defect development during digital imager lifetime," in *Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications IX* (M. M. Blouke and E. Bodegom, eds.), SPIE, feb 2008.
- [68] A. Baumgartner *et al.*, "Characterisation methods for the hyperspectral sensor HySpex at DLR's calibration home base," in *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVI* (R. Meynart, S. P. Neeck, and H. Shimoda, eds.), SPIE-Intl Soc Optical Eng, nov 2012.
- [69] *Typical spectra of ORIEL spectral calibration lamps*. App Note.
- [70] "Basic atomic spectroscopic data." Disponible: http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/element_name.htm. Accesado: 10 de Junio de 2017.
- [71] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*. McGraw-Hill Professional, 2000.
- [72] S. F. Ray, *Applied Photographic Optics: Lenses and Optical Systems for Photography, Film, Video and Electronic Imaging*. Focal Pr, 1994.