

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



DOCTORADO EN INVESTIGACIÓN APLICADA A LA INDUSTRIA

CALIBRACIÓN DE SENSORES HÍPERESPECTRALES ANTE EFECTOS ANGULARES PARA ESPECTROSCOPIA REMOTA BASADA EN MICRO-DRONES

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Investigación Aplicada a la Industria
presenta:

M.C. Azgad Casiano Ramos

Asesor:

Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco

Puebla, Pue. 8 de diciembre de 2022.

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Programa de Doctorado en Investigación Aplicada a la Industria.

Tesis: *Calibración de sensores híperespectrales ante efectos angulares para espectroscopía remota basada en micro-drones*

Autor: M.C. Azgad Casiano Ramos.

Asesor: Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco.

Vo Bo: _____

Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro.

Presidente

Vo Bo: _____

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández.

Secretario

Vo Bo: _____

Dra. Luz del Carmen Gómez Pavón.

Vocal 1

Vo Bo: _____

Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco.

Vocal 2

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a todas las personas e instituciones que me apoyaron de una u otra manera para lograr esta meta. En particular, agradezco a mi director de tesis, el Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco, quien me ha acompañado con gran profesionalismo, ética y responsabilidad estos 4 años, y cuyo testimonio me sigue motivando a trabajar cada día para contribuir al desarrollo de la sociedad a través de la investigación aplicada.

Agradezco a los miembros del comité por cada una de sus valiosísimas sugerencias. Cada una de ellas marcó el rumbo de mi trabajo y contribuyó a hacerlo mejor en cada iteración. Agradezco la confianza depositada en mi persona, de que cumpliría los objetivos a pesar de las adversidades que trajo consigo la pandemia por COVID-19. Gracias, Dra. Luz del Carmen Gómez-Pavón, gracias, Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro y gracias, Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández.

Agradezco a los profesores del claustro de doctorado, en especial a aquellos que con quienes tuve el agrado de aprender en sus cursos: al Dr. Victor Rodolfo Gonzalez-Diaz, al Dr. Gerardo Mino-Aguilar, al Dr. José Fermi Guerrero-Castellanos y al Dr. Juan Reyes-Álvarez.

Agradezco a la BUAP, por brindarme la oportunidad de salir adelante con mi preparación profesional, y al CONACyT por la beca de manutención en el último año.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, en especial a la Dra. María Dolores Guevara-Espinosa por el préstamo de equipo y por la colaboración en su proyecto PRODEP 511-6/18-9344.

Gracias a mis compañeros de generación, a Ángel y Juan, por su apoyo y ánimo mutuo para conseguir la anhelada meta. Gracias a Rita, la secretaria del posgrado por su valioso apoyo con las gestiones durante mi estancia en el doctorado.

DEDICATORIA

A mi familia.

RESUMEN

En esta tesis se elaboró un flujo de trabajo de calibración de sensores híperespectrales utilizando sensores integrados en micro-drones para compensar los efectos angulares de la geometría sol-sensor. Primero se estudiaron los conceptos de espectroscopía y percepción remota para comprender la naturaleza de las cantidades involucradas y las características de los drones como plataformas de percepción remota. Después se revisó el estado del arte en métodos de estimación de reflectancia basados en el modelo de reflectancia bidireccional (BRDF), mediante el cual se diseñó un flujo de trabajo de calibración cruzada para un espectrómetro de punto, tomando como base el sensor multi-espectral, el sensor de irradiancia y los sensores inerciales disponibles en un micro-dron para agricultura. Posteriormente, se desplegó un aparato experimental para la adquisición de imágenes y firmas híperespectrales de muestras representativas sobre las cuales se aplicaron procedimientos de calibración geométrica y radiométrica por sensor y la calibración cruzada propuesta en el flujo de trabajo, sin considerar los efectos angulares. Por último, se analizó la geometría sol junto con los marcos de referencia del sensor a bordo del dron, lográndose determinar el ángulo sol-sensor y la irradiancia directa en suelo, que fueron los puntos de referencia para la calibración cruzada considerando los efectos angulares. El coeficiente de correlación entre la radiancia estimada por el sensor multiespectral del micro-dron y la radiancia calibrada del sensor híperespectral fue superior a $R^2 = 0,99$, tanto para el caso de estimación sin efectos angulares, como para el caso que incluye la geometría sol-sensor. La consistencia de datos

de radiancia, reflectancia y el cálculo de índices espectrales a partir del espectrómetro calibrado indican la viabilidad del flujo de procesamiento propuesto para casos donde el ángulo sol-sensor sea pronunciado, como en condiciones previas y posteriores al medio día y para el caso de superficies no Lambertianas. Este último resultado es de especial importancia para aplicaciones industriales tales como el mapeo de alto rendimiento para la fenología de cultivos, por lo cual se llevó a cabo el planteamiento de un modelo de negocios basados en la tecnología de percepción remota utilizando micro-drones.

SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

Notación

Cantidades radiométricas

- A, B, C Constantes o coeficientes de calibración del modelo radiométrico
- $DC[p]$ Corriente de oscuridad del píxel p en el arreglo híperespectral
- $DC(x, y)$ Corriente de oscuridad del píxel $p(x, y)$ en la imagen multiespectral
- E Irradiancia
- g_{rel} Ganancia relativa del sensor de irradiancia solar
- I_{dir} Irradiancia directa
- I_{seq} Irradiancia del sensor Sequoia en unidades homogéneas a E
- I'_{seq} Irradiancia del sensor Sequoia en unidades físicas de E
- I_{ss} Irradiancia del sensor Sunshine en unidades homogéneas a E
- I_{ss} Irradiancia del sensor Sunshine en unidades físicas de E
- I_{sun} Irradiancia solar hemisférica
- k Constante de calibración implícita
- K Factor de calibración
- K_L^R Factor de calibración de radiancia a reflectancia
- L Radiancia
- L_i Radiancia incidente
- L_r Radiancia reflejada
- L_{seq} Radiancia del sensor Sequoia
- L_{STS} Radiancia del sensor STS
- M Excitancia
- $p(x, y)$ DN del píxel en las coordenadas (x, y) de la imagen
- R Reflectancia
- R_{seq} Reflectancia del sensor Sequoia
- R_{STS} Reflectancia del sensor STS

$R(x, y)$ Reflectancia del píxel en las coordenadas (x, y) de la imagen
 T Temperatura del sensor optoelectrónico
 $\nu(x, y)$ Factor de viñeteo del píxel $p(x, y)$
 γ Ganancia del sensor multiespectral (exposición ISO)
 λ_c Longitud de onda central
 τ Tiempo de integración del sensor optoelectrónico

Cantidades geométricas

c_α Coseno del ángulo α
 n Vector unitario
 $R_x(\alpha)$ Matriz de rotación alrededor del eje x por el ángulo α
 s_α Seno del ángulo α
 (ϕ, θ, ψ) Coordenadas inerciales (roll, pitch, yaw)
 ϕ_i Ángulo de azimuth solar en coordenadas esféricas
 Ω Ángulo sólido
 ω Ángulo sólido infinitesimal
 ω_i Ángulo sólido infinitesimal del haz de luz incidente
 ω_r Ángulo sólido infinitesimal del haz de luz reflejado
 Ω_i Ángulo sólido proyectado a partir del ángulo sólido ω_i
 Ω_r Ángulo sólido proyectado a partir del ángulo sólido ω_r
 Ω_{ss}^H Ángulo sólido subtendido por el campo visual hemisférico del sensor Sunshine
 Ω_{seq}^C Ángulo sólido subtendido por el campo visual cónico del sensor Sequoia
 θ_e Ángulo de elevación (latitud) solar en coordenadas polares
 θ_i Ángulo de colatitud de flujo radiante incidente
 θ_r Ángulo de colatitud de flujo radiante reflejado
 (X_B, Y_B, Z_B) Marco de referencia del cuerpo (dron)

Otras

R^2 Coeficiente de determinación de la regresión lineal
 $\bar{E}(x)$ Promedio de la variable x
 x^T Transposición del vector x

Acrónimos

Percepción remota

- BRDF** Función de distribución de reflectancia bidireccional
- BRF** Factor de reflectancia bidireccional
- BHRF** Factor de reflectancia bihemisférica
- CCD** Dispositivos de carga acoplada
- CMOS** Semiconductores complementarios de óxido metálico
- DLS** Sensor de luz solar incidente (downwelling)
- DNs** Números digitales (datos crudos) del sensor
- EVI** Índice de vegetación mejorado
- FOV** Campo visual del sensor
- FWHM** Anchura completa a la mitad del máximo
- GNDVI** Índice de vegetación de diferencia normalizada verde
- GPS** Sistema de posicionamiento global
- GSD** Distancia de muestreo del suelo
- HCRF** Factor de Reflectancia hemisférico-cónico
- ISO** Organización Internacional de Estandarización
- LAI** Índice de área foliar
- MAV** Micro vehículo aéreo
- MTOW** Peso máximo al despegue
- NDVI** Índice de vegetación de diferencia normalizada
- NDRE** Índice de de diferencia normalizada de borde rojo
- NED** Sistema de referencia Norte-Este-Abajo
- OSAVI** Índice de vegetación optimizado ajustado al suelo
- PTP** Protocolo de Transferencia de Imágenes
- RGB** Imágenes de tono real compuestas por los colores rojo, verde y azul
- SD** Dispositivo de almacenamiento digital seguro
- SI** Sistema internacional de unidades
- SNR** Relación señal a ruido
- TCARI** Índice de reflectancia de absorción de clorofila transformada
- TIFF** Formato de archivo de imagen etiquetada
- RPAS** Sistema de aeronave pilotada remotamente
- UAS** Sistema aéreo no tripulado
- USB** Bus serial universal
- VANT** Vehículo aéreo no tripulado (dron)

Mnemónicos

2D Bidimensional

BLUE Azul (banda espectral)

GRE Verde (banda espectral)

GREEN Verde (banda espectral)

IR Infrarrojo (banda espectral)

NIR Infrarrojo cercano (banda espectral)

RED Rojo (banda espectral)

STS Espectrómetro Oceanoptics, modelo STS

UV Ultravioleta (banda espectral)

VIS Visible (banda espectral)

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Resumen	IV
Simbología	VI
Notación	VI
Cantidades radiométricas	VI
Cantidades geométricas	VII
Otras	VII
Acrónimos	VIII
Percepción remota	VIII
Mnemónicos	IX
Índice general	X
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVI
1 Introducción	1
1.1. Drones, percepción remota y aplicaciones	1
1.2. Preguntas de investigación	2
1.3. Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1.4. Contribución	3
Contribución al área de conocimiento	3
Contribución a la innovación industrial	4
1.5. Descripción general del documento	4

2 Marco conceptual	6
2.1. Unidades de percepción remota	7
Reflectancia	9
Factor de reflectancia	10
Calibración de sensores y corrección de datos	11
Corrección geométrica	12
2.2. Corrección radiométrica	13
Corrección radiométrica absoluta	13
Corrección radiométrica relativa	14
2.3. Índices espectrales	15
2.4. Drones como plataforma de percepción remota	17
Sensores de percepción remota para mini y micro-drones	18
Cámaras multiespectrales	20
Espectrómetros de punto	20
2.5. Conclusiones del Capítulo 2	22
3 Estimación de reflectancia	23
3.1. Flujos de trabajo	23
Cálculo de reflectancia	24
Función de reflectancia bidireccional	24
3.2. Factores de reflectancia	26
3.3. Estimación de reflectancia con drones	27
Esquema ideal de estimación de reflectancia con drones	27
Esquemas HCRF y BHRF	28
Esquema de estimación de reflectancia propuesto	28
3.4. Flujo de trabajo basado en reflectancia	30
3.5. Flujos de trabajo basados en radiancia	31
3.6. Flujo de trabajo propuesto	31
3.7. Conclusiones del Capítulo 3	35
4 Calibración de sensores de percepción remota	36
4.1. Implementación del flujo de trabajo	37
Características de la implementación	38
4.2. Ajuste de parámetros del espectrómetro STS	39
Ajuste del tiempo de adquisición	39
Ajuste del número de escaneos	40
Ajuste de muestras del filtro de promediado boxcar	40

Remoción de corriente de oscuridad	41
4.3. Calibración cruzada del espectrómetro STS	41
Método de calibración LRM	43
4.4. Calibración de irradiancia del sensor de imagen multi-espectral	45
Calibración de irradiancia del sensor de brillo solar	46
4.5. Calibración de reflectancia del sensor de imagen multi-espectral	47
Factor de reflectancia del sensor de imagen multiespectral	48
4.6. Calibración cruzada del sensor híperespectral	49
Descripción del aparato experimental	49
Componentes del sistema	49
Fecha, ubicación y condiciones ambientales	51
Forma de muestreo del espectrómetro	52
Forma de muestreo del sensor Sequoia	53
4.7. Resultados experimentales	54
Resultados de calibración del sensor multiespectral	54
Resultados de calibración cruzada del sensor híperespectral	54
4.8. Conclusiones del capítulo 4	66
5 Corrección radiométrica de efectos angulares	69
5.1. Geometría sol-sensor	70
5.2. Sistemas de referencia	70
Vector del zenith en coordenadas NED	71
Vector de posición solar en coordenadas NED	72
Vector de orientación del dron en coordenadas NED	72
Ángulo sol-sensor	73
Irradiancia solar directa	73
Irradiancia nivel del suelo	74
5.3. Resultados de aplicación al flujo de trabajo	74
Verificación de datos de posición solar	74
Irradiancia solar directa a nivel del suelo	76
Cálculos de radiancia y reflectancia con efectos angulares	77
Resultados de calibración de reflectancia híperespectral con efectos angulares	77
5.4. Discusión de resultados	80
5.5. Conclusiones finales	81
5.6. Trabajo futuro	82

5.7. Productos derivados	83
Propiedad intelectual	83
Proyecto aplicado a la industria	83
Publicaciones en coautoría en congresos nacionales	86
6 Modelo de negocios	90
6.1. Análisis del entorno	90
6.2. Análisis de la competencia	91
6.3. Lienzo del modelo de negocios	92
Referencias	95

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Espectro electromagnético. Fuente: (California State University, 2022). Adaptado bajo licencia CC-BY-NC-SA 3.0 (via Wiki Commons)	7
2.2. Esquema de percepción remota y efectos atmosféricos. Fuente: elaboración propia basada en (Hakala y cols., 2018), (Murai, 1999).	8
2.3. conceptos y unidades de flujo radiante. Fuente: elaboración propia basada en (Knudby, 2021).	9
2.4. Técnicas de corrección geométrica. Fuente: elaboración propia basada en (Japan Association of Remote Sensing, 1999).	12
2.5. Técnicas de corrección radiométrica. Fuente: elaboración propia basada en (Murai, 1999).	13
2.6. Cálculo de índices espectrales. Fuente: Elaboración propia basada en (Harris Aerial Inc., 2013)	17
2.7. Diagrama a bloques de un sistema aéreo no tripulado. Fuente: Wikimedia Commons. Adaptado del original bajo licencia CC BY-SA 4.0 (Maxorazon), recuperada el 31/10/2022 de https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/	19
2.8. Cámara multispectral Parrot Sequoia y sensor de irradiancia solar Parrot Sunshine. Fuente: (Parrot Sequoia, 2016).	20

2.9. Construcción y funcionamiento de un espectrómetro moderno, incluyendo la interfaz de software de adquisición. Fuente: (Ocean Optics Inc., 2007).	21
3.1. Geometría utilizada para la definición de la BRDF, indicando las direcciones de los rayos incidente y reflejado. Fuente: (Horn y Sjoberg, 1979).	25
3.2. Representación de los factores de reflectancia HCRF y BHRF	29
3.3. Esquema propuesto par el cálculo de reflectancia utilizando un micro-dron. Fuente: elaboración propia basada en (Parrot Bluegrass, 2018), (Micasense, 2017).	30
3.4. Flujo de trabajo propuesto para calibración cruzada del sensor híperespectral, incluyendo la corrección de efectos angulares. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)	32
3.5. Flujo de trabajo propuesto para calibración de reflectancia del sensor multispectral. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)	33
3.6. Flujo de trabajo propuesto para calibración de reflectancia del sensor híperespectral. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)	34
4.1. Ajuste de parámetros del sensor Oceanoptics STS mediante la interfaz de OceanView. Fuente: elaboración propia.	40
4.2. Corriente de obscuridad del espectrómetro STS, medida de manera previa a cada captura. Ésta se obtuvo colocando temporalmente el protector de caucho negro de la lente colimadora. Fuente: elaboración propia con datos experimentales.	42
4.3. Método LRM para calibración de radiancia. Fuente: Elaboración propia basada en (Guo y cols., 2019)	44
4.4. Panel de calibración de la cámara multispectral Parrot Sequoia. Fuente: elaboración propia.	50
4.5. Componentes del aparato experimental. Fuente: elaboración propia.	50
4.6. Escenario experimental para la toma de imágenes multispectrales y firmas híperespectrales. Fuente: elaboración propia.	52
4.7. Interfaz de captura de imágenes de calibración del sensor Parrot Sequoia. Fuente: elaboración propia mediante la aplicación móvil Pix4D Capture.	53
4.8. Flujo de procesamiento de imágenes multispectrales: Imágenes en DN's de la banda GREEN. Dimensiones: 960x1280 [px]. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.	55

4.9. Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Calibración de píxeles a irradiancia espectral en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.	56
4.10. Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Calibración de irradiancia del píxel a radiancia $L_{seq}(x, y)$ en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.	57
4.11. Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Calibración de radiancia $L_{seq}(x, y)$ a reflectancia $R_{seq}(x, y)$ en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.	58
4.12. Reflectancia en la selección rectangular de la imagen, del panel de referencia y de una muestra de vegetación, en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.	59
4.13. Firma híperespectral en DNs del sensor STS: Panel de reflectancia. Fuente: elaboración propia.	61
4.14. Firma híperespectral en DNs del sensor STS: Hoja vegetal. Fuente: elaboración propia.	61
4.15. Firma híperespectral en DNs del sensor STS: Hoja blanca. Fuente: elaboración propia.	62
4.16. Firma híperespectral en DNs del sensor STS: Panel negro. Fuente: elaboración propia.	62
4.17. Parámetros del algoritmo LRM para calibración cruzada de radiancia. Fuente: elaboración propia.	64
4.18. Resultados de calibración cruzada de la firma híperespectral del panel de referencia.	66
4.19. Resultados de calibración cruzada de la firma híperespectral de la muestra de vegetación.	67
4.20. Resultados de calibración cruzada de la firma híperespectral de la hoja blanca.	68
5.1. Geometría sol-sensor en coordenadas NED. Fuente: elaboración propia.	70
5.2. Marco de referencia del dron. Fuente: Elaboración propia con referencia a datos experimentales. Dibujos obtenidos de GrabCAD community Library (https://grabcad.com/library) el 08-11-2022; créditos: H. Razza (marco del dron) y Leonardo Ibarra (sensor solar).	71
5.3. Marco de referencia del sensor. Fuente: Elaboración propia con referencia a datos experimentales. Dibujos obtenidos de GrabCAD community Library (https://grabcad.com/library) el 08-11-2022; créditos: H. Razza (marco del dron) y Leonardo Ibarra (sensor solar).	71

5.4. Megasun: aplicación móvil de cálculo de postura solar,	75
5.5. Calculadora solar NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratories, 2022a).	75
5.6. Ángulo sol-sensor. Fuente: elaboración propia en python con funciones auxiliares de Micasense Image Processing Sequoia©	76
5.7. Escenario de pruebas de calibración radiométrica del sensor híperespectral con corrección de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.	77
5.8. Resultados de calibración de reflectancia de imágenes multiespectrales ante efectos angulares en la banda GREEN.	78
5.9. Producto de propiedad intelectual.	84
5.10. Carta de recepción de proyecto de por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, CONCYTEP.	85
5.11. Producto académico 1.	87
5.12. Producto académico 2.	88
5.13. Producto académico 3.	89
6.1. Canvas del modelo de negocios.	94

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Índices espectrales comunes en análisis de vegetación. Fuente: Elaboración propia, adaptada de (Harris Aerial Inc., 2022) y (Franceschini, Bartholomeus, van Apeldoorn, Suomalainen, y Kooistra, 2017)* Ch: Clorofila, Cv: Cobertura vegetal.	16
2.2. Características de sensores compatibles con micro-drones. Fuente: elaboración propia (2022).	19
4.1. Parámetros de adquisición del espectrómetro STS. Fuente: elaboración propia.	53
4.2. Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia.	60
4.3. Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda RED. Fuente: elaboración propia.	60

4.4.	Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda RED-EDGE. Fuente: elaboración propia.	60
4.5.	Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda NIR. Fuente: elaboración propia.	60
4.6.	Coeficientes del método LRM para calibración cruzada de radiancia L_{seq} a radiancia L_{STS} . Fuente: elaboración propia.	63
4.7.	Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia.	63
4.8.	Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda RED. Fuente: elaboración propia.	63
4.9.	Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda RED-EDGE. Fuente: elaboración propia.	64
4.10.	Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda NIR. Fuente: elaboración propia.	64
4.11.	Factor de calibración de radiancia a reflectancia del sensor STS. Fuente: elaboración propia.	65
4.12.	Resumen de resultados de calibración cruzada del sensor STS de acuerdo al flujo de trabajo propuesto. Fuente: elaboración propia.	65
5.1.	Cálculo del ángulo sol-sensor con pysolar. Fuente: elaboración propia utilizando Micasense Image Processing Sequoia©.	76
5.2.	Resultados del cálculo de irradiancia a nivel de suelo [$\alpha W/m^2/sr$] en la banda GREEN considerando el ángulo sol-sensor. Fuente: elaboración propia.	76
5.3.	Calibración de radiancia del sensor Sequoia en la banda GREEN con y sin la incorporación de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.	79
5.4.	Calibración de reflectancia del sensor Sequoia en la banda GREEN con y sin la incorporación de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.	79
5.5.	Comparación de reflectancia del sensor Sequoia con reflectancia del sensor STS considerando efectos angulares. El error en todas las bandas es menor al 1%. Fuente: elaboración propia.	80

INTRODUCCIÓN

1.1. Drones, percepción remota y aplicaciones

En los últimos 35 años, la tecnología de satélites artificiales ha favorecido el auge de aplicaciones de percepción remota de interés para el sector público y privado, como la *agricultura de precisión* (Mulla, 2013). Más recientemente, los drones se han convertido en una alternativa de percepción remota con capacidad de captura de datos espaciales a nivel centimétrico; sin embargo, a diferencia de los satélites, esta tecnología aún requiere el desarrollo de flujos de trabajo para la corrección de errores en los datos, así como estrategias que permitan incrementar la resolución de las mediciones sin comprometer el costo y el peso de la carga útil. Actualmente, se busca convertir el conjunto dron-sensor en un instrumento de campo para espectroscopía de alta resolución, alta precisión y bajo costo, para lo cual los flujos de trabajo están dirigidos a métodos de corrección geométrica y radiométrica aplicables a sensores de imagen, sensores térmicos y espectrómetros con potencial aplicación a procesos de monitoreo ambiental, exploración mineral y modelado de ecosistemas (Aasen, Honkavaara, Lucieer, y Zarco-Tejada, 2018).

1.2. Preguntas de investigación

Esta tesis se sitúa en el desarrollo de métodos de corrección radiométrica de datos hiperespectrales para percepción remota basada en micro-drones. Particularmente, se aborda el problema de corrección de efectos angulares asociados a la geometría sol-sensor, surgiendo las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué características de los flujos de trabajo existentes en percepción remota son aplicables a la corrección de efectos angulares en mediciones hiperespectrales basadas en la tecnología de micro-drones?
- ¿Qué tipos de modelos y variables deben considerarse para la corrección radiométrica de efectos angulares en mediciones hiperespectrales basadas en micro-drones?
- ¿En qué medida la corrección de efectos angulares generan estimaciones más precisas en mediciones hiperespectrales basadas en micro-drones?

A partir de las preguntas de investigación, se han formulado los siguientes objetivos de investigación.

1.3. Objetivo general

Diseñar un flujo de trabajo para la corrección radiométrica de efectos angulares en mediciones hiperespectrales utilizando micro-drones.

Objetivos específicos

1. Evaluar las características de esquemas de trabajo de percepción remota para drones, aplicables a la corrección de efectos angulares en mediciones hiperespectrales basadas en micro-drones.

2. Diseñar un flujo de trabajo para calibración cruzada de radiancia de un sensor híperespectral con base los sensores de irradiancia y de imagen multiespectral de un micro-dron.
3. Diseñar procedimientos de corrección radiométrica de efectos angulares para mediciones híperespectrales con base en la tecnología disponible para micro-drones.
4. Evaluar los resultados de corrección radiométrica de efectos angulares para espectrómetros de resolución híperespectral con base en la tecnología disponible para micro-drones.

1.4. Contribución

La capacidad actual de los drones para llevar a cabo tareas automatizadas de vuelo y la reciente disponibilidad de sensores espectrales de bajo peso (e.g. < 350 g) compatibles con drones, ha abierto la posibilidad para el manejo ágil de procesos de ambientales y de agricultura, con una mayor cobertura y movilidad que los métodos de espectroscopía de campo en tierra (Adamu, Tansey, y Ogutu, 2018), (Adão y cols., 2017). Esta investigación contribuye a la generación de alto valor en aplicaciones científicas e industriales, al extender los métodos de calibración de imágenes multiespectrales a la corrección radiométrica de datos híperespectrales utilizando sensores disponibles en micro-drones. Particularmente, la calibración de mediciones de reflectancia ante efectos angulares amplía las posibilidades de estudio de superficies anisotrópicas, tales como la cobertura vegetal de cultivos en sus distintas etapas de desarrollo.

Contribución al área de conocimiento

Esta tesis contribuye al área de conocimiento en percepción remota utilizando micro-drones, particularmente en los procedimientos para la caracterización de efectos angu-

lares asociados a la posición del sol y la orientación del sensor durante la adquisición de imágenes y mediciones de punto con sensores híperespectrales a bordo de drones, lo cual resulta útil para la generación de mediciones de reflectancia calibradas, que pueden ser utilizadas en la caracterización precisa de rasgos en objetivos de interés, como en la fenología de cultivos.

Contribución a la innovación industrial

El diseño de un flujo de trabajo para calibración de sensores híperespectrales compatibles con micro-drones abre un extenso campo de aplicación para la industria, partiendo del aprovechamiento de los sensores inerciales y multiespectrales incluidos en micro-drones agrícolas, en una cadena de procesamiento que permite a desarrolladores implementar soluciones a la medida (tipos de cultivos, servicios de fenología y detección de plagas, estimación de la producción), más allá de las soluciones comerciales, las cuales limitan los estudios a un número determinado de bandas multi-espectrales.

1.5. Descripción general del documento

Este documento de tesis se divide en 6 capítulos. El Cap. 1 presenta la introducción, una descripción general del tema de tesis y la organización general del documento. El Cap. 2 presenta un marco conceptual necesario para comprender las cantidades de percepción remota de las que se tratará en los capítulos subsecuentes, así como los métodos y tecnologías involucradas. En el Cap. 3 se describe el desarrollo del flujo de trabajo propuesto para el procesamiento de imágenes multiespectrales y firmas híperespectrales, indicando cada uno de los procedimientos de calibración y corrección radiométrica mediante diagramas de flujo correlacionados. El Cap. 4 aborda la problemática de calibración de sensores para convertir imágenes y firmas híperespectrales en datos crudos, a valores calibrados de irradiancia, radiancia y reflectancia, mostrando los resultados del proce-

samiento. En el Cap. 5 se aborda específicamente el tema de corrección radiométrica de firmas híperespectrales ante efectos angulares, particularmente, los asociados a la geometría sol-sensor, mostrando los resultados de su implementación. Finalmente, en el Cap. 6 se describe el modelo de negocios que se deriva de este trabajo de tesis.

MARCO CONCEPTUAL

La percepción remota es el campo científico y tecnológico que trata de la captura, procesamiento y evaluación de información espacial proveniente de la radiación electromagnética (ver Fig. 2.1) reflejada o emitida por la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con los objetos observados, utilizando diversas plataformas de vuelo y sensores a bordo (Meaden y Kapetsky, 1991). Un esquema de percepción remota utilizando un dron se muestra en la Fig. 2.2. La energía incidente sobre la superficie de la tierra es principalmente la radiación solar, de la cual una parte es absorbida por el objeto y otra es reflejada por el mismo. En el rango de luz visible (400-700 nm) y del cercano infrarrojo, el objeto reflejará la radiación incidente, mientras que el rango infrarrojo, el objeto re-emitirá la radiación que absorbida en forma de calor. La atmósfera, compuesta por gases, partículas de polvo y otros agentes también puede dispersar la luz en la banda visible y absorberla en el rango ultravioleta; se estima que en conjunto, un 35% de la luz solar es reflejada por la tierra y la atmósfera. Dados los fenómenos anteriores, es importante considerar que la radiación medida por el sensor dependerá de la hora del día, la posición del sol en cada época del año, las condiciones atmosféricas y el campo

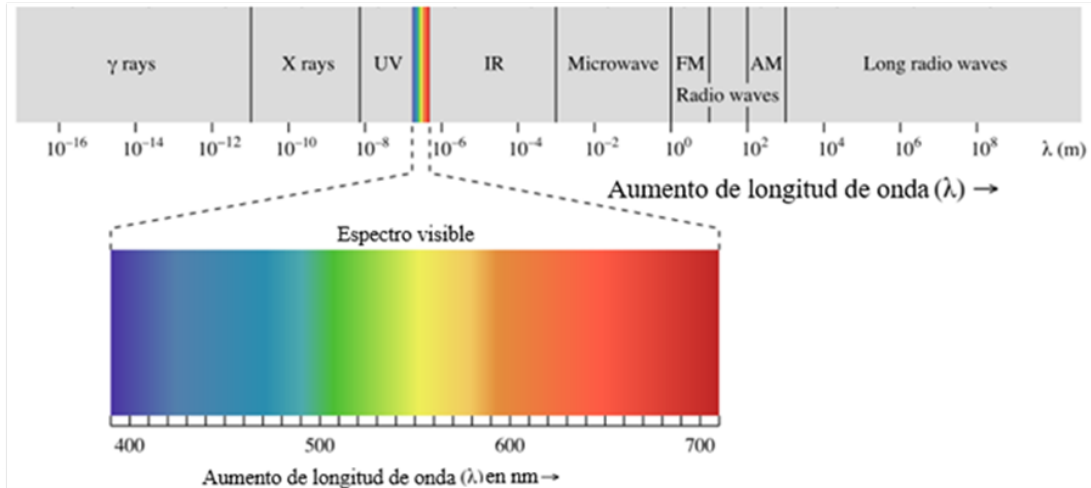


Figura 2.1: Espectro electromagnético. Fuente: (California State University, 2022). Adaptado bajo licencia CC-BY-NC-SA 3.0 (via Wiki Commons)

visual (FOV) instantáneo del sensor, donde pueden existir objetos que causen reflexiones o la emisión de radiación de diferentes intensidades y longitudes de onda (Kapetsky y Aguilar-Manjarrez, 2007).

2.1. Unidades de percepción remota

En percepción remota, la magnitud utilizada para expresar la intensidad de la radiación incidente es la irradiancia, representada mediante $E [W/m^2]$, cuyas unidades en el sistema internacional (SI) corresponden a potencia incidente de radiación electromagnética por unidad de superficie y representan el flujo de energía originado por el movimiento de las ondas de radiación electromagnética, desde o hacia una superficie por unidad de tiempo ($1 W = 1 J/s$); cuando el flujo radiante sale de la superficie, éste se denomina excitancia (M) (ver Figs. 2.3a y 2.3b) (Palmer, 2003). El campo visual del sensor es un ángulo sólido, Ω , es decir, la fracción de la superficie de una esfera de radio r , centrada en el observador, que es cubierta con respecto a la superficie total de la esfera, A , utilizando una proyección cónica ($\Omega = A/r^2$). La unidad del ángulo sólido en el SI es el estereorradián (sr), una magnitud adimensional a partir de la cual se define la

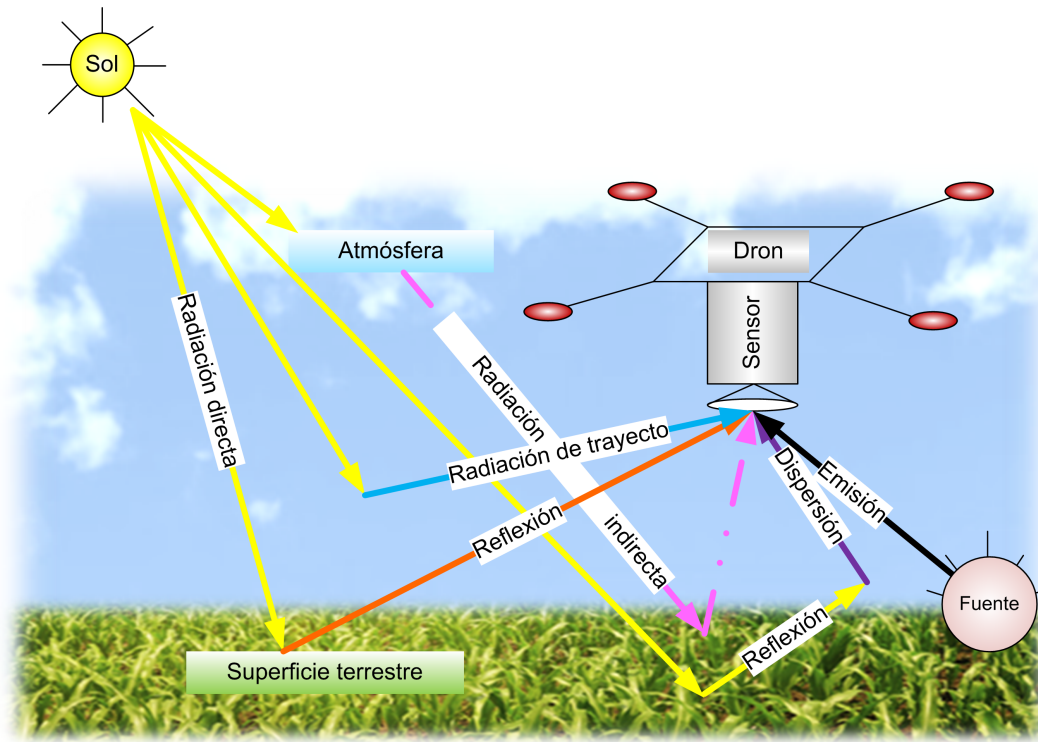


Figura 2.2: Esquema de percepción remota y efectos atmosféricos. Fuente: elaboración propia basada en (Hakala y cols., 2018), (Murai, 1999).

radiancia como el flujo radiante por unidad de superficie por unidad de ángulo sólido ($W/m^2/sr$), es decir, la intensidad del flujo radiante captado por el sensor, conteniendo una variedad de longitudes de onda. Las mediciones de radiancia de un sensor son normalmente discretizadas en intervalos regulares de longitudes de onda sobre rangos específicos (e.g., rango visible, cercano infrarrojo, etc.), por lo que la unidad derivada en el SI para sensores de percepción remota es la radiancia espectral ($W/m^2/sr/nm$), la cual se obtiene de dividir la radiancia entre el intervalo o banda de longitudes de onda capturadas por el sensor (Knudby, 2021) (ver Figs. 2.3c y 2.3d). Cualquier análisis cuantitativo de mediciones de percepción remota utilizando de satélites o aeronaves parte de la la calibración de sensores a valores físicos de radiancia espectral (Schaepman-Strub, Schaepman, Painter, Dangel, y Martonchik, 2006)

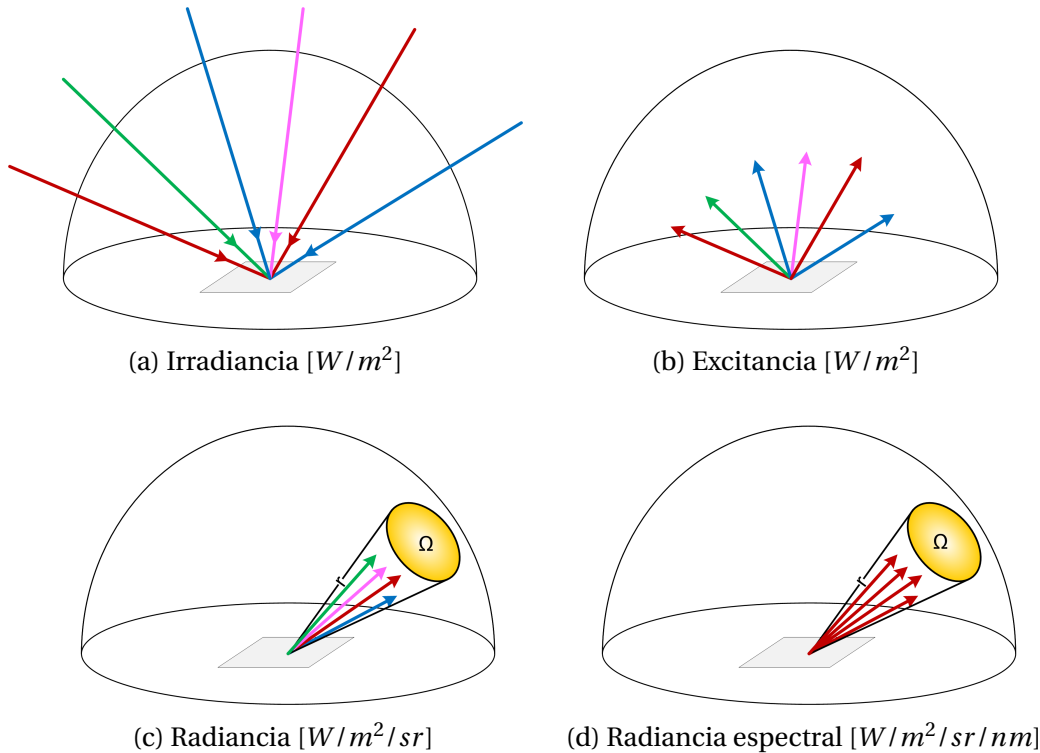


Figura 2.3: conceptos y unidades de flujo radiante. Fuente: elaboración propia basada en (Knudby, 2021).

Reflectancia

La radiancia espectral es la cantidad más descriptiva del flujo radiante captado por un sensor en unidades físicas; aunque no lo es para la descripción de las características de una superficie, ya que su valor depende de las condiciones de iluminación (intensidad y dirección) (Knudby, 2021), (Harris Aerial Inc., 2013). La reflectancia es una propiedad física de una superficie, definida como el cociente entre la excitancia radiante (W/m^2) y la irradiancia (W/m^2), por lo tanto es adimensional. Si la reflectancia se mide considerando toda la luz reflejada en el hemisferio alrededor de la superficie (i.e., reflectancia hemisférica, también llamada reflectancia difusa o albedo), de acuerdo a la ley de la conservación de la energía los valores de reflectancia se encuentran en el intervalo inclusivo de 0 a 1 (Schaepman-Strub et al., 2006). La superficie de un material con acabado perfectamente mate, capaz de reflejar toda la luz incidente de manera difusa en todas direcciones, dando la misma apariencia de brillo para un observador desde cualquier

ángulo de observación, se denomina superficie Lambertiana, aludiendo al concepto de difusión perfecta introducido por Lambert en 1760 (Wikimedia Foundation, Inc., 2022). La reflectancia difusa tiene el valor de 1 para una superficie Lambertiana, y 0 para un material totalmente oscuro. El material de referencia con mayor valor de reflectancia difusa disponible en la industria es un fluoropolímero conocido comercialmente como Spectralon, cuya reflectividad es superior al 96 y 99% en las bandas de 250-2000 y 250-1500 nm, respectivamente, seguido por el politetrafluoroetileno (PTFE), con valores superiores al 95 y 98% en las bandas de 250-2200 y 250-1500 nm, respectivamente (Ocean Optics Inc., 2022). La reflectancia hemisférica es la variable preferida en los productos de percepción remota, ya que permite llevar a cabo un análisis cuantitativo a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones de iluminación con que fue obtenida (Hakala y cols., 2018); sin embargo, es una cantidad conceptual no medible directamente y que en percepción remota debe estimarse a nivel de la capa superior de la atmósfera (TOA); este proceso incluye la estimación de irradiancia a partir de la irradiancia espectral ($W/m^2/nm$) y la conversión de radiancia espectral ($W/m^2/sr/nm$) a excitancia, sin considerar las sombras y los efectos direccionales causados por la atmósfera, por lo cual se denomina reflectancia aparente o reflectancia TOA (Knudby, 2021), (Harris Aerial Inc., 2013).

Factor de reflectancia

El factor de reflectancia se define como el cociente entre el flujo radiante reflejado por una superficie respecto al reflejado por una superficie difusa sin pérdidas (Lambertiana) irradiada bajo la misma geometría y rango de longitudes de onda que la primera (Schaepman-Strub y cols., 2006). A diferencia de la reflectancia, el factor de reflectancia puede tomar valores superiores a 1, debido a que superficies especulares, como la nieve o muchos objetos de fabricación humana, reflejan gran parte de la luz incidente en una sola dirección Micasense, 2017. Cuando una fuente de luz irradia de manera

isotrópica, es decir, que la intensidad radiante (W/sr) es la misma en todas direcciones, implica que la fuente es esférica (algo similar a un foco doméstico con recubrimiento interior escarchado); en cambio, una superficie plana difusa (como una pared pintada con pintura de acabado mate) tiene un comportamiento Lambertiano, es decir, que la intensidad radiante se atenúa con el coseno del ángulo de observación (ley del coseno de Lambert) y que la radiancia de la superficie se vuelve independiente de la dirección (Schaepman-Strub y cols., 2006).

Calibración de sensores y corrección de datos

La calidad de los resultados de percepción remota dependen no sólo del seguimiento correcto de protocolos de adquisición, el correcto funcionamiento de la plataforma de vuelo y la presencia de condiciones de iluminación favorables para su operación, sino también de métodos robustos y estandarizados para el procesamiento de datos (Manfreda y cols., 2018). De la misma manera, las aplicaciones de mayor valor en percepción remota utilizando UAS no sólo requieren de sensores con mayor resolución, sino también de algoritmos de corrección adicionales para mejorar la precisión de la información extraída. Dada su importancia, la correcta estimación de radiancia y reflectancia son tópicos dentro de percepción remota, debido a que los datos medidos por el sensor son comúnmente afectados por diversas variables ambientales e instrumentales. Lo anterior deriva en procesos de corrección de datos (e.g., imágenes) en los dominios espacial (corrección geométrica) y espectral (corrección radiométrica). Aunque el término calibración se define como el proceso de comparación y ajuste de un instrumento (i.e., sensor) respecto a estándares de medición para obtener mediciones correctas (National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratories, 2022b), en la literatura de percepción remota es común encontrar los términos calibración radiométrica y calibración geométrica refiriéndose a procesos de corrección de datos (e.g., “calibración de imágenes”) y procesos implícitos de calibración

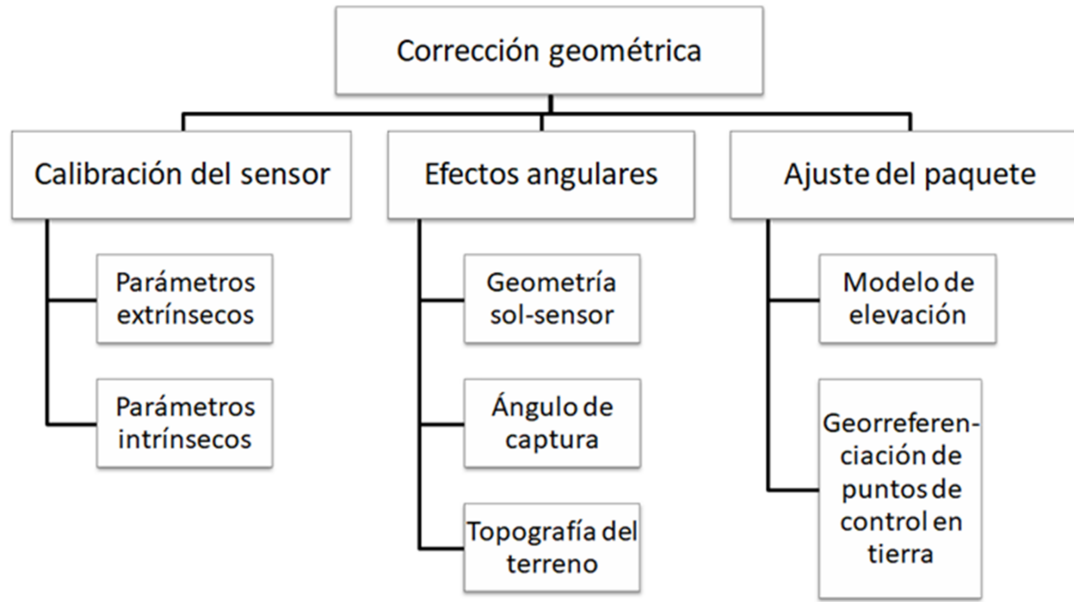


Figura 2.4: Técnicas de corrección geométrica. Fuente: elaboración propia basada en (Japan Association of Remote Sensing, 1999).

de sensores, para reproducir de manera fidedigna las variables físicas en el dominio correspondiente.

Corrección geométrica

Los parámetros ópticos que intervienen en la formación de la imagen en un sensor pueden generar distorsiones geométricas, es decir, errores entre las coordenadas actuales de la imagen y la proyección teórica de la imagen real con un sensor ideal (Japan Association of Remote Sensing, 1999). La calibración geométrica es el proceso de ajuste de píxeles de la imagen a las coordenadas del mundo real. Las distorsiones geométricas que intervienen pueden estar asociadas a parámetros intrínsecos y extrínsecos, también llamados internos y externos, respectivamente. Dos de las distorsiones más comunes en sensores de imagen en percepción remota son la distorsión de perspectiva y el efecto ojo de pez (también llamada distorsión de barril o de acerico (e.g., almohadilla de alfileres)). Un diagrama de los procedimientos comunes en calibración geométrica de datos de percepción remota se muestra en la 2.4.

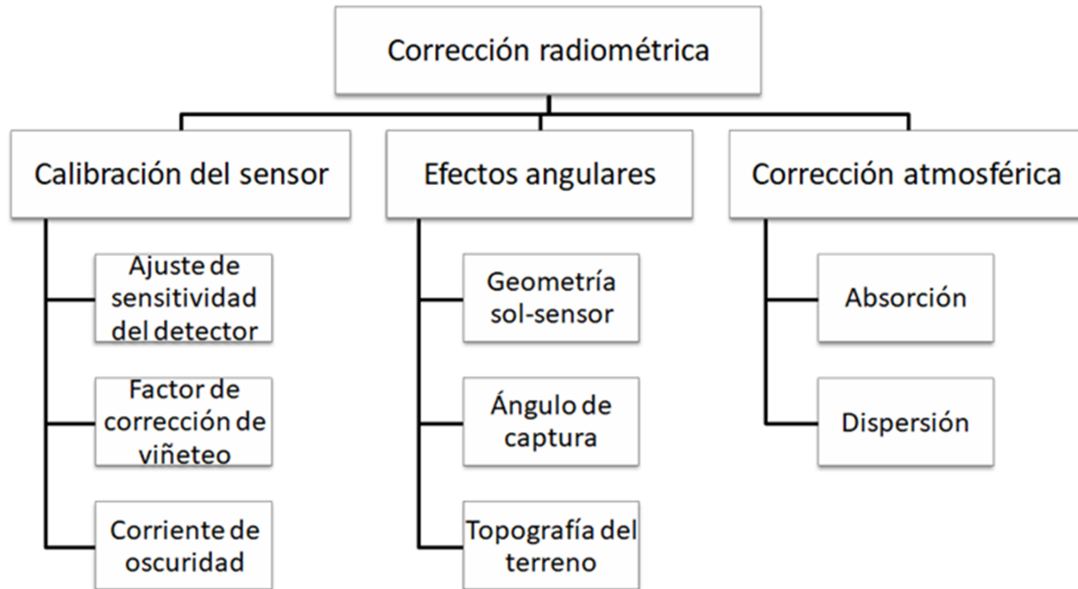


Figura 2.5: Técnicas de corrección radiométrica. Fuente: elaboración propia basada en (Murai, 1999).

2.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es el proceso de conversión de datos crudos capturados en números digitales (DNs) de un sensor a datos de radiancia (Murai, 1999). Ésta puede involucrar factores de gran escala (distancia tierra-sol, la irradiancia solar promedio y ángulo de zenith solar, entre otros) (Zarzar, Dash, Dyer, Moorhead, y Hathcock, 2020), factores de pequeña escala que alteran la energía incidente sobre el sensor (distorsión atmosférica por nubosidad, neblina, humedad, etc.) o condiciones instrumentales, tales como tiempo de adquisición, valor de exposición de píxeles del sensor y modelado de la corriente de oscuridad (DNs diferentes de cero con el obturador cerrado) asociada al aumento de temperatura del instrumento, entre otros (Jeong y cols., 2018) (ver Fig. 2.4). La corrección radiométrica puede ser de tipo absoluta o relativa.

Corrección radiométrica absoluta

La calibración radiométrica absoluta requiere del uso de un sensor de referencia calibrado radiométricamente (espectrorradiómetro), modelos atmosféricos y datos de

validación en tierra que incluyen parámetros como el PRNU (parámetro de corrección de No Uniformidad de Respuesta Fotónica) para compensar la no uniformidad del detector y el efecto de viñetas; y un modelo de transferencia radiativa para convertir las cuentas digitales (DNs) del sensor a unidades físicas de radiancia (Burkart y cols., 2015). Los niveles de irradiancia en sitio se simulan utilizando ecuaciones de transferencia radiativa atmosférica, disponibles en códigos de 6S o Modtran (Guo y cols., 2019), (Honkavaara y Khoramshahi, 2018), (Burkart, Cogliati, Schickling, y Rascher, 2014).

Corrección radiométrica relativa

La estimación de condiciones atmosféricas es un proceso complicado, sobre todo en escenarios de mayor nubosidad, por lo cual los modelos físicos de transferencia radiativa suelen sustituirse por métodos empíricos basados en reflectancia o en irradiancia a nivel del suelo o a nivel del sensor (Chen y Wang, 2021), (Honkavaara y Khoramshahi, 2018), (Jeong y cols., 2018). La calibración radiométrica relativa es un método empírico en el cual los DNs del sensor se normalizan con base en patrones de referencia, de manera que para una medición subsecuente se obtenga una respuesta uniforme; con este método, los efectos atmosféricos y distintos niveles de iluminación quedan incluidos dentro de un modelo de regresión lineal simple a valores de reflectancia tomando como referencia paneles de reflectancia conocida ubicados en tierra (Guo y cols., 2019). Algunos autores han encontrado que el mejor ajuste de la relación entre DNs y reflectancia puede ser no lineal; sin embargo, ya sea exponencial o de otro tipo, el valor de esta relación consiste en la regularidad con que la reflectancia cambia con la longitud de onda para distintos materiales, por lo que la calibración se hace banda por banda (Xu y cols., 2019). En ocasiones, otros factores de influencia sobre la reflectancia deben ser considerados, tales como efectos topográficos en un terreno inclinado, o la anisotropía común a los objetos naturales, cuya corrección requiere modelos basados en la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) (Guo y cols., 2019), (Honkavaara y Khoramshahi,

2018), (Jakob, Zimmermann, y Gloaguen, 2017), (Verrelst y cols., 2016). Para llevar a cabo mediciones de reflectancia en campo no es preciso contar con mediciones absolutas de irradiancia, dado que puede medirse un factor de reflectancia, definido como la razón entre el flujo radiante reflejado por el objeto y el flujo radiante reflejado por un patrón de referencia blanco; sin embargo, un cambio en las condiciones de iluminación alterará el offset y la pendiente de la recta empírica, requiriendo un nuevo ajuste por cada muestreo. Por lo tanto, para llevar a cabo un análisis cuantitativo de percepción remota, es necesario contar con un método sistemático de calibración por cada sensor o banda espectral en específico que estandarice los valores de reflectancia respecto a la magnitud unitaria (Guo y cols., 2019), (Iqbal, Lucieer, y Barry, 2018).

2.3. Índices espectrales

Una vez calibrados radiométricamente, los datos de reflectancia de objetos sobre la superficie terrestre pueden ser utilizados para extraer información de interés, tales como parámetros de tipo biofísico (e.g., contenido de biomasa de la vegetación) (Rivera, Verrelst, Delegido, Veroustraete, y Moreno, 2014), bioquímico (e.g., contenido de clorofila de las hojas) o geológico (e.g., área de cobertura de agua y suelo) (Nizeyimana, 2020), entre otros (Cohen y Alchanatis, 2019), (Zhang y cols., 2020). Un principio básico utilizado en percepción remota para resaltar los rasgos distintivos de los datos consiste en generar combinaciones algebraicas de las bandas donde se lleva a cabo el fenómeno; a este tipo de combinaciones de reflectancia espectral en diferentes longitudes de onda, utilizadas para resaltar las características de interés en los datos de reflectancia se les conoce como índices espectrales (Harris Aerial Inc., 2022). Los índices espectrales más comunmente utilizados son los índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (Castro, Shi, y Maja, 2021), pero pueden encontrarse otras clases de índices para resaltar características como las de los materiales hechos

2.3. Índices espectrales

Acrónimo	Índice	Rasgos*	Ecuación algebraica	GRE	RED	REG	NIR	OTROS
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Ch, Cv	$\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	-	✓	-	✓	-
OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	Ch, Cv	$\frac{NIR-RED}{NIR+RED+0,16}$	-	✓	-	✓	-
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	Ch	$\frac{NIR-GRE}{NIR+GRE}$	✓	-	-	✓	-
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index	Ch	$\frac{NIR-REG}{NIR+REG}$	-	-	✓	✓	-
TCARI	Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index	Ch	$3 \left[(\rho_{700} - \rho_{700}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550} \frac{\rho_{700}}{\rho_{670}}) \right]$		✓	-	-	✓
EVI	Enhanced Vegetation Index	Ch, Cv	$2,5 \frac{NIR-RED}{NIR+6RED-7,5BLUE+1}$	-	-	-	-	✓
LAI	Leaf Area Index	Ch, Cv	$3,618EVI - 0,118$	-	-	-	-	✓

Tabla 2.1: Índices espectrales comunes en análisis de vegetación. Fuente: Elaboración propia, adaptada de (Harris Aerial Inc., 2022) y (Franceschini y cols., 2017)* Ch: Clorofila, Cv: Cobertura vegetal.

por el hombre (Graham, Girkin, y Bourgenot, 2022), o bosques quemados (Mpakairi, Kadzunge, y Ndaimani, 2020). Algunos índices espectrales comunes y su formulación se presentan en la Tabla 2.1.

Cuando las imágenes capturadas por el sensor están en el rango de luz visible, su representación en colores naturales o verdaderos, es el resultado de la combinación de las capas roja, verde y azul. Sin embargo, si las imágenes capturadas por el sensor contienen longitudes de onda fuera del rango de luz visible (e.g., UV, IR), su representación básica por computadora es la escala de grises. En este caso se recurre a la técnica de representación en imágenes de falso color, las cuales permiten interpretar de mejor manera las combinaciones entre bandas espectrales (Humboldt State University, 2014). Los mapas de índices espectrales también suelen graficarse en falso color utilizando modos de

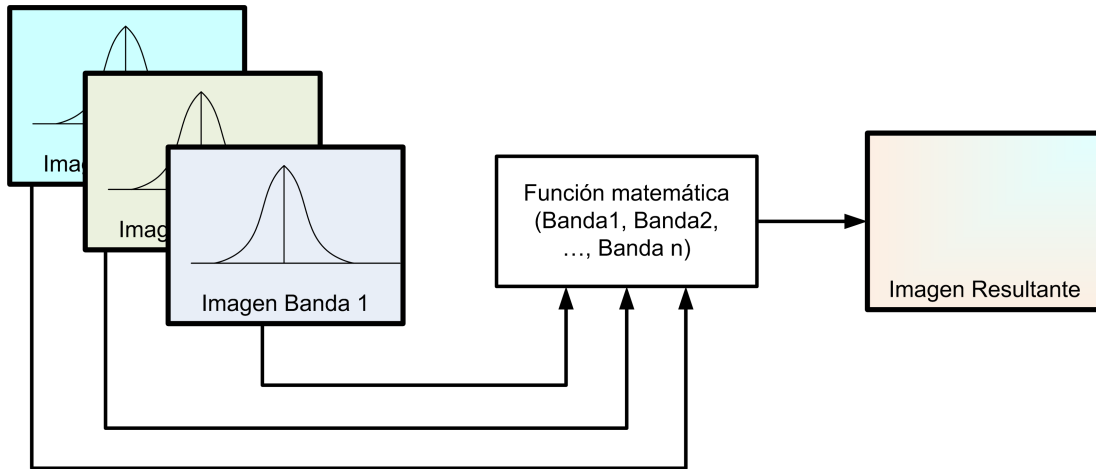


Figura 2.6: Cálculo de índices espectrales. Fuente: Elaboración propia basada en (Harris Aerial Inc., 2013)

colores conocidos como, mapa de calor, modo espectral, rojo-verde y escala de grises, entre otros (PIX4Dfields, 2022). En la Fig. 2.6 se ilustra el proceso de combinación de bandas para obtención de índices espectrales y su representación en falso color.

2.4. Drones como plataforma de percepción remota

En los últimos 10 años, los vehículos aéreos no tripulados (también llamados UAVs, Sistemas Aéreos no tripulados (UAS), Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS), Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) o drones) se han convertido en una alternativa viable como plataforma de percepción remota gracias a la miniaturización de sensores y a la reducción del costo del conjunto dron-sensor. Anteriormente, las plataformas para llevar a cabo tareas de percepción remota incluían principalmente satélites y aeronaves tripuladas, cuyos costos de operación son restrictivos para gran parte de la sociedad. En un inicio, la resolución espacial de las imágenes obtenidas con satélites era de cientos de metros, hasta que paulatinamente llegó a niveles métricos e incluso sub-métricos; sin embargo, los costos y la complejidad logística siguieron limitando las aplicaciones de alta resolución espacial y temporal, tales como la agricultura a pequeña escala (e.g., hasta 5 hectáreas) (Iqbal y cols., 2018), (Manfreda y cols., 2018), (Adão y cols., 2017),

(Matese y cols., 2015). La emergencia de los sistemas aéreos no tripulados (UAS), que comprenden el conjunto de tecnologías de comunicaciones, sensores y computadoras de vuelo a bordo del UAV para lograr la ejecución segura y precisa de tareas de vuelo, posibilitaron la utilización de los UAVs como nuevas plataformas de percepción remota de alta resolución y bajo costo (ver Fig. 2.7). Dos categorías importantes definidas por la FAA (Administración Federal de Aviación de los EEUU) son los micro-UAVs (MAVs) y mini-UAVs; estos dos tipos de drones, cuyo peso máximo al despegue (MTOW) es menor a 5 kg y 25 kg, respectivamente, son preferidos para aplicaciones de percepción remota por contar con menores restricciones de uso legal; por su costo más accesibles y popularidad en el mercado. Sin embargo, una limitante importante de estas categorías es el peso máximo de la carga útil (e.g., sensores) y el tiempo máximo de vuelo. Las dos topologías de drones más utilizadas en percepción remota son los drones de ala fija y los multirrotores. Los de ala fija tienen mejor estabilidad y eficiencia de vuelo que les permite mapear grandes extensiones bajo el compromiso de mayor movimiento de las imágenes capturadas y una limitada carga útil. Los segundos tienen una dinámica ágil con cambios de altitud, postura y dirección, y la capacidad de vuelo estacionario (hovering), que les permite reducir el efecto de movimiento en las fotografías aéreas, así como llevar a cabo despegues y aterrizajes controlados, evitando el impacto brusco de los sensores a bordo (Jakob y cols., 2017). En la actualidad, los tiempos máximos de vuelo de un cuadirrotor comercial y uno de ala fija de la categoría MAV son aproximadamente de 20 y 45 minutos, respectivamente.

Sensores de percepción remota para mini y micro-drones

Una clasificación de sensores de percepción remota aplicables a mini y micro drones y algunas de sus características se muestran en la Tabla 2.2. Dos aspectos primordiales a considerar son la resolución espacial y la resolución espectral. Un tipo común de sensor es el multiespectral, por ofrecer un balance entre resolución espacial, resolución espec-

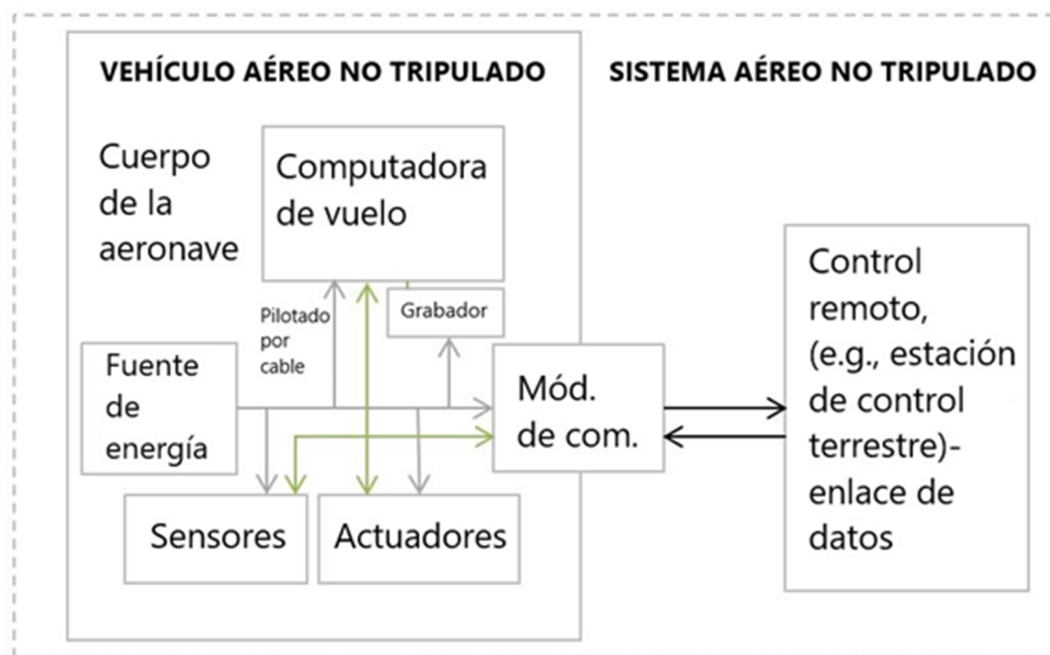
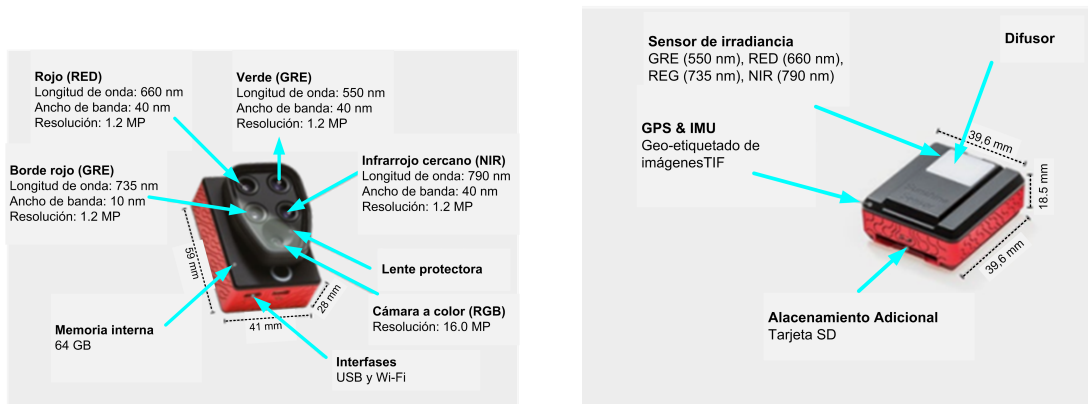


Figura 2.7: Diagrama a bloques de un sistema aéreo no tripulado. Fuente: Wikimedia Commons. Adaptado del original bajo licencia CC BY-SA 4.0 (Maxorazon), recuperada el 31/10/2022 de <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Tipo de sensor a bordo de micro-dron	Resolución espectral	Resolución espacial	Complejidad de procesamiento	Inver-sión	Disponibilidad comercial
De imagen, hiperespectral	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta	Baja
De imagen, multiespectral	Media	Alta	Alta	Media	Alta
De punto, hiperespectral	Muy alta	Baja	Media	Media	Media
De imagen, visible	Baja	Muy Alta	Media	Baja	Alta
De imagen, térmica	Muy baja	Baja	Alta	Alta	Baja

Tabla 2.2: Características de sensores compatibles con micro-drones. Fuente: elaboración propia (2022).

tral, costo y complejidad de procesamiento. En esta tesis se trabajó con un sensor de tipo hiperespectral, el cual se caracteriza por contar una alta resolución espectral, cientos de bandas en el rango visible, UV o NIR, con el compromiso de perder la resolución espacial en un solo punto del FOV, pero a un costo similar al del multiespectral. La combinación de estas dos tecnologías se llevará a cabo en el Capítulo 5, demostrando la factibilidad de integrar ambas sin comprometer en gran medida la carga útil de mini y micro-drones.



(a) Descripción de partes del sensor de imagen multiespectral, interfaz de comunicación con el usuario y almacenamiento interno de datos.

(b) Descripción de partes del sensor de irradiancia solar, interfaz de comunicación con el sensor de imagen y almacenamiento adicional.

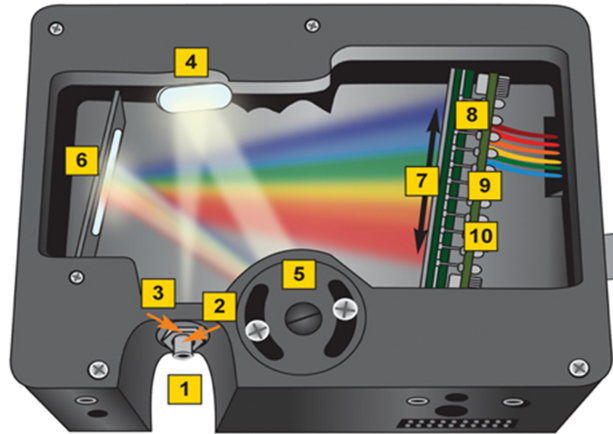
Figura 2.8: Cámara multiespectral Parrot Sequoia y sensor de irradiancia solar Parrot Sunshine. Fuente: (Parrot Sequoia, 2016).

Cámaras multiespectrales

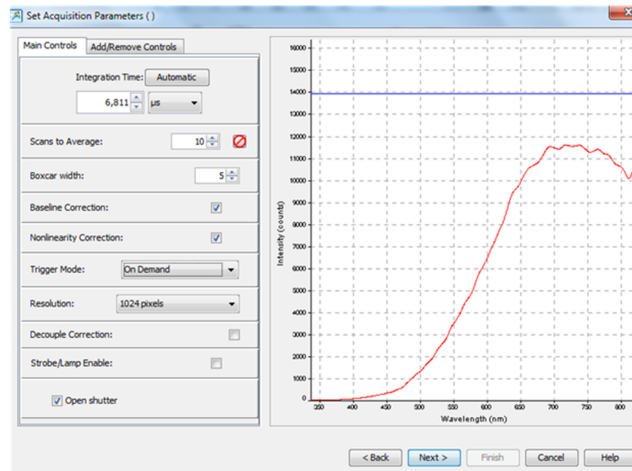
Una cámara con capacidad de registrar imágenes bidimensionales (2D) en múltiples bandas espectrales (típicamente 4 a 10) se conoce como cámara multiespectral (ver Fig. 2.8). Un accesorio compatible con cámaras multiespectrales se denomina sensor de brillo solar, el cual es un sensor de irradiancia que permite normalizar las mediciones de la cámara y dar uniformidad a los resultados de análisis espectral a lo largo del tiempo, como se presentará en los capítulos 3 y 4. las especificaciones de longitud de onda central y anchura de la banda respecto al punto máximo de sensibilidad (FWHM, Full Width at Half Maximum) pueden variar según el fabricante. En la Fig. se muestra el espectro de longitudes de onda de una cámara multiespectral para agricultura.

Espectrómetros de punto

Un espectrómetro es un instrumento capaz de producir las líneas espectrales de la luz incidente sobre una porción específica del espectro electromagnético, cuantificando su longitud de onda e intensidad (ver Fig. 2.9a). Esto permite graficar el patrón de variación



(a) Espectrómetro Oceanoptics USB4000. Componentes (visto desde abajo): 1. Conector de fibra óptica para entrada de luz, 2. Rendija fija de entrada de luz, 3. Filtro de absorción pasa largas (opcional), 4. Espejo colimador dirigido hacia la rejilla, 5. Rejilla de difracción, 6. Espejo de enfoque sobre el plano del detector, 7. Lente colectora del detector (opcional), 8. Detector CCD, 9. Filtro de orden de difracción (opcional), 10. Lente de vidrio o de cuarzo (opcional). Dimensiones: 89.1x63.3x34.4 mm, peso: 190 g.



(b) Ajuste de parámetros de adquisición del espectrómetro Oceanoptics STS mediante el software OceanView ver. 1.6.7, mostrando el espectro de una fuente de luz de criptón.

Figura 2.9: Construcción y funcionamiento de un espectrómetro moderno, incluyendo la interfaz de software de adquisición. Fuente: (Ocean Optics Inc., 2007).

de la luz emitida, absorbida o reflejada por un material con respecto a las longitudes de onda. Dicho patrón es repetible y se conoce como la firma espectral del material (ver Fig. 2.9).

2.5. Conclusiones del Capítulo 2

En este capítulo se presentaron conceptos de percepción remota necesarios para comprender abordar el problema de diseño de flujos de procesamiento de calibración de sensores de percepción remota y corrección radiométrica de imágenes multiespectrales y firmas híperespectrales que se aborda en capítulos posteriores. Con lo anterior, se contribuye al cumplimiento de los objetivos 1 a 4 planteados en esta tesis.

ESTIMACIÓN DE REFLECTANCIA

3.1. Flujos de trabajo

En la actualidad existen flujos de trabajo bien establecidos para la adquisición, interpretación y corrección de imágenes satelitales y de aeronaves tripuladas (Chuvieco y Huete, 2009); sin embargo, estos métodos no son aplicables total o parcialmente al problema de percepción remota utilizando drones debido a las diferencias en sus condiciones de operación, tipos de sensores y las condiciones atmosféricas en vuelos de baja altitud (típicamente de 100 a 500 m, como máximo) (Jakob y cols., 2017). Es por ello que en los últimos años en la literatura de percepción remota han surgido diversos enfoques de estimación de reflectancia utilizando drones (Aasen y cols., 2018). En este capítulo se resumen los métodos y flujos de trabajo más comunes encontrados en la literatura para la estimación de reflectancia, partiendo del marco conceptual de la función de reflectancia bidireccional (BRDF), del cual se derivan los anteriores.

Cálculo de reflectancia

Como se mencionó en el Cap. 2, la reflectancia es la variable preferida en los productos de percepción remota por ser una propiedad física trazable a lo largo del tiempo. El prerrequisito para el cálculo de reflectancia es la calibración de imágenes a unidades de radiancia (Schaepman-Strub et al., 2006), lo cual incluye la remoción de corriente de oscuridad y otras correcciones geométricas previas (Hakala et al., 2018). También es importante poder contar con una calibración previa de los sensores en laboratorio, para incluir modelos que estimen el comportamiento del sensor durante el vuelo, tal como el aumento de la corriente de oscuridad en función de la temperatura (Burkart et al., 2014).

Función de reflectancia bidireccional

El marco de referencia conceptual para el análisis del fenómeno de reflectancia ante distintas geometrías sol-sensor en percepción remota es la función de reflectancia bidireccional (BRDF), propuesta por Nicodemus en 1977. La BRDF permite modelar los cambios de reflectancia capturados por el sensor considerando las condiciones de iluminación, el ángulo de visión y las propiedades de la superficie (Burkart y cols., 2015). Considere la geometría de la BRDF (Fig. 3.1); para una superficie en particular se construye un sistema local coordinado erigiendo un eje en la dirección normal a la superficie y otro eje definiendo una dirección arbitraria sobre el plano tangente. La dirección del haz de luz se especifica mediante el ángulo polar θ (colatitud) respecto a la normal local y el ángulo de azimuth (longitud), ϕ , medido en dirección contraria a las manecillas del reloj respecto a la dirección de referencia en la superficie (longitud). La BRDF, denotada por f_r , se define como la razón de la radiancia reflejada en la dirección del observador, dL_r , a la irradiancia incidente, dE_i , en dirección de una porción de la fuente (Ec. 3.1) (Horn y Sjoberg, 1979).

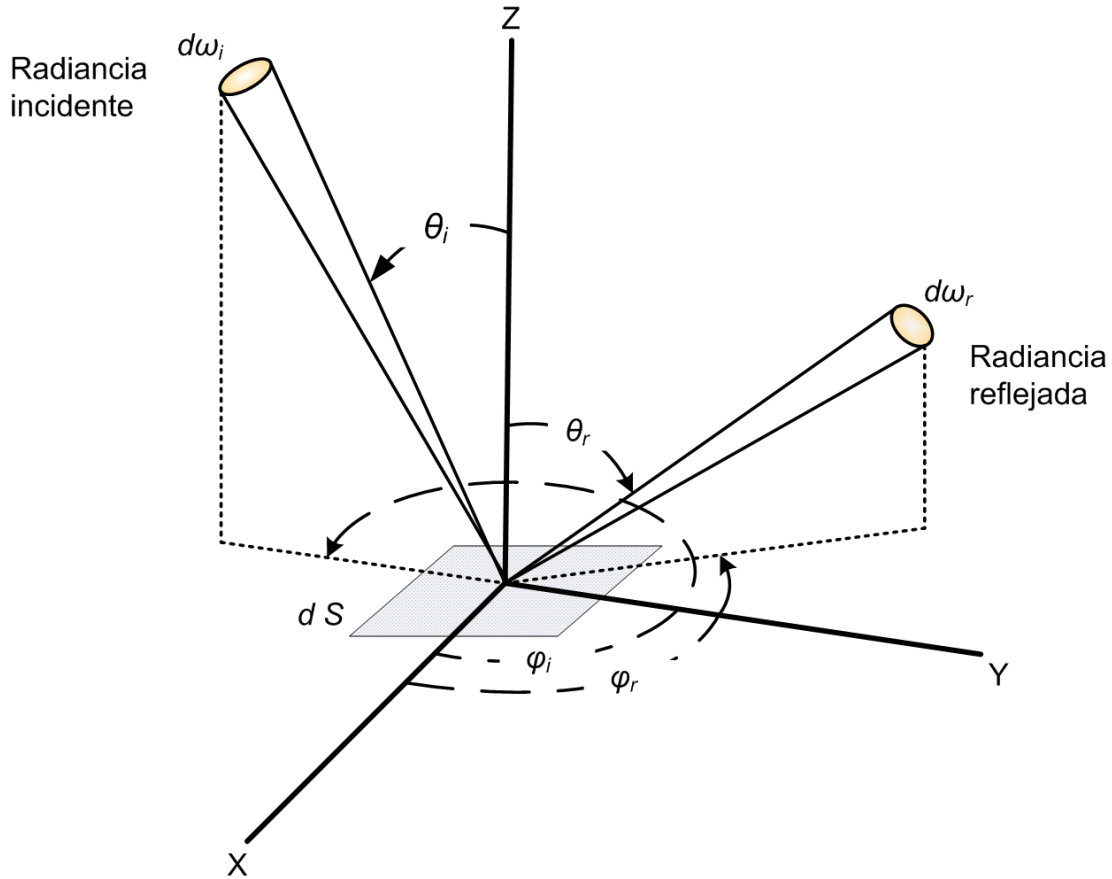


Figura 3.1: Geometría utilizada para la definición de la BRDF, indicando las direcciones de los rayos incidente y reflejado. Fuente: (Horn y Sjoberg, 1979).

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad [sr^{-1}] \quad (3.1)$$

El flujo incidente sobre la superficie dS puede provenir de distintas porciones del fuente, por lo tanto la radiancia incidente, $L_i(\theta_i, \phi_i)$, es una cantidad direccional. Considere las componentes de flujo incidente, $d\Phi_i$ y excitante, $d^2\Phi_r$ sobre la porción superficial, dS ; a través de los ángulos sólidos infinitesimales, $d\omega_i$, en la dirección (θ_i, ϕ_i) y $d\omega_r$ en la dirección (θ_r, ϕ_r) . La notación dX , indica direccionalidad de la variable radiométrica X y d^2 denota que la variable es bidireccional, esto es, depende de ambas direcciones, incidente y excitante. El flujo incidente depende sólo de la dirección de incidencia, pero el flujo saliente depende de la dirección de emitancia, e implícitamente, de la dirección de incidencia. De esta manera, la BRDF puede reescribirse como (Ec. 3.2):

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{d^2\Phi_r/d\Omega_r}{d\Phi_i} = \frac{dL_r}{dE_i} \quad [sr^{-1}] \quad (3.2)$$

donde $d\Omega_r = d\omega \cos\theta$ es el ángulo sólido correspondiente a la proyección del ángulo infinitesimal $d\omega$ sobre la normal a la superficie dS , y:

$$d\Phi_i = L_i \cos\theta_i d\omega_i dS \quad (3.3)$$

$$d^2\Phi_r = dL_r \cos\theta_r d\omega_r$$

$$dE_i = L_i \cos\theta_i d\omega_i$$

Bajo este enfoque, la reflectancia direccional para cualquier geometría de rayo incidente y reflejado puede calcularse al integrar la BRDF sobre los ángulos sólidos especificados. En términos prácticos, el flujo $P_s = d^2\Phi_r$ reflejado por la superficie S puede medirse mediante un sensor discreto abarcando el ángulo sólido Ω_r , por lo tanto, la BRDF puede calcularse mediante la aproximación:

$$\begin{aligned} BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) &= \frac{dL_r}{dE_i} \approx \frac{\frac{P_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{\Omega_r S \cos\theta_r}}{\frac{P_i}{S}} \\ &= \frac{P_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{P_i \Omega_r \cos\theta_r} \quad [sr^{-1}] \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde P_i es la potencia de la radiación incidente sobre el área de estudio (Wierzbicki, Kedzierski, Fryskowska, y Jasinski, 2018).

3.2. Factores de reflectancia

Conceptualmente, la BRDF implica que la luz observada y la luz medida son medidas en un ángulo sólido infinitesimal, lo cual no es posible físicamente, debido a que un ángulo sólido infinitesimal no es capaz de entregar cantidades medibles de flujo radiante (Doctor, Bachmann, Gray, Montes, y Fusina, 2015). En cambio el concepto de

factor de reflectancia permite evaluar diferentes geometrías de iluminación y reflexión, principalmente considerando ángulos sólidos cónicos y hemisféricos. La medición de la BRDF parte del cálculo de un factor de reflectancia bidireccional, BRF, el cual se basa en la razón de la radiancia reflejada por una superficie, respecto a la radiancia de un objetivo de superficie Lambertiana. Una clasificación completa de geometrías posibles para el cálculo de la BRDF y factores de reflectancia, o albedos, pueden encontrarse en (Schaepman-Strub y cols., 2006). En las siguientes secciones se describen los factores de reflectancia hemisférico-cónico (HCRF) y hemisférico-hemisférico, o bihemisférico (BHRF), correspondientes dos esquemas posibles de percepción remota con drones.

3.3. Estimación de reflectancia con drones

Esquema ideal de estimación de reflectancia con drones

Como se definió en el Cap. 2, la reflectancia es el cociente entre el flujo radiante reflejado por una superficie y la irradiancia incidente sobre la misma. Dado un sensor de imagen, sensible a una banda espectral determinada, y con un modelo de calibración de valores del píxel a irradiancia determinados, la estimación remota de la reflectancia de una superficie para esa banda parte de las siguientes condiciones ideales (Domenzain, 2017):

- La superficie observada es plana y el plano del sensor es paralelo a la superficie.
- La superficie observada es Lambertiana (perfectamente mate o difusa)
- La superficie observada es más grande que un píxel (sin mezcla del píxel)
- La única fuente de luz es el sol, con todos sus rayos paralelos entre sí, y perpendiculares a la superficie observada.
- No existen objetos alrededor que reflejen la luz del sol.
- La transmisión de luz por parte de la atmósfera es perfecta (sin absorción, ni dispersión)

- La superficie observada está suficientemente cerca del centro óptico de la imagen, por lo que los efectos de viñetas y distorsión pueden despreciarse.
- La superficie de la imagen tiene reflectancia R , constante para toda la banda de interés.
- El difusor de luz solar tiene una superficie perfectamente mate (Lambertiana).
- La fuente de luz es constante sobre una banda espectral.
- La intensidad de la fuente de luz cambia con el tiempo, pero sólo de manera despreciable durante la adquisición.

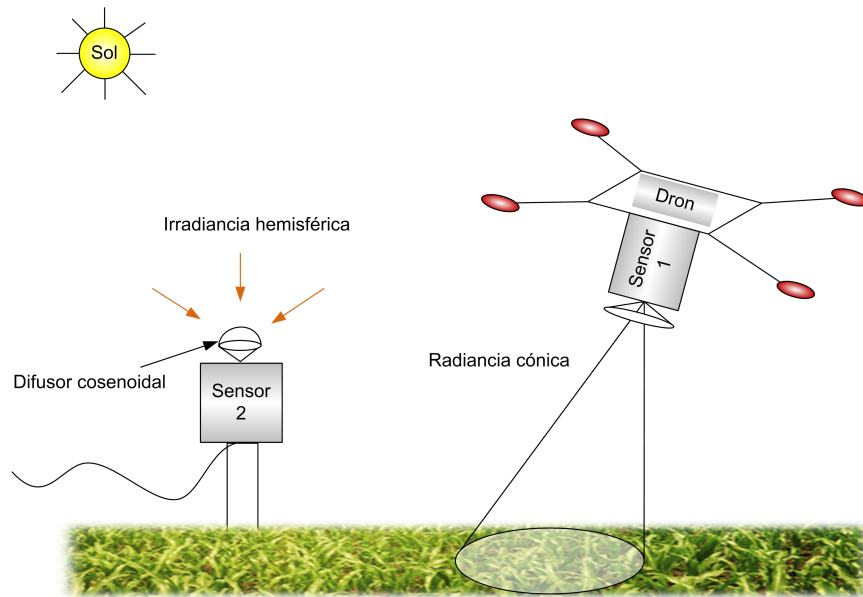
Los métodos de corrección geométrica y radiométrica tratan de resolver los problemas que surgen cuando no se cumplen las condiciones ideales anteriores. Particularmente, en esta tesis se aborda el problema de efectos angulares asociados a la geometría sol-sensor.

Esquemas HCRF y BHRF

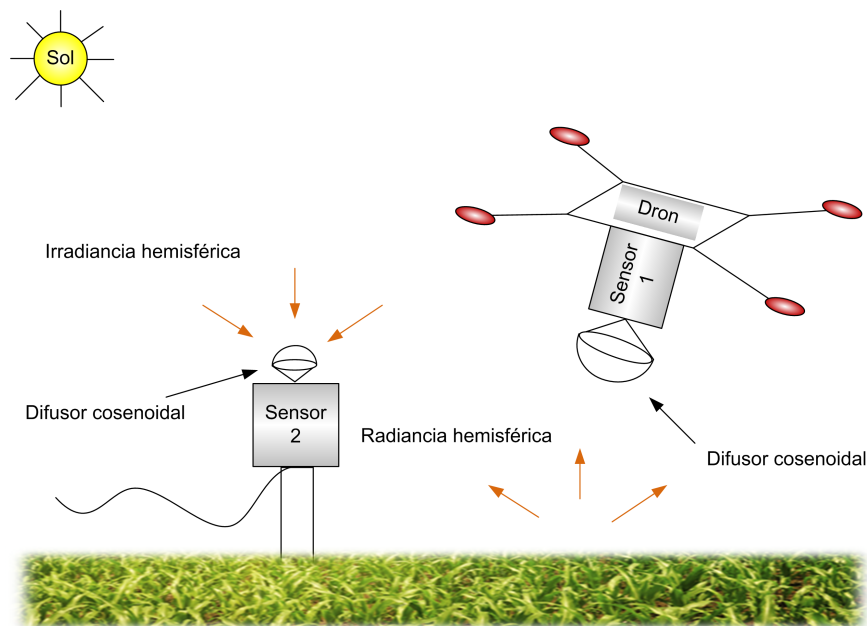
Dos esquemas físicos para la estimación de reflectancia utilizando drones se presentan en la Fig. 3.2. El factor de reflectancia bihemisférica (HCRF) y el factor de reflectancia esférica cónica (BHRF) requieren de la medición de la radiación solar incidente sobre el nadir, para lo cual se utilizan sensores viendo hacia el cielo. El otro sensor lleva a cabo mediciones de la luz reflejada por la superficie, ya sea de manera hemisférica, a través de un difusor cosenoidal para permitir el FOV hemisférico o a través de un sensor de FOV cónico, (e.g. sensores de imagen) (Sun, Bu, Lu, y Omasa, 2021), (Jin y Eklundh, 2015).

Esquema de estimación de reflectancia propuesto

En esta tesis se propone el cálculo del factor de reflectancia HCRF con el sensor de irradiancia a bordo del dron. Para ello se utilizó una lente colimadora en lugar de un difusor cosenoidal como elemento de entrada del espectrómetro. En la Fig. 3.3 se presenta el esquema de estimación de reflectancia propuesto; el sensor 1 es la cámara



(a) Reflectancia hemisférica-cónica.



(b) Reflectancia hemisférica-hemisférica.

Figura 3.2: Representación de los factores de reflectancia HCRF y BHRF.

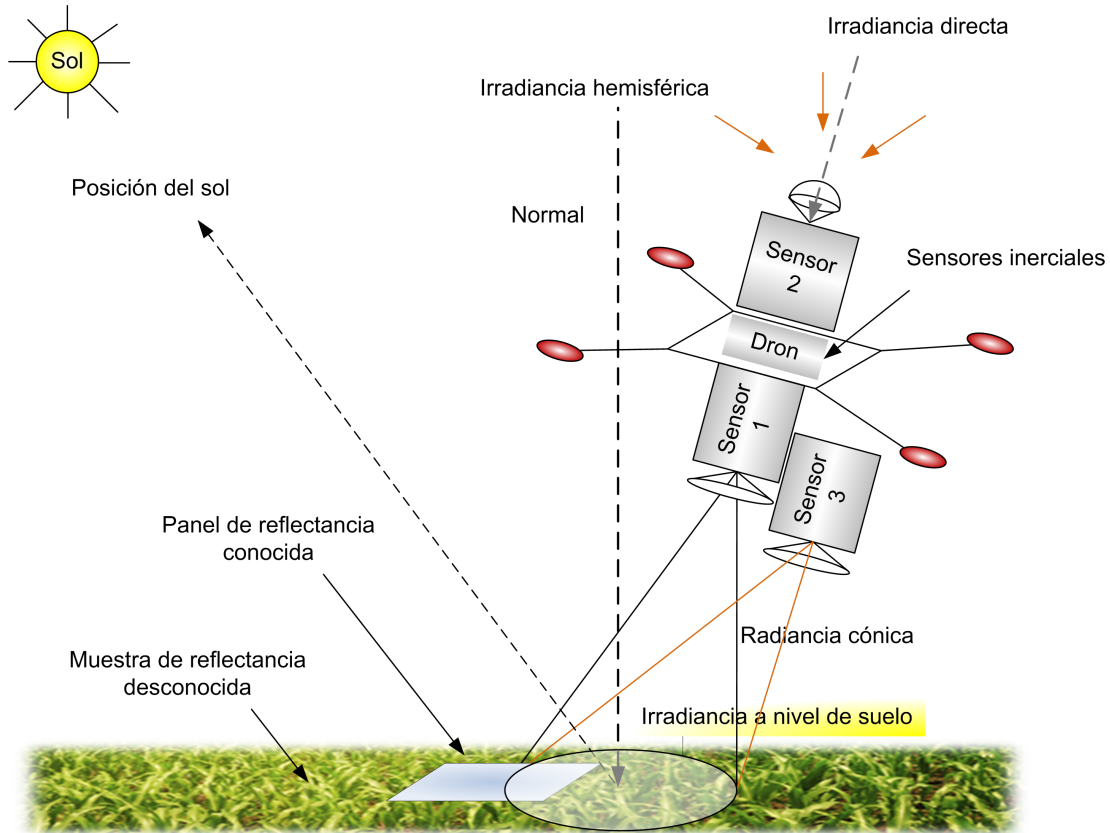


Figura 3.3: Esquema propuesto para el cálculo de reflectancia utilizando un micro-dron. Fuente: elaboración propia basada en (Parrot Bluegrass, 2018), (Micasense, 2017).

multiespectral, la cual provee de imágenes de la superficie que pueden ser calibradas en irradiancia mediante el sensor irradiancia solar (sensor 2) en las mismas bandas multi-espectrales. Los efectos angulares son compensados mediante transformaciones de coordenadas que convierten la irradiancia directa captada por el sensor, a irradiancia a nivel de suelo, medida por la cámara multi-espectral. No obstante, primero debe calcularse la irradiancia directa del sensor, conociendo el ángulo de posición solar. El sensor 3 captura mediciones hiperespectrales en una geometría idéntica a la del sensor 1.

3.4. Flujo de trabajo basado en reflectancia

Un proceso de calibración radiométrica basado en reflectancia para micro espectrómetros de punto ha sido reportado en (Burkart y cols., 2014). En este tipo de calibración,

además del espectrómetro remoto en aire, es necesario un espectrómetro en tierra para la toma de mediciones simultáneas de reflectancia sobre un patrón de reflectancia difuso (e.g., Lambertiano). El flujo de procesamiento de datos incluye remoción de corriente de oscuridad, caracterización de efectos de segundo orden y calibración radiométrica.

3.5. Flujos de trabajo basados en radiancia

En el flujo de trabajo propuesto por (Natesan, Armenakis, Benari, y Lee, 2018), no se consideran mediciones simultáneas de reflectancia en tierra para el cálculo de la BRDF, sino solamente mediciones de radiancia con un sensor pre-calibrado en laboratorio a partir de una fuente calibrada radiométricamente controlada en intensidad para convertir los DNs en valores de irradiancia.

3.6. Flujo de trabajo propuesto

El flujo de trabajo propuesto está basado en radiancia, a través de la calibración cruzada del sensor multiespectral Parrot Sequoia y el sensor híperespectral Oceanoptics STS, con el sensor Parrot Sunshine a bordo del micro-dron. Si bien las características de resolución espacial y espectral de ambos sensores no son compatibles, sí con complementarias dada la capacidad de calibrarse en unidades absolutas de radiancia. En la Fig. 3.4 se describe gráficamente el flujo de trabajo general propuesto para la calibración y corrección radiométrica de efectos angulares de datos híperespectrales basados en micro-drones. El flujo de procesamiento individual para imágenes multiespectrales se presenta en la Fig. 3.5. La parte correspondiente al procesamiento de datos híperespectrales se presenta en la Fig. 3.6.

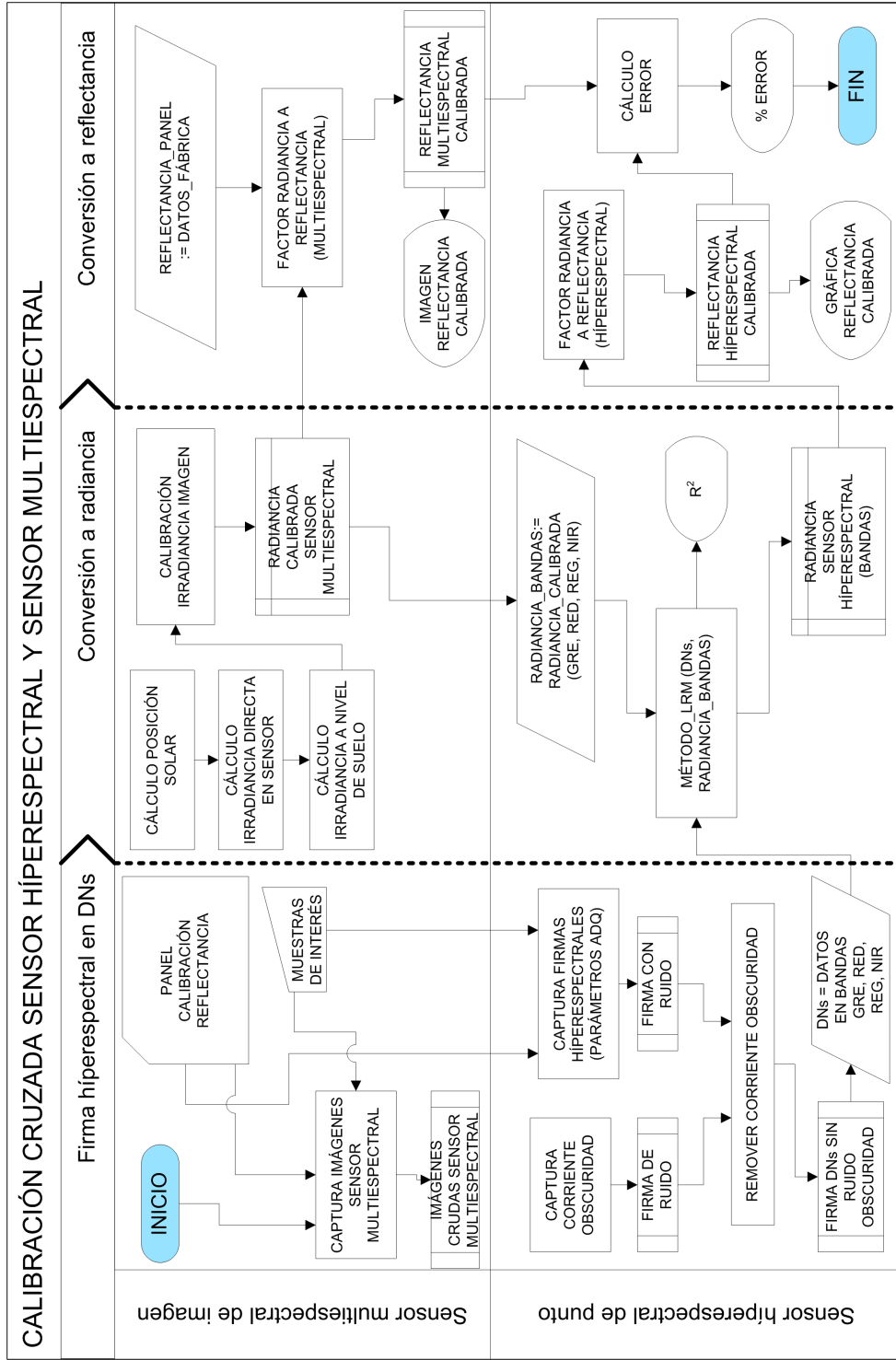


Figura 3.4: Flujo de trabajo propuesto para calibración cruzada del sensor hiperespectral, incluyendo la corrección de efectos angulares. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)

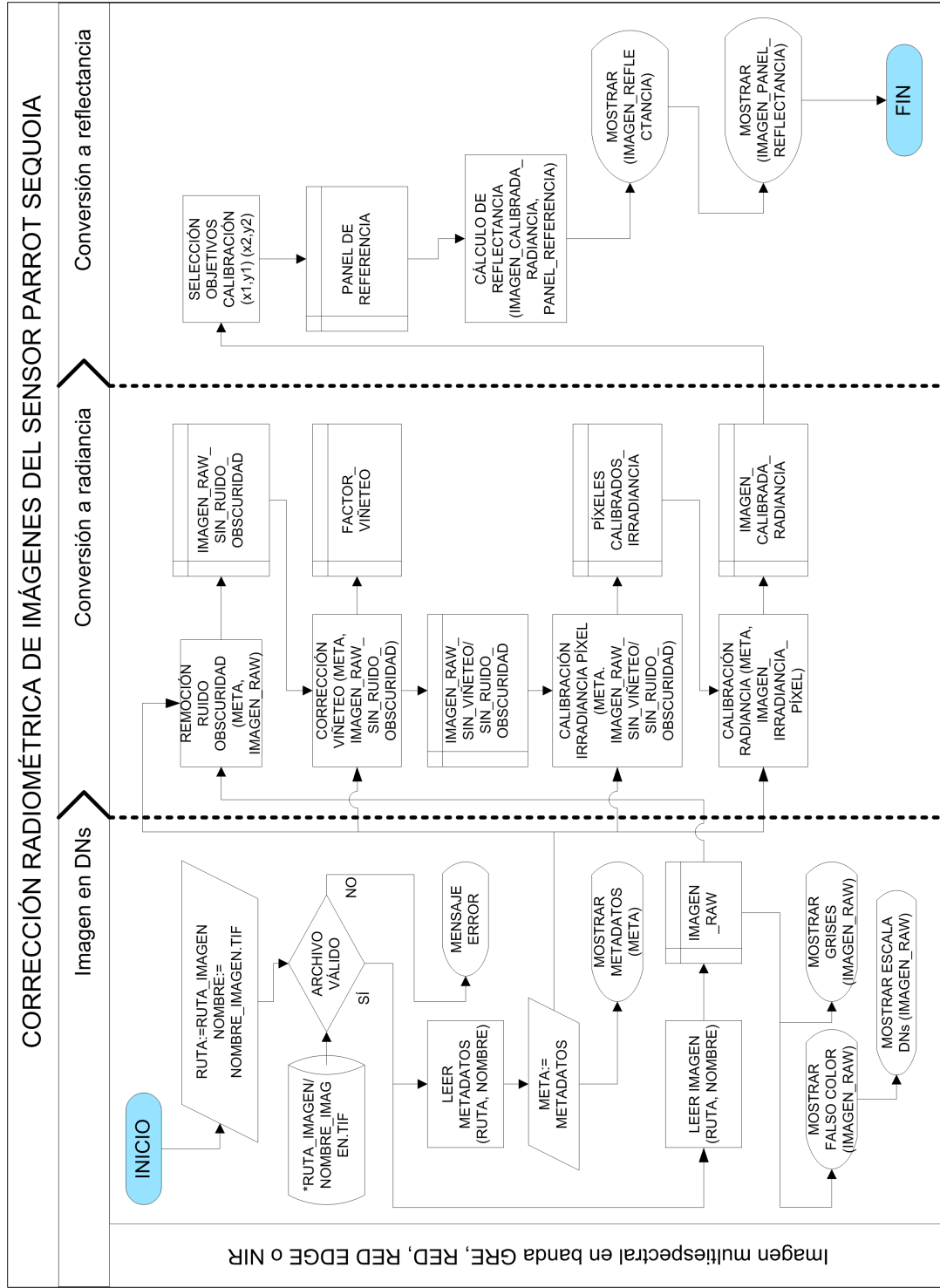


Figura 3.5: Flujo de trabajo propuesto para calibración de reflectancia del sensor multiespectral. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)

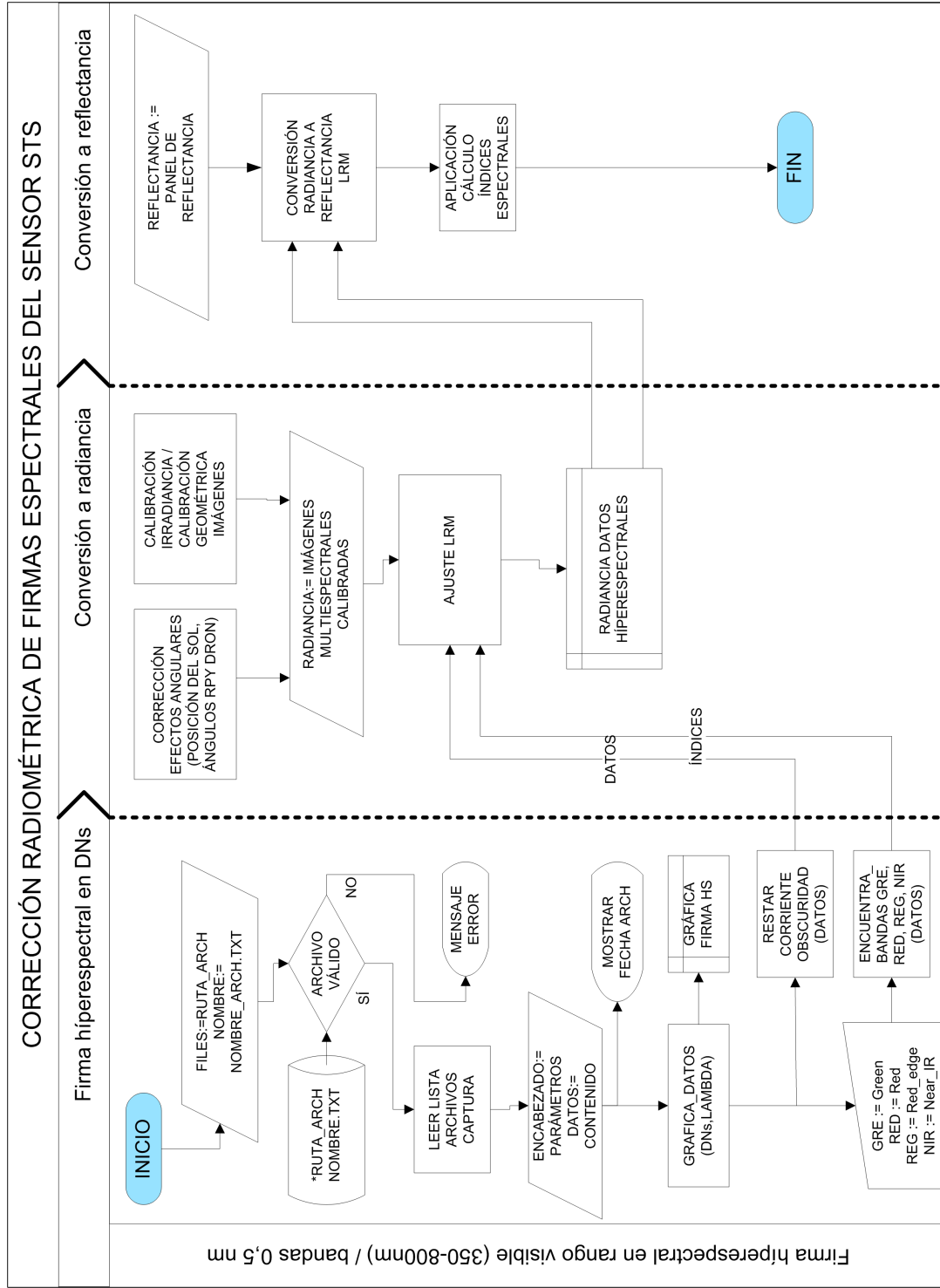


Figura 3.6: Flujo de trabajo propuesto para calibración de reflectancia del sensor hiperespectral. Fuente: Elaboración propia basada en (Micasense, 2017)

3.7. Conclusiones del Capítulo 3

En este capítulo se evaluaron las características de los esquemas de percepción remota basada en drones, aplicables a la corrección de efectos angulares en mediciones híperespectrales. Se optó por un esquema de trabajo basado en radiancia y el factor de reflectancia hemisférico cónico. A partir de este esquema, se diseñó un flujo de trabajo general de calibración cruzada entre el sensor multiespectral Parrot Sequoia y el sensor híperespectral Oceanoptics STS. También se plantearon los flujos de procesamiento independientes para cada sensor, cumpliéndose los objetivos 1 y 2 de esta tesis.

CALIBRACIÓN DE SENSORES DE PERCEPCIÓN REMOTA

En este capítulo se describen los modelos y procedimientos utilizados para llevar a cabo la calibración del sensor multiespectral y el sensor híperespectral, previo a la corrección de efectos angulares. En el flujo de trabajo propuesto, los valores de referencia de unidades físicas de radiancia ($W/m^2/sr$) son obtenidos a partir de la calibración de la cámara multiespectral Parrot Sequoia. La empresa Parrot® cuenta con un modelo propietario de calibración que ha puesto a disposición a través de notas de aplicación para permitir a sus socios y usuarios llevar a cabo sus propios flujos de trabajo, bajo un esquema de imagen por imagen. Las notas de aplicación y tutoriales de software incluyen modelos y parámetros de corrección geométrica y radiométrica que se describirán en las siguientes secciones. La interpretación de dichos modelos, así como detalles técnicos para su implementación se discuten en algunos foros entre pares (Domenzain, 2017) (Muzammil, 2017). Una vez calibrada la cámara multiespectral, el sensor híperespectral puede calibrarse de manera cruzada por bandas tomando como referencia

estas mediciones. También se describen los procedimientos de ajuste de parámetros del espectrómetro para aumentar el rango dinámico de la señal y elevar la relación señal a ruido en las mediciones crudas de radiancia. El software utilizado para el procesamiento de imágenes del sensor multiespectral fue Micasense Image Processing©. en su versión adaptada para Parrot Sequoia (Fenger-Nielsen, 2019).

4.1. Implementación del flujo de trabajo

El flujo de trabajo diseñado para esta tesis es una modificación al flujo de trabajo propuesto por (Burkart y cols., 2014)), con las diferencias que aquí se explican, particularmente, el proceso de calibración propuesto toma como base mediciones de los sensores integrados (sensor multiespectral Parrot Sequoia, sensor de irradiancia solar Parrot Sunshine y unidad de medición inercial) de fábrica en un midro-dron Parrot Bluegrass, en lugar de los instrumentos y métodos de laboratorio y de campo utilizados por Burkart. Burkart mostró el proceso de calibración de varios parámetros de adquisición del sensor híperespectral (espectrómetro Oceanoptics STS), que incluyen el ajuste automático del tiempo de adquisición, el modelado y remoción de la corriente de oscuridad como función de la temperatura de la placa del sensor y la caracterización de la luz parásita de segundo orden. Así mismo, llevó a cabo la corrección radiométrica de los DNs del sensor híperespectral contra un espectroradiómetro de campo de alta gama, logrando el ajuste de curvas de reflectancia con coeficientes de determinación $r^2 > 0,99$, indicando la viabilidad de su metodología en aplicaciones de espectroscopía de campo. Por último, Burkart planteó el tema acerca de la corrección de efectos angulares en las adquisiciones con drones, lo cual fue parte de la motivación de esta tesis.

Características de la implementación

En este trabajo hay varias diferencias respecto al flujo de trabajo propuesto por (Burkart y cols., 2014), por ejemplo, para la caracterización de la luz parásita de segundo orden del espectrómetro, es necesario contar con un laboratorio oscuro de óptica, un monocromador de luz y una fuente de luz calibrada en amplitud y longitud de onda en el rango visible, lo cual además está fuera del contexto de esta investigación. Para llevar a cabo el modelado de la corriente de oscuridad sería preciso contar con una cámara de temperatura controlada que permitiera llevar a cabo mediciones y el correspondiente ajuste exponencial propuesto por Burkart, sin contar la implementación de la interfaz de software y hardware para dicho aparato experimental. En este caso, la corriente de oscuridad fue medida instantes previos a cada adquisición para ser removida en el post-procesamiento de las capturas. El ajuste automático del tiempo de adquisición requiere la implementación de tarjetas electrónicas de control integradas al espectrómetro STS mediante la interfaz GPIO, módulos inalámbricos de comunicación y la programación de software embebido para el disparo sincronizado de la adquisición. Esto es muy deseable, puesto que en un esquema ideal, las mediciones de la cámara multiespectral Sequoia del dron y el espectrómetro STS deberían ser sincronizadas para garantizar que ambas fueron capturadas bajo las mismas condiciones de iluminación. Para resolver este último punto, se trabajó desde el punto de vista alternativo de la activación de la cámara multiespectral mediante hardware y la utilización del mismo pulso de activación para disparar la captura del espectrómetro; sin embargo, se concluyó que los modos de disparo de la cámara multiespectral Sequoia son internos, e.g., activados por traslape de las imágenes o por distancia calculada por GPS o por temporizador, entre otros. La cámara incluye un botón de disparo manual, lo cual es inviable para tomas con el dron durante el vuelo, así como con una interfaz usb para conexión con el controlador de vuelo y otra para conexión con el sensor de irradiancia solar. Por lo anterior, la única opción abierta sería un disparo asíncrono mediante protocolo PTP (Picture Transfer

Protocol), sujeto a la velocidad de la comunicación inalámbrica con la cámara. También se trabajó en pruebas para modificar parámetros de la cámara mediante este protocolo, pero en la experiencia del autor de la tesis, la cámara Parrot Sequoia incluida junto con el dron Parrot Bluegrass no contaba con las opciones de comunicación PTP de una cámara Sequoia comprada por separado y la interfaz web no permitió llevar a cabo capturas de imágenes o modificaciones de parámetros vía web, a pesar de haber actualizado la versión del firmware. No obstante, la utilización de una aplicación de un tercero (Pix4Dcapture) permitió llevar a cabo disparos síncronos temporizados de las cuatro bandas del sensor multiespectral mediante la comunicación interna entre el controlador de vuelo del dron y la aplicación móvil, a través de la red inalámbrica de 2.4 GHz entre el telemando del dron y la conexión de éste al teléfono móvil mediante interfaz USB.

4.2. Ajuste de parámetros del espectrómetro STS

Los parámetros que afectan directamente al hardware del espectrómetro son el tiempo de adquisición y el número de escaneos progresivos. Un parámetro ajustable mediante software es el filtro boxcar, el cual es un promediador de muestras que suaviza las mediciones adquiridas. Cada parámetro se suma para lograr elevar la relación señal a ruido (SNR). En esta implementación, los parámetros de adquisición del espectrómetro Oceanoptics STS se ajustaron mediante el software propietario Oceanview (ver Fig. 4.1).

Ajuste del tiempo de adquisición

El tiempo de adquisición controla el tiempo en que los capacitores de cada píxel del sensor almacenan la carga eléctrica equivalente a los fotones de luz incidentes en cada banda. De esta manera, si las condiciones de luz son bajas, es posible elevar el tiempo de adquisición o viceversa, aumentando la SNR de las mediciones. En este trabajo de tesis, se llevaron a cabo numerosas pruebas de adquisición, τ [ms], con el espectrómetro STS,

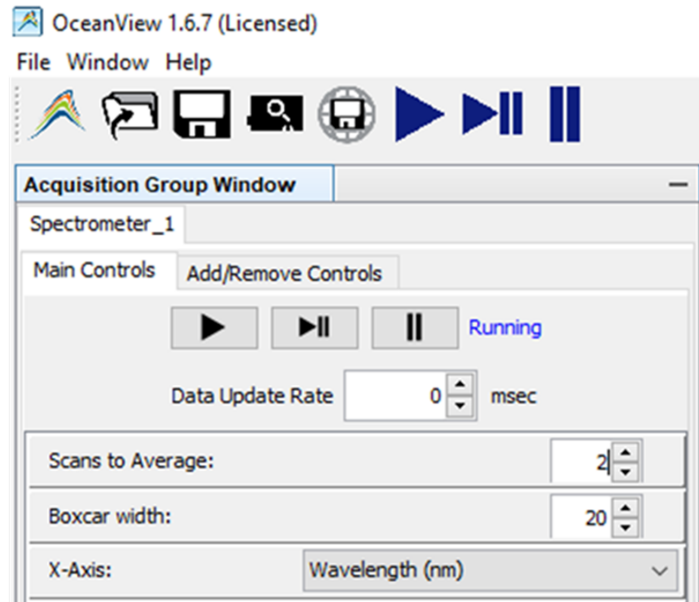


Figura 4.1: Ajuste de parámetros del sensor Oceanoptics STS mediante la interfaz de OceanView. Fuente: elaboración propia.

logrando caracterizar un tiempo adecuado de entre 350 y 750 ms para las condiciones de iluminación solar presentes.

Ajuste del número de escaneos

Este es un parámetro de hardware, ya que el sensor CMOS permite almacenar progresivamente la carga eléctrica, equivalente a fotones, sin borrar la carga de la adquisición anterior. El número de escaneos permite mejorar la SNR, bajo el compromiso de un mayor tiempo de adquisición por cada muestra. En este trabajo de tesis, el número de escaneos se ajustó en 2 para todas las mediciones.

Ajuste de muestras del filtro de promediado boxcar

El filtro de promediado boxcar se calibró tomando mediciones de reflexión utilizando el panel de calibración y referencias de blanco, como hojas de papel bond de alto brillo, lográndose un compromiso entre suavidad de la señal sin pérdida de los detalles de

cambios entre las bandas separadas en proporciones cercanas a 2 nanómetros. Derivado de numeros experimentos, el parámetro de ajuste del filtro boxcar se dejó en 20 nm.

Remoción de corriente de oscuridad

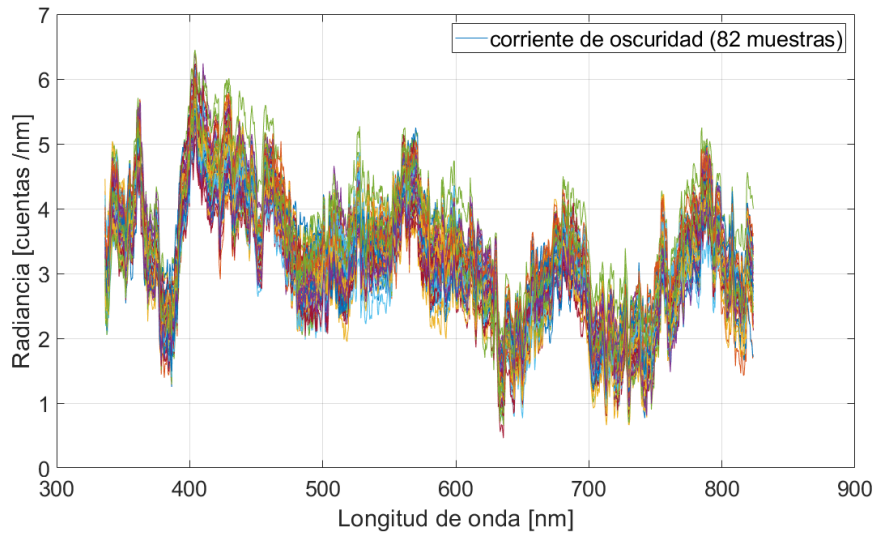
La corriente de oscuridad (DC) es tipo de ruido presente en sensores fotoeléctricos como los CCD o CMOS, que consiste en la presencia de una corriente eléctrica de salida, ante la ausencia de luz sobre el sensor. La DC presente en cada pixel, p , del sensor STS depende de la temperatura, T , y del tiempo de integración, IT , y corresponde a una función exponencial:

$$DC_{[p]} = (A_{[p]} + B_{[p]}e^{C_{[p]}T}) \tau \quad (4.1)$$

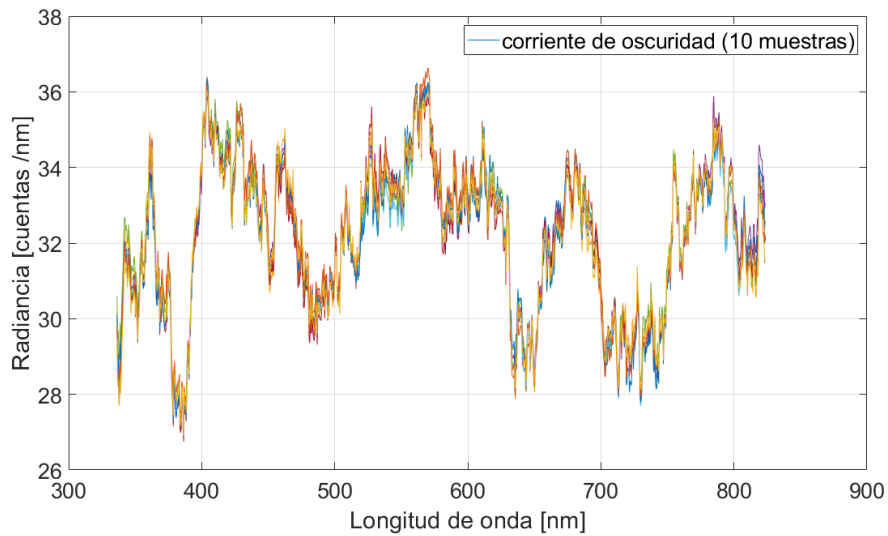
donde A , B y C son las constantes para el ajuste de la función exponencial. Antes de hacer el ajuste exponencial, los valores medidos por cada pixel se dividen por el tiempo de integración, después de haber eliminado los datos no estacionarios. En este trabajo, la remoción de corriente de oscuridad se llevó a cabo con base en mediciones de la misma previas a cada captura de la firma híperespectral, como se observa en la Fig. 4.2

4.3. Calibración cruzada del espectrómetro STS

En (Burkart y cols., 2014) se plantea la utilización de un espectrorradiómetro de campo para llevar a cabo la calibración cruzada del espectrómetro STS tomando mediciones aéreas desde el dron. Aunque la metodología de medición de factores de reflectancia no requiere mediciones absolutas, un trabajo de investigación requiere al menos de la disponibilidad de paneles de calibración con diferentes valores de reflectancia y especificaciones sobre su firma espectral. Las condiciones particulares del proyecto en el que se enmarca este trabajo de tesis no permitieron contar con esta clase de equipos y accesorios ópticos; sin embargo, las características de calibración absoluta de la cámara



(a) Corriente de oscuridad al inicio de la toma de mediciones (11:58:44 hrs) (periodo transitorio).



(b) Corriente de oscuridad 40 min después de operar en el exterior (12:37:43 hrs) (estado estacionario.)

Figura 4.2: Corriente de oscuridad del espectrómetro STS, medida de manera previa a cada captura. Ésta se obtuvo colocando temporalmente el protector de caucho negro de la lente colimadora. Fuente: elaboración propia con datos experimentales.

multiespectral Parrot Sequoia en sus cuatro bandas espectrales originaron la propuesta de utilizar este sensor para generar los patrones de referencia en las mediciones del espectrómetro, aunque la validación del flujo de trabajo se limitara a las bandas disponibles, dejando que la validación en todo el espectro del sensor pudiera hacerse en un futuro contando con recursos adicionales. Primero, se sigue el procedimiento de calibración de irradiancia proporcionado por el fabricante de la cámara Parrot Sequoia, logrando convertir los valores de píxeles del sensor multiespectral a unidades absolutas de irradiancia en unidades arbitrarias. Un sensor solar (Parrot Sunshine) instalado en la parte superior del dron, mismo que apunta en dirección opuesta a la cámara y se estabiliza junto con la plataforma de vuelo, capta la radiación solar de manera directa al sol, permitiendo un análisis del proceso de adquisición sincrónica de las imágenes multiespectrales y mediciones de irradiancia del sensor para generar mediciones de radiancia y reflectancia absolutas. A partir de este análisis teórico-práctico, se determina una manera de normalizar las mediciones de irradiancia por píxel a unidades de radiancia de un área de la imagen y de factores de radiancia consistentes a lo largo del tiempo.

Método de calibración LRM

La base del procedimiento de calibración cruzada del sensor híperespectral es el método de regresión lineal (LRM). A través de este método es posible estimar los coeficientes de calibración de radiancia del sensor híperespectral (por banda) a partir de los valores de radiancia del sensor multiespectral para cada objetivo de calibración. El método LRM asume que el espectro de reflectancia de un objetivo de calibración, medido con un espectrorradiómetro de campo en tierra (en esta tesis, un sensor de irradiancia multiespectral en aire), tiene una relación lineal con los DNs de cada banda de las imágenes tomadas por el sensor remoto (en esta tesis, el sensor híperespectral). Típicamente, los DNs se grafican en el eje X y la reflectancia en el eje Y ; la intersección de la recta con

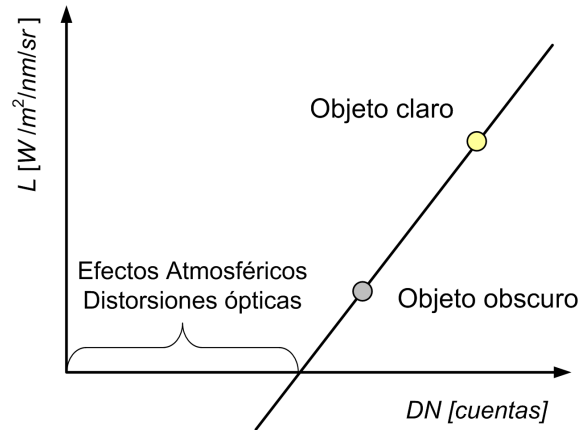


Figura 4.3: Método LRM para calibración de radiancia. Fuente: Elaboración propia basada en (Guo y cols., 2019)

el eje X es el valor de DN adscrito al ruido de la cámara y la radiancia por dispersión atmosférica. La Fig. 4.3 describe la forma en que los efectos atmosféricos y de iluminación son eliminados por el método LRM (Guo y cols., 2019). Una vez que la corriente de oscuridad de la cámara multiespectral se ha establecido, la Ec. 4.2 puede utilizarse para predecir la radiancia de la superficie de referencia mediante el sensor híperespectral, a partir de la radiancia registrada por el sensor multiespectral.

$$L_{sts} = aDN_{sts} \pm b \quad (4.2)$$

En el caso más simple, el uso de un único objetivo de calibración asume que la dispersión atmosférica no contribuye en la radiancia registrada por el sensor y por lo tanto las superficies con reflectancia cero producirán radiancia cero en el sensor. El uso dos o más objetivos de calibración mejora la precisión de la relación entre la radiancia registrada por el sensor y la reflectancia de la superficie obtenida. Para un conjunto de n objetivos de calibración, los coeficientes de la Ec. 4.2 pueden obtenerse con la Ec. 4.3 (Chen y Wang, 2021):

$$a = \frac{\sum L_i}{n} - \frac{b(\sum DN_i)}{n} \quad (4.3)$$

$$b = \frac{n \sum L_i DN_i - \sum L_i \sum DN_i}{n \sum DN_i^2 - (\sum DN_i)^2}$$

En la práctica, este método requiere de más de un objetivo de calibración de reflectancia conocida para mejorar la estimación de la aproximación lineal. Sin embargo, en este trabajo sólo se contó con un panel de radiancia conocida por cada banda espectral, por lo que el método LRM se implementó considerando un objetivo de calibración físico (panel de reflectancia) y tres objetivos de calibración virtuales (hoja vegetal, hoja blanca y panel negro), previamente calibrados a radiancia.

4.4. Calibración de irradiancia del sensor de imagen multi-espectral

El modelo propietario de calibración del sensor multispectral Parrot Sequoia permite convertir los DNs de los píxeles de la imagen a valores absolutos de irradiancia en unidades arbitrarias. Este modelo transforma los píxeles de la imagen a un espacio de color normalizado en el rango $[0, \infty]$, homogeneizado con unidades físicas de irradiancia W/m^2 . La equivalencia de cuentas de un píxel, p , a unidades arbitrarias de irradiancia, común a todas las bandas de la cámara Sequoia está dado por (Parrot Drone, 2017):

$$I_{seq} = f^2 \frac{p - B}{A\epsilon\gamma + C} \left[\alpha \frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (4.4)$$

donde A , B y C son coeficientes de calibración de fábrica, γ es la ganancia del sensor (e.g. factor de exposición ISO), ϵ el tiempo de exposición [s], f es el radio focal o número f , e I_{seq} es el valor de irradiancia espectral, en unidades arbitrarias, integrada sobre el ángulo sólido subtendido por el campo visual cónico del píxel del sensor Sequoia, Ω_{seq}^C . Los parámetros requeridos para el cálculo de I_{seq} pueden encontrarse etiquetados en los metadatos de la imagen. El símbolo α indica proporcionalidad. La irradiancia por píxel del sensor en unidades físicas, I'_{seq} , está dada por:

$$I'_{seq} = k I_{seq} \quad \left[\frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (4.5)$$

donde k es una constante de calibración, implícita en el proceso de estimación de reflectancia, como se describirá más adelante a partir de los conceptos propuestos por (Domenzain, 2017).

Calibración de irradiancia del sensor de brillo solar

El sensor Sequoia puede acompañarse del sensor de irradiancia solar Sunshine, para tomar datos simultáneos de referencia, útiles en la estimación de reflectancia. La equivalencia de cuentas del sensor Sunshine a unidades arbitrarias de irradiancia sobre las mismas bandas de la cámara Sequoia está dado por (Fenger-Nielsen, 2019):

$$I_{ss} = \frac{v}{g_{rel} \tau} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.6)$$

donde v es el valor en DNs del sensor, g_{rel} es un factor de ganancia relativa (particular para cada toma) y τ [s] es el tiempo de exposición del sensor. Dicho de otra manera, la relación de v con I_{ss} , g_{rel} y τ , es lineal y sin offset por corriente de oscuridad. La irradiancia del sensor Sunshine en unidades físicas, I'_{ss} está dado por:

$$I'_{ss} = k' I_{ss} \quad \left[\frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (4.7)$$

La estimación de la constante k' no es trivial y requeriría ensayos controlados en laboratorio, por lo cual también queda implícita en el proceso de calibración (Domenzain, 2017).

4.5. Calibración de reflectancia del sensor de imagen multi-espectral

Suponga que el sol ilumina desde el nadir una superficie de reflectancia R , de manera que el ángulo de incidencia es $\theta_i = 0$ y la irradiancia solar hemisférica es I_{sun} . Si el sensor Sequoia captura la imagen de la superficie desde un ángulo de reflexión θ_r , por la ley de Lambert del coseno, el valor de irradiancia por píxel del sensor Sequoia en unidades físicas, I'_{seq} , quedaría dado por (Domenzain, 2017):

$$I'_{seq}(\theta_r) = RI_{sun} \cos\theta_r = kI_{seq}(\theta_r) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.8)$$

Si a su vez, el sensor sunshine apunta perpendicularmente al sol en el zenith, el valor de irradiancia medido en unidades físicas queda dado por:

$$I'_{ss}(\theta_i = 0) = I_{sun} = k'I_{ss}(\theta_i = 0) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.9)$$

Resolviendo para I_{sun} , se obtiene la igualdad:

$$Rk'I_{ss}(\theta_i = 0) \cos\theta_r = kI_{seq}(\theta_r) \quad (4.10)$$

de donde, la reflectancia asociada con cada píxel de la imagen queda dada por:

$$R = \frac{k}{k'} \frac{I_{seq}(\theta_r)}{I_{ss}(\theta_i = 0) \cos\theta_r} \quad (4.11)$$

El factor $K = k/k'$ interpretarse como la proporción entre los ángulos sólidos subtendidos por el campo visual cónico del píxel del sensor de imagen (Domenzain, 2017), Ω_{seq}^C y el campo visual hemisférico del sensor de irradiancia solar, Ω_{ss}^H . Las constantes de calibración de irradiancia k y k' han quedado implícitas en el factor K , por lo tanto:

$$R \cos\theta_r = K \frac{I_{seq}(\theta_r)}{I_{ss}(\theta_i = 0)} \quad (4.12)$$

Si el ángulo de observación del sensor Sequoia es el nadir, $\theta_r = 0$, entonces la reflectancia puede calcularse como:

$$R = K \frac{I_{seq}(\theta_r = 0)}{I_{ss}(\theta_i = 0)} \quad (4.13)$$

Factor de reflectancia del sensor de imagen multispectral

Como puede apreciarse en la Ec. 4.13, la estimación de reflectancia R depende del factor de calibración K , esto es:

$$K = R \frac{I_{ss}(\theta_i = 0)}{I_{seq}(\theta_r)} \cos \theta_r \quad (4.14)$$

Dado que I_{ss} e I_{seq} están determinadas por las mediciones de los sensores respectivos, una forma simple de determinar K es a partir de un panel de reflectancia conocida, R_{ref} :

$$K = R_{ref} \frac{I_{ss}(\theta_i = 0)}{I_{seq}(\theta_r)} \cos \theta_r \quad (4.15)$$

Si además, el ángulo de observación del sensor es el nadir, entonces el factor de calibración K puede simplificarse a:

$$K(\theta_i = 0; \theta_r = 0) = R_{ref} \frac{I_{ss}}{I_{seq}} \quad (4.16)$$

La radiancia promedio medida por el sensor en el ángulo sólido proyectado por el panel de reflectancia sobre el área de la imagen, $A_{img(ref)}$, está dada por:

$$L_{abs} = \bar{E}(I_{seq}/(I_{ss} \cos \theta_r)), \quad I_{ss}, I_{seq} \in A_{img(ref)} \quad [\alpha W/m^2/nm/sr] \quad (4.17)$$

Finalmente, el proceso de calibración de irradiancia a reflectancia del sensor Sequoia por cada píxel $p(x, y)$ de una imagen dada, con $\theta_i = 0$ puede expresarse como:

$$R(x, y) = K_L^R \frac{I_{seq}}{I_{ss}(x, y) \cos \theta_r} \quad (4.18)$$

donde $K_L^R = R_{ref}/L_{abs}$ es un factor de conversión de radiancia a reflectancia.

4.6. Calibración cruzada del sensor hiperespectral

Tomando como base la calibración absoluta del sensor multiespectral Parrot Sequoia en unidades de radiancia, así como los datos conocidos del panel de calibración, se llevó a cabo la calibración cruzada del sensor hiperespectral con los resultados que se presentan en la Sec. 4.7.

Descripción del aparato experimental

El aparato experimental implementado corresponde al esquema propuesto en la Fig. 3.3. El objetivo final consiste en calibrar el sensor hiperespectral de punto, Oceanoptics STS (sensor 3), a unidades de reflectancia considerando la corrección de efectos angulares asociados a la geometría sol-sensor y tomando como referencia de calibración las mediciones de radiancia del sensor multiespectral Parrot Sequoia (sensor 1), normalizadas a partir de mediciones de irradiancia absoluta del sensor de irradiancia Parrot Sunshine (sensor 3). Se contó con un panel de reflectancia Airnov, con datos de referencia para las bandas GREEN (18.9%), RED (20.1%), RED EDGE (22.7%) y NIR (26%) (ver Fig. 4.4), correspondientes a la cámara multiespectral Parrot Sequoia con las longitudes de onda centrales en GREEN (550.0 nm), RED (660.0 nm), RED EDGE (735.0 nm) y NIR (790.0 nm), a la vez integrada en un dron Parrot Bluegrass, el cual además cuenta con un sensor de irradiancia solar Parrot Sunshine, sincronizado con el obturador general del sensor Sequoia, referido a las mismas bandas del sensor de imagen. El sensor hiperespectral fue el espectrómetro Ocean Optics STS-VIS, con un rango de longitudes de onda de 336.384 a 823.5930 nm, en pasos de 0.5 nm (ver Fig. 4.5).

Componentes del sistema

A continuación se enlistan los componentes del sistema.

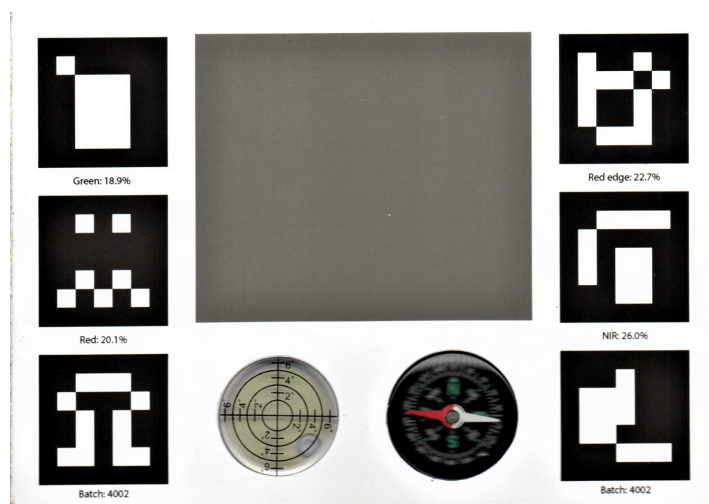


Figura 4.4: Panel de calibración de la cámara multispectral Parrot Sequoia. Fuente: elaboración propia.

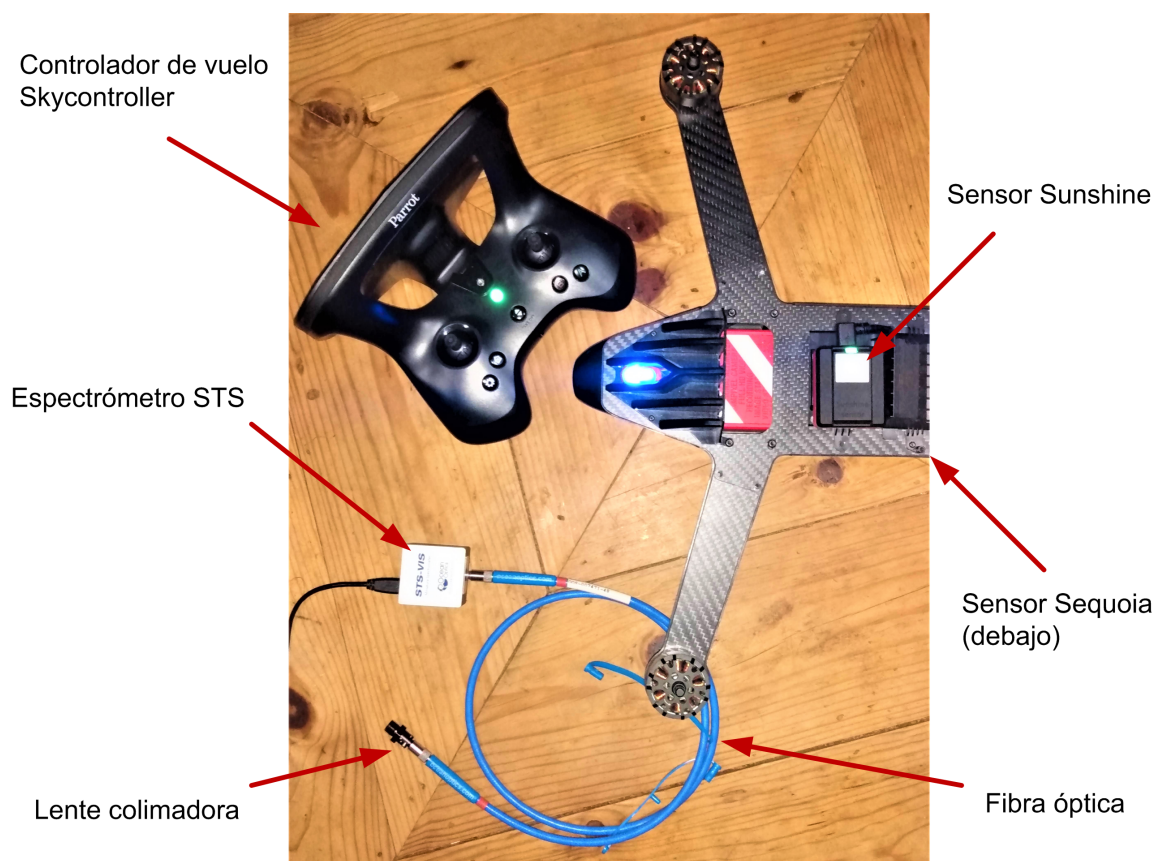


Figura 4.5: Componentes del aparato experimental. Fuente: elaboración propia.

Componentes del micro-dron

- Cámara multiespectral Parrot Sequoia
- Sensor de irradiancia solar Parrot Sunshine
- Aplicación de planificación de vuelo
- Panel de calibración de 4 bandas empatadas con Parrot Sequoia
- Controlador de vuelo skycontroller

Componentes del espectrómetro

- Accesorio óptico: fibra óptica
- Accesorio óptico: lente colimadora
- Acceso de software: Oceanoptics Oceanview
- Accesorio de hardware: cable micro-USB

Fecha, ubicación y condiciones ambientales

El 06/11/2022, entre las 11:30 y 13:30 horas, tiempo del centro de México (UTC+6), en el sitio con coordenadas 19.0581111005806, latitud norte y 98.3074754001278, longitud oeste, ubicado a una altitud de 2149.699988 msnm, se llevó a cabo la captura de imágenes multiespectrales y firmas híperespectrales *representativas* de diferentes tipos de muestras para su posterior calibración imagen por imagen. Las muestras consistieron en un espécimen de hoja de una planta del género *Alocasia*, el panel de calibración Airnov, una hoja de papel bond marca HP para oficina, de $75\text{g}/\text{m}^2$ y con especificación de brillo al 92 %. (ver Fig. 4.6). La fecha, hora y ubicación seleccionada obedeció a las condiciones ambientales favorables para las mediciones, soleado y sin nubosidad. Cabe mencionar que también se tomaron mediciones en otros sitios, fechas y condiciones diferentes, pero el caso que se presenta es representativo de los demás, con la ventaja de que las mediciones que aquí se presentan no incluyen en gran medida efectos atmosféricos, cuya corrección está fuera del enfoque de esta tesis.



Figura 4.6: Escenario experimental para la toma de imágenes multiespectrales y firmas hiperespectrales. Fuente: elaboración propia.

Forma de muestreo del espectrómetro

Para el desarrollo del flujo de calibración, las firmas hiperespectrales se tomaron de manera próxima a las muestras lo que permitirá separar será separar las mediciones en conjuntos de datos correspondientes a una clase a la vez, evitando el fenómeno conocido como mezcla del píxel, donde un mismo píxel puede contener información espectral de más de un objeto. En primer lugar, se ajustaron los parámetros de adquisición del sensor previamente caracterizados para trabajo a medio día. Los parámetros utilizados fueron los que se muestran en la Tabla 4.1. Posteriormente, con el espectrómetro en frío, se llevó a cabo la adquisición de muestras de corriente de oscuridad en ráfagas de 10 [s], dejando estabilizar la temperatura del espectrómetro por aproximadamente 10 min. A continuación, se tomaron muestras representativas de los materiales descritos en la Ss. 4.6 en ráfagas de 10 [s], seguidas del muestreo de la corriente de oscuridad. Los archivos se etiquetaron automáticamente con la fecha, hora y parámetros del muestreo para su posterior análisis. Las firmas hiperespectrales que se analizan más adelante corresponden al promedio de las ráfagas tomadas por cada muestreo.

Parámetro	Ajuste	unidades
Tiempo de integración	350	[ms]
Número de escaneos para el filtro promedio	2	[escaneos]
Ancho de caja del filtro boxcar	20	[muestras]

Tabla 4.1: Parámetros de adquisición del espectrómetro STS. Fuente: elaboración propia.

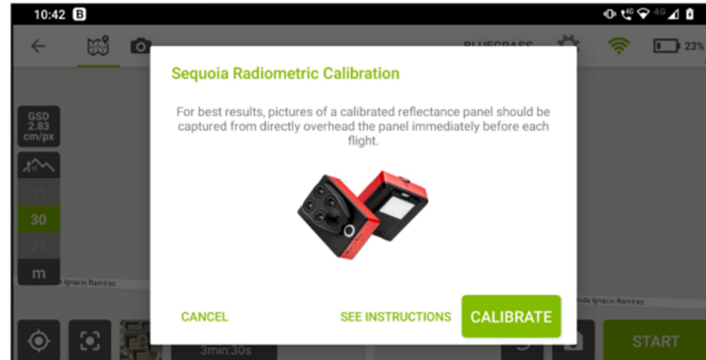


Figura 4.7: Interfaz de captura de imágenes de calibración del sensor Parrot Sequoia. Fuente: elaboración propia mediante la aplicación móvil Pix4D Capture.

Forma de muestreo del sensor Sequoia

Las imágenes del sensor Sequoia se tomaron de manera próxima a las muestras, sosteniendo el micro-dron a una altura aproximada de 1.0-1.7 [m] por encima de los objetivos de calibración, desde distintos ángulos de observación alrededor de las mismas, evitando reflexiones de objetos circundantes, o sombras provocadas por la persona. Los momentos de adquisición fueron inmediatos a la adquisición de firmas híperespectrales que se describen en la Ss 4.6. El micro-dron Parrot Bluegrass se sostuvo de manera horizontal, midiéndose un ángulo de observación en el ángulo de pitch de 14° , aproximadamente, debido a la postura oblicua de la cámara según el diseño de fábrica. El muestreo de las bandas multiespectrales se llevó a cabo de manera síncrona, activado por temporizador de un contador de 10 [s] asociado al obturador síncrono de la cámara Parrot Sequoia. El disparo del muestreo se activó enviando el comando de captura (“calibrate”) desde la aplicación móvil Pix4D Capture, previamente conectada a la red de 2.4 GHz del dron a través del controlador de vuelo Skycontroller (ver Fig. 4.7).

4.7. Resultados experimentales

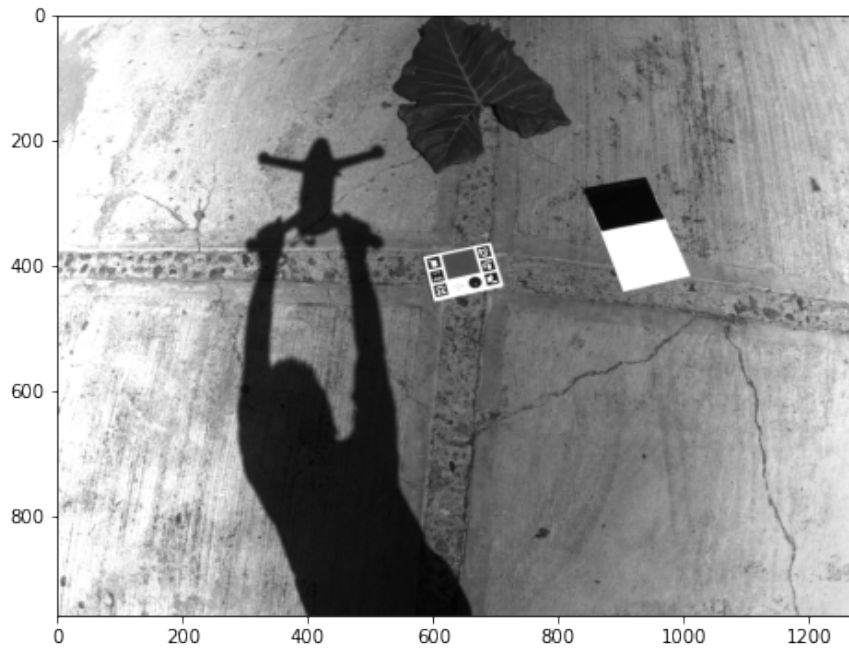
A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el flujo de trabajo propuesto en la S. 3.4.

Resultados de calibración del sensor multiespectral

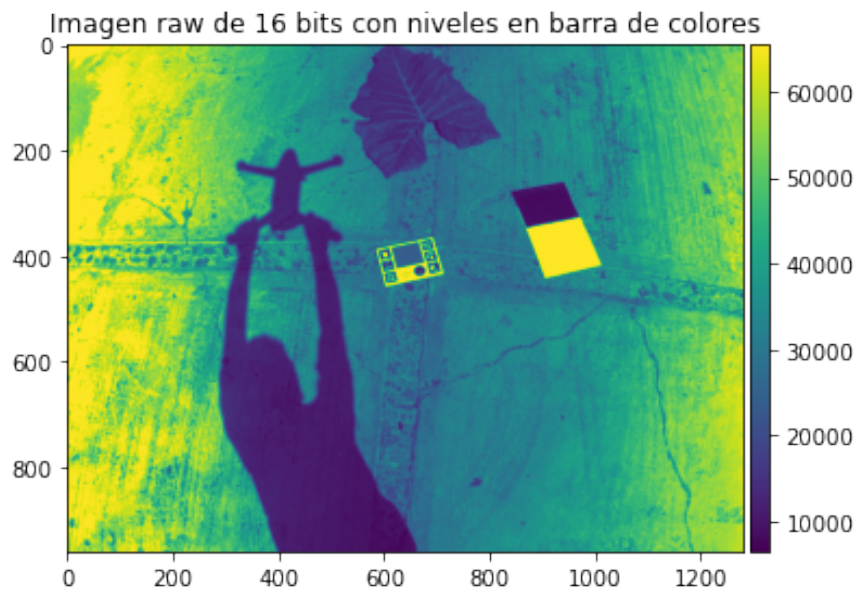
Considere el flujo de procesamiento propuesto en el diagrama de la Fig. 3.5. Las imágenes del sensor Sequoia se importaron al software Micasense Image Processing© Sequoia (Fenger-Nielsen, 2019), partiendo con el procesamiento en DNs, como se muestra en la Fig. 4.8. Seguidamente, se llevó a cabo la conversión de píxeles en DNs a valores de radiancia, utilizando las funciones de calibración de irradiancia de píxeles y corrección de viñeteo incluidas con el software (ver Fig. 4.9). Posteriormente se llevó a cabo la selección de objetivos de calibración dentro de las imágenes de radiancia para calcular las constantes de calibración de radiancia a reflectancia utilizando imágenes del panel de referencia (ver Fig. 4.10). Una vez calculada la constante de calibración, las imágenes corregidas en radiancia se convirtieron a reflectancia, como se muestra en la Fig. 4.11. El procedimiento anterior se llevó a cabo por cada una de las bandas del sensor multiespectral (GRE, RED, REG y NIR). Finalmente, se observaron las imágenes convertidas a reflectancia y los valores de reflectancia en las regiones seleccionadas por cada objetivo de calibración (ver Fig. 4.12). Los resultados del flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales en las distintas bandas se resumen en las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5. Es a partir de estos datos de radiancia y reflectancia que se llevará a cabo la calibración cruzada del sensor híperespectral, como se describe en la Ss. 4.7.

Resultados de calibración cruzada del sensor híperespectral

A continuación se describen los resultados del flujo de procesamiento propuesto en el diagrama de la Fig. 3.6 para la calibración del sensor STS.

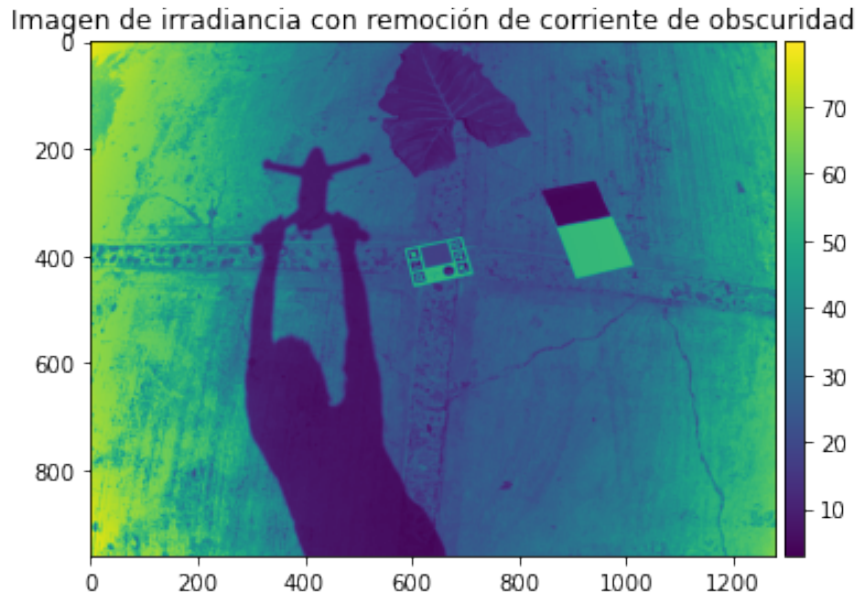


(a) Imagen cruda en escala de grises $p(x, y)$ en la banda GREEN.



(b) Imagen cruda en falso color $DN(x, y)$ en la banda GREEN.

Figura 4.8: Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Imágenes en DNs de la banda GREEN. Dimensiones: 960x1280 [px]. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.

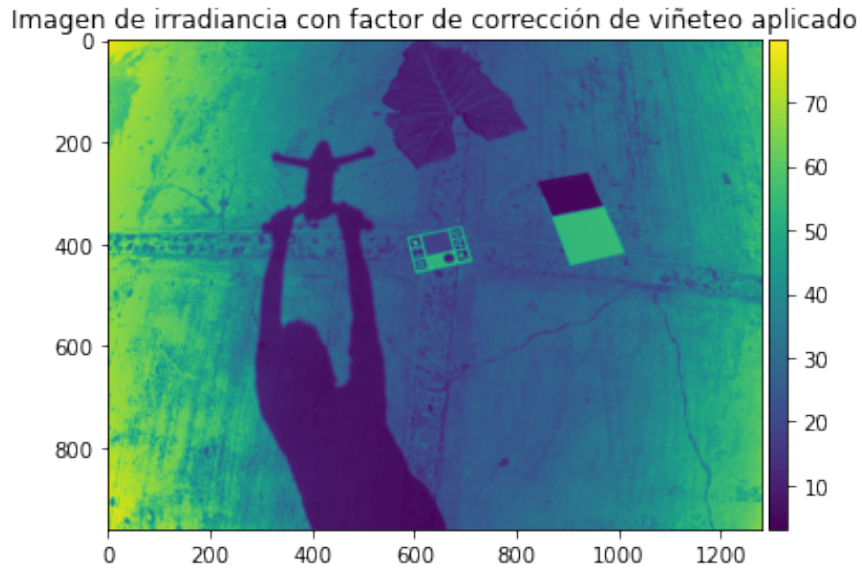


(a) Conversión de píxeles a irradiancia $I_{seq}(x, y)$ con remoción de corriente de oscuridad $DC(x, y)$ en la banda GREEN.

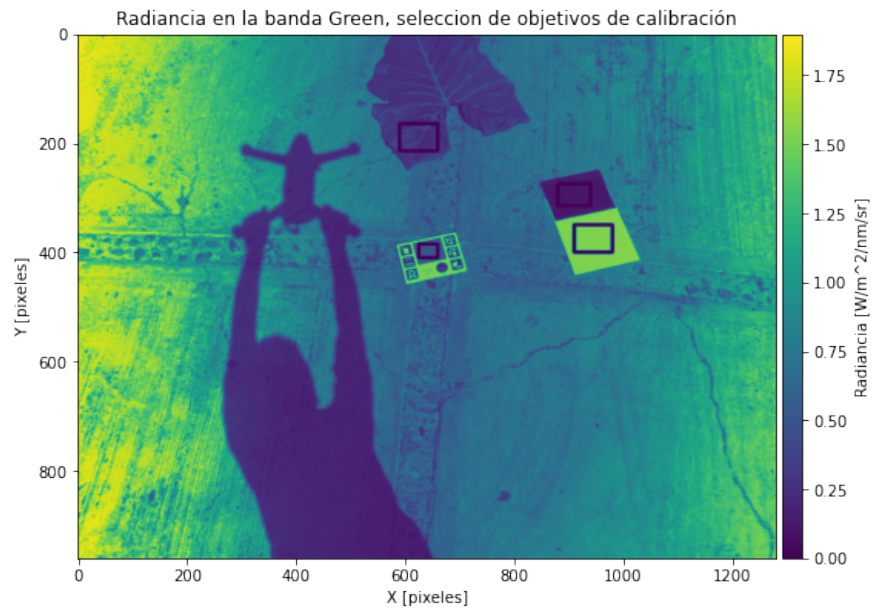


(b) Factor de viñeteo $\nu(x, y)$ en la imagen de irradiancia $I_{seq}(x, y)$ de la banda GREEN.

Figura 4.9: Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Calibración de píxeles a irradiancia espectral en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.

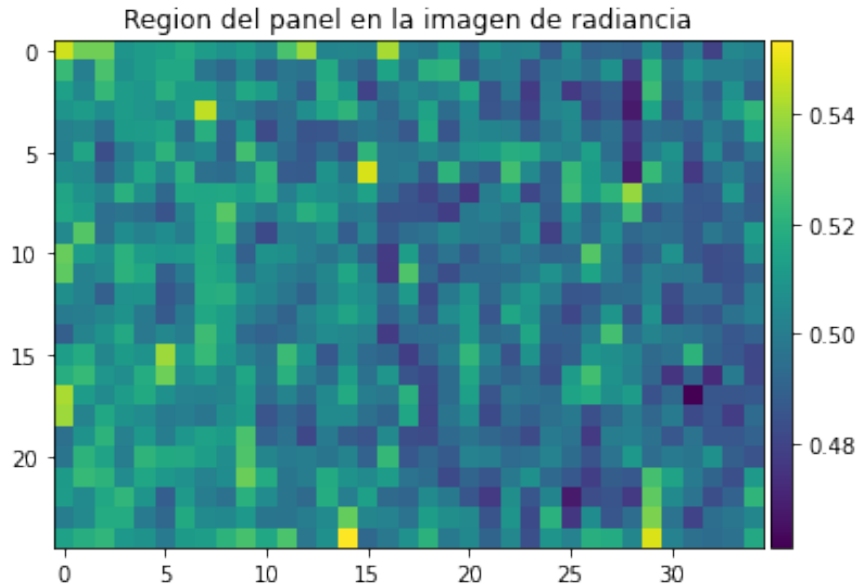


(a) Aplicación del factor de corrección de viñeteo a imagen de irradiancia $I_{seq}(x, y)$ en la banda GREEN.

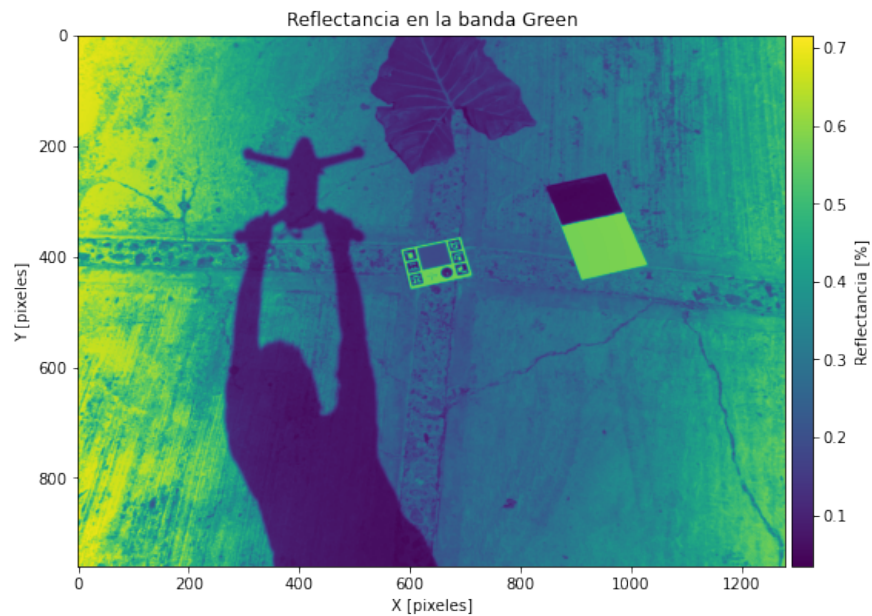


(b) Imagen calibrada de radiancia, $L_{seq}(x, y)$, en la banda GREEN. Selección rectangular del objetivos de calibración.

Figura 4.10: Flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales: Calibración de irradiancia del píxel a radiancia $L_{seq}(x, y)$ en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.

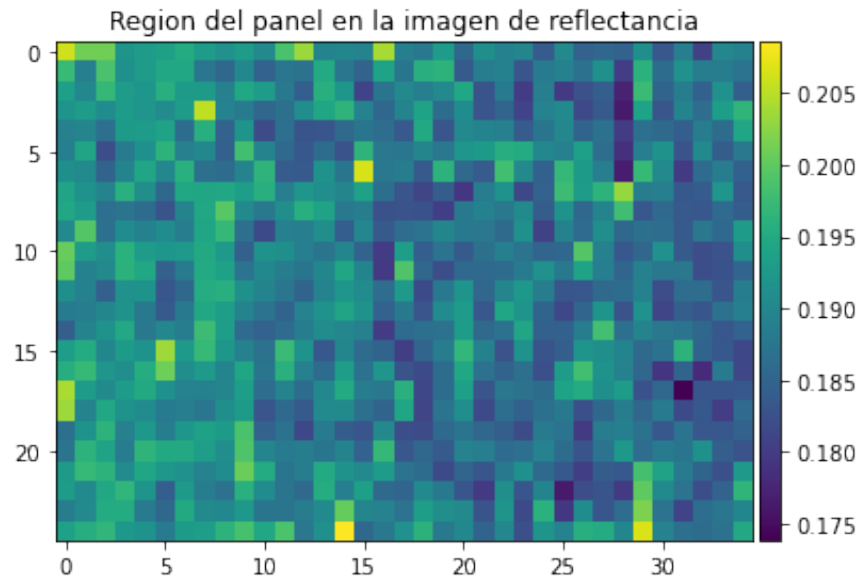


(a) Radiancia [$W/m^2/nm/sr$] en la selección rectangular, $L_{seq}(x_1 : x_2, y_1 : y_2)$, del panel de reflectancia en la banda GREEN.

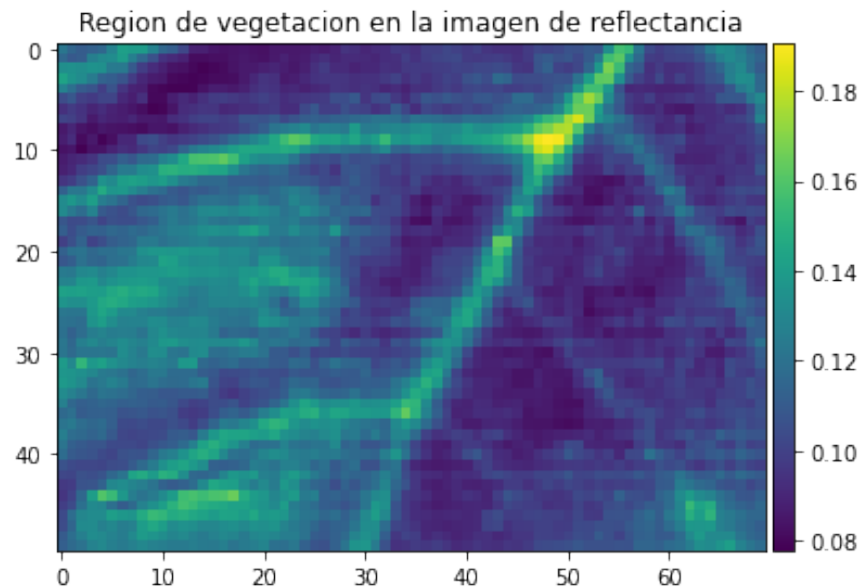


(b) Imagen calibrada de reflectancia, $R_{seq}(x, y)$, en la banda GREEN.

Figura 4.11: Flujo de procesamiento de imágenes multispectrales: Calibración de radiancia $L_{seq}(x, y)$ a reflectancia $R_{seq}(x, y)$ en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.



(a) Reflectancia en la selección rectangular, $R_{seq}(x_{1p} : x_{2p}, y_{1p} : y_{2p})$, del panel de reflectancia en la banda GREEN.



(b) Reflectancia en la selección rectangular, $R_{seq}(x_{1v} : x_{2v}, y_{1v} : y_{2v})$, de la muestra de vegetación en la banda GREEN.

Figura 4.12: Reflectancia en la selección rectangular de la imagen, del panel de referencia y de una muestra de vegetación, en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia mediante el software Micasense Image Processing©.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	R_{seq}	K_L^R
GREEN	PANEL	0.501	0.189	0.377
	VEGETACIÓN	0.292	0.110	0.377
	HOJA BLANCA	1.531	0.577	0.377
	PANEL NEGRO	0.122	0.046	0.377

Tabla 4.2: Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	R_{seq}	K_L^R
RED	PANEL	0.451	0.201	0.446
	VEGETACIÓN	0.141	0.063	0.446
	HOJA BLANCA	1.791	0.798	0.446
	PANEL NEGRO	0.092	0.040	0.446

Tabla 4.3: Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda RED. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	R_{seq}	K_L^R
RED EDGE	PANEL	1.214	0.227	0.187
	VEGETACIÓN	2.416	0.452	0.187
	HOJA BLANCA	4.308	0.806	0.187
	PANEL NEGRO	0.204	0.036	0.187

Tabla 4.4: Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda RED-EDGE. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	R_{seq}	K_L^R
NIR	PANEL	0.328	0.260	0.793
	VEGETACIÓN	0.719	0.570	0.793
	HOJA BLANCA	1.001	0.794	0.793
	PANEL NEGRO	0.061	0.048	0.793

Tabla 4.5: Resultados de calibración de radiancia multiespectral (L_{seq}) a reflectancia multiespectral (R_{seq}) en la banda NIR. Fuente: elaboración propia.

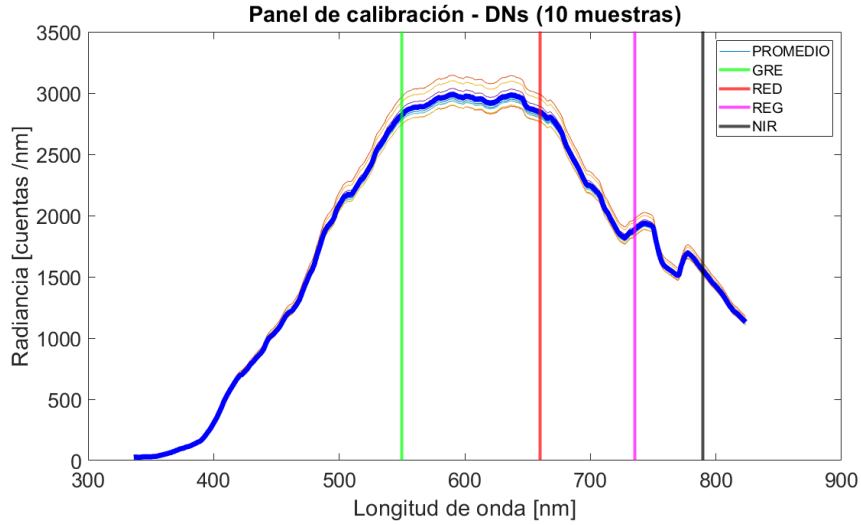


Figura 4.13: Firma hiperespectral en DNs del sensor STS: Panel de reflectancia. Fuente: elaboración propia.

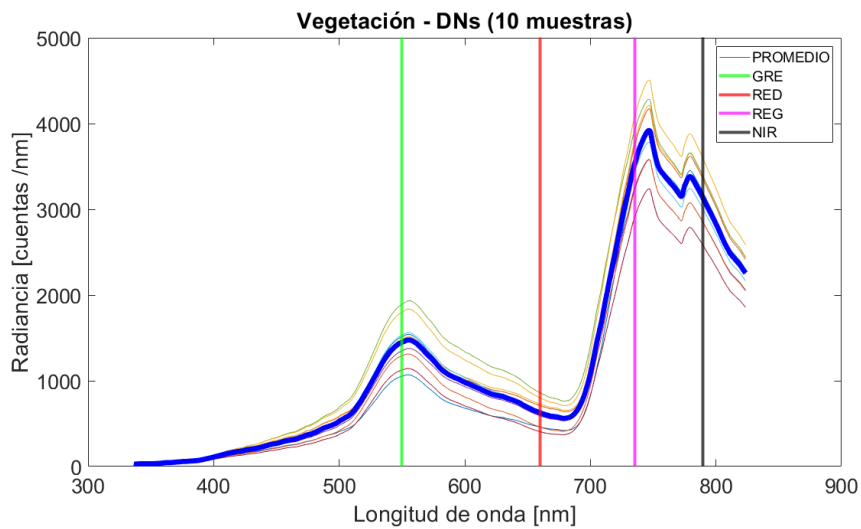


Figura 4.14: Firma hiperespectral en DNs del sensor STS: Hoja vegetal. Fuente: elaboración propia.

Resultados: firma hiperespectral en DNs

En las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran las firmas hiperespectrales de cada uno de los objetivos de calibración en DNs, una vez que se ha removido la corriente de oscuridad.

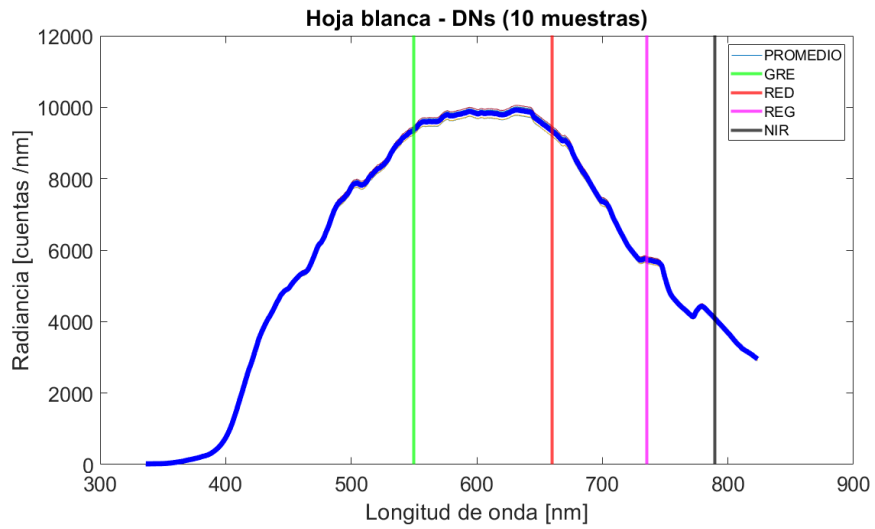


Figura 4.15: Firma hiperespectral en DNs del sensor STS: Hoja blanca. Fuente: elaboración propia.

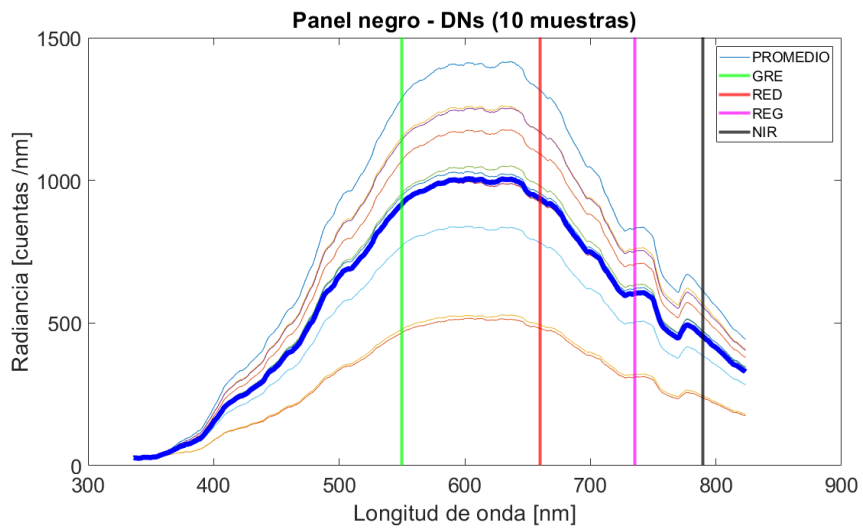


Figura 4.16: Firma hiperespectral en DNs del sensor STS: Panel negro. Fuente: elaboración propia.

Banda	$\lambda_c [nm]$	$FWHM [nm]$	a	b	R^2
GREEN	550.0	40.0	1.6135E-04	2.8575E-02	0.998
RED	660.0	40.0	1.9591E-04	-4.9308E-02	0.997
REDEDGE	735.0	10.0	7.9350E-04	-2.7728E-01	0.999
NIR	790.0	40.0	2.5641E-04	-5.5793E-02	0.999

Tabla 4.6: Coeficientes del método LRM para calibración cruzada de radiancia L_{seq} a radiancia L_{STS} . Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	$L_{seq} [W/m^2/nm/sr]$	DN_{STS}	$L_{STS} [W/m^2/nm/sr]$
GREEN	PANEL	0.501	2796	0.480
	VEGETACIÓN	0.292	1415.4	0.257
	HOJA BLANCA	1.531	9354.8	1.538
	PANEL NEGRO	0.122	884.75	0.171

Tabla 4.7: Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia hiperespectral (L_{STS}) en la banda GREEN. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	$L_{seq} [W/m^2/nm/sr]$	DN_{STS}	$L_{STS} [W/m^2/nm/sr]$
RED	PANEL	0.451	2820.50	0.503
	VEGETACIÓN	0.141	595.36	0.067
	HOJA BLANCA	1.791	9319.3	1.776
	PANEL NEGRO	0.092	905.25	0.128

Tabla 4.8: Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia hiperespectral (L_{STS}) en la banda RED. Fuente: elaboración propia.

Resultados: Calibración cruzada de radiancia LRM

Los datos de entrada para el algoritmo LRM por cada banda se muestran en las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5. Estos son los datos calibrados en radiancia y reflectancia de cada uno de los objetivos de calibración a partir del procesamiento de las imágenes multiespectrales del sensor Sequoia. Los coeficientes de calibración de DNs a radiancia del sensor hiperespectral se presentan en las Tabla 4.6. Los resultados de calibración cruzada de radiancia Sequoia a radiancia STS se presentan en las tablas 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10. En la Fig 4.17 pueden apreciarse gráficamente los coeficientes de calibración por banda.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	DN_{STS}	L_{STS} [$W/m^2/nm/sr$]
RED EDGE	PANEL	1.214	1859.8	1.198
	VEGETACIÓN	2.416	3500.6	2.500
	HOJA BLANCA	4.308	5722.9	4.264
	PANEL NEGRO	0.204	575.24	0.179

Tabla 4.9: Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda RED-EDGE. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	L_{seq} [$W/m^2/nm/sr$]	DN_{STS}	L_{STS} [$W/m^2/nm/sr$]
NIR	PANEL	0.328	1521.7	0.334
	VEGETACIÓN	0.719	3093	0.737
	HOJA BLANCA	1.001	4061.5	0.986
	PANEL NEGRO	0.061	419.13	0.052

Tabla 4.10: Resultados de calibración cruzada de radiancia multiespectral (L_{seq}) a radiancia híperespectral (L_{STS}) en la banda NIR. Fuente: elaboración propia.

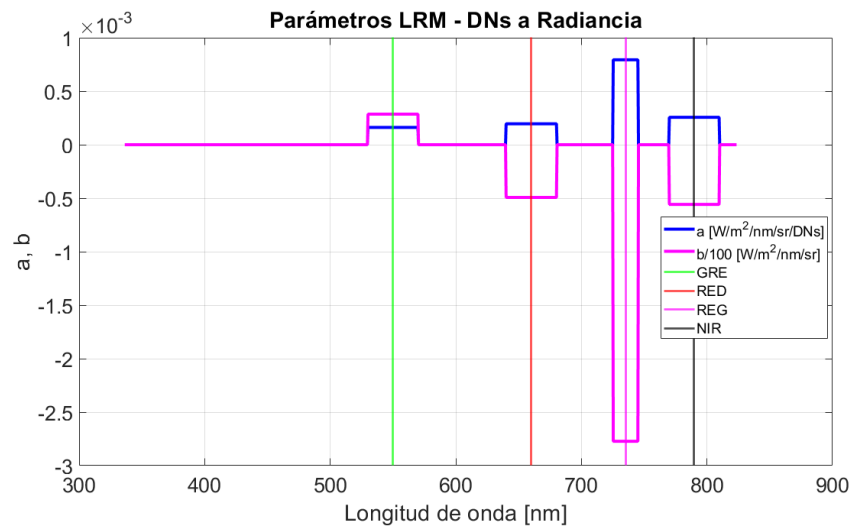


Figura 4.17: Parámetros del algoritmo LRM para calibración cruzada de radiancia. Fuente: elaboración propia.

BANDA	R_{panel}	L_{STS}	$K_{L_{STS}}^R$
GREEN	0.189	0.480	2.5382
RED	0.201	0.503	2.5037
RED EDGE	0.227	1.198	5.2797
NIR	0.26	0.334	1.2861

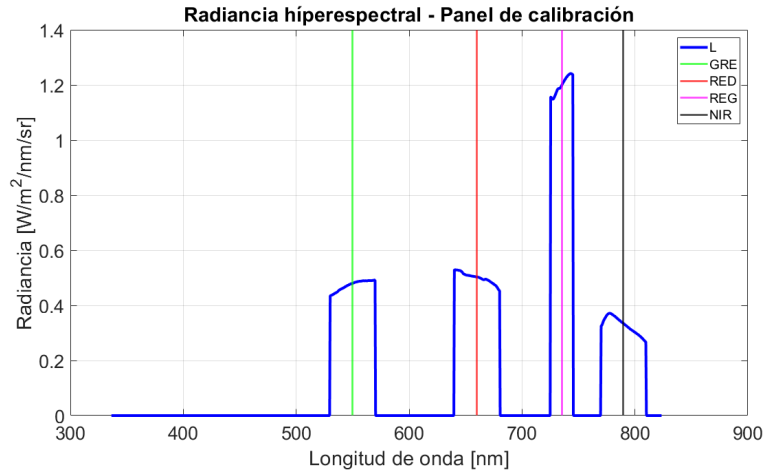
Tabla 4.11: Factor de calibración de radiancia a reflectancia del sensor STS. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	L_{seq}	L_{STS}	R_{seq}	R_{STS}	e [%]
GREEN	PANEL	0.501	0.480	0.189	0.189	0
	VEGETACIÓN	0.292	0.257	0.110	0.189	1
	HOJA BLANCA	1.531	1.538	0.577	0.606	2
	PANEL NEGRO	0.122	0.171	0.046	0.068	3
RED	PANEL	0.451	0.503	0.201	0.201	0
	VEGETACION	0.141	0.067	0.063	0.027	4
	HOJA BLANCA	1.791	1.776	0.798	0.710	9
	PANEL NEGRO	0.092	0.128	0.040	0.051	1
RED EDGE	PANEL	1.214	1.198	0.227	0.227	0
	VEGETACION	2.416	2.500	0.452	0.474	2
	HOJA BLANCA	4.308	4.264	0.806	0.808	0
	PANEL NEGRO	0.204	0.179	0.036	0.034	0
NIR	PANEL	0.328	0.334	0.260	0.260	0
	VEGETACION	0.719	0.737	0.570	0.573	0
	HOJA BLANCA	1.001	0.986	0.794	0.766	3
	PANEL NEGRO	0.061	0.052	0.048	0.040	1

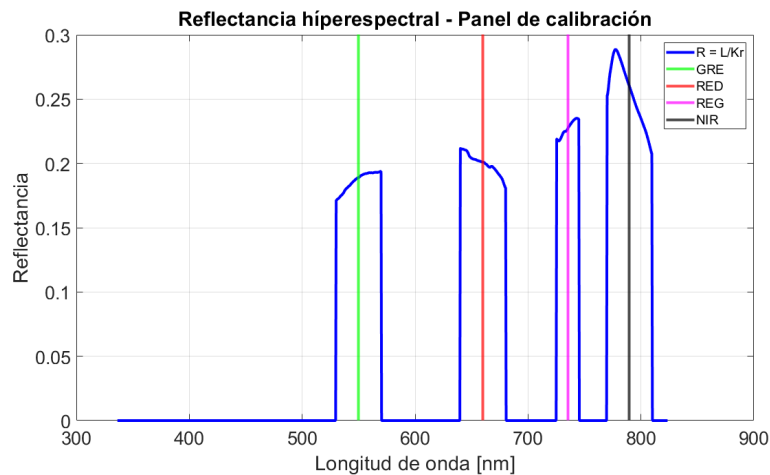
Tabla 4.12: Resumen de resultados de calibración cruzada del sensor STS de acuerdo al flujo de trabajo propuesto. Fuente: elaboración propia.

Resultados: Conversión de radiancia a reflectancia hiperespectral

El flujo de procesamiento de firmas hiperespectrales concluye con el cálculo de reflectancia en cada una de las bandas correspondientes al sensor hiperespectral. Los factores de conversión de radiancia a reflectancia del sensor STS, $L_{L_{STS}}^R$ se presentan en la Tabla 4.11. Los resultados del flujo de procesamiento se resumen en la Tabla 4.12. Las firmas hiperespectrales calibradas en radiancia y en reflectancia se presentan en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20.



(a) Firma hiperespectral del panel de referencia, calibrada en radiancia.

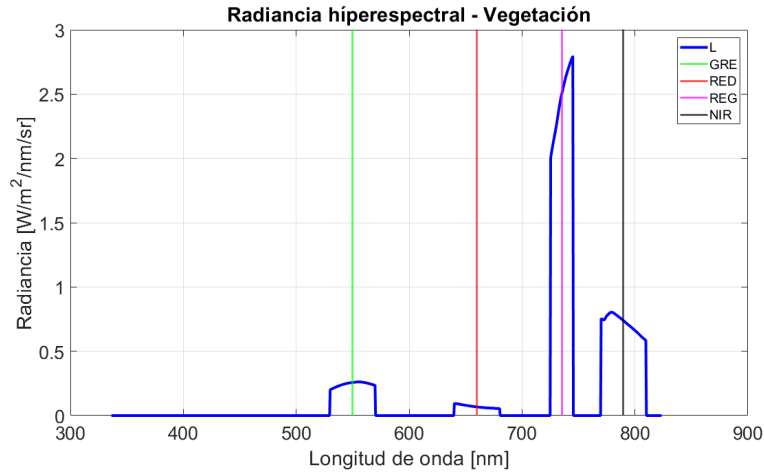


(b) Firma hiperespectral del panel de referencia, calibrada en reflectancia.

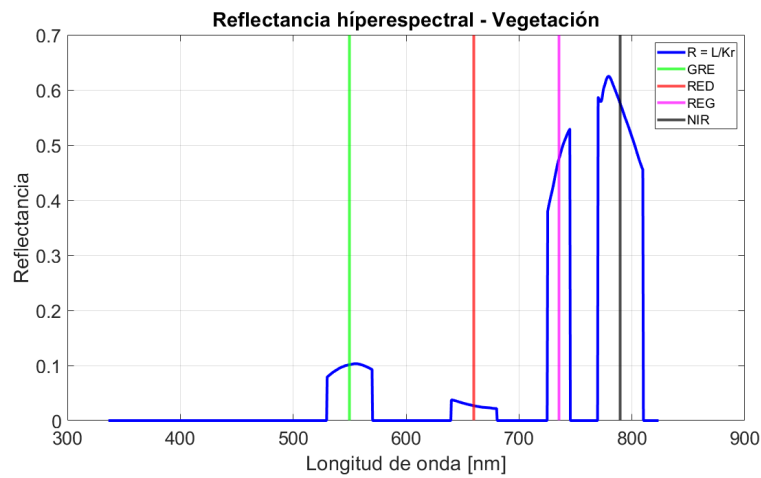
Figura 4.18: Resultados de calibración cruzada de la firma hiperespectral del panel de referencia.

4.8. Conclusiones del capítulo 4

En este capítulo se implementó el flujo de procesamiento general diseñado en el Cap. 3, considerando las condiciones particulares del sistema, así como los métodos de calibración y corrección radiométrica aplicables a cada bloque del flujo de procesamiento, trazándose la ruta paso a paso para llevar los datos crudos de imágenes multispectrales y firmas hiperespectrales a valores calibrados de radiancia y reflectancia. De esta manera, se establecen las bases para el diseño de procedimientos de corrección radiométrica



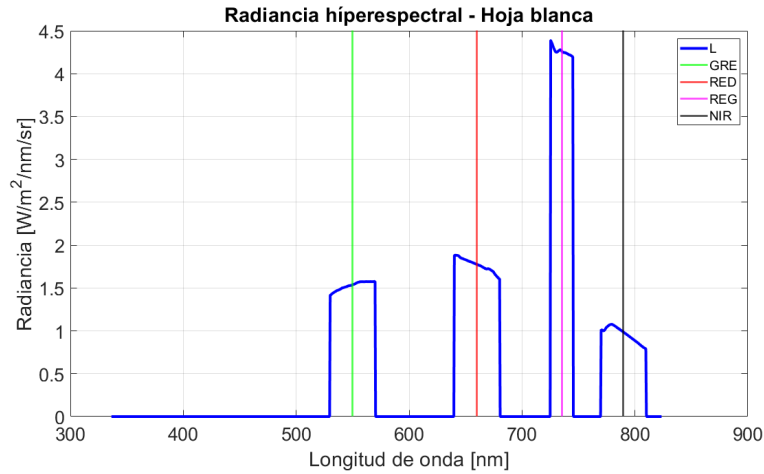
(a) Firma hiperespectral de vegetación, calibrada en radiancia.



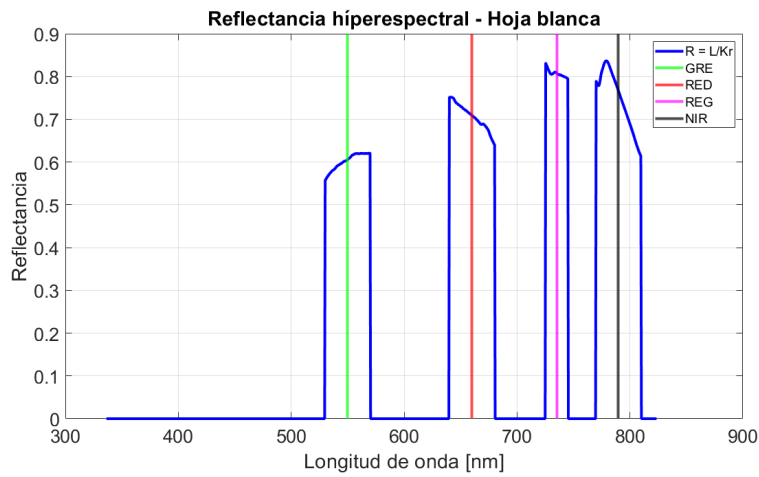
(b) Firma hiperespectral de vegetación, calibrada en reflectancia.

Figura 4.19: Resultados de calibración cruzada de la firma hiperespectral de la muestra de vegetación.

de efectos angulares y la evaluación de resultados de corrección de los mismos, que se desarrollan en el Cap. 5, de acuerdo con los objetivos específicos 3 y 4 de esta tesis.



(a) Firma hiperespectral de la hoja blanca, calibrada en radiancia.



(b) Firma hiperespectral de la hoja blanca, calibrada en reflectancia.

Figura 4.20: Resultados de calibración cruzada de la firma hiperespectral de la hoja blanca.

CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA DE EFECTOS ANGULARES

En las siguientes secciones se describen los modelos considerados para llevar a cabo la corrección radiométrica de efectos angulares en las mediciones de reflectancia con base en los sensores del micro-dron. El sistema de referencia utilizado para el cálculo de la geometría de iluminación fue el sistema NED (norte-este-abajo), adecuado a las mediciones de postura solar y a la medición de movimiento de los drones. En los resultados experimentales que se describen en la S. , las mediciones del espectrómetro se hicieron de manera próxima desde el nadir, coincidiendo con la dirección de irradiancia solar en suelo. Las mediciones del giróscopo integrado en el micro-dron se utilizaron para estimar las orientaciones del sensor de irradiancia solar respecto al nadir y así llevar a cabo el cálculo del factor de reflectancia hemisférico-cónico mediante la corrección previa de efectos de los ángulos sol-sensor y del ángulo de incidencia solar directa.

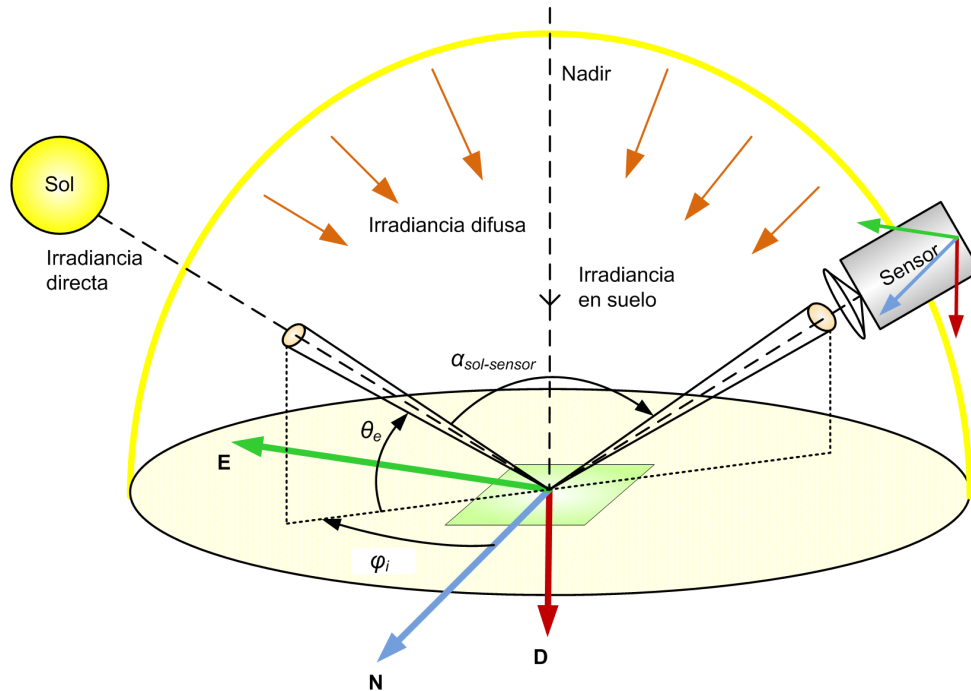


Figura 5.1: Geometría sol-sensor en coordenadas NED. Fuente: elaboración propia.

5.1. Geometría sol-sensor

Considere la geometría de la Fig. 5.1. La superficie a observar es perpendicular al nadir. La posición del sol está indicada por los ángulos de azimuth ϕ_i respecto al norte y elevación, θ_e , respecto al plano horizontal en coordenadas NED. El ángulo sol-sensor es $\alpha_{sol-sensor}$. La irradiancia solar directa ingresa a la superficie con el ángulo de latitud θ_e .

5.2. Sistemas de referencia

Los marcos de referencia del dron Parrot Bluegrass y del sensor Parrot Sequoia a bordo fueron caracterizados experimentalmente y se muestran en las figuras 5.2 y 5.3, respectivamente. A partir del primero, las rotaciones del sensor de irradiancia solar se modelaron mediante la representación *ropy* (roll, pitch, yaw). El cálculo del ángulo $\alpha_{sol-sensor}$ se llevó a cabo a partir de los vectores unitarios correspondientes en coordenadas NED.

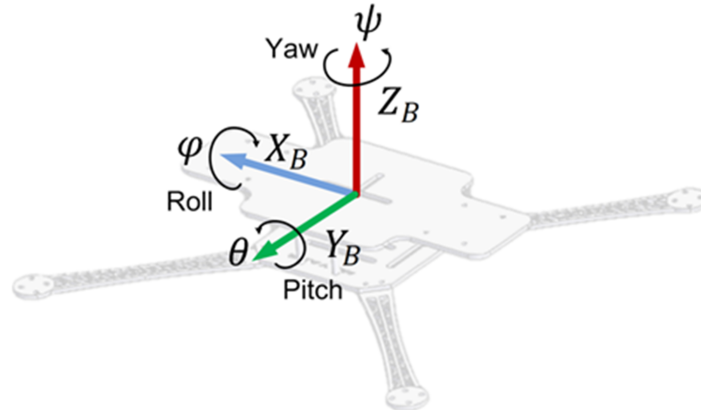


Figura 5.2: Marco de referencia del dron. Fuente: Elaboración propia con referencia a datos experimentales. Dibujos obtenidos de GrabCAD community Library (<https://grabcad.com/library>) el 08-11-2022; créditos: H. Razza (marco del dron) y Leonardo Ibarra (sensor solar).

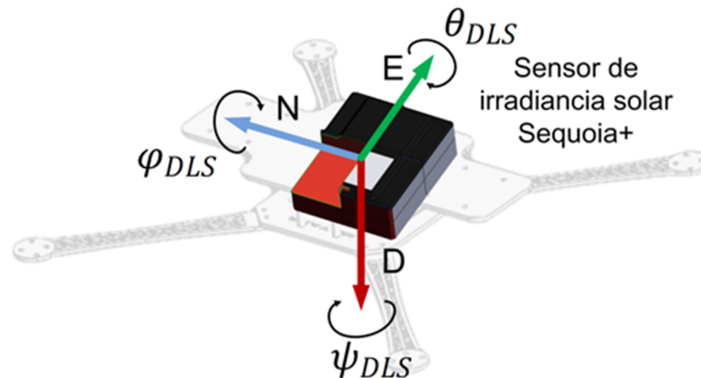


Figura 5.3: Marco de referencia del sensor. Fuente: Elaboración propia con referencia a datos experimentales. Dibujos obtenidos de GrabCAD community Library (<https://grabcad.com/library>) el 08-11-2022; créditos: H. Razza (marco del dron) y Leonardo Ibarra (sensor solar).

Vector del zenith en coordenadas NED

Para referenciar los ángulos del sensor y la posición del sol se define el siguiente vector de orientación hacia el zenith en coordenadas NED (Micasense, 2017):

$$n = [0 \ 0 \ -1]^T \quad (5.1)$$

Vector de posición solar en coordenadas NED

De acuerdo al esquema de la Fig. 5.1, las coordenadas de azimuth, ϕ_i , y elevación solar θ_e convertidas a coordenadas NED quedan dadas por la Ec. 5.2 (Micasense, 2017):

$$n_{sol} = \begin{bmatrix} -c_{\phi_i} c_{\theta_e} \\ s_{\phi_i} c_{\theta_e} \\ -s_{\theta_e} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Vector de orientación del dron en coordenadas NED

El vector de orientación del dron respecto al sistema de referencia NED, se obtuvo a partir de la aplicación de la matriz de rotación rpy siguiente (Micasense, 2017):

$$R_{zyx}(-\psi, -\theta, -\phi) = R_z(-\psi)R_y(-\theta)R_x(-\phi) \quad (5.3)$$

definiendo:

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos(-\phi) \\ s_1 &= \sen(-\phi) \\ c_2 &= \cos(-\theta) \\ s_2 &= \sen(-\theta) \\ c_3 &= \cos(-\phi) \\ s_3 &= \sen(-\phi) \end{aligned} \quad (5.4)$$

las matrices de rotación quedan como:

$$R_z(-\psi) = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$R_y(-\theta) = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & -s_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ s_2 & 0 & c_2 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$R_x(-\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & s_3 \\ 0 & -s_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Mediante las definiciones anteriores, el vector de orientación del sensor puede quedar expresado en coordenadas NED a partir de los ángulos rpy del dron como:

$$n_{sensor} = R_{zyx}(-\psi, -\theta, -\phi) \begin{bmatrix} r \\ p \\ y \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Ángulo sol-sensor

Una vez obtenidos los ángulos de postura solar y postura del dron en coordenadas NED, EL ángulo sol-sensor puede calcularse como:

$$\alpha_{sol-sensor} = \arccos(n_{sol} \cdot n_{sensor}) \quad (5.9)$$

donde (\cdot) denota el producto punto de ambos vectores (Micasense, 2017).

Irradiancia solar directa

Una vez definida la geometría sol-sensor y el ángulo sol-sensor, es posible calcular la irradiancia que se mediría si el sensor estuviera totalmente alineado con el sol, esto es la irradiancia directa. También debe considerarse el factor de reflectancia de difusor del sensor de irradiancia solar, el cual por el momento se asumirá como 1. Para aproximar la difusividad del difusor, puede recurrirse al modelo de transmisión de Fresnel (Micasense,

2019); sin embargo, dicho modelado queda fuera del alcance de esta tesis.

$$I_{dir(sensor)} = I_{ss} / \cos(\alpha_{sol-sensor}) \quad (5.10)$$

Irradiancia nivel del suelo

Finalmente, debe considerarse que la irradiancia recibida en tierra recibida por el panel de calibración o la superficie plana en particular, depende de la proyección de la irradiancia solar directa sobre el zenith. Tomando en cuenta la geometría sol-sensor, la irradiancia directa en tierra se calcula como (Micasense, 2017):

$$I_{dir(suelo)} = I_{dir(sensor)} \text{sen}\theta_e \quad (5.11)$$

5.3. Resultados de aplicación al flujo de trabajo

Verificación de datos de posición solar

Antes de proceder a la aplicación de los modelos de calibración de irradiancia en función de la posición del sol, se verificó que éstos fueran correctos mediante dos fuentes alternativas: una aplicación móvil con datos de orientación del sol por cada fecha y hora del año, así como la calculadora de posición solar NOAA. La fecha y hora de la adquisición mediante la aplicación móvil Megasun (Megasun, 2022) se muestran en la Fig. 5.4. Se tomó como base la fecha 2022:07:13 a las 12:36:00 horas. Nótese que en la aplicación se utilizó una hora menos, ya que ésta no cuenta con opción para horario de verano. Los datos correspondientes a la misma fecha y hora utilizando la calculadora solar NOAA se muestran en la Fig. 5.5. La estimación del ángulo solar se llevó a cabo utilizando el paquete pysolar de Python. Los resultados obtenidos con pysolar se muestran en la tabla 5.1, donde puede apreciarse que el ángulo sol-sensor es de 34.29° (ver Fig. 5.6), a partir del cual se llevó a cabo la calibración de irradiancia solar en suelo.

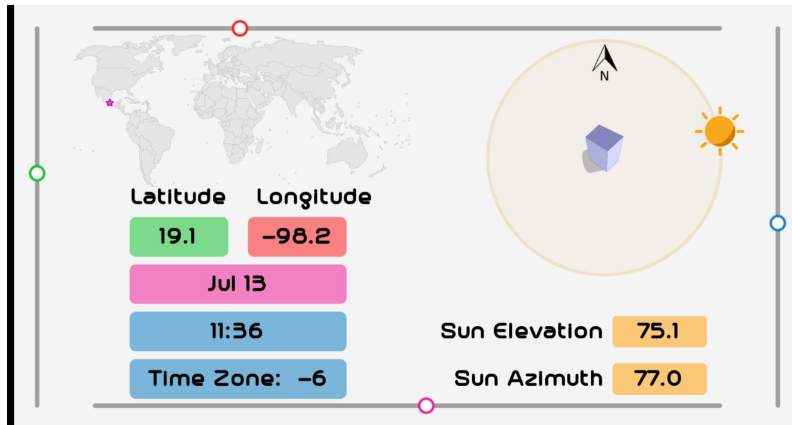


Figura 5.4: Megasun: aplicación móvil de cálculo de postura solar,

<https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/azel.html>

City:	Deg:	Min:	Sec:	Time Zone		
Mexico City, Mexico	Lat: North=+	19	24	0	Offset to UTC (MST=+7): 6	Daylight Saving Time: Yes
Click here for help finding your lat/long coordinates	South=-	99	9	0		

Note: To manually enter latitude/longitude, select **Enter Lat/Long** -> from the City pulldown box, and enter the values in the text boxes to the right.

Month:	Day:	Year (e.g. 2000):	Time (hh:mm:ss)			
July	13	2022	12	: 36	: 30	<input type="radio"/> AM <input type="radio"/> PM <input checked="" type="radio"/> 24hr

Calculate Solar Position

Equation of Time (minutes):	Solar Declination (degrees):	Solar Azimuth:	Solar Elevation:	cosine of solar zenith angle
-5.82	21.75	78.48	74.4	0.9631

Azimuth is measured in degrees clockwise from north.
Elevation is measured in degrees up from the horizon.
Az & El both report dark after astronomical twilight.

Figura 5.5: Calculadora solar NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratories, 2022a).

Date Time Original: 2022:07:13 12:36:00
 UTC Time: 2022-07-13 12:36:00.217010-05:00
 Solar Elevation: 75.00275708255053
 Solar Azimuth: 76.9747111126895

Tabla 5.1: Cálculo del ángulo sol-sensor con pysolar. Fuente: elaboración propia utilizando Micasense Image Processing Sequoia©.

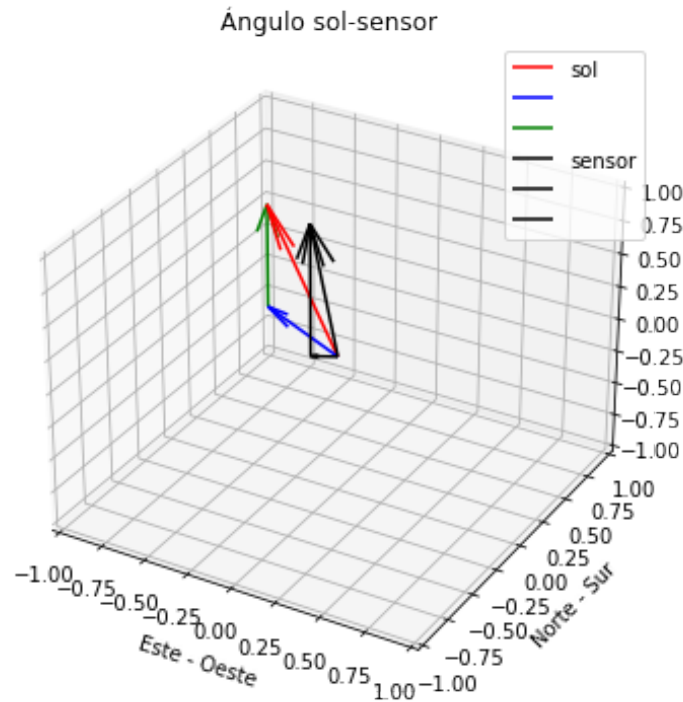


Figura 5.6: Ángulo sol-sensor. Fuente: elaboración propia en python con funciones auxiliares de Micasense Image Processing Sequoia©

BANDA	$\alpha_{sol-sensor}$	I_{seq}	I_{ss}	I_{suelo}
GREEN	34.29	21.47188	35.39	33.49

Tabla 5.2: Resultados del cálculo de irradiancia a nivel de suelo [$\alpha W/m^2/sr$] en la banda GREEN considerando el ángulo sol-sensor. Fuente: elaboración propia.

Irradiancia solar directa a nivel del suelo

Los resultados del cálculo de irradiancia a nivel de suelo, la irradiancia solar directa a partir del ángulo sol-sensor se presentan en la Tabla 5.2.

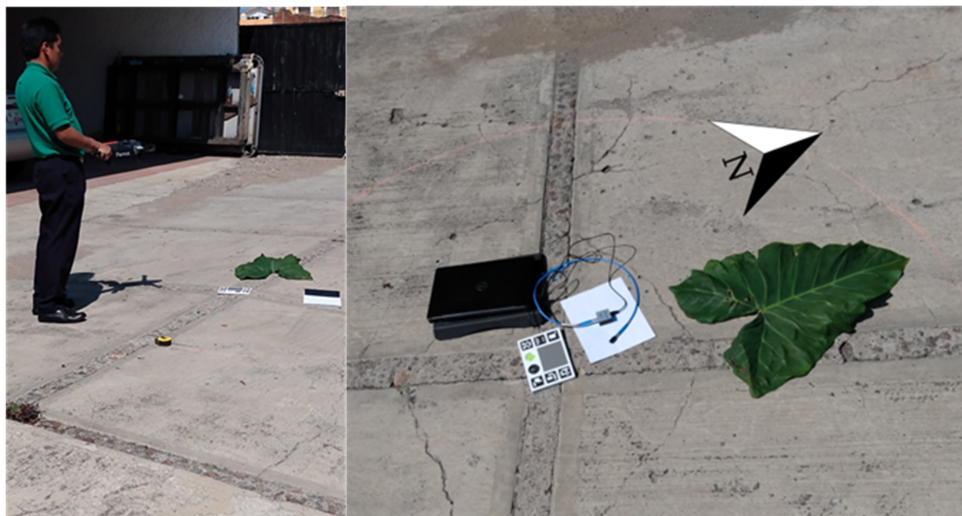


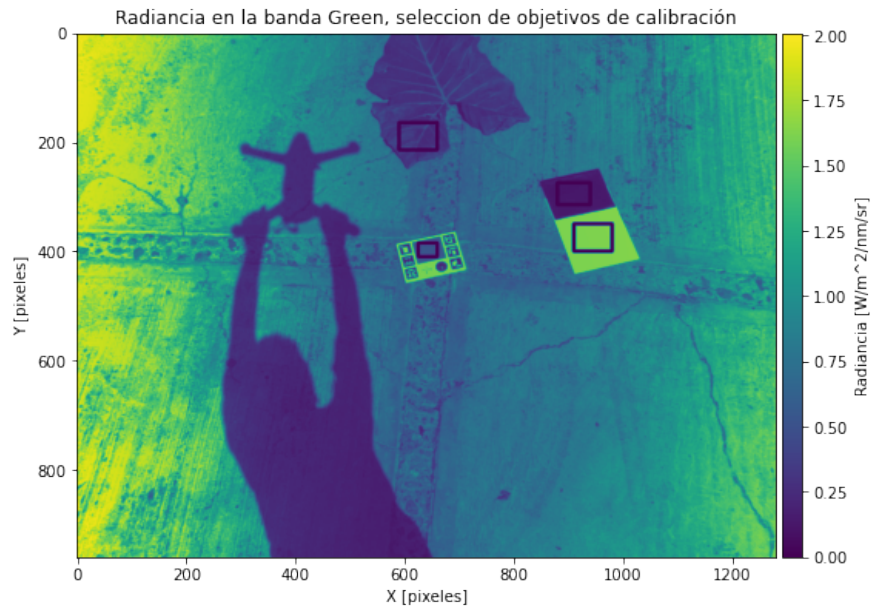
Figura 5.7: Escenario de pruebas de calibración radiométrica del sensor hiperespectral con corrección de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.

Cálculos de radiancia y reflectancia con efectos angulares

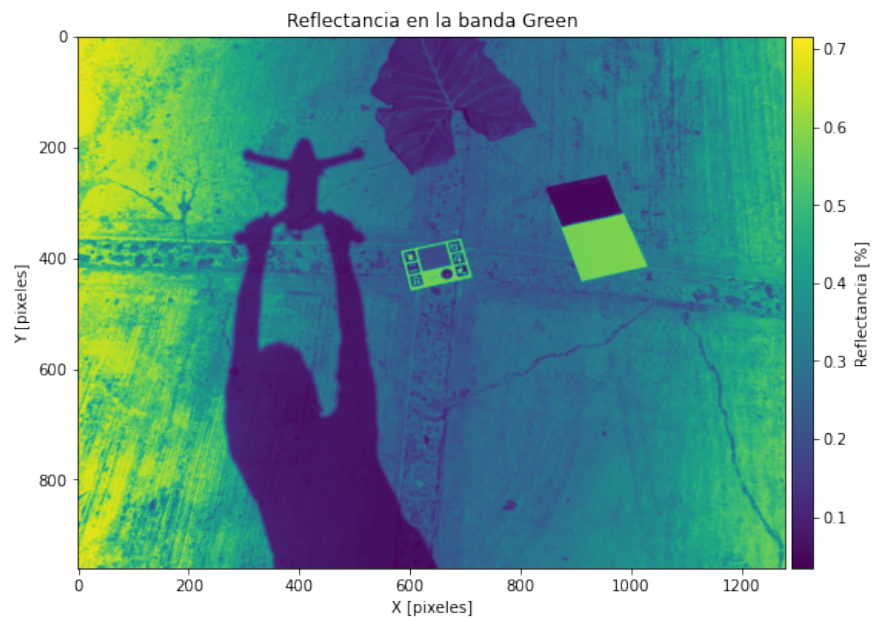
En esta parte se procedió a implementar el flujo de trabajo de la Fig. 3.4. El escenario de pruebas se presenta en la Fig. 5.7. El resultado de calibración de radiancia de imágenes en la banda GREEN, considerando la geometría sol-sensor, se presenta en la Fig. 5.8. Un resumen de resultados de calibración de radiancia con efectos angulares en todas las bandas multiespectrales del sensor Sequoia y su comparación con valores de radiancia sin corrección de efectos angulares se presenta en la Tabla 5.3. La comparación de reflectancia multiespectral con corrección de efectos angulares se presenta en la Fig. 5.4.

Resultados de calibración de reflectancia hiperespectral con efectos angulares

En la Tabla 5.5 se resumen los resultados de calibración de reflectancia de los sensores Sequoia y STS considerando efectos angulares. El error de calibración observado entre ellos fue menor al 1 %.



(a) Selección de objetivos y cálculo de radiancia con corrección de efectos angulares en la banda GREEN.



(b) Estimación de reflectancia ante efectos angulares en la banda GREEN.

Figura 5.8: Resultados de calibración de reflectancia de imágenes multiespectrales ante efectos angulares en la banda GREEN.

5.3. Resultados de aplicación al flujo de trabajo

Banda	Objetivo	L_{seq}	$L_{seq(angular)}$	$e[\%]$
GREEN	PANEL	0.501	0.53	5
	VEGETACION	0.292	0.309	6
	HOJA BLANCA	1.531	1.618	5
	PANEL NEGRO	0.122	0.129	5
RED	PANEL	0.451	0.477	5
	VEGETACION	0.141	0.149	5
	HOJA BLANCA	1.791	1.892	5
	PANEL NEGRO	0.092	0.098	6
RED EDGE	PANEL	1.214	1.282	5
	VEGETACION	2.416	2.552	5
	HOJA BLANCA	4.308	4.552	5
	PANEL NEGRO	0.204	0.216	6
NIR	PANEL	0.328	0.346	5
	VEGETACION	0.719	0.76	5
	HOJA BLANCA	1.001	1.058	5
	PANEL NEGRO	0.061	0.064	5

Tabla 5.3: Calibración de radiancia del sensor Sequoia en la banda GREEN con y sin la incorporación de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.

Banda	Objetivo	R_{seq}	$R_{seq(angular)}$	$e[\%]$
GREEN	PANEL	0.189	0.189	0
	VEGETACIÓN	0.11	0.101	-9
	HOJA BLANCA	0.577	0.606	5
	PANEL NEGRO	0.046	0.068	32
RED	PANEL	0.201	0.201	0
	VEGETACIÓN	0.063	0.027	-133
	HOJA BLANCA	0.798	0.71	-12
	PANEL NEGRO	0.04	0.051	22
RED EDGE	PANEL	0.227	0.227	0
	VEGETACIÓN	0.452	0.476	5
	HOJA BLANCA	0.806	0.809	0
	PANEL NEGRO	0.036	0.034	-6
NIR	PANEL	0.26	0.26	0
	VEGETACIÓN	0.57	0.577	1
	HOJA BLANCA	0.794	0.767	-4
	PANEL NEGRO	0.048	0.04	-20

Tabla 5.4: Calibración de reflectancia del sensor Sequoia en la banda GREEN con y sin la incorporación de efectos angulares. Fuente: elaboración propia.

OBJETIVO	R_{GREEN}	R_{RED}	R_{REG}	R_{NIR}
PANEL CALIBRACIÓN Sequoia	0.189	0.201	0.227	0.26
PANEL CALIBRACIÓN STS	0.189	0.201	0.227	0.26
e [%]	0	0	0	0
VEGETACION Sequoia	0.101	0.027	0.476	0.577
VEGETACION STS	0.1015	0.0272	0.4756	0.5766
e [%]	-0.5	-0.7	0.1	0.1
HOJA BLANCA Sequoia	0.606	0.71	0.809	0.767
HOJA BLANCA STS	0.6061	0.7098	0.8086	0.7674
e [%]	0.0	0.0	0.0	-0.1
PANEL NEGRO Sequoia	0.068	0.051	0.034	0.04
PANEL NEGRO STS	0.0676	0.0514	0.0338	0.0398
e [%]	0.6	-0.8	0.6	0.5

Tabla 5.5: Comparación de reflectancia del sensor Sequoia con reflectancia del sensor STS considerando efectos angulares. El error en todas las bandas es menor al 1%. Fuente: elaboración propia.

5.4. Discusión de resultados

Se integró la corrección de efectos angulares al flujo de procesamiento diseñado para la calibración de reflectancia de un espectrómetro de punto. Los coeficientes de determinación R^2 obtenidos al ajustar con el modelo lineal, LRM, fueron superiores a 0.99, con diferencias menores al 1% en las calibraciones de reflectancia que consideran los efectos angulares y los que no (ver Tabla 5.5). Lo anterior puede explicarse por los tipos de muestras analizadas, las cuales corresponden a superficies difusas, así como a un limitado ángulo sol-sensor, que fue de 34° aproximadamente. La metodología propuesta tendrá mayor impacto en muestreos desde el aire con superficies de reflectancia anisotrópica y posición solar alejada del nadir. Otro factor a considerar en este resultado, es la falta de un mayor número de objetivos de calibración físicos, debido a que el método LRM se ajustó con un solo panel físico y tres objetivos de referencia virtuales, influyendo directamente en el proceso de calibración cruzada. Se espera que la metodología siga siendo válida al calibrar con más objetivos de calibración físicos y también al hacer la

calibración cruzada con un espectrorradiómetro de campo de mayor precisión que el sensor de irradiancia a bordo. Particularmente, se espera que la metodología pueda aplicarse a casos donde el ángulo sol-sensor sea pronunciado, como en el caso de vuelos tomados de mañana o tarde y en estudios de superficies de reflectancia anisotrópica (no Lambertianas).

5.5. Conclusiones finales

En este trabajo de tesis se diseñó e implementó un flujo de trabajo para la calibración radiométrica de sensores híperespectrales para aplicaciones de espectroscopía remota basada en micro-drones. En el Cap. 1 se plantearon los objetivos de la tesis partiendo del contexto de los drones como plataformas de percepción remota de alta resolución, para los cuales hacen falta flujos de trabajo adecuados. Posteriormente, en el Cap. 2 el tema se delimitó dentro del marco conceptual de percepción remota basada en drones, presentando los conceptos necesarios para comprender los procesos de adquisición, calibración y corrección radiométrica de imágenes multiespectrales y firmas híperespectrales que se abordaron en el Cap. 3. Posteriormente, en el Cap. 3 se abordó el diseño de un esquema de trabajo para la estimación de reflectancia basada en micro-drones, con base en el marco de referencia de reflectancia bidireccional, así como el flujo de procesamiento adecuado a los sensores involucrados, esto es, la calibración de DNs a unidades físicas de radiancia y reflectancia de un sensor de imagen multiespectral, y la parte equivalente del sensor híperespectral, calculada de manera cruzada con el primero. Los aspectos prácticos de implementación del flujo de trabajo se abordaron en el Cap. 4 y se validaron mediante muestras representativas de superficies con características diferentes, como la vegetación, un objeto claro más reflejante (hoja de papel bond), un objeto oscuro y un objeto de reflectancia conocida. Los resultados del flujo de calibración y corrección radiométrica se presentaron a través de imágenes, gráficas

y tablas comparativas por cada tipo de superficie. Finalmente, en el Cap. 5 se abordó el problema de corrección radiométrica de efectos angulares, para lo cual se recurrió a una conceptualización de la geometría sol-sensor, así como a transformaciones de coordenadas que permitieron trasladar las variables de flujo radiante entre los distintos sistemas de coordenadas, correspondientes al conjunto dron-sensor, a la posición del sol y finalmente, a la irradiancia a nivel de suelo, a partir de la cual se calculó el factor de reflectancia hemisférico cónico que se planteó como esquema de estimación de reflectancia en esta tesis. Los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos en esta tesis, indican la viabilidad de llevar el el flujo de trabajo diseñado a un marco de aplicación para el análisis de alto rendimiento de características de interés, como las superficies de cultivos en sus distintas fases de desarrollo.

5.6. Trabajo futuro

Al haber desarrollado este trabajo se pudo tener una visión general de la problemática de percepción remota con drones, así como una introspección a problemas específicos, los cuales se describen a continuación como propuestas de trabajo futuro. El flujo de procesamiento propuesto se llevó a cabo de manera completa, partiendo de los datos crudos de los sensores hasta la calibración en unidades físicas. No obstante, algunas limitantes tales como la disponibilidad de un solo panel de calibración, la falta de una fuente de luz calibrada radiométricamente para laboratorio y la falta de un espectrorradiómetro de campo para calibración absoluta, de los sensores, impidieron la comparación autocomparación del flujo de trabajo tomando diversas referencias y la comparación contra otros flujos de trabajo existentes. El procesamiento imagen por imagen fue una labor de alto consumo de horas hombre, por lo que la automatización de funciones para lectura simultánea de imágenes multiespectrales y la automatización del disparo sincronizado de sensores calibrados de manera cruzada ofrecería una ventaja en la

evaluación de este y otros flujos de trabajo con un número mayor de muestras y en distintos escenarios. Una colaboración con expertos en espectroscopía y en fenología de cultivos aportaría mayor valor a los resultados obtenidos en cada flujo de procesamiento, indicando posibles mejoras. Los productos de percepción remota más aceptados son los mapas ortorrectificados; un mapa ortorrectificado consiste en un conjunto de imágenes contiguas corregidas geométricamente para crear una sola imagen con apariencia plana observada desde el cielo. Otra vertiente de trabajo como continuación de esta tesis consiste en el registro de imágenes multiespectrales utilizando software de código abierto como `OpenDroneMap.org` y la codificación del flujo de trabajo propuesto en dicha plataforma.

5.7. Productos derivados

Como parte de este trabajo de tesis, se generaron los productos que se listan a continuación.

Propiedad intelectual

- Casiano-Ramos, A. y Muñoz-Pacheco, J. Manual técnico de corrección radiométrica para imágenes del sensor Parrot Sequoia. Doctorado en Inv. Apl. a la Industria. (aceptado y en proceso de registro de P.I.) (ver Fig. 5.9.)

Proyecto aplicado a la industria

- Casiano-Ramos, A. y Díaz-Téllez, J. “Tecnologías para la gestión inteligente de recursos y generación de alto valor del campo poblano” (en proceso de revisión por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, CONCYTEP) (Ver Fig. 5.10)



PROGRAMA 2022 DE APOYO AL REGISTRO DE INVENCIÓNES

De conformidad con la Convocatoria del Programa 2022 de Apoyo al Registro de Invencciones se dan a conocer los resultados de aquellas propuestas que cumplen con la viabilidad de patentabilidad.

PROYECTOS ACEPTADOS

No. Proyecto	Investigador Responsable	No. Proyecto	Investigador Responsable
2022-01	Geolar Fetter	2022-17	Filiberto Candia García
2022-02	Miguel Angel Domínguez Jiménez	2022-18	Filiberto Candia García
2022-03	Filiberto Candia García	2022-19	Víctor González Díaz
2022-04	Albino Moreno Rodríguez	2022-20	Jesús Sandoval Ramírez
2022-05	Filiberto Candia García	2022-21	Fermi Guerrero Castellanos
2022-06	Albino Moreno Rodríguez	2022-22	Jesús Sandoval Ramírez
2022-07	Luis Beristáin Jiménez	2022-23	Francisco Pacheco Aguirre
2022-08	Claudia Mendoza Barrera	2022-24	Carmen Cerón Garnica
2022-09	Víctor González Díaz	2022-25	Ma. de los Angeles Moyaho Bernal
2022-10	Sofía Schotte Hernández	2022-26	Fermi Guerrero Castellanos
2022-11	Tatiana Pritskij	2022-27	Fermi Guerrero Castellanos
2022-12	Albino Moreno Rodríguez	2022-28	Marino Conde Guevara
2022-13	Griselda Corro Hernández	2022-29	Francisco Pacheco Aguirre
2022-14	Facundo Comba	2022-30	Ángel Picazo Castillo
2022-15	Carlos Ochoa Velasco	2022-31	Jesús Muñoz Pacheco
2022-16	Edgar González Campos		

Atte.

Dr. David Pinto Avendaño

Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Figura 5.9: Producto de propiedad intelectual.

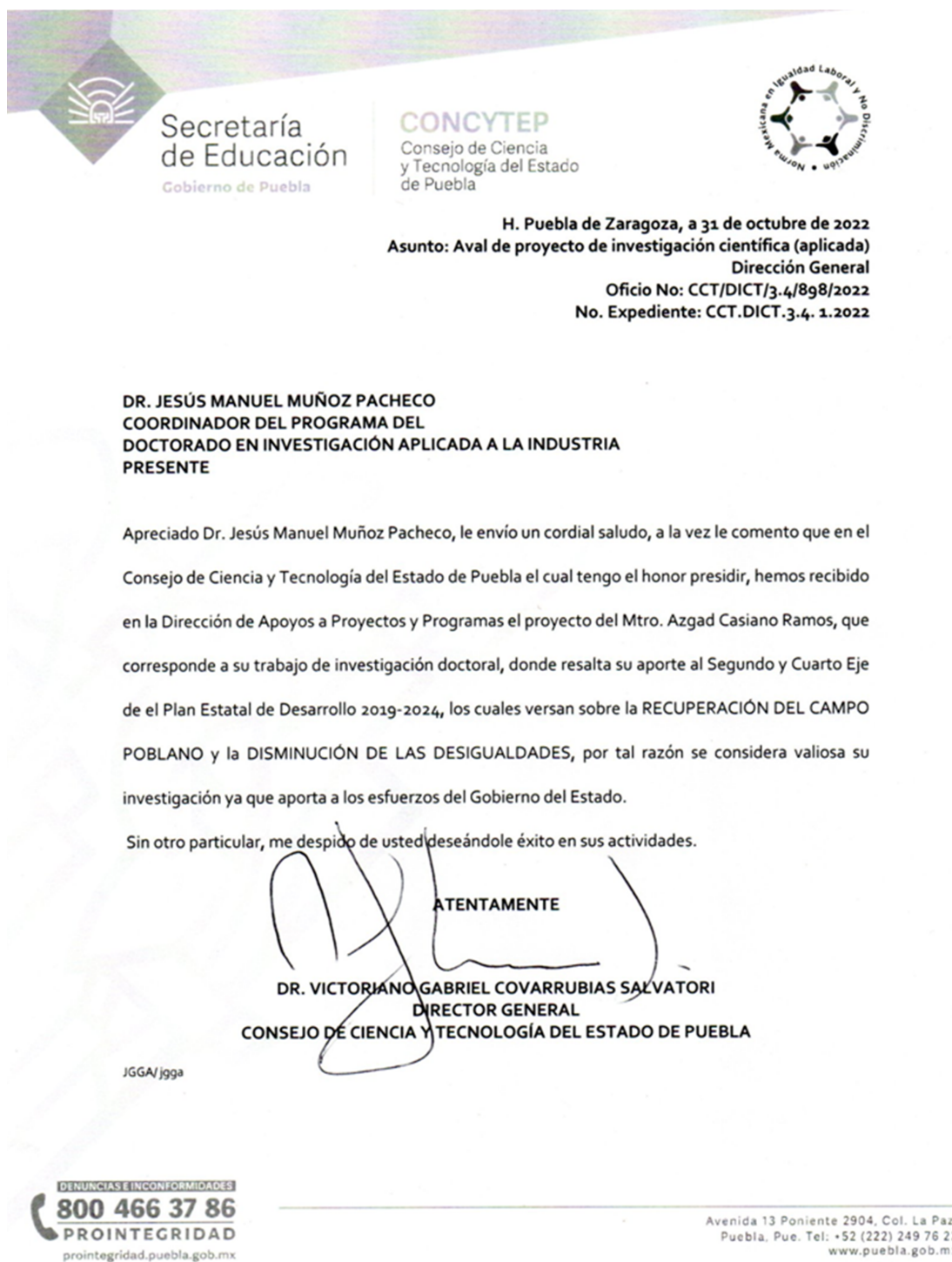


Figura 5.10: Carta de recepción de proyecto de por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, CONCYTEP.

Publicaciones en coautoría en congresos nacionales

- Guevara-Espinosa Dolores [y otros] PROPUESTA METODOLÓGICA DE ANÁLISIS POR TELEDETECCIÓN ESPECTRAL CON UAVS EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS [Conferencia]. - Lima, Perú : Universidad Agraria La Molina, 2020. - pág. 64. - ISBN 9786124387500. (ver Fig. 5.11)
- Guevara-Espinosa María Dolores [y otros] USO DE TECNOLOGÍA DRONE PARA ESPECTROSCOPIA REMOTA DE SUELOS: AVANCES, RETOS Y OPORTUNIDADES [Conferencia] // EL SUELO, DONDE TODO COMIENZA / ed. Ramos Gourcy F. [y otros]. - Aguascalientes, MX : Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2019. - págs. 146-152. - ISBN 978-607-8652-94-5. (ver Fig. 5.12)
- Guevara Espinosa Ma. Dolores [y otros] ANÁLISIS DEL USO DE TELEDETECCIÓN PARA MONITOREO DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS EN MÉXICO [Conferencia] // Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2019. - Celaya, Gto, México : Academia Journals, 2019. - Vol. 11(9). - págs. 1477-1481. - ISSN 1946-5351. (ver Fig. 5.13)

ANÁLISIS DEL USO DE TELEDETECCIÓN PARA MONITOREO DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS EN MÉXICO

Dra. Ma. Dolores Guevara Espinosa 1, M.C. Azgad Casiano Ramos 2, M.C. Catalina Rivera Morales 1, Luz Arcelia Vázquez Sánchez 3, Loussiana Victoria Pérez Hernández 3,

Resumen –La degradación del suelo por procesos naturales y antrópicos es un problema mundial de alto impacto tanto ecológico, social y económico. En los últimos años, el derrame de residuos peligrosos, particularmente hidrocarburos, ha sido la causa principal de contaminación de este recurso no renovable en México.

Existe una gran variedad de tecnologías para evaluar el nivel de degradación, sin embargo, esto genera un factor alarmante en cuanto al tiempo y costo. No obstante, el monitoreo de suelos por medio de micro vehículos aéreos no tripulados y equipados con un micro espectrómetro da una alternativa no solo para la reducción de costos, sino que, a su vez, obtiene una mayor cobertura y movilidad generando una estimulación de los procesos para alcanzar los resultados esperados.

De forma general, esta investigación busca implementar una metodología que ayude a realizar y facilitar un mapeo de los suelos contaminados por hidrocarburos mediante la teledetección hiperespectral.

Palabras clave— Residuos peligrosos, hidrocarburos, teledetección, dron, mapeo

Introducción

Uno de los problemas más señalados por la sociedad a nivel mundial es la progresiva degradación de los recursos naturales causada por industrias que generan un irremediable deterioro del planeta. Actualmente existen estudios tendientes a resolver la contaminación originada por hidrocarburos en suelos, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de acumular estos desechos. Este proceso es denominado “fitorremediación” consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos que resultan tóxicos en el suelo.

La contaminación del suelo está fundamentalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas. Una vez en el suelo, estos pueden quedar retenidos en él, pero también pueden ser movilizadas en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos.

La sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS, AC) ha calificado al recurso suelo como “elemento clave de la seguridad alimentaria” y este proyecto emerge en un momento crucial para México, donde es necesario abordar la investigación necesaria para evitar el rezago científico y la dependencia tecnológica en cuanto a la preservación, aprovechamiento y recuperación de este valiosísimo recurso y en particular, con motivo de la contaminación de suelos por derrame de hidrocarburos en diversas localidades del país que son atravesadas por oleoductos, donde esta problemática se ha incrementado debido a la proliferación de tomas clandestinas. Por lo que, resulta muy pertinente contar con un sistema ágil para la evaluación de condiciones del suelo, el seguimiento ininterrumpido de la teledetección y las estrategias de biorremediación correspondientes.

La novedosa técnica para análisis de suelos por teledetección del espectro por reflectancia utilizando UAVs es una necesidad inmediata y prioritaria para el manejo ágil de procesos de biorremediación y fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en México, con mayor cobertura y movilidad de la que se cuenta con los métodos de espectroscopía de campo por métodos manuales y que en paralelo, permitirá promover nuevos sistemas de planificación y optimización del recurso suelo para el beneficio de la sociedad¹.

Descripción

Los hidrocarburos contaminantes del suelo se degradan con el tiempo, dependiendo de las características químicas y biológicas así como del tipo de hidrocarburo, los procesos de biorremediación y fitorremediación

¹Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

²Facultad de ciencias de la electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

³Estudiante de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

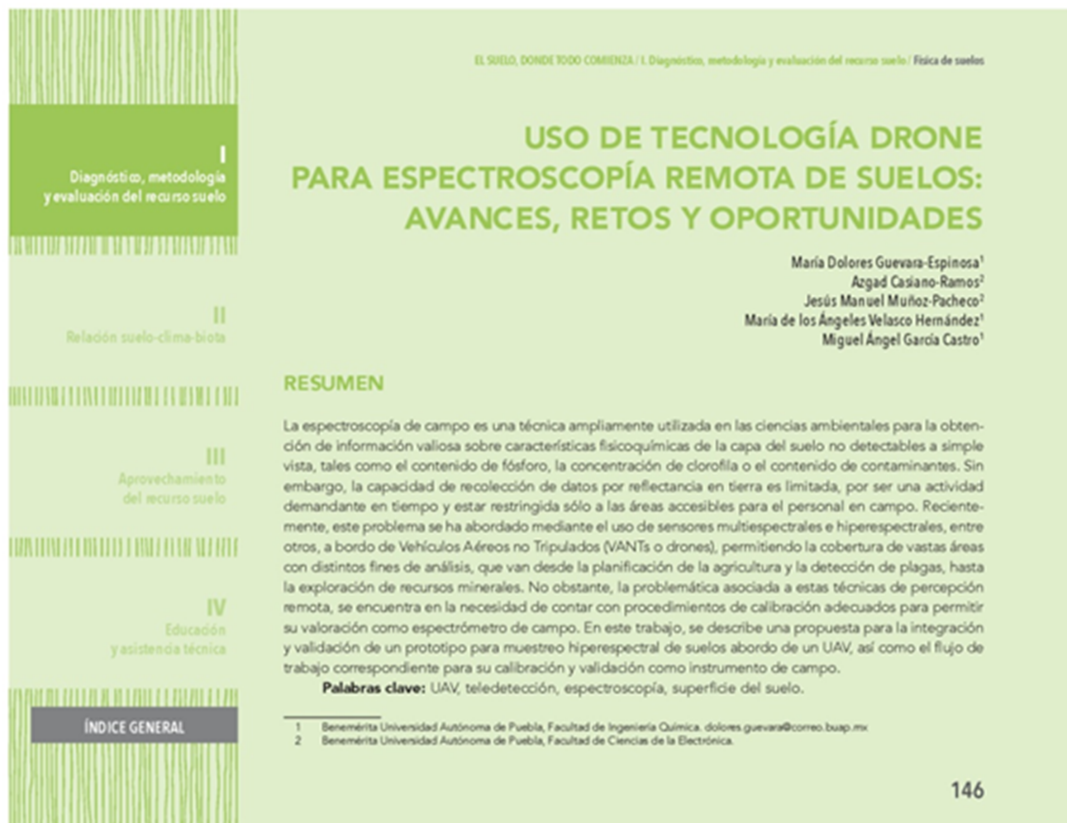


Figura 5.12: Producto académico 2.

PROPUESTA METODOLÓGICA DE ANÁLISIS POR TELEDETECCIÓN ESPECTRAL CON
UAVS EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS

Dolores Guevara Espinosa¹; Azgad Casiano Ramos²; Jesús Manuel Muñoz Pacheco²; María de los Angeles Velasco Hernández¹; Miguel Angel García Castro¹

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química. Av San Claudio s/n ciudad Universitaria Puebla 72000

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica. Av. San Claudio s/n Ciudad Universitaria Puebla 72000

guevara@correo.buap.mx

RESUMEN

La reciente convergencia de las tecnologías de micro espectrómetros portátiles (e.g., <500g) y de los micro UAVs (Micro Vehículos Aéreos No Tripulados, o MAVs, por sus siglas en inglés) (e.g., <5 kg), ha abierto la posibilidad de desarrollar nuevos métodos para el análisis de suelos de manera remota, con mayor alcance y mayor movilidad que las técnicas tradicionales a nivel de piso. Este trabajo describe la metodología propuesta para el tratamiento de suelos contaminados por materiales peligrosos, en el marco de un programa de desarrollo profesional docente en México, donde actualmente se desarrolla un proyecto para el análisis y seguimiento remoto del proceso de remediación en la recuperación de zonas contaminadas por hidrocarburos. El método de intervención se enumera a continuación: 1. Estudio del estado del arte en remediación de suelos asistida por teledetección espectral. 2. Desarrollo de mediciones controladas de reflectancia con sensores espectrales. 3. Integración de un prototipo de nivel de campo para espectrometría remota de suelos. 4. Desarrollo del flujo de trabajo para el muestreo y remediación de suelos contaminados utilizando el prototipo de teledetección espectral. 5. Validación de los métodos utilizados en un ciclo continuo para la medición de la evolución del proceso de remediación del suelo en un estudio de caso. 7. Comparación teórica, análisis estadístico de resultados y obtención de conclusiones experimentales.

Palabras Clave: Tecnologías de tratamiento ambiental, residuos peligrosos, teledeteccion hiperespectral con UAVs.

REFERENCIAS

1. Aasen, H., & Bolten, A. (2018). Multi-temporal high-resolution imaging spectroscopy with hyperspectral 2D imagers - From theory to application. *Remote Sensing of Environment*, 205, 374-389.
2. Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. *Remote sensing*, 10(7), 1-42.
3. Adamu, B., Tansey, K., & Ogutu, B. (08 de Mar de 2018). Remote sensing for detection and monitoring of vegetation affected by oil spills. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), 3628-3645.
4. Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote sensing*, 9.

MODELO DE NEGOCIOS

En este capítulo se presenta un conjunto de ideas relacionadas con la explotación industrial del conocimiento generado en este tema de investigación aplicada; se plantean las oportunidades considerando el entorno y se discute la viabilidad de escalamiento del proyecto en el conexto de formación de ecosistemas de innovación abierta en el Estado de Puebla. Particularmente, la incorporación de los métodos generados a procesos productivos agrícolas.

6.1. Análisis del entorno

En el Estado de Puebla existen alrededor de 359,563 unidades de producción (UP) agrícolas, cuyo valor de producción anual reportado en 2018 fue de 18,776,455.33 miles de pesos, con un crecimiento promedio anual del 9.54%. Los tres cultivos principales a cielo abierto fueron maíz, caña de azúcar y papa; tan sólo de estos tres se estimó un valor de la producción de 6,802,855.03 miles de pesos; sin embargo, uno de los principales factores que limitaron la productividad de este sector fue la “atomización” de la super-

ficie agrícola (2.8 hectáreas por unidad de producción (UP), en promedio) asociada a factores económicos y técnicos. La variación del índice de nivel tecnológico de la actividad agrícola, un índice compuesto por las variables de material vegetativo, fertilización, sistema de riego y mecanización midió un 42 %, con una expectativa del 100 % anual; y el rendimiento del cultivo principal, maíz grano de temporal, disminuyó en -0.63 % de 2016 a 2018. Los datos anteriores indican que la inversión en componentes de tecnología, como la mecanización, que ocupó el 76 %, no se reflejaron en los resultados esperados. Por lo cual se establece la premisa de que un mejoramiento en los procesos productivos basados en alta tecnología traerá un beneficio sobre la rentabilidad de la actividad económica agrícola en el Estado de Puebla, particularmente para pequeños productores (UP \leq 5 hectáreas). Debido a las condiciones adversas a las que se enfrentan los pequeños productores, tales como baja disponibilidad de capital de inversión y baja capacidad de mecanización del terreno, la baja productividad de la agricultura a pequeña escala se convierte en un círculo vicioso; sin embargo, la introducción de tecnología de alto valor a un costo accesible podría convertir a la agricultura a pequeña escala en un círculo virtuoso.

6.2. Análisis de la competencia

En México y en el estado de Puebla se localizan diversas empresas de ventas y servicios asociados con drones. Los principales servicios que se encuentran son fotografía aérea y aspersión de agroquímicos. Una empresa en Puebla ofrece servicios de plantación de semillas de árboles, servicios de mapeo agrícola y fotogrametría aérea. Otra empresa ofrece el mapeo de índices multiespectrales de cultivos, con énfasis en la detección oportuna de afectaciones por plagas. Otros servicios se encuentran en el ámbito de la seguridad pública y el entretenimiento y la capacitación de personal para operar drones. En el país, varias empresas cuentan con servicios para productores agrícolas; no

obstante, el enfoque principal es hacia medianos y grandes productores, cuyo volumen de producción permite la inversión privada en tecnologías de agricultura inteligente. Un actor fundamental en esta problemática es el gobierno, pues es quien tendría la capacidad para impulsar programas de apoyo específicamente para agricultura inteligente en las pequeñas UP, donde se desarrolla más de la mitad de la agricultura a nivel nacional.

6.3. Lienzo del modelo de negocios

El planteamiento de un modelo de negocios asociado con este tema de investigación aplicada se presenta en la Fig. 6.1. Éste está basado en la metodología *canvas*, propuesta por Osterwalder y Pigneur en 2010. Se compone de 9 partes estratégicas que definen el funcionamiento de un negocio, las cuales están sujetas a mejora continua. En primer lugar se tiene el segmento de mercado (SM), en el cual los actores involucrados son el gobierno, como impulsor de programas de adopción de tecnología agrícola inteligente, los grandes productores, como los mayores consumidores de dicha tecnología, los proveedores de servicios especializados con drones, como competidores del mercado y los pequeños productores, como potenciales clientes ante un cambio de paradigma. La propuesta de valor del negocio (parte 2) se origina a partir de la consideración que los elementos tecnológicos involucrados en esta tesis corresponden a la categoría de menor costo en su tipo, pudiendo acercarse pequeños productores y programas de apoyo en masa por parte del gobierno. Como canales de venta (parte 3) se plantean los contratos por servicios de mapeo con drones, así como alianzas con el gobierno y la iniciativa privada para el desarrollo de aplicaciones y servicios de percepción remota y agricultura inteligente basados en drones. La asistencia a foros de la industria agrícola y los anuncios vía web son considerados un importante medio de relación con los clientes (parte 4), donde puede también darse seguimiento las necesidades reales del mercado. Para el funcionamiento del negocio, se plantea una estrategia de capitalización

(parte 5) mediante servicios comunes y otros especializados que marquen la diferencia con los competidores. Particularmente, se proponen desarrollos que popularicen la tecnología híperespectral de una manera similar a la popularidad con que ahora cuentan las cámaras multiespectrales, ofreciendo un conjunto estándar de nuevas aplicaciones, por ejemplo, el cálculo de índices espectrales de alto interés y no disponibles en el mercado. Los recursos clave (parte 6) parten de contar con el know how de un conjunto básico de aplicaciones y servicios basados en drones, así como la capacidad para resolver problemas de diseño en laboratorios de pruebas, logrando una diferencia competitiva y un prestigio de marca contra competidores del mercado sin capacidades de desarrollo. Las actividades clave (parte 7) que se plantean contemplan la parte de servicios como parte fundamental para los ingresos, y las actividades de manufactura que permitirán lanzar al mercado nuevas aplicaciones basadas en la investigación, el desarrollo y la innovación (I+D+i). En el contexto global, la disponibilidad de cámaras multiespectrales y otros sensores como las cámaras térmicas se ha visto afectada en los últimos dos años, por lo cual es crucial determinar los proveedores de los sensores a largo plazo, así como los socios estratégicos que permitirán detonar la adopción de esta tecnología (parte 8), por ejemplo, las empresas que actualmente ofrecen servicios de drones. Se considera que los sensores híperespectrales podrán estar disponibles en un inicio, debido a su baja popularidad en aplicaciones de percepción remota con drones. En el mercado digital actual, en la estructura de costos (parte 9) debe contemplarse el pago de servicios de envío de mercancías, así como pagos por manejo de plataformas de venta en línea.

<p>8. AsC (Socios / Alianzas estratégicas)</p> <p>Proveedores de sensores hiperespectrales</p> <p>Proveedores de drones</p> <p>Proveedores de manufactura 3D</p> <p>Distribuidores autorizados</p> <p>Empresas de servicios de vuelo</p>	<p>7. AC (Actividades clave)</p> <p>Desarrollo</p> <p>Manufactura</p> <p>Servicios I+D</p> <p>Marketing</p>	<p>2. PV (Propuesta de valor)</p> <p>Tecnología accesible de mapeo para la productividad de suelos y cultivos</p>	<p>4. RCI (Relación con los clientes)</p> <p>Página web</p> <p>Asistencia a foros de la industria</p>	<p>1. SM (Segmentos de mercado, clientes)</p> <p>Gobierno</p> <p>Grandes productores</p> <p>Proveedores de servicios de vuelo con dron</p> <p>Asociaciones de pequeños productores</p>
<p>6. RC (Recursos clave)</p> <p>Laboratorios de desarrollo y pruebas</p> <p>Cartera de aplicaciones, servicios y productos</p> <p>Métodos de calibración</p> <p>Marca</p>	<p>3. C (Canales)</p> <p>Contratos de servicios</p> <p>mapeo de cultivos</p> <p>mapeo de suelos</p> <p>Proyectos de I+D con industria y gobierno</p>			
<p>9. EC (Estructura de costos)</p> <ul style="list-style-type: none"> * Insumos para desarrollo tecnológico * Infraestructura técnica * Soporte y garantías * Estructura legal 		<p>5. FI (Fuentes de ingresos)</p> <p>Servicios especializados de mapeo e irrigación inteligente</p> <p>Caracterización espectral de especímenes vegetales</p> <p>Desarrollo de proyectos de I+D para la industria</p> <p>Venta de kits de adaptación de sensores a drones</p>		

Figura 6.1: Canvas del modelo de negocios.

REFERENCIAS

- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., y Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7), 1–42. doi: 10.3390/rs10071091
- Adamu, B., Tansey, K., y Ogutu, B. (2018). Remote sensing for detection and monitoring of vegetation affected by oil spills. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), 3628–3645. Descargado de <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1448483> doi: 10.1080/01431161.2018.1448483
- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., y Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 9(11). doi: 10.3390/rs9111110
- Burkart, A., Aasen, H., Alonso, L., Menz, G., Bareth, G., y Rascher, U. (2015). Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer. *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs70100725
- Burkart, A., Cogliati, S., Schickling, A., y Rascher, U. (2014). A novel UAV-Based ultra-light weight spectrometer for field spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*, 14(1), 62–67. doi: 10.1109/JSEN.2013.2279720
- Castro, A. I. D., Shi, Y., y Maja, J. (2021). *UAVs for Vegetation Monitoring*. doi: 10.3390/books978-3-0365-2191-6
- Chen, W., y Wang, H. (2021). Absolute radiometric calibration and validation of a UAV

- multispectral sensor: a comparison between the irradiance-based method and reflectance-based method. *Journal of Spatial Science*, 66(3), 481–492. Descargado de <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1658651> doi: 10.1080/14498596.2019.1658651
- Chuvieco, E., y Huete, A. (2009). *Fundamentals of satellite remote sensing*. doi: 10.1201/b18954
- Cohen, Y., y Alchanatis, V. (2019). Spectral and Spatial Methods for Hyperspectral and Thermal Image-Analysis to Estimate Biophysical and Biochemical Properties of Agricultural Crops. *Biophysical and Biochemical Characterization and Plant Species Studies*, 73–101. doi: 10.1201/9780429431180-3
- Doctor, K. Z., Bachmann, C. M., Gray, D. J., Montes, M. J., y Fusina, R. A. (2015). Wavelength dependence of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of beach sands. *Applied Optics*, 54(31), F243. doi: 10.1364/ao.54.00f243
- Domenzain, L. (2017). *Reflectance Estimation*. Descargado 2022-10-11, de <https://forum.developer.parrot.com/t/reflectance-estimation/5597>
- Fenger-Nielsen, R. (2019). *Micasense Image Processing Tutorial (Sequoia)*. Descargado 2022-11-28, de https://github.com/rasmusfenger/micasense_imageprocessing_sequoia
- Franceschini, M. H. D., Bartholomeus, H., van Apeldoorn, D., Suomalainen, J., y Kooistra, L. (2017). Intercomparison of unmanned aerial vehicle and ground-based narrow band spectrometers applied to crop trait monitoring in organic potato production. *Sensors (Switzerland)*, 17(6). doi: 10.3390/s17061428
- Graham, C., Girkin, J., y Bourgenot, C. (2022). Spectral index selection method for remote moisture sensing under challenging illumination conditions. *Scientific Reports*, 12(1), 1–9. Descargado de <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18801-9> doi: 10.1038/s41598-022-18801-9
- Guo, Y., Senthilnath, J., Wu, W., Zhang, X., Zeng, Z., y Huang, H. (2019). Radiometric

- calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. *Sustainability (Switzerland)*. doi: 10.3390/su11040978
- Hakala, T., Markelin, L., Honkavaara, E., Scott, B., Theocharous, T., Nevalainen, O., ... Fox, N. (2018). Direct reflectance measurements from drones: Sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization. *Sensors (Switzerland)*, 18(5). doi: 10.3390/s18051417
- Harris Aerial Inc. (2013). *Radiance vs. Reflectance*. Descargado 2022-11-09, de <https://www.l3harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Help-Articles/Help-Articles-Detail/ArtMID/10220/ArticleID/19247/3377>
- Harris Aerial Inc. (2022). *Spectral Indices*. Descargado 2022-11-01, de <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/spectralindices.html>
- Honkavaara, E., y Khoramshahi, E. (2018). Radiometric correction of close-range spectral image blocks captured using an unmanned aerial vehicle with a radiometric block adjustment. *Remote Sensing*, 10(2). doi: 10.3390/rs10020256
- Horn, B. K. P., y Sjoberg, R. W. (1979). Calculating the reflectance map. *Applied Optics*. doi: 10.1364/ao.18.001770
- Humboldt State University. (2014). *Natural and False Color Composites*. Descargado 2022-11-01, de https://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/composites.html
- Iqbal, F., Lucieer, A., y Barry, K. (2018). Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 301–313. doi: 10.1080/22797254.2018.1432293
- Jakob, S., Zimmermann, R., y Gloaguen, R. (2017). The Need for Accurate Geometric and Radiometric Corrections of Drone-Borne Hyperspectral Data for Mineral Exploration: MEPHySTo-A Toolbox for Pre-Processing Drone-Borne Hyperspectral Data. *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs9010088

- Japan Association of Remote Sensing. (1999). *Remote Sensing Notes (JARS)*. Descargado 2022-11-06, de http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/rsnote/contents.htm
- Jeong, Y., Yu, J., Wang, L., Shin, H., Koh, S. M., y Park, G. (2018). Cost-effective reflectance calibration method for small UAV images. *International Journal of Remote Sensing*. doi: 10.1080/01431161.2018.1516307
- Jin, H., y Eklundh, L. (2015). In situ calibration of light sensors for long-term monitoring of vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3405–3416. doi: 10.1109/TGRS.2014.2375381
- Kapetsky, J., y Aguilar-Manjarrez, J. (2007). *Geographic information systems , remote sensing and mapping for the development and management of marine aquaculture* (n.º December). Descargado de <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab825f/AB825F00.htm#TOC> doi: 10.13140/RG.2.1.4046.9842
- Knudby, A. (2021). *Remote Sensing*. Ottawa, Canada. Descargado de <https://ecampusontario.pressbooks.pub/remotesensing/>
- Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Madrigal, V. P., Mallinis, G., ... Toth, B. (2018). *On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring*. doi: 10.3390/rs10040641
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., ... Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990. doi: 10.3390/rs70302971
- Meaden, G. J., y Kapetsky, J. M. (1991). *Geographical information systems and remote sensing in inland fisheries and aquaculture*. Descargado 2022-10-27, de <https://www.fao.org/3/t0446e/T0446E03.htm#ch3.1>
- Megasun. (2022). *Sun Position Calculator Lite*. Descargado 2022-11-05, de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.itskasra.suncalculator>

- Micasense, I. (2017). *Micasense Image Processing Tutorial*. Descargado 2021-11-06, de <https://github.com/micasense/imageprocessing>
- Mpakairi, K. S., Kadzunge, S. L., y Ndaimani, H. (2020, nov). Testing the utility of the blue spectral region in burned area mapping: Insights from savanna wildfires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100365. doi: 10.1016/J.RSASE.2020.100365
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009> doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009
- Murai, S. (1999). *GIS Work Book Vol. 2 Technical Course*. Descargado de http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/giswb/vol2/contents.htm
- Muzammil, B. (2017). *Details of Irradiance List tag for Sunshine sensor in exif data of Sequoia*. Descargado 2022-11-12, de <https://forum.developer.parrot.com/t/details-of-irradiance-list-tag-for-sunshine-sensor-in-exif-data-of-sequoia/5261>
- Natesan, S., Armenakis, C., Benari, G., y Lee, R. (2018). Use of UAV-Borne Spectrometer for Land Cover Classification. *Drones*. doi: 10.3390/drones2020016
- National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratories. (2022a). *NOAA ESRL - Solar Position Calculator*. Descargado 2022-11-05, de <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/azel.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratories. (2022b). *Solar Calculator Glossary*. Descargado 2022-11-06, de <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/glossary.html>
- Nizeyimana, E. (2020). *Remote Sensing and GIS Integration*. doi: 10.1201/9781003053514

www.gmp.ch/htmlarea/pdf/catalog.pdf

- Ocean Optics Inc. (2022). *Specular and Diffuse Reflectance Standards*. Descargado 2022-11-06, de <https://www.oceaninsight.com/products/sampling-accessories/solid-sampling/Reflectance-standards/>
- Palmer, J. M. (2003). *Radiometry and photometry FAQ*. Descargado 2022-09-11, de <https://wp.optics.arizona.edu/jpalmer/radiometry/radiometry-and-photometry-faq/>
- Parrot Bluegrass. (2018). *Multipurpose Quadcopter Solution for Agriculture*.
- Parrot Drone, S. (2017). *Parrot Announcement - Release of application notes*. Descargado 2022-11-29, de <https://forum.developer.parrot.com/t/parrot-announcement-release-of-application-notes/5455>
- Parrot Sequoia. (2016). *Understanding multispectral imagery using drones in agriculture*. Descargado 2019-10-01, de https://www.parrot.com/es/sites/default/files/sequoia_official_documentation_and_specifications_2016_2.pdf
- PIX4Dfields. (2022). *How to use the advanced layer visualization*. Descargado 2022-11-01, de <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360038962892-How-to-use-the-advanced-layer-visualization-PIX4Dfields>
- Rivera, J. P., Verrelst, J., Delegido, J., Veroustraete, F., y Moreno, J. (2014). On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sensing*, 6(6), 4927–4951. doi: 10.3390/rs6064927
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M. E., Painter, T. H., Dangel, S., y Martonchik, J. V. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*. doi: 10.1016/j.rse.2006.03.002
- Sun, Z., Bu, Z., Lu, S., y Omasa, K. (2021). A General Algorithm of Leaf Chlorophyll Content Estimation for A Wide Range of Plant species. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2892(c). doi: 10.1109/TGRS.2021.3123117

- Verrelst, J., Sabater, N., Rivera, J. P., Muñoz-Marí, J., Vicent, J., Camps-Valls, G., y Moreno, J. (2016). Emulation of leaf, canopy and atmosphere radiative transfer models for fast global sensitivity analysis. *Remote Sensing*, 8(8), 1–27. doi: 10.3390/rs8080673
- Wierzbicki, D., Kedzierski, M., Fryskowska, A., y Jasinski, J. (2018). Quality assessment of the bidirectional reflectance distribution function for NIR imagery Sequences from UAV. *Remote Sensing*, 10(9). doi: 10.3390/rs10091348
- Wikimedia Foundation, Inc. (2022). *Lambertian Reflectance*. Descargado 2022-11-09, de https://en.wikipedia.org/wiki/Lambertian_reflectance
- Xu, K., Gong, Y., Fang, S., Wang, K., Lin, Z., y Wang, F. (2019). Radiometric calibration of UAV remote sensing image with spectral angle constraint. *Remote Sensing*, 11(11). doi: 10.3390/rs11111291
- Zarzar, C. M., Dash, P., Dyer, J. L., Moorhead, R., y Hathcock, L. (2020). Development of a simplified radiometric calibration framework for water-based and rapid deployment unmanned aerial system (Uas) operations. *Drones*, 4(2), 1–22. doi: 10.3390/drones4020017
- Zhang, Y., Yang, J., Liu, X., Du, L., Shi, S., Sun, J., y Chen, B. (2020). Estimation of multi-species leaf area index based on Chinese GF-1 satellite data using look-up table and Gaussian process regression methods. *Sensors (Switzerland)*, 20(9). doi: 10.3390/s20092460