

**SIMULACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL
EN LA VEGETACIÓN MEDIANTE MODELOS DE
TRANSFERENCIA RADIATIVA A PARTIR DE
IMÁGENES HIPERESPECTRALES**

JHON EDWARD PINTO BARRERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2017

SIMULACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN MEDIANTE MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA A PARTIR DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES

JHON EDWARD PINTO BARRERA

Trabajo de grado para optar por el título de:
Ingeniero de Sistemas

Director:

ARIOLFO CAMACHO VELASCO

MSc. Ingeniería de Sistemas e Informática

Codirector:

HENRY ARGUELLO FUENTES

PhD. Ingeniería Eléctrica y Computación

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2017

A Dios por haberme dado vida y salud para culminar esta etapa.

A mi madre, por ser una mujer luchadora, por enseñarme a caminar por la vida, por brindarme su amor incondicional, por exigirme y motivarme a ser cada día mejor y por ser ese gran apoyo excepcional.

A todos mis amigos y familiares que fueron parte de este gran logro, por acompañarme en cada momento y depositarme su confianza.

JHON EDWARD PINTO BARRERA

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

Al ingeniero Ariolfo Camacho Velasco por su dedicación, paciencia y valiosos aportes en mi formación, por demostrarme que con esfuerzo cualquier meta se puede cumplir.

Al profesor Henry Arguello por permite formar parte de su grupo de investigación, por depositarme un voto de confianza y por todas sus enseñanzas.

A Jennifer Suarez, mi compañera de trayecto, por su constante apoyo, compañía y motivación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1 ESTADO DEL ARTE	16
1.1 PERCEPCIÓN REMOTA	16
1.2 IMÁGENES ESPECTRALES	17
1.3 COMPORTAMIENTO ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN	18
1.4 VARIABILIDAD ESPECTRAL	19
1.5 SIMULADORES	20
1.6 MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA	20
1.6.1 Prospect	21
1.6.2 Sail	23
1.6.3 Dart	23
1.6.4 Eetes	24
1.6.5 Ararat	25
1.6.6 Apsim	26
1.6.7 HySimCar	26
1.7 BASES TEÓRICAS DEL MTR	26
1.8 TENDENCIAS DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN	27
2 ADQUISICIÓN DE DATOS	30
2.1 DATOS SIMULADOS	30
2.2 DATOS REALES	31
2.2.1 Planta de retamo espinoso	31
2.2.2 Planta de fique	32
2.3 ESTADÍSTICA Y MÉTRICAS	33
2.3.1 Media	33
2.3.2 Desviación estándar	33
2.3.3 Matriz de correlación	34
2.3.4 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada <i>NDVI</i>	34

2.3.5	Error cuadrático medio	35
2.4	HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	35
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS FIRMAS ESPECTRALES	38
3.1	MEDIDAS SIMULADAS	38
3.1.1	Simulación en condiciones mínimas y máximas	39
3.1.2	Simulación en condiciones predeterminadas	40
3.1.3	Simulación variando el contenido de clorofila C_{ab}	41
3.1.4	Simulación variando el contenido de agua C_w	41
3.1.5	Simulación variando el ángulo cenital solar ACS	42
3.1.6	Simulación variando el ángulo cenital del observador ACO	43
3.1.7	Simulación variando la estructura interna de la hoja N	44
3.2	MEDIDAS REALES	46
3.2.1	Imágenes hiperespectrales aéreas del retamo espinoso medidas 1, 2, 3.	46
3.2.2	Firmas espectrales de Fique medidas 4-16	48
3.2.3	Experimentos realizados con las medidas obtenidas de manera independiente	63
3.3	COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS SIMULADAS CON LAS REALES	66
4	CONCLUSIONES	67
	REFERENCIAS	68
	BIBLIOGRAFÍA	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Principales elementos en la percepción remota.	16
Figura 2:	Clasificación de imágenes espectrales.	18
Figura 3:	Firma espectral de la vegetación	19
Figura 4:	Variabilidad espectral en la vegetación. [1])	20
Figura 5:	Clasificación de los modelos de transferencia radiativa. . .	21
Figura 6:	Modelización de una hoja compacta mediante el modelo de láminas generalizado.	22
Figura 7:	Modelización de una hoja compuesta por N capas mediante el modelo de láminas generalizado.	23
Figura 8:	Representación del proceso del simulador EeteS.	25
Figura 9:	Número de artículos por año en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.	28
Figura 10:	Número de publicaciones por autor en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.	28
Figura 11:	Número de publicaciones por país en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.	29
Figura 12:	Diagrama ARTMO	30
Figura 13:	Retamo Espinoso.	32
Figura 14:	Fique	33
Figura 15:	Interfaz del programa <i>análisis de firmas espectrales</i>	35
Figura 16:	Cargar datos en la interfaz	36
Figura 17:	Visualización y análisis de la variabilidad espectral	37
Figura 18:	Simulación x_0 y x_2	40
Figura 19:	Simulación x_1	40
Figura 20:	Simulación x_3 variando $C_{ab}=20/40/60/80/100 \mu g cm^{-2}$. . .	41
Figura 21:	Simulación x_4 variando $C_w=0,01/0,02/0,03/0,04/0,05 cm$. .	42
Figura 22:	Comportamiento del ángulo cenital solar ACS	42
Figura 23:	Simulación x_5 variando $ACS=10/20/30/40/50/60/70/80/90$	43
Figura 24:	Comportamiento del ángulo cenital del observador ACO . .	44

Figura 25: Simulación x_6 variando $ACO=-75/-60/-45/-30/-15/0/15/30/45/60/75$	44
Figura 26: Simulación x_7 variando $N=1/2/3/4$	45
Figura 27: Imagen hiperespectral del retamo espinoso	47
Figura 28: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral del retamo espinoso	48
Figura 29: Plantas (a)76, (b)94, (c)107, (d)110, (e)112	49
Figura 30: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida No. 4	50
Figura 31: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 5	51
Figura 32: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 6	52
Figura 33: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 7	53
Figura 34: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 8	54
Figura 35: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 9	55
Figura 36: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 10 planta 110	57
Figura 37: Gráficas de las firmas espectrales y su variabilidad espec- tral de la medida 10 planta 112	58
Figura 38: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 13 planta 110	59
Figura 39: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 13 planta 112	60
Figura 40: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 16 planta 110	61
Figura 41: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la me- dida 16 planta 112	62
Figura 42: Variación de la intensidad solar en la medida 8	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1:	Parámetros de entrada de PROSAIL	31
Tabla 2:	Parámetros de PROSPECT de cada simulación	38
Tabla 3:	Parámetros de SAIL de cada simulación	39
Tabla 4:	Variabilidad espectral de las simulaciones	46
Tabla 5:	Retamo Espinoso medidas 1, 2 y 3	47
Tabla 6:	Condiciones principales de la medida 4	49
Tabla 7:	Resumen de resultados medida 4	50
Tabla 8:	Condiciones principales de las medidas 5, 6, 7	51
Tabla 9:	Resumen de resultados medidas 5, 6, 7	53
Tabla 10:	Condiciones principales de las medidas 8, 9	54
Tabla 11:	Resumen de resultados de las medidas 8, 9	56
Tabla 12:	Condiciones principales de las medidas 10, 11, 12, 13, 15, 16	56
Tabla 13:	Resumen de resultados de las medidas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	63
Tabla 14:	Resultados experimento 1	64
Tabla 15:	Resultados experimento 2	64
Tabla 16:	Resultados experimento 3	65

Resumen

TITULO: SIMULACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN MEDIANTE MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA A PARTIR DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES^(*)

AUTOR: JHON EDWARD PINTO BARRERA ^(**)

PALABRAS CLAVE: Cobertura Vegetal, Imágenes Hiperespectrales, Modelos de Transferencias Radiativa, Prosail, Variabilidad Espectral.

El comportamiento espectral de la vegetación y la cantidad de energía reflejada por una planta se pueden medir a lo largo del espectro electromagnético mediante la percepción remota.

Por otra parte, existen los modelos de transferencia radiativa que permiten modelar la interacción de la energía electromagnética con los diferentes componentes que conforman la cubierta vegetal, para este estudio se empleó el modelo de transferencia radiativa PROSAIL.

Las firmas espectrales presentan variaciones en sus valores de reflectancia por factores como, las condiciones atmosféricas, composición vegetal y materiales en la escena. A estas diferencias espectrales de un mismo elemento y en condiciones iguales se les denomina variabilidad espectral.

La variabilidad afecta el resultado de algoritmos de clasificación o detección basados en la información espectral, esta situación es la principal motivación para el desarrollo de esta investigación.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es estudiar la variabilidad espectral presente en las medidas adquiridas (firmas espectrales). El estudio se realizó mediante sensores hiperespectrales y espectro radiómetros de punto para dos especies vegetales, la planta del retamo espinoso y de fique.

Se realizaron diferentes experimentos y medidas tanto con datos simulados como reales, donde se variaban parámetros de las características de las plantas (contenido de agua, clorofila y materia seca) y parámetros del sistema de adquisición de datos (ángulo del sol, ángulo del observador). De esta manera, el presente trabajo realizó 1301 medidas de firmas espectrales que permiten evaluar la variabilidad espectral.

Los resultados muestran que el factor que más afecta la variabilidad espectral en las medidas es el contenido de clorofila de las plantas en la región espectral visible. Asimismo, en las regiones del infrarrojo cercano y ondas cortas del infrarrojo el factor que incrementó la variabilidad es el contenido de agua en las plantas.

^(*) Trabajo de Investigación.

^(**) Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director, MSc. Ingeniería de Sistemas e Informática Ariolfo Camacho Velasco.

Abstract

TITLE:SIMULATION OF SPECTRAL VARIABILITY IN VEGETATION USING RADIATIVE TRANSFER MODELS FROM HYPERSPECTRAL IMAGES.^(*)

AUTHOR: JHON EDWARD PINTO BARRERA ^(**)

KEYWORDS: Canopy, Hyperspectral Images, Radiative Transfer Models, Prosail, Spectral Variability.

The spectral behavior of the vegetation and the amount of energy reflected by a plant can be measured along the electromagnetic spectrum using techniques of remote sensing.

On the other hand, there are the models of radiative transfer that permit modeling and estimating the interaction of electromagnetic energy with the various components that form the vegetation cover, in this work it is applied the radiative transfer model PROSAIL.

Spectral signatures show variations in their reflectance values due to different factors such as: atmospheric conditions, vegetal composition and materials at the scene. These spectral differences of the same element, which are under equal conditions, are defined as the spectral variability.

Variability affects the results of classification or detection algorithms based on spectral information, this situation is the prime motivation for the development of spectral variability investigations. The main objective of this research work is to study the spectral variability in the acquired measures (spectral signatures). The study was conducted by using hyperspectral sensors and spectroradiometer in situ to two plant species, the gorse and the fique.

In order to study which factors influence the spectral variability the most, different experiments and measurements were made with both simulated and real data, where the parameters of the plants' characteristics (water content, chlorophyll and dry matter) and data acquisition system parameters (sun angle, observer angle) were varied. In this work, 1301 spectral signatures were measured to evaluate the spectral variability.

The results show that the aspect that most affect the spectral variability in the measurements is the chlorophyll content of the plants in the spectral region of the visible. Besides, in the near infrared and short wavelength infrared regions the water content in plants increased the spectral variability.

^(*) Research Work.

^(**) School of Physical-Mechanical Engineering. Department of Systems Engineering and Informatics. Advisor, MSc. Computer and Systems Engineering Ariolfo Camacho Velasco.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento espectral de la vegetación y la cantidad de energía reflejada por una planta se puede medir a lo largo del espectro electromagnético, esto permite su caracterización espectral. Este comportamiento espectral depende de la interacción con la radiación solar (400nm - 2500nm), y puede ser alterado por varios factores, tales como: nutrientes, agua, clima y su medio ambiente. Para el estudio del comportamiento espectral de la vegetación se han desarrollado diversas técnicas tales como, espectroscopia in situ, cromatografía en laboratorio y el uso de las imágenes hiperespectrales.

Las imágenes hiperespectrales se han convertido en una técnica fundamental para la observación de la Tierra, y para satisfacer a nivel mundial la creciente demanda de mapeo de alta resolución espectral a gran escala en diferentes áreas, tales como recursos naturales, mineros, geológicos, ambientales, y principalmente en el sector de la agricultura y estudio de coberturas vegetales [2]. La interpretación de imágenes espectrales mediante percepción remota, requiere conocer con cierto detalle los fundamentos físicos de la señal que adquiere el sensor, especialmente en el análisis de coberturas vegetales, donde los factores que intervienen en la respuesta espectral adquirida por el sensor son especialmente complejos, variaciones en ellos inducen problemas de variabilidad espectral en la señal adquirida.

En diferentes trabajos se han propuesto modelos de simulación que permiten estimar la reflectancia y modelar el comportamiento espectral, a partir de una serie de parámetros biofísicos y bioquímicos que existen en la cobertura vegetal. Estos modelos se han desarrollado con distintos enfoques, si bien los más extendidos se basan en la ecuación de transferencia radiativa. Existen diferentes modelos de transferencia radiativa MTR (del inglés *radiative transfer models*) tales como, Prospect, Sail, Dart, Eetes, Ararat, Aspsim y HySimCar, los cuales se describen en el estado del arte, bajo previa revisión de este, se han seleccionado los modelos PROSPECT y SAIL. PROSPECT y SAIL son herramientas computacionales de simulación que estiman el comportamiento espectral de la vegetación. Los MTR son muy utilizados por los científicos, según un estudio realizado por el Instituto para la Información Científica donde se encontraron 113 artículos usando PROSPECT y 105 artículos usando SAIL[3].

PROSAIL es una combinación de PROSPECT y SAIL, esta es una herramien-

ta computacional de simulación de carácter científico ampliamente usada en la validación y aplicación en el estudio de la reflectancia y la transmitancia en la vegetación, debido a que contiene modelos de transferencia radiativa que ayudan a entender la intercepción de un rayo de luz que incide tanto a nivel de la hoja (PROSPECT) como a nivel de la cobertura vegetal (SAIL).

La herramienta computacional de simulación PROSPECT representa las propiedades ópticas de las hojas en el rango del espectro electromagnético desde las longitudes de onda de los 400nm hasta los 2500nm [4]. Del mismo modo, la herramienta de simulación SAIL modela la reflectancia bidireccional de la cobertura vegetal a nivel de dosel y ayuda a describir la interacción de la radiación con un conjunto de plantas, permitiendo simular áreas grandes de vegetación de una forma rápida y en condiciones controladas [5]. Gracias a este tipo de herramientas computacionales es posible estudiar diferentes elementos dentro de un cultivo, a nivel de hojas o plantas, modificando entradas en los MTR de manera rápida, y sin incurrir en altos costos.

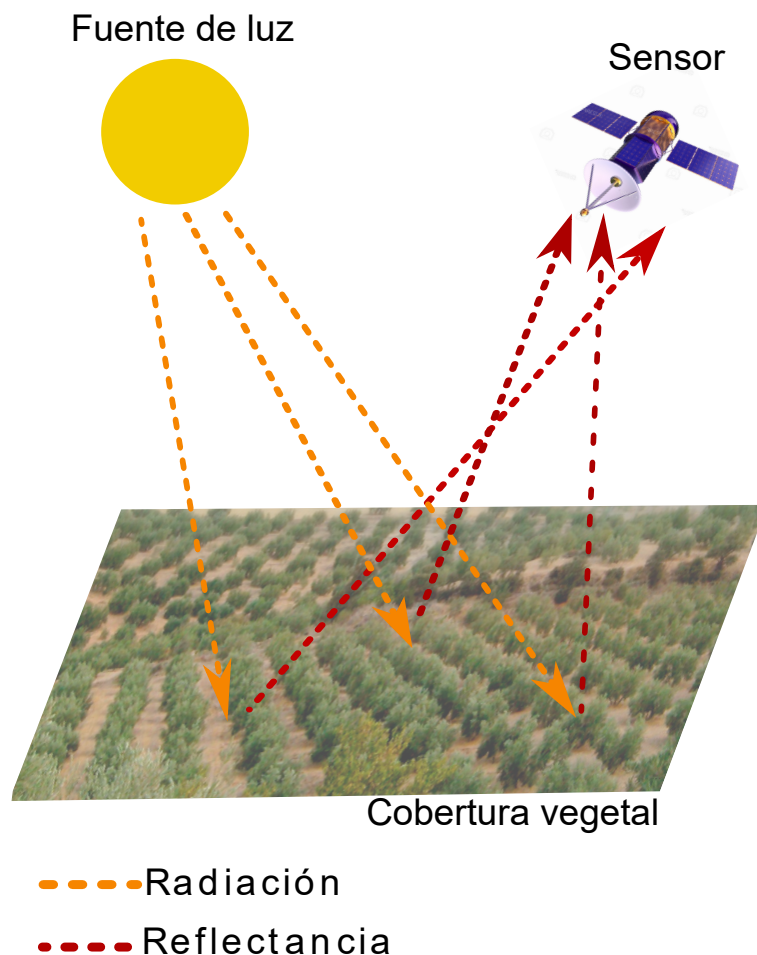
En este trabajo se busca simular el comportamiento espectral de la vegetación mediante el uso de los MTR para estudiar la variabilidad presente en las firmas espectrales, producidas por la atmósfera, ruido en el sensor, niveles de luminosidad, y por condiciones propias en el desarrollo fenológico de las coberturas vegetales, crecimiento de las plantas, y su interacción con otros factores, tales como el clima, medio ambiente, niveles de tensión hídrica o nutrientes. Además, se analizará y se comparará los datos reales respecto a los datos simulados.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota (del inglés, *remote sensing*) es la ciencia que permite adquirir y procesar información, estudiando la interacción que existe entre la luz y la atmosfera por medio de sensores ubicados en plataformas aerotransportadas (aviones tripulados o no tripulados) o aeroespaciales (satélites) [6]. También existe la percepción remota en campo o laboratorio, donde el sensor es dirigido al objeto o escena *in situ*. La figura 1 muestra los elementos principales de la percepción remota, una fuente de luz que emite la radiación solar, el sensor que adquiere la energía electromagnética y la cobertura vegetal [2].

Figura 1: Principales elementos en la percepción remota.



Fuente: Modificado de aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana, 2015 [2]

La técnica de percepción remota se utiliza para la adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en diferentes plataformas, la mayoría de ellas aéreas. La interacción electromagnética entre el sensor y el terreno generan una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra.

El primer satélite de observación de la Tierra fue lanzado al espacio por EE.UU en el año 1972, iniciándose entonces las técnicas de la percepción remota, poco utilizadas hasta hace unos años debido al alto costo que suponía trabajar con imágenes aéreas o satelitales. Actualmente, debido a la disponibilidad de imágenes y al desarrollo de nuevas tecnologías, son cada vez más las empresas y organismos públicos que incorporan el uso sistemático de imágenes en sus distintos proyectos, ya que pueden resultar muy ventajosas para un gran número de aplicaciones tales como: agricultura, urbanismo, medio ambiente y actualización de bases de datos cartográficas.

1.2. IMÁGENES ESPECTRALES

Las imágenes espectrales son aquellas que adquieren información espacial (x, y) y espectral (λ) formando un hipercubo (3D). Las condiciones de iluminación solar en una escena, así como las propiedades de reflexión de la luz en los materiales y las superficies, hacen parte de las imágenes espectrales usadas en la percepción remota. La radiación se refiere a la energía de la luz por unidad tiempo (potencia) que incide sobre una superficie, normalizada por el área de superficie (W/m^2) . La reflectancia (luz reflejada) es un número adimensional entre 0 y 1 que caracteriza la fracción incidente de luz reflejada por una superficie, es captada por el sensor [2].

Las características de reflexión de la luz solar de un material, aportan a su detección y clasificación dentro de una escena. Cuando la radiación incide sobre un material, este absorbe $L_{(\alpha)}(\lambda)$, transmite $L_{(\tau)}(\lambda)$ y refleja $L_{(\gamma)}(\lambda)$ la luz. Todos los componentes están en función de la longitud de onda.

$$L_i(\lambda) = L_{\alpha}(\lambda) + L_{\tau}(\lambda) + L_{\gamma}(\lambda) \quad (1.1)$$

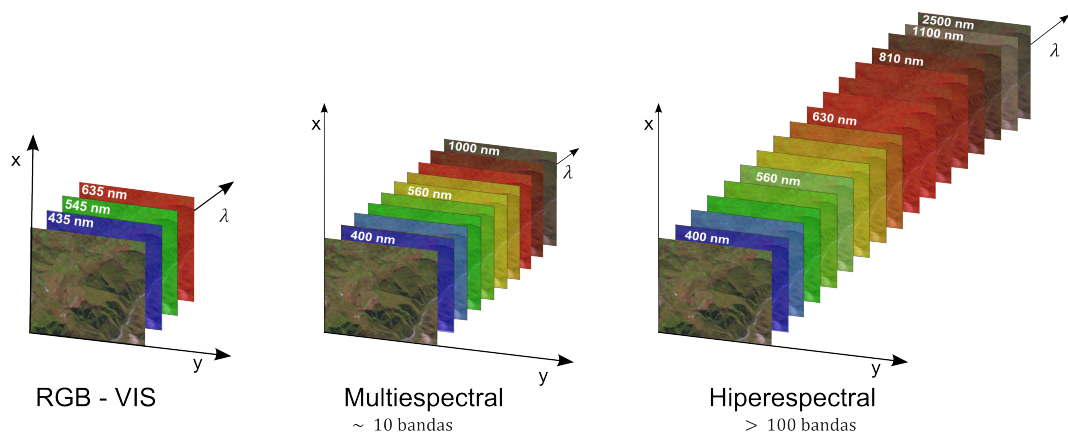
Las proporciones en (1.1) varían de acuerdo con el comportamiento espectral, la diferencia espectral permite detectar o clasificar un objeto o material en una imagen captada, a partir de su firma espectral, sin embargo, aún es materia de investigación la variabilidad espectral presente en el comportamiento espectral de objetos o materiales iguales medidos dentro de una misma escena o en diferentes tiempos.

Las imágenes espectrales se pueden clasificar a partir del número de bandas contenidas en cada imagen, la figura 2 muestra imágenes RGB, (del inglés *Red, Green, Blue*) son aquellas que pertenecen al rango visible del espectro electromagnético; imágenes multiespectrales son las que captan información en solo

decenas de bandas no contiguas y con longitudes de onda ancha (del inglés, *broadband*); por ultimo tenemos las imágenes hiperespectrales que adquieren desde 50 bandas hasta cientos de bandas por escena. Todas las bandas de una imagen hiperespectral representan una misma escena, y cada una de ellas contiene información de un rango de longitudes de onda diferente, que pueden cubrir tanto el espectro visible como el infrarrojo. El ancho de cada banda puede ser entre 5 y 10nm según el sensor utilizado. Así, para cada pixel espacial (x, y) de la imagen se dispone de una curva espectral que proporciona una gran cantidad de información en el dominio espectral (λ). La principal ventaja de las imágenes hiperespectrales es la cantidad de bandas y su alta resolución espectral.

A continuación, clasificación de las imágenes espectrales.

Figura 2: Clasificación de imágenes espectrales.



Fuente: Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana, 2015 [2]

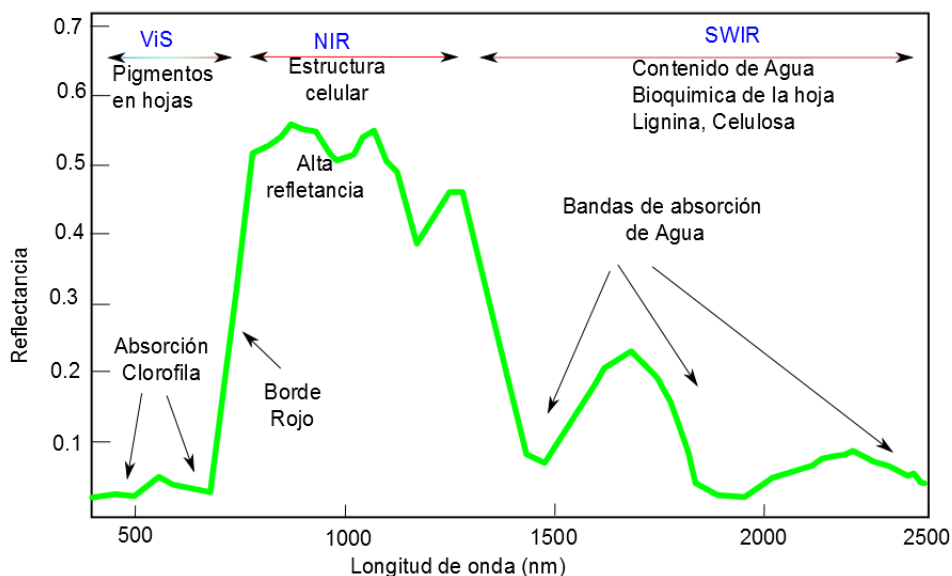
1.3. COMPORTAMIENTO ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN

La cobertura vegetal es un medio heterogéneo compuesto por: hojas, tallos, troncos, suelos y aguas. La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre una superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales, tales como: pastizales, bosques naturales o cultivos.

El comportamiento espectral en la vegetación está dado principalmente por la interacción entre la radiación solar y la cobertura vegetal. Este comportamiento es muy complejo debido a factores tales como: el clima, el medio ambiente y enfermedades de la vegetación.

La figura 3 muestra las principales características espectrales de la vegetación, destacando las regiones espectrales o longitudes de onda de mayor importancia como la región del espectro electromagnético visible *VIS* (400-800nm), el infrarrojo cercano *NIR* (800-1300nm) y la onda corta del infrarrojo *SWIR* (1300-2500nm), para el análisis y estudio de los cultivos agrícolas y vegetación en general.

Figura 3: Firma espectral de la vegetación



Fuente: Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana, 2015 [2]

La región espectral que corresponde al VIS en la vegetación se caracteriza por una baja reflectancia y transmitancia, debido a que los pigmentos y la clorofila absorben la mayor parte de la energía en $\lambda \sim 650\text{nm}$ (rojo) y $\lambda \sim 450\text{nm}$ (azul), esta absorción elimina estos colores de la cantidad de luz que se refleja, haciendo que el color visible predominante que llega a nuestros ojos sea el verde $\lambda \sim 520\text{nm}$ en esta longitud de onda se presenta el mayor pico de reflectancia en el VIS [7].

La vegetación sana aparece como un color verde oscuro, la vegetación no saludable tendrá menos clorofila y por lo tanto genera tonos rojizos. Este aumento de la reflectancia roja, junto con la disminución del verde causa la apariencia amarilla en las plantas no saludables.

Uno de los parámetros o regiones espectrales de importancia en la vegetación es el borde rojo (del inglés *red edge*), el cual presenta una fuerte pendiente entre la baja reflectancia en el VIS y la alta reflectancia del NIR, el borde rojo se ubica en $\lambda \sim 700\text{-}740\text{nm}$.

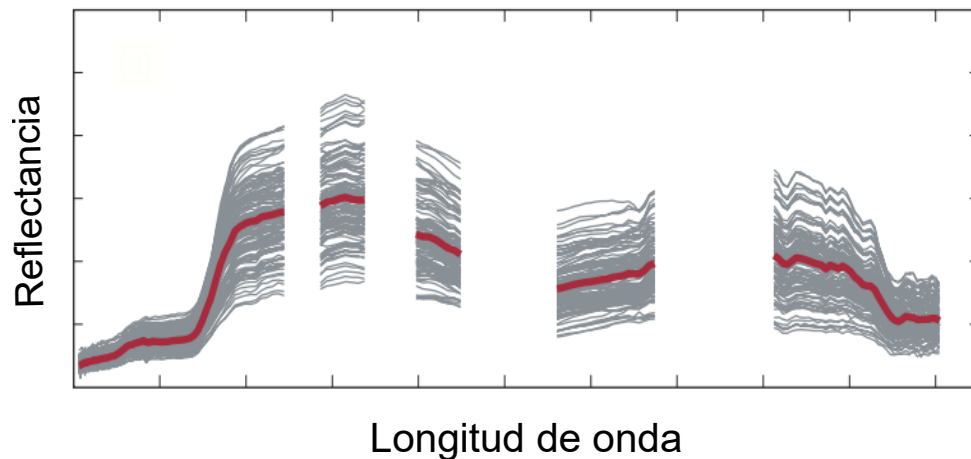
1.4. VARIABILIDAD ESPECTRAL

La variabilidad de las firmas espectrales en la vegetación (ver figura 4) es muy común debido a las condiciones atmosféricas, ruido en el sensor, composición del material, materiales en la escena, entre otras. Por lo tanto, al hacer mediciones sobre el mismo tipo de superficie, las firmas espectrales presentan una

variabilidad espectral inherente, en consecuencia, esta variabilidad dificulta la caracterización para formar una firma espectral única.

Otro aspecto importante surge a partir de la interacción entre la resolución espacial del sensor y la variabilidad del suelo presente en la escena, dependiendo de esto y de los materiales presentes en la superficie, da como resultado un cubo de datos hiperespectral puro o mixto, donde el puro contiene un solo material en la superficie y el mixto contiene múltiples materiales, este es uno de los mayores obstáculos cuando se quiere caracterizar una firma espectral.

Figura 4: Variabilidad espectral en la vegetación. [1])



Fuente: Tomada de [1]

1.5. SIMULADORES

Un simulador es un programa de computación que permite diseñar y modelar el comportamiento de un sistema real. Estos simuladores evitan todo tipo de riesgos y disminuyen costos comparados con la práctica real, debido a que en un ordenador se pueden realizar múltiples repeticiones sin necesidad de utilizar recursos diferentes a los del hardware.

Los simuladores se pueden desarrollar en diferentes áreas tales como, biología, matemáticas, física, agricultura, forestal, entre otras. En la presente investigación se abordan los simuladores que permiten estudiar el comportamiento espectral en la vegetación, modelando la interacción que hay entre la radiación solar y la vegetación.

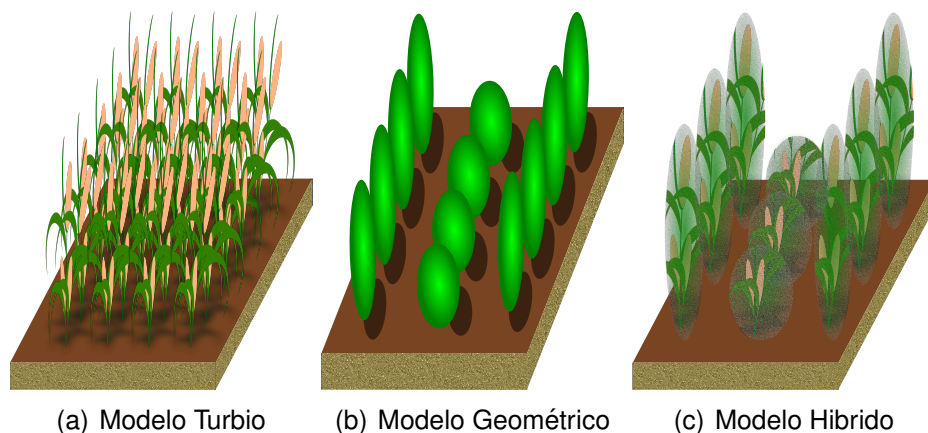
1.6. MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA

Los modelos de transferencia radiativa (*MTR*) en la vegetación simulan la propagación e interacción de la energía electromagnética con los diferentes componentes que conforman la cubierta vegetal [8], ayudando al entendimiento de la

interpretación de la reflectancia en la vegetación en términos de características biofísicas.

Comprender el comportamiento espectral de la estructura de la cubierta vegetal es un proceso complejo, por lo que determinar la manera en que la energía emitida por la fuente de luz incide sobre la cubierta vegetal requiere de varios enfoques. Para simular la reflectancia de la cubierta vegetal existen distintas aproximaciones, que pueden ser clasificadas en 3 categorías: modelos turbios (ver figura 5a), modelos geométricos simples (ver figura 5b) y modelos híbridos (figura 5c).

Figura 5: Clasificación de los modelos de transferencia radiativa.



Los modelos turbios (ej. Prosail) representan la estructura de la cubierta vegetal por una o varias capas horizontalmente infinitas y homogéneas; y contienen pequeños elementos difusores y absorbentes que están distribuidos representando las hojas. Este tipo de modelos son los elegidos cuando se pretende simular coberturas densas, como por ejemplo maíz, soya y cebada. Los modelos geométricos simples describen la cubierta vegetal con figuras geométricas como, esferas, cilindros, elipsoides, y conos. Estos objetos representan la planta o conjunto de plantas y finalmente los modelos híbridos que son combinaciones de modelos turbios y modelos geométricos simples, donde los modelos turbios están limitados por objetos geométricos simples [9].

De acuerdo con la revisión del estado del arte, se presentan los MTR más representativos:

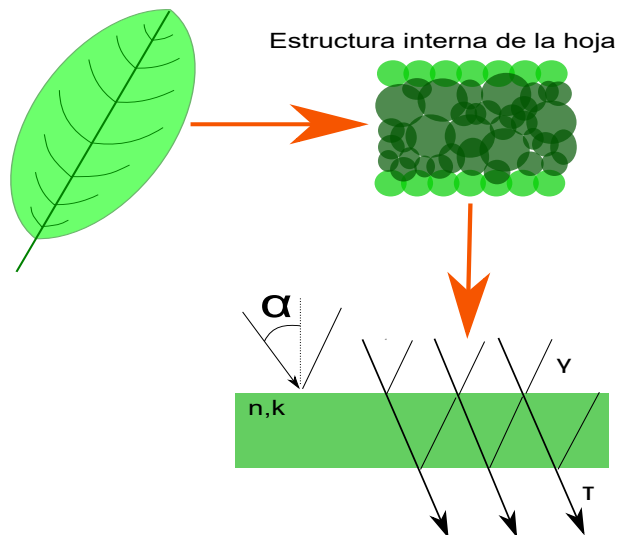
1.6.1 Prospect (del inglés *Properties Spectra*), es un MTR que simula la reflectividad y transmisividad a nivel de hoja en una planta en el rango espectral de iluminación solar entre 400 y 2500nm. A partir de cuatro parámetros de entrada (N , parámetro estructural; C_{ab} , contenido de clorofila a y b ; C_w , contenido de agua y C_m , contenido de materia seca) [4].

Prospect fue ideado y desarrollado por S. Jacquemoud y F. Baret en 1990, y es uno de los MTR más utilizados en investigaciones científicas. Prospect está ba-

sado en el modelo de láminas generalizado de Allen (ver figura 6), que representa las propiedades ópticas de las hojas [4], este modelo solo podía ser aplicado a hojas con estructura interna compacta.

El modelo de capas desarrollado por Allen asume que una hoja compacta puede ser considerada como una lámina transparente con superficies rugosas plano-paralelas e inicialmente asume que los flujos de luz son isotrópicos y que el rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie de la hoja. Sin embargo, debido a la forma ondulada de la superficie, el rayo que llega a la superficie de la hoja penetra en su interior con ciertas direcciones de incidencia que se encuentran dentro de un ángulo sólido. El ángulo es definido por un ángulo máximo de incidencia α , relativo a la normal del plano de la hoja. El modelo para las hojas compactas tiene tres parámetros de entrada: un índice de refracción n , un ángulo de incidencia α , y un coeficiente de transmisión τ .

Figura 6: Modelización de una hoja compacta mediante el modelo de láminas generalizado.

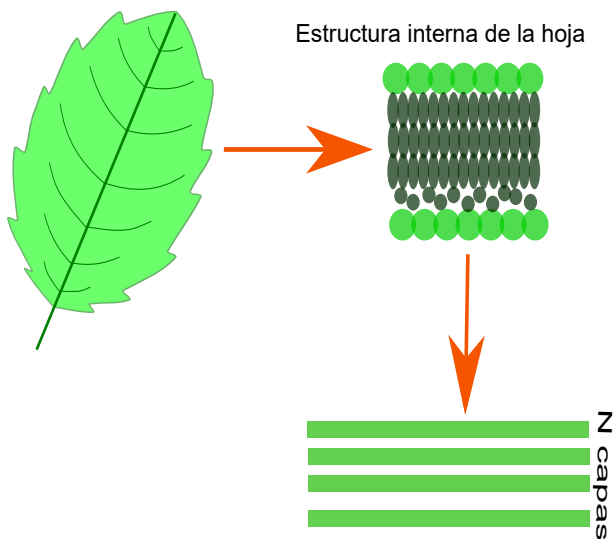


Fuente: Modificado de <http://geogra.uah.es/rtm/>

Posteriormente, este modelo fue extendido para N capas (figura 7). La estructura interna de la hoja se describe entonces con el índice de área vacía (VAI), parámetro que viene dado por $VAI = N - 1$, este modelo generalizado es un buen método de aproximación al problema.

La generalización del modelo de láminas consiste en apilar las capas elementales que forman la hoja. Se considera entonces una hoja compuesta por una pila de N capas homogéneas separadas por $N - 1$ espacios de aire.

Figura 7: Modelización de una hoja compuesta por N capas mediante el modelo de láminas generalizado.



Fuente: Modificado de <http://geogra.uah.es/rtm/>

Prospect es una versión mejorada del modelo de capas generalizado, este requiere un número muy reducido de parámetros de entrada lo que facilita su utilización.

Algunas aplicaciones de este MTR son: inversión del modelo de transferencia radiativa para estimar el índice de área foliar LAI (del inglés *Leaf Area Index*) y clorofila en un pastizal heterogéneo a nivel de la hoja [10]; simulación de imágenes hiperespectrales y radiancia direccional usando modelos de transferencia radiativa biofísicos y atmosféricos [11]; índices de vegetación hiperespectral y un nuevo algoritmo para predecir el LAI verde de las coberturas: modelización y validación en el contexto de la agricultura de precisión [12].

1.6.2 Sail (del inglés *Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*) Es un MTR que permite simular la reflectividad a nivel de dosel o cubierta vegetal (conjunto de plantas) teniendo en cuenta la reflectividad y transmisividad de la hoja (simulada por PROSPECT), SAIL permite modelar los siguientes parámetros de entrada, LAI, distribución angular de las hojas (*LADF*, del inglés *Leaf Angle Distribution Function*), radiancia difusa por parte de la atmosfera, ángulos de observación (posición del sensor) e iluminación (posición de la fuente de luz), efecto hot spot, coeficiente del suelo y el azimut [13]. Este modelo fue desarrollado por Verhoef (1984) [14], sus versiones derivadas son: SAILH (1985) [15], GeoSail (2001) [16] y 4SAIL (2007) [17].

1.6.3 Dart (del inglés *Discrete Anisotropic Radiative Transfer*) es una herramienta computacional de MTR en 3D más completa que simulan la interacción entre la radiación Tierra-atmósfera y las longitudes de onda infrarrojas. Este ha

sido desarrollado en el laboratorio CESBIO (centro de estudios espaciales de la biosfera) en Toulouse, Francia en el año 1992. Modela señales ópticas de imágenes radiométricas y escáneres de laser a bordo de satélites y aviones. Este simulador puede trabajar con cualquier configuración experimental en 3D como, atmosfera, geomorfología del terreno, bosques, cultivos agrícolas, iluminación solar angular de cualquier día y especificaciones instrumentales como: resolución espacial y espectral, dirección del sensor, altitud de la plataforma, etc [18].

DART es un simulador libre para actividades de investigación y enseñanza, ha sido empleado con éxito en varias aplicaciones científicas, incluyendo el desarrollo de técnicas de inversión para imágenes de reflectancia aérea y por satélite [19]; diseño de sensores de satélites (NASA DESDynI, CNES Pleiades, CNES LIDAR mission project [20]); estudio en la estructura del dosel sobre la textura de la imagen satelital [21] y la reflectancia [22]; modelado de la distribución tridimensional de la fotosíntesis y tasas de producción primaria en las cubiertas vegetales [23]; investigación de la influencia de la estructura forestal de los abetos de Noruega, y de los elementos leñosos en la reflectancia del dosel [24]; diseño de un nuevo índice de vegetación de la clorofila, para una cobertura vegetal de coníferas [25].

1.6.4 Eetes (del inglés *end to end*) Es un software de simulación que ha sido desarrollado en el marco de la misión del programa de análisis y mapeo ambiental (EnMAP), misión que contará con un sensor de imágenes hiperespectrales. El enfoque de la simulación muestra las diferentes etapas en dos procesos: simulación directa y simulación inversa [26].

La cadena del proceso secuencial de la simulación directa consta de 4 módulos independientes:

a) Módulo atmosférico: Convierte la reflectancia superficial a datos de radiancia de la parte superior de la atmosfera TOA (del inglés *Top Of Atmosphere*), utilizando distribuciones horizontales de espesor óptico de aerosol, el vapor de agua en columnas en píxeles y la elevación de la superficie además, incluye la cobertura de las nubes y las sombras.

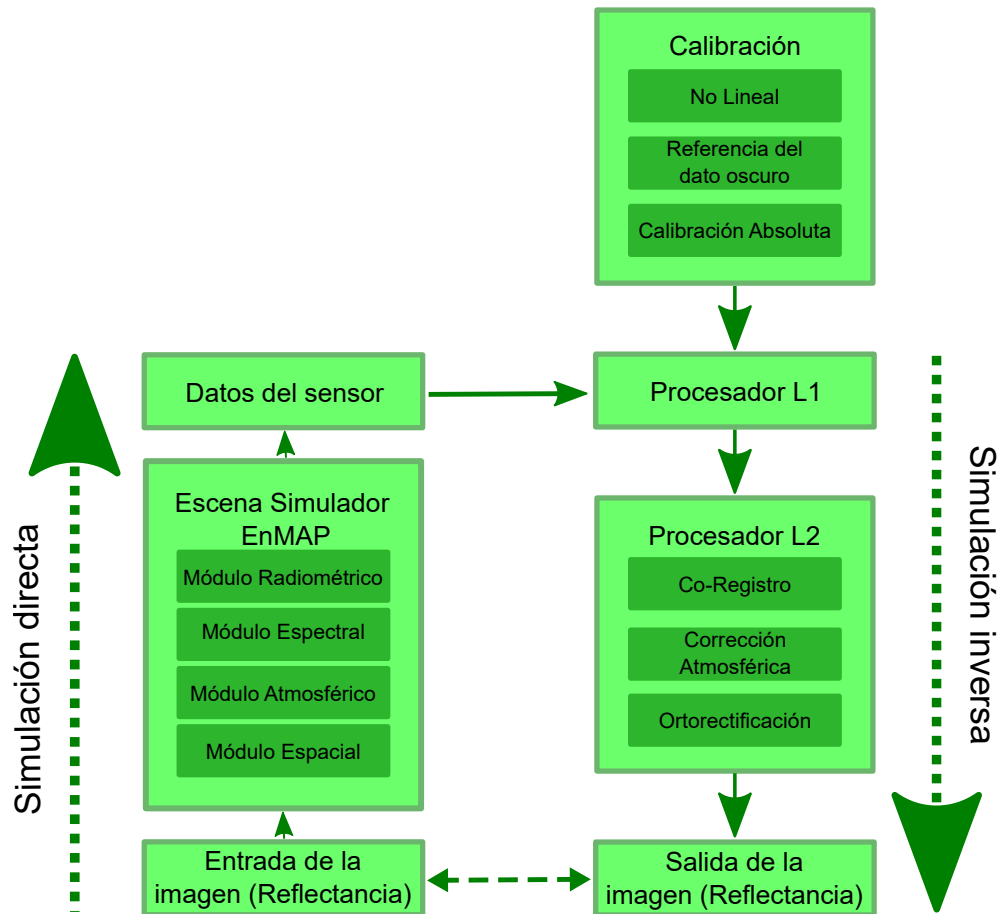
b) Módulo espacial: Realiza la adquisición espacial, simulando el sensor sobre una superficie. Además, incluye el modelo geométrico que describe las características geométricas del sensor y de la plataforma. Así mismo el modelo del sensor óptico, caracteriza la respuesta espacial del sistema de imágenes definido por la función de transferencia de modulación del sensor MTF (del inglés *Modulation Transfer Function*).

c) Módulo espectral: Realiza el remuestreo espectral en 244 bandas para correcciones tales como el efecto sonrisa y también realiza un cambio en la di-

mención espectral del espectrómetro modificando las longitudes de onda y su ancho.

d) Módulo radiométrico: Transforma la radiación del sensor en números digitales DN (del inglés *Digital Numbers*). Este módulo considera algunos parámetros como el tiempo de integración; eficiencia cuántica; capturas, oscuridad y cuantificación de ruidos; IR-sígnal de fondo; modos de ganancia alta y baja para el detector VNIR (*espectro visible e infrarrojo cercano*); compensaciones variables y respuestas individuales no lineales para cada elemento del detector.

Figura 8: Representación del proceso del simulador EeteS.



Fuente: Modificado, Herramienta de simulación Eetes aplicado a la misión hiperespectral EnMAP [26]

1.6.5 Ararat Sistema de trazado de rayos monte carlo conocido como ARARAT (del inglés *Advanced RAdiometric RAY Tracer*). Es una herramienta que permite simular de forma real la radiancia direccional y la reflectancia, medidas por medio de la percepción remota. Este sistema utiliza modelos geométricos tridimensionales de datos topográficos de vegetación o superficies (Modelo Digital de Elevación-DEM) con atributos radiométricos asociados [27].

Ararat ha sido diseñado principalmente para modelos de plantas geométricas que se generan mediante el Sistema de Modelación de Plantas Botánicas BPMS (del inglés *Botanical Plant Modelling System*). Esta herramienta se ha implementado en diferentes aplicaciones, tales como, entendimiento de imágenes satelitales [28]; efectos sobre la variación del ángulo cenital según tres índices espectrales en un bosque [29]; entre otras.

1.6.6 Apsim Simulador de Sistemas de Producción Agropecuaria (APSIM) (del inglés, *Agricultural Production Systems Simulator*). Fue desarrollado por la Unidad de Investigación de Sistemas de Producción Agrícola en Australia APSRU. Su función es simular el proceso biofísico en los sistemas agrícolas en particular donde hay interés económico e interés ecológico de la práctica de gestión frente al riesgo climático.

Apsim está compuesto por, un conjunto de módulos biofísicos que simulan los procesos físicos y biológicos de sistemas agrícolas; un conjunto de módulos de gestión que permiten al usuario especificar las reglas de gestión previstas que caracterizan el escenario que está siendo simulado y que controlan la realización de la simulación; varios módulos que facilitan la entrada y salida de datos de la simulación; por último un motor que maneja el proceso de simulación y controla los mensajes que pasan entre los módulos independientes.

Apsim contiene una serie de módulos para simular el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de cultivos, pastos, bosques y sus interacciones con el suelo. Actualmente, existen módulos de cultivo para cebada, garbanzo, algodón, maíz, soja, girasol, trigo, caña de azúcar, entre otros. Además, hay módulos generales para el bosque, pastos y malezas, así como implementaciones específicas para el pasto llamado Medicago sativa [30].

1.6.7 HySimCar Este sistema de simulación también ha sido desarrollado en la misión del programa de análisis y mapeo ambiental (EnMAP). HySimCaR permite hacer simulación espectral, espacial y temporal de la reflectancia bidireccional y la aproximación de la función de distribución de reflectancia bidireccional BRDF (del inglés *the bidirectional reflectance distribution function*) de diferentes cubiertas de cereales. Las cubiertas de cereales son de gran interés debido a que constituyen la mayor parte de las tierras cultivables en el mundo, del mismo modo, la agricultura en general se está haciendo cada vez más importante por el crecimiento de la población. Una aplicación de esta herramienta es, simulación multitemporal e hiperspectral de la reflectancia bidireccional que existe en la cobertura vegetal usando modelos 3D virtual [31].

1.7. BASES TEÓRICAS DEL MTR

Los procesos de interacción entre la radiación electromagnética y la materia se describen formalmente a través de la ecuación de transferencia radiativa. Este formalismo emplea como cantidad básica la intensidad de la radiación, que se relaciona con cantidades medibles como el flujo de energía; la intensidad del campo radiativo varía por procesos como absorción, emisión y dispersión.

La ecuación de transferencia radiativa se conoce como:

$$-\frac{1}{e_{v,v}} \frac{dI_v(P, s)}{ds} = I_v(P, s) - J_v(P, s) \quad (1.2)$$

1.8. TENDENCIAS DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN

Para el desarrollo de la presente tesis se realizó una revisión del estado del arte, donde se estudió detalladamente artículos y publicaciones científicas escritos desde el año 1981 hasta la fecha utilizando como palabra clave (*Key word*), variabilidad espectral en la vegetación. Para este fin se recurrió a *Scopus* que es una de las bibliotecas electrónicas más grandes del mundo.

Scopus es una herramienta de navegación con 20.500 publicaciones procedentes de más de 5.000 editoriales internacionales desde el año de 1966, abarcando la literatura internacional sobre ciencias, medicina y tecnología.

Por otra parte, *Scopus* es una base de datos bibliográfica de fácil manejo, debido a que cuenta con una funcionalidad de búsqueda, además se actualiza semanalmente para enriquecer su contenido.

Como resultado de esta revisión se encontró que existen 843 publicaciones que están relacionadas con la variabilidad espectral en la vegetación desde el año 1981 hasta el año 2017 (ver figura 9). El autor que más ha realizado publicaciones respecto a este tema es Gregory Asner de Washington, Estados Unidos con 21 publicaciones realizadas (ver figura 10). Adicionalmente, Estados Unidos seguido de China y España son los países que cuentan con un mayor número de publicaciones, Colombia presenta solo una publicación en el año 2001 (ver figura 11).

Gracias a esta herramienta se ha percibido que la investigación referente a este proyecto de grado es de gran importancia debido a sus aplicaciones y a su amplia gama de exploración.

Figura 9: Número de artículos por año en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.

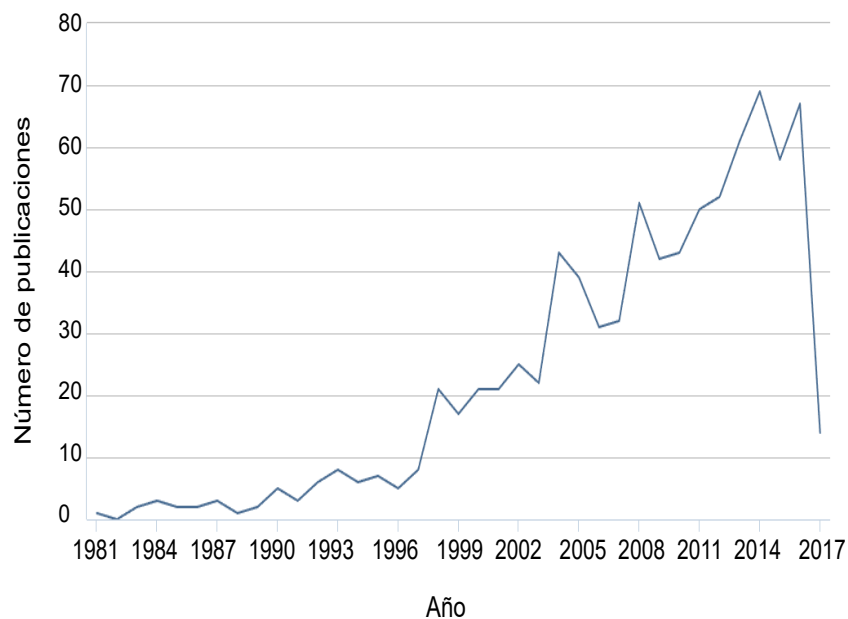


Figura 10: Número de publicaciones por autor en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.

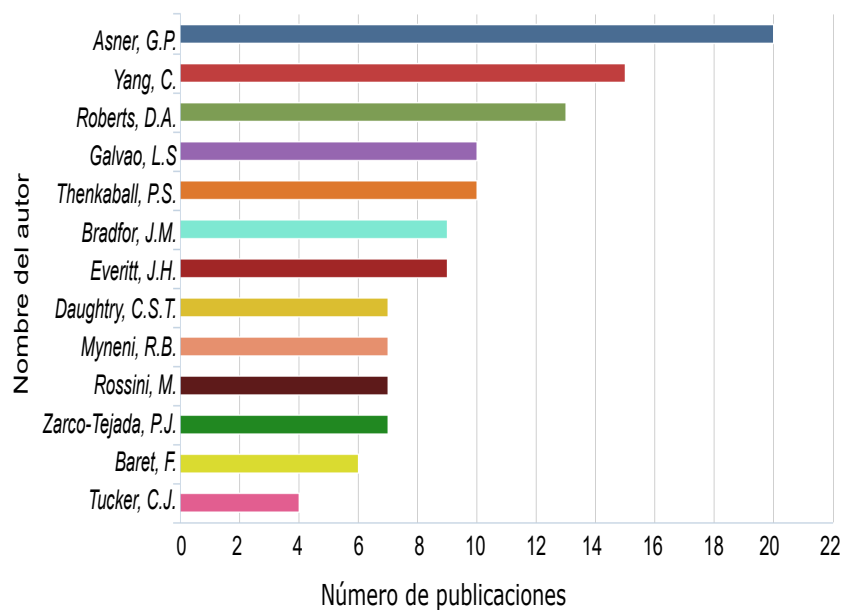
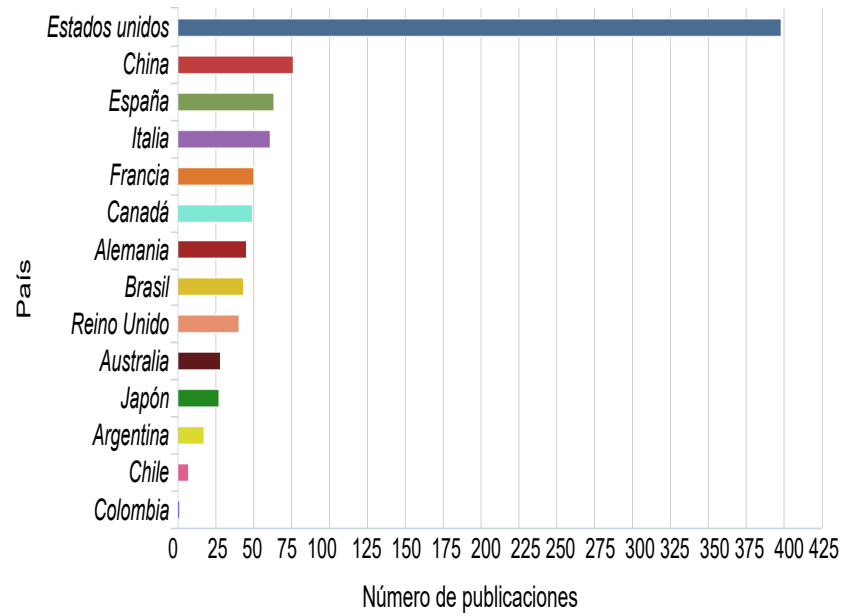


Figura 11: Número de publicaciones por país en la temática de variabilidad espectral en la vegetación.



2. ADQUISICIÓN DE DATOS

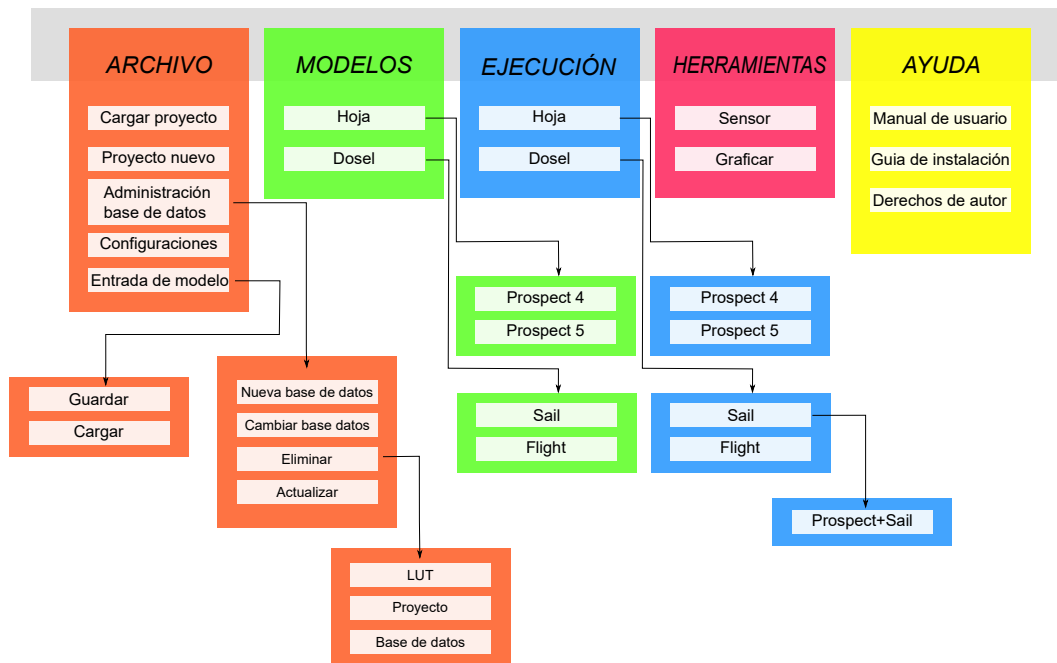
2.1. DATOS SIMULADOS

En este proyecto de grado se estudió la variabilidad espectral de la vegetación mediante la simulación de datos empleando la herramienta software ARTMO (*Automated Radiative Transfer Models Operator*), que ha sido implementada en diferentes lenguajes de programación tales como, Matlab, Fortran, IDL y Python. Este software científico de computación tiene una herramienta llamada PROSAIL (conformada por los MTR PROSPECT y SAIL).

ARTMO se encuentra desarrollado en Matlab que es un lenguaje de programación científico matemático y MySQL que es un gestor de base de datos, su versión más reciente es la (3,21,4) del 28 marzo del 2017 [32].

El simulador ARTMO (ver figura 12) utiliza una interfaz de usuario GUI (del inglés *graphical user interface*) compuesta por un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz, por lo tanto, proporciona todas las herramientas necesarias para ejecutar una serie de MTR tanto a nivel de la hoja (PROSPECT) como a nivel de la cubierta vegetal (SAIL) facilitando una interacción coherente e intuitiva con el usuario.

Figura 12: Diagrama ARTMO



Por otra parte, los parámetros de entrada requeridos en el MTR PROSPECT son la estructura interna de la hoja (N), contenido de clorofila (C_{ab}), agua (C_w) y materia seca (C_m). En cuanto a los parámetros de entrada del MTR SAIL, se tienen el índice de área foliar (LAI), efecto *hot spot* (HS), radiación directa/difusa (RDD), coeficiente del suelo

(C_s), ángulo promedio de la hoja (APH), ángulo cenital solar (ACS), ángulo cenital del sensor (ACO) y el azimut (Az). Estos parámetros se resumen en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de entrada de PROSAIL

Modelo	Nomenclatura	Parámetros	Unidad
PROSPECT	N	Estructura interna de la hoja	—
	C_{ab}	Contenido de clorofila	$\mu g\ cm^{-2}$
	C_w	Contenido de agua	cm
	C_m	Contenido de materia seca	$g\ cm^2$
SAIL	LAI	Índice de área foliar	—
	HS	Hot-spot	—
	RDD	Radiación directa/difusa	—
	C_s	Coefficiente del suelo	—
	APH	Ángulo promedio de la hoja	<i>grados</i>
	ACS	Ángulo cenital solar	<i>grados</i>
	ACO	Ángulo cenital del observador	<i>grados</i>
	Az	Azimut	<i>grados</i>

Finalmente, por medio de PROSAIL se realizaron 7 simulaciones donde se variaron los parámetros de entrada N , C_{ab} , C_w , C_m , ACS y ACO . Los resultados obtenidos de estas simulaciones se encuentran en la sección: 3 *Resultados y análisis de las firmas espectrales* y la subsección: 3.1 *Medidas simuladas*.

2.2. DATOS REALES

En el estudio de la variabilidad espectral de la vegetación en campo se obtuvieron medidas de dos tipos de plantas, el retamo espinoso (nombre científico *Ulex Europaeus*) y el fique (nombre científico *Furcraea Bedinghausii*), para el estudio del retamo espinoso los datos se obtuvieron mediante imágenes hiperespectrales adquiridas por el sensor VNIR1600 que tiene una resolución espacial de 1m y una resolución espectral en el VNIR de 160 bandas y en el SWIR de 260 bandas, así mismo, para el fique se adquirieron los datos por medio del espectrómetro *FLAME-S-VIS-NIR-ES* que tiene una resolución espectral de 350-1000nm.

2.2.1 Planta de retamo espinoso El retamo espinoso (ver figura 13) es una planta exótica que introdujeron de Europa a Colombia, se utilizó para crear cercas vivas, sin embargo, actualmente se convirtió en una problemática ambiental de carácter nacional, debido a que la especie vegetal del retamo es una planta invasora que está ahogando los frailejones y otras especies en los páramos, esta planta está dispersada por todo el país, por lo tanto, las autoridades ambientales están explorando el uso de nuevas tecnologías para detectar y mapear las zonas con presencia de retamo espinoso, dentro de las cuales se destaca el uso de imágenes hiperespectrales.

Figura 13: Retamo Espinoso.



Fuente: Tomada de naturalezayvida.blogia.com

La presente investigación hace uso de imágenes hiperespectrales adquiridas de manera aérea sobre áreas del municipio de Sopo- Cundinamarca con presencia del retamo. El día 25 de abril del 2017 se realizaron tres líneas de vuelo, donde cada línea de vuelo abarco un área de 0.5 x 6 Kilómetros, el área total fue de 900 hectáreas. El sensor HySpex VNIR1600 se instaló sobre un avión, la altitud del avión fue de 430 metros. Estas medidas fueron realizadas por la empresa *Quimbaya Resource Exploration*, quien suministro las imágenes hiperespectrales para la presente investigación.

El objetivo de esta imagen hiperespectral suministrada es estudiar la variabilidad espectral en una misma escena (retamo espinoso) bajo las mismas condiciones. Con esta planta se obtuvieron 101 firmas espectrales.

2.2.2 Planta de fique El fique (ver figura 14) es una planta originaria de la América Tropical, su cultivo se da de manera particular en las zonas andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador, en nuestro país su siembra se realiza en la parte alta de la sierra templada y fría.

Esta planta produce fibras largas, duras y posee atributos importantes para la fabricación de productos étnicos y artesanías colombianas. Además, el fique es una fibra biodegradable que al descomponerse se emplea como alimento y abono.

Figura 14: Fique



Fuente: Tomada de www.eldiario.com.co

Para estudiar la variabilidad espectral en el caso de una escena u objetivo (plantas de fique), se varió el ángulo cenital del observador ACO y el ángulo cenital solar ACS . En la variación de ACO , el observador se puso en diferentes posiciones y en la variación del ACS se hicieron las medidas en diferentes horas. Las muestras del fique se captaron en el invernadero de la Universidad Industrial de Santander, donde se obtuvieron 1200 firmas espectrales.

2.3. ESTADÍSTICA Y MÉTRICAS

Para estudiar y analizar las firmas espectrales obtenidas, se realizaron diferentes cálculos mediante las siguientes métricas:

2.3.1 Media En matemáticas y estadística, la media aritmética de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Este concepto se puede describir matemáticamente como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.1)$$

En este trabajo, se utilizó la media para obtener la firma espectral más representativa de todo el conjunto de firmas espectrales adquiridos.

2.3.2 Desviación estándar La desviación estándar es una medida del grado de dispersión para datos cuantitativos con respecto al valor promedio, se expresa

matemáticamente como:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

En este trabajo se utilizó la desviación estándar para determinar la variación de los datos obtenidos en cada experimento.

2.3.3 Matriz de correlación La matriz de correlación r permite evidenciar la relación existente entre las bandas de cada firma espectral. Cuando $r = 0$ indica que las firmas espectrales no están correlacionadas, cuando $r > 0$ la relación es positiva, esto indica que las firmas espectrales se correlacionan en sentido directo y cuando $r < 0$ la relación es negativa, significa que se correlacionan en sentido inverso.

2.3.4 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada *NDVI*

Un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de operaciones matemáticas entre diferentes longitudes de onda [33]. Una cubierta vegetal en buen estado de salud tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 600 y 700 nm), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 700 y 1100 nm), que es reflejada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite realizar su valoración cualitativa.

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (*NDVI*) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (2.3)$$

donde *NIR* es la reflectividad en el infrarrojo cercano y *R* es la reflectividad en el rojo.

El rango de valores de la reflectancia espectral se encuentra entre 0 y 1; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. Por consecuencia de estos rangos de valores, el *NDVI* varía su valor entre -1 y 1.

El *NDVI* permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto, está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas.

El *NDVI* se utilizó para evaluar el impacto de la variabilidad espectral en operaciones sobre los valores de reflectancia en la vegetación.

2.3.5 Error cuadrático medio En estadística, el error cuadrático medio ECM es una forma de evaluar la diferencia entre un estimador y el valor real de una cantidad. Un estimador es usado para deducir el valor de un parámetro desconocido en un modelo estadístico, se expresa matemáticamente como:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.4)$$

donde \hat{Y}_i es un vector de n predicciones y Y es el vector de los verdaderos valores.

El ECM es usado para determinar la medida en la que las firmas espectrales varían respecto a la media.

2.4. HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

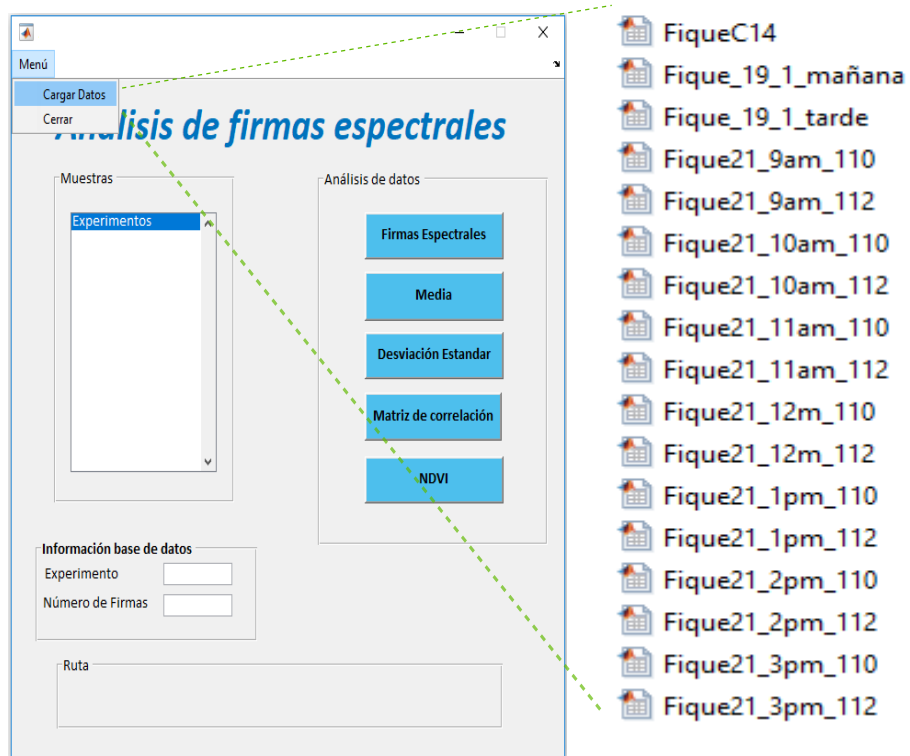
Se desarrolló una interfaz en Matlab (ver figura 15) la cual ayuda a evaluar y graficar las firmas espectrales adquiridas. Esta interfaz permite adquirir información de las firmas espectrales, así como, realizar un análisis estadístico de la variación de las mismas mediante el cálculo de la media, la desviación estándar, la matriz de correlación, el $NDVI$ y el error cuadrático medio.

Figura 15: Interfaz del programa *análisis de firmas espectrales*



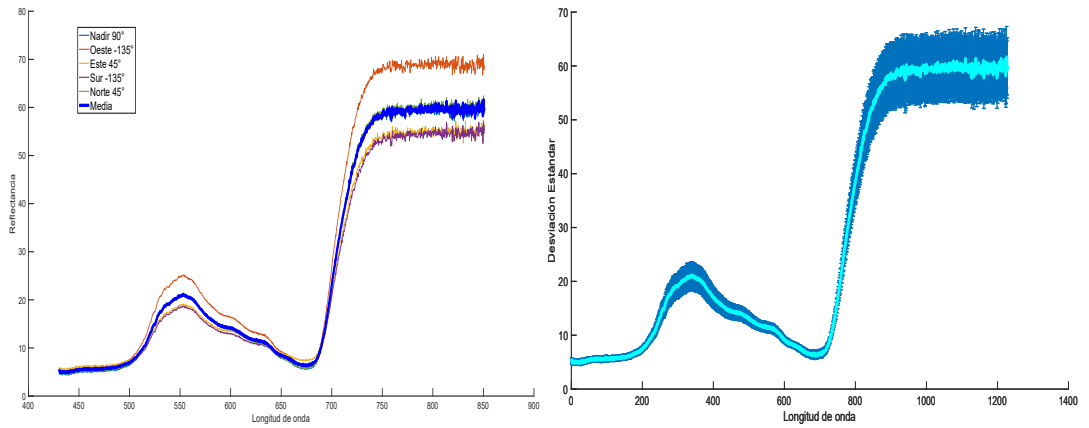
En esta interfaz, en la parte izquierda se observan las muestras que corresponden al *experimento* seleccionado, además, en esta zona se visualiza la información de la base de datos, el *nombre del experimento* y el *número de firmas adquiridas*, en la parte derecha se observa el análisis de datos que hace referencia a los botones de las *firmas espectrales*, la *media*, la *desviación estandar*, la *matriz de correlación* y el *NDVI*, por último, en la parte inferior de la interfaz se observa la *ruta* donde se encuentra el experimento seleccionado.

Figura 16: Cargar datos en la interfaz



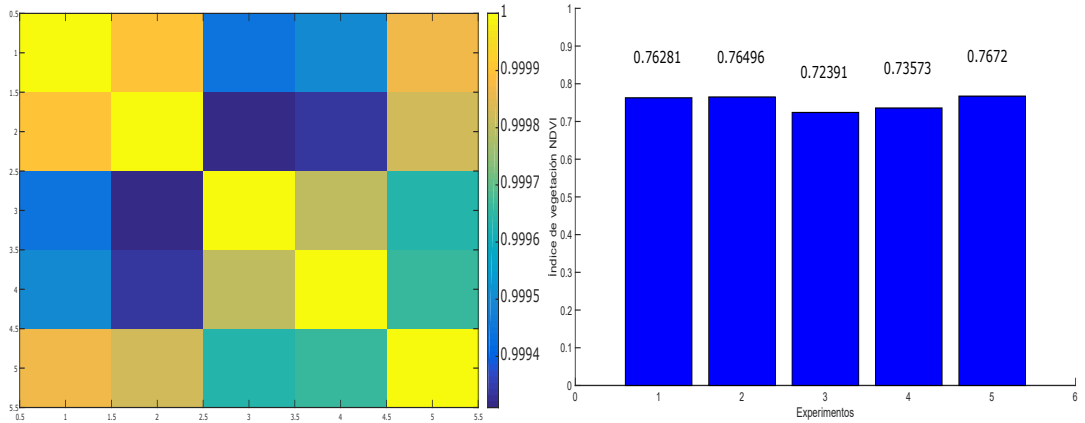
Finalmente en la figura 16 se observa el momento en que se cargan los datos de la base de datos de las medidas realizadas. A continuación, en grafica (ver figura 17) se visualizan todos los resultados obtenidos por el programa.

Figura 17: Visualización y análisis de la variabilidad espectral



(a) Media

(b) Desviación estándar



(c) Matriz de correlación

(d) NDVI

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS FIRMAS ESPECTRALES

En este capítulo se muestran los resultados y análisis correspondientes de las medidas simuladas y de las medidas reales.

3.1. MEDIDAS SIMULADAS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a través del software de simulación ARTMO. Se realizaron 7 simulaciones donde se variaron los siguientes parámetros de entrada: Estructura interna de la hoja N , el contenido de clorofila C_{ab} , el contenido de agua C_w , el ángulo cenital solar ACS y el ángulo cenital del observador ACO .

A continuación, en la tabla 2 y 3 se detallan en cada columna los parámetros de entrada de cada simulación (x_0-x_7) con sus respectivas variaciones.

Tabla 2: Parámetros de PROSPECT de cada simulación

Parámetros	Simulación							
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
N Estructura de la hoja	1	1.5	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1 2 3 4
C_{ab} Clorofila	0	30	100	20 40 60 80 100	30	30	30	30
C_w Contenido de agua	0	0.03	0.05	0.03	0.01 0.02 0.03 0.04 0.05	0.03	0.03	0.03
C_m Contenido de materia seca	0	0.012	0.05	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

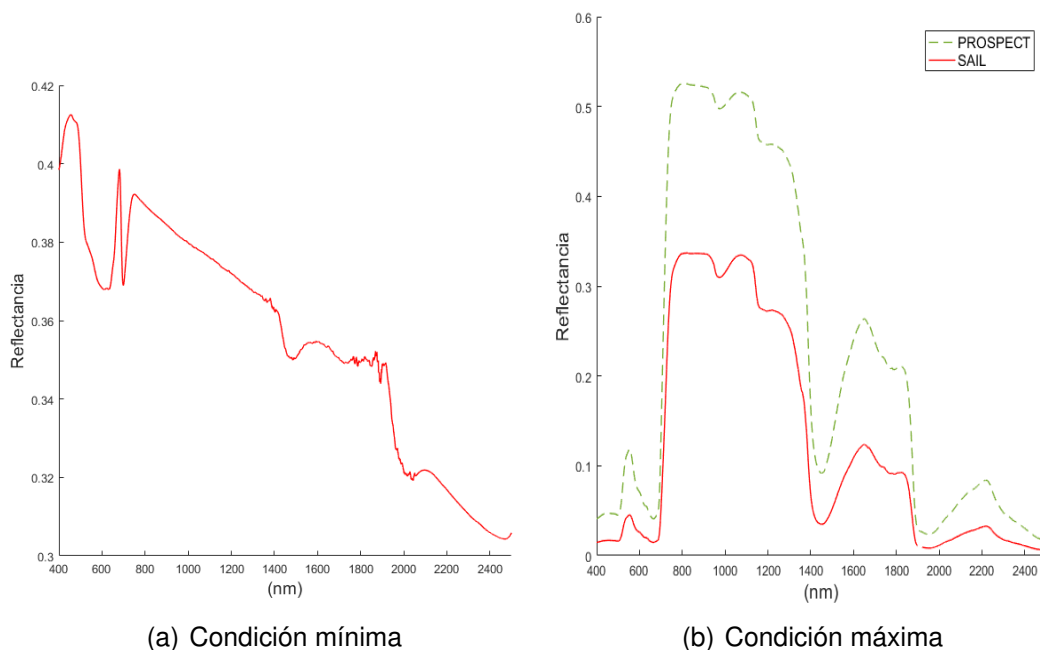
Tabla 3: Parámetros de SAIL de cada simulación

Parámetros	Simulación								
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
<i>LAI</i> Índice de área foliar LAI	0	3	10	3	3	3	3	3	
<i>HS</i> Efecto Hot Spot	0	0.01	1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
<i>APH</i> Ángulo promedio de la hoja	0	30	90	30	30	30	30	30	
<i>ACS</i> Ángulo cenital solar	0	0	90	0	0	10	0	0	
						20			
						30			
						40			
						50			
						60			
						70			
						80			
<i>ACO</i> Ángulo cenital del observador	0	0	75	0	0	0	-75	0	
							-60		
							-45		
							-30		
							-15		
							0		
							15		
							30		
<i>C_s</i> Coeficiente del suelo	0	0.8	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
									0.8
									0.8
									0.8
									0.8
									0.8
									0.8
									0.8
<i>Az</i> Azimut	0	0	180	0	0	0	0	0	

3.1.1 Simulación en condiciones mínimas y máximas

En la figura 18a se muestra la firma espectral con todas las entradas de PROSAIL en condiciones mínimas, es decir que no se alteró ningún parámetro, en esta figura se observa que la firma ilustrada no corresponde a la forma de una firma espectral de la vegetación y en la figura 18b se muestra la firma espectral con todas las entradas de PROSAIL en condiciones máximas, es decir, que todos los parámetros están en su máximo valor.

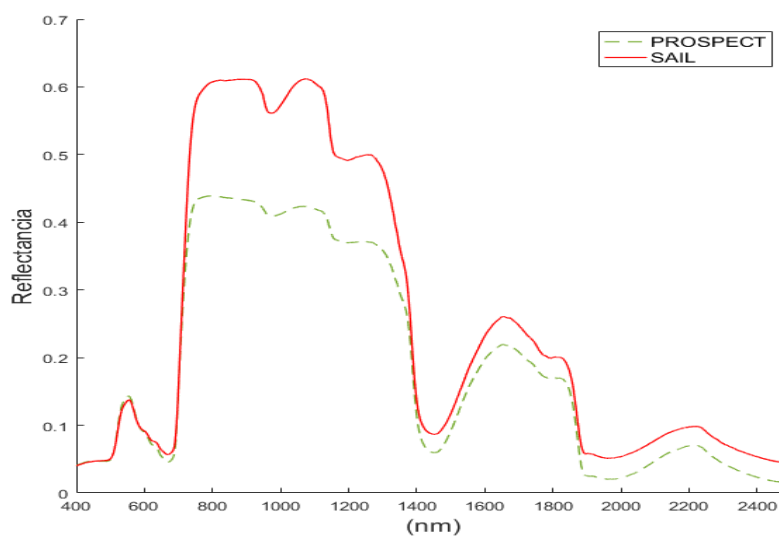
Figura 18: Simulación x_0 y x_2



3.1.2 Simulación en condiciones predeterminadas

La simulación x_1 en condiciones predeterminadas (ver figura 19), se realizó con los siguientes parámetros de entrada, para el MTR PROSPECT $N=1,5$, $C_{ab}=30 \mu g cm^{-2}$, $C_w=0,03 cm$, $C_m=0,012 g cm^2$ y para el MTR SAIL $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30$ grados, $ACS=0$ grados, $ACO=0$ grados, y $Az=0$ grados. Estos parámetros son los predeterminados que sugiere el software de computación ARTMO para PRO-SAIL.

Figura 19: Simulación x_1

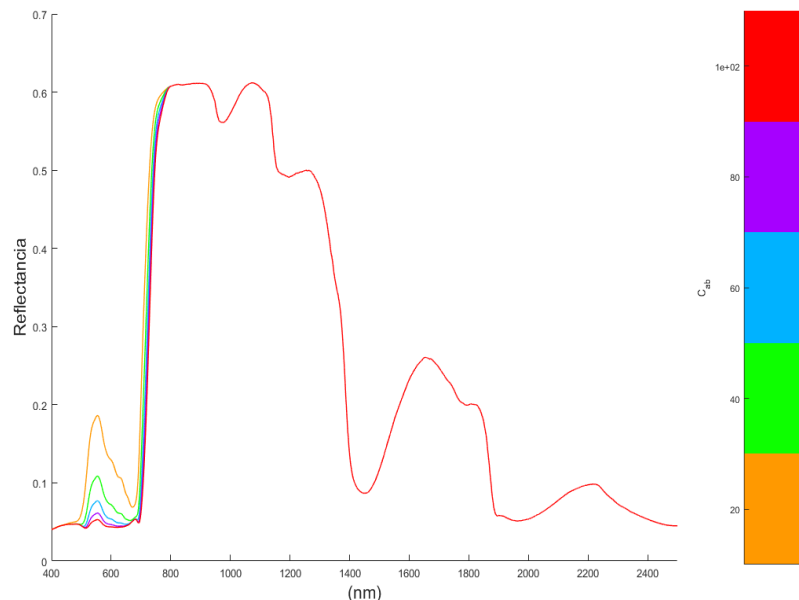


3.1.3 Simulación variando el contenido de clorofila C_{ab}

La simulación x_3 se realizó variando el contenido de C_{ab} (ver figura 20). Los parámetros de entrada que se utilizaron para el MTR PROSPECT fueron: $N=1,5$, $C_{ab}=20/40/60/80/100 \mu g cm^{-2}$, $C_w=0,03 cm$, $C_m=0,012 g cm^2$ y para el MTR SAIL fueron: $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30$ grados, $ACS=0$ grados, $ACO=0$ grados, y $Az=0$ grados.

Se muestran 5 firmas espectrales que corresponden al MTR PROSAIL, se puede observar que solo ocurren cambios en el VIS , a mayor C_{ab} el pico de la reflectancia que aparece en el VIS decrece, en contraste a menor C_{ab} el pico de la reflectancia en el VIS aumenta.

Figura 20: Simulación x_3 variando $C_{ab}=20/40/60/80/100 \mu g cm^{-2}$

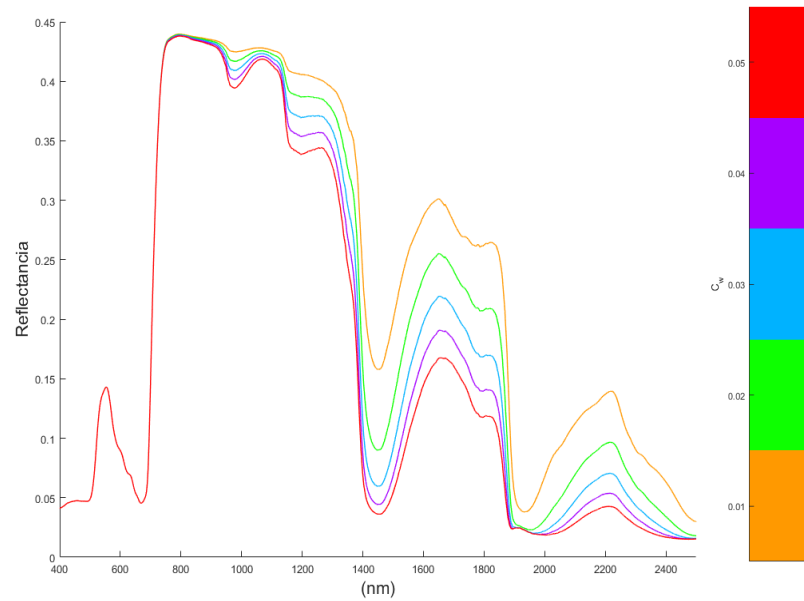


3.1.4 Simulación variando el contenido de agua C_w

La simulación x_4 se realizó variando el contenido de C_w (ver figura 21). Los parámetros de entrada que se utilizaron para el MTR PROSPECT fueron: $N=1,5$, $C_{ab}=30 \mu g cm^{-2}$, $C_w=0,01/0,02/0,03/0,04/0,05 cm$, $C_m=0,012 g cm^2$ y para el MTR SAIL fueron: $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30$ grados, $ACS=0$ grados, $ACO=0$ grados, y $Az=0$ grados.

Se presentan cambios en la longitud de onda del NIR ($800 - 1300nm$) y en la longitud de onda del $SWIR$ ($1300 - 2500nm$), la figura 21 muestra que ha mayor C_w la reflectancia de la firma espectral es menor, por el contrario, cuando el C_w es menor la reflectancia de la firma espectral se incrementa.

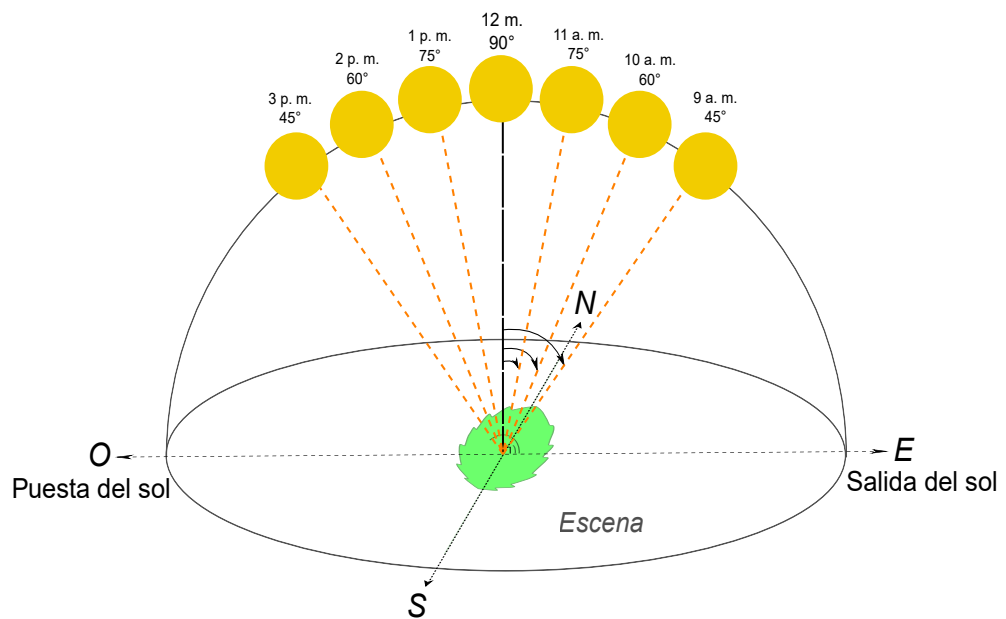
Figura 21: Simulación x_4 variando $C_w=0,01/0,02/0,03/0,04/0,05 \text{ cm}$



3.1.5 Simulación variando el ángulo cenital solar ACS

En la gráfica (ver figura 22) se representa el comportamiento del ángulo cenital solar en diferentes horas del día, este recibe valores de 0° a 90° y esta formado por la perpendicular del plano cardinal.

Figura 22: Comportamiento del ángulo cenital solar ACS

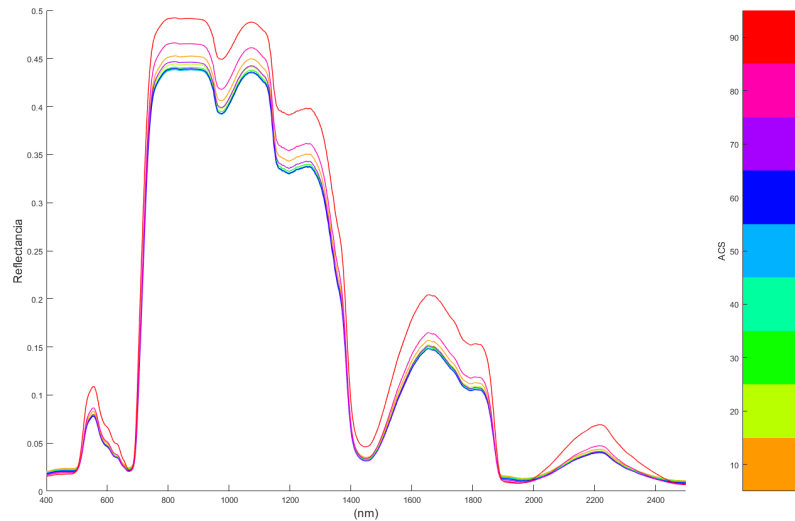


La simulación x_5 (ver figura 23) se realizó variando el ángulo ACS (ver figura 22). Los parámetros de entrada que se utilizaron para el MTR PROSPECT fueron: $N=1,5$, $C_{ab}=30$

$\mu g\ cm^{-2}$, $C_w=0,03\ cm$, $C_m=0,012\ g\ cm^2$ y para el MTR SAIL fueron: $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30\ grados$, $ACS=10/20/30/40/50/60/70/80/90\ grados$, $ACO=0\ grados$, y $Az=0\ grados$.

se observa que el comportamiento del ángulo solar donde existe mayor reflectancia es en $90\ grados$.

Figura 23: Simulación x_5 variando $ACS=10/20/30/40/50/60/70/80/90$



3.1.6 Simulación variando el ángulo cenital del observador ACO

La simulación x_6 (ver figura 25) se realizó variando el ángulo ACO (ver figura 24). Los parámetros de entrada que se utilizaron para el MTR PROSPECT fueron: $N=1,5$, $C_{ab}=30\ \mu g\ cm^{-2}$, $C_w=0,03\ cm$, $C_m=0,012\ g\ cm^2$ y para el MTR SAIL fueron: $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30\ grados$, $ACS=0\ grados$, $ACO=-75/-60/-45/-30/-15/0/15/30/45/60/75\ grados$, y $Az=0\ grados$.

Figura 24: Comportamiento del ángulo cenital del observador ACO

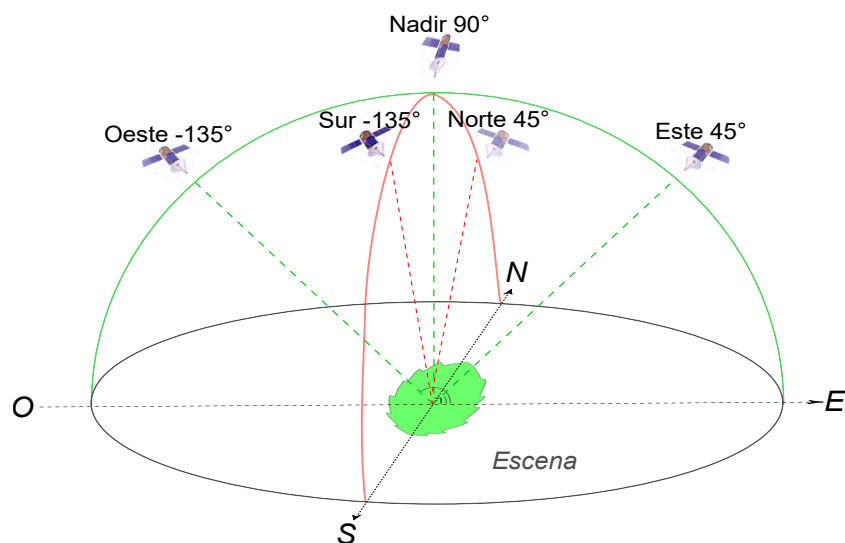
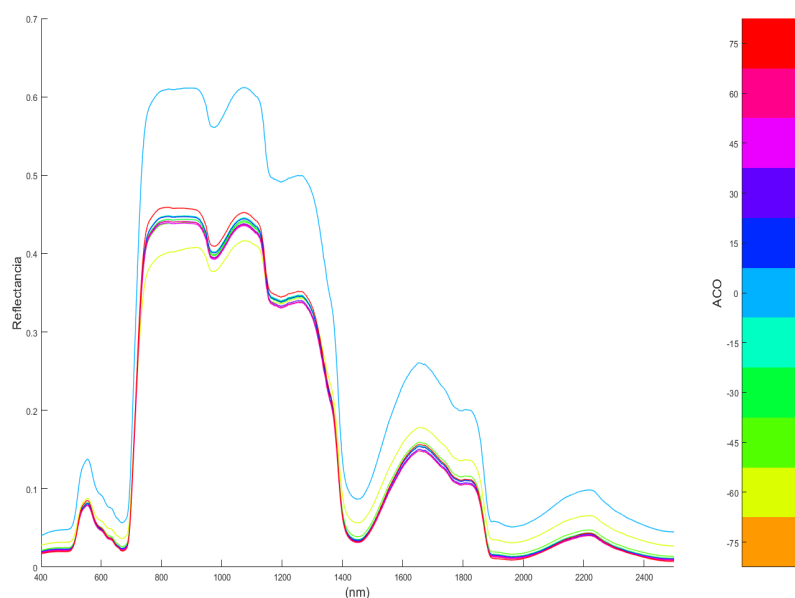


Figura 25: Simulación x_6 variando $ACO = -75/-60/-45/-30/-15/0/15/30/45/60/75$



En esta simulación se observa que la mejor firma espectral es cuando el ángulo cenital del observador $ACO = 0$ *grados* es decir, cuando el observador forma un ángulo recto con el plano cardinal.

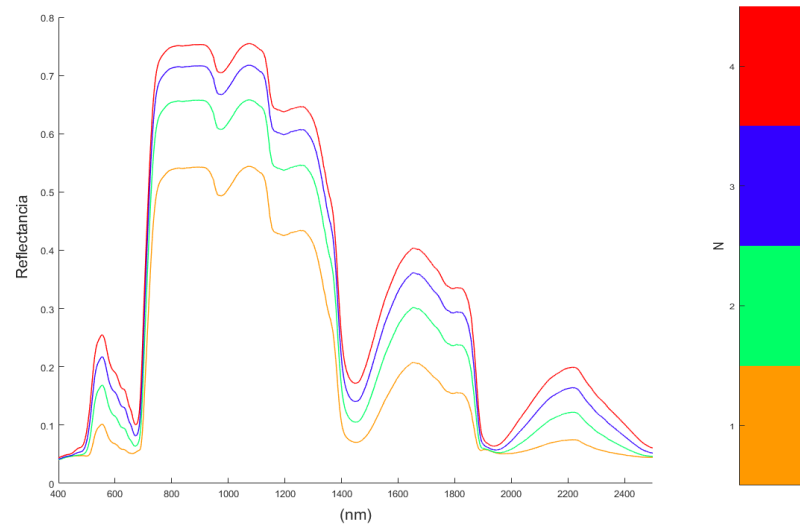
3.1.7 Simulación variando la estructura interna de la hoja N

La simulación x_7 (ver figura 26) se realizó variando la N . Los parámetros de entrada que se utilizaron para el MTR PROSPECT fueron: $N = 1/2/3/4$, $C_{ab} = 30 \mu g cm^{-2}$, $C_w = 0,03$

cm , $C_m=0,012 \text{ g cm}^2$ y para el MTR SAIL fueron: $LAI=3$, $HS=0,01$, $RDD=10$, $C_s=0,8$, $APH=30 \text{ grados}$, $ACS=0 \text{ grados}$, $ACO=0 \text{ grados}$, y $Az=0 \text{ grados}$.

Se muestra que la N es directamente proporcional a la reflectancia, es decir, a mayor N , la reflectancia de la firma espectral aumenta.

Figura 26: Simulación x_7 variando $N=1/2/3/4$



Resumen de resultados de variabilidad por región espectral con medidas simuladas

Después de hacer un análisis detallado de las simulaciones realizadas, se observaron diferentes variaciones. En la tabla 4, se observan los parámetros que se modificaron con su respectivo porcentaje de variabilidad en las regiones espectrales del VIS, NIR y SWIR. Se analizó que cuando se varía el parámetro N , su mayor variabilidad se presenta en el NIR con 61 %, este resultado es concordante con la información que existe en la literatura, puesto que la región espectral donde se presenta la mayor variabilidad se encuentra en el NIR. Además, se observa que la mayor variabilidad inducida por C_{ab} es de 100 % en la región del VIS, estos datos también son afines con la información que se encuentra en la literatura. Por otra parte, la mayor variabilidad del C_w es de 89 % en la región del SWIR, este resultado es semejante al que existe en la literatura [3]. Finalmente, cuando se varió el ACS y el ACO la mayor variabilidad se presentó en el NIR con 60 % y 69 % respectivamente.

Tabla 4: Variabilidad espectral de las simulaciones

Parámetro	Región espectral		
	VIS (400-800 nm)	NIR (800-1300 nm)	SWIR (1300-2500 nm)
Estructura interna de la hoja N	21 %	61 %	18 %
Contenido de clorofila Cab	100 %	0 %	0 %
Contenido de agua Cw	0 %	11 %	89 %
Ángulo cenital solar ACS	19 %	60 %	21 %
Ángulo cenital del observador ACO	17 %	69 %	14 %

3.2. MEDIDAS REALES

Para el estudio de la variabilidad espectral mediante medidas reales se realizaron medidas a dos tipos de plantas, el retamo espinoso y el fique. Las firmas espectrales para el retamo espinoso se adquirieron por medio del sensor VNIR 1600 en tres líneas de vuelo realizadas en el mes de abril del 2017 en el departamento de Cundinamarca, para el fique se adquirieron por medio del espectrómetro *FLAME-S-VNIR-NIR-ES* en el mes de julio del 2017.

En esta sección se adquirieron 1301 firmas espectrales, las cuales 101 firmas se midieron para el retamo y 1200 firmas se midieron para el fique.

3.2.1 Imágenes hiperespectrales aéreas del retamo espinoso medidas 1, 2, 3.

La imagen hiperespectral (ver figura 27) del retamo espinoso fue suministrada por la empresa *Quimbaya Resource Exploration*. Las medidas adquiridas se separaron en tres grupos de plantas, retamo A, B y C (ver tabla 5), para estas muestras se adquirieron 10, 8 y 83 firmas espectrales respectivamente.

En estos experimentos solo se muestran las firmas espectrales del retamo espinoso *A* la cual nos ayuda a visualizar que existe variabilidad espectral en una planta bajo las mismas condiciones de adquisición de la imagen (tiempo, ángulo y altura). Los resultados de la variabilidad del retamo espinoso se muestran en la figura 28.

Figura 27: Imagen hiperespectral del retamo espinoso

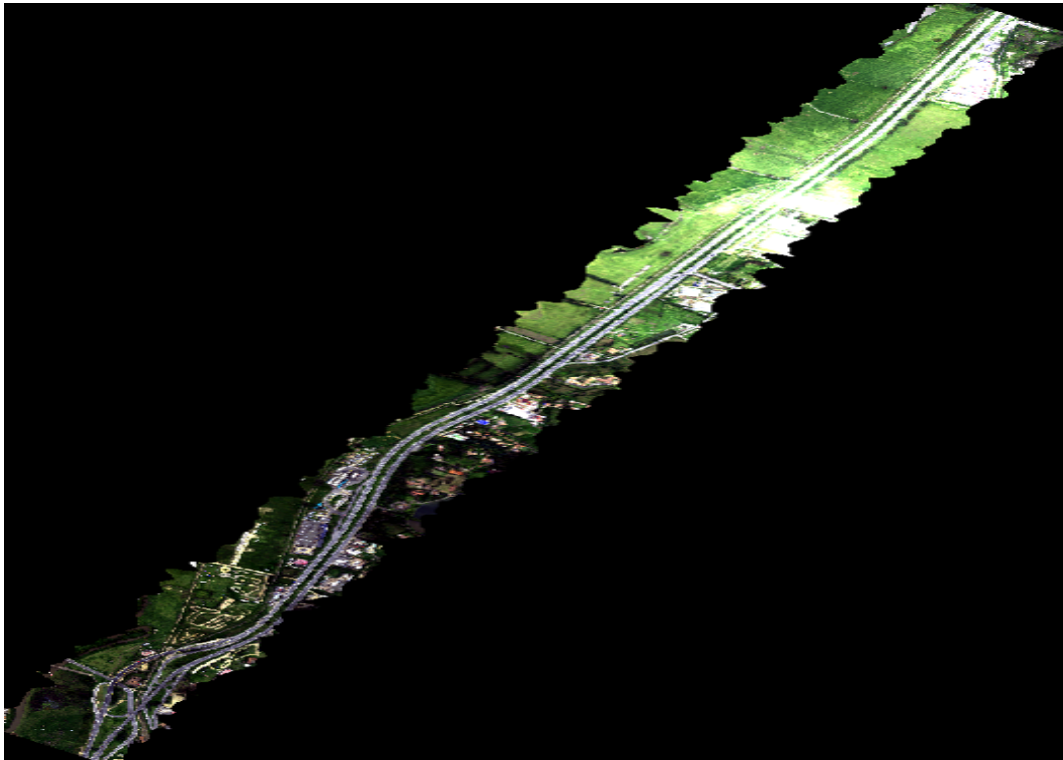
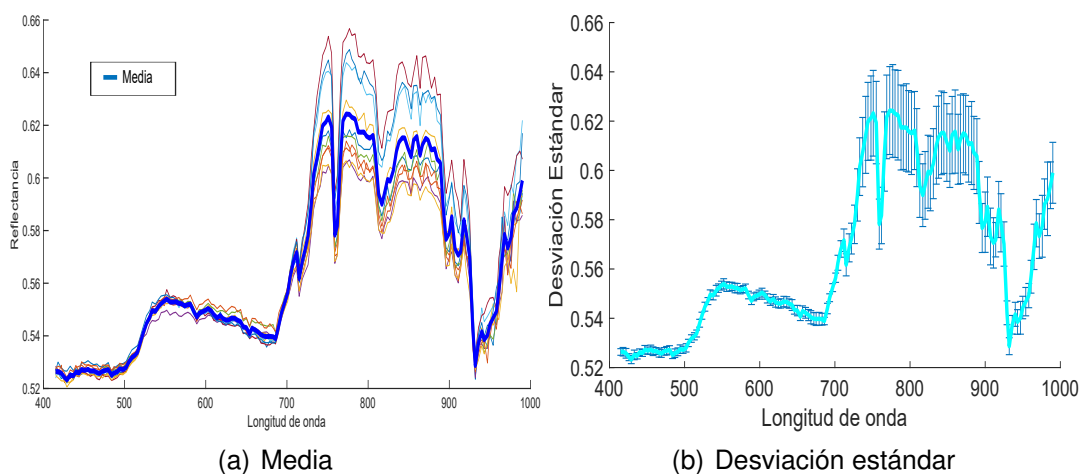


Tabla 5: Retamo Espinoso medidas 1, 2 y 3

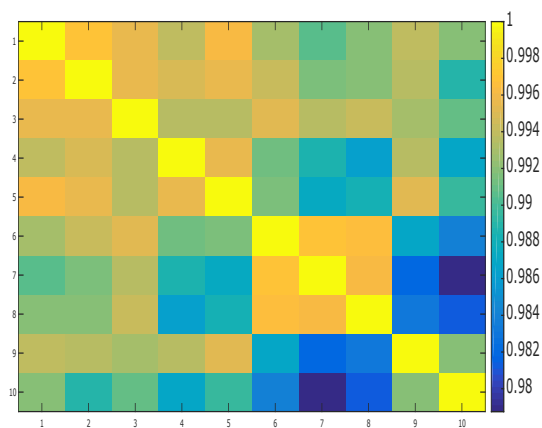
Fecha	Experimento	Planta	No. Firmas espectrales
25 Abril 2017	Exp. 1	Retamo Espinoso A	10
	Exp. 2	Retamo Espinoso B	8
	Exp. 3	Retamo Espinoso C	83
Total			101

Figura 28: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral del retamo espinoso



(a) Media

(b) Desviación estándar



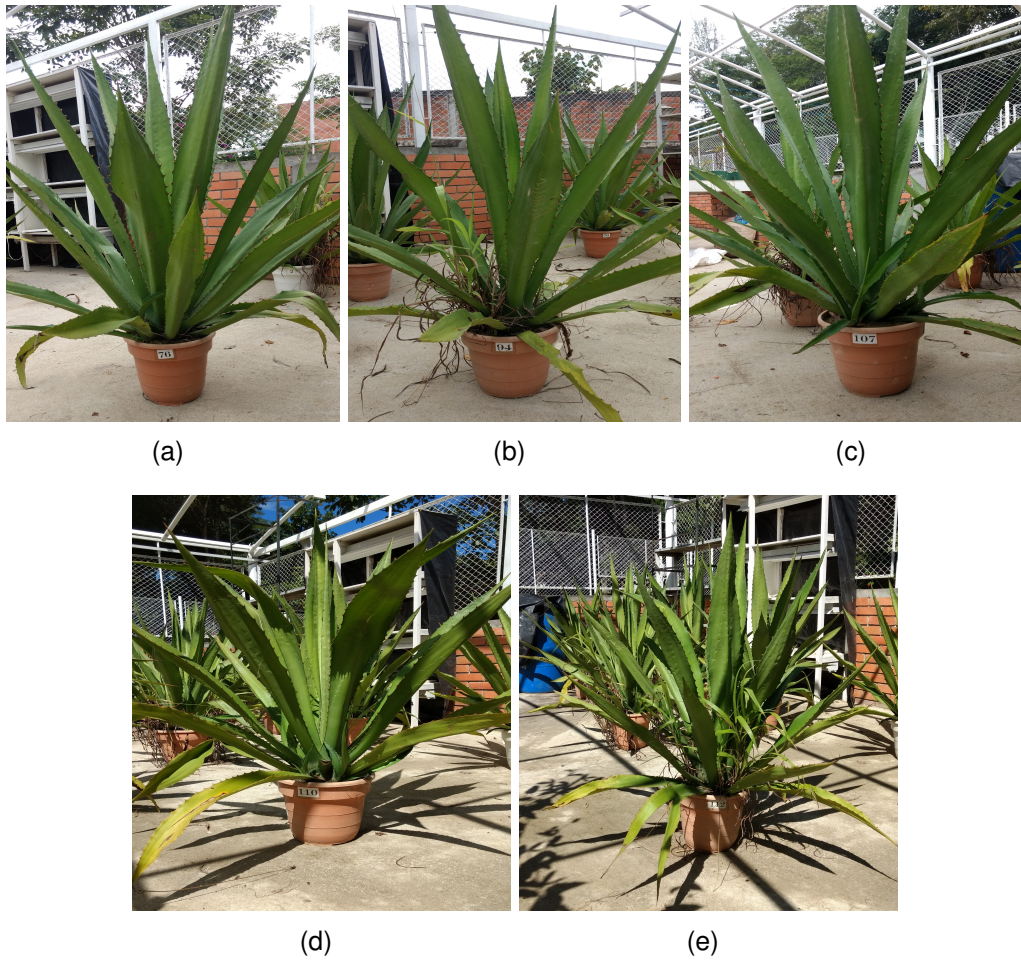
(c) Matriz de correlación

Se observa que las firmas espectrales están altamente correlacionadas, debido a que tienen una diferencia de correlación de 0,0212, en esta medida, el retamo tiene mayor variabilidad espectral en la región del NIR ya que su máximo valor de la desviación estándar es de 0,0188 con una longitud de onda $\lambda=807$. Esta variabilidad es debido a las intensidades del sol dentro de la misma escena como se observa en la figura 27.

3.2.2 Firmas espectrales de Fique medidas 4-16

Por otra parte, en el estudio del fique se realizaron 13 medidas con el fin de observar la variabilidad presente en las firmas espectrales. Estas medidas fueron captadas sobre 5 plantas (ver figuras 29) en el invernadero de la Universidad Industrial de Santander, de las cuales se obtuvieron 1200 firmas espectrales. A continuación se detalla cada medida realizada y los resultados de las mismas. En la sección 3.2.3 *Experimentos realizados con las medidas obtenidas* se desarrollan 3 experimentos para la evaluación de la variabilidad espectral manteniendo algunos parámetros estables y modificando otros.

Figura 29: Plantas (a)76, (b)94, (c)107, (d)110, (e)112

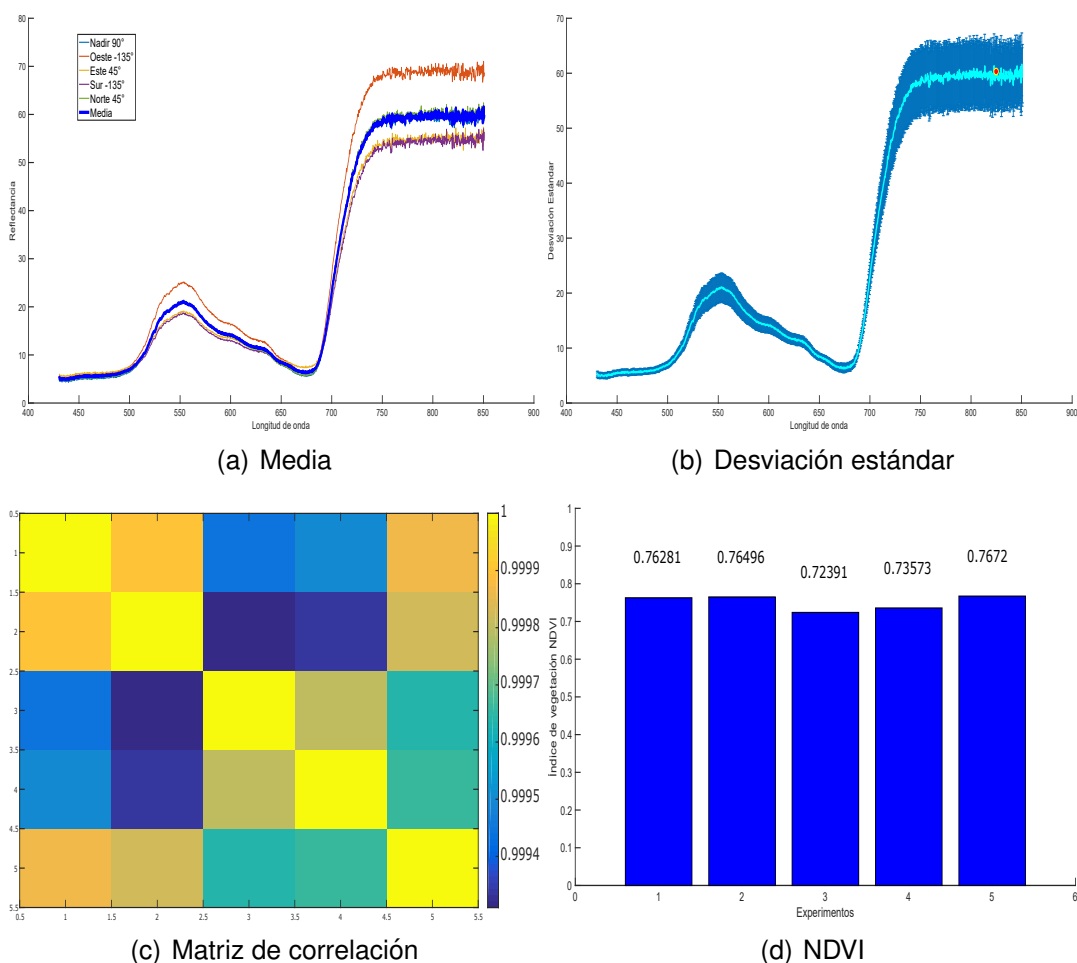


Firmas espectrales de la medida 4 En la medida 4 (ver tabla 6) se obtuvieron las firmas espectrales variando el ángulo cenital del observador ACO en sentido norte= 45° , sur= -135° , este= 45° , oeste= -135° y nadir= 90° , además, el ángulo cenital solar $ACS=90^\circ$, sobre la planta 94.

Tabla 6: Condiciones principales de la medida 4

Fecha	Medidas	Hora	Planta	Nadir 90°	Oeste -135°	Este 45°	Sur -135°	Norte 45°
13 Julio 2017	4	12:00 m.	No. 94	12 Firmas	12 Firmas	12 Firmas	12 Firmas	12 Firmas
Total				60 Firmas espectrales				

Figura 30: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida No. 4



Para esta medida, se adquirieron 60 firmas espectrales, 12 firmas para cada posición del ACO. Para este grupo de firmas espectrales se calculó la desviación estándar (ver figura30b), la cual permite observar la variabilidad en las medidas adquiridas, en la región donde se presentó mayor variabilidad fue en el NIR, específicamente, en la longitud de onda $\lambda=825$ y con una desviación estándar=6,43. Por otra parte, se calculó la matriz de correlación (ver figura30c), la cual nos indica el comportamiento de cada firma, la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la matriz de correlación fue de 0,0006, es decir, las firmas espectrales son altamente correlacionadas, por lo tanto, esto indica una baja presencia de variabilidad. Por último, se calculó el NDVI (ver figura30d), también, muestra que las firmas espectrales tienen baja variabilidad.

Tabla 7: Resumen de resultados medida 4

Desviación Estándar		Correlación	Índice de vegetación NDVI	
Máxima	Longitud de onda λ	Diferencia	Mínimo	Máximo
6.43	825	0.0006	0.72391	0.7672

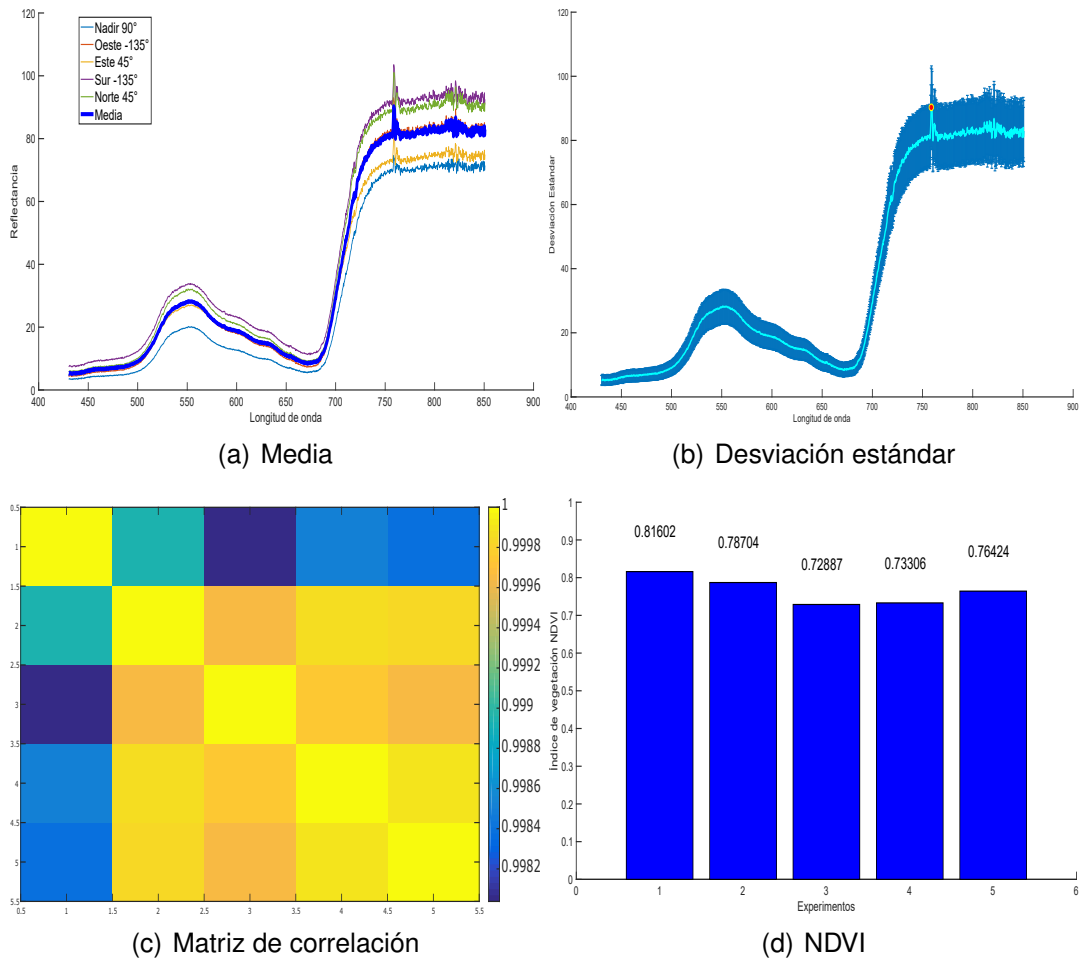
Firmas espectrales de las medidas 5, 6, 7

En las medidas 5, 6, y 7 (ver tabla 8), se muestran los parámetros de entrada que se utilizaron para realizar la toma de datos en las plantas 110, 76, y 107 adquiriendo 180 firmas. En estas medidas se variaron los ángulos del observador ACO en sentido norte= 45° , sur= -135° , este= 45° , oeste= -135° y nadir= 90° , y el ángulo cenital solar $ACS=90^\circ$.

Tabla 8: Condiciones principales de las medidas 5, 6, 7

Fecha	Medidas	Hora	Planta	Nadir 90°	Oeste -135°	Este 45°	Sur -135°	Norte 45°
14 Julio 2017	5	11:40 a. m.	No. 110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas
	6	12:00 m.	No. 76	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas
	7	12:20 p.m	No. 107	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas
Subtotal				36 firmas	36 firmas	36 firmas	36 firmas	36 firmas
Total				180 Firmas espectrales				

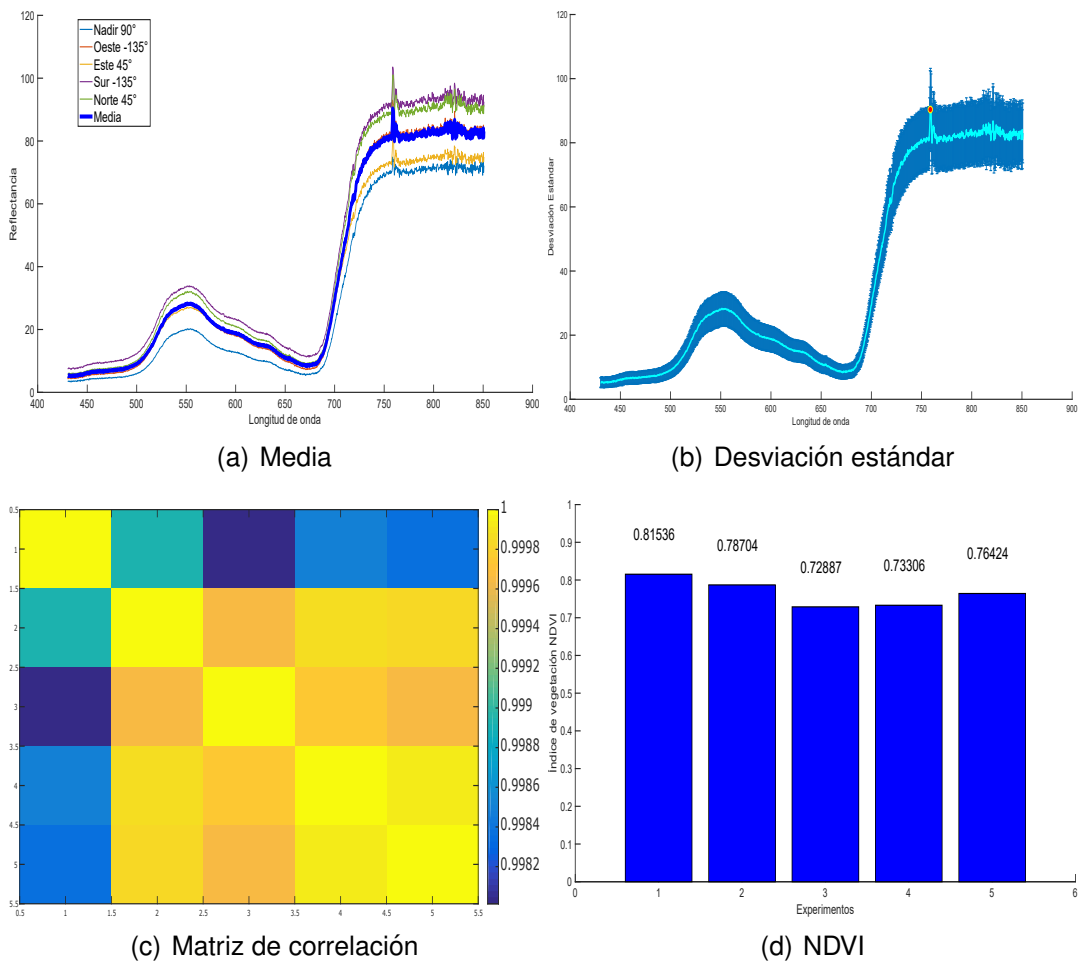
Figura 31: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 5



En la medida 5, se adquirieron 60 firmas espectrales de la planta 110, para esta medida

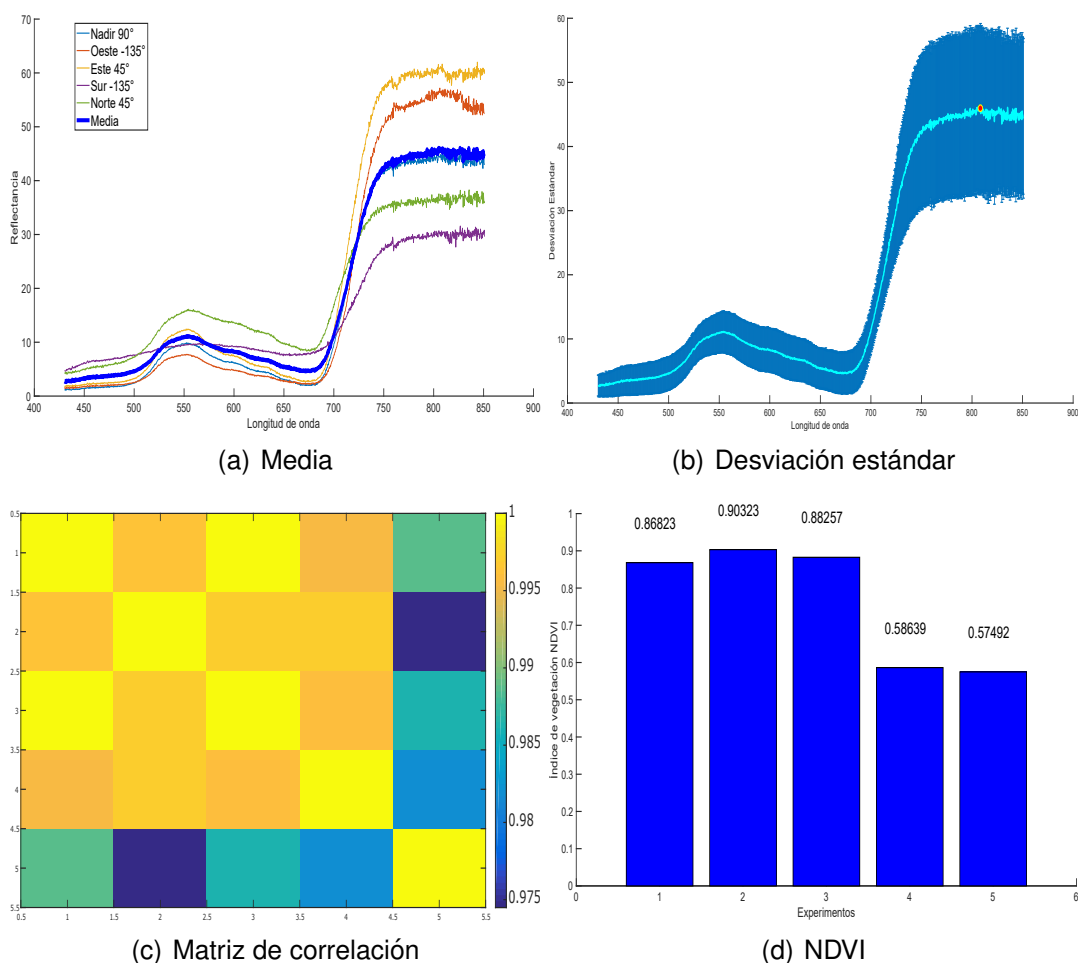
se calculó la media (ver figura 31a); la desviación estándar (ver figura 31b), que muestra donde se presentó la mayor variabilidad espectral, con una desviación estándar de 12,99 en la longitud de onda $\lambda=758$; la matriz de correlación (ver figura 31c), que indica la correlación que existe entre las firmas espectrales, la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo fue de 0,0018, entre menor sea este valor las firmas espectrales son más correlacionadas, además, la matriz de correlación permite establecer que la firma 1 es la que más varía respecto a las otras. Por último se calculó el índice de vegetación NDVI (ver figura 31d), que varía entre 0,72887 y 0,81602.

Figura 32: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 6



En la medida 6, se adquirieron 60 firmas espectrales de la planta 76, para esta medida se calculó la media (ver figura 32a); la desviación estándar (ver figura 32b), que indica que la mayor variabilidad se presentó en la longitud de onda 758 con una desviación estándar de 12,90; la matriz de correlación (ver figura 32c), donde su diferencia de correlación fue de 0,0018, se observa en la matriz de correlación que la firma espectral 1 es la que más varía. Por último, el índice de vegetación NDVI (ver figura 32d), que varía entre 0,72887 y 0,81536.

Figura 33: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 7



En la medida 7, se adquirieron 60 firmas espectrales de la planta 107, para esta medida se calculó la media (ver figura 33a); la desviación estándar (ver figura 33b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar es de 13,24 en la longitud de onda 808; la matriz de correlación (ver figura 33c) donde su diferencia de correlación fue de 0,025, se observa que la firma espectral 5 es la que más varía respecto a las otras. Por último, el índice de vegetación NDVI (ver figura 33d) varía entre 0,57492 y 0,90323.

Tabla 9: Resumen de resultados medidas 5, 6, 7

Desviación Estándar		Correlación	Índice de vegetación NDVI	
Máxima	Longitud de onda λ	Diferencia	Mínimo	Máximo
12.99	758	0.0018	0.72887	0.81602
12.90	758	0.0018	0.72887	0.81536
13.24	808	0.025	0.57492	0.90323

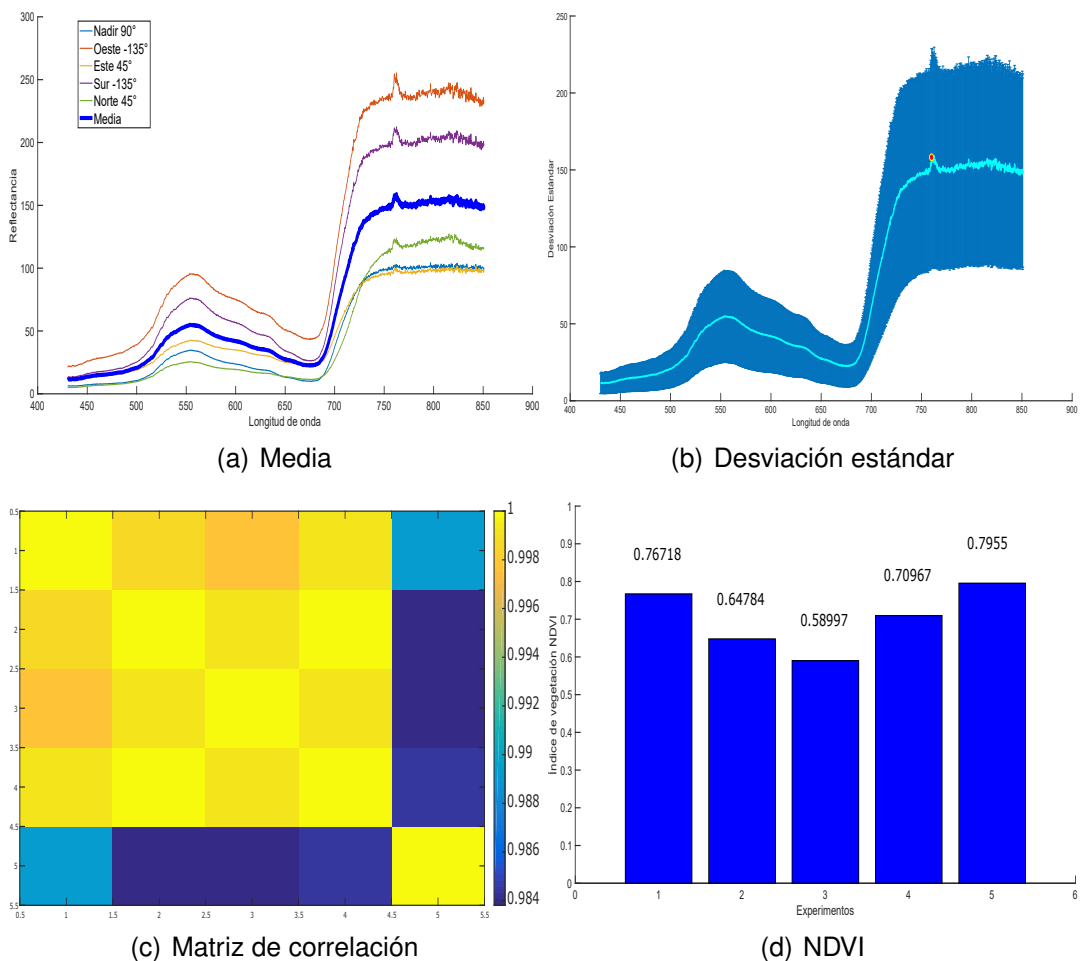
Firmas espectrales de las medidas 8, 9

En la medida 8 y 9 (ver tabla 10) se muestran los parámetros de entrada que se utilizaron para realizar la toma de datos en la planta 112. En estas medidas se variaron los ángulos del observador ACO en sentido norte= 45° , sur= -135° , este= 45° , oeste= -135° y nadir= 90° y el ángulo cenital solar ACS en 90° y 60° .

Tabla 10: Condiciones principales de las medidas 8, 9

Fecha	Medidas	Hora	Planta	Nadir 90°	Norte 45°	Sur -135°	Oeste -135°	Este 45°
19 Julio 2017	8	12 m.	112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas
	9	4 p. m.		12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas
Subtotal				24 firmas	24 firmas	24 firmas	24 firmas	24 firmas
Total				120 Firmas espectrales				

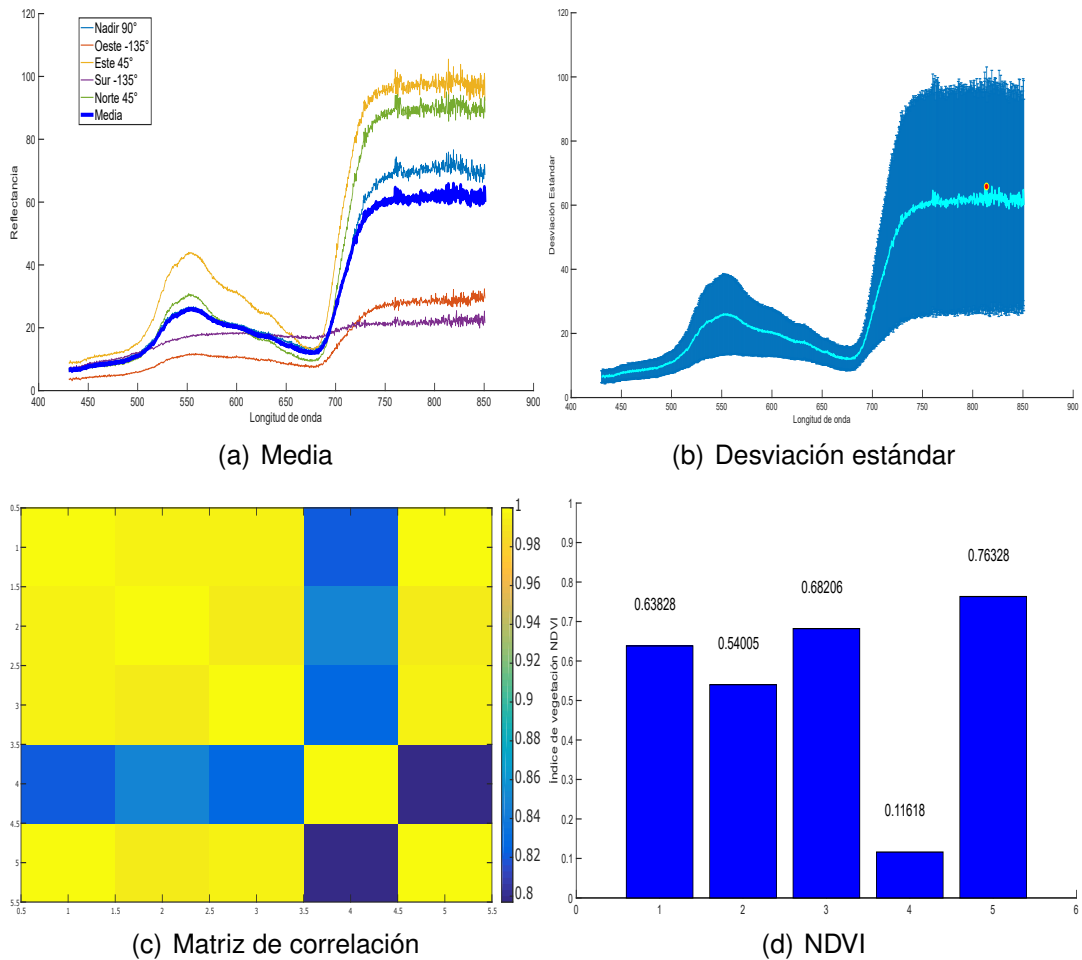
Figura 34: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 8



En la medida 8, las firmas espectrales se adquirieron de la planta 112, en esta muestra se calculó la media (ver figura 34a), la desviación estándar (ver figura 34b), donde

indica que la mayor variabilidad se presentó en la longitud de onda $\lambda=760$ con una desviación estándar de 70,75, la matriz de correlación (ver figura 34c) donde su diferencia de correlación fue de 0,016 y el NDVI (ver figura 32d), que varía entre 0,58997 y 0,7955.

Figura 35: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 9



En la medida 9, las firmas espectrales se adquirieron de la planta 112, para esta medida se calculó la media (ver figura 35a), la desviación estándar (ver figura 35b) de 37,35 en la longitud de onda $\lambda=813$, la matriz de correlación (ver figura 35c), donde su diferencia fue de 0,2 y el NDVI (ver figura 33c) que muestra alta variabilidad en la firma 4, además, el índice de vegetación varía entre 0,11618 y 0,76328.

Finalmente, en las dos medidas se obtuvieron 120 firmas espectrales, es decir, cada medida contiene 60 firmas.

Tabla 11: Resumen de resultados de las medidas 8, 9

Desviación Estándar		Correlación	Índice de vegetación NDVI	
Máxima	Longitud de onda λ	Diferencia	Mínimo	Máximo
70.75	760	0.016	0.58997	0.7955
37.35	813	0.2	0.11618	0.76328

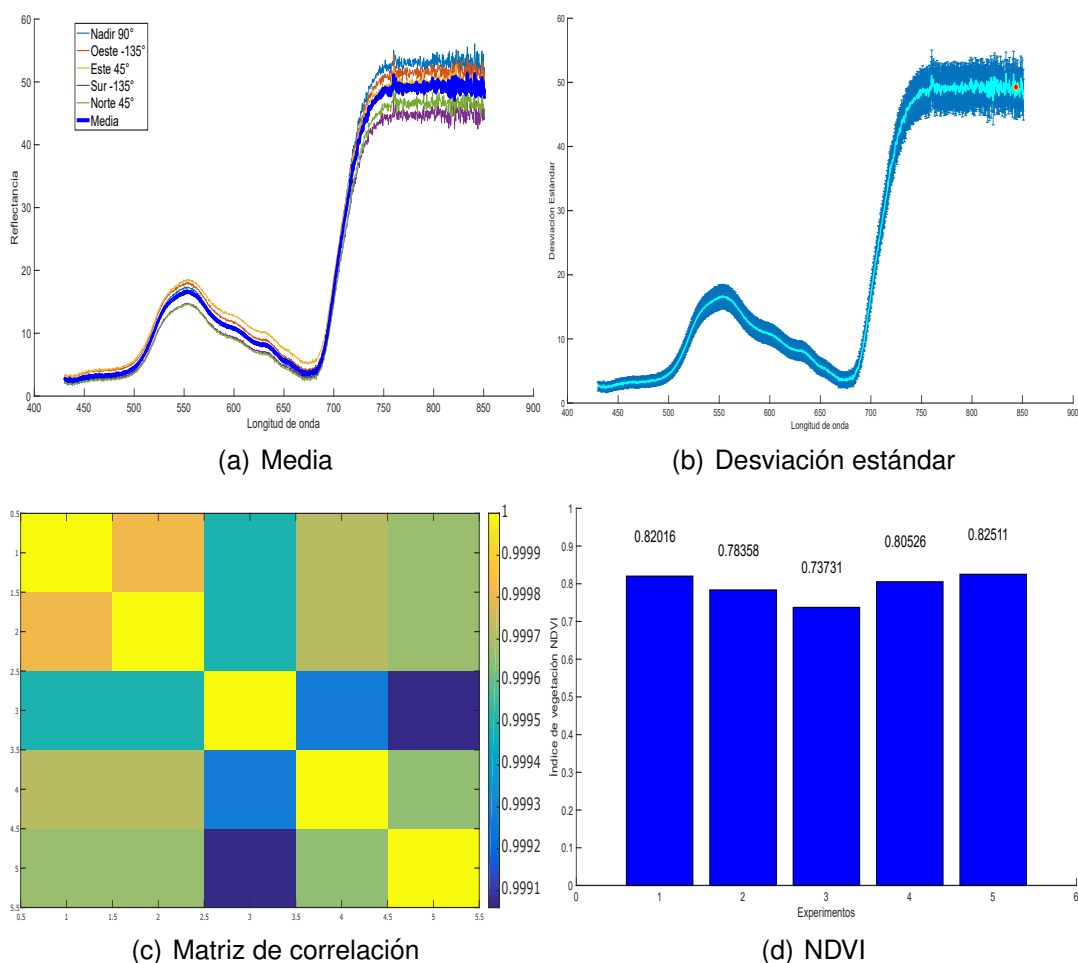
Firmas espectrales de las medidas 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16

En las medidas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 (ver tabla 12) se muestran los parámetros de entrada que se utilizaron para realizar la toma de datos en las plantas 110 y 112. En estas medidas se variaron los ángulos del observador ACO en sentido norte= 45° , sur= -135° , este= 45° , oeste= -135° y nadir= 90° y el ángulo cenital solar ACS en 90° , 75° , 60° y 45° para la mañana y para la tarde. En estas medidas se adquirieron 840 firmas espectrales.

Tabla 12: Condiciones principales de las medidas 10, 11, 12, 13, 15, 16

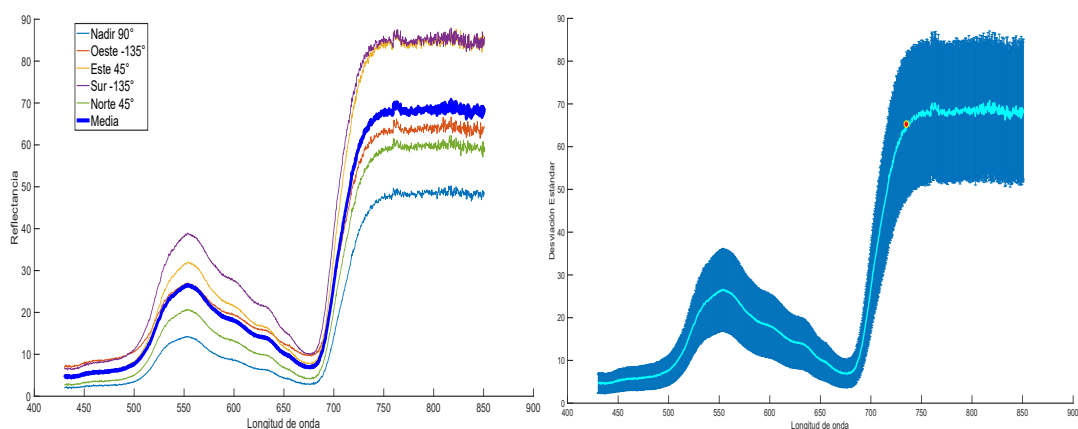
Fecha	Medidas	Hora	Planta	Nadir 90°	Norte 45°	Sur -135°	Oeste -135°	Este 45°	
21 Julio 2017	10	9:00 a. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	11	10:00 a. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	12	11:00 a. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	13	12:00 m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	14	1:00 p. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	15	2:00 p. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	16	3:00 p. m.	110	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
			112	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	12 firmas	
	Subtotal				168 firmas	168 firmas	168 firmas	168 firmas	168 firmas
	Total				840 Firmas espectrales				

Figura 36: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 10 planta 110



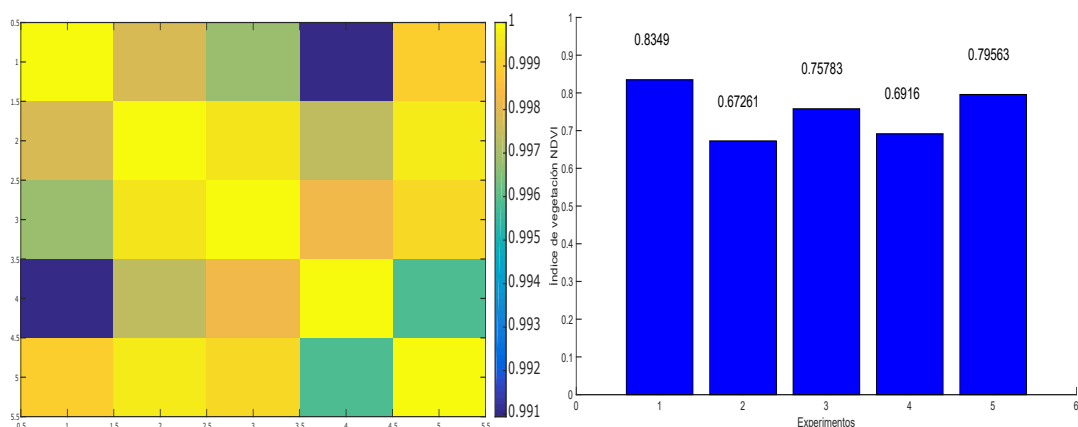
En la medida 10, las firmas espectrales se adquirieron de las plantas 110 y 112, en esta muestra se calculó la media (ver figura 36a), la desviación estándar (ver figura 36b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 4,1656 en la longitud de onda $\lambda=843$, la matriz de correlación (ver figura 36c), en esta gráfica se observa con mayor claridad que la firma 3 varía en mayor proporción frente a las otras firmas, por ello la diferencia fue 0,016 y el NDVI (ver figura 36d), que varía entre 0,73731 y 0,82511.

Figura 37: Gráficas de las firmas espectrales y su variabilidad espectral de la medida 10 planta 112



(a) Media

(b) Desviación estándar

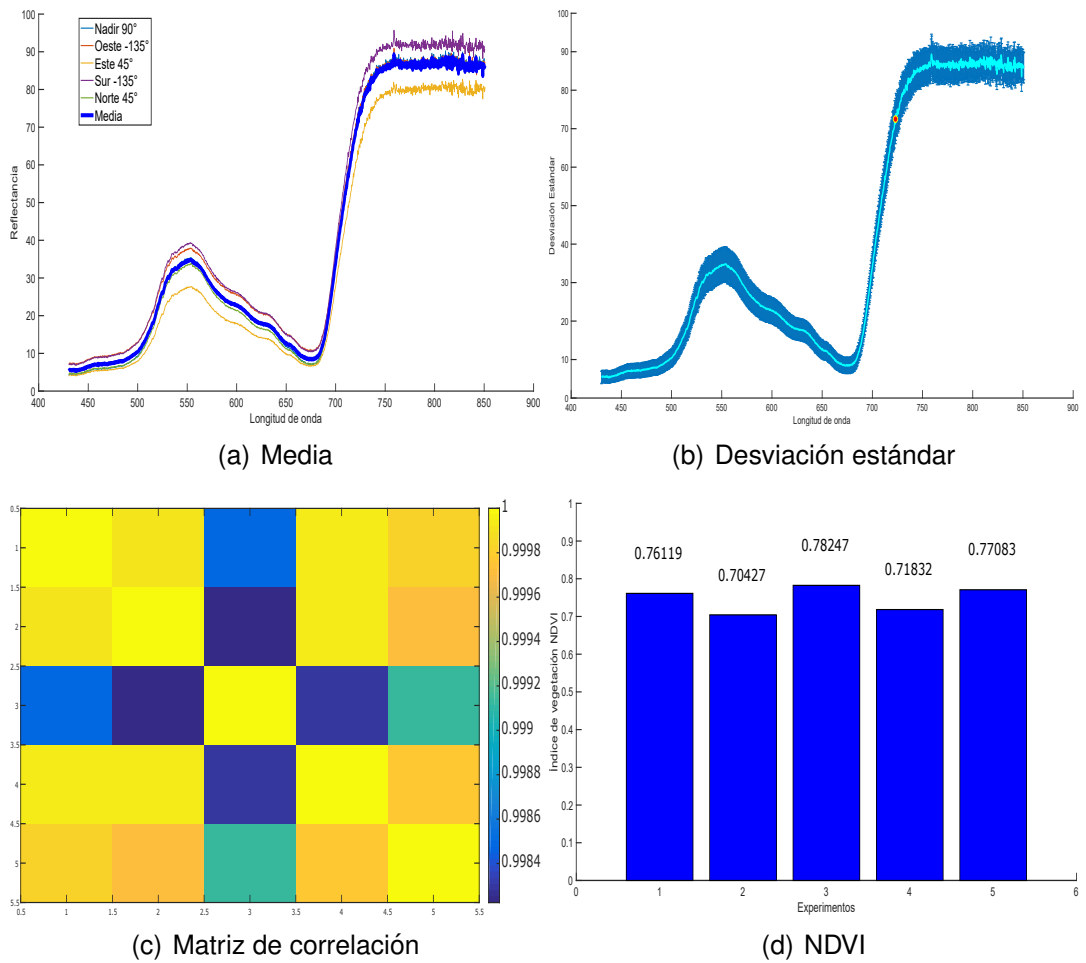


(c) Matriz de correlación

(d) NDVI

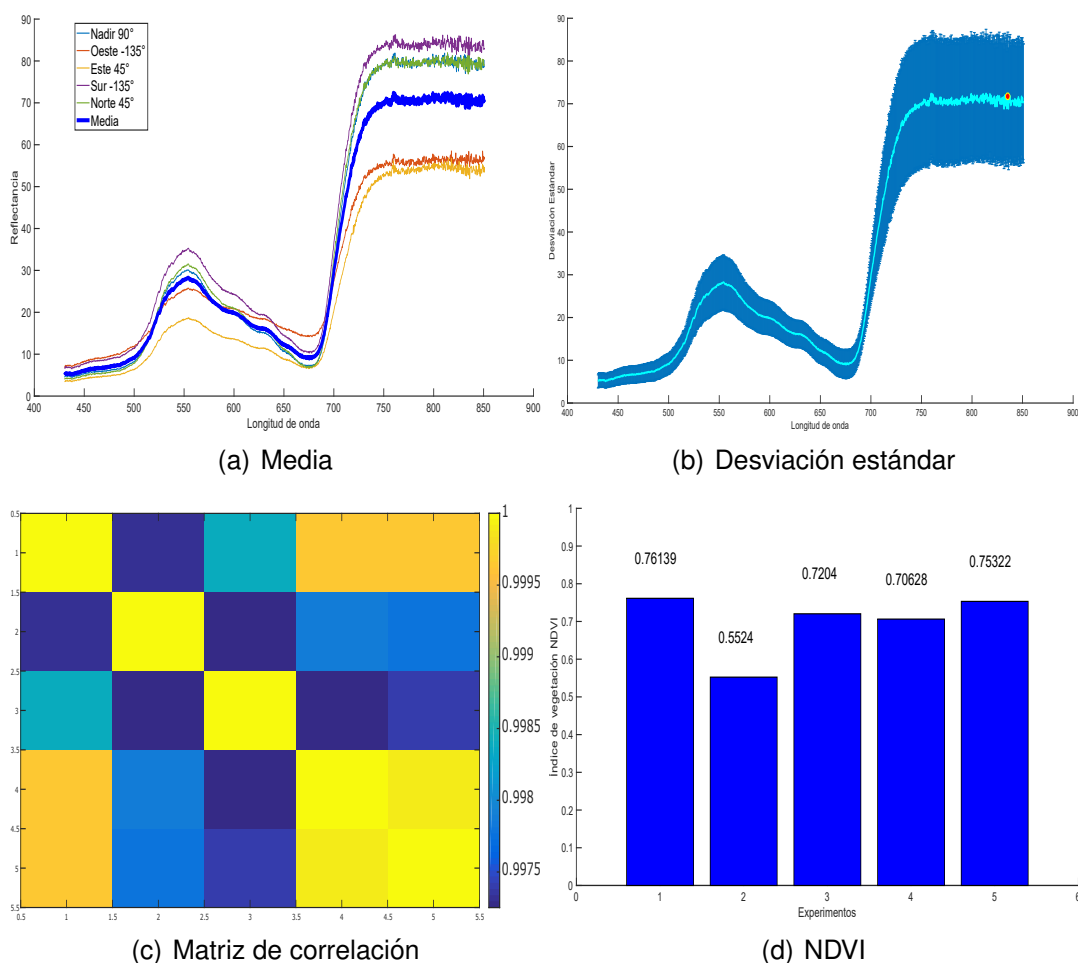
En esta medida se muestra la media (ver figura 37a), la desviación estándar (ver figura 37b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 16,9413 en la longitud de onda $\lambda=735$, la matriz de correlación (ver figura 37c), donde su diferencia fue de 0,0091 y el NDVI (ver figura 37d), que varía entre 0,67261 y 0,8349.

Figura 38: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 13 planta 110



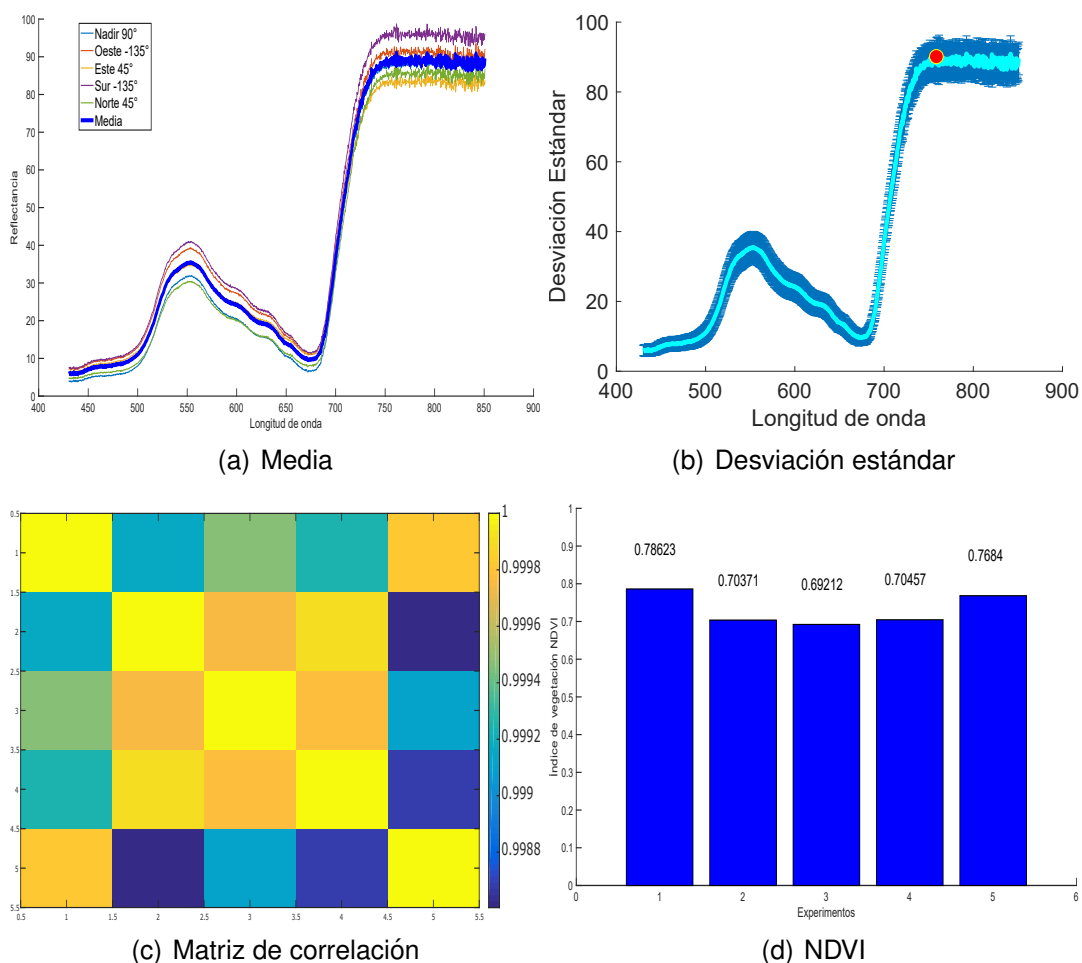
En esta medida se muestra la media (ver figura 38a), la desviación estándar (ver figura 38b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 5,4397 en la longitud de onda $\lambda=723$, la matriz de correlación (ver figura 38c), donde su diferencia fue de 0,018, aquí se observa que la firma 3 presenta mayor variabilidad y el NDVI (ver figura 38d), que varía entre 0,70427 y 0,78247.

Figura 39: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 13 planta 112



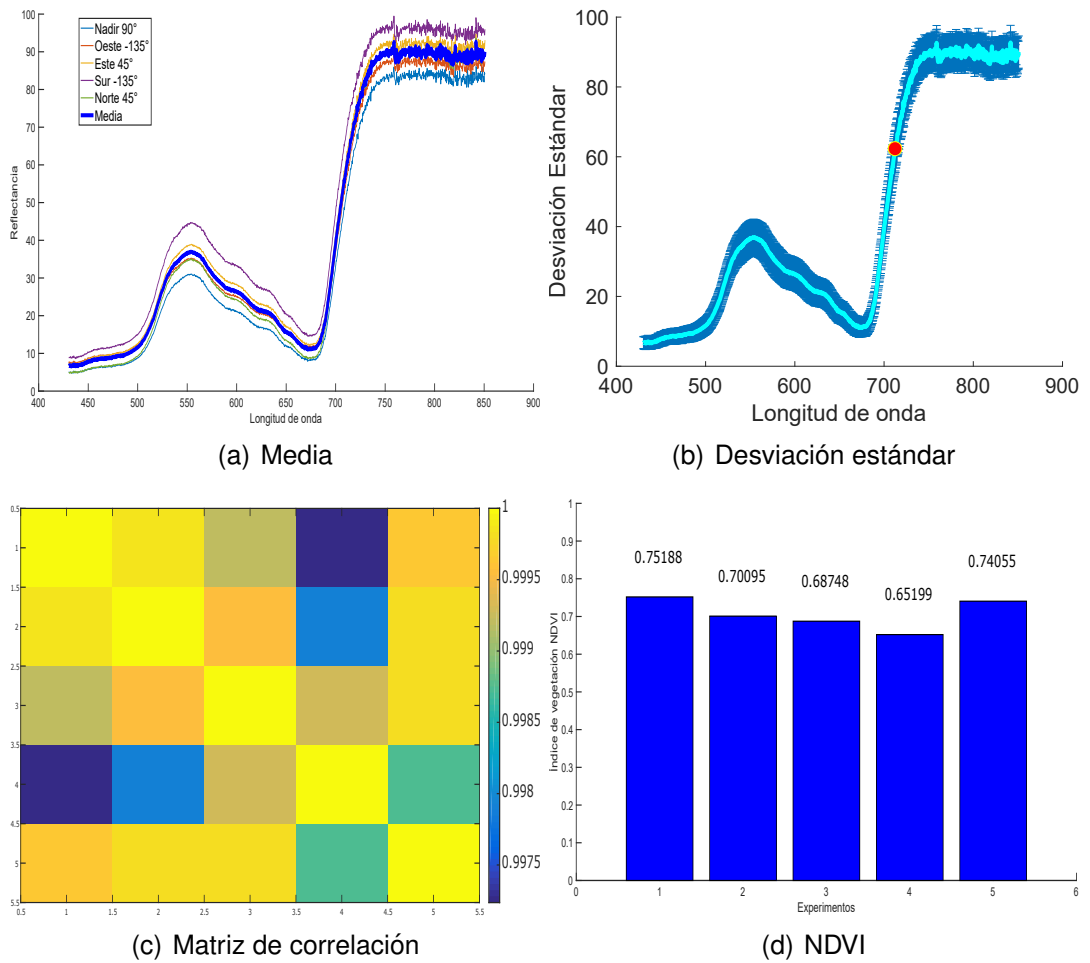
En esta medida se muestra la media (ver figura 39a), la desviación estándar (ver figura 38b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 15,0685 en la longitud de onda $\lambda=835$, la matriz de correlación (ver figura 39c), donde su diferencia fue de 0,0027, en esta gráfica se observa que las firmas 2 y 3 tienen mayor variabilidad, y el NDVI (ver figura 39d), que varía entre 0,5624 y 0,76139, además, se puede observar como la variabilidad espectral que se presentó en la firma 2 afecta la estimación del NDVI.

Figura 40: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 16 planta 110



En esta medida se muestra la media (ver figura 40a), la desviación estándar (ver figura 40b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 5,7861 en la longitud de onda $\lambda=759$, la matriz de correlación (ver figura 40c), donde su diferencia fue de 0,0014 en esta figura se observa que la firma 5 fue la que más varió y el NDVI (ver figura 40d) que varía entre 0,69212 y 0,78623.

Figura 41: Gráficas de las firmas y su variabilidad espectral de la medida 16 planta 112



En esta medida se muestra la media (ver figura 41a), la desviación estándar (ver figura 41b), que indica donde se presentó la mayor variabilidad, la desviación estándar fue de 6,6465 en la longitud de onda $\lambda=712$, la matriz de correlación (ver figura 41c), donde su diferencia fue de 0,0027 en esta gráfica se observa que la firma 4 tiene mayor variabilidad, y el NDVI (ver figura 41d), que varía entre 0,65199 y 0,75188.

Tabla 13: Resumen de resultados de las medidas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

Medidas	Planta	Desviación Estándar		Correlación	Índice de vegetación <i>NDVI</i>	
		Máxima	Longitud de onda λ	Diferencia	Mínimo	Máximo
Medida 10	110	4.1656	843	0.00093	0.7373	0.8251
	112	16.9413	735	0.0091	0.6726	0.8349
Medida 11	110	4.9265	840	0.00094	0.7333	0.8309
	112	29.7210	717	0.0032	0.6299	0.7908
Medida 12	110	7.6838	728	0.0015	0.7068	0.7846
	112	14.7188	759	0.0040	0.6773	0.7674
Medida 13	110	5.4397	723	0.0018	0.7043	0.7825
	112	15.0685	835	0.0027	0.5524	0.7614
Medida 14	110	23.3820	762	0.0048	0.5373	0.7968
	112	7.7780	723	0.0022	0.6829	0.7878
Medida 15	110	3.6791	822	0.0011	0.7014	0.8021
	112	3.1151	554	0.00049	0.6946	0.7678
Medida 16	110	5.7861	759	0.0014	0.6921	0.7862
	112	6.6465	712	0.0028	0.6520	0.7519

3.2.3 Experimentos realizados con las medidas obtenidas de manera independiente

Después de realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las medidas obtenidas se realizaron tres experimentos, en el experimento 1 se mantuvo la planta (110), se varió el ángulo cenital solar *ACS* y el ángulo cenital del observador *ACO*; en el experimento 2 se mantuvo la planta (112), se mantuvo el ángulo cenital solar *ACS* y se varió el ángulo cenital del observador *ACO*, estas medidas fueron realizadas en dos hojas diferentes de la planta; en el experimento 3 las medidas fueron seleccionadas con plantas diferentes (94, 110, 76, 107, y 112), se mantuvo el ángulo cenital solar *ACS* y se varió el ángulo cenital del observador *ACO*.

Experimento 1 En este experimento (ver tabla 14) se realizó una clasificación de las medidas con la misma escena (planta 110), con diferentes ángulos del observador *ACO*, nadir=90 *grados*, oeste=-135 *grados*, este=45 *grados*, sur=-135 *grados* y norte=45 *grados*, y con diferentes ángulos solares *ACS*, 45 *grados* (9:00 a. m.), 60 *grados* (10:00 a. m.), 75 *grados* (11:00 a. m.), 90 *grados* (12:00 m.), 75 *grados* (1:00 p. m.), 60 *grados* (2:00 p. m.) y 45 *grados* (3:00 p. m.).

Tabla 14: Resultados experimento 1

Medidas	Planta	Ángulo cenital solar ACS	Ángulo cenital del observador ACO					Promedio
			Nadir 90°	Oeste -135°	Este 45°	Sur -135°	Norte 45°	
Medida 10	110	9 a. m. = 45°	5.0565	2.4146	2.1171	7.1815	3.7066	4.0952
Medida 11		10 a. m. = 60°	9.7840	0.4697	2.7060	5.5784	0.7977	3.8671
Medida 12		11 a. m. = 75°	23.1787	24.7712	40.5713	5.7530	1.6140	19.1776
Medida 13		12 m. = 90°	0.7550	4.7307	29.3519	15.8393	1.0364	10.3426
Medida 14		1 p. m. = 75°	268.3949	65.4046	319.1765	82.0841	17.6633	150.5446
Medida 15		2 p. m. = 60°	6.2945	0.7183	4.7405	12.9450	1.8497	5.3096
Medida 16		3 p. m. = 45°	7.0060	6.4130	10.2189	26.3788	12.0828	12.4199
Promedio			8.6791	6.5862	14.9509	12.2793	3.5145	

Se observa que a las 9:00 a. m. con un $ACS=45$ grados la mayor variabilidad estuvo presente cuando se realizaron las medidas en la posición del sensor en sentido sur, para las 10:00 a. m. con un $ACS=60$ grados su mayor variabilidad ocurre en la posición del sensor en sentido del nadir, para las 11:00 a. m. y 12:00 m. con un $ACS=75$ grados y con un $ACS=90$ grados respectivamente, la mayor variabilidad ocurrió en la posición del sensor en sentido del este, para la 1:00 p. m. con un $ACS=75$ grados su mayor variabilidad fue en la posición del sensor en sentido del nadir y para las 2:00 p. m. $ACS=60$ grados y 3:00 p. m. $ACS=45$ grados, su mayor variabilidad ocurrió en la posición del sensor en sentido sur.

Además, se evidencia que la medida de la 1:00 p. m. presento valores atípicos, por lo tanto en este análisis no se tiene en cuenta. Se evidencia que a la hora 10:00 a. m. y la posición del observador en sentido norte con un ángulo de 45 grados, son las variables óptimas para tomar medidas, debido a que la variabilidad en estas condiciones es menor.

Experimento 2 En este experimento (ver tabla 15) se escogió la medida con la misma escena (planta 112), con diferentes ángulos del observador ACO y con dos hojas de la misma planta, esto con el fin de evaluar que tanto varía la respuesta espectral de las hojas en una misma planta.

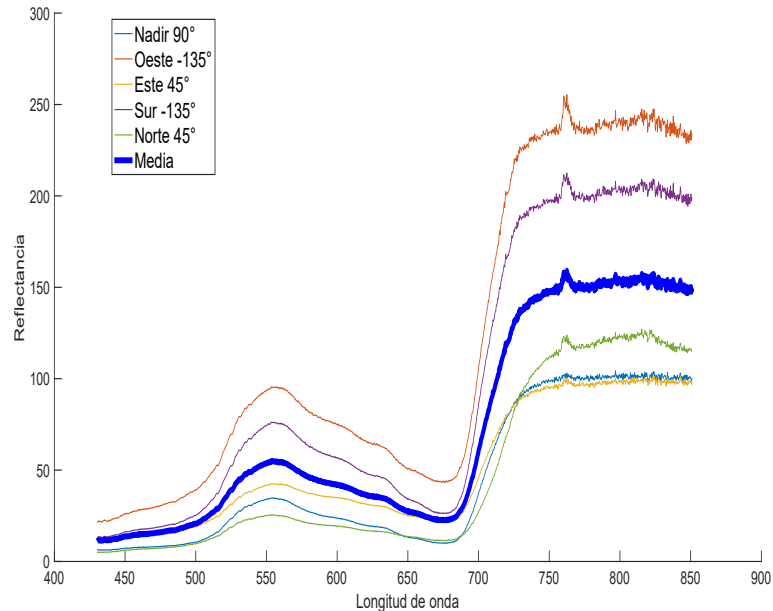
Tabla 15: Resultados experimento 2

Medidas	Planta	Ángulo cenital solar ACS	Hoja	Ángulo cenital del observador ACO				
				Nadir 90°	Oeste -135°	Este 45°	Sur -135°	Norte 45°
Medida 8	112	12 m. = 90°	1	1012.1	3181.9	980.79	988.27	711.15
			2	1.1391	4.4299	2.5884	15.5741	3.4682

En este experimento, a pesar de que las medidas se realizaron con hojas de la misma planta los resultados varían en gran porcentaje, esto sucedió debido a que en el momento en que se tomaron las medidas de la hoja 1, la intensidad del sol varió significativamente, este suceso se puede observar en la gráfica (42), de cómo el comportamiento de la intensidad de la señal decrecía.

Gracias a este resultado se evidencia que una de las variables principales que afectan la variabilidad espectral es el ángulo cenital solar ACS

Figura 42: Variación de la intensidad solar en la medida 8



Experimento 3 En este experimento (ver tabla 16) se hizo una clasificación de las medidas obtenidas, se escogió la medida con diferentes escenas (planta 94, 110, 76, 107, y la 112), con el ángulo solar ACS en 90° y con los ángulos del observador ACO , nadir= 90 grados, oeste= -135 grados, este= 45 grados, sur= -135 grados y norte= 45 grados.

Tabla 16: Resultados experimento 3

Medidas	Planta	Ángulo cenital solar ACS	Ángulo cenital del observador ACO					Promedio
			Nadir 90°	Oeste -135°	Este 45°	Sur -135°	Norte 45°	
Medida 4	94	12 m. = 90°	0.1638	33.0871	7.8204	10.2828	0.2432	10.3194
Medida 5	110		67.7941	0.7461	21.7280	49.9318	26.6881	33.3776
Medida 6	76		65.8857	0.7259	22.0087	49.5096	26.3728	32.9005
Medida 7	107		3.0369	31.8712	71.1313	75.3792	31.1627	42.5162
Medida 13	112		27.8008	74.5620	119.38	72.6126	29.7725	64.8255
Promedio			32.9362	28.1984	48.4136	51.5432	22.8478	

A partir de estos resultados se observa que las características de las plantas (estructura interna, la cantidad de clorofila, el contenido de agua y contenido de materia seca) también afectan en un alto porcentaje la variabilidad espectral.

En este experimento se puede observar que al realizar las medidas con un ángulo cenital del observador $ACO=45$ grados al norte y un $ACS=90$ grados, existe menos variabilidad espectral respecto a los otros ángulos.

3.3. COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS SIMULADAS CON LAS REALES

Para el proceso de comparar datos simulados con los datos reales, se pudo evidenciar que la variabilidad espectral es alterada por los cambios biofísicos presentes en la planta (contenido de clorofila, contenido de humedad, materia seca y estructura interna de la hoja), este comportamiento se dio en las medidas simuladas y en las medidas reales, para el caso de las medidas simuladas se cambiaron los parámetros de entrada (contenido de clorofila, contenido de humedad y estructura interna de la hoja) y para el caso de las medidas reales se tomaron diferentes plantas las cuales tenían diferentes características, al comparar las medidas simuladas con las reales se observó que siempre que se alteraban los parámetros al nivel de la planta (contenido clorofila) la región que presentaba más variabilidad era la del VIS y cuando se alteraba el contenido de agua la región que más se alteraba era la del NIR y SWIR.

4. CONCLUSIONES

- Finalmente, es posible realizar estudios de variabilidad espectral en la vegetación mediante simuladores de modelos de transferencia radiativa, debido a que este tipo de simulador permite modelar y manipular los principales parámetros que se tienen presentes al adquirir la información espectral de la vegetación. Adicionalmente se observó la robustez de los simuladores actualmente desarrollados por laboratorios e instituciones científicas aeroespaciales, como la NASA, agencia espacial de EEUU, la agencia espacial europea ESA, el programa espacial EnMap, estas instituciones utilizan simuladores similares para diseñar y desarrollar sensores hiperspectrales que serán puestos en órbita en futuras misiones espaciales.
- En conclusión, los parámetros que más inciden en la variabilidad espectral en la vegetación son: la estructura interna de la hoja en la región espectral del infrarrojo cercano NIR, el contenido de clorofila en la región espectral visible VIS y el contenido de agua en la región del infrarrojo cercano NIR y ondas cortas de infrarrojo SWIR.
- Por último, se evidencia que la posición del ángulo cenital solar, la posición del ángulo cenital del observador y los niveles de intensidad solar afectan directamente los resultados de las medidas, por lo tanto se recomienda a partir de este estudio realizar todas las medidas en una misma hora, en un mismo ángulo del observador y preferiblemente con la misma intensidad solar a la hora de calibrar el sistema.

Referencias

- [1] Dimitris Manolakis, David Marden, and Gary A Shaw. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Lincoln laboratory journal*, 14(1):79–116, 2003.
- [2] Ariolfo Camacho Velasco, César Augusto Vargas García, Fernando Antonio Rojas Morales, Sergio Fernando Castillo Castelblanco, and Henry Arguello Fuentes. Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Facultad de Ingeniería*, 24(40):17–29, 2015.
- [3] Stéphane Jacquemoud, Wout Verhoef, Frédéric Baret, Cédric Bacour, Pablo J Zarco-Tejada, Gregory P Asner, Christophe François, and Susan L Ustin. Prospect+ sail models: A review of use for vegetation characterization. *Remote sensing of environment*, 113:S56–S66, 2009.
- [4] S Jacquemoud and F Baret. Prospect: A model of leaf optical properties spectra. *Remote sensing of environment*, 34(2):75–91, 1990.
- [5] Jan GPW Clevers and Lammert Kooistra. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2):574–583, 2012.
- [6] Andrés Fernando Jiménez-López, Fabián Rolando Jiménez-López, and Mariana Jiménez-López. Multispectral analysis of vegetation for remote sensing applications. *Iteckne*, 12(2):156–167, 2015.
- [7] Ariolfo Camacho Velasco. Identificación e implementación de algoritmos de detección de patrones en imágenes hiperespectrales adquiridas por sensores remotos, aplicadas al sector de la agricultura colombiana, 2015.
- [8] Juan Pablo Rivera, Luis Gonzalo Saldarriaga, Jochem Verrelst, Jesús Delegido, and José Moreno. Evaluación de métodos de análisis de sensibilidad global aplicados a modelos de transferencia radiativa para cubiertas vegetales. *UD y la GEOMÁTICA*, (9), 2014.
- [9] Theres Kuester, Daniel Spengler, Jean-Francois Barczy, Karl Segl, Patrick Hostert, and Hermann Kaufmann. Simulation of multitemporal and hyperspectral vegetation canopy bidirectional reflectance using detailed virtual 3-d canopy models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4):2096–2108, 2014.
- [10] Roshanak Darvishzadeh, Andrew Skidmore, Martin Schlerf, and Clement Atzberger. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation lai and chlorophyll in a heterogeneous grassland. *Remote Sensing of Environment*, 112(5):2592–2604, 2008.
- [11] Wout Verhoef and Heike Bach. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 87(1):23–41, 2003.

-
- [12] Driss Haboudane, John R Miller, Elizabeth Pattey, Pablo J Zarco-Tejada, and Ian B Strachan. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green lai of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 90(3):337–352, 2004.
- [13] Marta Yebra, E Chuvieco, and I Aguado. Comparación entre modelos empíricos y de transferencia radiativa para estimar contenido de humedad en pastizales: Poder de generalización. *Revista de teledetección*, 29:73–90, 2008.
- [14] Wouter Verhoef. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the sail model. *Remote sensing of environment*, 16(2):125–141, 1984.
- [15] Marta Yebra and Emelio Chuvieco. Modelos de simulación de reflectividad en ecología: potencialidades y problemas. *Revista Ecosistemas*, 17(3), 2008.
- [16] KF Huemmrich. The geosail model: a simple addition to the sail model to describe discontinuous canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 75(3):423–431, 2001.
- [17] W Verhoef, L Jia, and Z Su. Optical-thermal canopy radiance directionality modelling by unified 4sail model. 2007.
- [18] Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Tiangang Yin, Nicolas Lauret, Thomas Cajgfinger, Tristan Gregoire, Eloi Grau, Jean-Baptiste Feret, Maïlys Lopes, Jordan Guilleux, Gérard Dedieu, et al. Discrete anisotropic radiative transfer (dart 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and lidar acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sensing*, 7(2):1667, 2015.
- [19] F Gascon, J-P Gastellu-Etchegorry, M-J Lefevre-Fonollosa, and E Dufrene. Retrieval of forest biophysical variables by inverting a 3-d radiative transfer model and using high and very high resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24):5601–5616, 2004.
- [20] Sylvie Durrieu, Selma Cherchali, Josiane Costeraste, Linda Mondin, Henri Debise, Patrick Chazette, Jean Dausat, J-P Gastellu-Etchegorry, Nicolas Baghdadi, and Raphaël Pélissier. Preliminary studies for a vegetation ladar/lidar space mission in france. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pages 4332–4335. IEEE, 2013.
- [21] V Bruniquel-Pinel and JP Gastellu-Etchegorry. Sensitivity of texture of high resolution images of forest to biophysical and acquisition parameters. *Remote Sensing of Environment*, 65(1):61–85, 1998.
- [22] JP Gastellu-Etchegorry, P Guillevic, F Zagolski, V Demarez, V Trichon, D Deering, and M Leroy. Modeling brf and radiation regime of boreal and tropical forests: I. brf. *Remote Sensing of Environment*, 68(3):281–316, 1999.
- [23] P Guillevic and JP Gastellu-Etchegorry. Modeling brf and radiation regime of boreal and tropical forest: II. par regime. *Remote Sensing of Environment*, 68(3):317–340, 1999.

-
- [24] Zbyněk Malenovský, Emmanuel Martin, Lucie Homolová, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Raúl Zurita-Milla, Michael E Schaeppman, Radek Pokorný, Jan GPW Clevers, and Pavel Cudlín. Influence of woody elements of a norway spruce canopy on nadir reflectance simulated by the dart model at very high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112(1):1–18, 2008.
- [25] Zbyněk Malenovský, Lucie Homolová, Raúl Zurita-Milla, Petr Lukeš, Věroslav Kaplan, Jan Hanuš, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, and Michael E Schaeppman. Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment*, 131:85–102, 2013.
- [26] Karl Segl, Theres Küster, Christian Rogaß, Hermann Kaufmann, Bernhard Sang, Valery Mogulsky, and Stefan Hofer. Eetes: An end-to-end image simulation tool applied to the enmap hyperspectral mission. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pages 5025–5028. IEEE, 2012.
- [27] P Lewis and JP Muller. The advanced radiometric ray tracer: Ararat for plant canopy reflectance simulation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29:26–26, 1993.
- [28] JP Muller and M Dalton. Application of ray-tracing to satellite image understanding. IEEE, 1988.
- [29] Fraser Gemmell and Adrian J McDonald. View zenith angle effects on the forest information content of three spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 72(2):139–158, 2000.
- [30] Brian A Keating, Peter S Carberry, Graeme L Hammer, Mervyn E Probert, Michael J Robertson, D Holzworth, Neil I Huth, John NG Hargreaves, Holger Meinke, Zvi Hochman, et al. An overview of apsim, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, 18(3):267–288, 2003.
- [31] Theres Kuester, Daniel Spengler, Jean-Francois Barczi, Karl Segl, Patrick Hostert, and Hermann Kaufmann. Simulation of multitemporal and hyperspectral vegetation canopy bidirectional reflectance using detailed virtual 3-d canopy models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4):2096–2108, 2014.
- [32] J. P Rivera J. Verrelst. *Manual ARTMO 3.21.4*, 2017.
- [33] M Amparo Gilabert, José González-Piqueras, and J García-Haro. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10), 1997.

BIBLIOGRAFÍA

CAMACHO, Ariolfo, et al. Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. Facultad de Ingeniería, 24(40):17–29, 2015.

CLEVERS, Jan, et al. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(2):574–583, 2012.

DARVISHZADEH, Roshanak et al. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation lai and chlorophyll in a heterogeneous grassland. Remote Sensing of Environment, 112(5):2592–2604, 2008.

HABOUDANE, Driss et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green lai of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote sensing of environment, 90(3):337–352, 2004.

JACQUEMOUD, Stéphane, et al. Prospect + sail models: A review of use for vegetation characterization. Remote sensing of environment, 113:S56–S66, 2009.

KUESTER, Theres, et al. Simulation of multitemporal and hyperspectral vegetation canopy bidirectional reflectance using detailed virtual 3-d canopy models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(4):2096–2108, 2014.

RIVERA, Juan, et al. Evaluación de métodos de análisis de sensibilidad global aplicados a modelos de transferencia radiativa para cubiertas vegetales. UD y la GEOMÁTICA, (9), 2014.

YEBRA Marta, et al. Comparación entre modelos empíricos y de transferencia radiativa para estimar contenido de humedad en pastizales: Poder de generalización. Revista de teledetección, 29:73–90, 2008.