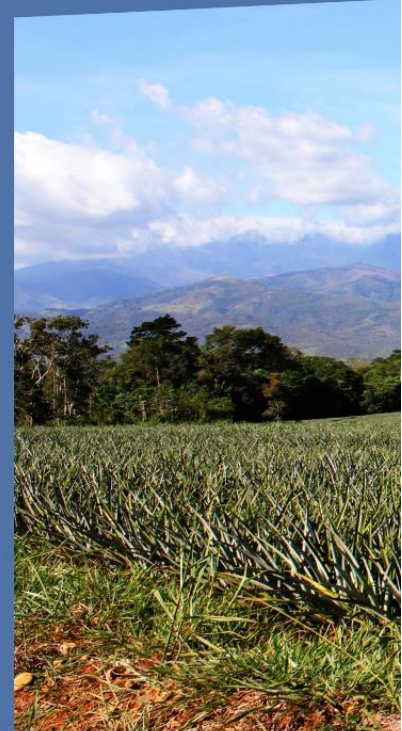




INFORME FINAL DE PROYECTO 2016

**DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL
PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA
A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA**

**LÍNEA BASE PARA LA PRESENCIA DE CULTIVOS DE PIÑA
EN PAISAJES PRODUCTIVOS DE COSTA RICA 2015**



Desarrollo de una firma espectral para la identificación de cultivos de piña a través de sensores remotos e in situ en Costa Rica.

Consejo Nacional de Rectores

Centro Nacional de Alta Tecnología

Laboratorio PRIAS

Citación: Aguilar-Arias, H., Carranza-Solano, M., Foster-Burr, L., Ortega-Rivera, M. (2016). *Desarrollo de una firma espectral para la identificación de cultivos de piña a través de sensores remotos e in situ en Costa Rica*. (Informe II-Final de Proyecto). San José: PRIAS-CeNAT.

Director de Laboratorio: Cornelia Miller Granados

Investigador Principal: Heileen Aguilar Arias


Revisión: Allan Campos Gallo, Cornelia Miller Granados

Equipo encargado de toma y procesamiento de datos: Heileen Aguilar Arias, Meybell Carranza Solano, Lloyd Foster Burr, Marilyn Ortega Rivera

Colaboración en campo: Andrés Barahona Contreras, Daniel Flores Cordero, Christian Vargas Bolaños

Diseño de portada: Daniel Flores Cordero

Fotografías de portada: Meybell Carranza Solano

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 2 de 101

RESUMEN

La especie *Ananas comosus*, popularmente conocida como piña, pertenece a la familia de las bromeliáceas y es originaria de América del Sur, específicamente de Brasil, norte de Paraguay y Argentina. En Costa Rica el cultivo de piña ocupa grandes extensiones del territorio y es uno de los productos más exportados a nivel internacional, posicionándose como primer lugar a nivel mundial. (CANAPEP, 2015). Las extensiones de territorio pueden ser monitoreadas por medio del uso de sistemas de teledetección ambiental, como lo son los sensores remotos. La reflectancia espectral de las hojas a diferentes longitudes de onda produce una firma espectral que es influenciada por las propiedades ópticas de la planta (Mullan, 2013). De esta manera, la aplicación de índices de reflectancia espectral es un medio práctico para obtener información de un cultivo (Mullan, 2013), y además se puede lograr implementar una agricultura de mayor precisión (Hatchell, 1999). En este proyecto se ha planteado el estudio de la firma espectral de piña para tomar en cuenta sus variaciones estacionales y la influencia que puedan ejercer algunas variables, como la región y el tipo de suelo, en la clasificación de imágenes. Por medio de sistemas de clasificación de imágenes a partir de árboles de decisión (See5), se emplearon datos del sensor Landsat 8 del año 2015 para identificar las áreas de piña en tres regiones de Costa Rica: Región Huetar Norte (RHN), Región Huetar Caribe (RHC) y Región Brunca (RB). Los resultados encontrados para cada región arrojan un valor de 57327 hectáreas aproximadas de piña, distribuidas en las tres regiones de la siguiente forma: 37718 ha RHN, 11579 ha RHC y 8030 ha RB. Una vez identificadas estas áreas se determinaron las firmas espectrales del cultivo de piña durante el mes de marzo de 2016. Se compararon las firmas espectrales obtenidas para cada región en cuatro diferentes estadios: piña menor a seis meses, piña mayor a seis meses, piña quemada y piña podada. A nivel espectral se encontraron diferencias entre regiones siendo la finca de la RB la que presenta mayores diferencias con las otras dos fincas de las regiones RHN y RHC. Dentro de los sitios de muestreo entre estadios de piña, a nivel general las diferencias más marcadas se dan en cultivos que tienen más de seis meses de plantados versus cultivos que ya están en proceso de quema. Por otro lado, a la hora de utilizar las firmas espectrales de piña en las imágenes Landsat 8 para cada finca de muestreo se encontraron dificultades al separar espectralmente los cultivos de piña en los diferentes estadios debido a una alta cantidad de nubes presentes en la zona. En la Región Brunca fue posible aplicar las firmas espectrales de piña para los diferentes estadios, logrando separar piña de más de seis meses y la piña quemada lo que concuerda con el análisis estadístico ejecutado. De acuerdo con los resultados, se determinó que la firma espectral de piña para Costa Rica no está constituida como un solo dato, debido a las diferencias encontradas a nivel de cada finca. Del mismo modo, la presencia de nubes en dos de las regiones (RHN y RHC) representa un desafío cuando se trabaja con imágenes ópticas utilizando el algoritmo clasificador en el software ENVI, debido a la falta de cobertura para llevar a cabo el estudio. Se recomienda extender el nivel de toma de muestras y el rango espectral del espectrorradiómetro para comprobar la efectividad del modelo de aplicación de firmas espectrales con el algoritmo clasificador dentro de las siete bandas disponibles para Landsat.

Palabras clave: Costa Rica, *Ananas comosus*, piña, firma espectral, clasificación de imágenes, See5, monitoreo de cultivos, sensores remotos.



ABSTRACT

The species *Ananas comosus*, popularly known as pineapple, belongs to the Bromelias family. Pineapple is native from South America, it specifically comes from Brazil, Paraguay and northern of Argentina. In Costa Rica, pineapple cultivation occupies extensive areas of territory and is one of the principal exported products. It should be noted that Costa Rica's pineapple production, has positioned the country as the principal exporter of this fruit in the world (CANAPEP, 2015). Land extensions can be monitored by using environmental sensing systems, such as remote sensors. Pineapple leaves have spectral reflectance to different wavelengths and, as a result its spectral signature is influenced by the optical properties of the plant (Mullan, 2013). Thus, the application of spectral reflectance indexes is a practical method to obtain information of a crop, (Mullan, 2013) and it can be applied in precision agriculture (Hatchell, 1999). In this project the study of pineapple's spectral signature considered seasonal variations and the influence of some variables, such as region and soil type for the image classification. Advanced image classification systems, decision trees (See5), Landsat 8 sensor data (2015), were used to identify pineapple areas in three regions of Costa Rica: Region Huetar Norte (RHN), Region Huetar Caribe (RHC) and Region Brunca (RB). The results for each region show an approximate total value of 57327 hectares of pineapple, distributed in the three regions as follows: 37718 ha at RHN, 11579 ha at RHC and 8030 ha at RB. Once these areas had been identified, spectral signatures of pineapple were determined during March 2016. Spectral signatures obtained for each region were compared in four different stages: less than six months old pineapple, more than six months old pineapple, pruned pineapple and burned pineapple. Differences between regions were found at a spectral level, being the RB plot which has major differences respect to the other two plots in RHN and RHC regions. In general, marked differences were found between pineapple stages, more than six months old respect to crops in burning process, for the different plots. On the other hand, when pineapple spectral signatures were used on Landsat 8 images, for each sampling plot, difficulties were found in separating pineapple crops at different stages due to a high amount of clouds present in the image; it was possible to apply the spectral signature at different stages in the Brunca region. It was possible to separate the pineapple of more than six months old and burned pineapple, which is consistent with the statistical analysis performed. According to the results, it was determined that one spectral signature of pineapple for Costa Rica is not constituted as a single data due to the differences found at plot level. Similarly, the presence of clouds in two of the regions represents a challenge when working with optical imagery and using the classifier algorithm on ENVI software due lack of coverage to perform the study. It is recommended to extend the level of sampling and spectral range of the spectroradiometer to be able to check the effectiveness of the application model of spectral signatures with the classifier algorithm within the seven bands of Landsat data.

Keywords: Costa Rica, *Ananas comosus*, pineapple, spectral signature, image classification, See5, crop monitoring, remote sensing.

ÍNDICE DE CONTENIDO

SIGLAS Y ABREVIATURAS	11
I. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	12
II. INTRODUCCIÓN	13
III. OBJETIVOS	18
3.1. Objetivo general	18
3.2. Objetivos específicos.....	18
IV. PRODUCTOS OBTENIDOS POR OBJETIVOS	19
V. RESULTADOS	20
5.1. Selección de la especie.....	22
5.2. Revisión de literatura y búsqueda de datos geográficos de la especie	24
5.3. Definición de zonas de estudio.....	31
5.4. Identificación de coberturas.....	35
5.5. Descarga de imágenes Landsat 8.....	42
5.6. Preprocesamiento de imágenes.....	42
5.7. Búsqueda de fincas y acuerdos con finqueros	43
5.8. Establecimiento del diseño de muestreo	45
5.9. Toma de firmas espectrales	46
5.10. Procesamiento de firmas espectrales	47
5.11. Discriminación de valores / análisis estadístico	48
Resultados Shapiro-Wilks	49

 	<p style="text-align: center;">DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA</p>	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 5 de 101

Resultados Kruskal Wallis.....	51
Análisis de correlación de Spearman (rho)	64
5.12. Generación de la firma espectral	69
5.13. Reducción de firmas espectrales para Landsat 8	70
5.14. Categorización y sistematización en <i>ENVI</i>	71
5.15. Clasificación avanzada.....	71
5.16. Depuración de la clasificación.....	72
5.17. Validación de la clasificación.....	73
5.18. Imagen validada y clasificada	78
VI. CONCLUSIONES.....	92
VII. RECOMENDACIONES	93
VIII. REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Productos generados por el proyecto basado en cada uno de los objetivos fijados	19
Tabla 2. Información básica de las fincas de muestreo de firmas espectrales distribuidas en las tres regiones de estudio, Laboratorio PRIAS, 2016.	44
Tabla 3. Resultados prueba Shapiro-Wilks modificado para firmas espectrales de piña de tres regiones productivas de Costa Rica.	49
Tabla 4. Resultados prueba Shapiro-Wilks modificado para valores transformados de firmas espectrales de piña de tres regiones productivas de Costa Rica.	50
Tabla 5. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio mayor a seis meses, en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	52
Tabla 6. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio menor a seis en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	54
Tabla 7. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio de piña podada en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	56
Tabla 8. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio quemada para tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	58

Tabla 9. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	61
Tabla 10. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016...	62
Tabla 11. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	63
Tabla 12. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	66
Tabla 13. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	67
Tabla 14. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	68
Tabla 15. Bandas utilizadas del sensor Landsat 8 para reducir los valores del espectrorradiómetro de campo, Laboratorio PRIAS, 2016.	70
Tabla 16. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.	75
Tabla 17. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.	76

Tabla 18. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016..... 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo desarrollo de firma espectral para establecer línea base de identificación de cultivo a partir de sensores remotos.	21
Figura 2. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible en infrarrojo.	25
Figura 3. Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de suelos a distintas longitudes de onda	26
Figura 4. Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de vegetación a distintas longitudes de onda.	27
Figura 5. Firmas hiperespectrales de árboles de limón infectados con HLB y sanos.	28
Figura 6. Firma espectral de los polígonos cañeros por nivel de productividad.....	29
Figura 7. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca Yarinacocha, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.	32
Figura 8. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca Babilonia, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.	33

Figura 9. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca La Guaria, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	34
Figura 10. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	36
Figura 11. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	37
Figura 12. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	38
Figura 13. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	39
Figura 14. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	40
Figura 15. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.....	41
Figura 16. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio mayor a seis meses. (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB)	53
Figura 17. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio menor a seis meses. (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB)	55
Figura 18. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio podada (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB).	57
Figura 19. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio quemado (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB).	59

Figura 20. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. 79

Figura 21. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. 80

Figura 22. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016..... 81

Figura 23. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en tres regiones de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016..... 83

Figura 24. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RHN y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado..... 85

Figura 25. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016..... 86

Figura 26. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RHC y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado..... 87


Figura 27. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. 88

Figura 28. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RB y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado..... 89

Figura 29. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. 91

SIGLAS Y ABREVIATURAS

CANAPEP	Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña
CeNAT	Centro Nacional de Alta Tecnología
CONARE	Consejo Nacional de Rectores
ENVI	Environment for Visualizing Images
FLASSH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes
FunCeNAT	Fundación Centro de Alta Tecnología
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
PINDECO	Pineapple Development Corporation-Del Monte
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PSA	Pagos por Servicios Ambientales
RB	Región Brunca
REDD+	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques
RHC	Región Huetar Caribe
RHN	Región Huetar Norte
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SFE	Servicio Fitosanitario del Estado
SNIT	Sistema Nacional de Información Territorial

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 12 de 101

I. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

INFORMACIÓN GENERAL	
Título del proyecto: Desarrollo de una firma espectral para la identificación de cultivos de piña a través de sensores remotos e in situ en Costa Rica	
Nombre o razón social del contratante: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo	
Nombre o razón social del contratista: Fundación Centro de Alta Tecnología	
Cédula jurídica del contratista: 3-006-213777	
Representante legal del contratista: Cynthia Cordero Solís	
Dirección del contratista para notificaciones: Edificio Dr. Franklin Chang Díaz, 1,3 km norte de la Embajada Americana, Pavas, San José, Costa Rica.	
Correo electrónico: ccordero@cenat.ac.cr	Teléfono: 2519-5700. Ext. 5838
Laboratorio ejecutor: Laboratorio PRIAS	
Coordinador: Cornelia Miller Granados	
Investigador principal: Heileen Aguilar Arias	
Asistentes de Investigación: Lloyd Foster Burr, Meybell Carranza Solano, Marilyn Ortega Rivera	
Investigador sustituto: Christian Vargas Bolaños	
Fecha de inicio del contrato: 23 de marzo de 2015	
Fecha de entrega del informe: 10 de junio	
Pago correspondiente: Cuarto pago correspondiente al 20% del total	
Monto correspondiente al pago: ₡10.821.582,34	

II. INTRODUCCIÓN

La especie *Ananas comosus* (L) Merr, popularmente conocida como piña, pertenece a la familia Bromeliaceae y es originaria de América del Sur, específicamente de Brasil, norte de Paraguay y Argentina. El principal factor climatológico que determina el crecimiento y el desarrollo de esta planta es la temperatura, con valores óptimos entre 22°C – 30°C. La precipitación ideal para obtener una mayor producción de piña es la que va de 1000 mm – 1500 mm anuales (IICA, 1983).

Basado en los requerimientos climáticos para cultivar piña se señala que Costa Rica tiene las condiciones idóneas para el desarrollo de este cultivo y hasta la fecha ha logrado posicionarse en el primer lugar a nivel mundial en la exportación de este producto (CANAPEP, 2015).

De acuerdo con los datos históricos que reporta CANAPEP (2015), el crecimiento del sector Piñero inició aproximadamente en el año 2000, hasta ese entonces se estimaba que existían unas 11000 hectáreas distribuidas entre la Zona Sur y Zona Norte del país, mientras que para el año 2004 se contabilizaba en la Región Huetar Norte un área de siembra de 12000 ha, siendo la región con mayor producción de piña a nivel nacional, seguido por la Región Brunca con 5500 ha y la Región Huetar Atlántica que mantenía un área de siembra de 5000 ha (Aravena, 2005). Tal como lo menciona CANAPEP (2014) en su sitio web, los datos más recientes reportan para la Región Huetar Norte 18800 ha de piña, en la Región Pacífica (incluye sur y centro del pacífico de Costa Rica) 8800 ha y 12400 ha de piña en la región Huetar Atlántica.

En vista del crecimiento y expansión que ha tenido este cultivo en el país y el auge que han desarrollado otros productos agrícolas en los paisajes productivos de Costa Rica, principalmente en áreas que bordean bosques maduros y áreas de regeneración natural, se ha generado una amenaza en diversos hábitats naturales, esencialmente a causa de la deforestación, fragmentación de bosques y cambios de uso y cobertura del suelo.

A nivel mundial Costa Rica es uno de los pocos países que han combatido con éxito la deforestación, por medio de la combinación de diversas políticas orientadas a la protección, conservación y generación de prácticas productivas basadas en la sostenibilidad, tal como es la promulgación de la Ley Forestal 7575 en el año 1995, la cuál que prohíbe el cambio de uso del suelo y el Programa de PSA. Parte de los ejemplos de la aplicación de las diversas políticas radica en la disminución de la deforestación y el aumento en la cobertura forestal. Para el año 1997 el 42% del territorio nacional era de cobertura forestal, con un aumento significativo al 2000 para un 47% del territorio, 51,4% en 2005 y el dato más reciente un 52,3% para el año 2010, de acuerdo con los datos reportados por el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO, 2012).

Las diversas políticas que ha implementado el país necesitan respaldo y apoyo de otras iniciativas multilaterales, para contrarrestar de forma más amplia y efectiva el impacto generado por la expansión de la agricultura intensiva en los ecosistemas naturales. Una herramienta que permite reducir el avance de la deforestación, relacionada con cultivos agrícolas de gran expansión, es la estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación del Bosque y más) que busca incentivar a los países en desarrollo a proteger, administrar y utilizar mejor los recursos forestales contribuyendo en la lucha global contra el cambio climático (PNUD, 2015).

Actualmente, la estrategia REDD+ invierte en el desarrollo de sistemas de medición y monitoreo, de manera que los países podrán calcular y comprobar el carbono almacenado en sus bosques, medir los cambios en la cobertura y uso de la tierra. Con ello, REDD+ busca promover un desarrollo verde, social y económico, fomentar la conservación, el manejo sostenible de los recursos naturales y aumentar las reservas de carbono (PNUD, 2015).

Por otra parte, una de las herramientas más importantes para implementar sistemas de monitoreo, medición y control de la cobertura de la tierra son la teledetección y el sensoramiento remoto. Estas dos disciplinas permiten obtener información de los objetos sin la necesidad de tener contacto directo con ellos (Chuvienco, 2010), lo que las convierte en las mejores herramientas para llegar a estimar la cobertura de la tierra en áreas de muy difícil acceso a través de imágenes satelitales, por ejemplo.

El procesamiento digital de imágenes implica la manipulación e interpretación de imágenes digitales registradas por los sensores remotos, con la ayuda de computadoras (Lillesand & Kiefer, 1999). Tomando en cuenta técnicas que permitan mejorar la información disponible como la rectificación y restauración de imágenes, (operaciones que tienen como objetivo corregir imágenes distorsionadas y/o degradadas) a fin de crear una representación más fiel de la imagen original.

Típicamente el mejoramiento de imágenes implica realizar correcciones de distorsiones geográficas (georeferenciación), correcciones radiométricas, geométricas y eliminación de ruidos. Por otro lado, la clasificación digital de imágenes satelitales, permite caracterizar áreas, obtener porcentajes de coberturas, entre otro tipo de análisis, por medio de técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de rasgos en una escena. Normalmente esto implica el análisis de imágenes satelitales con reglas de índole estadístico, para determinar la identidad de tipo de cobertura de cada pixel en una imagen, en un número finito de clases o categorías de datos, basado en sus valores asociados (Coronado, 2001).


En este sentido uno de los sensores más utilizados para diversos tipos de investigaciones y que se encuentra de acceso libre en internet para la población en general, es el sensor Landsat producto de un esfuerzo conjunto entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) con el fin de recopilar rutinariamente las imágenes de la tierra desde el espacio (Chuvieco, 2012).

El programa Landsat inició en el año 1972, y a partir de este año se han lanzado ocho satélites, el más reciente fue lanzado el 11 de febrero del año 2013, llamado Landsat 8, cuyo objetivo principal es adquirir datos de alta calidad que satisfagan las necesidades científicas y operacionales de la NASA y el USGS para la observación de cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal (USGS, 2013). El sistema Landsat 8 porta dos instrumentos, la Cámara Terrestre Operacional (OLI, por sus siglas en inglés) y el TIRS (Sensor Térmico Infrarrojo), los cuales recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre. Las imágenes del satélite Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) se componen de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9.

Estos datos Landsat han sido seleccionados por Vargas (2014) en la implementación de un sistema de monitoreo de paisajes productivos como una herramienta eficaz para determinar áreas de ocupación de la tierra y cambios de uso del suelo, en este sentido se busca por medio de la aplicación de nuevas tecnologías implementar firmas espectrales para la mejora de los sistemas de clasificación de cultivos agrícolas a partir de sensores remotos; dado que, los datos recopilados remotamente pueden corresponder a varias formas de energía, donde se incluye: variaciones de fuerza, ondas de sonido o bien energía electromagnética.

Los sensores usualmente empleados en la actualidad son capaces de trabajar capturando variaciones de energía electromagnética (Lillesand & Kiefer, 1999). Las plantas tienen la cualidad de reflejar gran cantidad del espectro electromagnético, la cual es posible medir y caracterizar, posibilitando su detección mediante imágenes hiperespectrales. La reflectancia espectral de las hojas a diferentes longitudes de onda produce una firma espectral que se ve influenciada por las propiedades ópticas de la planta (Mullan, 2013), esta firma espectral puede ser medida a partir de imágenes satelitales y sensores *in situ* que permitan la discriminación de cultivos y otras coberturas a partir de su comportamiento espectral.

Por lo tanto, la información generada por los sensores remotos y la combinación con las técnicas de análisis y procesamiento de datos e imágenes por medio de la teledetección y el uso de SIG, son herramientas que permiten mejorar la gestión de la información disponible sobre un territorio. Bajo este contexto, el objetivo principal de este estudio es, desarrollar una línea base de presencia de cultivos de piña en Costa Rica a través del uso de sensores remotos e *in situ* que permitan obtener una firma espectral para identificar cultivos de piña.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 18 de 101

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

- Desarrollar la firma espectral para identificar cultivos de piña a través de un seguimiento regular en diferentes partes del país por medio del uso de sensores remotos.

3.2. Objetivos específicos

- Llevar a cabo un monitoreo de las acciones y el trabajo de campo para recoger la radiación electromagnética emitida, reflejada o absorbida en diferentes longitudes de onda que pueden identificar de forma única los cultivos de piña en los paisajes productivos de Costa Rica a través del uso de sensores remotos.
- Determinar y describir la fenología y el espectro de los cultivos de piña en paisajes productivos de Costa Rica.
- Analizar las diferencias de estado de los cultivos de piña que pueden afectar la firma espectral a través de la consulta de expertos y la verificación de campo.
- Llevar a cabo una revisión de la literatura para determinar la discriminación espectral de piña con otros tipos de cultivos.
- Utilizar la firma espectral desarrollada para producir un plan piloto de “Línea base para la presencia de cultivos de piña en paisajes productivos de Costa Rica 2015”.

IV. PRODUCTOS OBTENIDOS POR OBJETIVOS

Tabla 1. Productos generados por el proyecto basado en cada uno de los objetivos fijados

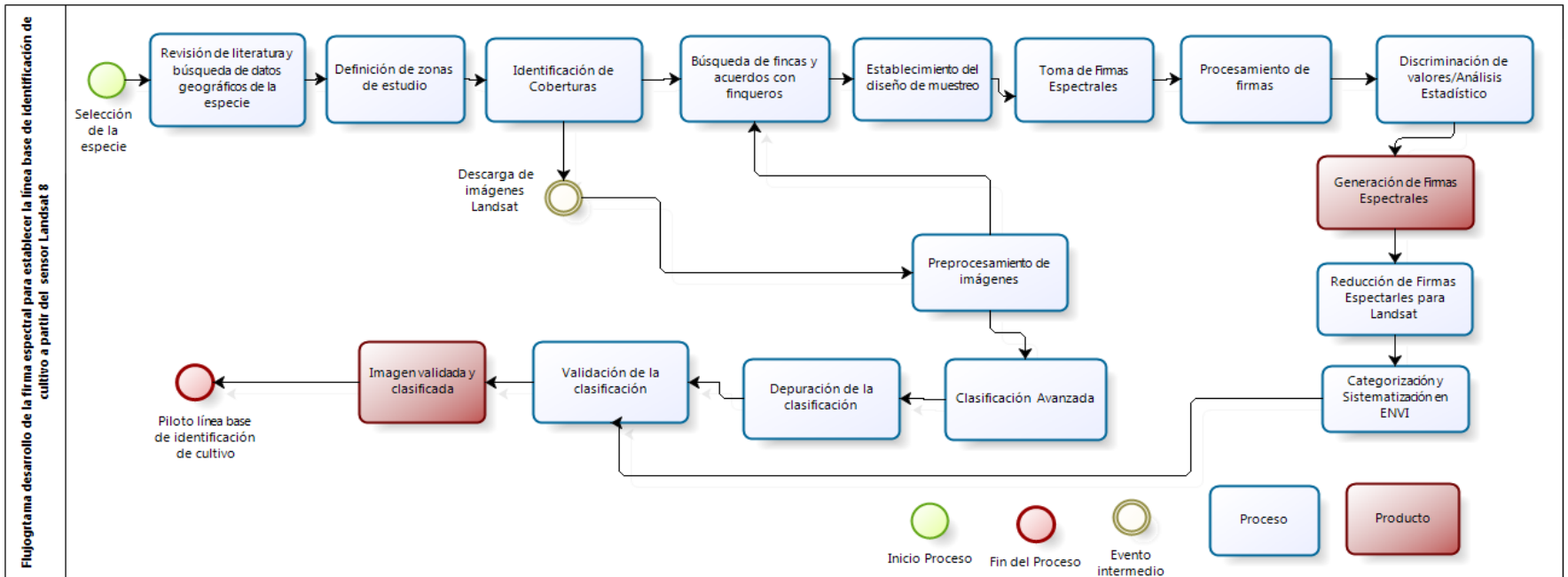
Objetivo	Logros
1. Llevar a cabo un monitoreo de las acciones y el trabajo de campo para recoger la radiación electromagnética emitida, reflejada o absorbida en diferentes longitudes de onda que pueden identificar de forma única los cultivos de piña en los paisajes productivos de Costa Rica a través del uso de sensores remotos.	Manual de descarga de imágenes Landsat 8. Manual de Corrección Atmosférica de imágenes Landsat 8. Manual de clasificación avanzada para imágenes Landsat 8. Manual para elaborar puntos de validación ENVI. Imágenes Landsat 8 descargadas para todo el año 2015 de las tres regiones de estudio. Acuerdos para acceso a fincas de piña. Puntos GPS de control para clasificación y validación.
2. Determinar y describir la fenología y el espectro de los cultivos de piña en paisajes productivos de Costa Rica.	Establecimiento de diseño de muestreo. Firmas espectrales de piña para diferentes cultivos. Procesamiento de firmas espectrales.
3. Analizar las diferencias de estado de los cultivos de piña que pueden afectar la firma espectral a través de la consulta de expertos y la verificación de campo.	Análisis estadístico de las diferencias espectrales en piña para cuatro estadios de piña en tres regiones de Costa Rica. Mejoramiento de técnicas de clasificación de imágenes y adquisición de firmas espectrales a través de la consulta con expertos internacionales de la Universidad de Alberta de Canadá y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR, por sus siglas en inglés).
4. Llevar a cabo una revisión de la literatura para determinar la discriminación espectral de piña con otros tipos de cultivos.	Revisión literaria de aspectos técnicos en el sistema de clasificación de imágenes e incorporación de firmas espectrales, comparación con otros valores reportados. Generación de firma espectral de piña para diferentes estadios.
5. Utilizar la firma espectral desarrollada para producir un plan piloto de "Línea base para la presencia de cultivos de piña en paisajes productivos de Costa Rica 2015"	Plan piloto de línea base de presencia de cultivos de piña a partir de imágenes Landsat 8. Coberturas de piña para tres regiones de interés en Costa Rica. Firmas espectrales de piña para tres regiones en Costa Rica.

V. RESULTADOS

Esta investigación se centró en definir un sistema piloto de línea base para la identificación de cultivos de piña a partir del uso de sensores remotos e in situ en Costa Rica. De acuerdo con los estudios preliminares desarrollados por Vargas (2014), se recomendó el uso del sensor satelital Landsat para implementar el sistema de monitoreo de cobertura de la tierra a fin de obtener una constancia de datos en el tiempo. De tal forma, este estudio se ha centrado en el uso del sensor Landsat 8 con el fin de valorar su aplicación en un sistema de identificación de cultivos que sea accesible y replicable, enfocado para este proyecto, en el cultivo de piña.


En este estudio piloto se utilizaron los datos del sensor Landsat 8 disponibles para el año 2015, cabe destacar que este sensor es gratuito, no tiene ningún costo asociado a la descarga de datos. Además, se incorporaron firmas espectrales de campo para mejorar el sistema de clasificación del cultivo de piña en Costa Rica. Se elaboró un flujograma de procesos (Figura 1), que incluye las diferentes etapas propuestas para desarrollar un sistema de monitoreo de cultivos a través de sensores remotos, el desarrollo de las diferentes etapas se expone de manera general y se aborda un enfoque metodológico de toma de datos para el cultivo de la piña.

La Figura 1 muestra el flujograma de procesos para establecer la línea base de identificación de cultivos a partir de imágenes Landsat 8. Anteriormente en los **Informes I Versión I** e **Informe I Versión II Final** se expusieron los procesos (paso a paso) necesarios para el procesamiento de la información. En este informe se presentan los resultados finales y algunos procesos que estaban pendientes de ejemplificar, de igual forma se adjunta en la versión digital todos los manuales y archivos generados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Diagrama de flujo desarrollo de firma espectral para establecer línea base de identificación de cultivo a partir de sensores remotos.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 22 de 101


5.1. Selección de la especie

La especie seleccionada para esta investigación es *Ananas comosus* (L) Merr, popularmente conocida como piña, pertenece a la familia de las bromeliáceas y se ha producido en Costa Rica en grandes extensiones de territorio desde hace más de cincuenta años, iniciando con las variedades de piña Hawaiana y luego con Cayena Lisa producidas a finales de los noventas y más reciente la variedad MD2 o Golden desde 2006 que le ha dado el posicionamiento internacional a la fruta de la piña (Boeglin, 2015). Actualmente, ocupa en el país grandes extensiones de terreno, primordialmente en las regiones Huetar Norte, Huerta Caribe y Brunca; además, abarca áreas más pequeñas de producción en otras regiones del país. Dado el cambio de uso del suelo que pueden experimentar los paisajes en Costa Rica, se seleccionó el cultivo de piña como base para fijar el monitoreo de cultivos a partir de 2015, utilizando para ello el plan piloto propuesto en la Figura 1.

Basado en las investigaciones realizadas durante este proyecto, se encontraron características específicas de la planta y su cultivo que puede llegar a presentar diferencias en su comportamiento espectral. En el **Informe I Versión I**, se detallan los aspectos físico-biológicos de la planta que son más relevantes en la comprensión del cultivo. Además, con las observaciones realizadas en campo y las visitas a varios productores de piña se encontró que la piña describe varios estados fenológicos, estos estados fueron separados en cuatro a fin de realizar el muestreo de firmas espectrales:

- **Piña menor a seis meses:** es la piña en su estado juvenil su ciclo de vida aún no ha alcanzado el estado reproductivo y se encuentra con pocos meses de siembra, los espacios entre planta y planta son altamente visibles lo que permite una mezcla de suelo y vegetación, describe una coloración verde clara, con algunos bordes amarillentos.

- **Piña mayor a seis meses:** es la piña en su estado adulto, se caracteriza por tener más de seis meses de haber sido plantada, los espacios entre planta y planta son en su mayoría escasos, ya que la planta ha desarrollado su crecimiento longitudinal, además se observan las hojas más gruesas de una coloración verde oscuro y con algunos bordes en amarillo, hay presencia de floración y en ocasiones de frutos pequeños; o bien, algunos más desarrollados.
- **Piña podada:** luego de su primer cosecha la piña es sometida a un proceso de poda de las hojas, no se elimina la planta por completo sino que es removido alrededor del 50% del tamaño de la hoja, esto causa estrés en la planta y por ende se consideró como un estado distinto a ser evaluado espectralmente.
- **Piña quemada:** se identifica este estado como el residuo de piña que queda en la plantación una vez colectado el fruto por segunda vez y en el que se somete la planta a un proceso de quema donde luego es removida por completo la planta y material residual para iniciar una nueva siembra.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 24 de 101

5.2. Revisión de literatura y búsqueda de datos geográficos de la especie

Anteriormente en el *Informe I Versión I* se abordó la descripción acerca de la especie de piña bajo estudio, en este último informe se mencionan los aspectos relacionados con las firmas espectrales para completar la información correspondiente a esta sección.

Cualquier cuerpo u objeto en la superficie terrestre emite una radiación electromagnética específica, resultado de la interacción con las fuentes de energía propias o externas. La absorción, la emisión, la difracción y la reflexión de la energía electromagnética por un determinado tipo de material son selectivas en función de la longitud de onda específica del material. Esta característica especial de cada superficie suele denominarse como firma espectral. De acuerdo con Chuvieco (2010), las firmas espectrales son fundamentales para reconocer cubiertas de interés o bien parámetros dentro de esas cubiertas.

En este contexto, todos los materiales presentan respuestas espectrales características que se pueden detectar usando sensores óptico-electrónicos capaces de detectar energía en la región infrarroja reflejada y térmica (Hernández, 2011). En esta sección se buscó incorporar material referencial que sirva para futuros estudios a nivel de firmas espectrales, de igual forma, se investigó la existencia de firmas espectrales de piña a nivel de Costa Rica y otras regiones; sin embargo, no se encontraron estudios similares al llevado a cabo. Por lo tanto se exponen algunos estudios de mayor relevancia relacionados con lo elaborado en esta investigación como consulta técnica durante toda la lectura de los resultados que se exponen a partir de la sección **5.3.** siguiente.

La figura 2 presenta firmas espectrales de referencia general para un conjunto de materiales comunes que se pueden encontrar en la superficie terrestre.

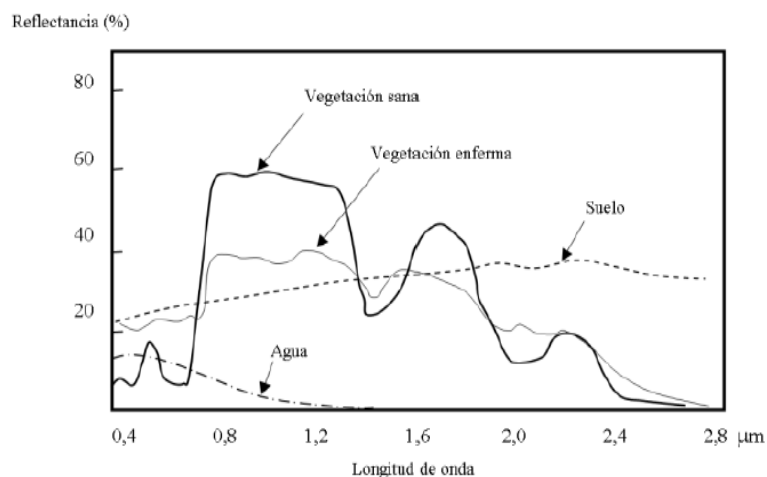


Figura 2. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible en infrarrojo.

Fuente: Hernández, 2011.

En los suelos por ejemplo, los principales factores que afectan el comportamiento espectral son el color y el contenido de humedad. Cuando los suelos se encuentran secos las tierras ennegrecidas presentan mayor reflectancia, contrariamente cuando se encuentran con un alto contenido de agua poseen en promedio una reflectancia dos veces más débil que los suelos secos registrando las mayores diferencias en la zona de infrarrojo cercano (Scanvic, 1989). Otros factores que modifican la reflectancia de los suelos son: el contenido de materia orgánica, la textura y estructura, disposición vertical y horizontal, así como los ángulos de iluminación y observación de éstos. Este aspecto importante se evidencia en el resultado encontrado al ejecutar las comparaciones estadísticas por regiones, donde la RB es la que más difiere del resto de regiones.

La figura 3 muestra diferentes firmas espectrales reportadas para distintos tipos de suelos.

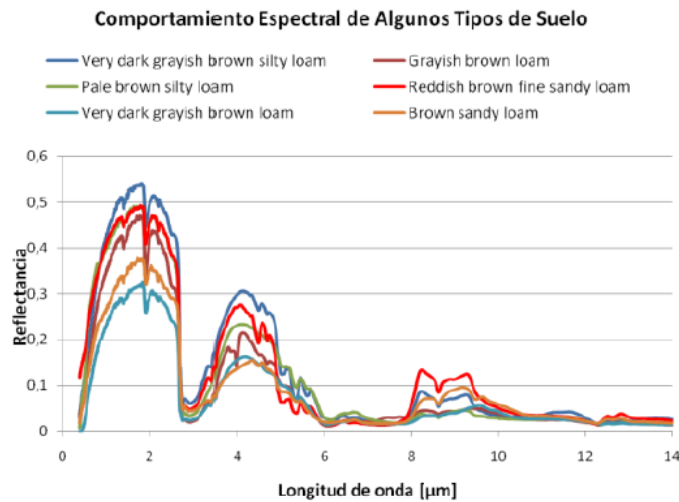


Figura 3. Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de suelos a distintas longitudes de onda

Fuente: Hernández, 2011.

En el caso de vegetación, la firma espectral de una planta muestra las características del comportamiento de la radiación electromagnética con la estructura de la planta (Meer *et al.*, 2002). El primer contacto de la radiación es con la superficie de las hojas. El valor de luz que es absorbida o transmitida entre las hojas depende de su longitud de onda y de la selectividad de absorción de los pigmentos de la hoja, que pueden ser características de la misma especie o estar causadas por enfermedades o deficiencias nutritiva (Meer *et al.*, 2002). En la figura 4 se muestran firmas espectrales para diferentes tipos de vegetación.

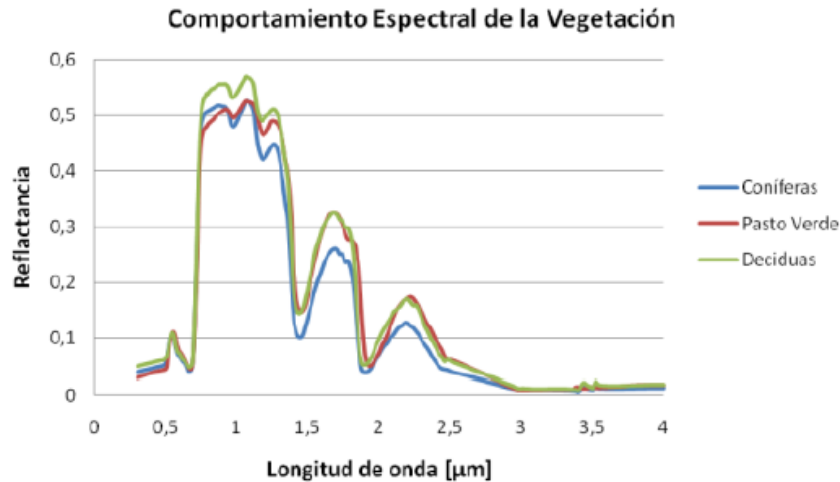


Figura 4. Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de vegetación a distintas longitudes de onda.

Fuente: Hernández, 2011.

Un aspecto que influye en la reflectividad de las plantas son sus pigmentos presentes en las hojas que absorben fuertemente la luz en la región de la radiación fotosintética del espectro electromagnético (el verde), pero no así en la región del infrarrojo cercano o NIR (750nm – 2500nm) (Knipling, 1970), esto da como resultado una reflexión de radiación menor en la región del verde comparado con la región NIR del espectro. Este comportamiento se puede observar en los resultados presentados en la última sección de documento (5.18.). La respuesta de la vegetación al estrés puede ocasionar cambios bioquímicos a nivel celular y de hoja, que tiene influencia sobre los sistemas de pigmento y el contenido de humedad, por otro lado, el estrés puede causar cambios biofísicos en la estructura de la cobertura, el índice de área foliar (IAF) o la biomasa (Meer *et al.*, 2002).

Por ejemplo, Xiuhua (2012), obtuvo firmas hiperespectrales para cítricos con Huanglongbing (HLB), también conocida como enverdecimiento de los cítricos, y firmas de individuos sanos, concluyendo su diferenciación a nivel de árbol en las regiones ópticas (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) de espectro electromagnético.

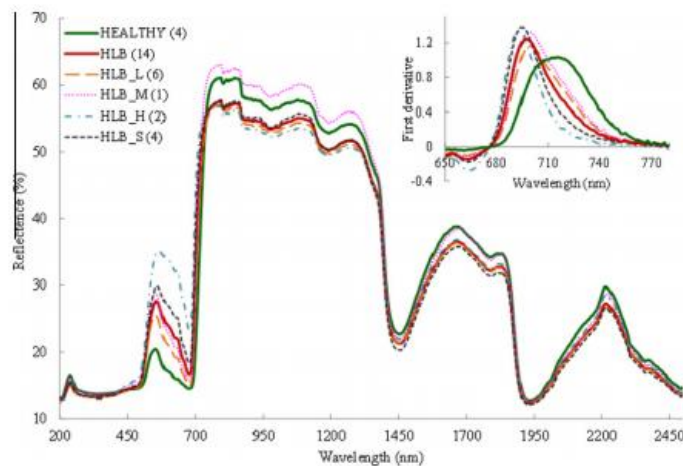


Figura 5. Firmas hiperespectrales de árboles de limón infectados con HLB y sanos.

Fuente: Xiuhua et al., 2012.

En otro estudio, se analizaron las propiedades espectrales de las hojas de cebada atacadas por el mildew polvoso (*powdery mildew*), que es una enfermedad que ataca a un gran número de cultivos en los que el aumento de la reflectancia en el espectro visible fue observado después de la inoculación (Lorenzen *et al.*, 1989).

Aguilar-Rivera *et al.* (2012) a través de un estudio de evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México y a través de la comparación de los niveles digitales (ND) de cada clase de productividad cañera obtenidos para las distintas bandas involucradas en las firmas espectrales de la zona cañera de estudio, y de acuerdo a Chuvieco (1996) permitió establecer que la categoría clasificada como ALTO, presenta las características de una vegetación vigorosa; muestra un máximo relativo (215,2 ND) en la porción verde del espectro y un mínimo (95,5 ND) en el rojo (banda 2), este valor en coincidencia a los valores en esta banda para las categorías BAJO y MUY BAJO, derivado de la actividad fotosintética decreciente en esta zona de estudio.

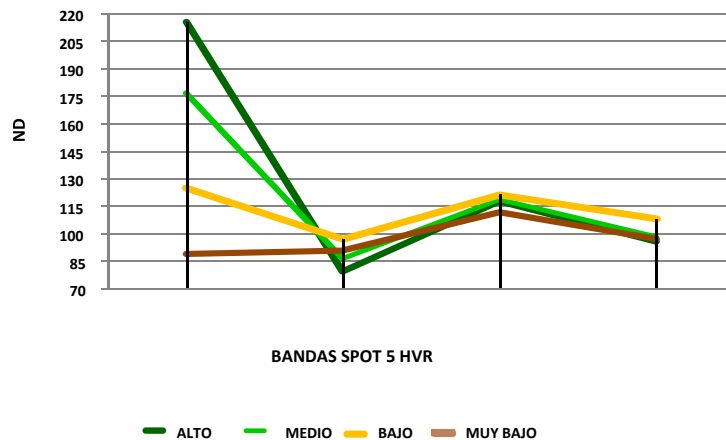


Figura 6. Firma espectral de los polígonos cañeros por nivel de productividad.

Fuente: Aguilar et al., 2012.

En otro estudio para el cultivo de caña, Johnson *et al.* (2008) establecieron que la respuesta espectral es significativa en longitudes de onda entre 510 – 550, 580 - 620 nm y hasta 720 nm) y que pueden usarse incluso para discriminar entre diversas variedades de caña, debido a su alta actividad fotosintética. Doraiswami *et al.* (2003) calibra un modelo de rendimiento de cultivos usando Landsat con insumos derivados de AVHRR. Otro ejemplo es la metodología usada por McNairn *et al.* (2002) para evaluar la factibilidad de identificar cultivos usando imágenes de radar.

En resumen, el uso de técnicas geomáticas permite obtener datos homogéneos de extensas superficies agrícolas y forestales y realizar análisis multi-temporales y mapeos en tiempo real y de forma rápida, sinóptica, y relativamente accesible de las diferencias en el vigor de los cultivos (variaciones de la biomasa) e integrando las características bioquímicas y biofísicas del dosel ayudando a orientar el muestreo y evaluación del potencial de producción de una superficie cultivada (Almeida *et al.*, 2006).

5.3. Definición de zonas de estudio

Para el desarrollo de esta investigación se definieron las tres zonas de estudio de acuerdo a los niveles de producción de piña en el país. Las principales zonas con áreas extensas de cultivo de piña de acuerdo al sistema de clasificación de regiones de MIDEPLAN (2014) son: Región Huetar Norte, Región Huetar Caribe y la Región Brunca (Ver Informe I_Versión I).

El proceso de clasificación de imágenes para la obtención de coberturas de piña se llevó a cabo en toda la extensión total del terreno dentro de las tres regiones piloto. Por otro lado, para el muestreo exploratorio de firmas espectrales se seleccionó en cada región, una finca de estudio para realizar el muestreo. Estas fincas fueron seleccionadas basado en una revisión mensual de imágenes Landsat 8. Anteriormente en el **Informe I Versión II Final** se definieron las fincas sobre las cuales se realizaría el estudio. Sin embargo, a la hora de efectuar la toma de datos en campo, en la Región Brunca por dificultad a la hora de ingresar no fue posible adquirir, en vista de ello se solicitó la colaboración del Ingeniero William Pizarro, funcionario del SFE, para colaborar con la selección de una nueva finca que cumpliera con todos los requisitos de muestreo para la toma de datos en dicha región.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran las áreas de muestreo de firmas espectrales efectuado durante el mes de marzo 2016 en una finca de cada región de estudio.

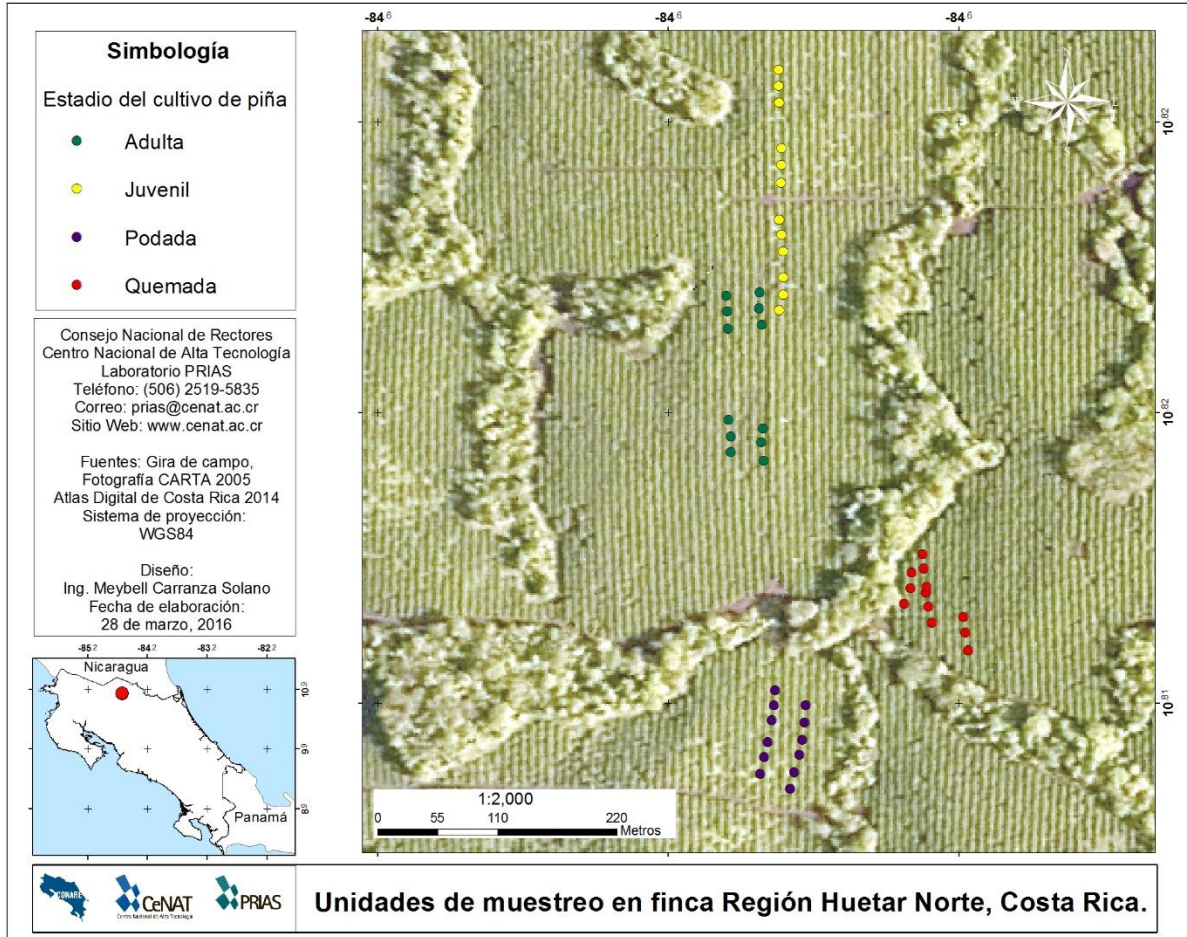


Figura 7. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca Yarinacocha, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

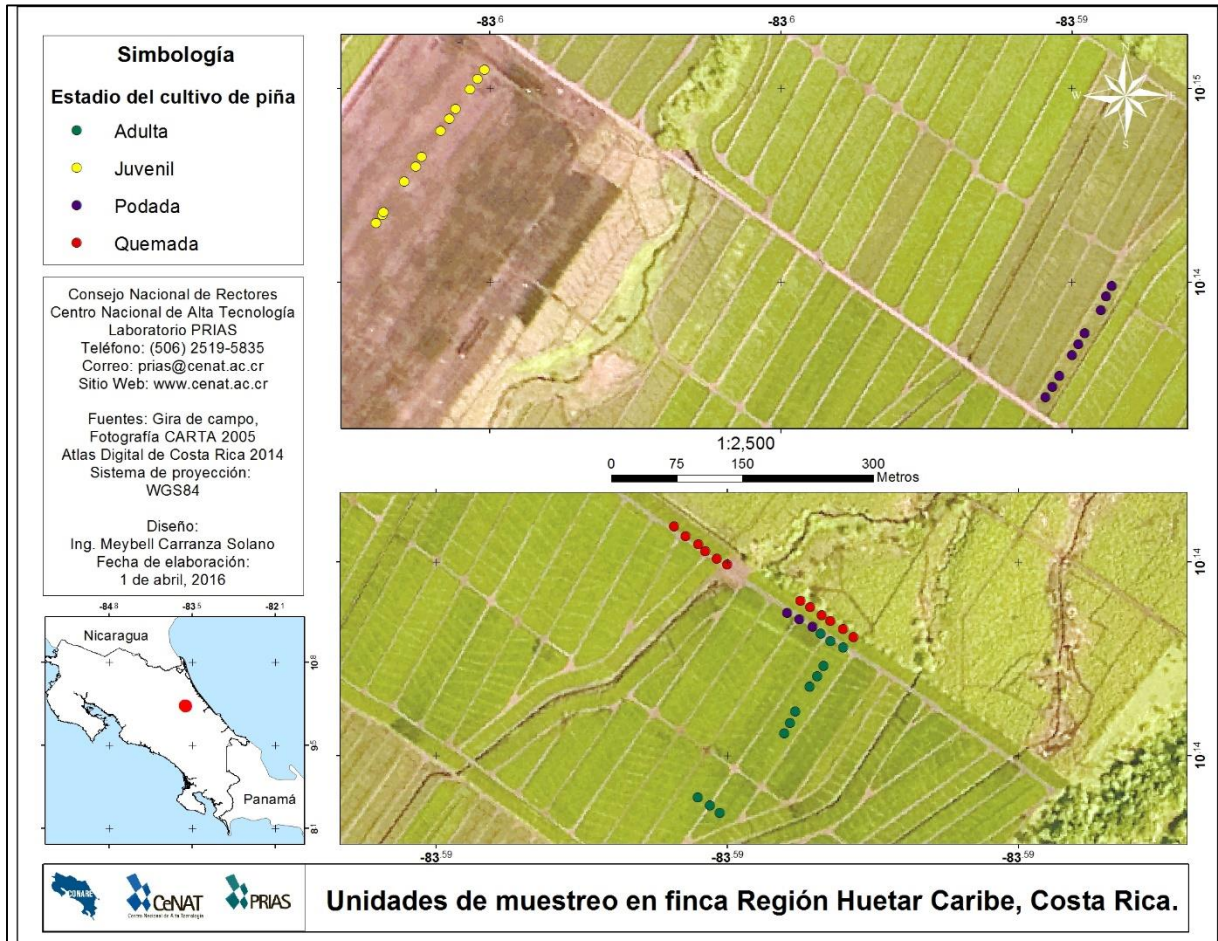


Figura 8. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca Babilonia, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

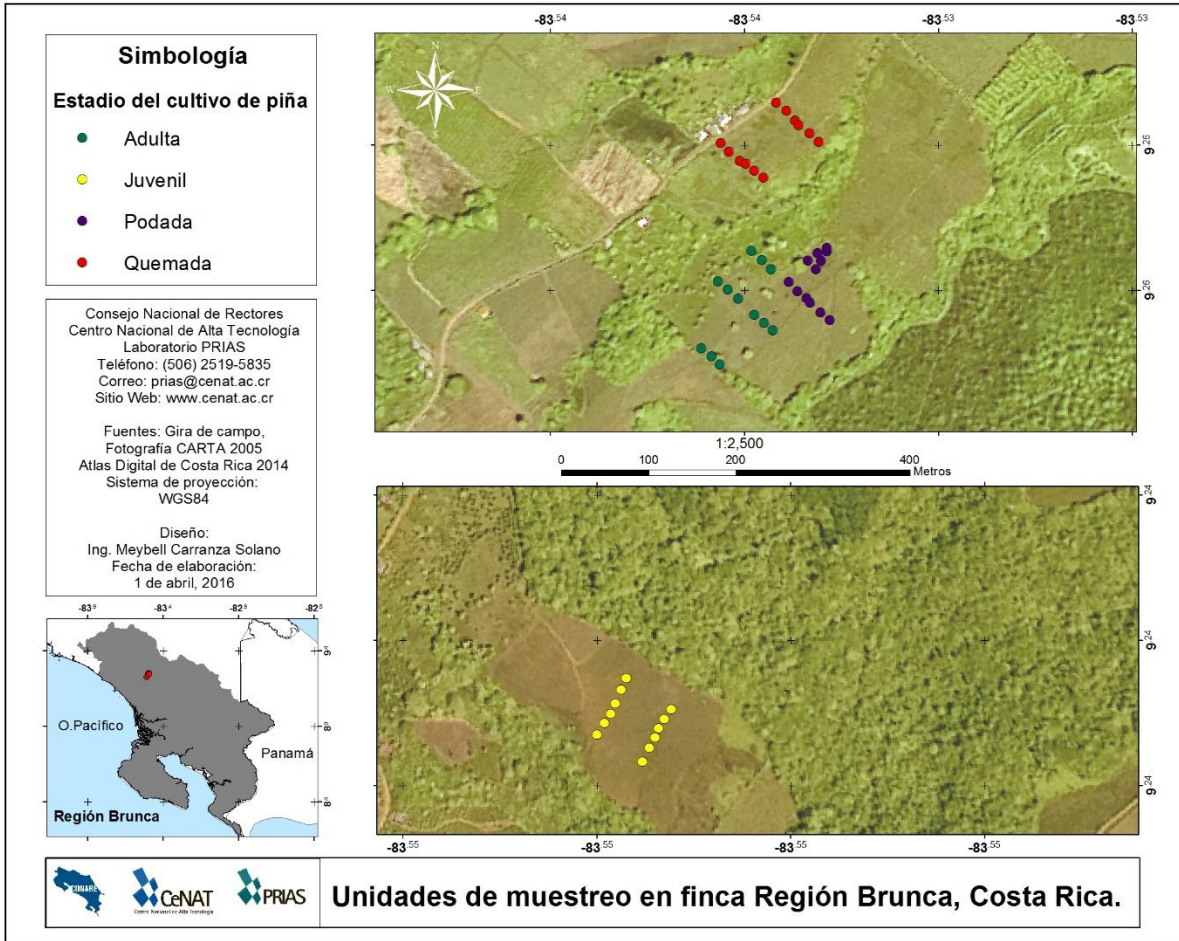


Figura 9. Mapa de ubicación de los las unidades de muestreo de firmas espectrales en la finca La Guaria, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

5.4. Identificación de coberturas

En esta etapa se colectaron puntos de control de diferentes coberturas, utilizados como insumo para desarrollar el sistema de clasificación avanzada y la validación primaria de la clasificación. En el **Informe I Versión II Final** se encuentra disponible la descripción de la toma de datos y los mapas de ubicación de los mismos.

Del total de puntos de control colectados en campo se tomó una muestra para puntos de clasificación y otra muestra para puntos de validación. Los puntos de clasificación fueron utilizados en el proceso de creación de áreas de entrenamiento en el software *ENVI* para la clasificación avanzada en el software *ERDAS* (Figuras 10, 11, 12). Los puntos de validación fueron utilizados al final de la obtención de coberturas piña para validar los resultados de las áreas generadas a partir de las imágenes. Para este caso se generó otra serie de puntos aleatorios a partir de la herramienta *Random Sample* de *ENVI*. Las figuras 13, 14 y 15 muestran los mapas de ubicación de los puntos de control para la validación de la clasificación de imágenes. Los archivos digitales se encuentran disponibles en la carpeta nombrada como “Puntos de control”.

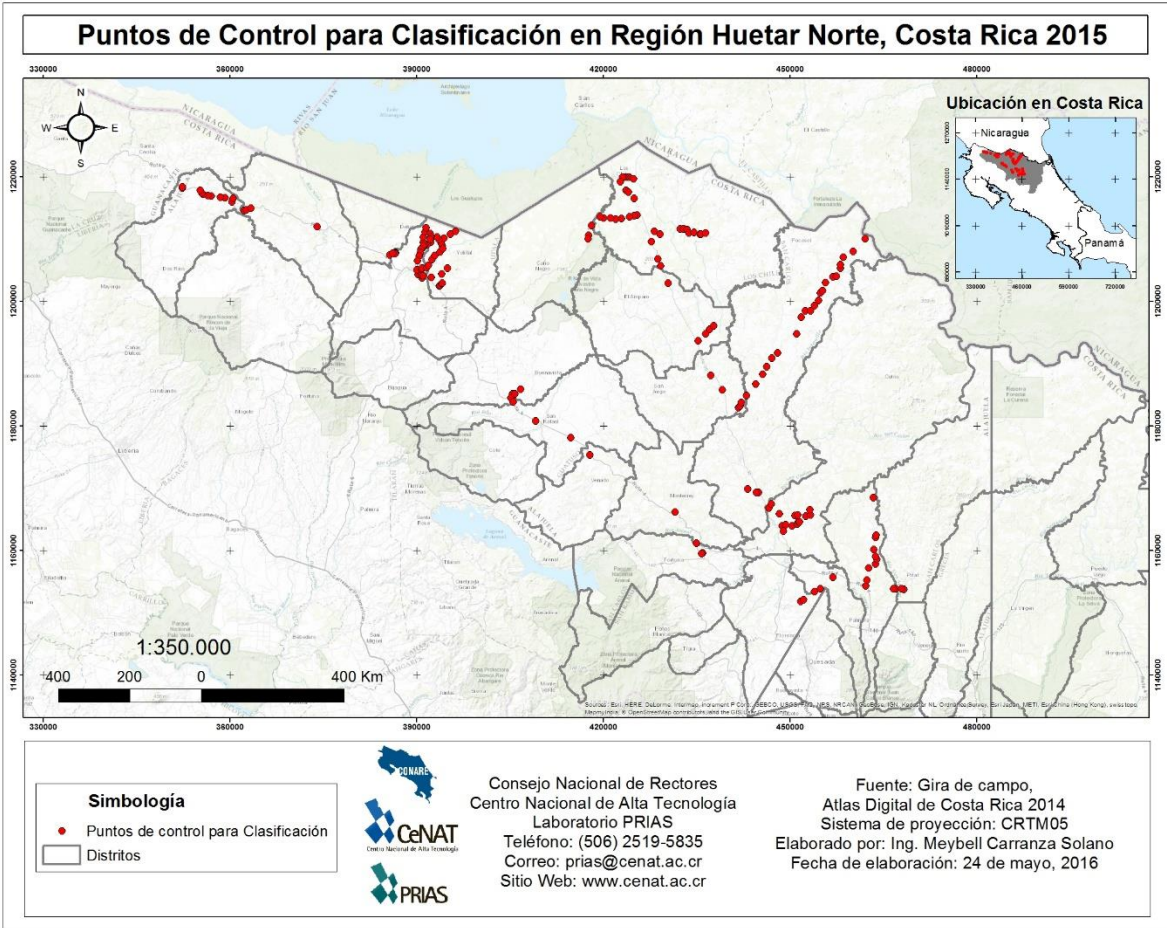


Figura 10. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

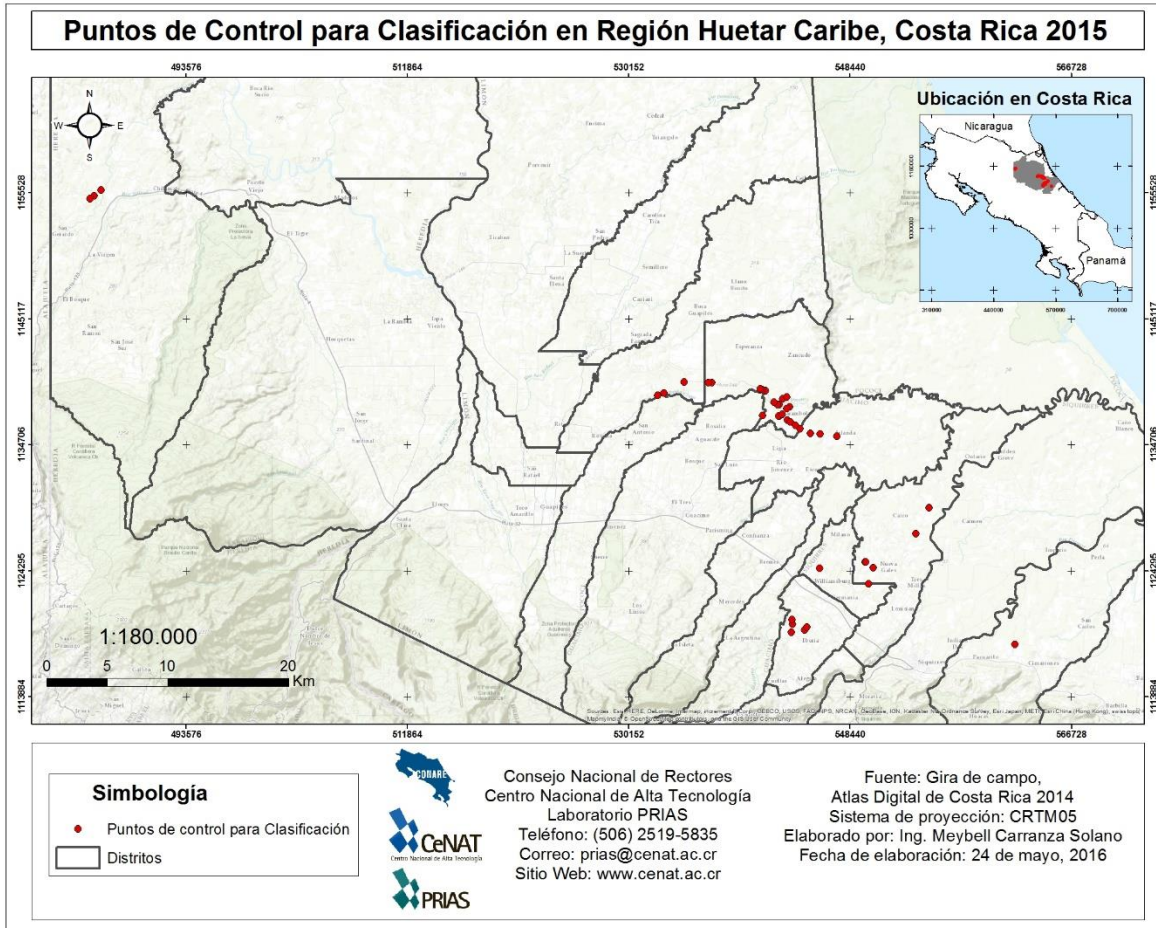


Figura 11. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

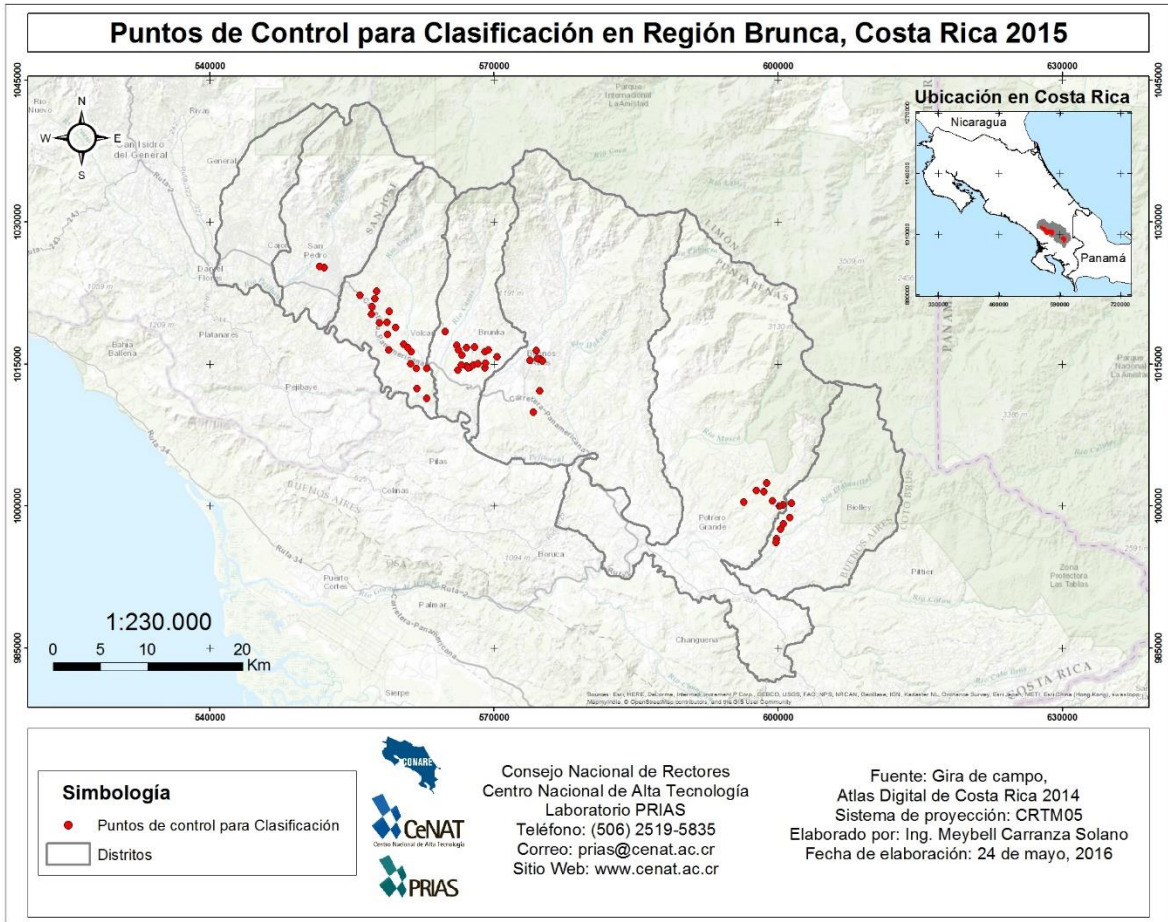


Figura 12. Mapa de puntos de control para la clasificación de imágenes Landsat 8, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

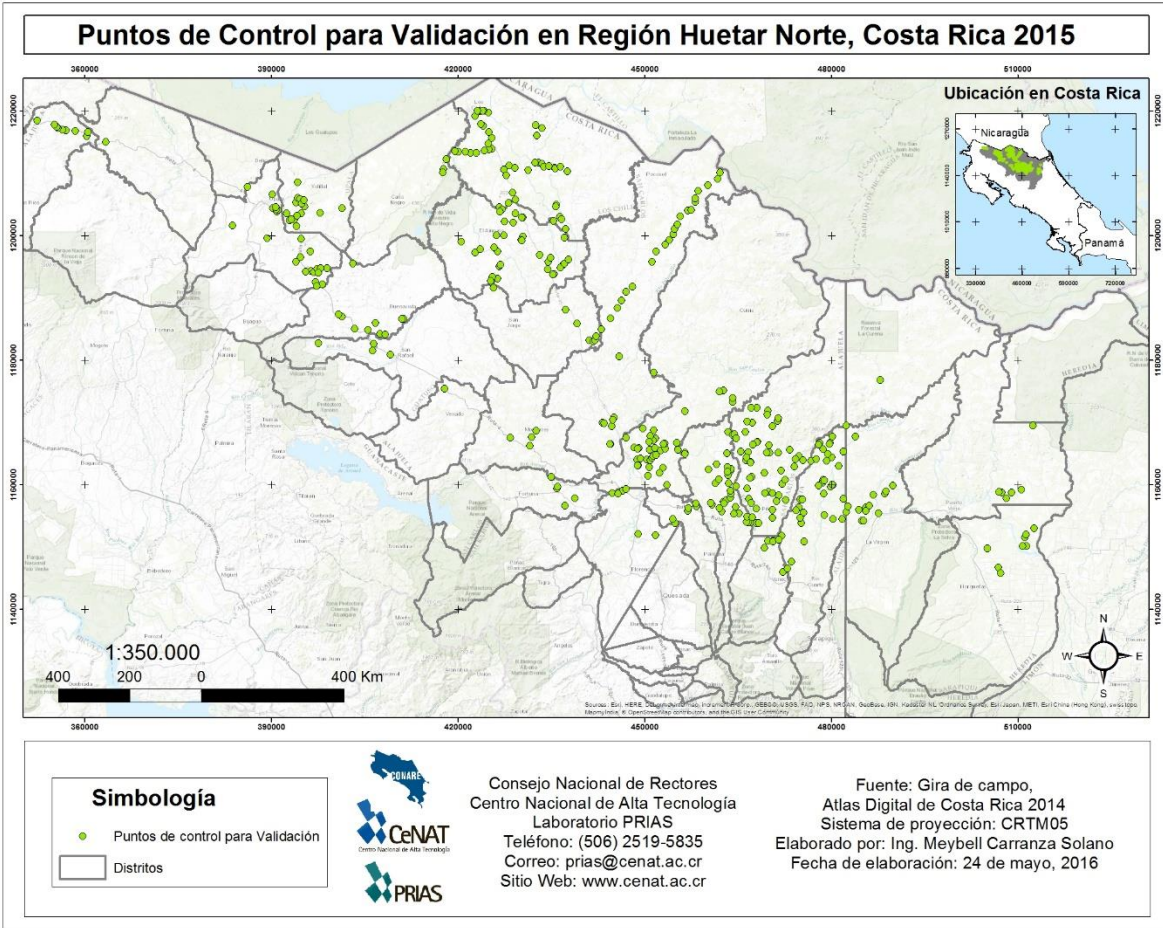


Figura 13. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Norte, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

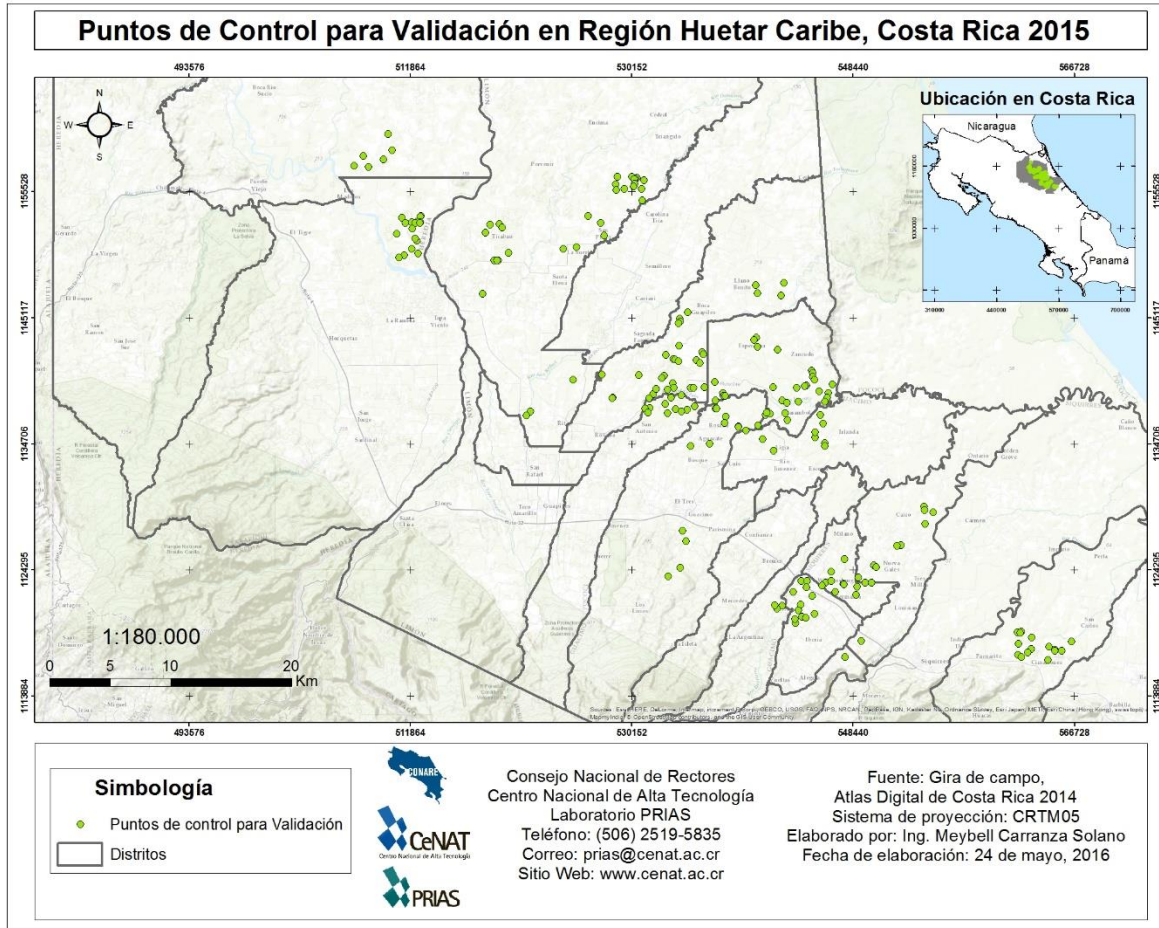


Figura 14. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Huetar Caribe, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

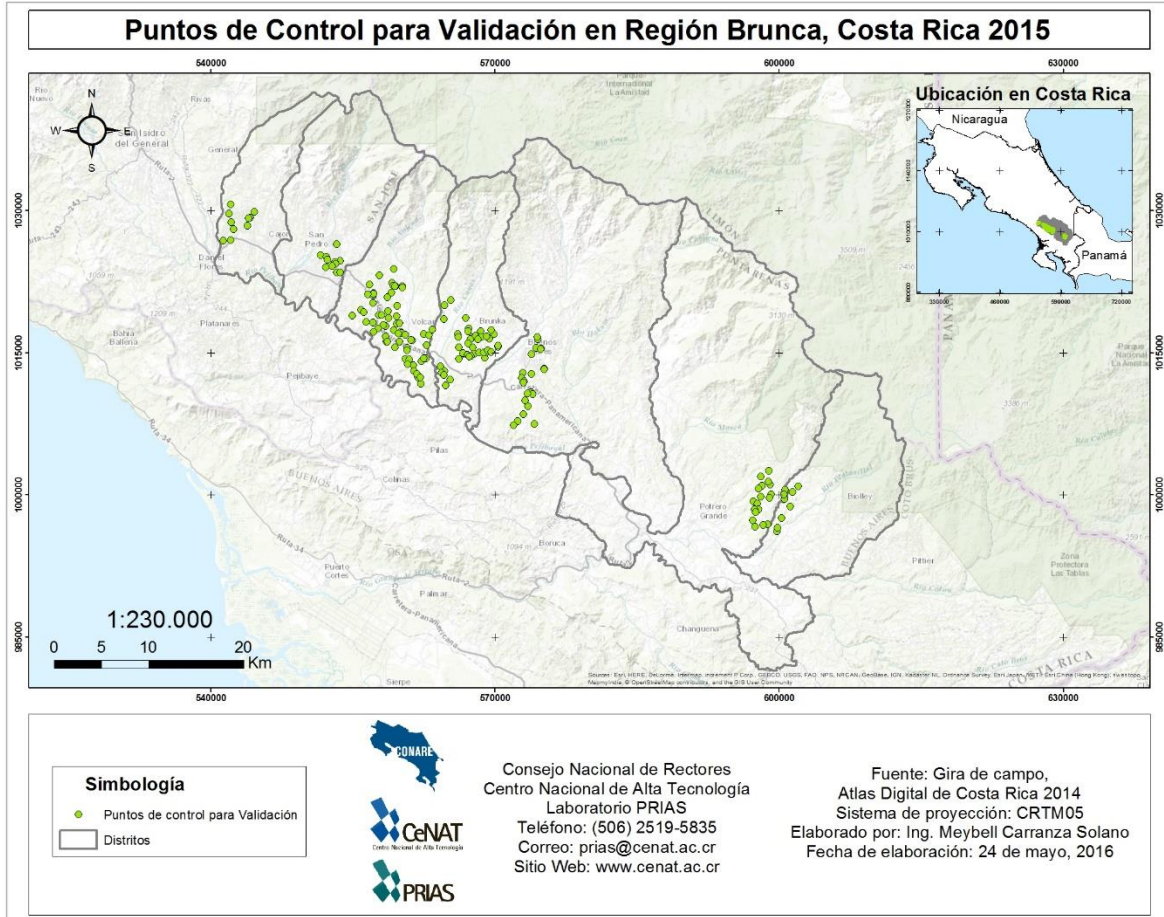



Figura 15. Mapa de puntos de control para la validación de imágenes Landsat 8, Región Brunca, Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 42 de 101

5.5. Descarga de imágenes Landsat 8


En el **Informe I Versión I** se presentó el Manual de descarga de imágenes Landsat 8 utilizando la plataforma web: <http://earthexplorer.usgs.gov/logout/expire>. Este manual se encuentra disponible en digital en el Disco de datos que acompaña este informe en la carpeta nombrada como “*Manuales*”.

De igual forma se adjuntan las imágenes que se utilizaron para llevar a cabo la clasificación y obtención de coberturas de piña en el país en la carpeta nombra como “*Imagenes*”.

5.6. Preprocesamiento de imágenes

El preprocesamiento realizado en las imágenes Landsat 8 consistió en corregir los efectos de la atmósfera por medio de la herramienta FLASSH de ENVI, el manual para este proceso está disponible en el **Informe I Versión II Final**. Además se encuentra en digital en la carpeta “Manuales”.

Además, se incluyó en el preprocesamiento la extracción de nubes por medio de un segmentador de imágenes (Berkeley Image Seg), los segmentos de nubes y sombra de nubes fueron creados como una máscara que se aplicó luego a las imágenes en el proceso de clasificación para que el clasificador no tomara en cuenta estos valores a la hora de correr el algoritmo de asignación de valores a los píxeles.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 43 de 101

5.7. Búsqueda de fincas y acuerdos con finqueros


En el **Informe I Versión I** se expuso en detalle los sitios visitados con el fin de establecer un acercamiento inicial con dueños de fincas de piña que permitieran luego establecer un muestreo de firmas espectrales en el campo. No fue posible contar con el aval de PINDECO para efectuar las mediciones en campo en la Región Brunca, acorde a lo mencionado en la sección 5.3 de este documento.

En la tabla 2 se resumen las características de cada una de las fincas estudiadas a partir de firmas espectrales de campo.

Tabla 2. Información básica de las fincas de muestreo de firmas espectrales distribuidas en las tres regiones de estudio, Laboratorio PRIAS, 2016.

Región	Nombre de Finca	Ubicación Geográfica	Tipo de suelo	Compañía Propietaria	Contacto en finca	Contacto SFE	Características
RHN	Yarinacocha	10,81423 -84,60092	Ultisol	Inversiones Yarinacocha	William Allan	Ricardo Guzmán	Suelo cubierto con plástico en cultivo de piña menor a 6 meses. Pendientes entre 10 y 20% (Olor fuerte a sustancias químicas luego de la quema de la piña).
RHC	Del Monte Babilonia	10,16025 -83,59655	Inceptisol	Corporación de Desarrollo Agrícola del Monte S.A.	Jairo Treviño	Tomás Rojas	Alta pedregosidad, muchas zonas anegadas dentro de las plantaciones. Pendientes inferiores al 10%.
RB	La Guaria	9,25936 -83,53560	Ultisol	Wilberth Salazar Castro	Wilberth Salazar Castro	William Pizarro	Pendientes superiores al 20%.

Fuente: elaboración propia

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 45 de 101

5.8. Establecimiento del diseño de muestreo

En el *Informe I Versión II Final* se indicó el diseño de muestreo a aplicar. Sin embargo, basado en la consulta con expertos internacionales de la Universidad de Alberta de Canadá y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y los estudios exploratorios realizados en campo se determinó que por el tipo de cultivo no es posible efectuar un diseño de parcelas de tamaño conocido, por lo que se redefinió el sistema para el muestreo de firmas espectrales en campo.

Basado en la importancia de tener la representatividad de un pixel de Landsat 8 se definieron cuatro transeptos de treinta metros de largo en cada estadio. Estos transeptos fueron distribuidos de forma aleatoria en un área aproximada mayor a 900 m², para evitar el traslape de la información entre pixeles cercanos.

Por tanto, la definición del diseño de muestreo para futuros sistemas de monitoreo de cultivos deberá estar en función del sistema de siembra que tenga el cultivo. Para este caso en piña, existen fincas que tienen un sistema de siembra con bolsa por lo tanto, no es posible marcar las parcelas completas. Por otro lado, la distribución de las plantas de piña dificulta la medición en plantaciones con edades superiores a los seis meses de plantada, por lo que para unificar criterios de medición se decidió aplicar un sistema de transeptos sobre los bordes de las plantaciones en cada estadio.


5.9. Toma de firmas espectrales

Para medir la respuesta espectral se utilizó un espectrorradiómetro de campo FieldSpec® modelo HandHeld 2™. El instrumento utilizado cubre el rango del espectro electromagnético comprendido entre las longitudes de onda de 325 nm a 1075 nm con un ancho de banda de 1,6 nm, abarca tanto la región visible (VIS) (400-725 nm) como el infrarrojo cercano de onda corta (NIR) (750-1075 nm).

Las mediciones se realizaron directamente sobre la copa de la planta utilizando la fibra óptica ensamblada en una grúa móvil para facilitar las mediciones, ésta se colocó a una distancia mayor de 30 cm para abarcar un área representativa de la planta. Se utilizó un panel *Spectralon* (blanco de referencia) para efectuar las calibraciones en el instrumento.

Las mediciones se realizaron *in situ* durante el mes de marzo de 2016, entre las 9:00 -13:00 horas. En cada finca se seleccionaron aleatoriamente cuatro puntos en los que se trazó un transepto de 30 metros en cada uno de los estadios establecidos anteriormente (ver sección 5.1 de resultados). Para un total de cuatro transeptos por estadio y dieciséis transeptos por finca.

En cada transepto se trazaron tres puntos de control a una distancia de diez metros cada uno. Para medir la reflectancia total por planta, sobre cada punto se tomaron un total de 10 repeticiones de firmas con el espectrorradiómetro. Cada punto de muestreo se realizó sobre la copa de una planta y fue registrado espacialmente con un GPS Oregon 550. En una hoja de registro se anotó la posición del transepto, el código del espectrorradiómetro, las condiciones climáticas, las condiciones fitosanitarias, características del sitio (suelo, pendiente), la hora de adquisición de datos y una fotografía con cámara digital Canon EOS REBEL T2i. Las calibraciones del instrumento tanto de Optimización, como Dark Current y White Reference se realizarán antes y después de la medición de cada planta.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 47 de 101

Además de los datos espectrales se colectó una muestra de suelo de cada finca visitada para estudiar la relación de los componentes del suelo con la firma espectral. Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Foliarés del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

5.10. Procesamiento de firmas espectrales

Las firmas obtenidas con el espectrorradiómetro en campo fueron descargadas con la herramienta *HH2 Sync* del software *View Spec Pro*, propio del *Hand Held 2*. El formato de salida de los datos es del tipo *.asd*.

Una vez obtenidos los datos del instrumento se realizó una transformación de los datos del tipo *.asd* a tipo de archivo *.txt*, con el software *View Spec Pro*, para ser procesados en el software Excel. Se creó un archivo Excel (*.xls*) que contiene tanto los valores de reflectancia de la firma espectral; así como, las observaciones realizadas en campo y los valores complementarios a la firma espectral (fotos, puntos gps, distancias, entre otros). Las firmas espectrales de piña obtenidas en campo fueron sometidas a un proceso de depuración y corrección basado en la fórmula descrita por Peddle, White, Soffer, Miller, & LeDrew (2001):

$$Reflectancia = \frac{Valor\ de\ la\ firma}{Valor\ del\ panel} * valor\ reportado\ del\ panel \quad \text{Ecuación 1}$$

Una vez corregidos los datos se generan un total de 120 firmas espectrales por estadio. Para un total de 480 firmas por finca. Las 10 firmas adquiridas por cada toma se promediaron para obtener un total de 3 firmas espectrales por repetición (por transepto), para un total de 12 firmas espectrales por estadio. A su vez los datos por repetición se promediaron para obtener un total de cuatro firmas espectrales por estadio y un total de 16 firmas espectrales por finca. Las tablas de Excel se presentan en el archivo digital adjunto a este documento dentro de la carpeta “Firmas Espectrales\Datos Excel Firmas Espectrales”.

5.11. Discriminación de valores / análisis estadístico

Los valores promedio de las firmas espectrales de piña en unidades de reflectancia fueron sometidos a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilks. Anteriormente en el Informe I_Versión II_Final se indicó que se aplicaría una prueba paramétrica. Sin embargo, al obtener el número total de datos a analizar ($n=48$) se decidió aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks apropiada cuando el tamaño de la muestra es igual o inferior a 50 casos. Esta prueba proporciona un valor de *p-value* que puede encontrarse entre 0 y 1, cuanto mayor sea este número es más probable que la distribución sea normal. Un valor de *p-value* superior a 0,05 describe una curva normal *Gausiana* con un valor de confianza del 95%. De no encontrar normalidad en los datos se puede aplicar una función que permita transformar los datos para tratar de normalizar los valores iniciales. Para este caso se aplicó la transformación de los datos aplicando la ecuación 2.

$$x_1 = \ln(x + 1)$$

Ecuación 2

Donde:

$x_1 = \text{valor de firma espectral normalizado}$

$\ln = \text{logaritmo natural}$

$x = \text{valor de firma espectral no normalizado}$

Resultados Shapiro-Wilks

La tabla 3 presenta los valores obtenidos para la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks aplicada a los valores promedio de firmas espectrales obtenidos por banda equiparada a Landsat 8.

Tabla 3. Resultados prueba Shapiro-Wilks modificado para firmas espectrales de piña de tres regiones productivas de Costa Rica.

Banda	Variable	n	media	D.E.	W*	P(Unilateral D)
1	Aerosol costero 430-450	48	0,0412	0,0661	0,3363	<0,0001
2	Azul 450-510	48	0,0462	0,0665	0,3812	<0,0001
3	Verde 530-590	48	0,0753	0,0668	0,4907	<0,0001
4	Rojo 640-670	48	0,0692	0,0744	0,6151	<0,0001
5	Infrarrojo 850-880	48	0,4334	0,1309	0,9369	0,0618

n = número de observaciones/ media= promedio de la población/ D.E.= desviación estándar/ W*= valor del estadístico W de Shapiro-Wilks/ P (Unilateral D)=probabilidad

La tabla 3 muestra que la probabilidad es menor que el valor de p-value=0,05; por lo tanto, los datos no siguen una distribución normal para las bandas 1, 2, 3 y 4. Al encontrar que únicamente los valores dentro de la banda 5 presentan una distribución normal se aplicó la transformación para todos los datos, basado en la ecuación 2 anteriormente descrita. Estos datos están disponibles en la versión digital del informe.

En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para datos transformados a partir de la ecuación 2.

Tabla 4. Resultados prueba Shapiro-Wilks modificado para valores transformados de firmas espectrales de piña de tres regiones productivas de Costa Rica.

Banda	Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
1	Aerosol costero 430-450	48	0,0388	0,0538	0,3714	0,0001
2	Azul 450-510	48	0,0436	0,0542	0,4238	0,0001
3	Verde 530-590	48	0,0710	0,0542	0,5439	0,0001
4	Rojo 640-670	48	0,0649	0,0623	0,6642	0,0001
5	Infrarrojo 850-880	48	0,4334	0,1309	0,9369	0,0618

n = número de observaciones/ media= promedio de la población/ D.E.= desviación estándar/ W*= valor del estadístico W de Shapiro-Wilks/ P (Unilateral D)=probabilidad

Se encontró que los datos no siguen una distribución normal aún luego de la transformación logarítmica. Por lo tanto, se determinó que los valores de firmas espectrales no siguen una distribución normal para los valores que se encuentran en las bandas 1, 2, 3 y 4. Por lo cual, se decidió aplicar la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para determinar las diferencias significativas en los valores de las firmas espectrales por región y por estadio del cultivo de piña.

Resultados Kruskal Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis, también conocida como prueba H de Kruskal-Wallis, es un método no paramétrico con el cual no se asume la normalidad de los datos, se utiliza para comparar la heterogeneidad de más de dos muestras independientes, es una alternativa para el Análisis de Varianza Simple (ANDEVA de un factor) cuando no se cumplen los supuestos paramétricos. Además, sirve para comparar más de dos grupos independientes respecto a una variable de respuesta con un nivel de medida ordinal o de intervalo pero no normal (Rial Boubeta & Varela Mallou, 2008).

Para contrastar los valores entre regiones y estadios de firmas espectrales de piña se utilizó la comparación de a pares para medias de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de 0,05 (95% de confiabilidad).

a) Kuskal-Wallis entre regiones para un mismo estadio

- ***Estadio mayor a seis meses***

La tabla 5 resume los valores encontrados al aplicar la prueba de comparación de medias de Kruskal-Wallis.

Tabla 5. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio mayor a seis meses, en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Región	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Norte	0,04±0,01 a	0,04±0,01 a	0,05±0,01 a	0,03±0,01 a	0,44±0,05 b
Caribe	0,02±0,01 a	0,02±0,01 ab	0,05±0,01 a	0,03±0,01 a	0,36±0,03 a
Brunca	0,02±0,0032 b	0,02±0,0036 b	0,05±0,01 a	0,03±0,01 a	0,56±0,07 ab

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En el estadio identificado como mayor a seis meses (Ver figura 16), en el cual la planta tiene presencia de flores y frutos y sus hojas son más anchas y alargadas se encontraron diferencias significativas entre regiones. Al analizar las cinco diferentes bandas dentro del rango espectral de Landsat 8 se encontró que para el caso de la banda 1 hay diferencias entre la Región Brunca respecto a las otras dos regiones. Por otro lado, para el caso de la banda 2 hay diferencias entre la Región Brunca y Norte, para el caso de la banda 3 que abarca el rango espectral en el cual interviene la clorofila y la banda 4 de igual forma relacionada con la fotosíntesis, no existen diferencias significativas entre regiones, por último en la banda que abarca el infrarrojo se encontraron diferencias entre las regiones Norte y Caribe. Basado en los resultados de este análisis no es posible identificar una firma única para Costa Rica en el estadio de piña mayor a seis meses.

La figura 16 muestra los valores observados en campo para el cultivo de piña muestreado en cada una de las tres regiones de estudio en el estadio mayor a seis meses de edad.



Figura 16. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio mayor a seis meses. (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB)

- **Estadio menor a seis meses**

En la tabla 6 se detallan los resultados obtenidos del análisis estadístico entre regiones para el estadio menor a seis meses.

Tabla 6. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio menor a seis en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Región	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Norte	0,03±0,003 b	0,03±0,0032 b	0,06±0,01 a	0,03±0,0039 b	0,64±0,06 a
Caribe	0,02±0,001 a	0,02±0,0011 a	0,04±0,0029 ab	0,02±0,0026 a	0,46±0,01 a
Brunca	0,02±0,0035 b	0,03±0,01b	0,08±0,02 b	0,05±0,01 ab	0,55±0,09 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados estadísticos demuestran que en el estadio menor a seis meses en el cual la planta se encuentra en estado de crecimiento vegetal, las hojas son más pequeñas se dan diferencias en las tres regiones en las bandas 1, 2, 3 y 4 (ver figura 17). En la banda 5 no se encontraron diferencias significativas. Por otro lado, dentro de las bandas que presentan diferencias, la región que más difiere del resto es la región Caribe.

De esta forma se identifican las diferencias entre fincas por cada región lo que determina que no es posible generar una firma espectral única de piña menor a seis meses para Costa Rica. La figura 17 muestra los valores observados en campo para el cultivo de piña muestreado en cada una de las tres regiones de estudio en el estadio menor a seis meses.

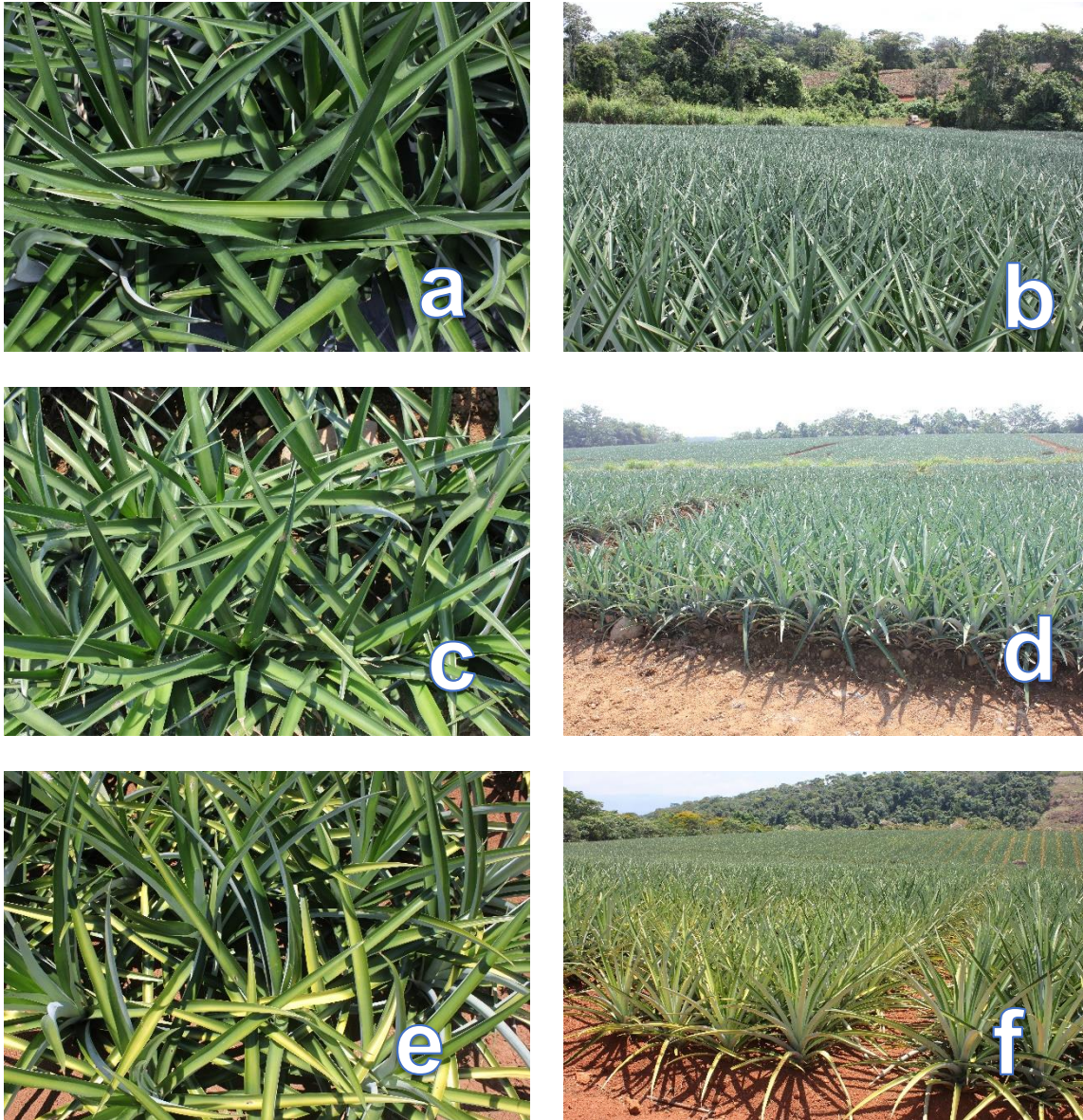


Figura 17. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio menor a seis meses. (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB)

- **Estadio piña podada**

En la tabla 7 se presentan los valores obtenidos al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis para valores de firmas espectrales en el estadio de piña podada en tres distintas regiones de Costa Rica.

Tabla 7. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio de piña podada en tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Región	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Norte	0,04±0,0025 a	0,04±0,0025 a	0,06±0,0024 a	0,05±0,0035 a	0,39±0,03 a
Caribe	0,15±0,22 a	0,16±0,22 a	0,18±0,21 a	0,18±0,21 a	0,49±0,20 a
Brunca	0,02±0,0032 a	0,03±0,0035 a	0,05±0,01 a	0,04±0,01 a	0,40±0,03 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Al efectuar las comparaciones de medias se determinó que este estadio no presenta diferencias significativas entre ninguna de las fincas evaluadas en cada una de las regiones de estudio en ninguno de los rangos espectrales estudiados (ver figura 18). Por lo que es posible generalizar la firma espectral de piña podada a nivel de las tres fincas, sin embargo, deben aplicarse más estudios que permitan asegurar que no hay diferencias a nivel de país, dado que, este estudio piloto permite identificar las diferencias entre fincas de diferentes regiones únicamente.

La figura 18 muestra los valores observados en campo para el cultivo de piña muestreado en cada una de las tres fincas en las tres regiones de estudio para el estadio de piña podada.

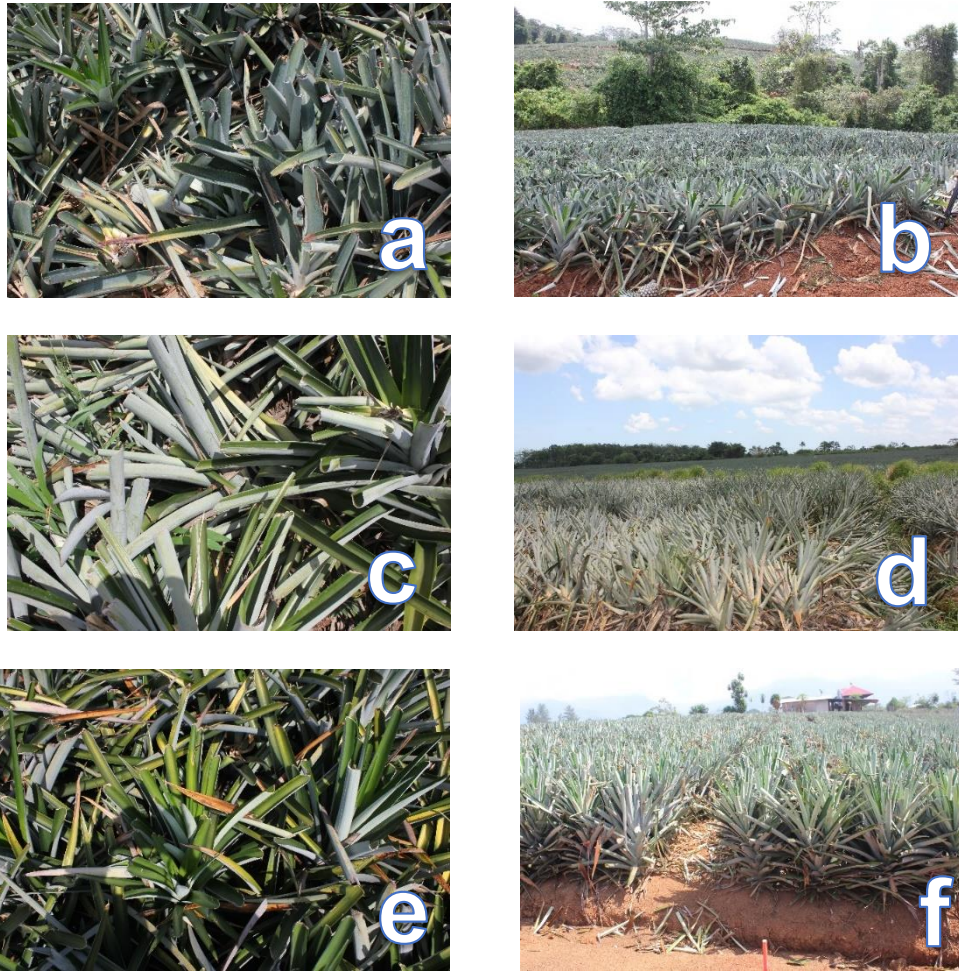


Figura 18. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio podada (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB).

- **Estadio piña quemada**

La tabla 8 presenta los valores obtenidos al efectuar el análisis de datos con la prueba Kruskal-Wallis para el estadio de plantas quemadas en las fincas ubicadas en cada una de las tres regiones de estudio.

Tabla 8. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en el estadio quemada para tres regiones en Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Región	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530- 590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850- 880
Norte	0,04±0,01 b	0,05±0,01 a	0,09±0,02 a	0,13±0,04 a	0,30±0,06 b
Caribe	0,04 ±0,0026 a	0,05±0,0047 a	0,08±0,01 a	0,12±0,01 a	0,22±0,02 a
Brunca	0,06±0,01 ab	0,07±0,01 a	0,11±0,02 a	0,12±0,03 a	0,40±0,06 ab

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Se determinó que existen diferencias significativas en las regiones Norte y Caribe para las bandas 1 y 5. Por otro lado en las bandas 2, 3 y 4 no presentan diferencias significativas.

De esta forma se identifican las diferencias entre fincas por cada región, lo que permite inferir que no es posible generar una firma espectral única de piña quemada para Costa Rica.

La figura 19 muestra los valores observados en campo para el cultivo de piña muestreado en cada una de las tres fincas en las tres regiones de estudio para el estadio de piña quemada.

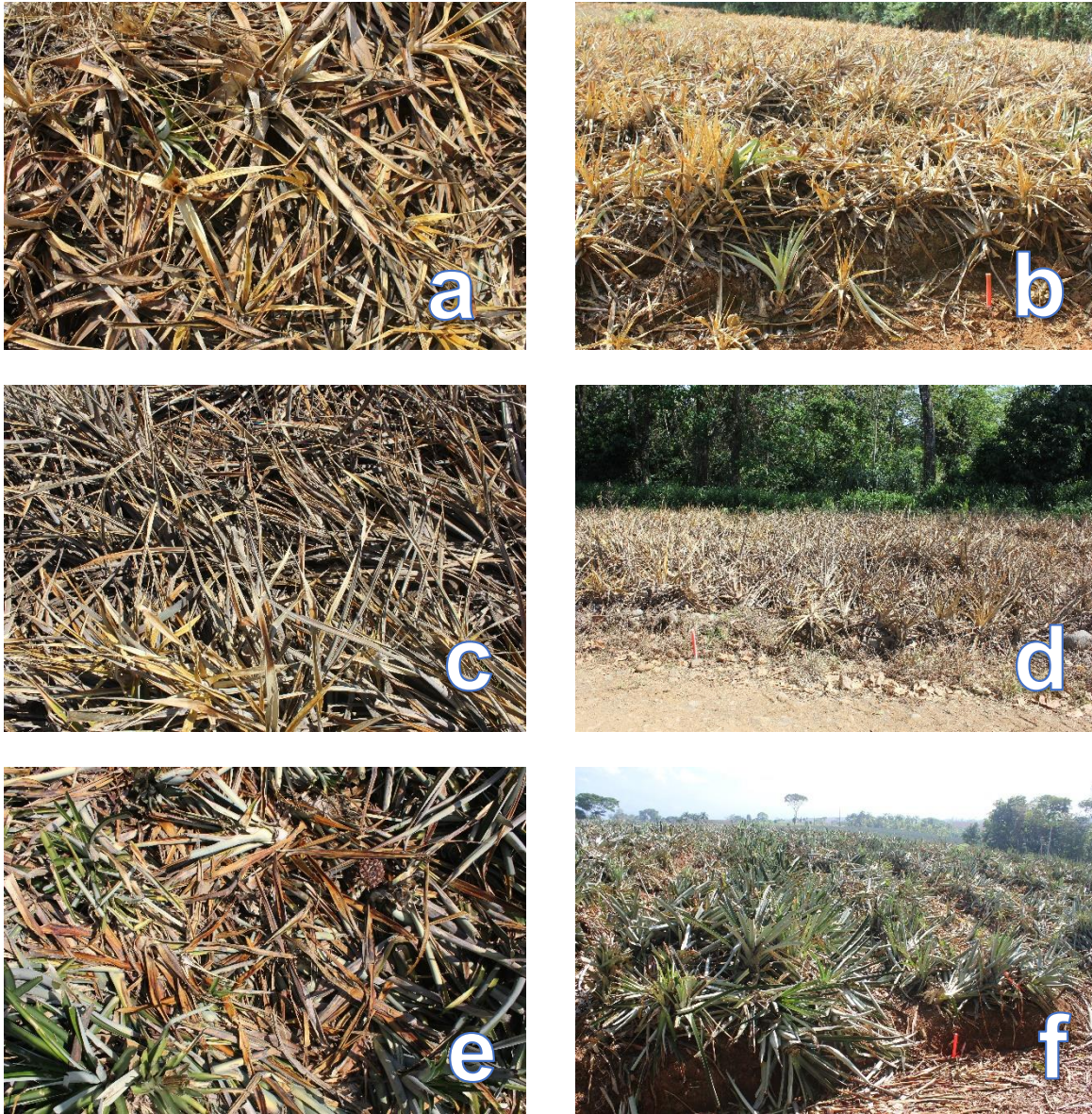


Figura 19. Vista vertical y horizontal de plantaciones de piña en el estadio quemado (a y b RHN) (c y d RHC) (e y f RB).

A nivel general se observa que comparado los valores obtenidos para los cuatro estadios no hay diferencias significativas en las bandas 3 (verde) y 4 (rojo) entre regiones en los estadios mayores a seis, podado y quemado. Las diferencias en estas bandas se presentan únicamente en el estadio menor a seis meses, lo que puede indicar que a nivel de madurez de la plata, no hay variaciones en estos dos canales específicos por lo que se pueden realizar estudios futuros que se dediquen a analizar estos dos canales a nivel de fincas productivas de piña en el país.

b) Kruskal-Wallis dentro de una misma región entre estadios.

Las tablas 9, 10 y 11 resumen los resultados encontrados al efectuar el análisis de comparación entre los cuatro estadios valorados en campo para cada una de las fincas estudiadas en las tres distintas regiones de producción de piña en Costa Rica. Para todos los casos se identifican las variables de muestreo de estadios de piña de la siguiente forma: piña mayor a seis meses (Ma), piña menor a seis meses (Me), piña podada (P) y piña quemada (Q), esto con el fin de facilitar la lectura de los datos dentro de la tabla.

- **Región Huetar Norte**

La tabla 9 presenta los resultados obtenidos al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis en los valores de las firmas espectrales obtenidos en la finca de Inversiones Yarinacocha S.A. ubicada en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Tabla 9. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Estadio	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Ma	0,04±0,01 a	0,04±0,01 ab	0,05±0,01 a	0,03±0,01 a	0,44±0,05 bc
P	0,04±0,0025 a	0,04±0,0025 ab	0,06±0,0024 ab	0,05±0,0035 ab	0,39±0,03 ab
Me	0,03±0,0033 a	0,03±0,0032 a	0,06±0,01 a	0,03±0,039 a	0,64±0,06 c
Q	0,04±0,01 a	0,05±0,01 b	0,09±0,02 b	0,13±0,04 b	0,30±0,06 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En esta finca se encontraron diferencias en el estadio quemado contra los estadios menor y mayor a seis, mientras que el estadio podado describe un comportamiento similar al de la piña en estado de poda.

- **Región Huetar Caribe**

En la tabla 10 se presentan los valores obtenidos al aplicar la prueba de comparación de medias de Kruskal-Wallis en la finca ubicada en la región RHC, Finca Babilonia perteneciente a la compañía DOLE S.A.

Tabla 10. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Estadio	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Ma	0,02±0,01a	0,02±0,01a	0,05±0,01a	0,03±0,01 ab	0,36±0,03 ab
P	0,15±0,22a	0,16±0,22a	0,18±0,21a	0,18±0,21 b	0,49±0,20 b
Me	0,02±0,001a	0,02±0,0011a	0,04±0,0029 a	0,02±0,0026 a	0,46±0,01 b
Q	0,04±0,006a	0,05±0,0047a	0,08±0,01a	0,12±0,01 b	0,22±0,02 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Para esta finca se encontraron diferencias únicamente en las bandas 4 y 5. Específicamente en los estadios menores a seis contra el resto de estadios para la banda 4 y quemado contra podado y menor a seis para la banda 5. Por lo que para este caso se puede ver que espectralmente hay una mayor influencia de la estructura de la planta sobre los patrones diferenciales espectrales.

- **Región Brunca**

En la tabla 11 se presentan los valores obtenidos al analizar estadísticamente los valores de firmas espectrales obtenidas en la finca ubicada en la región Brunca de Costa Rica, para los diferentes estadios mencionados anteriormente.

Tabla 11. Resultados prueba Kruskal-Wallis para valores de medias de firmas espectrales en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda	1	2	3	4	5
Estadio	Aerosol costero 430-450	Azul 450-510	Verde 530-590	Rojo 640-670	Infrarrojo 850-880
Ma	0,02±0,0032 a	0,02±0,0036 a	0,05±0,01 a	0,03±0,01 a	0,56±0,07 b
P	0,02±0,0032 ab	0,03±0,0035 a	0,08±0,01 ab	0,04±0,01 ab	0,40±0,03 a
Me	0,02±0,0035 ab	0,03±0,01 ab	0,05±0,02 bc	0,05±0,01 ab	0,55±0,09 b
Q	0,06±0,01 b	0,07±0,01 b	0,11±0,02 c	0,12±0,03 b	0,40±0,06 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

En la región Brunca la finca bajo estudio muestra valores significativamente distintos en todas las bandas. Para la banda que abarca el canal del aerosol costero se observan diferencias en los estadios mayores de seis meses y áreas quemadas. En la banda 2 hay diferencias en plantas quemadas contra mayores a seis y podadas. En la banda 3 en las plantas quemadas contra las mayores a seis y podadas y en las bandas 4 hay diferencias en las plantas quemadas contra mayor a seis. Por último, en la banda 5 hay diferencias en las plantas quemadas contra menor y mayor a seis meses.

Análisis de correlación de Spearman (ρ)

La prueba aplicada para analizar la correlación de nutrientes con los datos espectrales fue el coeficiente de correlación de Spearman (prueba no paramétrica) para datos superiores a 20 casos, el cual da una medida de la correlación entre variables aleatorias continuas (Rodríguez et al. 2001).

Además de las firmas espectrales colectadas en campo se obtuvieron datos del suelo en cada una de las fincas estudiadas, tal como se describió en la sección 5.9., anteriormente. Estos datos se encuentran disponibles en la carpeta “Datos Suelos” disponible en el archivo de entregas digitales del proyecto. De cada sitio muestreado se tomaron al azar cuatro muestras de suelo distribuidas a lo largo del área de muestreo en donde se colectaron las firmas espectrales, esto con el objetivo de estudiar si hay correlación con algún nutriente del suelo y el comportamiento espectral de la planta.

De acuerdo con Martínez-Ortega et al. (2009), diversos autores han definido varias interpretaciones de escala para el coeficiente de Spearman:

- Escala 1: El coeficiente de correlación oscila entre -1 y $+1$, el valor 0 que indica que no existe asociación lineal entre las dos variables en estudio.
- Escala 2:
 - Correlación negativa perfecta -1
 - Correlación negativa fuerte moderada débil $-0,5$
 - Ninguna correlación 0
 - Correlación positiva moderada Fuerte $+0,5$
 - Correlación positiva perfecta $+1$

- Escala 3:
 - Perfecta $R = 1$
 - Excelente $R = 0.9 \leq R < 1$
 - Buena $R = 0.8 \leq R < 0.9$
 - Regular $R = 0.5 \leq R < 0.8$
 - Mala $R < 0.5$
- Escala 4: Rango Relación
 - 0 – 0,25: Escasa o nula
 - 0,26-0,50: Débil
 - 0,51- 0,75: Entre moderada y fuerte
 - 0,76- 1,00: Entre fuerte y perfecta 5

Tal como lo mencionan Martínez-Ortega et al. (2009) los signos positivos o negativos solo indican la dirección de la relación; un signo negativo indica que una variable aumenta a medida que la otra disminuye o viceversa, y uno positivo que una variable aumenta conforme la otra también lo haga o disminuye, si la otra también lo hace.

Para esta investigación se tomaron en cuenta los valores de Carbono (C), Materia Orgánica (MO), Acidez del suelo (PH), Nitrógeno (N), Potasio (K) y Fósforo (P) encontrados a nivel de suelo y se correlacionaron con los valores de las firmas espectrales obtenidos para cada uno de los rangos espectrales calculados anteriormente (relacionados con bandas de Landsat 8), en cada una de las tres fincas evaluadas en cada región de estudio.

- **Región Huetar Norte**

En la tabla 12 se muestran los resultados encontrados al aplicar el índice de correlación de Spearman a fin de encontrar si existe un tipo de relación entre los nutrientes presentes en el tipo de suelo y el comportamiento espectral de planta de piña Huetar Norte.

Tabla 12. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda de Landsat 8	Rango espectral	C	MO	PH	N	K	P
1	Aerosol costero 430-450	-0,55	-0,55	-0,55	-0,61	-0,58	-0,28
2	Azul 450-510	-0,30	-0,30	-0,29	-0,71	-0,57	-0,09
3	Verde 530-590	0,07	0,07	0,24	-0,63	-0,47	-0,13
4	Rojo 640-670	-0,24	-0,24	-0,12	-0,84	-0,70	-0,25
5	Infrarrojo 850-880	0,35	0,35	0,31	0,86	0,70	0,16

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que existe una correlación “negativa mala” (basado en la escala 3 definida anteriormente) entre la mayoría de las bandas asociadas a los nutrientes en suelo. Además se encontró en esta finca una alta correlación entre el contenido de materia orgánica y el carbono ($r=1$), en este caso para estos dos nutrientes indica que conforme aumenta el contenido de MO también lo hace la cantidad de C.

Por otro lado, los valores más altos de correlación se dan con el N en el infrarrojo, lo que indica que hay una fuerte presencia de este elemento que determina en cierta forma el comportamiento ascendente de la firma en la banda 5 (infrarrojo se observa una correlación positiva de regular a buena) esto quiere decir que linealmente los datos espectrales aumentan al aumentar linealmente los datos de nutrientes en el suelo. Lo que puede estar relacionado estrechamente con los valores diferenciales encontrados entre fincas de diferentes regiones.

- **Región Huetar Caribe**

En la tabla 13 se muestran los resultados encontrados al aplicar el índice de correlación de Spearman a fin de encontrar si existe un tipo de relación entre los nutrientes presentes en el tipo de suelo y el comportamiento espectral de planta de piña para la región Huetar Caribe.

Tabla 13. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda de Landsat 8	Rango espectral	C	MO	PH	N	K	P
1	Aerosol costero 430-450	0,19	-0,49	0,19	-0,49	0,20	0,29
2	Azul 450-510	0,19	-0,49	0,19	-0,49	0,20	0,29
3	Verde 530-590	0,08	-0,41	0,08	-0,41	0,26	0,36
4	Rojo 640-670	0,29	-0,56	0,29	-0,56	0,13	0,22
5	Infrarrojo 850-880	-0,53	0,80	-0,53	0,80	-0,46	-0,36

Fuente: Elaboración propia

Se observa una correlación regular para los elementos K, P y C respecto a las bandas 1, 2, 3 y 4 en la finca de la región Caribe, por otro lado para la banda 5 únicamente se da correlación entre la MO y el nivel de N. Además se encontró en esta finca una alta correlación entre el contenido de materia orgánica, el carbono y el nitrógeno ($r=1$), teniendo en cuenta la relación de signos se concluye que los niveles de nutrientes ejercen una influencia sobre el valor de la firma espectral, tal como la MO que da lo niveles más altos de correlación (banda 5 = 0,8).

- **Región Brunca**

En la tabla 14 se muestran los resultados encontrados al aplicar el índice de correlación de Spearman a fin de encontrar si existe un tipo de relación entre los nutrientes presentes en el tipo de suelo y el comportamiento espectral de planta de piña en la Región Brunca.

Tabla 14. Resultados prueba correlación de Spearman para valores de firmas espectrales y nutrientes del suelo en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda de Landsat 8	Rango espectral	C	MO	PH	N	K	P
1	Aerosol costero 430-450	-0,17	-0,17	-0,36	-0,49	0,68	0,84
2	Azul 450-510	-0,15	-0,15	-0,34	-0,44	0,72	0,84
3	Verde 530-590	-0,01	-0,01	-0,16	-0,13	0,84	0,75
4	Rojo 640-670	-0,27	-0,27	-0,32	-0,57	-0,27	0,90
5	Infrarrojo 850-880	0,45	0,45	0,30	0,79	0,68	-0,63

Fuente: Elaboración propia

Para esta finca ubicada en la región Brunca, la mayoría de valores tienen una “correlación mala”, con valores negativos que indican que a medida que un factor disminuye el otro aumenta o viceversa, para el caso de los valores en la banda del infrarrojo se puede observar una correlación de mala a regular con signo positivo; es decir, que a medida que aumenta un valor el otro lo hace de igual forma pero no en proporción constante. Esto puede evidenciar las diferencias encontradas estadísticamente a nivel de firmas espectrales entre regiones. Además se encontró en esta finca una alta correlación entre el contenido de materia orgánica y el carbono ($r=1$). Los elementos que mejor se correlacionan son el N, P y K para la mayoría de bandas, lo que puede estar relacionado en la afectación del nivel de fertilidad de suelos con el comportamiento espectral de la región.

5.12. Generación de la firma espectral

Luego del análisis estadístico realizado anteriormente y de acuerdo a los parámetros que arrojaron los datos se procedió a generar las firmas espectrales para cada finca por cada estadio estudiado. Dado que el análisis estadístico no mostró similitudes en las firmas espectrales, por el contrario, se hallaron diferencias en las distintas bandas estudiadas a partir del sensor Landsat 8 y el espectrorradiómetro de campo, se encontraron dificultades para realizar la separación espectral y definir una firma espectral única para Costa Rica, pero sí para cada una de las fincas de estudio en cada región. Por lo tanto, las firmas espectrales generadas se desarrollaron como Bibliotecas Espectrales para ser utilizadas en el software ENVI en sistemas de clasificación supervisada, y podrán ser empleadas en estudios posteriores como parámetro de base para estudios similares a nivel de finca, no así, en estudios de monitoreo a gran escala.

Estas firmas espectrales están en formato accesible para ENVI en la carpeta “Firmas Espectrales” en la versión digital de entrega de este proyecto. De igual forma en la sección 5.18. se encuentran disponibles los gráficos de las firmas espectrales desarrolladas para emplear en la clasificación de las imágenes Landsat 8.

5.13. Reducción de firmas espectrales para Landsat 8

La reducción de firmas espectrales se llevó a cabo con el software Excel, una vez obtenidos los promedios correspondientes por estadio se procedió a reducir los valores de las firmas espectrales a las cinco bandas disponibles de Landsat 8 tal como lo muestra la tabla 15.

Tabla 15. Bandas utilizadas del sensor Landsat 8 para reducir los valores del espectrorradiómetro de campo, Laboratorio PRIAS, 2016.

Banda de Landsat 8	Color de la banda	Longitud de onda (nm)
1	Aerosol costero	430-450
2	Azul	450-510
3	Verde	530-590
4	Rojo	640-670
5	Infrarrojo	850-880

Fuente: Elaboración propia

Para ello se aplicaron promedios de cada uno de los valores obtenidos, a fin de elaborar una firma para cada estadio que contenga la información del valor de la banda y la reflectancia relacionada con ese rango de longitud de onda. Los valores se encuentran disponibles en el archivo Excel generado por cada región en la carpeta “Datos Excel Firmas Espectrales” del archivo digital de entrega.

5.14. Categorización y sistematización en ENVI

Basado en la utilización del software ENVI con la herramienta *Build Spectral Library* se construyeron tres bibliotecas espectrales una para cada región, cada una de estas bibliotecas contiene el valor promedio por cada estadio de la firma espectral escalado a las cinco bandas de Landsat 8 para archivos corregidos atmosféricamente.


Estos archivos se encuentran disponibles en la versión digital listos para ser utilizados con algún algoritmo de clasificación de imágenes de ENVI.

5.15. Clasificación avanzada

Anteriormente en el Informe *I Versión II Final* se definió el modelo de clasificación avanzada a utilizar. En el adjunto digital se encuentra disponible el manual actualizado de **Clasificación de Imágenes** en la carpeta disponible nombrada como “**Manuales**”.

Por otro lado, para incorporar la utilización de las firmas espectrales se seleccionó para cada una de las regiones de estudio la mejor imagen del mes de marzo 2016 (imagen correspondiente al mes de muestreo de las firmas espectrales). De cada una de estas imágenes se substrajo el área de interés (subset data via ROI) correspondiente a la finca muestreada. Al efectuar el “roi” solo se utilizan las 5 bandas de landsat 8 que son compatibles con el rango espectral del espectrorradiómetro.

Luego se aplicó el sistema de clasificación con el algoritmo de *Spectral Angle Mapper*. Para las regiones Norte y Caribe no fue posible aplicar las firmas espectrales a fin de obtener un área clasificada, ya que la imagen de la finca seleccionada estaba cargada de nubes (*cirrus*) que intervinieron en el proceso de separación espectral aplicada por el algoritmo clasificador de ENVI, y que no fueron posibles de eliminar con la corrección atmosférica. Por otro lado, para la Región Brunca si fue posible aplicar las firmas espectrales, los resultados se presentan en la sección 5.18.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 72 de 101

5.16. Depuración de la clasificación

Una vez realizada la clasificación avanzada con See5 utilizando como base los software *ENVI* y *ERDAS* (basado en el manual *Clasificación de Imágenes*), se procedió a continuar el procesamiento del archivo resultante de la clasificación con el software *ArcGIS*. La imagen generada de la clasificación tiene el formato de salida *.img*. Para mejorar el resultado y disminuir los efectos conocidos como “*sal-pimienta*” en una clasificación, se aplicó un filtro de tipo *Majority* (disponible en *Toolboxes/ System Toolboxes/ Spatial Analyst Tools/ Generalization/ Majority Filter*) el cual se encarga de reemplazar las celdas en un ráster según la mayoría de sus celdas vecinas contiguas. Este procedimiento se realizó como parte de etapa de depuración de la clasificación.

Posteriormente la imagen se transformó de formato raster (*.img*) a formato vector (*.shape*) (*Arc Tool Box/ Conversion Tools/ From Raster/ Raster to Polygon*), para luego proceder con la depuración de la clasificación. Este proceso consistió en una limpieza (eliminación, edición y realce de polígonos) de la capa correspondiente al cultivo de piña, para verificar que las áreas clasificadas pertenecieran a la clase correspondiente clasificada como piña por el algoritmo de árboles de decisión.

La etapa de depuración se realizó utilizando como base la imagen Landsat 8, debido a que la clasificación fue generada con dicha imagen; sin embargo, las áreas que se encontraban cubiertas por nubes o que fueron difíciles de identificar con Landsat 8 fueron estudiadas con ayuda de otros insumos disponibles en el Laboratorio PRIAS, tales como: mapa base de *Google Earth*, Mosaico de Ortofotos en formato *.jpg* del SNIT, imágenes RapidEye 2012 y puntos de control de campo, donde las áreas con presencia de cultivo de piña fueron digitalizadas e incluidas en esta clase.

5.17. Validación de la clasificación

Una vez finalizada la etapa de depuración de las coberturas de piña, se realizó la validación de la clasificación. Para la validación se emplearon los puntos colectados en campo, separados previamente, y se generó una malla de puntos “random” con ENVI para tener una mayor exactitud de la validación, dado que los puntos de control no cubrían la totalidad del área encontrada, necesario para aplicar los cálculos de validación descritos por Chuvieco (2010).

Con el software *ENVI* el vector resultante se convirtió a formato *.roi* de *ENVI* con la opción de *Export Layers to ROI* disponible en el menú *File* de *ENVI*. Para ello se utilizó como base la imagen anteriormente clasificada. Seguido a ello con la herramienta *Random Sample* de *ENVI* se aplicó un muestreo aleatorio de puntos. Para generar una malla de puntos a ser empleada en la etapa de validación.

Con la ecuación 3 definida por Chuvieco (2010) se generó la cantidad de puntos requeridos para aplicar la validación:

$$n = \frac{z^2 pq}{L^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

z= nivel de probabilidad normal

p= porcentaje estimado de aciertos

q = porcentaje estimado de errores (1-p)

L= nivel permitido de error

Para este caso se trabajó con un 95% de confianza, el valor de p se calculó basado en el área total cubierta por cada cobertura de piña y el valor de $z=1,64$

Una vez aplicada la ecuación 3, por cada región se obtuvo el valor mínimo de puntos necesarios para aplicar en la validación, estos valores corresponden a 246 puntos para la RHN, 185 puntos para la RHC y 123 puntos para la RB.

Estos datos generados al azar en unión con los puntos tomados en campo (226 puntos de la RHN, 17 puntos de la RHC y 71 puntos de la RB), se utilizaron para realizar la validación de la clasificación, se verificó la cobertura presente en cada uno de ellos, anotando en una tabla la cobertura tomada en la clasificación y la clase real a la cual pertenecía (los datos se encuentran en la versión digital en la carpeta “Validación”). Con dicha tabla se generó una matriz de valoración, en la cual se calculó el nivel de exactitud y el error que se obtuvo en la clasificación de la cobertura de piña en el país.

Una vez verificadas las coberturas con los puntos de control, se generó una matriz de valoración para calcular el nivel de exactitud y el error que se obtuvo en la clasificación, mediante el estadístico Kappa, el cual se encarga de medir el valor observado y el que cabría esperar simplemente por azar, por lo tanto permite conocer si el grado de acuerdo observado se aleja o no significativamente del esperado al azar. La estimación de dicho estadístico se obtiene a partir de la ecuación 4:

$$K_{hat} = \frac{N \sum_{i=1, n}^r x_{ii} - \sum_{i=1, n}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

N es el tamaño de la muestra

x_{ii} el valor observado

$x_{i+} * x_{+i}$ el valor esperado en cada categoría i.

Los resultados del proceso de validación se presentan a continuación para cada una de las regiones estudiadas.

- **Región Huetar Norte**

La tabla 16 muestra los datos de validación para la Región Huetar Norte, la cual se realizó con 472 puntos. En la Clase Real se presentan los valores observados en el momento de la validación y en Cobertura se encuentran los datos generados en la clasificación de la imagen.

Tabla 16. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Cobertura	Clase Real		Total general
	No Piña	Piña	
No Piña	197	18	215
Piña	2	255	257
Total general	199	273	472

Fuente: Elaboración propia

Con base en la clasificación realizada con las imágenes Landsat 8 se obtuvo un área de 37718 ha con un error de 4,24 %. De acuerdo con CANAPEP (2014) se reporta para esta región un total de 18800 ha de piña, lo que es significativamente menor a lo encontrado en este estudio. Los valores encontrados en esta investigación son aproximados y están basados en una revisión de datos actualizados con imágenes Landsat 2015, en aquellas áreas que no fue posible la identificación por medio del algoritmo clasificador de imágenes se utilizaron datos 2012 (Sensor RapidEye) y 2005 (Proyecto CARTA), por lo que se recomienda llevar a cabo una segunda validación externa con verificación de campo para mejorar los valores obtenidos.

Región Huetar Caribe

En la tabla 17 se muestran los valores obtenidos para la Región Huetar Caribe, generados de la validación de la clasificación para esta zona. Los valores de Cobertura corresponden a los obtenidos en la clasificación y los de Clase Real se refieren a los datos observados en las imágenes al momento de la validación. Dicha validación se realizó con 205 puntos.

Tabla 17. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Cobertura	Clase Real		Total general
	No Piña	Piña	
No Piña	18	0	18
Piña	1	186	187
Total general	19	186	205

Fuente: Elaboración propia

En la Región Huetar Caribe se encontró un área de 11579 ha de piña basado en la clasificación de imágenes Landsat 8, con un error de 0,49%. CANAPEP (2014) reportó 12400 ha de piña para la región Atlántica, este dato es superior al encontrado, lo puede ser debido a la presencia de nubes que mantienen áreas con baja visibilidad que hayan quedado por fuera de trazo; o bien, no fueron determinadas por el clasificador, por lo que se recomienda tomar los valores como datos aproximados y en la mejor medida realizar una segunda validación en campo.

Región Brunca

La tabla 18 presenta la matriz generada para la validación de la clasificación del cultivo de piña encontrado en la Región Brunca, basado en 194 puntos de validación. En la categoría de Cobertura se encuentran los valores obtenidos de la clasificación y en Clase Real los valores corresponden a los observados en las imágenes en el momento de la verificación con los puntos de control.

Tabla 18. Valores obtenidos en la matriz de validación de puntos para las áreas de piña encontradas en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Cobertura	Clase Real		Total general
	No Piña	Piña	
No Piña	46	0	46
Piña	4	144	148
Total general	50	144	194

Fuente: Elaboración propia

El sistema de clasificación basado en imágenes Landsat 8 proporcionó un valor de 8030 ha de cultivo de piña, para la Región Brunca, con un error global de tan solo un 2,06%. De acuerdo con los valores reportados por CANAPEP (2014) se tienen 8800 ha de piña para la región pacífica (incluyen datos de la RB y el Pacífico Central). Lo que muestra un valor similar al encontrado en esta investigación pero solo para la Región Brunca como tal, por lo tanto se recomienda llevar a cabo la validación externa con trabajo de campo.

5.18. Imagen validada y clasificada

Se elaboraron las coberturas en formato “.shape” para cada una de las tres regiones de estudio (RHN, RHC y RB). Las figuras 20, 21 y 22 muestran los mapas obtenidos de cobertura de la tierra con plantaciones de piña en cada una de las tres regiones de estudio para el año 2015. Esta información está disponible en sus formatos digitales accesibles para ser utilizados en ArcGIS, QGIS; o bien, cualquier otro software que soporte archivos en formato .shape.

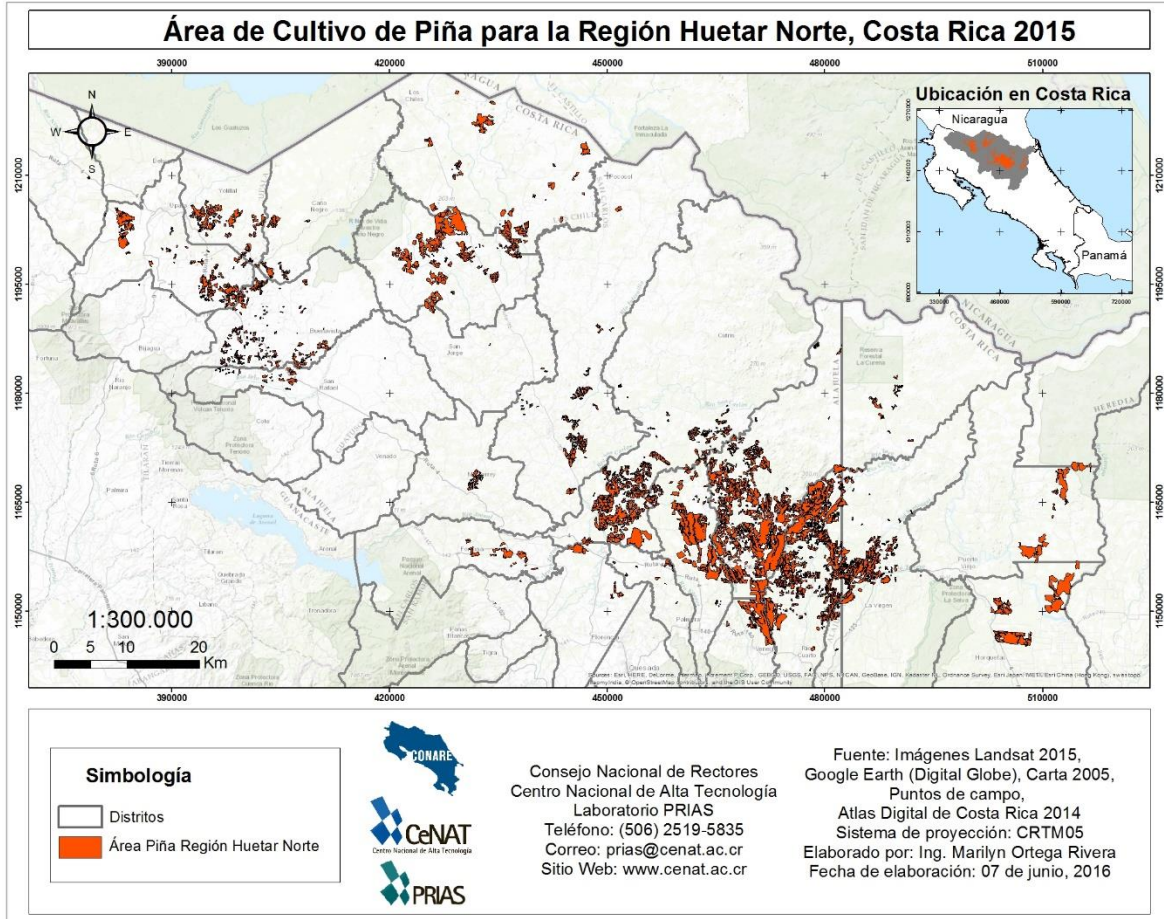


Figura 20. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

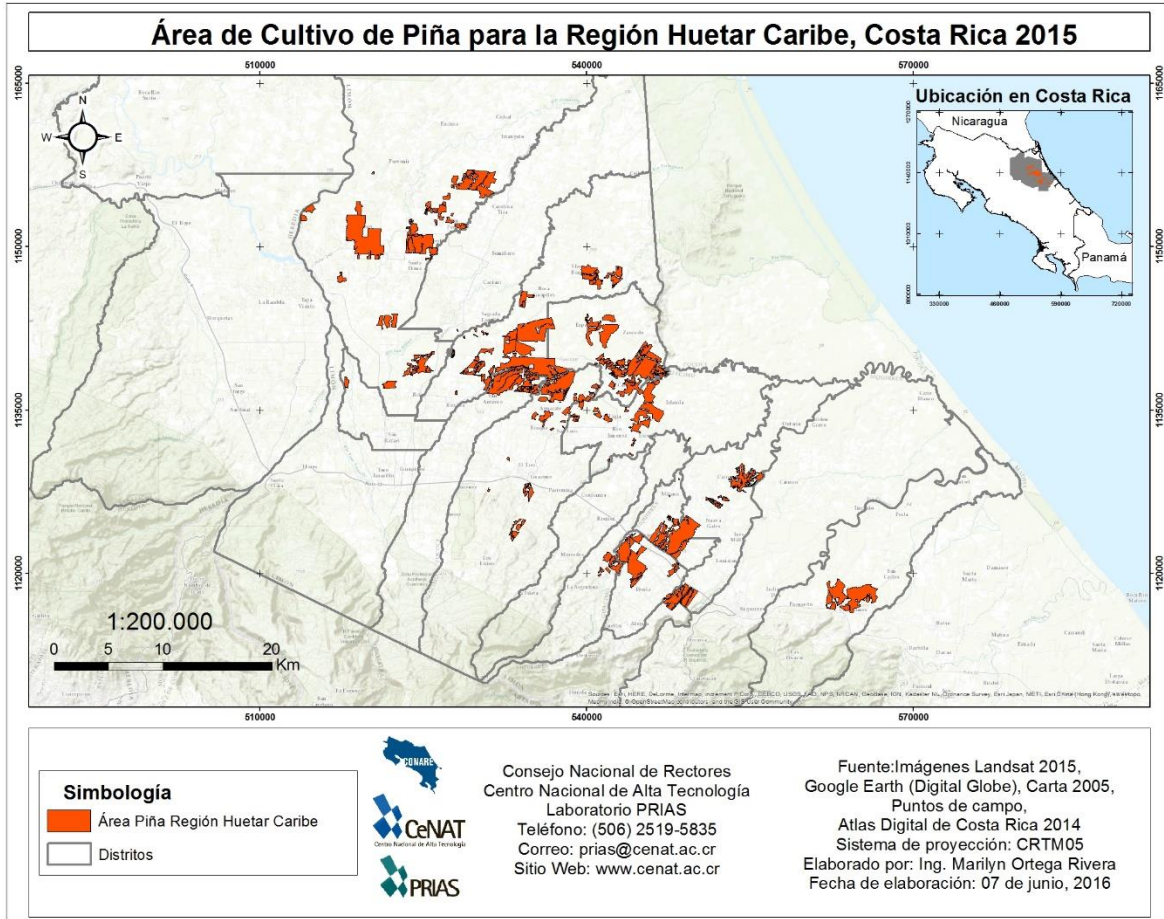


Figura 21. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

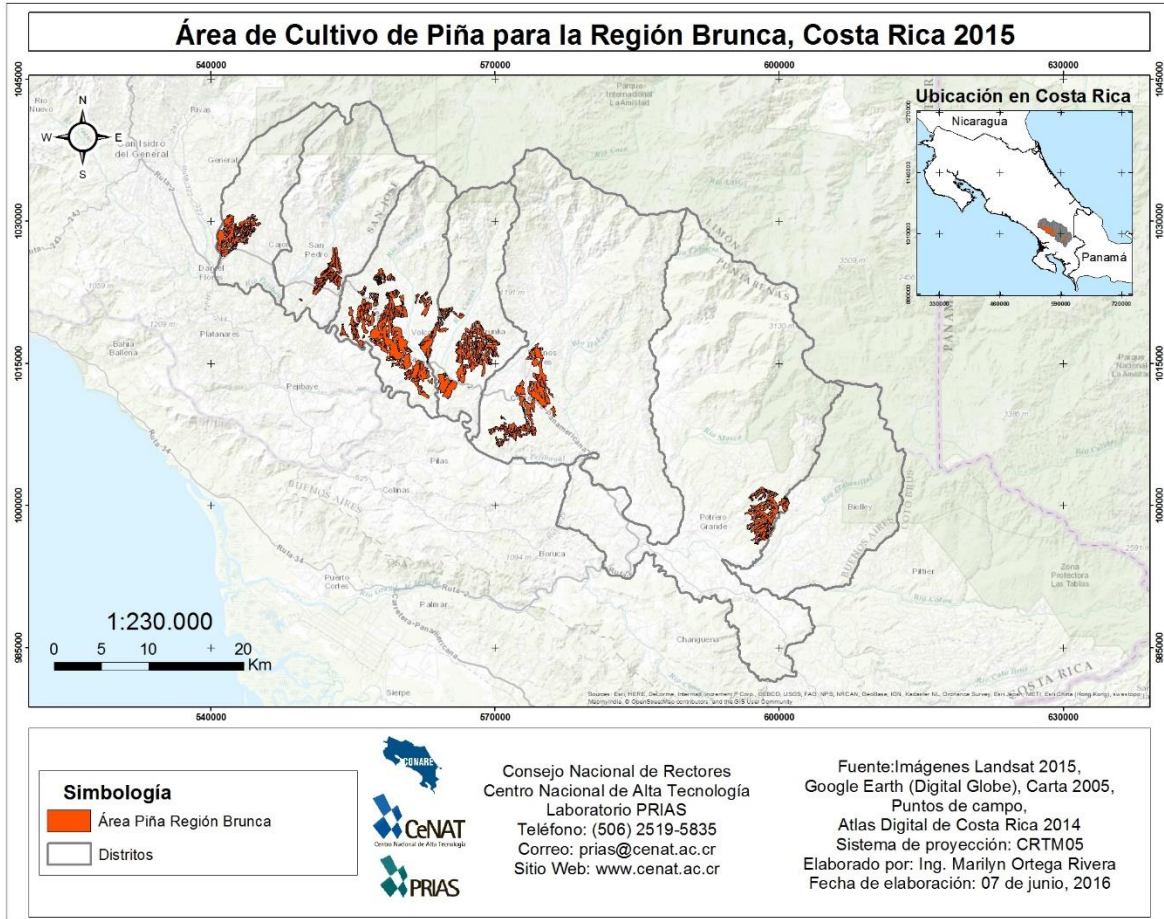


Figura 22. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en la Región Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

La figura 23 muestra el mapa piloto de línea base de cultivo de piña para tres regiones de estudio en Costa Rica al año 2015. Estas áreas han sido calculadas basando en algoritmos de clasificación de imágenes y levantamiento por medio de digitalización. Este mapa general es un mapa piloto que servirá como herramienta inicial para promover el monitoreo del cultivo de piña el país. Se encontró un total de 57327 hectáreas de piña distribuidas en las tres regiones de estudio en Costa Rica, donde la mayor presencia de área cultivada con piña es la Región Huetar Norte con 37718 hectáreas, seguido por la Región Huetar Caribe con 11579 hectáreas y por último la Región Brunca con 8030 hectáreas de piña.

Estos valores son las aproximaciones más reales en cobertura de piña actualizada al año 2015, se sugiere la validación externa que permita comprobar las coberturas a fin de verificar todas las áreas encontradas.

En el análisis de imágenes se incluyó las áreas cultivadas de piña y áreas con suelo preparado para cultivar piña como área de interés del estudio. Sin embargo, fue necesario utilizar diferentes clases para elaborar las áreas de entrenamiento a utilizar en el clasificador, estas clases utilizadas fueron: Bosque Natural, Plantación Forestal, Charral, Cultivo, Pastos, Nubes, Sombra de Nubes, Infraestructura, Suelo Desnudo, Cuerpos de Agua, Piña y Suelo Preparado. Se encontró que al aplicar los métodos de clasificación hay confusión en los cultivos de piña con bosque, piña con arroz y piña con charral. De igual forma se presentó similitud en los valores de pixeles con aguas profundas y con sombras de nubes, especialmente la piña que tenía una repuesta espectral más oscura, asumiendo que eran cultivos ya maduros. Por otro lado, el suelo preparado para piña se confunde con suelo desnudo y con pastos, por lo que deben tomar estos aspectos en futuros estudios para mejorar el muestreo de puntos de control.

La depuración de las clases solo se basó en el área de interés de piña, por lo que los valores de las otras clases antes mencionadas no fueron depurados ni validados, de igual forma tampoco se incluyeron como parte de los resultados de este proyecto.

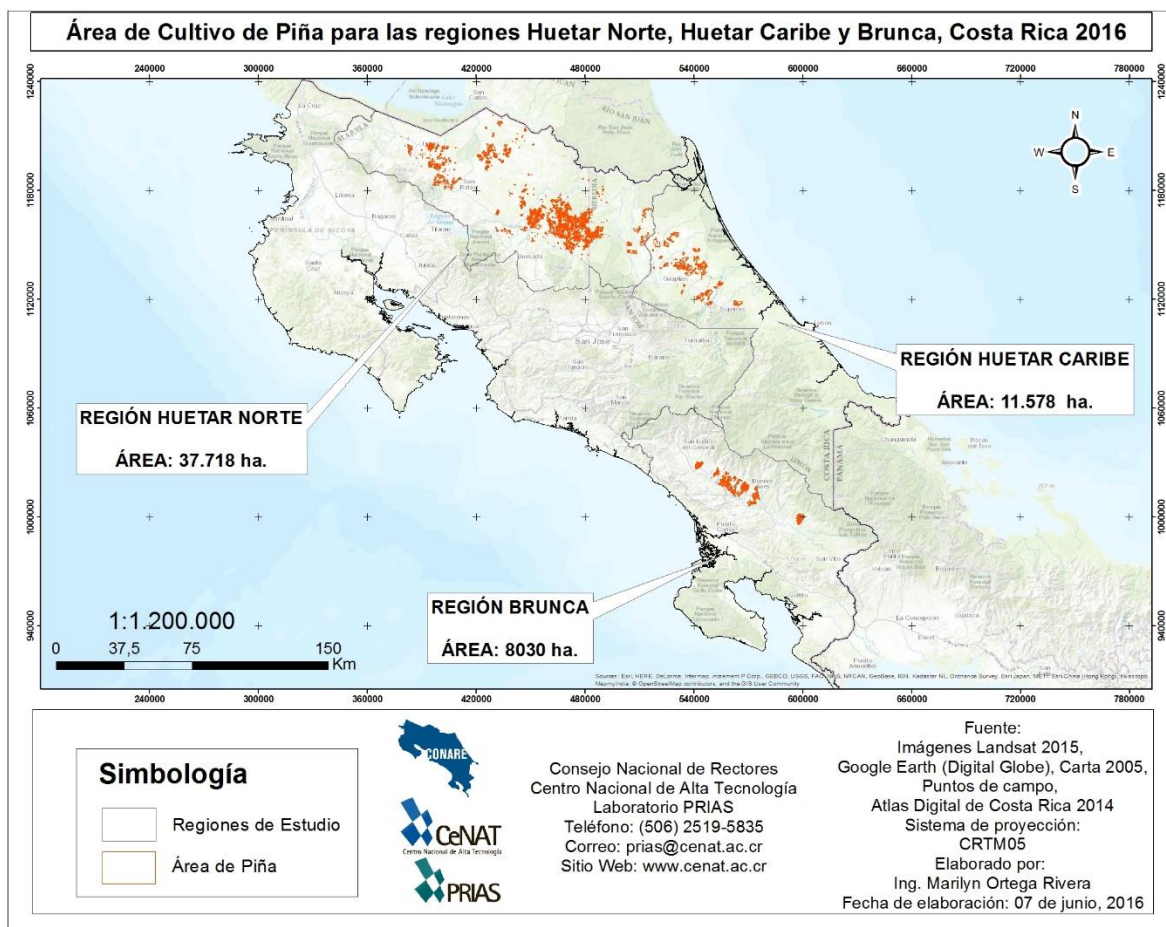


Figura 23. Mapa de cobertura de piña para el año 2015 en tres regiones de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016.

Por otro lado, el procesamiento con firmas espectrales se llevó a cabo en las tres fincas definidas para las tres regiones, los valores fueron aplicados en una sección extraída de la imagen Landsat 8 correspondiente a cada finca de muestreo.

Para el caso de la RHN y la RHC no fue posible obtener resultados de la clasificación empleando el algoritmo basado en el ángulo espectral (Spectral Angle Mapper) de ENVI, los resultados de esta dos clasificaciones se muestran en las figuras 24 y 26. Los resultados de la clasificación para la RB se muestran en la figura 28.

Región Huetar Norte

La figura 24 presenta los resultados obtenidos al momento de aplicar el algoritmo de clasificación alimentado por las firmas espectrales (Figura 25), obtenidas en campo, los valores de la imagen se encuentran distorsionados por la presencia de *cirrus* y algunos *cumulus* (nubes que son visibles en la imagen y que no pudieron ser corregidos en la corrección atmosférica).

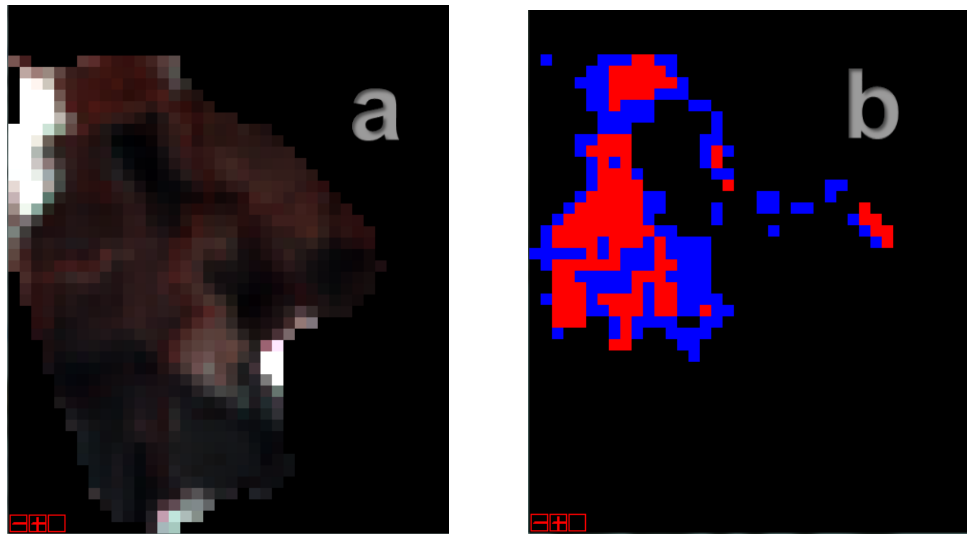


Figura 24. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RHN y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado.

Los resultados obtenidos al aplicar las firmas espectrales para la RHN muestran que para esta finca no fue posible establecer un valor que permita separar espectralmente los diferentes estadios de la piña, el color azul en la imagen de la Figura 24 (b) muestra el área identificada por el clasificador como piña podada y el área en rojo lo identificado por el clasificador como piña mayor a seis meses, el área en negro fue lo que el clasificador no pudo separar para asignar una categoría, en este caso el valor encontrado para piña podada no corresponde a lo observado en campo, por el contrario lo encontrado por el clasificador para piña mayor a seis meses concuerda con lo observado en campo.

Las áreas identificadas en campo como menor a seis y quemado no fueron identificadas y por el contrario el área asignada como podada, corresponde a piña menor de seis meses. Las diferencias estadísticas muestran que para la mayoría de las bandas los estadios de podado, menor a seis y mayor a seis son similares, lo que pudo haber generado la confusión en el clasificador, por lo que se recomienda ampliar más estudios que permitan demostrar la separabilidad en otras fincas de la misma región en donde exista disponibilidad de datos de imágenes satelitales.

La figura 25 presenta el valor de la firma espectral encontrada para los cuatro estadios de piña calculados a partir de los datos de campo generados con el espectrorradiómetro de campo luego de procesarlos con ENVI para ser empleados en Landsat 8.

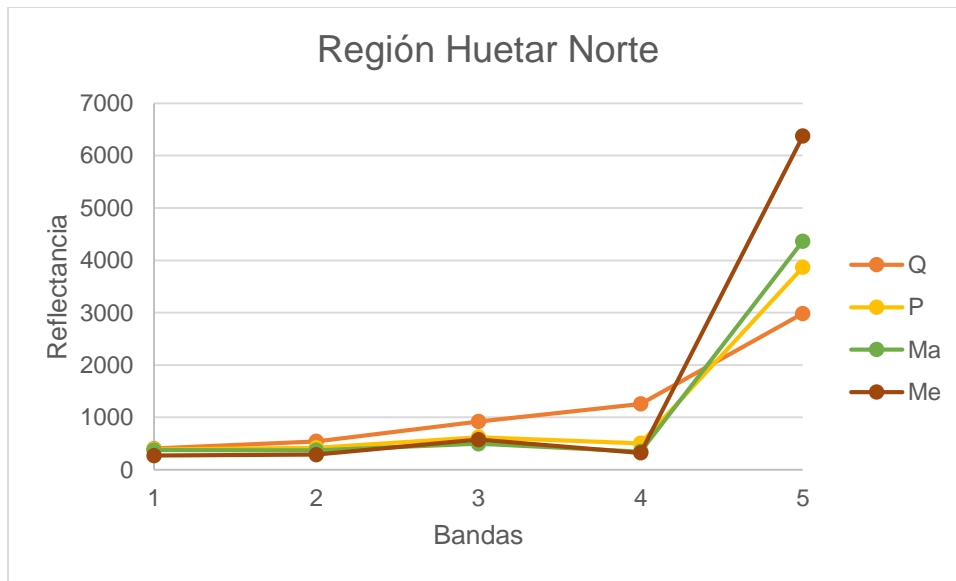


Figura 25. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 los valores corresponden a piña quemada (Q), piña podada (P), piña mayor a seis meses (Ma) y piña menor a seis meses (Me). En la sección 5.11 anteriormente se describió las diferencias a partir de los valores estadísticos calculados.

Región Huetar Caribe

La figura 26 muestra los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de clasificación de imágenes de ENVI alimentado por las firmas espectrales (figura 27) de campo, no fue posible identificar un tipo de estadio a pesar de estar presentes los cuatro estadios de piña en la finca, los resultados muestran un único polígono que de acuerdo a los resultados de la clasificación corresponde a piña podada lo que no corresponde a los valores observados en la imagen y en campo.

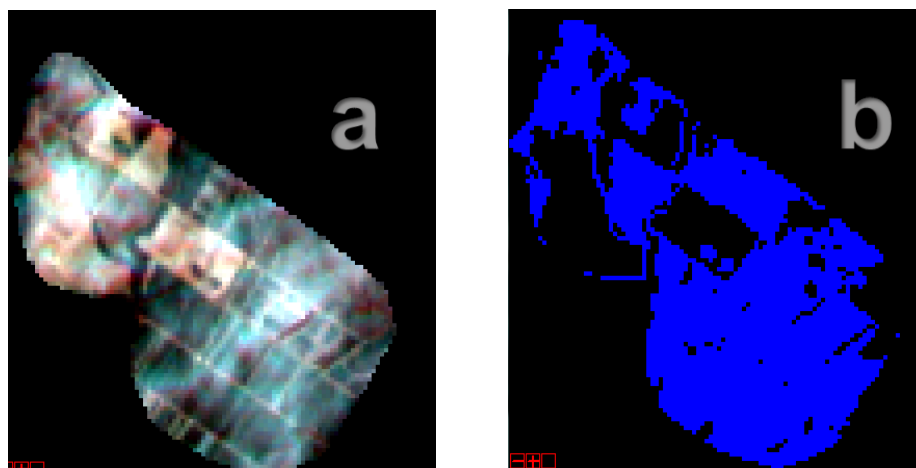


Figura 26. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RHC y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado.

De lo anterior se puede observar que el método no es eficaz para imágenes que presenten cirrus, o bien, cúmulos como se observa en la imagen de la Figura 26 (a), ya que la herramienta de clasificación confunde los valores de las firmas y no logra hallar una separabilidad espectral para identificar la cobertura.

La figura 27 presenta el valor de la firma espectral encontrada para los cuatro estadios de piña calculados a partir de los datos de campo generados con el espectrorradiómetro de campo luego de procesarlos con ENVI para ser empleados en las imágenes Landsat 8.

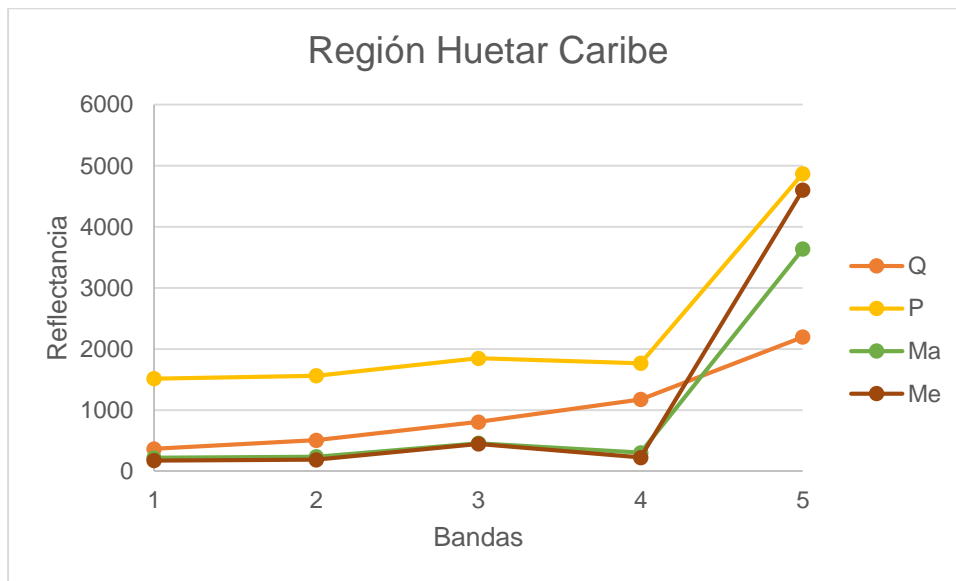


Figura 27. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Caribe de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. Fuente: Elaboración propia

Los valores corresponden a piña quemada (Q), piña podada (P), piña mayor a seis meses (Ma) y piña menor a seis meses (Me). En la sección 5.11 anteriormente se describió las diferencias a partir de los valores estadísticos calculados. Estos datos fueron empleados como una Biblioteca Espectral para alimentar el clasificador de imágenes.

Región Brunca

La figura 28 muestra los valores observados al momento de aplicar el algoritmo de clasificación de imágenes basado en firmas espectrales (figura 29), para la finca correspondiente a la Región Brunca.

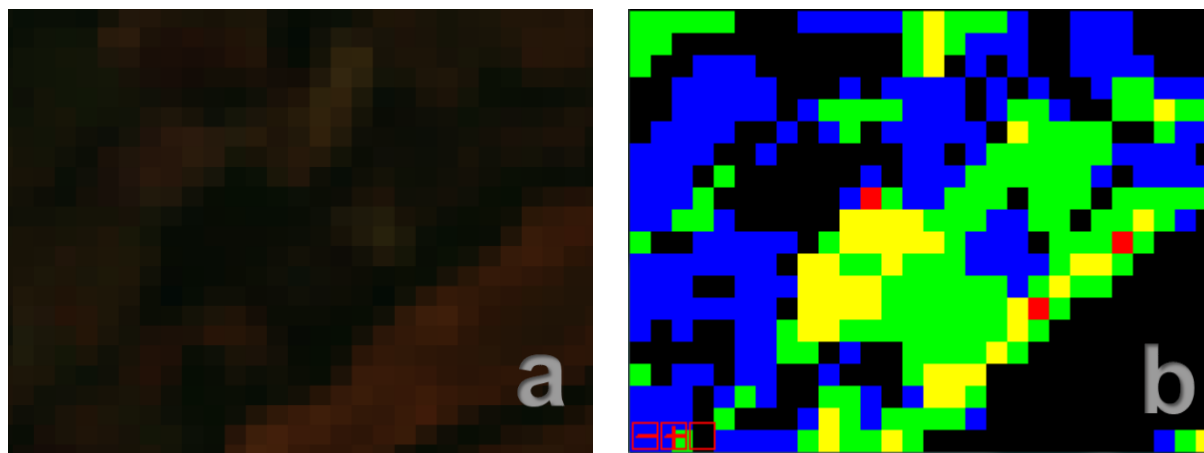


Figura 28. (a) Recorte de la imagen Landsat 8 correspondiente a la finca de muestreo en la RB y (b) Resultado del algoritmo de clasificación aplicado.

Los valores en la Figura 28 (b) corresponden a piña mayor a seis meses en amarillo, los valores en rojo corresponden a piña menor a seis meses, los valores en verde corresponden a piña podada y los valores en azul corresponden a piña quemada. En la figura 28 (a) se observa la imagen Landsat en color natural (verdadero) con las combinaciones de bandas 3, 2, 1. Al comparar los valores obtenidos de la clasificación con los valores reales de la imagen y lo observado en campo la clasificación es muy cercana de lo real. El único valor que no está dentro de lo observado en campo, es lo correspondiente a pixeles clasificados como piña menor a seis meses (pixeles rojos), ya que para el caso de esta finca este estadio estaba alejado del resto; sin embargo, al observar únicamente 3 pixeles no clasificados de acuerdo a lo encontrado en campo, se podría corregir luego en el posprocesamiento de la clasificación (etapa de depuración).

Por otro lado en esta región se evidencia que es factible la aplicación de las firmas espectrales como herramienta para mejorar la agricultura de precisión en el país, con estudios posteriores que permitan mejorar las técnicas de muestreo en campo y análisis de datos tal como lo mencionan los diferentes autores citados en la sección 5.2. de consulta bibliográfica.

La figura 29 presenta el valor de la firma espectral encontrada para los cuatro estadios de piña calculados a partir de los datos de campo generados con el espectrorradiómetro de campo luego de procesarlos con ENVI para ser empleados en las imágenes Landsat 8 en la RB.

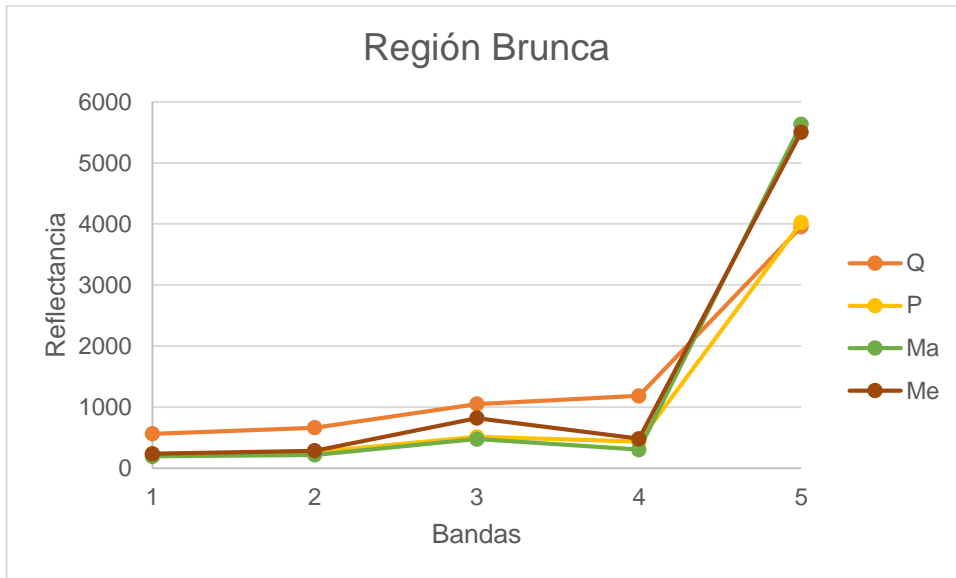


Figura 29. Firmas Espectrales reducidas para Landsat 8 en cuatro estadios del cultivo de Piña en la Región Huetar Brunca de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, 2016. Fuente: Elaboración propia

Los valores corresponden a piña quemada (Q), piña podada (P), piña mayor a seis meses (Ma) y piña menor a seis meses (Me). En la sección 5.11 anteriormente se describió las diferencias a partir de los valores estadísticos calculados. Estos datos fueron empleados como una Biblioteca Espectral para alimentar el clasificador de imágenes.

VI. CONCLUSIONES

- El área total de cobertura del cultivo de piña para Costa Rica en las tres regiones de estudio al año 2015 fue de 57327 hectáreas.
- El área total encontrada de piña en la región Huetar Norte fue de 37718 hectáreas.
- El área total hallada para piña en la región Huetar Caribe fue de 11579 hectáreas.
- El área total determinada de piña en la región Brunca fue de 8030 hectáreas.
- Se encontró que no es posible unificar la firma espectral de piña a nivel de fincas para las tres regiones de Costa Rica, pero si para fincas en regiones específicas.
- Se encontraron diferencias altamente significativas en las firmas espectrales entre las fincas de las tres regiones de estudio.
- En el estadio mayor a seis meses la finca con mayores diferencias respecto a las otras dos es la RB.
- En las bandas 3 (verde) y 4 (rojo) no hay diferencias entre regiones en los estadios mayores a seis, podado y quemado.
- Las comparaciones a nivel de estadios de la piña dentro de fincas muestran diferencias altamente significativas para la mayoría de los casos aplicados.
- Para cada una de las fincas de estudio se encontraron correlaciones tanto positivas como negativas en algunos elementos del suelo como la MO.
- La clasificación de imágenes con firmas espectrales no es factible para determinación de coberturas a gran escala como opción a ello se implementó el sistema de clasificación avanzada con See5 que dio resultados óptimos.


VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una segunda validación de campo que permita comprobar en un 100% el total de piña encontrado con este estudio, ya que el sistema está basado en métodos matemáticos aplicados por medio de algoritmos computacionales que pueden tener un error asociado al instrumento de clasificación.
- Se recomienda incorporar más muestreos de firmas espectrales en mayor cantidad de fincas a nivel nacional que permitan mejorar los modelos de clasificación utilizados actualmente, de igual forma ampliar el rango de investigación en esta línea a nivel país ya que es una rama muy poco explorada y no existen datos de cultivos que sirvan para comparar los encontrados en este estudio. Así mismo, los valores encontrados pueden servir para implementar la agricultura de precisión en Costa Rica, con mejoras en el control de los estadios de la piña, enfocado en este estudio, pero a nivel general para la toma de decisiones de pequeños y grandes productores de diversos cultivos a escala nacional.
- A nivel de muestreo se enfrentaron retos relacionados con el acceso a las fincas, por lo que se recomienda socializar el proyecto con productores nacionales a fin de que conozcan la importancia para el país de contar con este tipo de información.
- Es importante para este tipo de estudios contar con expertos en meteorología que permitan guiar la toma de datos en campo de acuerdo a la recomendación de selección de sitios con las óptimas condiciones climáticas, tal como se aplicó en este estudio.

- Se recomienda implementar para futuros estudios un espectrorradiómetro de mayor longitud de onda que permita utilizar las siete bandas de Landsat 8, con el fin de evaluar la separabilidad espectral en los diferentes rangos espectrales.
- De igual forma se recomienda ampliar el rango de investigación en los canales del verde y el rojo basado en los resultados encontrados para los estadios de piña mayor a seis meses, piña podada y piña quemada en la que no se encontraron diferencias significativas.
- Basado en el tamaño de pixel que tiene Landsat y en el tipo de modelo de clasificación empleado, se recomienda para futuros estudios ampliar la adquisición de datos para elaborar las áreas de entrenamiento; de igual forma, coordinar con otras instituciones que puedan ofrecer datos del cultivo de interés que puedan ser incorporados en el proceso de la clasificación de imágenes.
- Al finalizar esta investigación se tienen noticias de nuevos métodos para aplicar las bandas espectrales que contiene el sensor OLI, un canal profundo en el azul visible (banda 1) y un canal infrarrojo (banda 9), para la detección de nubes cirrus, por lo cual se recomienda para estudios posteriores investigar más acerca de este tema y valorarlo como una opción para reducir el tiempo de procesamiento de las imágenes, diferentes a los aplicados en esta investigación.
- Con el sensor Landsat es posible desarrollar el sistema de monitoreo de cultivos de piña; sin embargo, en áreas con alta presencia de nubes se dificulta la separabilidad de clases por lo que se recomienda para estudios futuros investigar otras opciones alternas a Landsat que permitan cubrir estas áreas faltantes o con alto porcentaje de nubosidad.

VIII. REFERENCIAS

- Almeida, T.I.R., De Souza, C.R., Rossetto, R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing* 27(19), 4057–4069. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160600857451>. [Consulta 08 jun.2016].
- Aguilar-Rivera, N; Galindo-Mendoza, G; Fortanelli –Martínez, J. (2012). Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 111 (2), 64-74. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/41892/Documento_completo.pdf?sequence=1. [Consulta 08 jun.2016].
- Agricultural Production Systems Simulator. (2015). Structure of the APSIM sugar model. Recuperado de <http://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Sugar.aspx>. [Consulta 08 jun.2016].
- Aravena, J. (2005). *La expansión piñera en Costa Rica. La Realidad de los perdedores de la Agroindustria exportadora de la piña*. Comunidades Ecologistas la Ceiba amigos de la tierra Costa Rica. Recuperado de <http://coecoceiba.org/wp-content/subidas/2010/03/pub11.pdf>. [Consulta 07 jun. 2016].
- Boeglin, N. (2015, 18 de marzo). La piña de Costa Rica ante la Comisión Interamericana de Derechos Humanos. *El País.cr*. Recuperado de <http://www.elpais.cr/2015/03/18/la-pina-de-costa-rica-ante-la-comision-interamericana-de-derechos-humanos/> [Consulta 07 jun. 2016].

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 96 de 101

Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña. (2014). *Estadísticas*. Recuperado de <http://canapep.com/estadisticas> [Consulta 07 jun. 2016].

Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña. (2015). *Piña de Costa Rica*. Recuperado de <http://canapep.com/pina-de-costa-rica> [Consulta 07 jun. 2016].


Christian, B., Krishnayya, N.S.R. (2008). Discrimination of Floor Cover of Dry Deciduous Forest using Hyperion (EO-1) Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 36, 137-148.

Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones RIALP. 568 pp.

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, España: Editorial Ariel S.A.

Coronado-Chacón, L. (2001). Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de bosques secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. (Informe de Práctica de Especialidad Instituto Tecnológico de Costa Rica). Recuperado de <http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/434/tesis-digital.pdf?sequence=1>. [Consulta 30 may. 2016].

Doraiswamy, P.; Moulin, S; Cook, P; y Stern, A. (2003) "Crop Yield Assessment from Remote Sensing", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS) Journal*, 69 (6) 6, 665-674. Recuperado de http://asprs.org/a/publications/pers/2003journal/june/2003_jun_665-674.pdf. [Consulta 08 jun.2016].

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 97 de 101

Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. (2012). Estudio de cobertura forestal de Costa Rica 2009-2010. Recuperado de <http://www.minae.go.cr/recursos/documentos/cobertura-forestal/estudio-cobertura-forestal-fonafifo-marzo2012.pdf>. [Consulta 31 may. 2016].

Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. (2014). Página principal/Proyectos/Estrategia REDD+. Recuperado de <http://www.fonafifo.go.cr/proyectos/redd.html>. Consultado [Consulta 30 may. 2016].


Hatchell, D.C. (Ed.). (1999). *Technical Guide*. (3.a ed.). Colorado, USA: Analytical Spectral Devices (ASD).

Hernández-Palma, J. (2011) Procesamiento digital de imágenes. Apuntes de clases. [pdf]. Recuperado de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Im%20C3%A1g%20enes%20-%20Jaime%20Hern%20andez%202011.pdf>. [Consulta 08 jun.2016].

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (1983). La Piña. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=lu8qAAAAYAAJ&pg=PA1&dq=pi%C3%B1a&hl=en&sa=X&ei=Ne91VYf9LpLnsAT356D4CA&ved=0CDkQ6AEwBA#v=onepage&q=pi%C3%B1a&f=false> [Consulta 11 jun. 2015].

Johnson, R.M.; Viator, R.P.; Veremis, J.C.; Richard, P.; Zimba, V. 2008. Discrimination of sugarcane varieties with pigment profiles and high resolution, hyperspectral leaf reflectance data. *Journal Association Sugar Cane Technologists*: 63-75.

Knipling, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1 (3): 155-159.

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 98 de 101

Lillesand, T., Kiefer, T. (1999). Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, USA. Cuarta edición. 724p.


Lorenzen, B.; Jensen, A. (1989). Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery Mildew. Remote sensing and Environment. 27, 201-209.

Martínez-Ortega, R., Tuya-Pendás, L., Martínez-Ortega, M., Pérez-Abreu, A. & Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2) Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tlng=es [Consulta 08 jun. 2016].

McNairn, H; Ellis, J; Van der Sanden, J.J; Hirose, T, y Brown, R.J. (2002). Providing crop information using RADARSAT-1 and satellite optical imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 23 (5), 851- 870. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.195.3671&rep=rep1&type=pdf>. [Consulta 08 jun.2016].

Meer, F. & Jong, S. (2002). *Imaging Spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Kluwe Academic Publishers. 4, 111-197. Recuperado de <https://24819d35c1302da3ecde341a5b40ae766385cd30.googledrive.com/host/0B1GrKsykU8CSVUVfblp4bUpjUE0/Imaging-Spectrometry-Principles-Prospective-Applications-1402001940.pdf>. [Consulta 08 jun.2016].

Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2014a). Región Huetar Norte. Plan de Desarrollo 2030. Recuperado de <http://documentos.mideplan.go.cr:8080/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/72e8292f-97f9-465c-a5ed-c2c4b442a55c/Region%20Huetar%20Norte.pdf> [Consulta 14 abr. 2015].

	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 99 de 101

Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2014b). Región Huetar Caribe. Plan de Desarrollo. Competitividad y Ordenamiento Territorial al 2030. Recuperado de <http://documentos.mideplan.go.cr:8080/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/7ff6af63-c9c3-4100-bbfe-315c524c54df/Regi%C3%B3n%20Caribe.pdf> [Consulta 14 abr. 2015].

Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2014c). Región Huetar Norte. Plan de Desarrollo 2030. Recuperado de <http://documentos.mideplan.go.cr:8080/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/0c8de019-b95a-464a-80ba-739baf46904f/Regi%C3%B3n%20Brunca.pdf> [Consulta 14 abr. 2015].

Mullan, D. (2013). Radiometría espectral. Por Reynolds, M.P., Pask, A.J.D., Mullan, D.M., Chávez-Dulanto, P.N. (Eds.). *Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo*. (69-80). México: CIMMYT.

Peddle, D., White, P., Soffer, R., Miller, J., LeDrew, E. (2001). Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. *Computers & Geosciences* 27:203-213.



Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). Request for proposals. Recuperado de http://procurement-notices.undp.org/view_notice.cfm?notice_id=20365. Consulta

Rodríguez-Salazar, M., Álvarez-Hernández, S., Bravo-Núñez, E. (2001). *Coefficientes de asociación*. México: Plaza y Valdés S.A.

Rial Boubeta, A., & Varela Mallou, J. (2008). *Estadística práctica para la investigación en ciencias de la salud: Ejercicios resueltos con G-Stat* (1ª ed. en español). Oleiros (La Coruña): Netbiblo.

Scanvic, J (1989). Teledetección aplicada: cartografía, geología estructural, exploración minera, medio ambiente, etc. Editorial Paraninfo, Madrid.

United States Geological Survey (USGS). (2013). Landsat Project Description. Recuperado de http://landsat7.usgs.gov/about_project_descriptions.php [Consulta 10 jun. 2015].

 	DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE PIÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E IN SITU EN COSTA RICA	Informe II
		Informe Final de Proyecto
		Fecha: 10/06/2016
		Página 100 de 101

United States Geological Survey (USGS). (2015). Landsat 8. Recuperado de <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php> [Consulta 10 jun. 2015].

Vargas, C. (2014). *Protocolo para estimar el cambio del uso del suelo y la pérdida de la cubierta forestal ligado a la tenencia de la tierra, relacionado con piña*. (Entrega V). San José: CeNAT.

Xiuhua, L.; Won Suk, L; Minzan, L; Reza, E; Ashish, R.M.; Chenghai Y y Mangan, R.N. (2012). Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, pp. 42-46. Recuperado de <http://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/00002906.pdf>. [Consulta 08 jun.2016].