



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN
LOS PÁRAMOS CERCANOS A LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL
INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO USANDO SENSORES
REMOTOS**

AUTOR: LOZA DUEÑAS, PATRICIO SEBASTIÁN

**DIRECTOR: ING. ECHEVERRÍA LLUMIPANTA, NEPTALÍ
ARMANDO, MG.**

SANGOLQUÍ - ECUADOR

2018

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN LOS PÁRAMOS CERCANOS A LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO USANDO SENSORES REMOTOS**” fue realizado por el señor **LOZA DUEÑAS PATRICIO SEBASTIÁN** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de septiembre del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Ing. Neptalí Armando Echeverría Llumipanta, sobre una línea de puntos.

Ing. Neptalí Armando Echeverría Llumipanta, Mg
CI: 1711153302

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **LOZA DUEÑAS PATRICIO SEBASTIÁN**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN LOS PÁRAMOS CERCANOS A LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO USANDO SENSORES REMOTOS** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 19 de septiembre del 2018

Loza Dueñas Patricio Sebastián

CI: 171675432-8

AUTORIZACIÓN**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE****AUTORIZACIÓN**

Yo, **LOZA DUEÑAS PATRICIO SEBASTIÁN**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio institucional el trabajo de titulación: **“CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN LOS PÁRAMOS CERCANOS A LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO USANDO SENSORES REMOTOS”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 19 de septiembre del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'PATRICIO LOZA'.

Loza Dueñas Patricio Sebastián

CI: 171675432-8

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, por haberme guiado en cada momento a lo largo de mi vida, por darme la fe y la fortaleza para afrontar cada adversidad que encontré en mi camino. A mis padres Marcia y Luis, que con disciplina y mucho amor cuidaron de mí y mis hermanos, logrando sacar adelante a esta hermosa familia. En memoria de mi abuelita Isabel, que desde el cielo sigue cuidándome y protegiéndome. A mis hermanos Luis y Alejandro, por su apoyo incondicional a lo largo de los años, por cada momento compartido y ser mis modelos a seguir. A mi pequeña princesa Rafaela, que aunque la distancia nos separa el amor y el cariño nos mantiene unidos.

A mi compañera inseparable en los últimos años Johita, por estar siempre conmigo en las buenas y malas, por ser mi apoyo, fuente de inspiración, felicidad y amor.

Todos ustedes son lo más valioso y hermoso que tengo en la vida, los amo a todos y cada uno de ustedes.

Patricio Sebastián Loza Dueñas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos y cada uno de mis familiares, que de una u otra manera aportaron enormemente a mi formación académica y personal, en especial a mis abuelitos Heriberto, Isabel, Luis y Nelly, a mis tíos y primos más allegados.

A mis mejores amigos Tiby, Kathy, Diany y Jairo, por sus consejos, apoyo, compañía en cada momento a lo largo de los años.

A mis amigos y compañeros de clase, en especial a Gabita, Ali, Andrés, Darío, Kerby y Joha, amigos que compartieron conmigo gran parte de mi vida universitaria, por tantos trabajos, deberes, pruebas, amanecidas, consejos y valiosa ayuda para el desarrollo de este trabajo.

A mi director de tesis el ingeniero Armando Echeverría, por su siempre oportuna asesoría y guía técnica a lo largo del desarrollo de mi proyecto de tesis.

De igual manera agradeciendo a todo el personal del Instituto Espacial Ecuatoriano con especial mención a mis tutores el Mayo. José Yépez y el Ing. Javier Maiguashca, por la ayuda, consejos y conocimiento compartido a lo largo del desarrollo de mi proyecto de tesis.

A Joha, Gaby, Pedro, Luis, Lu y al Sgto. Vicente Condolo por su ayuda en la recolección de información en campo.

A Tuku, por ser mi compañía día y noche durante la redacción y elaboración de este trabajo.

Patricio Sebastián Loza Dueñas

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iiv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	iix
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I	1
PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación e importancia	3
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Metas	6
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1. Fundamentación teórica	7
2.1.1. Sistemas de información geográfica (SIG)	7
2.1.1.1. Cartografía temática	7
2.1.1.2. Unidad mínima de mapeo	8
2.1.2. Teledetección	9
2.1.2.1. Elementos de la teledetección	10
2.1.2.2. Clasificación de los sensores remotos	11
2.1.2.3. Resoluciones de un sensor remoto	12
2.1.2.4. Espectro electromagnético	14
2.1.2.5. Firmas espectrales	15

2.1.2.6.	Espectrorradiómetro	16
2.1.2.7.	Índices espectrales.....	17
2.1.2.7.1.	Índice de vegetación ajustado con el suelo (SAVI)	17
2.1.2.7.2.	Índice normalizado de la diferencia de humedad (NDWI)	18
2.1.2.7.3.	Índice de vegetación normalizado (NDVI).....	18
2.1.2.8.	Proyecto Sentinel.....	18
2.1.2.9.	Misión sentinel2.....	19
2.1.2.10.	Tratamiento de imágenes satelitales.....	20
2.1.2.10.1.	Corrección geométrica.....	20
2.1.2.10.2.	Corrección atmosférica.....	20
2.1.2.10.3.	Corrección radiométrica	21
2.1.2.10.4.	Corrección topográfica	21
2.1.3.	Spectral Unmixing	21
2.1.4.	Ecosistema páramo	22
2.1.4.1.	Páramos en el Ecuador	23
2.1.4.2.	Vegetación de páramo	24
2.1.4.2.1.	Subpáramo arbustivo	25
2.1.4.2.2.	Páramo pajonal	26
2.1.4.2.3.	Superpáramo	26
2.2.	Fundamento conceptual	27
2.3.	Fundamento legal.....	28
2.4.	Sistemas de variables	29
2.4.1.	Variables dependientes	29
2.4.2.	Variables independientes.....	29
2.4.3.	Operacionalización de las variables	29
2.5.	Preguntas de Investigación.....	30
2.5.1.	Pregunta general	30
2.5.2.	Preguntas específicas	30
	CAPÍTULO III	31
	METODOLOGÍA.....	31
3.1.	Tratamiento digital de imágenes satelitales	31
3.1.1.	Descarga de imágenes satelitales.....	31

3.1.2. Corrección atmosférica y radiométrica.....	32
3.2. Definición de zonas de muestreo	33
3.3. Vegetación del área de estudio	34
3.4. Composición botánica	36
3.4.1. Procedimiento para la materialización en campo de parcelas y subparcelas	37
3.4.2. Procedimiento para la identificación de especies y obtención de firmas espectrales	37
3.5. Metodología para la obtención de firmas espectrales	38
3.5.1. Firmas espectrales en campo	38
3.5.2. Procesamiento de firmas espectrales	41
3.6. Distribución espacial de especies analizadas.....	43
CAPÍTULO IV	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1.Resultados	45
4.1.1. Imágenes sentinel-2 corregidas	45
4.1.2. Composición botánica	47
4.1.3. Firmas espectrales	51
4.1.4. Distribución espacial	52
4.1.5. Estado de vegetación	59
4.2. Discusión.....	63
4.2.1. Firmas espectrales	63
4.2.2. Distribución espacial de especies analizadas.....	64
4.2.3. Estado de conservación de especies analizadas.....	64
CAPÍTULO V	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
5.1. Conclusiones.....	65
5.2. Recomendaciones.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Coordenadas de los límites del área de estudio</i>	4
Tabla 2. <i>Descripción de las regiones del espectro electromagnético</i>	15
Tabla 3. <i>Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2</i>	19
Tabla 4 <i>Lista de Imágenes satelitales procesadas</i>	45
Tabla 5. <i>Abundancia total por especie en las cuadrículas 1 y 2</i>	50
Tabla 6. <i>Resultados Correlación de Pearson y regresión lineal índices espectrales vs</i> <i>coberturas del parque nacional Cotopaxi</i>	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación	5
Figura 2. Elementos de la Teledetección	11
Figura 3. Ejemplo un mismo lugar a diferente resolución espacial	12
Figura 4. Clasificación de imágenes satelitales según su resolución espectral	13
Figura 5. Ejemplos de resolución radiométrica de mayor (izq) a menor (der)	13
Figura 6. Ejemplo de resolución temporal, misma zona en distintas fecha de toma.....	14
Figura 7. El Espectro electromagnético.	14
Figura 8. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible,..... infrarrojo reflejado del Espectro Electromagnético	16
Figura 9. Espectroradiómetro ASD FieldSpect4 Hi-Res	17
Figura 10. Linear Mixing Model (LMM)	22
Figura 11. Distribución de los páramos en el mundo.....	23
Figura 12. Distribución espacial del Ecosistema Páramo en el Ecuador	24
Figura 13. Tipos de vegetación	25
Figura 14. Captura de pantalla de earthexplorer.usgs.gov	31
Figura 15. Captura de Pantalla del programa Sen2Cor.....	32
Figura 16. Comparación imágenes Sentinel L1C (izquierda) vs L2A (derecha)	33
Figura 17. Índices espectrales aplicados al área de estudio	33
Figura 18. Páramo con predominancia de pajonales.....	35

Figura 19. Páramo con predominancia de herbazal húmedo	35
Figura 20. Dimensiones de la parcela y (X) subparcelas para análisis de composición botánica y captura de firmas espectrales.....	36
Figura 21. Identificación y estimación de abundancia de especies en subparcelas	37
Figura 22. Captura de firmas espectrales en campo.....	38
Figura 23. Interruptor de encendido FielSpec4.....	39
Figura 24. Mochila ASD de campo para FielSpec4.....	40
Figura 25. Conexión Automática por Wi-fi del espectroradiómetro FielSpec4	40
Figura 26. Calibración del espectroradiómetro FielSpec4.....	41
Figura 27. Ejemplo de una firma espectral promedio	42
Figura 28. Firmas espectrales captadas en la subparcela AA de la Cuadrícula #2	42
Figura 29. Firmas espectrales promedio captadas en la Cuadrícula #1	43
Figura 30. Imagen satelital del área de estudio aplicada componentes principales	44
Figura 31. Imagen sentinel-2A nivel de procesamiento L2A correspondiente a la fecha 2017-07-16.....	46
Figura 32. Imagen sentinel-2A nivel de procesamiento L2A correspondiente a la fecha..... 2018-04-12.....	46
Figura 33. Fotografías por subparcela en la Cuadrícula 1	48
Figura 34. Fotografías por subparcela en la Cuadrícula 2	48
Figura 35. Abundancia por especie y firmas espectrales en la Cuadrícula #1	49
Figura 36. Abundancia por especie y firmas espectrales en la Cuadrícula #2.....	49
Figura 37. Abundancia de especies Cuadrícula #1	50
Figura 38. Abundancia de especies Cuadrícula #2	51
Figura 39. Especies identificadas en las Cuadrículas 1 y 2;.....	51
Figura 40. Firmas espectrales Promedio de las Cuadrículas #1 y #2.....	52
Figura 41. Mapa de la cobertura vegetal en el parque nacional Cotopaxi, usando la herramienta “Spectral Unmixing”	53
Figura 42. Ubicación de puntos GPS de validación de la cartografía generada	54
Figura 43. Mapa de la cobertura vegetal en el parque nacional Cotopaxi, corregido usando... componentes principales y clasificación supervisada.	55
Figura 44. Zona con predominancia de arbustividad	56
Figura 45. Zona con presencia de bosque	56

Figura 46. Zona con mezcla de vegetación arbustiva y pajonal	57
Figura 47. Zona con mezcla de herbazal húmedo y pajonal	57
Figura 48. Parque Nacional Cotopaxi: Páramo Pajonal.....	58
Figura 49. Parque Nacional Cotopaxi: Herbazal húmedo.....	58
Figura 50. Clasificación Suelo/Roca de la Figura 43.....	59
Figura 51. Gráficas de dispersión de puntos de los índices NDVI, SAVI y NDWI vs coberturas del parque nacional Cotopaxi.	61
Figura 52. Índice de SAVI del Herbazal Húmedo en el Parque Nacional Cotopaxi	62
Figura 53. Índice de SAVI del Páramo Pajonal en el Parque Nacional Cotopaxi	63

RESUMEN

El ecosistema páramo es de gran importancia por su gran biodiversidad y gran cantidad de beneficios ambientales, sociales, económicos y culturales, sin embargo, su alta vulnerabilidad se ha convertido en una preocupación para la comunidad científica, lo que ha llevado a buscar metodologías no destructivas que permitan su monitoreo continuo con la finalidad de conocer a ciencia cierta su extensión, ubicación, tipo y variedad. En el siguiente trabajo se estableció una metodología para la caracterización de las distintas coberturas vegetales en los páramos del Parque Nacional Cotopaxi, utilizando imágenes satelitales multiespectrales de los satélites Sentinel 2, en donde se realizó la corrección atmosférica de las mismas usando la herramienta Sen2cor del software SNAP, se determinó composición botánica en las zonas de muestreo, en donde las especies “*Lachemilla orbiculata*” y “*Calamagrostis intermedia*” fueron más abundantes. De estas se obtuvo las firmas espectrales promedio utilizando un espectroradiómetro Field Spec-4, posteriormente por medio de la herramienta “Spectral Unmixing” y clasificación no supervisada se determinó la distribución espacial de las especies de páramo analizadas generando cartografía validada con un 83,7% de veracidad. Finalmente se estudió el estado de la vegetación identificada por medio de índices espectrales, encontrando que el índice de SAVI es el más adecuado para dicho análisis con una correlación positiva media de 0,4 para la correlación Pearson.

PALABRAS CLAVE:

PÁRAMO

VEGETACIÓN

ÍNDICE ESPECTRAL

FIRMA ESPECTRAL

IMAGEN SATELITAL

ABSTRACT

Paramo ecosystem has great importance because of its great biodiversity and great amount of environmental, social, economic and cultural benefits, however its high vulnerability has become a concern for the scientific community, which has brought about looking for non-destructive methodologies that allow the continuous monitoring of this ecosystem in order to know in the best way possible their extension, location, type and variety. In the following project, a methodology was established for the characterization of the different vegetation coverings in the paramo of Cotopaxi National Park using multispectral satellite images of the Sentinel 2 satellites, where atmospheric correction was made using the Sen2cor tool of the software SNAP, botanical composition was performed in the sampling areas, finding that species "Lachemilla orbiculata" and "Calamagrostis intermedia" were the most abundant. Where average spectral signatures were obtained using a spectroradiometer, subsequently using the "Spectral Unmixing" tool and unsupervised classification, the spatial distribution of the paramo species were determined generating validated cartography with 84.4% accuracy. Finally, the state of the vegetation was analyzed through spectral indexes, finding that the SAVI index was the most suitable for these analysis with a mean positive correlation of 0.4 for the Pearson correlation.

KEYWORDS:

PARAMO

VEGETATION

SPECTRAL INDEX

SPECTRAL SIGNATURE

SATELITAL IMAGE

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Las actividades actuales en los páramos están encaminadas a la ganadería y los cultivos, pero también existen otras actividades de menor extensión, como las plantaciones forestales y la minería de carbón, de esta manera, en un área que originalmente fue cubierta por páramo de pajonal con unos bosquetes y algo de pantano, ahora se puede encontrar potreros, cultivos, una plantación forestal, pajonal quemado, pajonal en recuperación, entre otros (Hofstede, et al., 2014). Como una herramienta de conservación, los sensores remotos nos permiten mantener un monitoreo constante de la cobertura del suelo, permitiéndonos ver cómo han cambiado las áreas naturales a través de los años, en este caso los páramos. De la misma manera han demostrado ser una buena alternativa a la hora de realizar estudios de vegetación y clasificar la cobertura vegetal, ya que optimiza el tiempo, recursos, reduce el trabajo de verificación de campo y logra abarcar grandes áreas de estudio.

En la zona de estudio no existe una caracterización adecuada de la vegetación de páramo que sirva como una herramienta que ayude a fomentar el buen estado de conservación este tipo de áreas naturales, por esta razón este proyecto tiene como finalidad desarrollar una metodología con el uso sensores remotos y SIG para la caracterización de la cobertura vegetal en páramos por medio de la obtención de las distintas firmas espectrales de la vegetación más representativa del área de estudio, su posterior análisis y clasificación en imágenes satelitales.

1.2. Antecedentes

En el Ecuador, los páramos cubren alrededor de 1.250.000 ha, es decir aproximadamente un 6% del territorio nacional (Medina & Mena, 2001), los podemos encontrar desde los 2.800 m, especialmente en el sur del país o bosques cerrados hasta por sobre los 4.000 m (Medina & Mena, 2001).

En términos relativos, el Ecuador es el país que más páramos tiene con respecto a su extensión total. Pese a tener una representación considerable en términos de área a escala nacional, este ecosistema se encuentra entre los más amenazados por actividades antrópicas, principalmente por agricultura y ganadería, actividades que afectan considerablemente sus funciones ambientales: regulación hídrica, suministro de agua potable y almacenamiento de carbono, entre otros (Hofstede, Segarra, Mena, Medina, & F, 2003).

En el país se han realizado varios estudios en los páramos andinos, varios de ellos son de cuantificación de carbono almacenado en biomasa, necromasa y su carbono almacenado en suelo, para realizar estos estudios fue necesario realizar una clasificación previa del tipo de vegetación de los distintos páramos estudiados, para la cual se ocuparon distintas metodologías, por ejemplo (Hribljan, et al., 2017) en su estudio realizado en los páramos del volcán Cotopaxi y Antisana, para la clasificación del tipo de cobertura de suelo se utilizaron una combinación entre información radar de los satélites Palsar y Radarsat, un modelo digital de elevación (MDE) e imágenes satelitales de Landsat TM aplicando el método Random Forests (RF) classifier, en el cual se obtuvo una precisión general del 90% en el mapeo del tipo turberas en contraste a la verificación en campo realizado.

En otro estudio realizado en el parque nacional Yacuri se elaboró un mapa de cobertura vegetal, con énfasis en el ecosistema páramo, usando cartas topográficas, imágenes satelitales, fotos aéreas, visitas de campo para comprobación y para la caracterización florística del ecosistema páramo se utilizó la metodología de campo planteada por (Ayala, Villa, Aguirre, & Aguirre, 2014), más no se ha realizado una clasificación de la vegetación por sus firmas espectrales aunque si se han implementado el uso de sensores remotos y herramientas SIG en nuestro país.

Por otro lado, (Pantaleone & Tosini, 2012) en el proyecto desarrollado por la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, analizaron la clasificación de cultivos en imágenes satelitales Landsat TM, específicamente se utilizaron firmas espectrales multibanda para detectar, mediante un algoritmo clasificador, zonas con determinado tipo de cultivos, contrastándolas con bases de datos de cultivos existentes de los lotes de su zona de estudio verificando la precisión del algoritmo utilizado, la cual llegó a ser de hasta el 86% de precisión.

1.3. Justificación e importancia

Los páramos son ecosistemas frágiles, los cuales son globalmente importantes como fábricas del agua, hábitats de rica diversidad biológica, zonas de recreación, turismo y áreas de un importante valor cultural, además estas proveen directamente alimento para un 10% de la humanidad, también proveen entre 30-60% del agua en zonas húmedas y más del 70-95% en ambientes semiáridos y áridos (FAO, 2017), los páramos del Ecuador se ubican en zonas de gran altitud con bajas temperaturas los cuales se han formado por la actividad glacial, tectónica y una historia volcánica activa a través de los años (Balslev & Luteyn, 1992).

Dada la importancia del ecosistema páramo, es de vital importancia la aplicación de medidas de prevención, recuperación y protección de los recursos naturales de los páramos a través de una buena planificación territorial basada en el conocimiento detallado de su ubicación, estado, características biofísicas y funcionales con miras a administrar el ecosistema adecuadamente, garantizando la disponibilidad y sustentabilidad de sus bienes y servicios ambientales (Beltrán K. , et al., 2009).

La detección de patrones de forma y espectro a escala de imágenes satelitales es clave para determinar áreas con similares características forrajeras (disponibilidad, composición botánica, accesibilidad). En los últimos años se ha generalizado el uso de imágenes satelitales para detectar áreas heterogéneas de vegetación (Pantaleone & Tosini, 2012).

Uno de los más importantes, el programa Landsat de la NASA fue creado para mantener un monitoreo continuo de recursos naturales, fue conformado por ocho satélites de los cuales solamente se encuentran activos dos: Landsat TM y Landsat ETM. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores a través de los años. Por este motivo como continuación del programa Landsat en el año 2015 fue lanzado el satélite Sentinel 2A el cual con la finalidad de monitorizar la superficie de la tierra estudiando la cubierta vegetal, los usos del terreno, y ya que presenta una mejor resolución espectral y espacial con sus 12 bandas multiespectrales y 10 metros de resolución espacial, se espera obtener resultados más precisos y a una menor escala en el estudio propuesto.

Con respecto a la zona de estudio, se encuentra ubicada totalmente en el ecosistema de páramo, alrededor de 40 hectáreas le pertenecen al Instituto Espacial Ecuatoriano y es aquí donde funciona actualmente la “Estación Cotopaxi”, lugar que facilitó la obtención de datos en campo.

1.4. Zona de estudio

El presente proyecto se desarrolló en los páramos cercanos a la estación Cotopaxi (Figura 1) perteneciente al Instituto Espacial Ecuatoriano, el límite del área de estudio está definido por las siguientes coordenadas, las cuales se encuentran en el sistema de referencia SIRGAS y proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 17 Sur, las cuales son se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.
Coordenadas de los límites del área de estudio

Límites del área de estudio		
Punto	Coordenada (X)	Coordenada (Y)
1	768.090,26 m E	9.931.577,20 m N
2	771.196,79 m E	9.931.684,42 m N
3	768.012,73 m E	9.927.451,98 m N
4	771.007,16 m E	9.928.117,11 m N

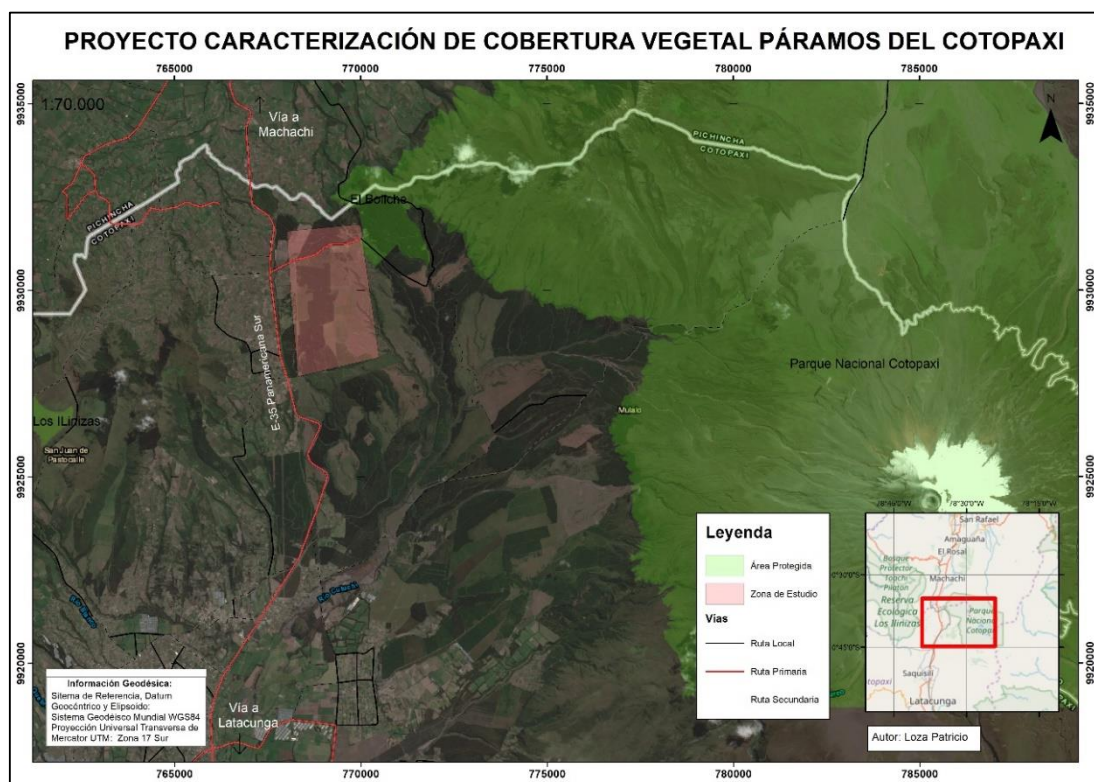


Figura 1. Mapa de ubicación

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Caracterizar los distintos tipos de vegetación de páramo presentes en el área de estudio por medio de la obtención de sus firmas espectrales y su posterior clasificación en imágenes satelitales del sensor remoto Sentinel 2A con la finalidad de determinar su distribución espacial y estado vegetativo.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar, validar y pre-procesar las imágenes satelitales correspondientes a la época lluviosa entre los meses de abril y junio de los años 2017 y 2018 según disponibilidad de imágenes.

- Determinar zonas heterogéneas de vegetación por medio de índices espectrales (NDVI, NDWI y SAVI) para la identificación zonas de muestreo para la medición en campo de firmas espectrales de vegetación por medio con un espectro radiómetro.
- Determinar la distribución espacial de cada tipo de vegetación identificada en el área de estudio usando el algoritmo clasificador “Spectral Unmixing”.
- Analizar el estado de la vegetación en función de índices espectrales obtenidos para después verificar si existe algún tipo correlación entre los resultados de las firmas espectrales y los índices espectrales obtenidos.

1.6. Metas

- Generar dos imágenes satelitales corregidas correspondiente a la época lluviosa.
- Composición botánica de las dos zonas de muestreo
- Catálogo de firmas espectrales de los páramos de la zona de estudio.
- Mapa de distribución espacial de las especies analizadas en las zonas aledañas de la estación Cotopaxi.
- Análisis de estado de la vegetación por medio de índices espectrales.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentación teórica

2.1.1. Sistemas de información geográfica (SIG)

A un Sistema de Información Geográfica (SIG), se lo puede definir como el conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en la captura, almacenamiento, análisis, manipulación, generación, modelación y presentación de todo tipo de información geoespacial y sus atributos, con el fin de resolver problemas de gestión y planificación del territorio (Maguire, 1991).

Básicamente, un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite la realización de los siguientes procesos (Olaya, 2014):

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, entre otros (Olaya, 2014).

2.1.1.1. Cartografía temática

La cartografía es una ciencia que basa su objeto de estudio en la descripción y representación de los fenómenos espaciales, a partir de modelos (representaciones simplificadas de los hechos estudiados) que permiten una mejor comprensión de estos fenómenos. Es decir,

a partir de la construcción de una serie de elementos espaciales se modela la realidad, a fin de lograr una representación simbólica de la misma (Bosque & Zamora, 2002).

Según la ICA (Asociación Cartográfica Internacional): “Un mapa temático es aquél que representa las características algún concepto en particular de cierta zona de estudio”. Efectivamente un mapa puede ser definido como una representación del entorno, lo que evidentemente supone un concepto tan amplio que abarca no sólo a los elementos visibles de la superficie terrestre, sino a cualquier clase de fenómeno que posea una variabilidad espacial (RedLatinGEO, 2018).

Dentro de los mapas temáticos, encontramos los mapas con información cualitativa de objetos geográficos, el fin de estos mapas es mostrar la distribución espacial o situación de un grupo de datos sobre objetos geográficos, clasificados en escalas de medida nominales por ejemplo mapas de suelos, geológicos, entre otros (Suarez, 2014).

2.1.1.2. Unidad mínima de mapeo

Aunque vivimos en una era digital en la que no necesariamente trabajamos con mapas impresos, su resolución espacial y extensión están estrechamente relacionadas con los conceptos cartográficos tradicionales (Goodchil, 2001) .

La unidad mínima de mapeo (UMM) es usada para estimar la resolución de cuadrícula adecuada para una escala de mapeo determinada y esta es el área de tamaño más pequeña que se va a representar del terreno en estudio. De acuerdo con la definición de (Vink, 1975), el MLD es de 0.25 cm^2 en el mapa, por lo que la resolución de cuadrícula adecuada puede estimarse en función del número de escala.

$$p \leq \sqrt{\frac{MLD}{4}} = \frac{\sqrt{SN^2 \cdot 0.000025}}{2} = SN \cdot 0.0025 \quad (1)$$

Donde:

p: es el tamaño de la cuadrícula (píxel)

MLD: es el área de delineación mínima legible en el suelo en m².

SN: Factor de escala

La resolución de la cuadrícula también se puede relacionar con el MLA, que comúnmente oscila entre 0,25 mm y un máximo de 0,1 mm en el mapa (Goodchil, 2001) (Vink, 1975). Esto da las resoluciones legibles más pequeñas.

$$p \geq SN \cdot MLA \quad (2)$$

Donde:

p: es el tamaño de la cuadrícula (píxel)

SN: Factor de escala

MLA: Máxima precisión de ubicación

Aplicando las fórmulas (1) y (2) se determinó la siguiente escala de trabajo y unidad mínima cartográfica obteniendo los siguientes resultados:

$$10 \text{ m} \leq SN \cdot 0,0005 \text{ m}$$

$$SN \geq \frac{10}{0,0005}$$

$$SN \geq 20000$$

$$\text{Escala de Trabajo} = 1:20.000$$

$$MLD = (20.000)^2 \cdot 0,000025 \text{ m}^2$$

$$MLD = 10.000 \text{ m}^2$$

$$\text{Unidad Mínima Cartografiable} = 1 \text{ ha.}$$

2.1.2. Teledetección

La Teledetección es una técnica por medio de la cual se obtiene información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de datos de imágenes de la

superficie terrestre o marina, adquiridas por sensores instalados en plataformas espaciales, las cuales no están en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Chuvieco, 1996).

2.1.2.1. Elementos de la teledetección

Un sistema de teledetección está compuesto básicamente por los siguientes elementos (Figura 2) (Chuvieco, 1996):

- **Fuente de Energía:** Es el emisor de la radiación electromagnética que llegará a la superficie terrestre y que posteriormente será detectada por el sensor. Puede ser el sol (como fuente natural) o el mismo sensor (como fuente artificial).
- **Cubierta Terrestre:** Son las distintas masas de vegetación, suelo, agua o infraestructura. Las cuales reciben la radiación electromagnética proveniente de la fuente de energía, y la refleja en función de sus características físicas.
- **Sistema Sensor:** Conformado por el sensor y la plataforma que lo sustenta, su función principal es captar la respuesta de cada cubierta terrestre, codificarla y almacenarla.
- **Sistema de recepción y comercialización:** Es el sistema que recibe la información captada por la plataforma y la guarda en un formato específico y apropiado. Posteriormente se realizan las correcciones necesarias, y se procede a distribuir a los clientes interesados.
- **Intérprete o Analista:** Es aquella persona encargada de clasificar y analizar la información captada en la imagen para la generación de información.
- **Usuario Final:** Es quien recibirá y utilizará el producto final, es decir, la información ya procesada por el analista para algún fin en específico.

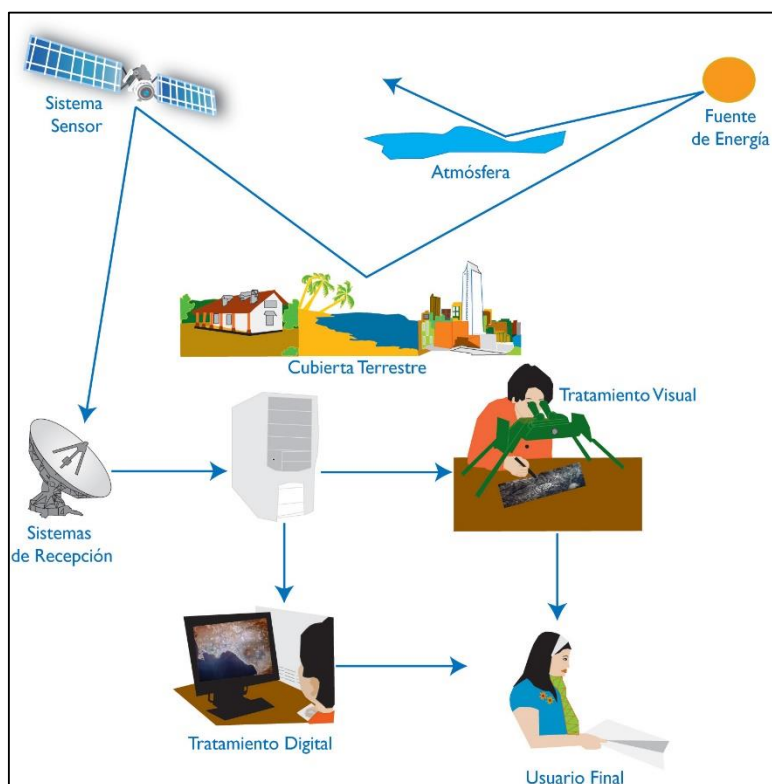


Figura 2. Elementos de la Teledetección

Fuente: (IGAC, 2018)

2.1.2.2. Clasificación de los sensores remotos

Los sensores se pueden clasificar dependiendo del origen de la señal captada, estos pueden ser activos o pasivos.

Los sensores pasivos se basan en la detección de las características reflectantes del sistema observado (objeto), es decir el sensor cumple la función de registrar la radiación emitida por la radiación solar reflejada.

Los sensores activos son aquellos en los que el sensor cumple doble función, ya que en primer lugar actúa activamente produciendo su propia señal de características conocidas que posteriormente registrará información después de interactuar con la cobertura terrestre (señal emitida y señal reflejada). El sensor activo más conocido es el radar, trabaja en la región de las microondas. Por otra parte, está el sensor activo “Lidar”, este opera con luz polarizada (láser) en el espectro óptico. La mayor ventaja de estos es que trabajan en todo el rango espectral,

mientras que los activos solamente trabajan con microondas, además de que atraviesan las nubes y no dependen de la luz solar para capturar la información (Chuvieco, 1996).

2.1.2.3. Resoluciones de un sensor remoto

Los sensores remotos se diferencian por las características de sus resoluciones, es decir, el nivel de detalle con el que capturan la información de la superficie terrestre, estas resoluciones son las siguiente: resolución espacial, resolución temporal, resolución radiométrica y resolución espectral (Chuvieco, 1996).

- Resolución Espacial: Como se puede apreciar en la Figura3, es el mínimo detalle espacial (tamaño del píxel) captado por el sensor (Figura 3).

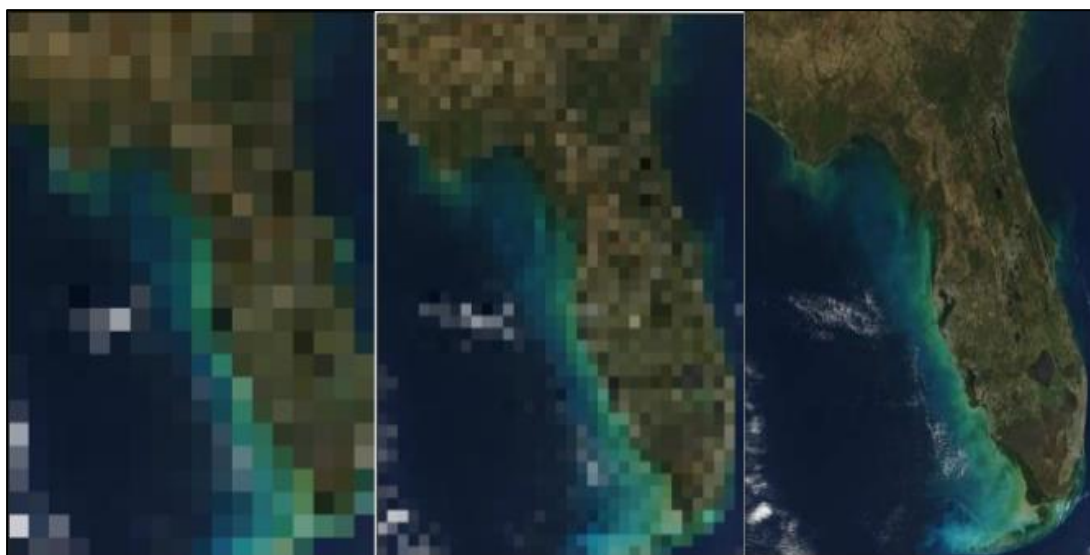


Figura 3. Ejemplo un mismo lugar a diferente resolución espacial

Fuente: (Quadri, 2018)

- Resolución Espectral: La Figura 4, indica el número y ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

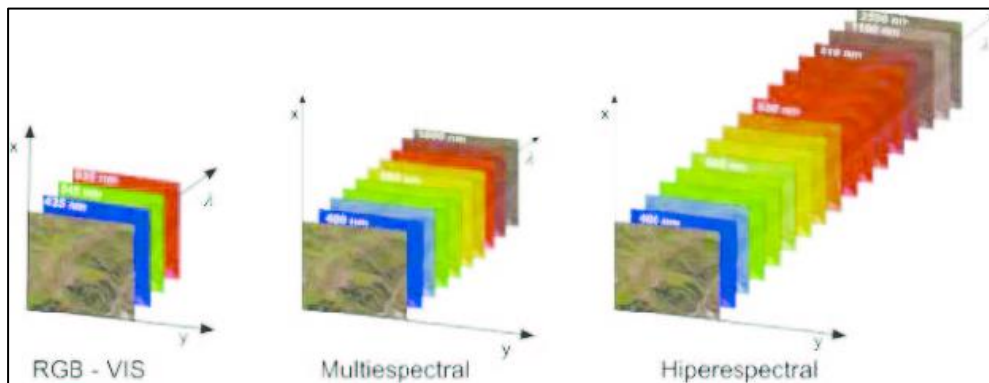


Figura 4. Clasificación de imágenes satelitales según su resolución espectral

Fuente: (Camacho, Vargas, Rojas, & Arguello, 2015)

- Resolución Radiométrica: Como se observa en la Figura 4, es la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que capta el sensor, indicada por la cantidad de tonos en escala de grises recogidos, por lo cual, mientras mayor sea la resolución radiométrica mejor será la capacidad de interpretación.

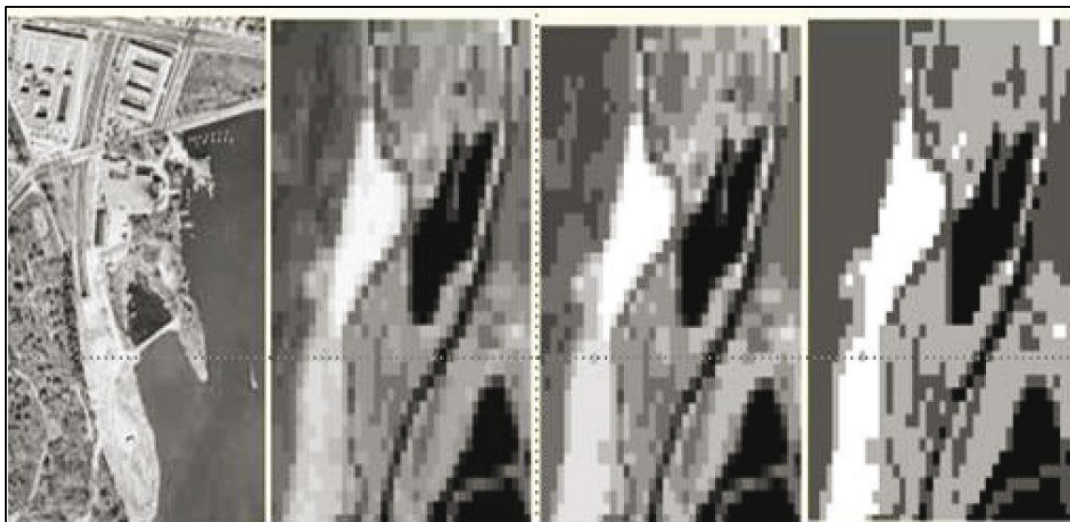


Figura 5. Ejemplos de resolución radiométrica de mayor (izquierda) a menor (derecha)

Fuente: (IGAC I. G., 2018)

- Resolución Temporal: Es la frecuencia con la que el sensor capta información de una misma superficie terrestre, como se lo muestra en la Figura 6.



Figura 6. Ejemplo de resolución temporal, una misma zona en distintas fechas de toma

Fuente: (TheDigitalRealm, 2018)

2.1.2.4. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias en las que se produce radiación electromagnética y está representada por valores de longitudes de onda que varían desde nanómetros hasta metros. Donde la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de onda a medida que la temperatura del cuerpo aumenta, tomando en cuenta que todo cuerpo con temperatura sobre el cero absoluto genera y emite energía en forma de radiación. A continuación, la Figura 7 y la Tabla 2 describen las principales características de cada una de las partes del espectro electromagnético (Hernández, 2011).

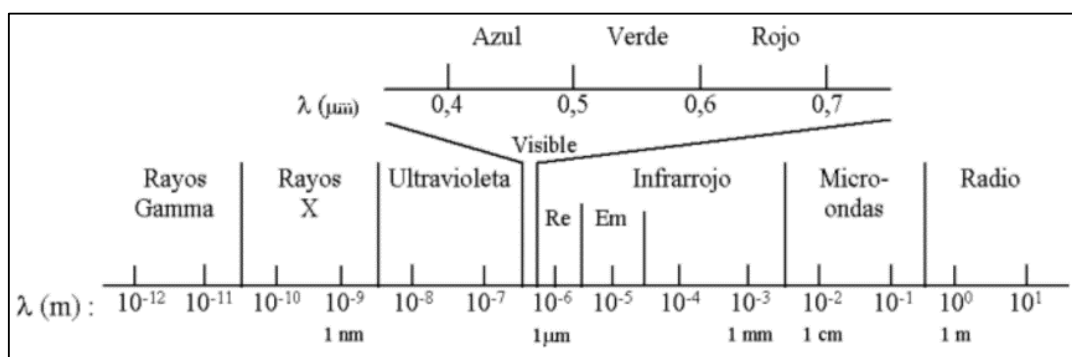


Figura 7. El Espectro electromagnético.

Fuente: (Hernández, 2011)

Tabla 2.

Descripción de las regiones del espectro electromagnético.

El Espectro Electromagnético

Región o Banda Espectral	Longitud de Onda (λ)	Características
Rayos Gamma Rayos X	< 0,03 nm 0,03 – 30 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se utilizan en teledetección.
Ultravioleta (UV)	0,03 – 0,4 μm	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ es completamente absorbida por la capa de ozono de la atmósfera. La radiación con λ entre 0,3 y 0,4 μm se transmite a través de la atmósfera y se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles especiales.
Visible (azul, verde, rojo)	0,4 – 0,7 μm	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo reflejado	0,7 – 3,0 μm	Radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El rango de longitud de onda de 0,7 a 0,9 μm se puede detectar usando películas fotosensibles y se denomina infrarrojo fotográfico
Infrarrojo térmico	3 – 5 μm , 8 – 14 μm	Corresponden a dos ventanas atmosféricas en la región térmica. Las imágenes son adquiridas usando sensores óptico-mecánicos y sistemas Vidicom especiales, pero no es posible usar película fotosensible.
Radar (región de la microondas)	0,1- 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Se utilizan en telecomunicaciones.

Fuente: (Hernández, 2011)

2.1.2.5. Firmas espectrales

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre esta interactúa de manera diferente con cada tipo de cobertura, ya sea por reflexión, absorción o transmisión de las longitudes de onda, esto en función a patrones de respuesta espectral. Los distintos comportamientos de cada tipo de cobertura es lo que se llama “Firma espectral” y es lo que permite que se puedan identificar los distintos tipos de coberturas como: suelo, vegetación, aguas, infraestructura, entre otros (Figura 8) (Hernández, 2011).

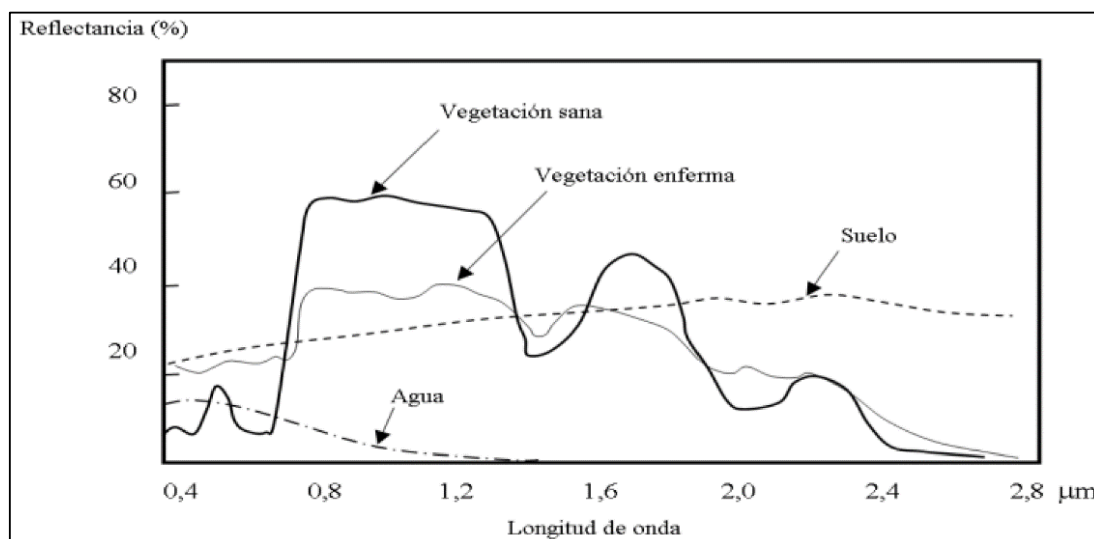


Figura 8. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo reflejado del Espectro Electromagnético

Fuente: (Hernández, 2011)

2.1.2.6. Espectrorradiómetro

El espectrorradiómetro es un instrumento que sirve para medición de la concentración espectral de potencia radiante, la transmitancia y reflectancia de un determinado rango del espectro electromagnético (CEM, 2018).

El espectrorradiómetro ASD FieldSpec4 (Figura 5) de alta resolución está diseñado para la recolección de datos espectrales en campo de una forma rápida y precisa. Su capacidad de detección se encuentra en el rango de (350 nm - 2500 nm) lo que proporciona una recolección de datos en el espectro visible, en el infrarrojo cercano (NIR) y en el infrarrojo corto (SWIR) (Malvern Panalytical, 2018).

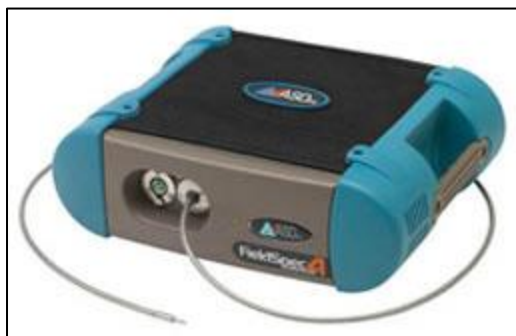


Figura 9. Espectroradiómetro ASD FieldSpec4 Hi-Res

Fuente: (Malvern Panalytical, 2018)

2.1.2.7. Índices espectrales

Una manera de mejorar la capacidad de interpretación de los resultados es efectuando operaciones entre bandas. Es decir, se puede obtener una “nueva banda” realizando operaciones entre las bandas espectrales de una imagen, proceso a lo cual se lo conoce como “Álgebra de bandas”. De esta manera se obtiene una banda que se lo conoce como “Índice espectral” resultado que permite mejorar la interpretación de algún tipo de cobertura en especial. Existen gran variedad de índices cada uno de ellos adecuados para la interpretación de distintos tipos de coberturas como: tipos de minerales, detección de humedad o para la caracterización de la vegetación (Hernández, 2011).

2.1.2.7.1. Índice de vegetación ajustado con el suelo (SAVI)

Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda roja (R) y la banda del infrarrojo cercano (NIR) ajustado con un factor “L”, que es la componente de brillo del suelo que se define con un valor de 0.5, ya que se ajusta mejor a todo tipo de cobertura para incluir explícitamente el factor suelo (CONAE, 2016).

$$SAVI = \left[\frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} \right] * (1 + L) \quad (3)$$

2.1.2.7.2. Índice normalizado de la diferencia de humedad (NDWI)

Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre el Infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR) (CONAE, 2016).

$$NDWI = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)} \quad (4)$$

2.1.2.7.3. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Es un índice que permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial. Se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR) (CONAE, 2016).

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad (5)$$

2.1.2.8. Proyecto Sentinel

Sentinel es un proyecto de cinco misiones basadas en constelaciones de dos satélites cada una. Las misiones Sentinel incluyen instrumentos radar, hiperespectrales de alta y media resolución, entre otros. Las misiones Sentinel están diseñadas para enriquecer la información del Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) en el transcurso de esta próxima década, que permitirán monitorizar cualquier cambio en la superficie terrestre, en los océanos y en la atmósfera, estas misiones son las siguientes: (ESA, 2018) .

- Sentinel-1 (2013): Esta misión con un sistema de satélite en órbita polar con un Radar de Apertura Sintética (SAR) que opera en la banda C, buscando dar continuidad a la información generada previamente por las misiones ERS-1, ERS-2 y Envisat de la ESA.
- Sentinel-2 (2013): Misión de órbita polar que cuenta con un instrumento multiespectral de alta resolución, el cual proveerá imágenes para el monitoreo de vegetación, cobertura del suelo y cuerpos de agua (continentales y costeros).

- Sentinel-3 (2013): Esta misión cuenta con múltiples instrumentos para brindar información para el estudio de los océanos, el monitoreo del medioambiente y del clima.
- Sentinel-4 (2019): Diseñado para un futuro monitoreo de la atmósfera, trabajará en órbita geoestacionaria.
- Sentinel-5 (2019): También diseñado para el monitoreo de la atmósfera, con la diferencia de que trabajará en órbita polar.

2.1.2.9. Misión sentinel2

La misión Sentinel-2 compuesta por los satélites Sentinel 2A y Sentinel 2B, fueron puestos en la misma órbita el 23 de junio del 2015 y el 7 de marzo del 2017 respectivamente, con un desfase de 180°, lo cual proporcionan una mejor resolución temporal. Además, cuentan con una altura orbital de 786 km y llevan incorporado una cámara multispectral de alta resolución, inspirado en las antiguas misiones francesas SPOT y en los satélites estadounidenses de la misión LANDSAT. Con sus 13 bandas espectrales, un ancho de banda de 290 km y un alto período de revisita, la misión Sentinel 2 fue diseñada con el fin de recopilar imágenes multispectrales de alta resolución a nivel global de tal manera que ayude a brindar apoyo a temas de gran importancia como: el cambio climático, la gestión de emergencias, la seguridad y el monitoreo de la tierra, aportando una nueva perspectiva de la superficie terrestre y de la vegetación (ESA, 2018). A continuación, se muestra en la Tabla 3 los rangos y las resoluciones de las bandas espectrales de los satélites Sentinel 2.

Tabla 3.
Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2

Bandas espectrales de satélites Sentinel-2

<i>Banda</i>	<i>Centro de Banda (nm)</i>	<i>Tamaño de píxel (m)</i>
Banda 2 - Azul	490 nm	10 m
Banda 3 - Verde	560 nm	10 m
Banda 4 - Rojo	665 nm	10 m
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	842 nm	10 m

CONTINÚA→

Banda 5 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	705 nm	20 m
Banda 6 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	740 nm	20 m
Banda 7 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	783 nm	20 m
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	865 nm	20 m
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	1610 nm	20 m
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	2190 nm	20 m
Banda 1 - Costa y Aerosol	443 nm	60 m
Banda 9 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	940 nm	60 m
Banda 10 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	1375 nm	60 m

Fuente: (ESA, 2018).

2.1.2.10. Tratamiento de imágenes satelitales

Se refiere a todos aquellos procesos que tienen el fin de eliminar cualquier anomalía detectada en una imagen, ya sea por su localización, en los Niveles digitales (ND) de los píxeles que la componen (Chuvieco, 1996).

2.1.2.10.1. Corrección geométrica

Este tipo de corrección implica el cambio en la posición que ocupan los píxeles de una imagen, sin modificar de manera alguna sus niveles digitales, sino solamente sus coordenadas, este procedimiento también conocido como “Georreferenciación” tiene como finalidad de dar a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estándar, para de este modo poder combinarla con otro tipo de capas en un entorno SIG (Chuvieco, 1996).

2.1.2.10.2. Corrección atmosférica

La radiación electromagnética es notablemente afectada por la influencia de varios componentes de la atmósfera terrestre. La presencia de aerosoles y el vapor de agua distorsiona

de forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie y el sensor, por lo que la radiancia que es finalmente detectada por el sensor no corresponde a un valor real de la superficie captada, sino que cuenta con un porcentaje de error añadido debido a la interferencia y efecto de estos aspectos atmosféricos (Chuvieco, 1996).

2.1.2.10.3. Corrección radiométrica

Se refiere a las técnicas implementadas que modifican los niveles digitales originales de una imagen, con la finalidad de hacerlos lo más semejantes a los de una imagen en una recepción ideal, es decir tratando de disminuir las distorsiones provocadas por la atmósfera, así como aquellas distorsiones que pudieran ser producidas por un mal funcionamiento del sensor (Chuvieco, 1996).

2.1.2.10.4. Corrección topográfica

La corrección topográfica permite compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a la variación altitudinal del terreno. Las zonas de con presencia de sombra presentaban menos reflectividad de lo que debieran, mientras que las zonas con luz solar presentaban una reflectividad más alta de lo esperado (Riaño, Salas, & Chuvieco, 2000).

2.1.3. Spectral Unmixing

“Spectral unmixing” es un algoritmo (7) que se basa en la suposición de un proceso de mezcla lineal para explicar los espectros observados, es decir, se supone que cada respuesta espectral observada en cada píxel de una imagen es el resultado de la combinación lineal de un “n” número de firmas espectrales Figura 10. Determina la abundancia relativa de ciertos tipos de cobertura en una imagen multispectral a partir de las características espectrales de sus firmas espectrales. El resultado obtenido está expresado en un formado raster por todos aquellos pixeles que presentan una respuesta espectral igual o similar al de la firma espectral ingresada, esta medida se la llama “Endmember Abundance”.

$$R_k = \sum_i^n a_i \cdot E_{i,k} + \varepsilon_k \quad (7)$$

Donde:

R_k = Reflectancia de la fuente en la longitud de onda k

$E_{i,k}$ = Reflectancia de la firma espectral i en la longitud de onda k

a_i = Abundancia de la firma espectral i

ε_k = Error en la longitud de onda k

n = Número de firmas espectrales

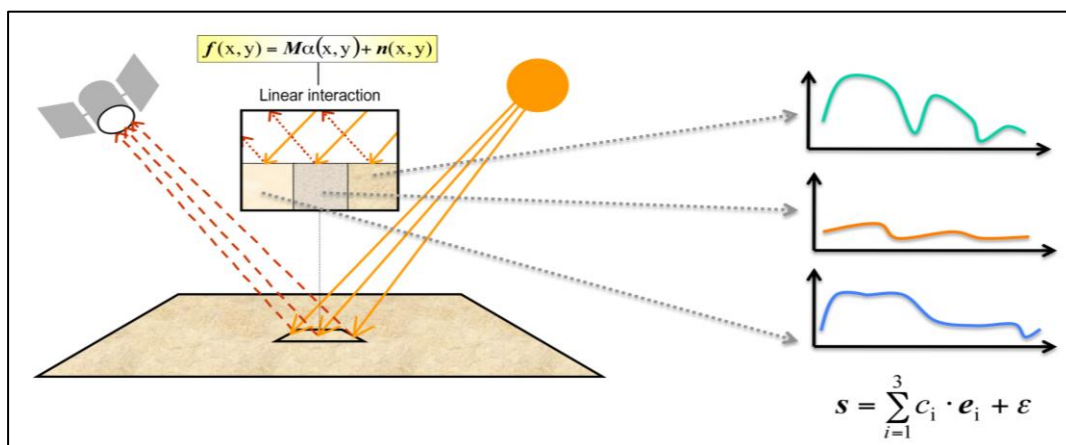


Figura 10. Linear Mixing Model (LMM)

Fuente: (Dalla, Chanussot, & Plaza, 2014)

2.1.4. Ecosistema páramo

El páramo es un ecosistema de alta montaña que se lo puede encontrar sobre la línea de bosques andinos hasta aquellos lugares donde se extiende su vegetación, por debajo las nieves eternas. Este ecosistema tropical de clima típicamente frío y húmedo se encuentra comúnmente entre los 3.200 msnm y 4.200 msnm (Mena & Hofstede, 2006).

Los páramos se encuentran en todas las altas montañas tropicales alrededor del mundo. En la Figura 11, la franja coloreada señala las zonas de alta montaña tropical, que coincide, aproximadamente, con la distribución de los ecosistemas afines al páramo, en todo el planeta (Llambí, et al., 2012).

En América los páramos se encuentran concentrados en: Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, con pequeñas extensiones en Costa Rica y Panamá. En África existe un ecosistema equivalente al páramo, conocido como "ecosistema atro-alpino" que se distribuye desde las altiplanicies de Etiopía, hasta las montañas del llamado Arco del Este, principalmente en Uganda, Kenia y Tanzania. También existe este ecosistema en Asia y Oceanía Este específicamente en las islas ubicadas entre los continentes de Asia y Australia, incluyendo el archipiélago indonesio y la isla de Nueva Guinea (Llambí, et al., 2012).

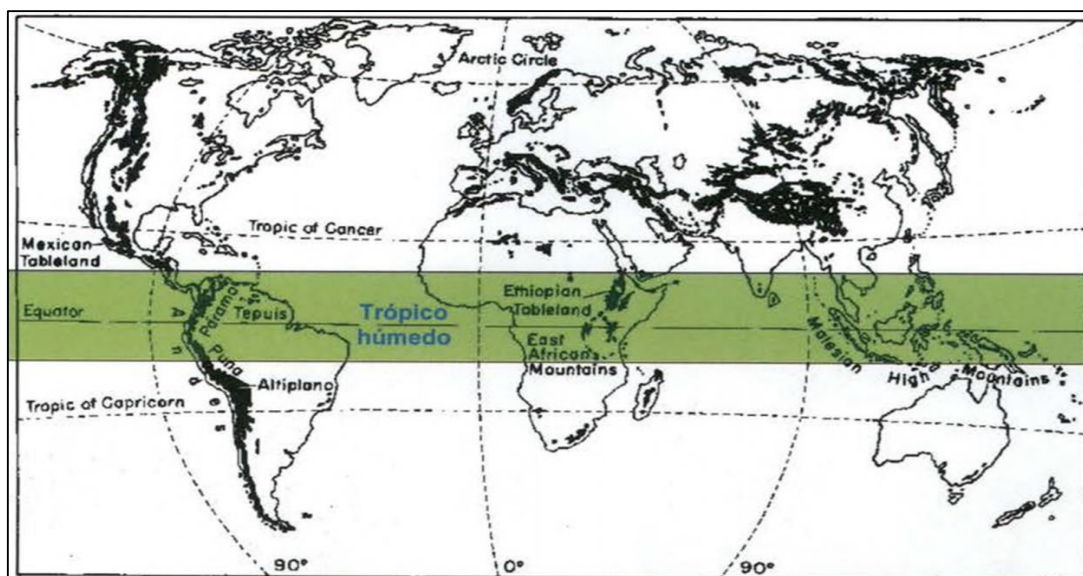


Figura 11. Distribución de los páramos en el mundo

Fuente: (Llambí, et al., 2012)

2.1.4.1. Páramos en el Ecuador

En el Ecuador, los páramos se distribuyen en la región Sierra, a lo largo de las dos cordilleras de los Andes, desde el límite con Colombia en el norte, hasta la frontera con Perú en el sur (Figura 12). Los páramos abarcan una superficie aproximada de 13.370 km² (Beltrán K. , et al., 2009), equivalente al 5% de la superficie del país. Estos ecosistemas ocurren sobre

el límite natural de los bosques que varía alrededor de los 3.300 m de altitud en el norte, y 3.000 m en el sur del país. El superior de distribución de los páramos alcanza los 4.600 a 4.800 m de elevación, hasta donde es posible el crecimiento de plantas vasculares (Sklenář & Balslev, 2007). El límite inferior de los páramos no es constante, esto ocurre en elevaciones menores, donde la intervención antrópica del ser humano ha generado un retroceso del límite inferior de este ecosistema (Bader, Rietkerk, & Bregt, 2007).

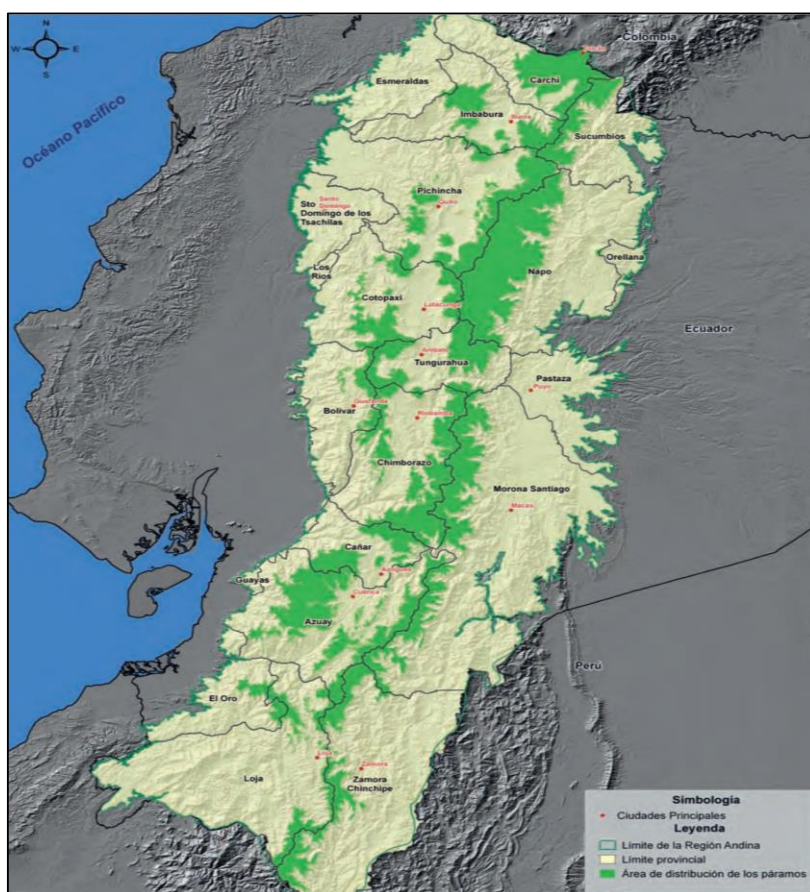


Figura 12. Distribución espacial del Ecosistema Páramo en el Ecuador

Fuente: (Beltrán K. , et al., 2009)

2.1.4.2. Vegetación de páramo

Los páramos se clasifican en tres grandes unidades según su tipo de vegetación, su fisonomía y estructura: subpáramo arbustivo, páramo pajonal, y superpáramo (Ramsay & Oxley, The growth form composition of plant communities in the Ecuadorian paramos, 1997); a esto se suma la presencia de bosques ocasionalmente monotípicos de “*Polylepis*, *Gynoxys*” y

“*Buddleja*”, remanentes de bosques altoandinos (Cuesta, Sevink, Llambí, De Bièvre, & Posner, 2014).

Las formaciones vegetales o tipos fisionómicos más comunes incluyen: el bosque paramero o subpáramo, los rosetales, pajonales, arbustales o matorrales, el páramo desértico del superpáramo, los humedales altoandinos, entre otros (Cuesta, Sevink, Llambí, De Bièvre, & Posner, 2014). En cada una de estas formaciones vegetales, dominan diferentes formas de vida de plantas que incluyen rosetas caulescentes, arbustos esclerófilos, cojines, rosetas acaules, gramíneas en macolla, hierbas no gramínoideas, entre otras (Azócar & Rada, 2006) (Ramsay & Oxley, 1997).

Cada forma de vida en especial la vegetación de este ecosistema se ha logrado adaptar de distintas maneras, encontrando la forma de enfrentar las difíciles condiciones ambientales de la alta montaña tropical, que incluyen las bajas temperaturas nocturnas, gran amplitud térmica diaria, altos niveles de radiación y suelos generalmente pobres en nutrientes (Azócar & Rada, 2006), todos los tipos de vegetación que se pueden encontrar en los páramos se encuentran ilustrados en la Figura 13.

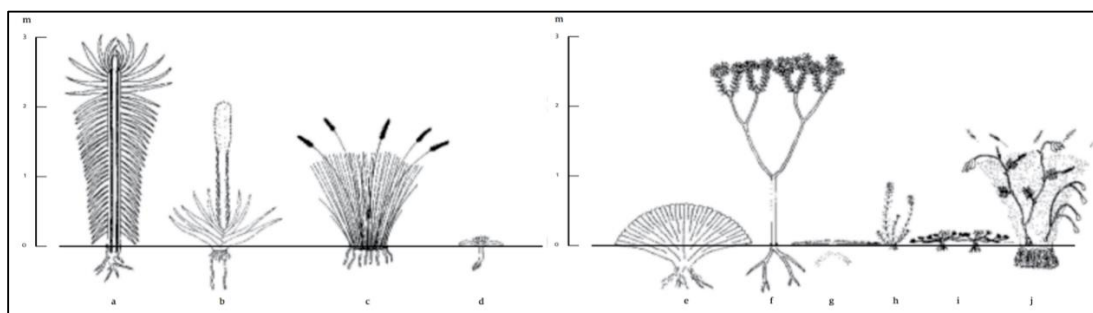


Figura 13. Tipos de vegetación: (a) rosetas caulescentes, (b) rosetas basales, (c) penachos, (d) rosetas acaulescentes, (e) cojines y tapetes, (f) arbustos erectos, (g) arbustos prostrados, (h) hierbas erectas, (i) hierbas prostradas, (j) hierbas rastreras y trepadoras.

Fuente: (Ramsay & Oxley, 1996)

2.1.4.2.1. Subpáramo arbustivo

El subpáramo arbustivo cubre el ecotono entre el bosque altoandino y el páramo de pajonal. En la mayoría de los casos se encuentra conformado por arbustos erectos y esclerófilos de los géneros: *Valeriana*, *Gynoxys*, *Diplostephium*, *Pentacalia*, *Monticalia*, *Chuquiraga*,

Berberis, *Hypericum*, *Gnaphalium*, *Lupinus*, *Loricaria*, *Calceolaria* y *Hesperomeles*. Sin embargo, este tipo de vegetación ya no existe en grandes extensiones debido al avance de la frontera agrícola (Beltrán K. , et al., 2009).

2.1.4.2.2. Páramo pajonal

El páramo de pajonal aparece de manera gradual conforme la elevación va aumentando y el clima va cambiando; en este ecosistema la vegetación se reduce a formas de vida arbustivas con dominancia de Poáceas amacolladas o en penachos (principalmente de los géneros *Festuca*, *Calamagrostis* y *Stipa*), junto con las rosetas gigantes (*Espeletia* y *Puya*), manchas de arbustos xerofíticos de los géneros *Diplostephium*, *Hypericum* y *Pentacalia* (Ramsay & Oxley, 1997) y parches de bosques monotípicos de *Polylepis*, *Gynoxys* o *Buddleja* (Beltrán K. , et al., 2009).

2.1.4.2.3. Superpáramo

El superpáramo se encuentra ubicado principalmente en el centro y norte del país, en las faldas de las montañas y cumbres más altas, en aquellas que se elevan de 4.100 a 4.800 m. A su vez este puede ser dividido en dos cinturones altitudinales: superpáramo inferior y superpáramo superior (Sklenár, 2000).

El superpáramo inferior se caracteriza por una vegetación cerrada de arbustos postrados (*Loricaria*, *Pentacalia*), cojines o almohadillas (*Plantago rigida*, *Xenophyllum*, *Azorella*), rosetas acaulescentes (*Hypochaeris*, *Oritrophium*) y hierbas amacolladas o en penacho (*Calamagrostis*, *Festuca*), mientras que el superpáramo superior está distribuido entre elevaciones de entre los 4.400 y 4.500 metros , este carece de arbustos postrados y hierbas amacolladas o en penacho, y presenta una cobertura vegetal muy localizada (Beltrán K. , et al., 2009). Algunas observaciones recientes indican que la composición florística del superpáramo depende de la disponibilidad de agua de este, la cual está altamente correlacionada con los patrones de precipitación de cada montaña (Sklenár, Bendix, & Balslev, 2008). La variación topográfica resulta en hábitats “azonales” (almohadillas, turberas y vegetación acuática), los cuales ocurren en áreas per-húmedas (Cuesta, Sevink, Llambí, De Bièvre, & Posner, 2014).

2.2. Fundamento conceptual

- Páramo

Ecosistema tropical altoandino, caracterizado por una vegetación dominante no arbórea, que incluye fragmentos de bosques nativos propios de este ecosistema (FAO, 2018).

- Vegetación

Se refiere al conjunto de plantas que conforman un área determinada. Los vegetales no se limitan a crecer con independencia unos de otros, sino que ejercen múltiples influencias directas e indirectas sobre los demás (De Bolós, 1983).

- Especie

Especie consiste en una población o grupo de poblaciones que comparten un destino evolutivo común a través del tiempo (Templeton, 1989).

- Teledetección

Es la ciencia y arte de obtener información acerca de la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con ella. Esto se realiza detectando y grabando la energía emitida o reflejada y procesando, analizando y aplicando esa información (Lindenlaub, 1976).

- Imagen satelital

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste, producto que posteriormente se transmite a estaciones terrenas para su visualización, procesamiento y análisis (TELEDET, 2018).

- Firma espectral

La firma espectral es la reflectancia en función de la longitud de onda, cada material tiene una firma única (NASA, 2018).

- Índice espectral

Son operaciones aritméticas entre las bandas de una imagen, de la cual se obtiene como resultado una nueva banda con la misma estructura y tamaño, los cuales llamamos índices mismos que independizan los factores que distorsionan su observación y resaltan aquellos importantes para cierto estudio.

2.3. Fundamento legal

El presente trabajo tiene como fundamento legal los siguientes artículos de la Constitución de la República del Ecuador del año 2008.

- Artículo 406.- La Constitución de la República del Ecuador describe que el Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros.
- Artículo 99.- Conservación de páramos, moretales y manglares. Será de interés público la conservación, protección y restauración de los páramos, moretales y ecosistema de manglar. Se prohíbe su afectación, tala y cambio de uso de suelo, de conformidad con la ley. Las comunas, comunidades, pueblos, nacionalidades y colectivos participarán en el cuidado de estos ecosistemas y comunicarán a la autoridad competente, cualquier violación o destrucción de los mismos.
- Artículo 100.- Disposiciones sobre el ecosistema páramo. Para la protección, uso sostenible y restauración del ecosistema páramo, se considerarán las características ecosistémicas de regulación hídrica, ecológica, biológica, social, cultural y económica. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales, Metropolitanos o Municipales deberán establecer planes, programas y proyectos que coadyuven a la conservación de dicho ecosistema bajo los criterios de la política nacional emitida por la Autoridad Ambiental Nacional.

De igual manera este trabajo se sustenta en los objetivos de desarrollo sostenible, desarrollados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en el cual establece en los objetivos 13 y 15.

- Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
- Objetivo 15. Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica

En el Plan Nacional de desarrollo 2017- 2023 de Ecuador en el objetivo 3 también se sustenta este trabajo, el cual busca garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, y específicamente el 7.1 donde se establece que el estado debe conservar, recuperar y regular el aprovechamiento del patrimonio natural y social, rural y urbano, continental, insular y marino-costero, que asegure y precautele los derechos de las presentes y futuras generaciones.

2.4. Sistemas de variables

2.4.1. Variables dependientes

- Firma espectral
- Índices espectrales

2.4.2. Variables independientes

- Cobertura vegetal
- Resoluciones del satélite sentinel2

2.4.3. Operacionalización de las variables

El cuadro operacional de las variables se muestra en el Anexo 1.

2.5. Preguntas de Investigación

2.5.1. Pregunta general

- ¿Es posible mapear la vegetación de páramo usando imágenes satelitales de los satélites sentinel2 a partir de la obtención de firmas espectrales y su posterior clasificación usando la herramienta “Spectral Unmixing”?

2.5.2. Preguntas específicas

- ¿Qué nivel de tratamiento necesitan las imágenes satelitales a ser utilizadas para la caracterización de la cobertura vegetal?
- ¿Cuáles y cuántas especies vegetativas existen en el páramo del área de estudio?
- ¿Cuál es el área de cobertura de cada especie vegetativa identificada del área de estudio?

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tratamiento digital de imágenes satelitales

3.1.1. Descarga de imágenes satelitales

La descarga de las imágenes satelitales se lo realizó desde la página de la USGS (Figura 14), definiendo primeramente los parámetros de búsqueda necesarios para los fines del proyecto es decir: fecha de toma (época Lluviosa), coordenadas del área de estudio, sensor de interés (Sentinel 2A Y 2B) y porcentaje de cobertura de nubes. Se onstató que no exista cobertura de nubes en el área de estudio.

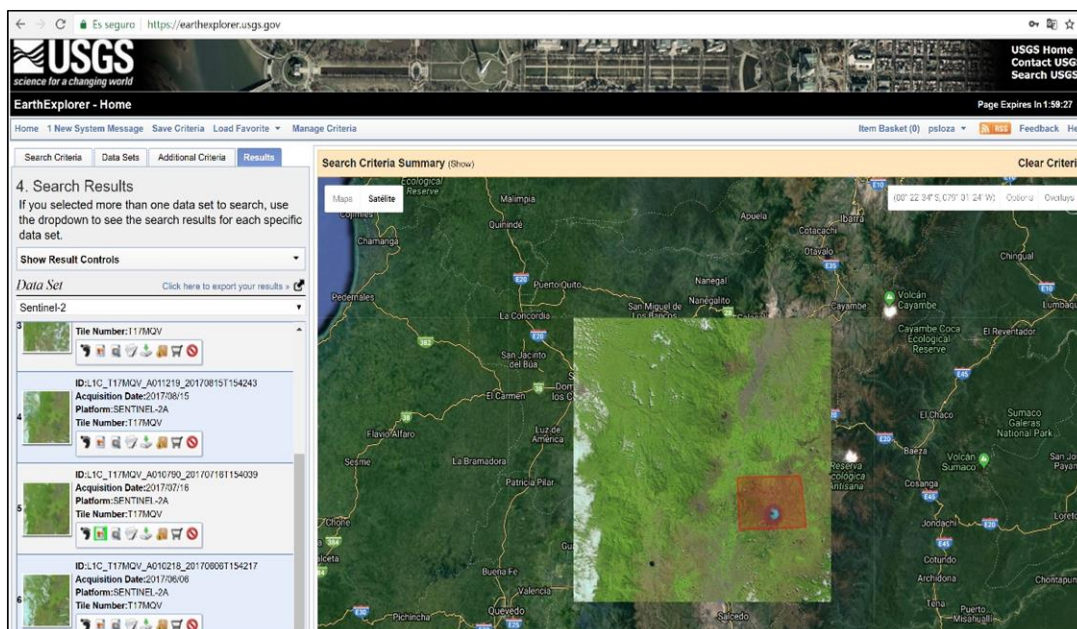


Figura 14.
Captura de pantalla de

earthexplorer.usgs.gov

3.1.2. Corrección atmosférica y radiométrica

El siguiente paso fue el procesamiento de las imágenes satelitales descargadas, para lo cual se ocupó el software Sentinel Application Platform SNAP, ya que no se logró realizar el procesamiento en los softwares ENVI 5.3 y ENVI 5.4, debido a que existe un problema de compatibilidad con las imágenes de sentinel 2 a la hora de ingresar metadatos de cualquier imagen captada por estos sensores, arrojando un error que nos impide proseguir con las correcciones atmosférica y radiométrica de las imágenes en estos programas.

Como solución a este problema, se decidió realizar las correcciones atmosférica y radiométrica en el software SNAP Desktop, en el cual necesario descargar un plug-in adicional llamado “Sen2cor” (Figura 15) el mismo que nos permitirá generar imágenes satelitales de nivel 2A a partir de imágenes en nivel 1C. Este programa además nos permite realizar las correcciones: atmosférica, del terreno (a través de modelos digitales de elevaciones) y de nubes “Cirrus”

Para continuar con el procesamiento de las imágenes satelitales se tomó en cuenta las observaciones, recomendaciones y procedimientos detallados en el documento “Sen2Cor Configuration and user manual” de la ESA (ESA, 2018).

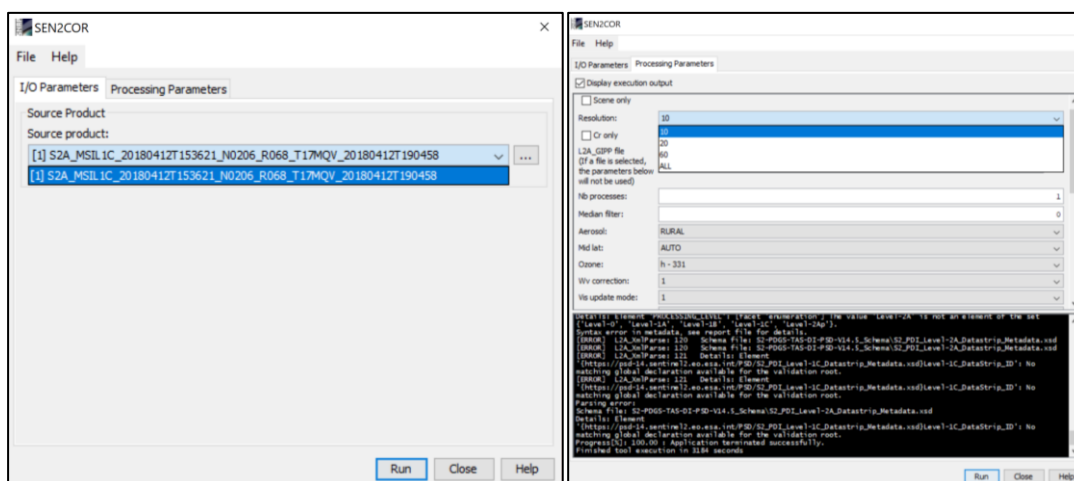


Figura 15. Captura de Pantalla del programa Sen2Cor

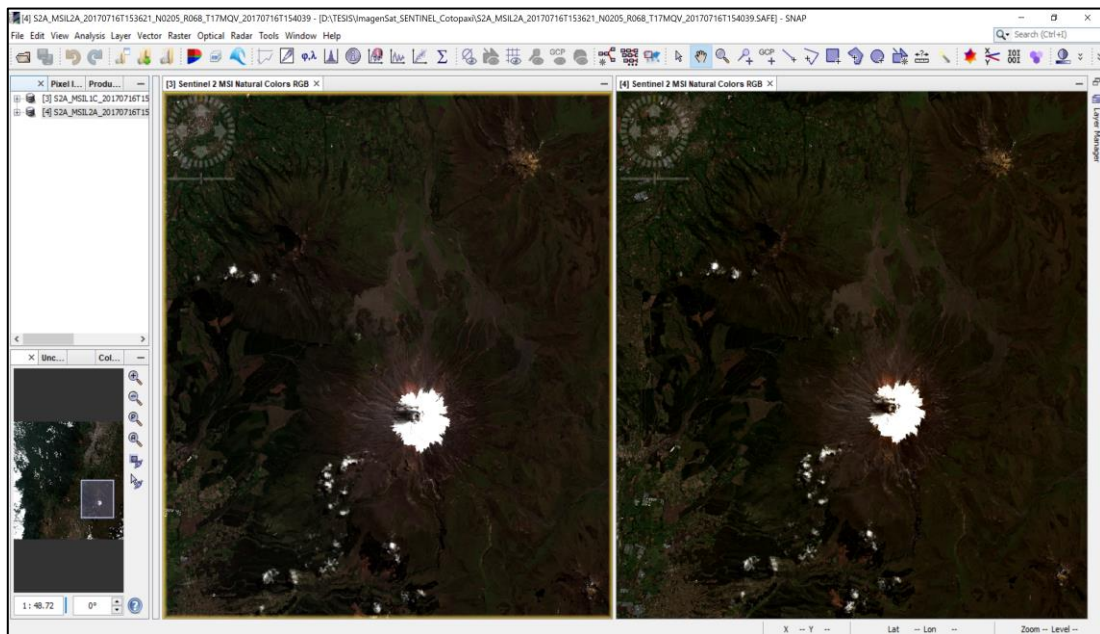


Figura 16. Comparación imágenes Sentinel L1C (izquierda) vs L2A (derecha)

3.2. Definición de zonas de muestreo

Para la definición de zonas de muestreo en primer lugar se calcularon índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI (Figura 17), en los cuales se identificó zonas heterogéneas de vegetación en función de los valores obtenidos en cada índice.

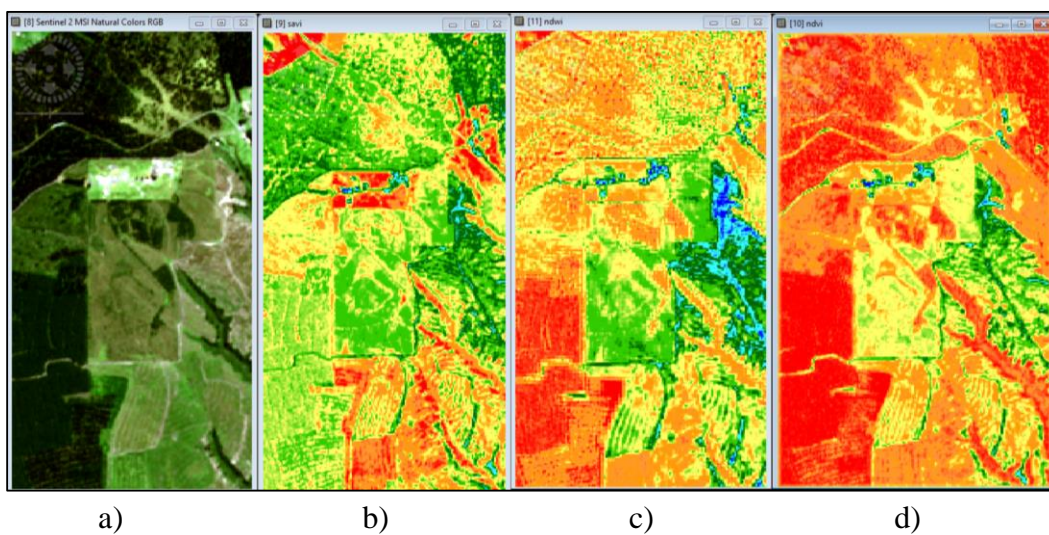


Figura 17. Índices espectrales aplicados al área de estudio a) imagen sentinel 2, b) índice de SAVI, c) índice NDWI y d) índice NDVI

Después, de la verificación en campo realizada, se establecieron 2 subzonas de estudio, las cuales fueron elegidas por ser las más representativas del área de estudio, tener una extensión de al menos 2500 metros cuadrados correspondiente a la unidad mínima de mapeo y por ser vegetación específica del ecosistema páramo.

3.3. Vegetación del área de estudio

Dependiendo del régimen hídrico o de las formas de vida predominantes, se puede realizar una clasificación más fina de la vegetación de páramo, estos son: páramo herbáceo, arbustivo, de almohadilla, de frailejones o páramo seco.

Para la identificación de especies se realizó dos visitas de campo en donde se fotografió y se tomó muestras de las especies más predominantes para después ser identificadas.

El área de estudio se ubica entre los 3500 metros y presenta una gran predominancia de vegetación de especies del tipo penachos de los géneros *Calamagrostis* y *Festuca* (Figura 18), por lo que se lo definió como páramo pajonal, sin embargo, también se encontró áreas considerables de vegetación perteneciente al superpáramo, tales como *Lachemilla orbiculata* y *Gentianella cerastioides* (Figura 19) típicas del páramo almohadilla, las cuales también fueron tomadas en cuenta. Por esta razón se establecieron 2 subzonas de estudio, para abarcar los dos tipos de vegetación más predominantes, la primera enfocándose a especies del tipo penachos y la otra en especies del páramo de almohadilla.

Es importante recalcar que a pesar de que se encontraron más tipos de vegetación, en especial especies arbustivas, estas no fueron consideradas en el estudio ya que se encontraban muy dispersas y no guardaban homogeneidad y por lo tanto no llegaron a cumplir con los requerimientos de la unidad mínima de mapeo de este trabajo.



Figura 18. Páramo con predominancia de pajonales



Figura 19. Páramo con predominancia de herbazal húmedo

3.4. Composición botánica

Esta metodología nos permitió determinar la proporción en que ciertas especies están presentes en las parcelas de estudio, su aporte relativo de cada especie respecto a la biomasa total de la parcela, es decir consiste en determinar el número de plantas por unidad de área y la cobertura de las especies (Toledo & Schultze-Kraft, 1982).

Esta metodología fue ajustada a las necesidades del trabajo, debido a que la resolución espacial de los satélites de la misión Sentinel2 es de 10m, se establecieron dos parcelas de estudio de 10 m x 10 m en las zonas previamente identificadas, a su vez a estas parcelas de estudio se las subdividió en 25 subparcelas de 2 m x 2 m en las cuales se realizó composición botánica en 13 de ellas para después obtener una composición botánica promedio de la parcela de 10 metros. De esta manera se simuló el comportamiento espectral de un pixel de los satélites Sentinel2 en los dos tipos de vegetación predominante (Figura 20).

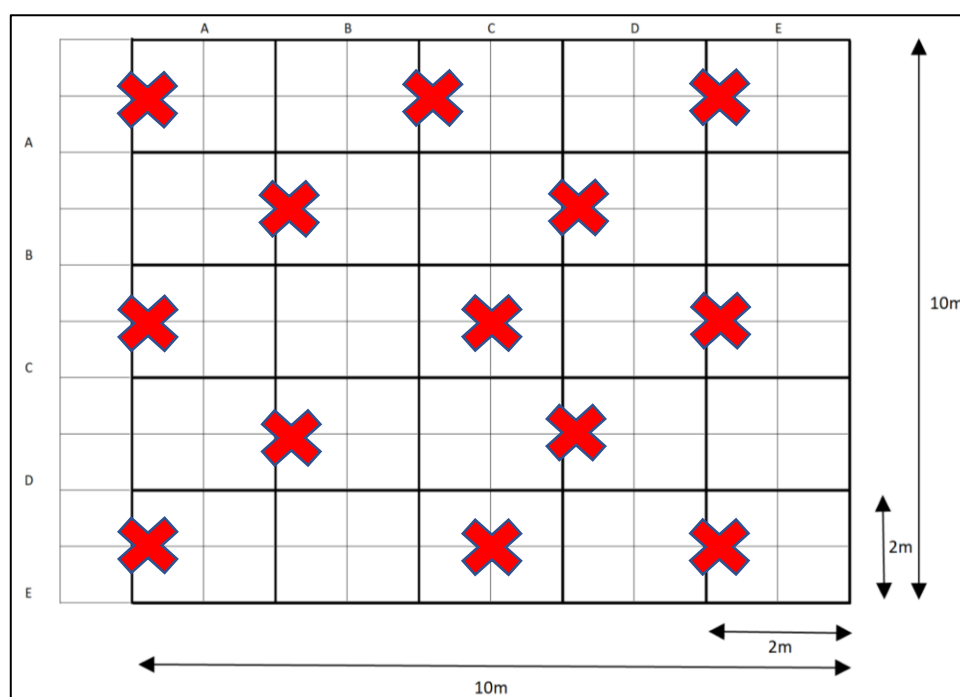


Figura 20. Dimensiones de la parcela y (X) subparcelas para análisis de composición botánica y captura de firmas espectrales

3.4.1. Procedimiento para la materialización en campo de parcelas y subparcelas

Materiales: Cinta, estacas, piola, martillo y GPS

- Identificar una zona en donde predomine la vegetación a ser muestreada.
- Demarcar la primera esquina de la parcela con una estaca, después con ayuda de la cinta construir una cuadrícula de diez metros a cada lado.
- En cada lado de la cuadrícula realizar mediciones a los dos, cuatro, seis y ocho metros y ubicar una estaca en cada medición.
- Finalmente delimitar la parcela y las subparcelas usando la piola
- Tomar las coordenadas de la parcela usando el GPS.

3.4.2. Procedimiento para la identificación de especies y obtención de firmas espectrales

Una vez delimitadas todas las subparcelas es necesario hacer la composición botánica individual de cada parcela, para lo que se procedió a identificar cada especie presente dentro de la subparcela y estimar su porcentaje de abundancia como se observa en la Figura 21.

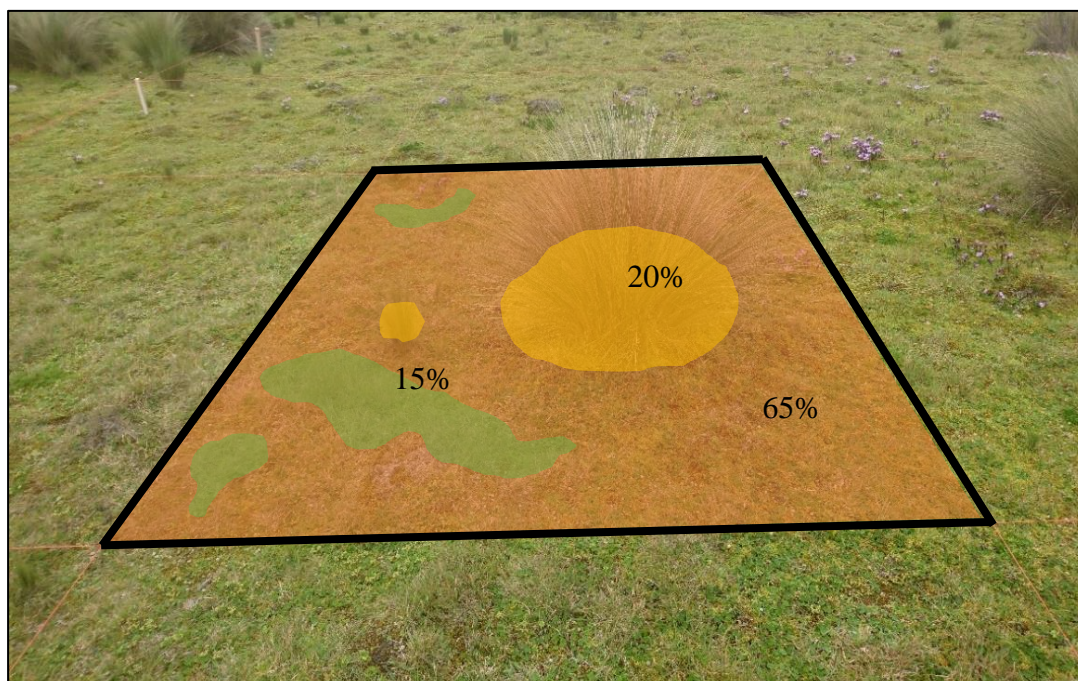


Figura 21. Identificación y estimación de abundancia de especies en una subparcela

A continuación, se realizó la captura de las firmas espectrales (Figura 22) en donde se tomó al menos cuatro mediciones de 5 repeticiones en cada subparcela obteniendo un total de 260 firmas espectrales en cada cuadrícula.



Figura 22. Captura de firmas espectrales en campo

3.5. Metodología para la obtención de firmas espectrales

3.5.1. Firmas espectrales en campo

Para las mediciones de las firmas espectrales en campo se utilizó la metodología establecida por (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015) en su capítulo número dos “Data Collection” de su reporte técnico para el espectroradiómetro FielSpec4.

Procedimiento de medición de firmas espectrales:

1. Conectar el espectroradiómetro FielSpec4 a una fuente de energía, es decir a una batería recargable o de ser posible a un enchufe eléctrico a través de la unidad de suministro de energía.
2. Iniciar el espectroradiómetro FielSpec4 accionando el interruptor de encendido / apagado que se encuentra en la parte posterior del dispositivo Figura 23.



Figura 23. Interruptor de encendido FielSpec4

Fuente: (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015)

3. Cuando el espectroradiómetro FielSpec4 esté listo para medir, se debe sacar con cuidado el cable de fibra óptica de la red de almacenamiento superior. Quite la tapa de goma negra y pase el extremo del cable dentro de la pistola.
4. Colocar el espectroradiómetro FielSpec4 en la mochila ASD (Figura 24), coloque con seguridad todos los componentes y ajuste los pestillos superiores, los dos laterales y el de la cintura.



Figura 24. Mochila ASD de campo para FielSpec4

Fuente: (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015)

5. Prender el computador e iniciar el software RS³. El espectroradiómetro FielSpec4 debe conectarse automáticamente a la computadora portátil a través de WiFi (Figura 25), que se indica mediante un mensaje de Windows y la visualización instantánea de los espectros medidos (datos en bruto).

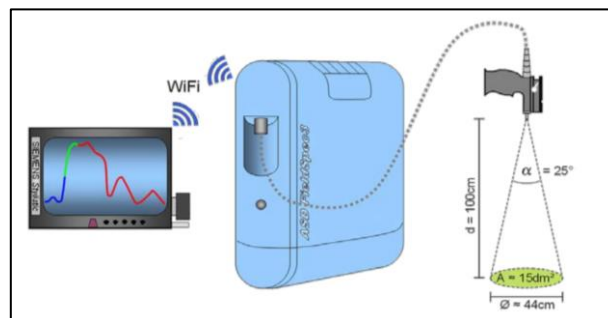


Figura 25. Conexión Automática por Wi-fi del espectroradiómetro FielSpec4

Fuente: (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015)

6. Button “WR”: Antes de realizar cualquier medición, es necesario calibrar el equipo usando con un blanco referencia hasta que aparezca una línea similar a la de la Figura 26.

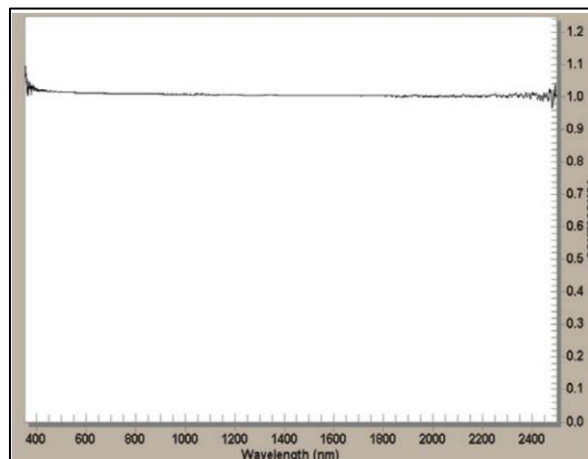


Figura 26. Calibración del espectroradiómetro FielSpec4

Fuente: (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015)

7. Spectrum Save: Una vez calibrado es necesario definir el lugar de almacenamiento de la información, su codificación, intervalos y número de mediciones a realizar.
8. Realizar cada medición en función del objeto a muestrear, tomando en cuenta el área de cobertura, la distancia y el ángulo de la fibra óptica usando la ecuación (4).

$$A = \left(\tan \frac{\alpha}{2} \cdot d \right)^2 \quad (6)$$

A = Área

α = Ángulo de la fibra óptica

d = Distancia desde la fibra óptica al objetivo

Fuente: (Danner, Locherer, Hank, & Richter, 2015)

3.5.2. Procesamiento de firmas espectrales

Una vez capturadas las firmas espectrales en campo estas son guardadas en la carpeta de destino en formato (.asd), los cuales pueden ser visualizados, corregidos y procesados en el programa “ViewSpecPro”. Programa en el que se procedió a ingresar las 20 firmas espectrales captadas de cada subparcela muestreada (Figura 27) para después promediarlas obteniendo una

firma espectral promedio (Figura 28) de cada subparcela. Finalmente, una vez obtenidos los promedios de las 13 subparcelas (Figura 29) se procedió a obtener una firma espectral promedio final de toda la cuadrícula, consiguiendo de esta manera un comportamiento espectral promedio de la vegetación analizada.

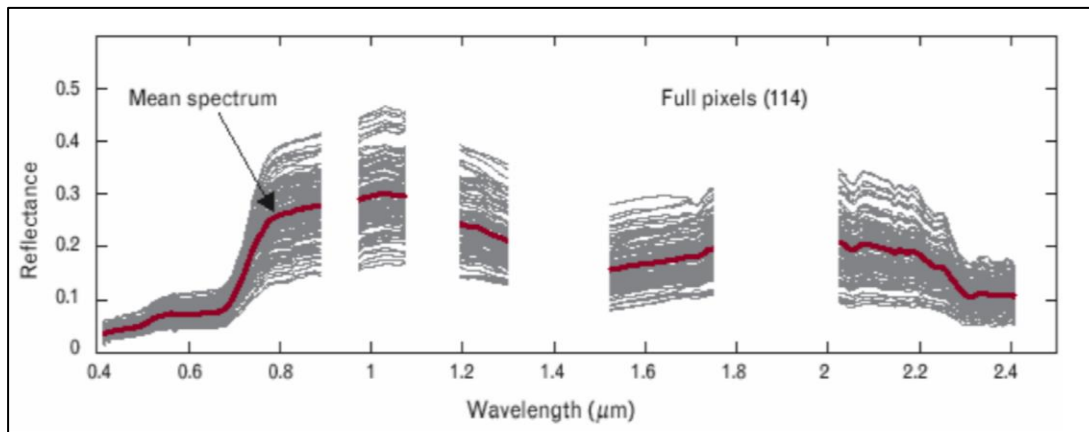


Figura 27. Ejemplo de una firma espectral promedio

Fuente: (Dalla, Chanussot, & Plaza, 2014)

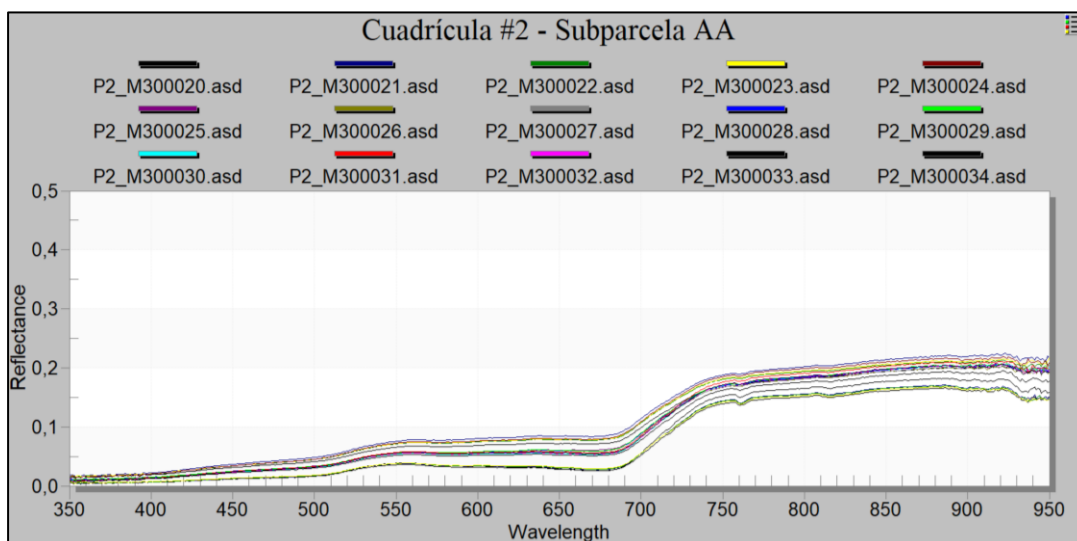


Figura 28. Firmas espectrales captadas en la subparcela AA de la Cuadrícula #2

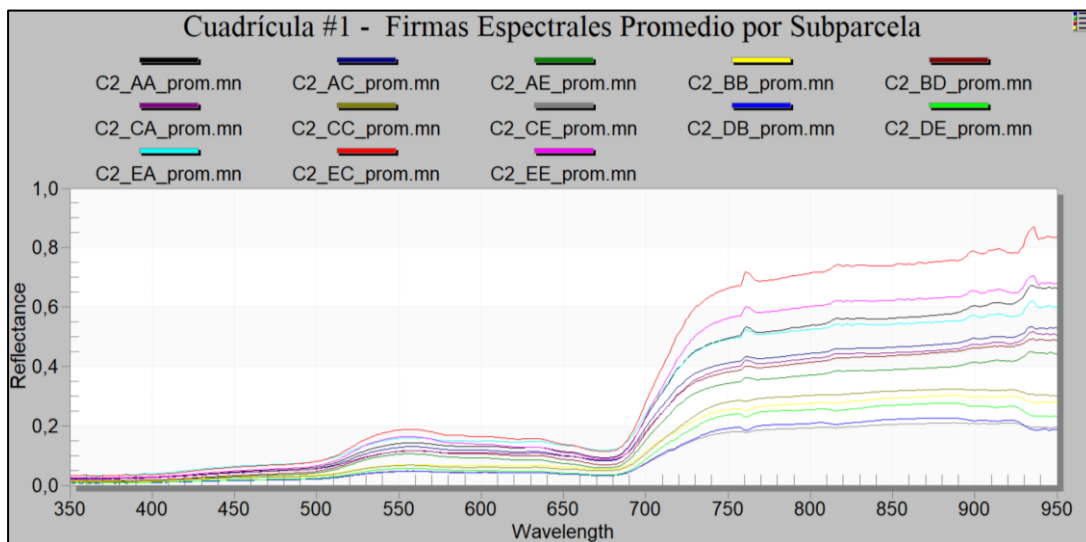


Figura 29. Firmas espectrales promedio captadas en las subparcelas - Cuadrícula #1

3.6. Distribución espacial de especies analizadas

Para determinar la distribución espacial de la vegetación analizada se utilizó la herramienta “Spectral Unmixing” del software SNAP Desktop, el cual es un algoritmo lineal y es la herramienta que permitió determinar la abundancia relativa de las firmas espectrales obtenidas previamente (cuadrícula #1 y la cuadrícula #2) en las imágenes satelitales.

Para complementar el los resultados obtenidos con la herramienta “Spectral Unmixing”, se aplicó componentes principales a las imágenes previamente procesadas (Figura 30), componentes principales es una técnica que se usa para resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto, más pequeño sin perder parte significativa de la información original, en la teledetección los componentes principales buscan reducir aquella información redundante y construir otras bandas que permitan diferenciar de mejor manera las distintas coberturas. Una vez hecho esto se precedió a realizar una clasificación “No Supervisada”, esto permitió diferenciar el comportamiento y/o estado de las coberturas identificadas previamente con la herramienta “spectral unmixing” y clasificar los espacios vacíos que quedaron anteriormente.

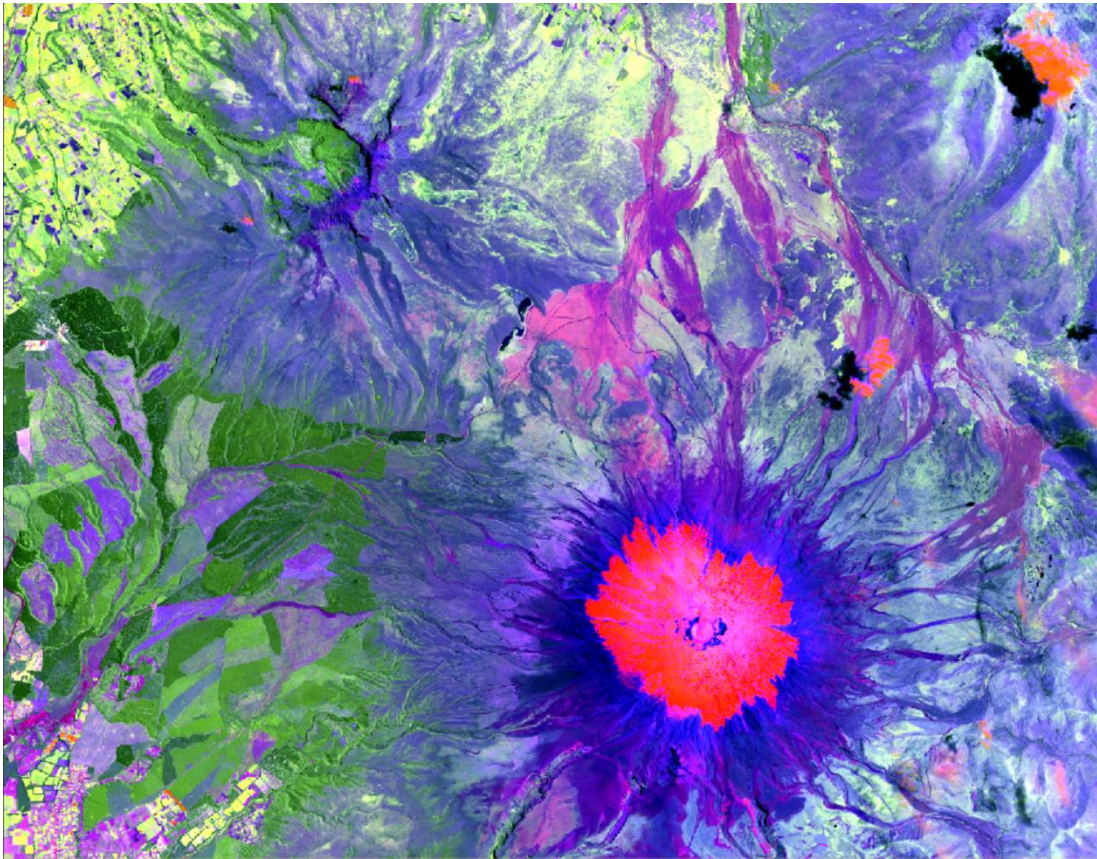


Figura 30. Imagen satelital del área de estudio aplicada componentes principales

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Imágenes sentinel-2 corregidas

Una vez definidos los parámetros de búsqueda para las imágenes satelitales, solamente dos imágenes cumplieron con requisitos establecidos de cobertura de nubes y época del año (Tabla 4), las cuales fueron procesadas en el software SNAP según la metodología establecida para la corrección atmosférica de las imágenes satelitales descargas obteniendo los siguientes imágenes corregidas Figura 31 y Figura 32.

Tabla 4

Lista de Imágenes satelitales procesadas

Imágenes satelitales procesadas

	<i>Satélite</i>	<i>Fecha de Toma</i>	<i>% de Cobertura de Nubes</i>	<i>Nivel de Procesamiento</i>
1	Sentinel 2A	2017-07-16 (Época Lluviosa)	05,45 %	L2A
2	Sentinel 2A	2018-04-12 (Época Lluviosa)	16,45 %	L2A



Figura 31. Imagen sentinel-2A nivel de procesamiento L2A correspondiente a la fecha 2017-07-16

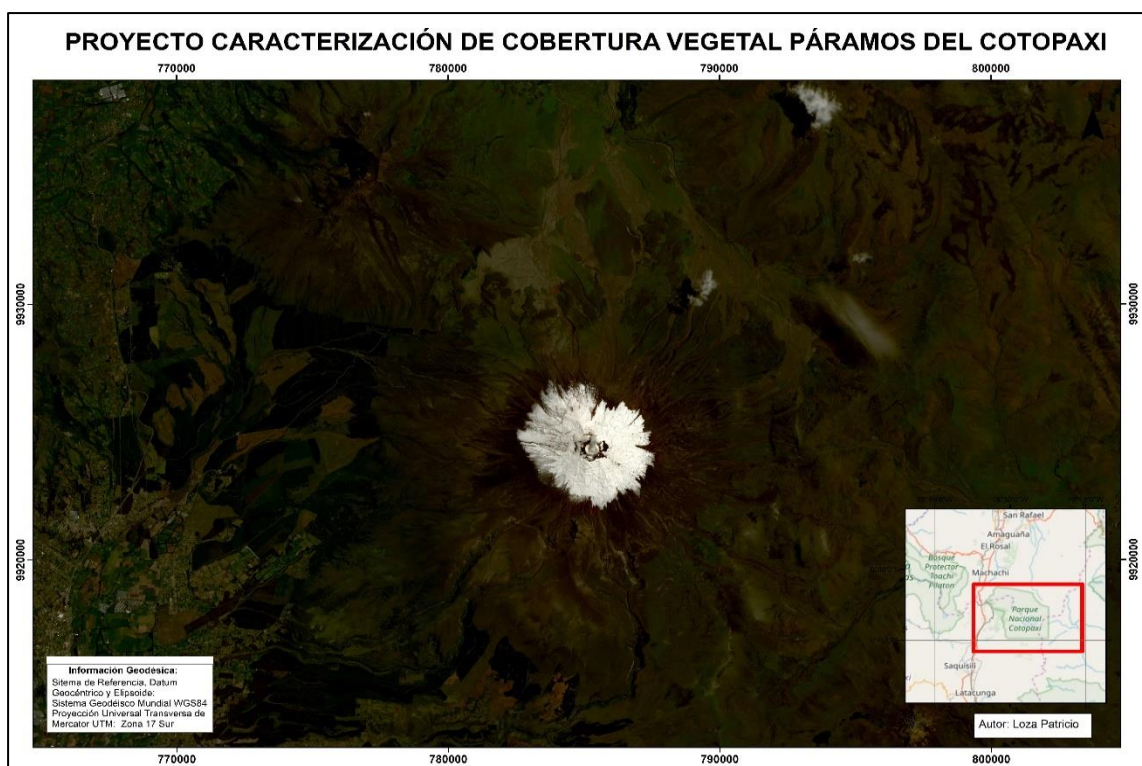


Figura 32. Imagen sentinel-2A nivel de procesamiento L2A correspondiente a la fecha 2018-04-12

4.1.2. Composición botánica

A continuación, en las Figuras 33 y 34 se puede observar fotografías individuales de cada una de las subparcelas analizadas, y en las Figuras 35 y 36 podemos apreciar la abundancia de cada especie y su numeración correspondiente a las firmas espectrales obtenidas, en la tabla se muestran los resultados obtenidos para la abundancia total por especie en las dos zonas de estudio realizadas.

Como resultados finales de la composición botánica, se obtuvo el porcentaje de abundancia de cada especie identificada en las dos cuadrículas de estudio. En los cuales se puede apreciar que las especies más predominante en la primera cuadrícula fue "*Lachemilla orbiculata*" con un 72,31% y en la segunda cuadrícula fue "*Calamagrostis intermedia*" con un 96,92%, las otras especies y sus porcentajes de abundancia se encuentran detallados en la Tabla 4, Figuras 37 y 38. Finalmente en la Figura 39 se puede observar cada una de las especies identificadas en el área de estudio con su nombre científico y fotografía.

Además, las Figuras 35 y 36 muestran la abundancia por especie en cada una de las subparcelas muestreadas, además se encuentra la distribución e identificación de las firmas espectrales muestreadas en las dos cuadrículas analizadas.

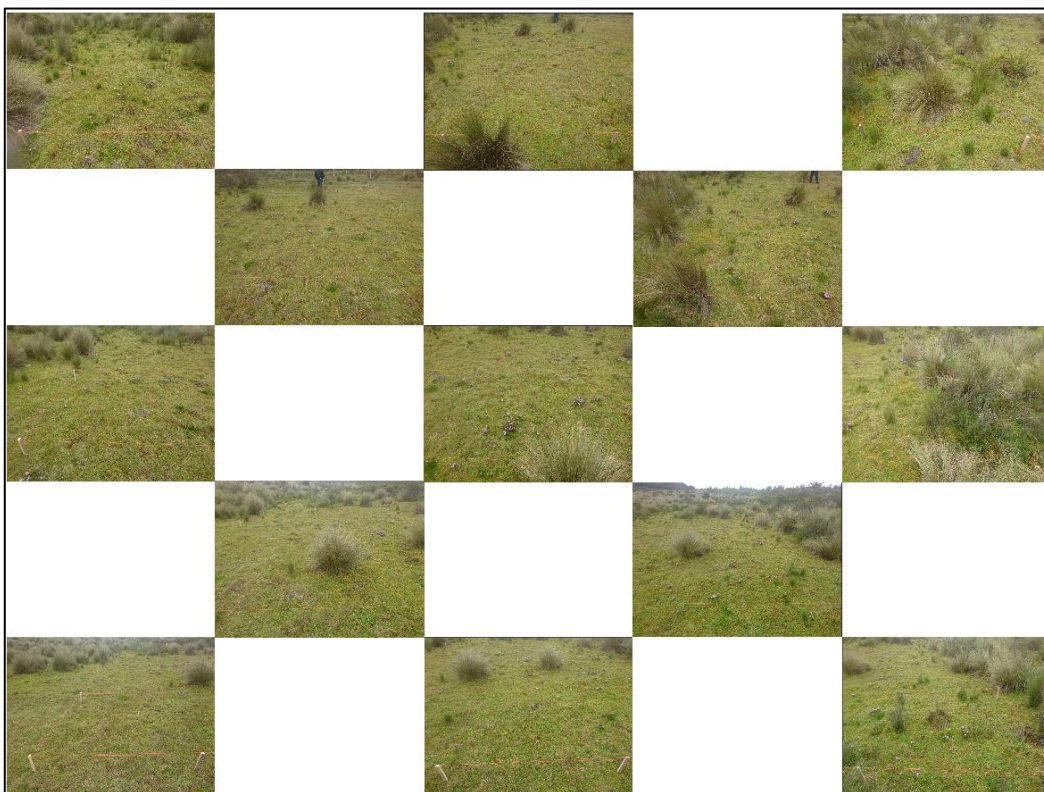


Figura 33. Fotografías por subparcela en la Cuadrícula 1



Figura 34. Fotografías por subparcela en la Cuadrícula 2

	A		B		C		D		E	
A	FE: 0-4 E1:100%	FE: 5-9 E1	✖	✖	FE: 20-24 E1:90%	FE: 25-29 E1	✖	✖	FE: 40-44 E1 60%	FE: 45-49 E2 25 %
	FE: 15-19 E1	FE: 10-14 E1			FE: 35-39 E3 10%	FE: 30-34 E1			FE: 55-59 E5 10%	FE: 50-54 E4: 5%
B	✖	✖	FE: 65-69 E1: 70%	FE: 70-74 E3: 30%	✖	✖	FE: 80-84 E1: 75%	FE: 85-89 E2: 15%	✖	✖
			FE: 60-64 E1	FE: 75-79 E1			FE: 95-99 E3: 10%	FE: 90-94 E1		
C	FE: 115-119 E1: 85%	FE: 100-104 E1	✖	✖	FE: 125-129 E1: 75%	FE: 130-134 E4	✖	✖	FE: 140-144 E4: 50%	FE: 155-159 E4
	FE: 110-114 E1	FE: 105-109 E3: 15%			FE: 120-124 E1	FE: 135-139 E3: 25%			FE: 145-149 E1 20%	FE: 150-154 E2 : 30%
D	✖	✖	FE: 160-164 E2: 30%	FE: 175-179 E1: 65%	✖	✖	FE: 185-189 E1: 85%	FE: 190-194 E3: 15%	✖	✖
			FE: 165-169 E3 15%	FE: 170-174 E1			FE: 180-184 E1	FE: 195-199 E1		
E	FE: 255-259 E1: 60%	FE: 260-264 E1	✖	✖	FE: 230-234 E1: 70%	FE: 235-239 E1	✖	✖	FE: 210-214 E4: 5%	FE: 215-219 E2: 5%
	FE: 250-254 E3 40%	FE: 240-244 E3			FE: 225-229 E1	FE: 220-224 E3: 30%			FE: 205-209 E1 90%	FE: 200-204 E1
	E1 = Lachemilla orbiculata		E2= Calamagrostis intermedia		E3= Pennisetum clandestinum L		E4 = Valeriana microphylla		E5= Hypericum laricifolium	

Figura 35. Abundancia por especie y firmas espectrales en la Cuadrícula #1

	A		B		C		D		E	
A	FE: 0-4 E2	FE: 5-9 E2	✖	✖	FE: 20-24 E2	FE: 25-29 E2	✖	✖	FE: 40-44 E2	FE: 45-49 E2
	FE: 15-19 E2 70%	FE: 10-14 E1 30%			FE: 35-39 E1 10%	FE: 30-34 E2 90%			FE: 55-59 E2 100%	FE: 50-54 E2
B	✖	✖	FE: 95-99 E2	FE: 80-84 E2	✖	✖	FE: 70-74 E2	FE: 60-64 E2	✖	✖
			FE: 90-94 E2 100%	FE: 85-89 E2			FE: 75-79 E2 100%	FE: 65-69 E2		
C	FE: 100-104 E2	FE: 105-109 E2	✖	✖	FE: 135-139 E2	FE: 120-124 E2	✖	✖	FE: 140-144 E2	FE: 145-149 E2
	FE: 115-119 E2 100%	FE: 110-114 E2			FE: 130-134 E2 100%	FE: 125-129 E2			FE: 155-159 E2 100%	FE: 150-154 E2
D	✖	✖	FE: 160-164 E2	FE: 165-169 E2	✖	✖	FE: 180-184 E2	FE: 185-189 E2	✖	✖
			FE: 175-179 E2 100%	FE: 170-174 E2			FE: 195-199 E2 100%	FE: 190-194 E2		
E	FE: 200-204 E2	FE: 205-209 E2	✖	✖	FE: 235-239 E2	FE: 220-224 E2	✖	✖	FE: 240-244 E2	FE: 245-249 E2
	FE: 215-219 E2 100%	FE: 210-214 E2			FE: 230-234 E2 100%	FE: 225-229 E2			FE: 255-259 E2 100%	FE: 250-254 E2
			E1= Lachemilla orbiculata		E2= Calamagrostis intermedia					

Figura 36. Abundancia por especie y firmas espectrales en la Cuadrícula #2

Tabla 5.

Resultados de abundancia total por especie en las cuadrículas 1 y 2

Abundancia por especie en las Cuadrículas 1 y 2

Especie	% en Cuadrícula 1	% en Cuadrícula 2
<i>Lachemilla orbiculata</i>	72,31	3,08
<i>Calamagrostis intermedia</i>	14,23	96,92
<i>Pennisetum clandestinum L</i>	8,01	0
<i>Valeriana microphylla</i>	4,61	0
<i>Hypericum laricifolium</i>	0,77	0

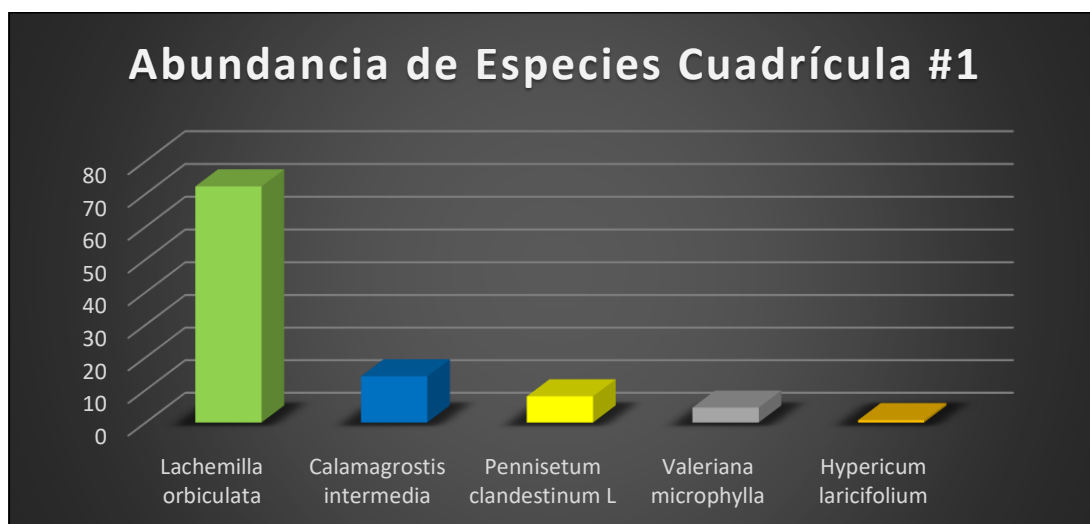


Figura 37. Abundancia de especies Cuadrícula #1

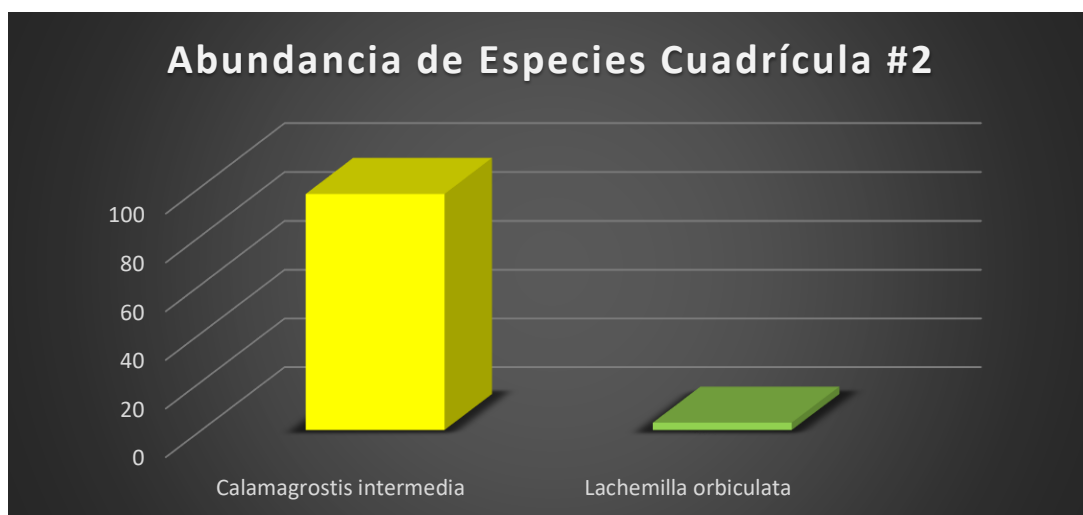


Figura 38. Abundancia de especies Cuadrícula #2



Figura 39. Especies identificadas en las Cuadrículas 1 y 2; (de izquierda a derecha *Hypericum laricifolium*, *Calamagrostis intermedia*, *Lachemilla orbiculata*, *Valeriana microphylla*, *Pennisetum clandestinum*).

Fuente: (Foster, Metz, & Baker, 2018)

4.1.3. Firmas espectrales

En la Figura 40 se muestran las dos firmas espectrales finales obtenidas después del procesamiento de las 260 firmas espectrales de cada cuadrícula. Esta gráfica representa la variación promedio de los valores de reflectancia de la vegetación de páramo existente en las zonas de estudio (%) en función de la longitud de onda en Nanómetros (nm). La curva color verde representa la firma espectral promedio en la cuadrícula #1 mientras que la curva de color amarillo representa la firma espectral promedio a la cuadrícula #2.

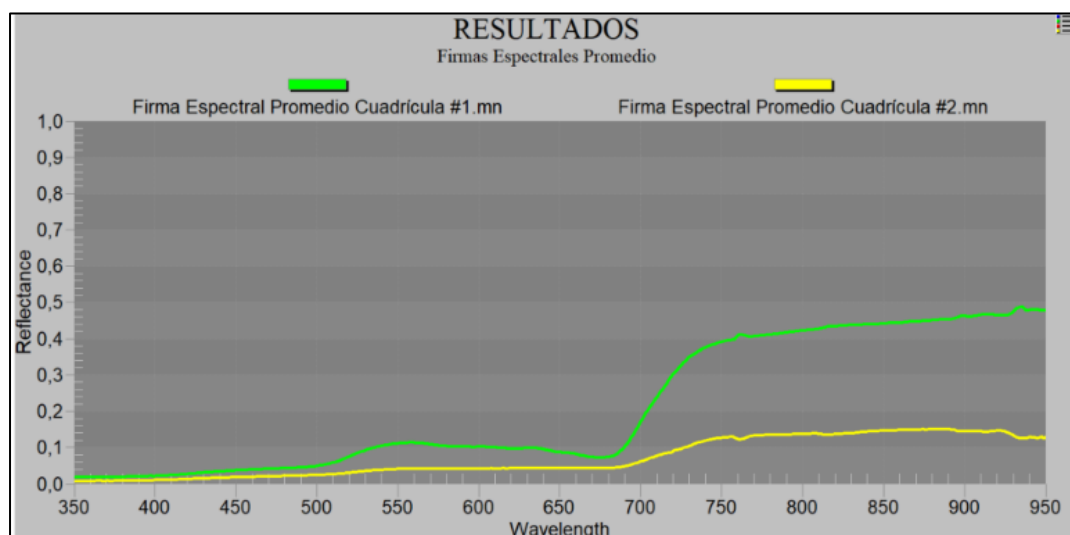


Figura 40. Firmas espectrales Promedio de las Cuadrículas #1 y #2

4.1.4. Distribución espacial

A continuación se muestra en la Figura 41 el mapa obtenido a través del uso de la herramienta “spectral unmixing” del programa SNAP Desktop, en el cual se puede apreciar la distribución espacial de las firmas espectrales procesadas correspondientes a páramo pajonal, en donde sobresale la especie “*Calamagrostis intermedia*” en color amarillo con una extensión total de 7191 ha. y de color verde se puede apreciar el páramo herbazal húmedo y ultrahúmedo subnival en donde sobresale la especie “*Lachemilla orbiculata*” con mayor abundancia en la cuadrícula 1 y una extensión de 4502 ha.

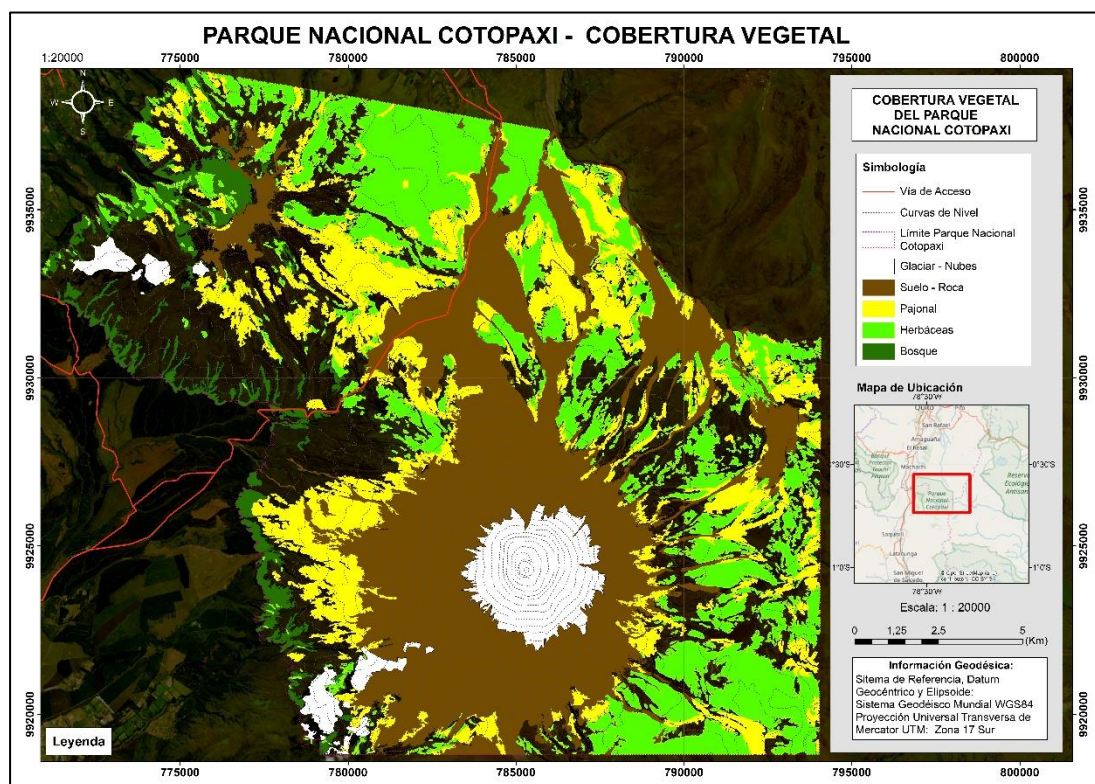


Figura 41. Mapa de la cobertura vegetal en el parque nacional Cotopaxi, usando la “Spectral Unmixing”

Una vez generado el mapa se realizó una visita de campo al Parque Nacional Cotopaxi, con la finalidad de evaluar la confiabilidad del mismo, para lo cual se tomó un total de 43 puntos GPS en campo (Figura 42) y se los sobrepuso sobre las capas cartográficas generada anteriormente obteniendo un 83,7% de puntos de acierto.

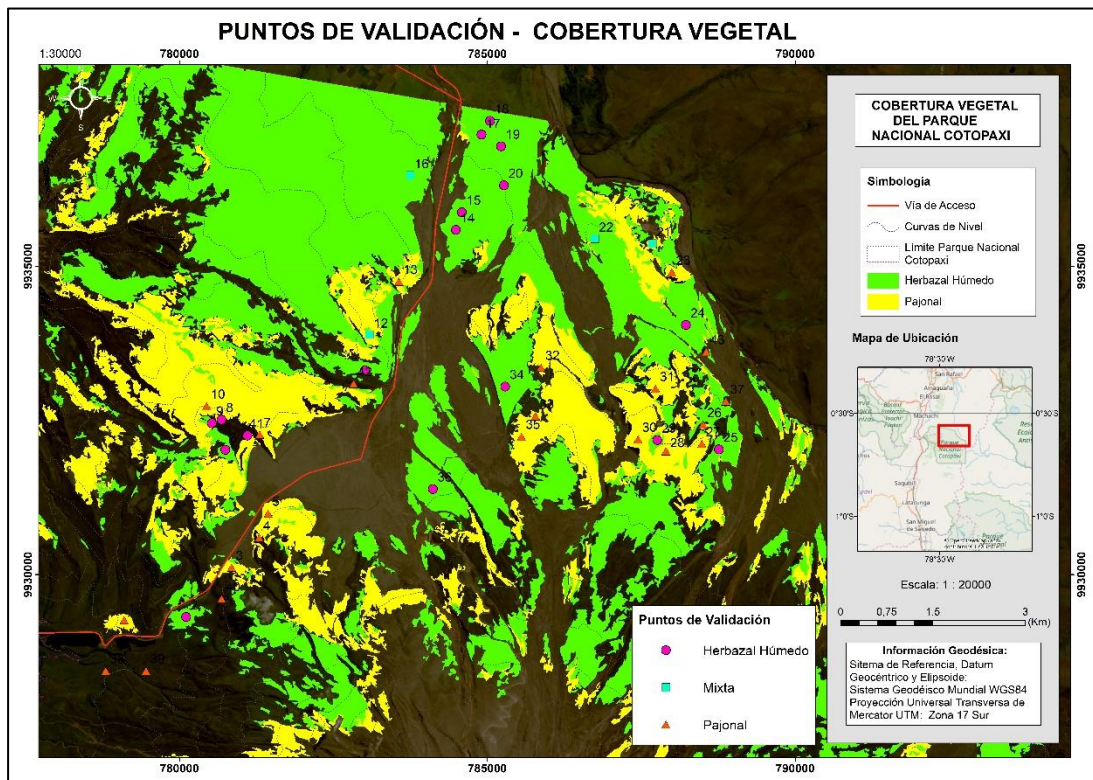


Figura 42. Ubicación de puntos GPS de validación de la cartografía generada

Después con la finalidad complementar el mapa de cobertura vegetal con la herramienta “spectral unmixing” mostrado en la Figura 41, y clasificar aquellas zonas vacías que se muestran en el mapa anterior, se aplicó componentes principales y posteriormente se realizó una clasificación no supervisada de la misma imagen ocupada anteriormente, obteniendo el mapa que se lo puede apreciar en la Figura 43.

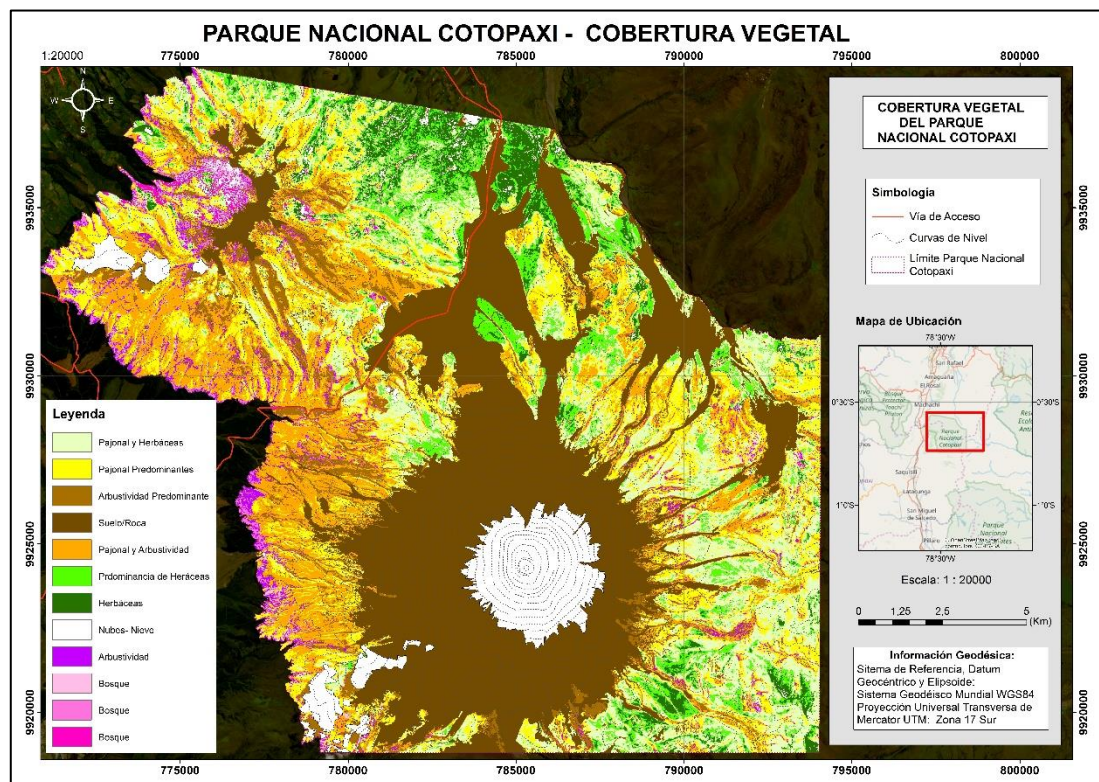


Figura 43. Mapa de la cobertura vegetal en el parque nacional Cotopaxi, corregido usando componentes principales y clasificación supervisada.

Como se puede apreciar en la Figura 42 existen varias zonas del Parque Nacional Cotopaxi que no poseen algún tipo de clasificación, una vez hecha la verificación en campo se pudo constatar que estas zonas correspondían a zonas en con tipos de vegetación distintas a las analizadas en este trabajo, estas pueden ser zonas de vegetación con predominancia de arbustividad (Figura 44) o bosque (Figura 45) representadas en la Figura 43 con color anaranjado y violeta respectivamente, de la misma manera se determinó que algunas de las zonas que no mostraron clasificación eran zonas en donde los tipos de vegetación en estudio se mezclaban entre ellas (Figura 46) o con arbustividad (Figura 47), representados en la Figura 43 con color verde opaco y café claro respectivamente; dificultando de esta manera su identificación por medio de firmas espectrales y la herramienta “Spectral unmixing”.



Figura 44. Zona con predominancia de arbustividad



Figura 45. Zona con presencia de bosque



Figura 46. Zona con mezcla de vegetación arbustiva y pajonal



Figura 47. Zona con mezcla de herbazal húmedo y pajonal



Figura 48. Parque Nacional Cotopaxi: Páramo Pajonal

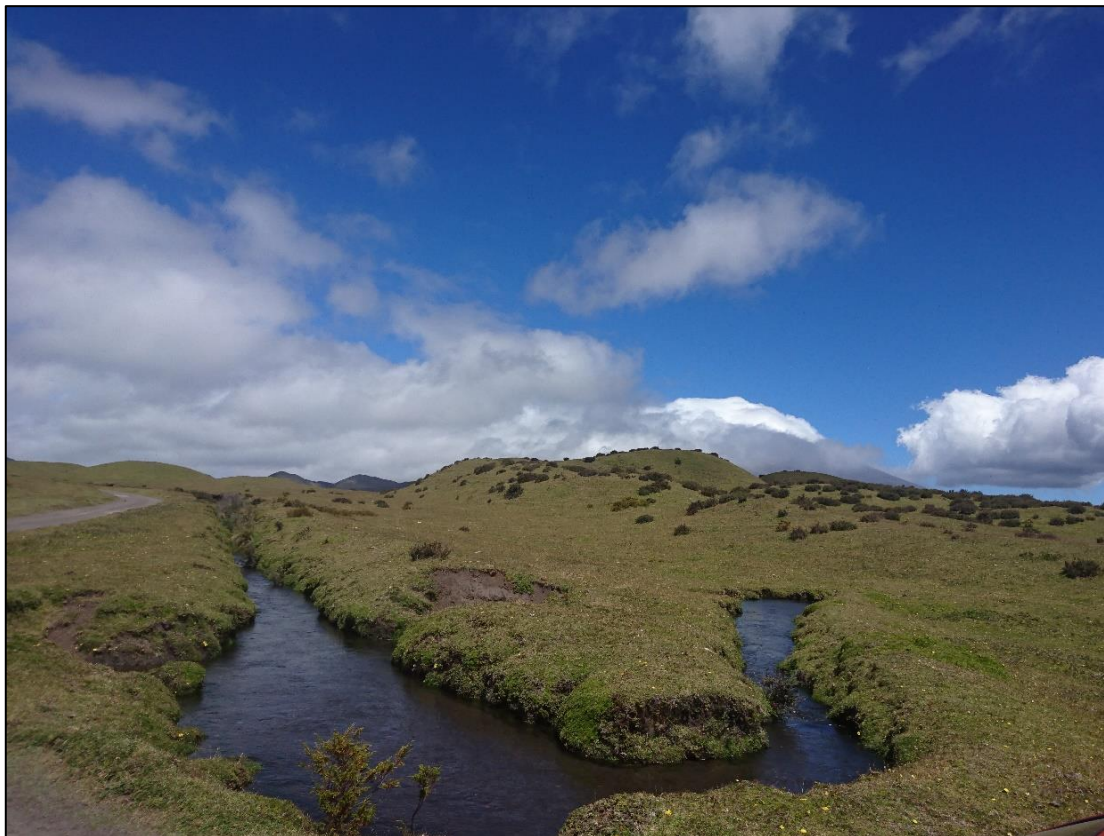


Figura 49. Parque Nacional Cotopaxi: Herbazal húmedo



Figura 50. Clasificación Suelo/Roca de la Figura 43

4.1.5. Estado de vegetación

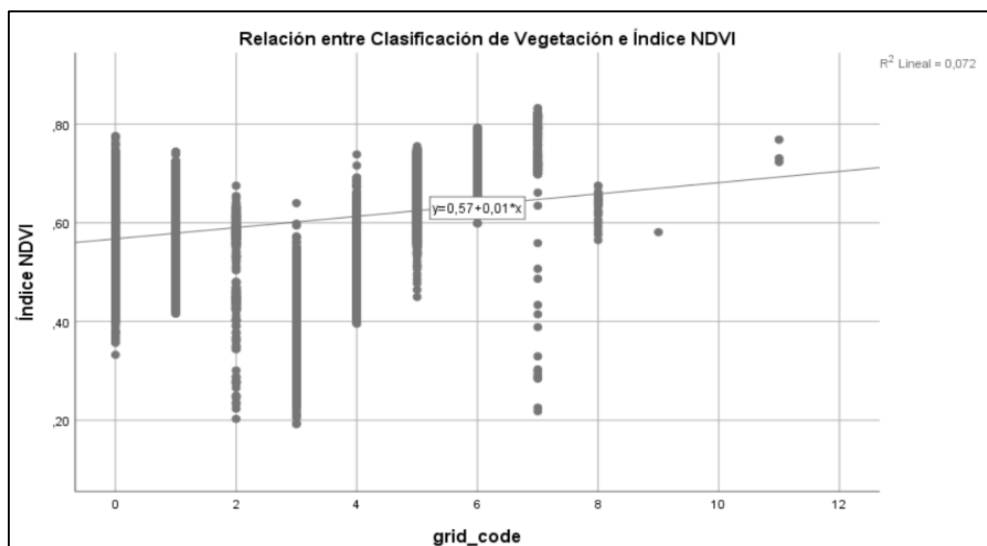
Dentro de los objetivos de este trabajo se estableció analizar el estado de la vegetación utilizando los índices espectrales antes mencionados y ver si existe correlación entre sus valores y la distribución espacial de las distintas coberturas del área de estudio, para lo cual fue necesario realizar la correlación de Pearson entre cada uno de los índices espectrales NDVI, SAVI y NDWI y las coberturas del Parque Nacional Cotopaxi, para que después aplicando regresión lineal identificar que tan relacionados se encuentran. Donde finalmente se encontró que el índice de SAVI fue el que más correlación tiene con las coberturas con una correlación positiva media, un R^2 de 0,396 para la correlación de Pearson y un R^2 en regresión lineal de 0,157.

Tabla 6.

Resultados de correlación de Pearson y regresión lineal índices espectrales vs coberturas del parque nacional Cotopaxi

Correlación de Pearson y Regresión Lineal, índices espectrales vs coberturas del Parque Nacional Cotopaxi

Índice espectral	Correlación de Pearson (R^2)	Tipo de correlación	Regresión lineal (R^2)
NDVI	0,269	Correlación Positiva Media	0,072
SAVI	0,396	Correlación Positiva Media	0,157
NDWI	0,338	Correlación Positiva Media	0,114



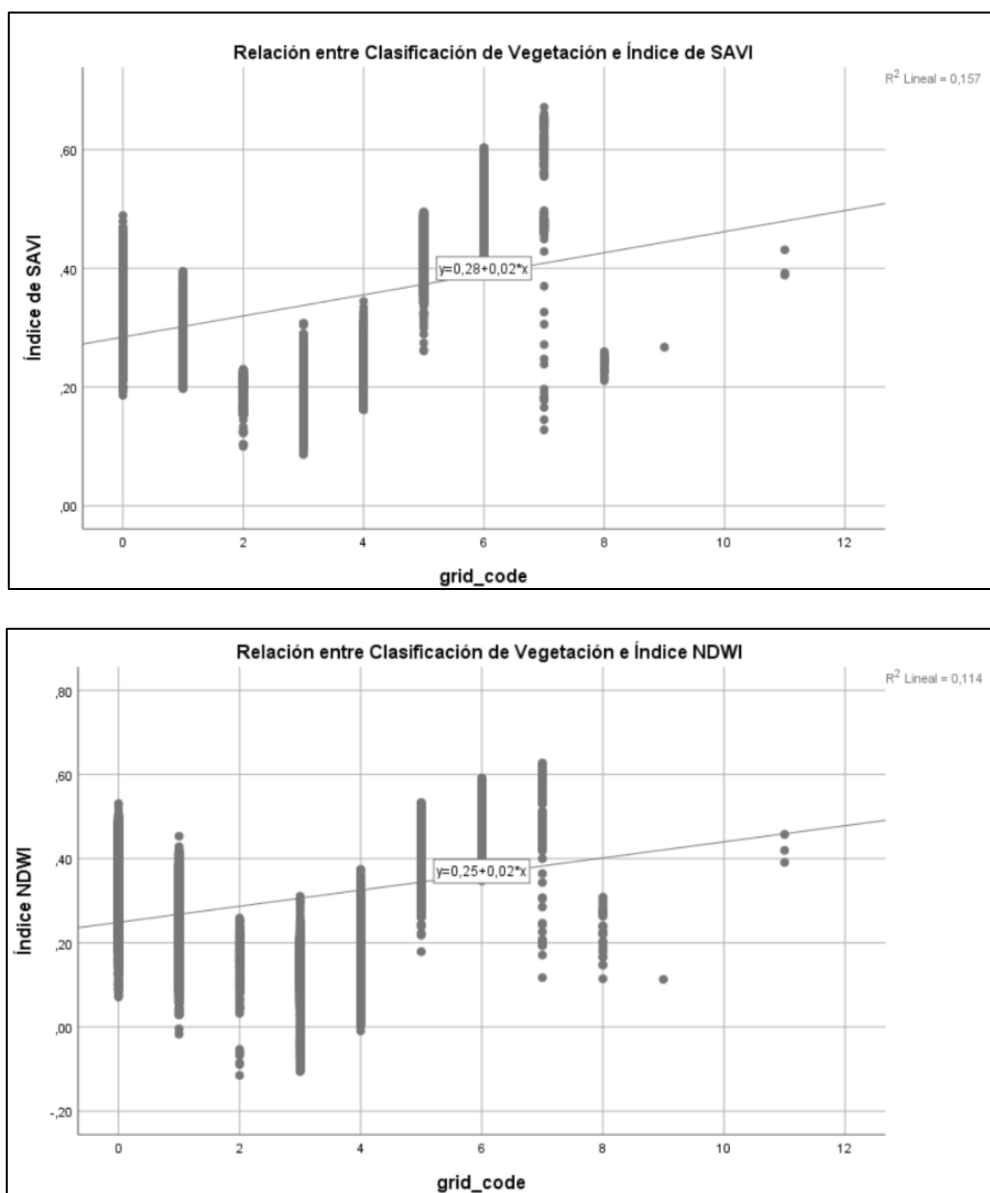


Figura 51. Gráficas de dispersión de puntos de los índices NDVI, SAVI y NDWI vs coberturas del parque nacional Cotopaxi.

Debido a que el índice de SAVI fue el que mayor correlación presentó en el análisis anterior, fue el índice espectral escogido para hacer los estudios preliminares de cómo podría ser el estado de la vegetación usando solamente sensores remotos. ¿Pero por qué el índice de SAVI resultó ser el índice más adecuado para analizar la vegetación de páramo?, probablemente porque por definición el índice de SAVI es un índice de vegetación que está enfocado a reducir la influencia del brillo del suelo mediante un factor de corrección, lo cual va acorde al tipo de

vegetación que se puede encontrar en el área de estudio donde la vegetación de páramo es baja y poco frondosa compuesta principalmente por herbáceas, musgos, líquenes y arbustos.

En las Figuras 52 y 53 se muestran los resultados obtenidos en donde la tonalidad roja muestra los valores más altos de del índice de SAVI, es decir el mayor estado de conservación, la tonalidad verde estado de conservación medio y tonalidad violeta un nivel de conservación bajo.

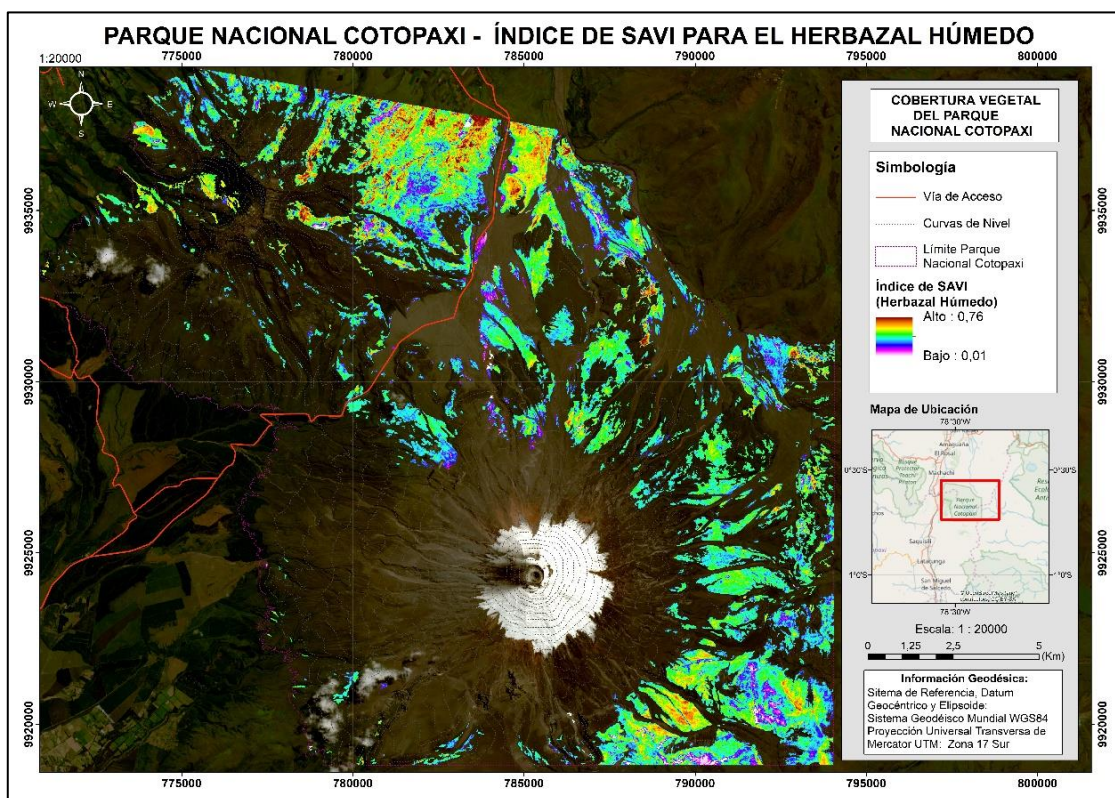


Figura 52 Índice de SAVI del Herbazal Húmedo en el Parque Nacional Cotopaxi

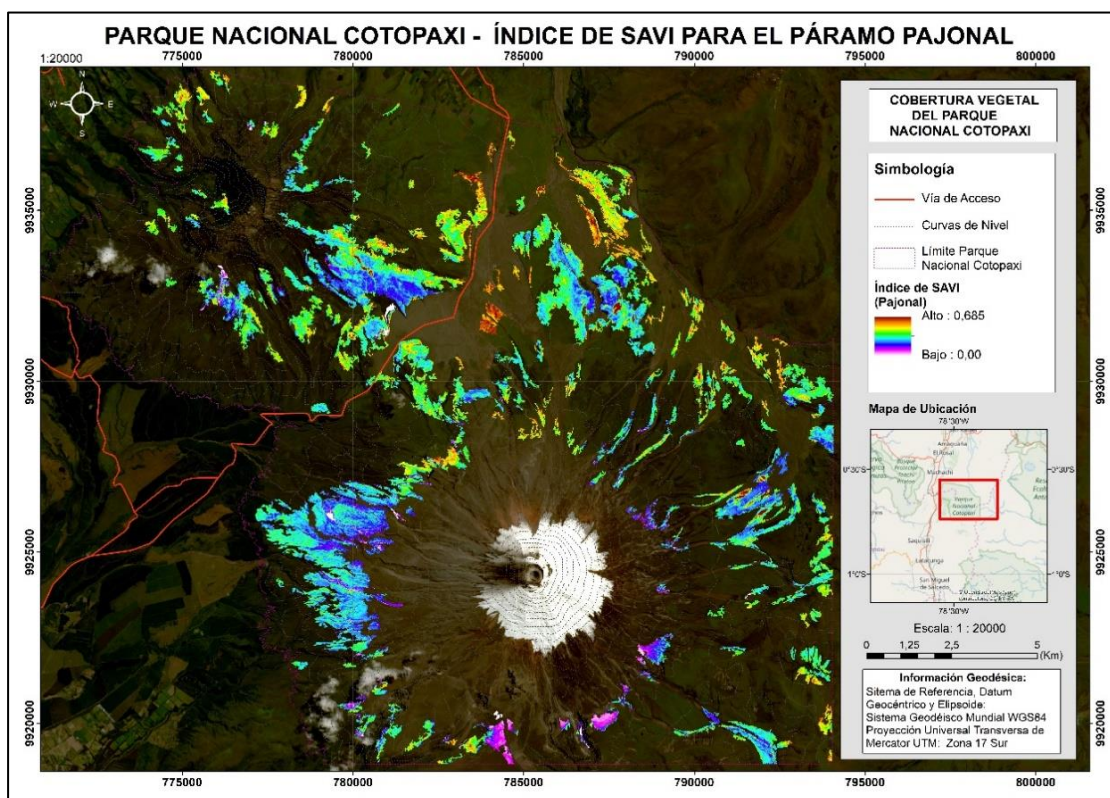


Figura 53. Índice de SAVI del Páramo Pajonal en el Parque Nacional Cotopaxi

4.2. Discusión

4.2.1. Firmas espectrales

A pesar de que los resultados obtenidos con la metodología propuesta fueron satisfactorios para la escala de trabajo y unidad mínima de mapeo propuestas, se podrían obtener mejores resultados ampliando el rango espectro electromagnético analizado, es decir, trabajar en un rango más amplio que el ocupado el cual fue de (350 – 950 nm), a un rango mayor del NIR, SWIR o incluso termal, aprovechando de mejor manera las firmas espectrales captadas por el espectrorradiómetro Field Spect 4 las cuales se encuentran dentro del rango de (350 – 2500 nm).

4.2.2. Distribución espacial de especies analizadas

En la Figura 42 se puede diferenciar únicamente los píxeles que mostraron mayor relación a las dos firmas espectrales promedio obtenidas en el área de estudio, posteriormente debido a que se trabajó solamente con los dos tipos de coberturas existieron varios lugares sin clasificar o a su vez lugares con vegetación mixta en el Parque Nacional Cotopaxi, estos problemas se podrían solucionar tomando las siguientes consideraciones:

- En primer lugar, se podrían mejorar los resultados de futuros trabajos, obteniendo una mayor cantidad de firmas espectrales de otros tipos de coberturas vegetales de páramo que no fueron analizadas en este trabajo, tales como la vegetación arbustiva, de líquenes y almohadillas especialmente.
- De la misma manera con imágenes satelitales de mayor resolución espacial y espectral se esperaría diferenciar de mejor manera los distintos tipos de cobertura vegetal, con una menor escala y unidad mínima de mapeo se podría identificar de mejor manera los tipos de coberturas analizadas previamente e incluso se podría ampliar el número de especies y tipos de coberturas a mapear.
- Finalmente, en este trabajo se utilizó un algoritmo “Spectral unmixing” lineal, ya que era el único disponible en software Snap, pero para futuros trabajos sería bueno comparar los resultados obtenidos con algoritmos no lineales o algún otro tipo de algoritmo clasificador.

4.2.3. Estado de conservación de especies analizadas

Las figuras 52 y 53 muestran el estado de conservación de las especies analizadas por medio del índice espectral que mayor correlación mostró para la clasificación de vegetación de páramo, sin embargo, el valor de correlación obtenido no fue tan alto, por lo que es importante contrastar estos resultados con otros tipos de indicadores de conservación de vegetación tales como: análisis de parámetros físicos y químicos del suelo, análisis de parámetros físicos y químicos de vegetación, estrés hídrico, entre otros.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se concluye que la metodología aplicada, es decir el uso en conjunto de imágenes satelitales Sentinel-2, espectrorradiometría y SIG mostraron ser una herramienta muy útil para la clasificación de vegetación de páramo obteniendo un porcentaje de acierto de 83,7% en la validación en campo realizada.
- Las especies más representativas del área de estudio fueron “*Lachemilla orbiculata*” y “*Calamagrostis intermedia*” ya que presentaron los mayores porcentajes de abundancia en las parcelas de composición botánica analizadas con valores de 72,31% y 96,92%.
- Se recopilaron dos imágenes satelitales capturadas por el satélite “Sentinel 2-A”, mismas que cumplieron con los parámetros de búsqueda propuestos y fueron procesadas de nivel L1C a nivel L2A usando el software SNAP Desktop, estas imágenes corresponden a las fechas 16 de julio del 2017 y 12 de abril del 2018.
- La zona de levantamiento de los datos espectrales fue la estación Cotopaxi perteneciente al Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), en donde determinaron dos sub-zonas de estudio correspondientes a los tipos de vegetación más abundante del área de estudio, estas zonas fueron determinadas por medio de índices espectrales (SAVI, NDVI y NDWI) y verificación en campo.
- Usando las firmas espectrales promedio obtenidas por medio de composición botánica y su posterior identificación en las imágenes satelitales usando la herramienta “spectral unmixing” se determinó que la abundancia de dichas firmas espectrales era de 7191 ha. para el páramo pajonal y 4502 ha. para los herbazales húmedos.
- Se determinó que el índice más indicado para analizar el estado de la vegetación de páramo fue el índice de SAVI, ya que fue el que más correlación tuvo con las coberturas identificadas en el Parque Nacional Cotopaxi con una correlación positiva media, un R^2 de 0,396 para la correlación de Pearson y un R^2 en regresión lineal de 0,157.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda aplicar la metodología propuesta en imágenes satelitales con mejor resolución espacial y espectral, ya que de esta manera se sería posible llegar a analizar e identificar de mejor manera más especies vegetales y tipos de cobertura.
- Se recomienda ampliar los límites del espectro electromagnético en estudio de cada firma espectral de 950 a 2500 nanómetros, tratando de cubrir un mayor rango del espectro electromagnético, es decir, se esperaría obtener mejores resultados analizando las distintas coberturas en los rangos del SWIR, NIR y termal.
- Se recomienda en futuras investigaciones trabajar y/o comparar los resultados de clasificación de firmas espectrales con algoritmos “Spectral Unmixing” lineal, no lineales y/u otro tipo algoritmos clasificadores.
- De la misma manera se recomienda contrastar los resultados de los índices espectrales con otros tipos de indicadores de conservación de vegetación tales como: análisis de parámetros físicos y químicos del suelo y la vegetación, estrés hídrico, entre otros.
- Es necesario realizar un estudio que detalle de manera clara y concisa la metodología a seguir para el tratamiento de imágenes satelitales de Sentinel-2, en el cual se explique detalladamente la función o el resultado de modificar cada uno de los parámetros de procesamiento de la herramienta Sen2Cor del software SNAP Desktop.
- En un futuro, cuando exista una mayor recopilación histórica de imágenes satelitales Sentinel 2, se recomienda realizar estudios multi-temporales aplicando la metodología propuesta para analizar cómo ha variado con el tiempo la cobertura vegetal del área de estudio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, L., Villa, M., Aguirre, Z., & Aguirre, N. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. *CEDAMAZ*, 45-52.
- Azócar, A., & Rada, F. (2006). *Ecofisiología de plantas de páramo*. Mérida: Editorial Litorama.
- Bader, M., Rietkerk, M., & Bregt, A. (2007). Vegetation structure and temperature regimes of tropical Alpine treelines. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 39:353-364.
- Balslev, H., & Luteyn, J. (1992). *Paramo: Andean Ecosystem Under Human Influence*. U.S.A.: Academic Press In.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., . . . Velástegui, A. (2009). *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador*. Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., . . . Velasteguí, A. (2009). *Distribución Espacial, Sistemas Ecológicos y Caracterización Florística de los Páramos en el Ecuador*. Quito. Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA.
- Bosque, J., & Zamora, H. (2002). Visualización geográfica y nuevas cartografías. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Cartográfica*, 61-77.
- Camacho, A., Vargas, C., Rojas, F., & Arguello, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)*, 17-29.
- CEM, C. (26 de Junio de 2018). *Centro Español de Metrología :Procedimiento OP- 003 para la calibración de espectralradiómetros*. Obtenido de www.cem.es: www.cem.es/sites/default/files/op-003_digital.pdf
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.
- CONAE, C. N. (2016). *Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI*. Argentina: CONAE.
- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L., De Bièvre, B., & Posner, J. (2014). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Quito: CODESAN.

- Dalla, M., Chanussot, J., & Plaza, A. (12 de 11 de 2014). *An Overview on Hyperspectral Unmixing*. Obtenido de GIPSA-lab: http://www-ljk.imag.fr/membres/Faouzi.Triki/projetPbsInverses/Pre/DallaMura_unmixing.pdf
- Danner, M., Locherer, M., Hank, T., & Richter, K. (2015). *Spectral Sampling with the ASD FieldSpec 4 – Theory, Measurement, Problems, Interpretation*. Potsdam: EnMAP Field Guides Technical Report, GFZ Data Services.
- De Bolós, O. (1983). *La vegetació del Montseny*. Barcelona: Servei de Parcs Naturals.
- ESA. (26 de Junio de 2018). *European Space Agency: Sentinel 2*. Obtenido de sentinels.copernicus.eu: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- ESA. (19 de Julio de 2018). *European Space Agency: Sentinel 2*. Obtenido de Sen2Cor Configuration and User Manual: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.5.5.pdf>
- ESA. (24 de Junio de 2018). *www.esa.int*. Obtenido de European Space Agency: Las Misiones Sentinel: https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Las_misiones_Sentinel
- FAO. (03 de 09 de 2017). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Las montañas, ecosistemas de importancia mundial*. Obtenido de [fao.org](http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s03.htm): <http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s03.htm>
- FAO. (26 de Junio de 2018). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación: Evaluación de los recursos forestales mundiales año 2010*. Obtenido de [fao.org](http://www.fao.org/docrep/013/al495S/al495S.pdf): <http://www.fao.org/docrep/013/al495S/al495S.pdf>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1999). *Sistema para el Seguimiento y Análisis de Tierras mediante Teledetección*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Foster, R., Metz, M., & Baker, G. (27 de Agosto de 2018). *fieldguides.fieldmuseum.org*. Obtenido de Plantas Llamativas del Parque Cotopaxi: https://fieldguides.fieldmuseum.org/sites/default/files/rapid-color-guides-pdfs/067_Cotopaxi-Conspic_v1.3_0.pdf
- Goodchil, M. (2001). Metrics of scale in remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114-120.
- Hernández, J. (2011). Procesamiento de Imágenes Satelitales. *Editorial Universitaria*, 691-717.

- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., . . . Cerra, M. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito, Ecuador: UICN.
- Hofstede, R., Segarra, P., Mena, P., Medina, G., & F. (2003). El Impacto de las Actividades. *Abya Yala/Proyecto Páramo*, 161-185.
- Hribljan, J., Suarez, E., Bourgeau, L., Endres, S., Lilleskov, E., Chimbolema, S., . . . Chimner, R. (2017). *Global Change Biology*.
- IGAC. (23 de Junio de 2018). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi: Fundamentos de Percepción Remota* . Obtenido de <http://geoservice.igac.gov.co>: http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana1-unidad1/index.php?id=3
- IGAC, I. G. (27 de Agosto de 2018). *Fundamentos de Percepción Remota*. Obtenido de Resolución Radiométrica: http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana2/index.php?id=21
- Lindenlaub, J. (1976). *What is it?, Fundamentals of Remote Sensing*. Purdue Research Foundation.
- Llambí, L., Soto, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramo*. Quito: Proyecto Páramo Andino, FLACSO.
- Maguire, D. (1991). An Overview and Definition of GIS. *Geographical information systems: Principles and applications*, 9-20.
- Malvern Panalytical, A. I. (26 de Junio de 2018). *ASD FieldSpec4*. Obtenido de [malvernpanalytical.com](https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range): <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range>
- Medina, G., & Mena, P. (2001). *Los páramos del Ecuador*. Quito: Hofstede.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. . *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 91-109.
- NASA. (26 de Junio de 2018). *Landsat 7 Science Data User's Handbook*. Obtenido de [landsathandbook](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov): <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace.
- Pantaleone, L., & Tosini, M. (2012). Clasificación de cultivos a partir de imágenes satelitales. *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.

- Quadri, S. (27 de Agosto de 2018). *SlideShare*. Obtenido de What is spatial Resolution: <https://www.slideshare.net/reachquadri/what-is-spatial-resolution>
- Ramsay, P., & Oxley, E. (1996). Fire temperatures and postfire plant community dynamics in Ecuadorian grass paramo. *Plant Ecology*, 129-144.
- Ramsay, P., & Oxley, E. (1997). The growth form composition of plant communities in the Ecuadorian paramos. *Plant Ecology*, 131:173-192.
- RedLatinGEO. (04 de Agosto de 2018). *redgeomatica.rediris.es*. Obtenido de Introducción a la Cartografía Temática: <http://redgeomatica.rediris.es/cart02/pdf/pdfT/tema1t.pdf>
- Riaño, D., Salas, J., & Chuvieco, E. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*, 222-239.
- Sklenář, P., & Balslev, H. (2007). Geographic flora elements in the Ecuadorian superparamo. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 202:50-61.
- Sklenář. (2000). Vegetation ecology and phytogeography of Ecuadorian superparamos. *PhD Thesis. Charles University, Praga*.
- Sklenář, P., Bendix, J., & Balslev, H. (2008). Cloud frequency correlates to plant species composition in the High Andes of Ecuador. *Basic and Applied Ecology*, doi:10.1016/j.
- Suarez, N. (Septiembre de 2014). *Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay*. Obtenido de Definiciones de la Cartografía: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/142750/mod_folder/content/0/21Cartograf%C3%ADaRevisi%C3%B3nConceptosDefiniciones.pdf?forcedownload=1
- TELEDET. (20 de 03 de 2018). *Percepción Remota*. Obtenido de teledet.com.uy: <http://www.teledet.com.uy/imagen-satelital.htm>
- Templeton, A. (1989). El significado de especie y de especiación: una perspectiva genética. *Speciation and its consequences*.
- TheDigitalRealm. (27 de Agosto de 2018). *SlidePlayer*. Obtenido de Digital Remote Sensing: <https://slideplayer.com/slide/4475883/>
- Toledo, J., & Schultze-Kraft, R. (1982). Metodología para la evaluación agronómica de pastos tropicales. En *Manual para la evaluación* (pág. 91). Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales.
- Vink, A. (1975). *Land Use in Advancing Agriculture*. New York: Springer.