

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA FOTOSINTÉTICA DE LA VEGETACIÓN A
LAS SALES Y/O SODIO DEL SUELO POR MEDIO DE UNA IMAGEN
HIPERESPECTRAL EN LA VEREDA EL SALITRE DEL MUNICIPIO DE PAIPA-
BOYACÁ.

AUTORAS: KAREN TATIANA BAUTISTA LEGUIZAMÓN
HELIANA MARCELA CAMPOS REYES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA-BOYACÁ
2020

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA FOTOSINTÉTICA DE LA VEGETACIÓN A
LAS SALES Y/O SODIO DEL SUELO POR MEDIO DE UNA IMAGEN
HIPERESPECTRAL EN LA VEREDA EL SALITRE DEL MUNICIPIO DE PAIPA-
BOYACÁ.

AUTORAS: KAREN TATIANA BAUTISTA LEGUIZAMÓN
HELIANA MARCELA CAMPOS REYES

Trabajo de grado presentado para optar el título de
INGENIERAS AMBIENTALES

Directora:

MSc Sandra Lizeth Parra Cruz
Ingeniera Sanitaria

Codirector:

MSc Eduar Leonardo Quinchanegua Pineda
Ingeniero Agrónomo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA-BOYACÁ

2020

AUTORIDADES ACADÉMICAS

FRAY JOSE GABRIEL MESA ANGULO O.P
Rector General

FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO O.P
Vicerrector Académico General

FRAY ÁLVARO JOSE ARANGO RESTREPO O.P
Rector Seccional Tunja

FRAY OMAR ORLANDO SÁNCHEZ SUÁREZ O.P
Vicerrector Académico Seccional Tunja

FRAY FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P
Decano de División Ingenierías y Arquitectura Seccional Tunja

PEDRO MAURICIO ACOSTA CASTELLANOS
Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

NOTA DE ACEPTACIÓN

Pedro Mauricio Acosta Castellanos
Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Sandra Lizeth Parra Cruz
Directora del Trabajo de Grado

Eduar Leonardo Quinchanegua Pineda
Codirector del Trabajo de Grado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico especialmente a mis padres Blanca Alcira Leguizamón Sanabria y Fredy Bautista Sánchez, a mi hermana Yessica Yulieth Bautista Leguizamón, a mi familia y a cada una de las personas que creen en mí y han estado presentes en cada paso de mi vida, apoyándome incondicionalmente para culminar cada meta, sueño y objetivo planteado.

Karen Tatiana Bautista Leguizamón

Dedico de manera especial mi trabajo de grado a mis padres Félix Arturo Campos Cuervo y Ana Beatriz Reyes Castro, a mi hermana Mónica María Campos Reyes por guiarme al camino de la superación, siendo la motivación de mi esfuerzo y esmero para lograr esta meta, junto con mi familia, que me ha apoyado constantemente en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

Heliana Marcela Campos Reyes

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por guiarnos y darnos las capacidades intelectuales necesarias para el desarrollo del presente proyecto, en segundo lugar, queremos darle gracias a nuestros padres, quienes nos dieron la posibilidad de acceder a una educación de alta calidad, acompañada de su apoyo, dedicación y entera confianza, pues sin sus motivaciones y sus palabras de aliento y amor, no hubiera sido posible culminar esta carrera universitaria.

En tercer lugar, queremos agradecerles a nuestra directora Sandra Lizeth Parra Cruz y a nuestro codirector Eduar Leonardo Quinchanegua Pineda, por brindarnos sus conocimientos en el aula de clase y generarnos interés y curiosidad por realizar proyectos de investigación, además de agradecerles por la sabiduría y el apoyo incondicional que nos brindaron durante todo el desarrollo del trabajo de grado, ya que sin sus consejos y ayudas no hubiera sido posible culminar el desarrollo del presente proyecto.

Por último, le agradecemos a la Universidad Santo Tomás seccional Tunja y a la Facultad de Ingeniería Ambiental por ofrecernos todas las herramientas necesarias para el desarrollo de nuestra investigación y por brindarnos espacios académicos en donde vivimos diversas experiencias que permitieron formarnos como Ingenieras Ambientales con ética profesional, que nos ayudará a desempeñarnos de manera adecuada en el ámbito laboral.

TABLA DE CONTENIDO

1 RESUMEN	15
2 ABSTRACT	16
3 INTRODUCCIÓN	17
4 OBJETIVOS	19
4.1 Objetivo general	19
4.2 Objetivos específicos	19
5 ANTECEDENTES	20
5.1 Estudios a nivel internacional sobre el uso de teledetección remota	20
5.2 Estudios a nivel internacional sobre el uso de imágenes hiperespectrales para el análisis del contenido de sales y/o sodios en el suelo	22
5.3 Estudios a nivel nacional sobre el uso de imágenes hiperespectrales para el análisis de suelos	24
5.4 Estudios realizados en Paipa, Boyacá, sobre los suelos sulfatados ácidos	25
6 MARCO TEORICO	27
6.1 Marco Conceptual	27
6.1.1 Conceptos de salinización y sodificación del suelo	27
6.1.2 Conceptos de la técnica de teledetección	28
6.1.3 Conceptos de índices espectrales	30
6.2 Marco contextual	31
6.2.1 Ubicación del proyecto	31
6.2.2 Demografía de la vereda El Salitre	32
6.2.3 Actividades socioeconómicas	32
6.2.4 Geología	33
6.2.5 Geomorfología de la vereda El Salitre	34
6.2.6 Tipos de suelos de la vereda El Salitre	34
6.3 MARCO DE TEORÍAS	36

6.3.1 Historia de la teledetección	36
6.3.2 Ley de Lambert-Beer	38
6.4 MARCO LEGAL	39
6.4.1 Política para la gestión sostenible del suelo	39
7 METODOLOGÍA	42
7.1 ETAPA 1. Delimitación de la zona de estudio	42
7.2 ETAPA 2. Definición de aspectos teóricos con relación a la salinización y sodificación del suelo a estudiar	42
7.2.1 Definición a partir de resultados fisicoquímicos del suelo	42
7.2.2 Definición a partir de información bibliográfica	43
7.3 ETAPA 3. Adquisición de la imagen hiperespectral	44
7.4 ETAPA 4. Procesamiento de la imagen hiperespectral	44
7.4.1 Corrección topográfica o ortorectificación con relación al geoide y al DEM de Headwall	44
7.4.2 Corrección radiométrica con relación al tarp	44
7.5 ETAPA 5. Análisis de la imagen hiperespectral	45
7.5.1 Obtención de las firmas espectrales del suelo y la vegetación	45
7.5.2 Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	45
7.5.3 Cálculo del Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)	46
7.5.4 Cálculo del Índice de Salinidad (INDSAL)	46
7.5.5 Cálculo del Índice de Salinidad de Diferenciada Normalizada (NDSI)	47
7.5.6 Correlación de los índices de vegetación (NDVI Y SAVI)	47
7.5.7 Correlación de los índices de salinidad (INDSAL Y NDSI)	48
7.5.8 Correlación de índices de salinidad con variables químicas	48
7.5.9 Identificación del porcentaje de afectación en la vegetación de la zona de estudio	48
7.6 ETAPA 6. Planteamiento de estrategias para dar un manejo adecuado a los suelos de la zona de estudio	48
8 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49

8.1 Características del suelo de la zona de estudio	49
8.1.1 Unidades Cartográficas de los Suelos (UCS)	49
8.1.2 Geomorfología de la zona de estudio	51
8.2 Tipos de suelos de la zona de estudio	54
8.2.1 Orden Inceptisol	54
8.2.2 Orden Alfisol	57
8.3 Conflicto de uso de la zona de estudio	58
8.3.1 Sobreutilización severa (O3)	58
8.3.2 Subutilización moderada (U2)	58
8.4 Capacidad de uso de la zona de estudio	58
8.4.1 Clase agrológica IIIsc1	59
8.4.2 Clase agrológica VIIes 1	60
8.5 Clima de la zona de estudio	61
8.6 Hidrología de la zona de estudio	61
8.7 Cobertura vegetal de la zona de estudio	62
8.8 Firmas espectrales	62
8.8.1 Firmas espectrales del suelo	63
8.8.2 Firmas espectrales de la vegetación	68
8.9 Aplicación de índices	75
8.9.1 Índices de vegetación	75
8.10 Análisis de correlación lineal	87
8.10.1 Correlación de los índices de vegetación	88
8.10.2 Correlación de los índices de salinidad	89
8.10.3 Correlación de índices de salinidad con variables químicas	90
8.11 Afectación en la vegetación	99
8.12 Estrategias para prevenir, mitigar y/o controlar la afectación en la vegetación generada por la salinización en la zona de estudio	105

	10
8.12.1 Encalado del suelo	105
8.12.2 Gallinaza como abono orgánico	109
8.12.3 Aplicación de micorriza	110
8.12.4 Gallinaza y micorriza	111
8.12.5 Selección de plantas tolerantes a los suelos salinos (Sulfatados Ácidos)	112
9 IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO	115
10 CONCLUSIONES	116
11 RECOMENDACIONES	119
12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
13 ANEXOS	136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de suelo de la vereda El Salitre	35
Tabla 2 <i>Normas de la gestión sostenible del suelo</i>	41
Tabla 3 Unidades Cartográficas de los Suelos (UCS) de la zona de estudio	49
Tabla 4 <i>Geomorfología de la asociación MVA</i>	51
Tabla 5 <i>Geomorfología de la asociación AMV</i>	52
Tabla 6 <i>Clasificación de los rangos de NDVI</i>	77
Tabla 7 <i>Clasificación de los rangos de SAVI</i>	79
Tabla 8 <i>Clasificación de los rangos de INDSAL</i>	83
Tabla 9 <i>Clasificación de los rangos NDSI</i>	85
Tabla 10 <i>Clasificación del coeficiente de correlación (r)</i>	85
Tabla 11 <i>Clasificación del coeficiente de determinación (R²)</i>	88
Tabla 12 Resultados de la correlación de los índices de vegetación y salinidad	90
Tabla 13 <i>Suelos salinos según conductividad eléctrica</i>	91
Tabla 14 <i>Suelos sódicos según conductividad eléctrica</i>	93
Tabla 15 <i>Suelos sódicos según sodio intercambiable</i>	95
Tabla 16 <i>Clasificación del pH</i>	97
Tabla 17 Resultados de la correlación entre los índices de salinidad con las variables químicas del suelo	98
Tabla 18 <i>Ponderación para la superposición de capas</i>	100
Tabla 19 <i>Ponderación NDVI</i>	100
Tabla 20 <i>Ponderación NDSI</i>	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ubicación del proyecto</i>	32
Figura 2 <i>Coordenadas del muestreo del suelo</i>	43
Figura 3 <i>Suelos de la zona de estudio</i>	50
Figura 4 <i>Firma espectral del suelo (Cajuela N° 1)</i>	65
Figura 5 <i>Firma espectral del suelo (Cajuela N° 11)</i>	66
Figura 6 <i>Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 7)</i>	71
Figura 7 <i>Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 8)</i>	72
Figura 8 <i>Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 23)</i>	74
Figura 9 <i>Mapa índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</i>	76
Figura 10 <i>Mapa Zonificación de la vegetación (NDVI)</i>	77
Figura 11 <i>Mapa índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)</i>	78
Figura 12 <i>Mapa Zonificación de la vegetación (SAVI)</i>	80
Figura 13 <i>Mapa índice de salinidad (INDSAL)</i>	82
Figura 14 <i>Mapa zonificación de la salinización del suelo (INDSAL)</i>	83
Figura 15 <i>Mapa índice de salinidad diferenciada normalizada (NDSI)</i>	84
Figura 16 <i>Mapa zonificación de la salinización del suelo (NDSI)</i>	85
Figura 17 <i>Correlación de Pearson entre NDVI y SAVI</i>	88
Figura 18 <i>Correlación de Pearson entre INDSAL y NDSI</i>	89
Figura 19 <i>Correlación de Pearson entre INDSAL y CE</i>	92
Figura 20 <i>Correlación de Pearson entre NDSI y CE</i>	92
Figura 21 <i>Correlación de Pearson entre INDSAL y RAS</i>	94
Figura 22 <i>Correlación de Pearson entre NDSI y RAS</i>	94
Figura 23 <i>Correlación de Pearson entre INDSAL y PSI</i>	96
Figura 24 <i>Correlación de Pearson entre NDSI y PSI</i>	96
Figura 25 <i>Correlación de Pearson entre INDSAL y pH</i>	97
Figura 26 <i>Correlación de Pearson entre NDSI y pH</i>	97
Figura 27 <i>Mapa afectación de la vegetación de la zona de estudio</i>	101

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Formula Longitud de onda</i>	30
Ecuación 2 <i>Ley de Lambert-Beer</i>	38
Ecuación 3 <i>Formula NDVI</i>	45
Ecuación 4 <i>Formula SAVI</i>	46
Ecuación 5 <i>Formula INDSAL</i>	46
Ecuación 6 <i>Formula NDSI</i>	47

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Suelos de la vereda El Salitre</i>	136
Anexo 2 <i>Coordenadas geográficas de la vegetación</i>	136
Anexo 3 <i>Conflicto de uso de la zona de estudio</i>	136
Anexo 4 <i>Capacidad de uso de la zona de estudio</i>	136
Anexo 5 <i>Clima de la zona de estudio</i>	136
Anexo 6 <i>Firma espectral del suelo</i>	136
Anexo 7 <i>Firma espectral de la vegetación</i>	136
Anexo 8 <i>Ecosistemas de la zona de estudio</i>	137
Anexo 9 <i>Salinización de la zona de estudio</i>	137
Anexo 10 <i>Variables químicas del suelo</i>	137
Anexo 11 <i>Valores de los índices espectrales</i>	138

1 RESUMEN

La salinización y sodificación son procesos fisicoquímicos de degradación del suelo, que afectan la respuesta fotosintética de las plantas, razón por la cual, algunos países han utilizado la técnica de teledetección hiperespectral para el estudio de esta problemática. Por tal motivo, el objetivo principal del presente proyecto fue analizar la respuesta fotosintética de la vegetación a las sales y/o sodio del suelo de la granja experimental Tinguavita, ubicada en la vereda El Salitre del municipio de Paipa, Boyacá, mediante una imagen hiperespectral y las propiedades fisicoquímicas del suelo, correspondientes a 46 muestras del suelo tomadas en cajuelas previamente realizadas.

La imagen hiperespectral fue procesada y analizada mediante los softwares ENVI 5.3 y ArcGIS 10.3.1, los cuales permitieron calcular los índices de vegetación NDVI y SAVI, que indican que la mayor parte de la vegetación es densa húmeda, y permitieron calcular los índices de salinidad INDSAL y NDSI, que indican que la mayor parte del suelo es ligeramente salino. Además, se realizó una correlación lineal entre los índices de salinidad y las variables químicas de CE, RAS, PSI y pH del suelo, con las cuales se determinó que, el NDSI presenta una mayor relación con las variables químicas de la RAS ($r= 0,8$) y el PSI ($r=0,8$).

El software ArcGIS, también permitió estimar que el 54% de la vegetación se encuentra afectada por problemas de salinidad en el suelo, mientras que el 46% de la vegetación, se encuentra saludable y densa, en un suelo libre de salinidad. El análisis de la imagen hiperespectral y las propiedades químicas del suelo, permiten inferir que la mayor parte del suelo de estudio es sulfatado ácido, por lo cual, se plantearon estrategias para prevenir, mitigar y/o controlar esta problemática, como lo es la aplicación al suelo de silicatos de calcio y yeso como enmienda, gallinaza como abono orgánico, micorrizas como biofertilizante y plantaciones de Raigrás *Lolium perenne*, Kikuyo *Pennisetum clandestinum*, Remolacha Forrajera *Beta vulgaris* y Cebada *Hordeum vulgare L.*, los cuales se adaptan a las condiciones ambientales de la zona de estudio.

El desarrollo del presente estudio permitió realizar un aporte de conocimiento significativo en Colombia, y a su vez, fomentar el estudio de la salinidad y/o sodicidad del suelo, mediante la teledetección hiperespectral, para identificar la distribución y concentración espacial de este tipo de degradación con mayor facilidad y un alto nivel de detalle.

2 ABSTRACT

Salinization and sodification are physicochemical processes of soil degradation, which affect the photosynthetic response of plants, which is why some countries have used the hyperspectral remote sensing technique to study this problem. For this reason, the main objective of this project was to analyze the photosynthetic response of the vegetation to salts and / or sodium in the soil of the Tinguavita experimental farm, located in the El Salitre village of the municipality of Paipa, Boyacá, using a hyperspectral image. and the physicochemical properties of the soil, corresponding to 46 soil samples taken from previously made pots.

The hyperspectral image was processed and analyzed using ENVI 5.3 and ArcGIS 10.3.1 software, which allowed calculating the NDVI and SAVI vegetation indices, which indicate that most of the vegetation is dense humid, and allowed the calculation of salinity indices. INDSAL and NDSI, which indicate that most of the soil is slightly saline. In addition, a linear correlation was made between the salinity indices and the chemical variables of CE, RAS, PSI and soil pH, with which it was determined that the NDSI presents a greater relationship with the chemical variables of RAS ($r = 0,8$) and PSI ($r = 0.8$).

The ArcGIS software also allowed estimating that 54% of the vegetation is affected by salinity problems in the soil, while 46% of the vegetation is healthy and dense, in a soil free of salinity. The analysis of the hyperspectral image and the chemical properties of the soil, allow to infer that most of the study soil is acid sulphated, for which, strategies were proposed to prevent, mitigate and / or control this problem, such as the application to the soil of calcium silicates and gypsum as amendment, chicken manure as organic fertilizer, mycorrhizae as biofertilizer and plantations of Raigras *Lolium perenne*, Kikuyo *Pennisetum clandestinum*, Forage Beet *Beta vulgaris* and Barley *Hordeum vulgare* L. study zone.

The development of this study made it possible to make a significant contribution of knowledge in Colombia, and in turn, to promote the study of soil salinity and / or sodicity, through hyperspectral remote sensing, to identify the distribution and spatial concentration of this type of degradation with greater ease and a high level of detail.

3 INTRODUCCIÓN

La calidad de los suelos es un factor importante para la sostenibilidad ecosistémica, pues regula el ciclo hidrológico, ayuda a la generación de la cobertura vegetal, provee hábitat para diversas especies, además de generar alimentos y minerales, pues cuenta con nutrientes y características propias, que permiten la producción de una gran variedad de cultivos para garantizar el alimento a distintas poblaciones y materias primas e insumos para el funcionamiento de las industrias a nivel mundial (Burbano-Orjuela, 2016).

Actualmente, la degradación de este recurso está incrementando debido a diferentes factores físicos, como la disminución de infiltración y la erosión hídrica, factores químicos, como la pérdida de nutrientes, contaminación, desequilibrio geoquímico, acidificación, salinización y sodificación, y factores biológicos, como la reducción de fauna y la pérdida de materia orgánica, los cuales producen efectos negativos en el suelo, lo que conlleva a su desertificación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016). Uno de los procesos que ocasiona mayor degradación en el suelo es la salinización, pues en suelos con condiciones normales, el contenido de sales por cada metro cúbico de agua es mínimo, por lo tanto, no interviene en el proceso de absorción de agua por parte de las raíces de la planta (Herrero, 1986). Sin embargo, aquellos suelos con un alto contenido de sales, afectan negativamente el crecimiento y productividad de la vegetación, debido a la disminución de la fertilidad y la capacidad de infiltración del agua en el suelo, la cual aumenta la escorrentía superficial y provoca su erosión, modificando sus propiedades físico químicas y afectando la actividad microbiana (Gorji et al., 2020).

La salinización generada por actividades antrópicas afecta alrededor del 20% de los suelos para la producción agrícola a nivel mundial, la cual está incrementando a una tasa anual del 10%, provocando su abandono (Gorji et al., 2020). Además, se estima que el 50% de las tierras con aptitud agrícola para el año 2050, estarán afectadas por esta problemática, perjudicando la economía nacional de los países en donde se pueda presentar. Algunos de los países que actualmente están siendo afectados por la salinización son: Egipto, Pakistán, Siria, Irán y principalmente Argentina (Nguyen et al., 2020). En Colombia, también se evidencian estos procesos de degradación, pues para el año 2017, se estimó que el 45% del área colombiana es susceptible a diferentes clases de salinidad (IDEAM et al., 2017), en especial, la región Caribe, Insular, los Sistemas Montañosos y los Valles interandinos, los cuales poseen

grandes extensiones de tierra con presencia de sales y sodio, debido a causas naturales y antrópicas, limitando el aprovechamiento de este recurso ((IGAC), 2016).

Estos procesos de degradación del suelo, generados por la salinización y sodificación, han hecho necesario desarrollar nuevas técnicas que permitan identificarlos y monitorearlos, como lo es la teledetección hiperespectral, que consiste en la adquisición de imágenes hiperespectrales mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), permitiendo obtener información de los parámetros que se desean estudiar con mayor precisión, flexibilidad y continuidad espacial (Vázquez, 2019).

La técnica de teledetección hiperespectral como alternativa para identificar el estado físico del suelo y la vegetación, es útil en el presente estudio, teniendo en cuenta que, según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, (2009), la vereda El Salitre, se encuentra ubicada en la zona de influencia del Distrito de riego del Chicamocha, que se caracteriza por la alta salinidad en las aguas, las cuales pueden afectar los ecosistemas y la calidad de vida de las personas. Por este motivo, el objetivo principal es analizar la respuesta fotosintética de la vegetación a las sales y/o sodio del suelo en la vereda El Salitre, por medio de una imagen hiperespectral capturada en la granja Tinguavita, debido a que la salinización y/o sodificación pueden generar graves afectaciones en la calidad y productividad del suelo a largo plazo, para finalmente, plantear estrategias que permitan prevenir, mitigar y/o controlar esta problemática, realizando un aporte de conocimiento significativo e innovador para el país en este campo, pues Colombia carece de estudios que resuelvan este tipo de afectación del suelo mediante la técnica de teledetección hiperespectral, ya que se suelen desenvolver en metodologías de campo y análisis de laboratorio.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar la respuesta fotosintética de la vegetación a las sales y/o sodio del suelo por medio de una imagen hiperespectral en la vereda El Salitre del municipio de Paipa, Boyacá.

4.2 Objetivos específicos

- ✓ Estimar y comparar los índices NDVI, SAVI, INDSAL y NDSI, aplicados a la imagen hiperespectral en relación con la respuesta fotosintética de la vegetación de la vereda El Salitre del municipio de Paipa-Boyacá.
- ✓ Identificar el porcentaje de afectación en la vegetación generado por la presencia de sales y/o sodio en el suelo de la zona de estudio en la vereda El Salitre del municipio de Paipa- Boyacá, mediante el uso de una imagen hiperespectral.
- ✓ Generar estrategias que permitan prevenir, mitigar y/o controlar la afectación en la vegetación generada por las sales y/o sodio presentes en el suelo de la zona de estudio de la vereda El Salitre del municipio de Paipa-Boyacá.

5 ANTECEDENTES

La teledetección hace uso de diferentes técnicas, que tienen como propósito adquirir información sobre el estado de la superficie terrestre, mediante la energía reflejada y absorbida por la tierra de acuerdo a la radiación emitida por el sol (A. Gonzalez & Vargas, 2014). Una de estas técnicas, es la teledetección hiperespectral para la observación remota, la cual se ha incorporado a través de los años con la utilización de imágenes satelitales o sensores aerotransportados, generando gran cantidad de información de alta precisión y dimensionamiento, por medio de más de 200 canales espectrales que generan una firma espectral por cada pixel que conforma la imagen. Sin embargo, aunque estas son de gran ayuda para los estudios ambientales, militares, mineralógicos, agrícolas y diferentes análisis en relación a la superficie terrestre, en la década pasada su uso estaba destinado exclusivamente a investigación, lo que actualmente ha cambiado, pues la accesibilidad y desarrollo de la tecnología han permitido realizar estudios sobre el estado de la tierra (C. González, 2012).

5.1 Estudios a nivel internacional sobre el uso de teledetección remota

Diferentes autores alrededor del mundo se han interesado en realizar estudios basados en la utilización de técnicas de teledetección remota para el análisis del suelo. En el 2001, se realizó un estudio en España que tenía por objetivo valorar el estado y la respuesta fotosintética de los viñedos ubicados en Raymat. Para su desarrollo, utilizaron imágenes Landsat 5 TM correspondientes a 6 parcelas de vegetación, capturadas por el satélite IRSID-LISIII, en las cuales se realizaron muestreos de la vegetación y del suelo. Mediante el procesamiento de la imagen, se obtuvo el valor de NDVI para cada parcela, lo que permitió identificar la respuesta espectral de la vegetación en cada una. De las parcelas de estudio, 3 presentaron escasa cobertura vegetal, pues el NDVI se aleja a los valores establecidos para que el cultivo sea adecuado, sin embargo, las parcelas restantes presentaron mejores condiciones en su vegetación. En conclusión, el cálculo del NDVI ayudó a entender el comportamiento espectral de la vegetación, permitiendo identificar las diferentes problemáticas que tienen los suelos del viñedo (Arán et al., 2001).

Esta técnica de teledetección remota también es útil para identificar y monitorear la salinidad del suelo, siendo demostrado por diversas investigaciones. Por ejemplo, un estudio realizado en el año 2012 en la región de Orán Argelia, donde se presentan problemas de

salinidad y alcalinidad, se utilizaron imágenes multiespectrales de Landsat ETM de los años 1987, 2002 y 2009, para detectar la salinidad del suelo. Para esto, se calculó el índice de brillo (BI), el índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI), el índice de salinidad (SI), el índice de salinidad aster (agricultura) (ASI), el índice de salinidad y sodicidad del suelo (SSSI), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de salinidad del suelo de la vegetación (VSSI), utilizando un sistema de información geográfica. El cálculo de los índices de salinidad y vegetación permitió conocer su correlación en los años mencionados, identificando que en el año 2009 se presenta la mejor correlación entre el NDSI y VSSI, con un coeficiente de correlación (r) de 0.9, debido a que la humedad relativa cambia en verano, siendo un factor que influye en los resultados de los índices. En conclusión, el estudio permitió demostrar que la teledetección como herramienta es útil para estimar las áreas con presencia de sal y aquellos cultivos que se ven afectados por esta problemática (Dehni & Lounis, 2012).

Para monitorear la salinidad en los suelos, también se han utilizado las imágenes satelitales, por ejemplo, en un estudio realizado en Perú en el año 2016, se utilizaron 15 imágenes de los sensores ETM+ (LANDSAT-7) y TM (LANDSAT-5), y una imagen del sensor HRG 2 (SPORT 5), del suelo donde se encuentran los cultivos de caña de azúcar de la agroindustria Pomalca, cuya zona se caracteriza por poseer suelos salinos. Para el análisis, se halló la reflectancia de la capa superior del suelo, en función de la longitud de onda, donde se evidenció que la radiación electromagnética en el infrarrojo cercano y medio, dependen del grado de salinidad del suelo, por lo que, un suelo que no es salino genera menor reflectancia en comparación a un suelo que es ligero o moderadamente salino. Seguido de esto, se calculó el NDVI y el INDSAL, por medio de las imágenes, haciendo uso del software ENVI 4.5, identificando que los valores más altos de NDVI corresponden a los cultivos de caña de azúcar saludables, ubicados en suelos sin salinidad, mientras que los valores bajos corresponden a suelos degradados por la concentración salina o a caminos. Finalmente, se calculó la correlación lineal entre la reflectancia de las bandas (1,2,3,4) de la imagen del sensor TM y la conductividad eléctrica, siendo el de la banda 1, el coeficiente de correlación (r) más alto, con 0.73. El estudio permitió crear estrategias útiles para rehabilitar los suelos con problemas de salinidad (Soca et al., 2016).

Otro estudio que menciona la importancia del mapeo y monitoreo de la salinidad del suelo para prevenir o disminuir su aumento, es uno realizado en Turquía, cerca del Lago Tuz, dado que sus tierras agrícolas presentan salinización secundaria, es decir, aquella generada

por actividades antrópicas. El estudio se enfoca en monitorear multitemporalmente las zonas que presentan salinidad en la región del Lago Tuz, específicamente en los años 1990, 2002, 2006, 2011 y 2015. Para ello, se adquirieron imágenes Landsat-5 TM y Landsat-8 desde el año 1990 a 2015, y se analizaron los valores de conductividad eléctrica (CE) de 322 muestras del suelo tomadas en el año 2002. Seguido de esto, con cada imagen satelital se calcularon cinco índices de salinidad en donde se localizan 28 muestras de suelo y se aplicó una regresión exponencial y lineal, para relacionar los valores del índice con la CE del suelo. Según los resultados, el Índice de salinidad (SI) evidenció el mejor resultado, con un valor (R^2) de 0.93 y 0.83 en el análisis de regresión exponencial y lineal, respectivamente. Finalmente, el estudio permitió identificar variaciones en la cobertura del suelo del área de estudio, desde el año 2000 al 2006, y desde el año 2006 al 2012 con el cálculo de los índices de salinidad y los valores de conductividad eléctrica (Gorji et al., 2017).

Etiopía, es uno de los países que también presenta suelos salinos, por tal motivo, un estudio realizado en 2018 tuvo como objetivo analizar el alcance de la salinidad en la granja Wonji, donde se cultiva caña de azúcar. Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó una imagen Landsat TM de 2012 y los softwares ERDAS, ArcGIS 10.2 y ENVI 4.7, con los cuales, se calcularon 7 índices de salinidad y vegetación, que son: SI, NDSI, BI, NDVI, VSSI y SAVI. Los valores de los índices se compararon con la conductividad eléctrica (CE) del suelo, mediante la utilización de modelos de regresión lineal. De acuerdo a esto, se determinó que el SI presenta mayor relación con la CE, pues tiene un valor de (R^2) de 78%. En conclusión, los modelos de regresión utilizados permiten obtener datos claros, precisos y certeros, que le dan validez al estudio (Asfaw et al., 2018).

5.2 Estudios a nivel internacional sobre el uso de imágenes hiperespectrales para el análisis del contenido de sales y/o sodios en el suelo

Actualmente, la salinización de los suelos es un problema a nivel mundial y la necesidad de combatirla ha impulsado a diversos autores a realizar estudios que permitan identificar esta problemática y plantear estrategias para mitigarla, teniendo en cuenta que las sales pueden generar afectaciones en ciertos cultivos, al presentarse en determinadas concentraciones, ya que reduce la cantidad de microorganismos y los procesos de degradación enzimática.

Un estudio relacionado a esta problemática fue realizado en México en 2009, el cual tenía como objetivo caracterizar las costras de sales en Montecillo, en la franja noroeste del ex Lago Texcoco, mediante espectroscopia en una longitud de onda de 450 a 968 nm, con el fin de conocer la relación entre las firmas espectrales y el análisis físico químico del suelo. Para esto, se hizo un muestreo en campo, haciendo un transecto en donde había costras salinas, seguido de un análisis multivariante, que es una técnica que agrupa datos similares, obteniendo cinco grupos de costras (g1, g2, g3, g4 y g5), que se diferencian por la reflectancia de sus curvas espectrales. El grupo g4 y g5 presentaron un alto nivel de reflectancia, debido a que el g4 tiene costras de sal compuestas por material de limo y el g5 debido al color del suelo. En conclusión, este estudio permitió buscar estrategias para realizar una clasificación de las costras de sal por medio de firmas espectrales, siendo eficiente por sus bajos costos y su precisión (Giron et al., 2009).

Por su parte, en el Delta del Río Amarillo en China se realizó un estudio en el año 2011, cuyo objetivo fue aplicar diferentes índices de vegetación (VI) para determinar el comportamiento de la salinidad en el suelo de la región. Para el desarrollo del estudio se utilizó un espectrómetro portátil de campo en una longitud de onda de 300 a 1150 nm, que capturó siete especies de plantas sensibles a la sal y halófitas, luego se identificaron las bandas sensibles a la salinidad mediante un correlograma lineal univariado y una regresión de mínimos cuadrados parciales. El estudio logró identificar que la mayoría de los índices, excepto el SAVI, presentaron una mínima correlación con la conductividad eléctrica del suelo, por ende, una baja relación con la salinidad del suelo, demostrando que la mayoría de los índices de vegetación no permiten monitorear la salinidad de algunas especies, debido a que no son sensibles a estas (Zhang et al., 2011). De acuerdo con esto, la aplicación de índices de vegetación es un factor importante para el estudio del suelo, la vegetación y el agua, pues ayudan a conocer y evaluar el estado de los recursos naturales mediante la diferenciación de áreas de acuerdo a las características que presentan (Muñoz, 2013).

Analizar el comportamiento espectral de los suelos salinos, también es objeto de investigación en Brasil, pues un estudio realizado en el año 2015 se enfocó en analizar cuatro tipos de sales en los suelos, las cuales son: cloruro de potasio, cloruro de sodio, cloruro de calcio deshidratado y cloruro de magnesio deshidratado. Para el desarrollo del estudio se utilizó un sensor hiperespectral fieldSpec, con un rango de 1100 a 2500 nm, obteniendo como resultado un aumento de la reflectividad para el cloruro de sodio, debido a su concentración, a

diferencia del cloruro de calcio deshidratado y del cloruro de magnesio deshidratado que produjo el efecto contrario. El estudio concluye que la reflectividad depende del tipo de sal a analizar, pues cada una tiene características propias que hacen que se genere mayor absorbancia o reflectancia, además, la utilización de metodologías de teledetección aporta grandes avances en el estudio de suelos, pues arrojan resultados de alta precisión (Medeiros et al., 2015).

La salinización, de igual forma, pone en riesgo la fertilidad, los cultivos y la producción agrícola sostenible de los suelos de Egipto, pues en un estudio, realizado en 2018, se evalúa la concentración salina del suelo ubicado al este del Delta del Nilo, por medio de los sistemas de información geográficos (SIG), con el objetivo de crear estrategias para mejorar esta condición. Para esto, se recolectaron 92 muestras del suelo y se mapeó la distribución de la salinidad del suelo, teniendo en cuenta la clasificación agronómica, que indicó que el 10% del suelo es extremadamente salino, el 2% es fuertemente salino, el 13% es moderadamente salino, el 15% es ligeramente salino y el 60% del suelo no es salino; a diferencia de la clasificación rusa, la cual tiene en cuenta el nivel de toxicidad de la sal, su composición química y el pH, indicando que el 5.7% del suelo corresponde a muy fuertemente salino, el 3.8% a fuertemente salino, el 9% a moderadamente salino, el 10.5% a ligeramente salino y el 71% del suelo no presenta concentración salina. Además, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que, según los resultados, a medida que aumenta la salinidad del suelo, disminuye la extensión de la cobertura vegetal, pues al suroeste de la zona estudio, los valores obtenidos del índice varían entre 0.3 y 0.56. Finalmente, se concluye que, para el manejo adecuado de los suelos salinos, se debe tener en cuenta la composición química de las sales y el nivel de sales tóxicas totales (Hammam & Mohamed, 2018).

5.3 Estudios a nivel nacional sobre el uso de imágenes hiperespectrales para el análisis de suelos

En el valle del río Cauca, en Colombia, también han hecho uso de técnicas de teledetección hiperespectral para el análisis del suelo, pues un estudio en el año 2010 tuvo como objetivo identificar los perfiles espectrales del suelo de este departamento, a partir de los cuatro subgrupos taxonómicos que lo conforman. Para esto, se recogieron 44 muestras de los subgrupos taxonómicos y se capturó una imagen hiperespectral en una longitud de onda de 400 a 2500 nm, por medio del espectrómetro FOSS NirSystems. Con esta imagen, es posible

determinar los perfiles espectrales para cada subgrupo taxonómico, a fin de establecer su homogeneidad y heterogeneidad. A partir de esto, se identificó la abundancia de los minerales y conglomerados para cada subgrupo, y junto con sus perfiles espectrales se logró construir un perfil representativo para cada uno, permitiendo establecer sus diferencias, como lo es la coloración que presenta el suelo, por la presencia del óxido de hierro. En conclusión, aunque el análisis de los conglomerados ayuda a estudiar el perfil espectral, es necesario relacionar los perfiles espectrales con valores cuantitativos, por lo cual, el modelo lineal espectral unmixing que se encuentra en ENVI puede ayudar a analizar de manera más objetiva los perfiles (Obando & Carbonell, 2010).

A su vez, un estudio realizado en Puerto Wilches, Santander, utilizó imágenes hiperespectrales tomadas con el sensor remoto MODIS, para identificar el comportamiento de la salinidad del suelo, donde se encuentra un cultivo de palma de aceite. Para ello, se tuvo en cuenta un registro histórico de la presencia de insectos defoliadores, que están relacionados con la presencia de la salinidad, y se obtuvieron firmas espectrales, que representa el comportamiento de la reflectancia del suelo en función de la longitud de onda, la cual se genera por los pigmentos de la planta. También se calcularon índices de vegetación, que permiten conocer las características fenológicas de la palma de aceite. Finalmente, se realiza una correlación entre las firmas espectrales y los ataques ocasionados por los insectos, determinando así las bandas donde se presenta el comportamiento de la salinidad, concluyendo que el uso de sensores remotos es una alternativa para conocer la afectación de un cultivo (Ojeda & Marín, 2014).

5.4 Estudios realizados en Paipa, Boyacá, sobre los suelos sulfatados ácidos

En el sector Varguitas, ubicado en el municipio de Paipa- Boyacá, se llevó a cabo un estudio en el año 2014, para evaluar la respuesta de algunas especies vegetales a la acidez de los suelos sulfatados e identificar la forma en que estas permiten mejorarlo o rehabilitarlo, teniendo en cuenta que este tipo de suelo se caracteriza por una alta presencia de azufre y hierro, lo que afecta su productividad y fertilidad. Para esto, se tomó una muestra de 135 Kg de suelo, que fue enviada al Jardín Botánico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) en Tunja, para realizar el montaje experimental del nabo forrajero (*Brassica rapa L*), la remolacha forrajera (*Beta vulgaris L*) y el rábano forrajero (*Raphanus sativus L.*), a fin de compararlo con otro montaje experimental igual, pero con suelo no sulfatado. Antes de

realizar el montaje experimental, se le agregó cal dolomita (20 t/ha) al suelo sulfatado ácido y cal agrícola (8,8 t/ha) al suelo no sulfatado como enmienda, obteniendo un total de 54 montajes experimentales, de los cuales, 27 estaban conformados por suelo ácido sulfatado y los 27 restantes por suelo no sulfatado. Para evaluar los efectos del suelo ácido sulfatado y no sulfatado, se midió el pH y la acidez intercambiable ($H^+ + Al^{+3}$ cmolc/kg) de cada uno, antes y después de sembrar las semillas. Al finalizar el ciclo del cultivo (120 días), se identificó la respuesta a nivel agronómico de las 3 especies ante los dos tipos de suelo, de modo que en el suelo sulfatado ácido, las especies *B. rapa*, *R. sativus* y *B. vulgaris* junto con la adición de enmiendas calcáreas como correctivo, redujeron la acidez intercambiable, sin embargo, *B. rapa* y *R. sativus* presentaron mejor potencial de crecimiento y tolerancia, mientras que *B. vulgaris* se vio afectada en altura y diámetro de raíz (Bernal Figueroa & Forero Ulloa, 2014)

Como se ha podido evidenciar, la salinización del suelo es una problemática ambiental global, que afecta principalmente la fertilidad del suelo, la productividad agrícola y el desarrollo sostenible, degradando progresivamente el suelo, principalmente en aquellas regiones áridas y semiáridas. Además, la sodificación puede estar asociada con la salinización generando una acumulación de sodio y/o sales de sodio en la fase líquida y/o sólida del suelo ((FAO), 2016). Por este motivo, se hace importante identificar y realizar el monitoreo de aquellos suelos salinos, con el fin de predecir y prevenir los potenciales riesgos que esta condición pueda generar.

6 MARCO TEORICO

6.1 Marco Conceptual

6.1.1 Conceptos de salinización y sodificación del suelo

Suelo: Es una capa delgada que ocupa gran parte de la superficie de la tierra, compuesta por minerales, materia orgánica, macro y microorganismos, agua y aire, en la cual interactúan de manera dinámica algunos elementos de la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera, realizando un intercambio de materia y energía entre los seres vivos y lo inerte (Jaramillo, 2002).

Sales en el suelo: La sal es un compuesto iónico, que se forma a partir de una reacción química entre un ácido y una base, donde el ácido provee el catión y la base provee el anión. Existen diversos tipos de sales en el suelo, generadas de manera natural o antrópica (IDEAM et al., 2017).

Sales solubles: Se presentan en la fase líquida o acuosa del suelo y normalmente son más solubles que el yeso. Algunas de estas son el cloruro sódico ($NaCl$), el cloruro magnésico ($MgCl_2$), el sulfato magnésico ($MgSO_4$) y el sulfato sódico (Na_2SO_4) (IDEAM et al., 2017).

Salinización del suelo: Proceso mediante el cual se acumula un alto contenido de sales solubles en el suelo, tales como sodio, sulfato, carbonato, calcio, potasio, magnesio, bicarbonato y cloruro, cuya concentración excede la tolerancia normal del suelo ((FAO), 2016), afectando negativamente el crecimiento natural de las plantas y su productividad, además de degradar progresivamente el suelo. Este proceso puede ser de origen natural o antrópico (J. Otero et al., 2002).

Salinización primaria: Es un proceso natural que ocasiona la acumulación de sales en el suelo (FAO, 2016), debido a diferentes razones, como el elevado contenido de sal en el material de origen o en las aguas lluvia que se infiltran, las sales arrastradas por el viento o el agua proveniente del mar, en las costas (J. Otero et al., 2002).

Salinización secundaria: Es aquella generada por la intervención del hombre (FAO, 2016), por ejemplo, el uso de agua con contenido de sales para riego, uso de fertilizantes, principalmente los más solubles, drenaje ineficiente o la contaminación atmosférica e hídrica generada por industrias (J. Otero et al., 2002).

Salinidad: Es la cantidad de sales en solución, la cual se puede estimar por medio de algunos indicadores químicos como lo es la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y potencial de hidrógeno (pH) (Badia, 1992).

Estrés salino: La elevada concentración de sales en el suelo puede provocar estrés salino, el cual genera cambios a nivel fisiológico y bioquímico en el metabolismo de las plantas, afectando su desarrollo y productividad. Un fuerte estrés salino puede romper la homeostasis del potencial hídrico y la distribución de iones (Lamz & González, 2013). Sin embargo, existen una variedad de seres vegetales tolerantes a la salinidad, como es el caso de las plantas halófitas (D. González, 2007).

Sodificación del suelo: Es el proceso mediante el cual se acumula sodio y/o sales de sodio en el suelo, específicamente en sus fases sólidas y/o líquidas ((FAO), 2016), debido a cambios generados en la concentración y composición de las sales en solución y en los cationes intercambiables, ocasionando dificultades en la permeabilidad y porosidad del suelo, como también toxicidad en algunas plantas (Jaramillo, 2002).

Sodicidad: Es la cantidad de sales de sodio, que es posible estimar mediante algunos indicadores químicos como lo es el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS). Su valor depende del balance de agua y sales ((FAO), 2016).

6.1.2 Conceptos de la técnica de teledetección

Teledetección: Es una técnica que permite identificar rasgos físicos y biológicos de un objeto en específico, haciendo uso de un sensor situado en cualquier plataforma (Satelital, área etc.), con el que se obtienen datos sin hacer contacto directamente con el objeto de estudio (Rodríguez & Arredondo, 2005).

Sensor: Son dispositivos que permiten capturar la radiación electromagnética que es emitida o reflejada por la superficie terrestre, los cuales miden el espectro electromagnético para poder identificar las características del paisaje, generando una imagen digital (Rodríguez & Arredondo, 2005).

Espectro electromagnético: Es el conjunto de ondas electromagnéticas que genera un cuerpo y se propagan en tiempo y espacio (Ordóñez, 2019), este conjunto de ondas se clasifica dependiendo la longitud de onda, la frecuencia y el número de ondas, pues a medida que la longitud de onda es menor, la energía aumenta, de acuerdo a la frecuencia y el número de ondas, estas son directamente proporcionales a la energía (UCO, 2010). Teniendo en cuenta que todas las ondas electromagnéticas no se comportan de la misma forma, estas se dividen en segmentos, entre los que se encuentran: los Rayos cósmicos, gamma, x, ultravioleta (300 a 400 nm), la luz visible (400-700 nm), el infrarrojo (700 a 3000 nm), el infrarrojo medio (3000 a 8000 nm) y el infrarrojo lejano (8000- $1e+6$) (Reuter, 2009).

Imagen hiperespectral: Es la combinación de imágenes y espectroscopia (reflectancia y la absorción del componente que se desea estudiar), y se conforma por información espacial, que es la ubicación que se le da espacialmente a un pixel en un plano (x,y) y por información espectral, que es el número de bandas que conforman la imagen, la cual da forma a un hipercubo con la longitud de onda reflectada por el objeto de estudio (Camacho et al., 2015). Este hipercubo se compone por un número de bandas contiguas en escala de grises y cada banda está constituida por pixeles, que contienen cada uno una firma espectral detallada (C. González, 2012), que es la curva de reflectancia en relación a la longitud de onda del objeto. La imagen maneja una longitud de onda amplia que comúnmente tiene un rango de 400 a 2500 nanómetros (nm), lo que permite abarcar el espectro electromagnético visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y largo, lo que propicia una mayor resolución (Sowmya et al., 2019), permitiendo obtener información precisa del aspecto a estudiar, cómo el estado del suelo, agua y vegetación (Sytar et al., 2017).

Firma espectral: Es la reflectancia y absorbancia que genera un componente de la tierra, en función de la longitud de onda, esta longitud varía de acuerdo a la reflectancia que genera el componente (ESA, 2014). Por ejemplo, la vegetación, el suelo y el agua, al presentar distintos comportamientos de reflectividad, producen diferentes picos que son conectados por

líneas, formando una gráfica en forma de curva específica para cada superficie, que se conoce como firma espectral (Campbell, 2017).

Reflectancia espectral: Es la cantidad de energía almacenada por una longitud de onda del espectro electromagnético (Grebner et al., 2013), se mide en porcentaje en un rango de 0 a 100% (García & Dubus, 2013). Esta es generada por una superficie u objeto y su comportamiento depende de la composición fisicoquímica y el estado en que se encuentre el elemento de estudio (Castro, 1999).

Absorbancia: Es la energía almacenada por un objeto o superficie, mediante la irradiación del sol (F. Alonso, 2003), la cual se convierte en energía cinética, produciendo diferentes reacciones fisicoquímicas dentro del objeto (FAO-ITC, 2013). Esta es representada en la longitud de onda generada por el espectro electromagnético (Abril et al., 1984).

Longitud de onda: Es la radiación generada por distintos tipos de ondas, por ejemplo: ondas electromagnéticas, de sonido y de luz. Su forma depende del elemento que la emite, la cual forma crestas y valles de diferentes longitudes, sus unidades de medición más comunes son: nanómetros (nm), micrómetros (μm) y metros (m) (Altshuler & Tuchin, 2009). Su comportamiento se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1 *Formula Longitud de onda*

$$\text{Longitud de onda } (\lambda) = \frac{\text{Velocidad}}{\text{Frecuencia}}$$

Fuente: (Dondurur, 2018)

6.1.3 Conceptos de índices espectrales

Índice de vegetación: Son operaciones matemáticas de suma, resta, división y multiplicación, desarrolladas mediante la combinación de bandas espectrales sensibles al índice que se desea calcular (Gilabert et al., 1997). Existen diferentes tipos de índices como: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI), que se utilizan para conocer la distribución, la cantidad y el vigor de la

vegetación. Las bandas para su desarrollo son seleccionadas en relación al comportamiento de la longitud de onda generada en el espectro electromagnético, que representa la reflectancia de la vegetación (Alzate, 2012).

Índice de salinidad: Son operaciones matemáticas que se llevan a cabo mediante el uso de datos de teledetección. El más utilizado es el índice de salinidad (INDSAL), el cual permite detectar el grado de salinidad en el suelo mediante imágenes (Babiker et al., 2018) y ha demostrado tener una correlación muy significativa con la conductividad eléctrica (Allbed, Kumar, & Sinha, 2014) (Allbed, Kumar & Sinha, 2014).

6.2 Marco contextual

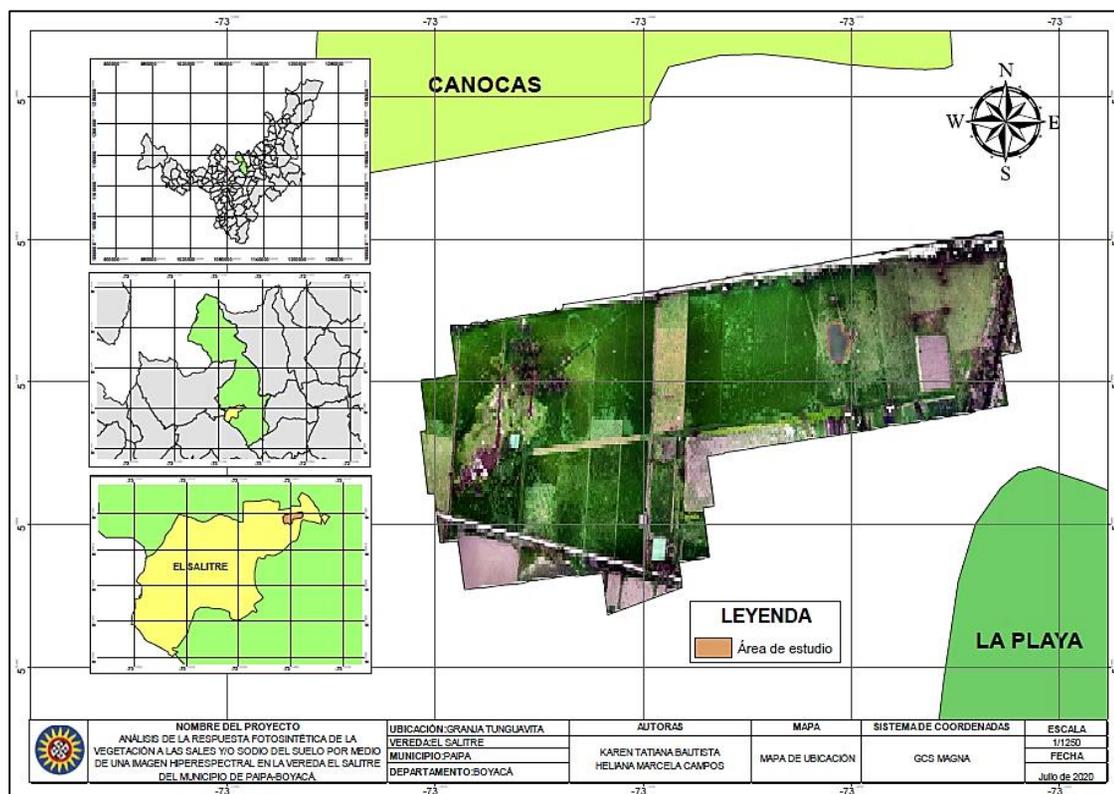
6.2.1 Ubicación del proyecto

El municipio de Paipa se encuentra ubicado dentro del valle de Sogamoso en la Cordillera Oriental de Colombia, a una altura promedio de 2500 m.s.n.m *metros sobre el nivel de mar*, limitando al oeste con Tuta y Sotaquirá, al este con Tibasosa y Duitama, al sur con Firavitoba y al norte con Gambita, Santander (Parra, 2006). El municipio abarca un área de 30.592,41 ha, de la cual el 10.80% pertenece a la zona urbana y el 89.20% a la zona rural (Borda, 2013). El municipio está dividido en zona urbana, que se conforma por 19 barrios y zona rural, que se conforma por 38 veredas (Parra, 2006). Entre las veredas, se encuentra El Salitre, que tiene una extensión de 1.120 hectáreas (ha) y limita al noroeste con la vereda Río Arriba, al noreste con la vereda Canocas y la Esperanza y al sureste con la vereda la Playa y el Tunal. En El Salitre, se ubica la zona de estudio del presente proyecto.

El área de estudio abarca 11,18 ha pertenecientes a la granja experimental Tunguavita, que está ubicada en el kilómetro 4 vía Paipa-Toca (Boyacá), la cual es utilizada como un ente académico, investigativo, extensor y reforzador a nivel práctico para las diferentes áreas del conocimiento (Duarte et al., 2018).

Figura 1

Ubicación del proyecto



Fuente: Autoría propia.

6.2.2 Demografía de la vereda El Salitre

El municipio de Paipa para el año 2012 cuenta con una población de 29.890 habitantes, de los cuales 17.954 de la población están ubicados en la zona urbana y 11.936 están en la zona rural del municipio y, a su vez, La vereda El Salitre está conformada por 287 familias, siendo la vereda que presenta mayor número de familias y por ende población en comparación con las veredas aledañas (Borda, 2013).

6.2.3 Actividades socioeconómicas

El municipio de Paipa desarrolla actividades en los tres sectores económicos (primario, secundario y terciario), razón por la cual, su economía es bastante diversificada, sin embargo,

esta se concentra en el sector primario y terciario. En el sector primario, se lleva a cabo la agricultura destinada al cultivo de cebolla, trigo, cebada, papa, maíz, coliflor, legumbres y frutales, ocupando un área de aproximadamente 5.450 ha en todo el municipio. También se lleva a cabo la ganadería, que genera productos como la carne y la leche, ocupando un área de aproximadamente 8.517 ha, en las que se encuentran hierbas y pastizales. Por último, la minería también se incluye en este sector, la cual realiza explotación de carbón, minerales y arena, debido al potencial de reservas que posee, aportando ingresos al municipio (Cely,2017).

El sector secundario, se compone de las industrias, cuyas principales actividades son: fabricación de prendas de vestir, elaboración de productos químicos, metálicos y de molinería, fabricación de elementos de construcción, productos alimenticios, entre otros. Finalmente, en el sector terciario, el comercio y los servicios son las actividades económicas más importantes en el municipio, pues cuenta con más de 800 establecimientos dedicados al comercio y con diversos escenarios y hoteles, proporcionando empleo a muchas personas y elevando los ingresos del municipio (Paipa, 2020).

6.2.4 Geología

De acuerdo al mapa geológico del municipio de Paipa, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la estratificación geológica para la vereda El Salitre del municipio de Paipa es la siguiente:

Depósitos Aluviales Recientes (Cuaternario): Se encuentra conformado por compuestos de limos, arcillas y arenas, características de las zonas aledañas al río Chicamocha y de la zona urbana del municipio de Paipa (B. IGAC, 1982).

Formación Bogotá (Terciario): Es conformada por areniscas friables, arcillas rojizas y amarillentas, pertenecientes al periodo terciario de la edad Paleoceno (B. IGAC, 1982).

Formación Tilatá (Terciario): Es conformada por conglomerados, capas de grava, arenas y arcillas, pertenecientes a la edad del Paleoceno al Pleistoceno. Cabe resaltar, que esta formación nació a partir de otras formaciones ya existentes (B. IGAC, 1982).

Formación Guaduas (Cretáceo): Es conformada por areniscas friables, arcillolitas grises y horizontes de carbón, pertenecientes al periodo de cambio del Terciario al Cretáceo Superior. Cabe resaltar, que esta formación se ve interferida al norte de Paipa por la falla geológica del departamento de Boyacá (B. IGAC, 1982).

6.2.5 Geomorfología de la vereda El Salitre

La palabra geomorfología, está compuesta por tres palabras griegas, *geo* que significa tierra, *morfé* que significa forma y *logos* que significa estudio, siendo una ciencia encargada del estudio de la forma de la superficie terrestre. De acuerdo a esto, la geomorfología que compone al municipio de Paipa se debe a su ubicación, ya que se encuentra localizado en la Cordillera Oriental de Colombia, presentando una morfología de cadena montañosa con francos plegables, cruzados por las fallas geológicas de Boyacá y El Curial (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, 2009)

La geomorfología que conforma a la Vereda El Salitre se reconoce mediante las unidades cartográficas presentes en la tabla de atributos del shape *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000 Departamento: Boyacá*, proporcionado por el geoportal del IGAC (I. G. A. C. IGAC, 2004). En relación a esto, las unidades cartográficas de la vereda ocupan un área total de 1.120 ha, donde la geomorfología de la unidad MMA se compone por un paisaje de montaña estructural erosional y un relieve de vigas y crestones homoclinales, abarcado un área de 0,607 ha que equivalen al 0.05%, la unidad ME se compone por un paisaje misceláneo erosionado y un relieve de miscelánea erosionada, abarcado un área de 1,4 ha que equivalen al 0.13%, la unidad VMA se compone por un paisaje de valle aluvial y un relieve de terrazas recientes, abarcado un área de 182,712 ha que equivalen al 16.31%, y la unidad AMV se compone por un paisaje de altiplanicie estructural y un relieve de lomas, colinas y glacis, abarcado un área de 935,462 ha que equivalen al 83.51% del área total ((IGAC),2004).

6.2.6 Tipos de suelos de la vereda El Salitre

Conocer el tipo de suelo es un factor esencial, que permite establecer el manejo que se le puede dar al suelo, para potencializar su productividad agrícola y pecuaria, disminuyendo alternativamente su degradación (Vallejo, 2013). Entre las características que se deben

conocer para determinar el tipo de suelo, se encuentran las físicas como: la litología, la estructura, el color, la porosidad y la densidad aparente, las químicas como: el pH y la capacidad de intercambio catiónico y las biológicas como: la macrofauna y la microfauna (Ramírez, 1997).

En concordancia a lo anterior, los tipos de suelos de la Vereda El Salitre se reconocen mediante las unidades cartográficas presentes en la tabla de atributos del shape *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá*, proporcionado por el geoportal del IGAC (I. G. A. C. IGAC, 2004) (Anexo 1). En efecto, en la siguiente tabla se presentan los suelos identificados:

Tabla 1

Tipos de suelo de la vereda El Salitre

Unidades cartográficas de los suelos (UCS)	Tipos de suelos de la vereda El Salitre
MMA	Asociación: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Inceptic Haplustalfs</i>, • <i>Lithic Ustorthents</i> • <i>Typic Dystrustepts</i>
ME	Consociación: <ul style="list-style-type: none"> • Misceláneo erosionado
VMA	Asociación: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Fluventic Haplustepts</i> • <i>Udertic – Haplustepts</i> • <i>Typic- Dystrustepts</i>
AMV	Asociación: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Vertic Haplustalfs</i> • <i>Andic Dystrustepts</i>

Fuente: Autoría propia con base en (I. G. A. C. IGAC, 2004).

6.3 MARCO DE TEORÍAS

6.3.1 *Historia de la teledetección*

La teledetección ha demostrado ser una de las herramientas más importantes para la obtención remota de información espectral, espacial y temporal de una superficie, un objeto o un fenómeno, generando una imagen digital, la cual es capturada por medio de una cámara o un sensor situado en una plataforma (aérea o satelital), sin hacer contacto directo con el objeto, razón por la cual, la resolución de la imagen depende de la distancia de la plataforma al objeto de estudio y del tipo de sensor utilizado. En este sentido, su desarrollo tecnológico ha avanzado a través del tiempo, a fin de mejorar sus características y proveer mayores aplicaciones (Ramirez et al., 2014). Esto comienza desde que Joseph Nicephore Niepce a inicios del siglo XIX inventa la fotografía, al desarrollar la técnica de la heliografía, que es un procedimiento que permite obtener una fotografía de positivo directo por medio de una cámara oscura, sin embargo, fue hasta finales del siglo XIX que se establecen las bases de la fotografía, como se le conoce actualmente, debido al desarrollo de lentes y nuevos sistemas ópticos (Reuter, 2009). A su vez, se evidencian las primeras experiencias de teledetección, cuando Gaspar de Tournachón utiliza por primera vez las cámaras fotográficas instaladas en globos, primero de aire caliente y luego de hidrógeno. Luego, en el año 1908, gracias a los avances en óptica y emulsiones, Wilbur Wright piloteando un aeroplano capturó la primera fotografía aérea sobre el cielo en Francia, la cual, se podría decir que es la primera imagen de teledetección obtenida, dando paso al comienzo de la observación por medio del uso de plataformas remotas (Chuvieco, 1990).

De esta manera, una vez mejorada la distancia y altura de vuelo de los aeroplanos, se diseña la primera cámara aérea, para darle nuevas aplicaciones a la obtención de fotografías aéreas como lo fue en la primera guerra mundial, sin embargo, el desarrollo de la percepción remota aún era escaso, fue en la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), cuando se desarrollaron las primeras técnicas de teledetección aérea y sensores con fines militares, es decir, para rastreo de la ubicación del enemigo, seguimiento de tropas o identificación de zonas en conflicto, siendo además, Estados Unidos, Alemania y Gran Bretaña los responsables de crear dispositivos que registran la región del infrarrojo, y Gran Bretaña de desarrollar el primer sistema para la obtención de imágenes radar (Reuter, 2009).

Seguido de esto, nace la necesidad de explorar el planeta tierra, los planetas vecinos y la luna, razón por la cual, surge la idea de hacer uso de plataformas espaciales, de manera que en el año 1959 fue capturada la primera imagen de la tierra por el EXPLORER-6 y a su vez, en el año 1960 la NASA lanza el primer satélite meteorológico denominado TIROS-1 *Televisión and Infrared Observational Satellite-1*, el cual contaba con sensores de baja resolución, que permitían diferenciar entre agua, nubes, nieve o hielo (Reuter, 2009).

Luego, en el año 1972 Estados Unidos se interesa en ejecutar un plan para observar de manera sistemática la superficie de la tierra, a fin de estudiar los recursos terrestres, por esto, la NASA pone en ejecución el lanzamiento del ERTS *Earth Resources Technology Satellite* que luego se denominó LANDSAT-1, el cual contaba con una cámara RBV *Return Beam Vidicon* y el sensor MSS *Multi-spectral Scanner*, que detectaba la energía reflejada de la superficie de la tierra en las regiones verde, roja e infrarroja del espectro electromagnético (Sacristán, 2006). A éste, le siguió el lanzamiento de otros satélites puestos en órbita, que contaban con otras características en relación a los sensores utilizados, como el LANDSAT-4 que se puso en órbita en 1982 y LANDSAT-5 en 1984, que tenían el sensor Thematic Mapper con 7 bandas espectrales y una resolución de 30 metros en 6 de las bandas (Reuter, 2009).

A partir de entonces, creció a nivel internacional el interés de la comunidad científica en la teledetección, pues diversos países decidieron lanzar sus propios satélites, entre los que se destacan Francia con los satélites SPOT, Canadá con los RADARSAT, Japón con los MOS, India con los IRS y la Agencia Espacial Europea con ERS (Gutiérrez & Moreno, 2000). Por esta razón, en la actualidad, gracias a su evolución existen plataformas aeroespaciales y aerotransportadas o terrestres, que generan imágenes con diferentes resoluciones espectrales, es decir, con distintos anchos de bandas, siendo la principal característica que distingue una imagen multiespectral de una hiperespectral. De acuerdo a esto, los sensores que son capaces de capturar información de 3 a 7 bandas son considerados multiespectrales, mientras que los sensores que pueden capturar hasta 400 bandas se consideran hiperespectrales, pues las imágenes tomadas con estos sensores capturan un rango espectral de 440 a 950 nm, por lo cual, al tomar mayor número de bandas espectrales se puede obtener información más detallada de las características de las coberturas de la tierra o el elemento que se desee estudiar (Camacho et al., 2015).

El uso de imágenes hiperespectrales actualmente tiene diferentes ventajas para realizar el estudio de las superficies y componentes de la tierra, entre estas se encuentra la alta resolución, pues al utilizar sensores aerotransportados como aviones tripulados o no tripulados, permiten obtener imágenes a una distancia corta del suelo, logrando captar con mayor detalle las características que se desean estudiar. Otra de sus ventajas es su fácil adaptación, pues estas imágenes pueden ser tomadas en zonas de difícil acceso, ya que se utilizan sensores que no requieren tripulación, generando que sea más fácil realizar un estudio. Otra de sus fortalezas, es que no generan un impacto o riesgo ambiental, ya que es una técnica que no necesita contacto físico con el objeto que se desea analizar. La duración de la obtención de los datos es otra característica favorable de esta técnica, pues se logran extraer datos en poco tiempo, en relación a otras metodologías. Sin embargo, entre las desventajas que tiene la aplicación de esta técnica, está la limitación de tomar imágenes cuando hay lluvia, nieve o viento con una velocidad mayor a 30 *m/seg*. Finalmente, otra falencia es la imposibilidad de capturar imágenes en zonas urbanas o lugares donde hay población y la limitación de realizar vuelos en las horas de la noche (J. Díaz, 2015).

6.3.2 Ley de Lambert-Beer

La Ley de Lambert-Beer es la unión entre la Ley de Lambert y la Ley de Beer, las cuales, en combinación permiten conocer la relación de la magnitud de luz que entra y sale en un medio (A. García, 2016). Esta se ve afectada por el fenómeno de absorbancia, el cual depende de la concentración del medio, es decir, del número de partículas que lo conforman, por lo que, a mayor número de partículas, mayor es la interacción con la luz incidente, por ende, hay mayor absorbancia. Otra de las características que modifica el comportamiento de la luz en un cuerpo, es la trayectoria que esta recorre, pues entre mayor sea la trayectoria recorrida de la luz en el cuerpo, mayor será la posibilidad de que existan interacciones con las partículas del medio (Abril et al., 1984). Este comportamiento se describe con la siguiente fórmula:

Ecuación 2 Ley de Lambert-Beer

$$A = \text{Log} \left(\frac{l}{T} \right) = \text{Log} \left(\frac{I_0}{I} \right) = Klc$$

Fuente: (Abril et al., 1984).

A : Absorbencia

l : Trayectoria de la luz a través de la muestra

T : Transmitancia

I_0 : Intensidad de la luz incidente

I : Intensidad de la luz transmitida

K : Coeficiente de absorción molecular

c : Concentración

6.4 MARCO LEGAL

6.4.1 Política para la gestión sostenible del suelo

La política para la gestión sostenible del suelo en Colombia tiene como objetivo general promover la gestión sostenible del suelo en Colombia, a fin de lograr la conservación del agua, el aire y la biodiversidad, de la mano con el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, contribuyendo en el desarrollo sostenible y la calidad de vida de los colombianos. Entre los objetivos específicos que abarca esta política se encuentran: Generar acciones de preservación, restauración y uso sostenible del suelo, fortalecer las instituciones y las políticas para la toma de decisiones en cuanto a la gestión del suelo, promover la investigación e innovación y transferencia de tecnologías para conocer las características del suelo, a fin de promover su preservación, restauración, uso y manejo sostenible, entre otros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, p. 57).

El marco jurídico que compone a la política de la gestión sostenible del suelo está compuesto por la constitución política de Colombia de 1991, en la que se instaura el marco general para la conservación, uso y acceso a los componentes del ambiente, entre ellos el suelo. También en esta, se da a conocer la importancia que tiene el medio ambiente, estipulando su cuidado y conservación como una obligación del Estado y la sociedad. De este modo, en el artículo 79 de la constitución, se establece que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar y es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”, y el artículo 80, cita que: “El Estado planificará el manejo y

aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, p. 9).

Así mismo, otra de las normas que regula y protege al suelo es el Decreto Ley 2811 de 1974 *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*, el cual afirma que el aprovechamiento del suelo, debe hacerse en relación a las propiedades y factores que lo conforman, pues se debe analizar el tipo de uso que se le puede dar, conforme a las características físicas, químicas, socioeconómicas y ecológicas de la zona donde se encuentra ubicado. Sumado a esto, también se debe tener en cuenta que su utilización debe realizarse sin generar impactos físicos negativos, por lo que las comunidades y autoridades deben velar por su conservación y su administración adecuada (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

De igual manera, el Decreto 1076 de 2015 *Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible* instaura en el artículo 2.2.1.1.8.6 las obligaciones que deben tener los propietarios de suelos que estén destinados para la protección y conservación, entre las que se encuentran:

- ✓ Usar los suelos de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos de tal forma que se mantenga su integridad física y su capacidad productora, de acuerdo con la clasificación agrológica del IGAC y con las recomendaciones señaladas por el ICA, el IGAC y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- ✓ Proteger los suelos mediante técnicas adecuadas de cultivos y manejo de suelos, que eviten la salinización, compactación, erosión, contaminación o revenimiento y, en general, la pérdida o degradación de los suelos.
- ✓ Mantener la cobertura vegetal de los terrenos dedicados a ganadería, para lo cual se evitará la formación de caminos de ganado o terracetas que se producen por sobrepastoreo y otras prácticas que traigan como consecuencia la erosión o degradación de los suelos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, p. 10).

Otras normas que velan por la conservación y la gestión sostenible del suelo son:

Tabla 2*Normas de la gestión sostenible del suelo*

NORMAS	CONTENIDO
Ley 160 de 1994	Por la cual se crea el Sistema Nacional de Reforma Agraria y Desarrollo Rural Campesino, se establece un subsidio para la adquisición de tierras, se reforma el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria y se dictan otras disposiciones.
Ley 388 de 1997	Modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991 sobre ordenamiento territorial.
Ley 461 de 1998	Aprueba la "Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular África"
Ley 1454 de 2011	Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones.
Ley 1469 de 2011	Por la cual se adoptan medidas para promover la oferta de suelo urbanizable y se adoptan otras disposiciones para promover el acceso a la vivienda.

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2016).

7 METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se desarrolla en seis etapas. En la primera, se delimita la zona de estudio, en la segunda, se definen aspectos teóricos relacionados a las características del suelo de estudio, en la tercera, se obtiene una imagen hiperespectral mediante un dron, en la cuarta, se realiza el procesamiento de la imagen, en la quinta, se analiza la imagen mediante el cálculo de índices de vegetación y salinidad, se realiza su respectiva correlación con los resultados fisicoquímicos de laboratorio y se identifica el porcentaje de afectación de la vegetación de la zona de estudio, finalmente, en la sexta etapa se plantean estrategias para dar un manejo adecuado a los suelos de la zona.

7.1 ETAPA 1. Delimitación de la zona de estudio

Inicialmente, se delimita el área de estudio, ubicada en la granja experimental Tunguavita, la cual abarca 11,18 ha de la vereda El Salitre, del municipio de Paipa, Boyacá, donde se pretende identificar la salinidad y/o sodicidad presente en el suelo.

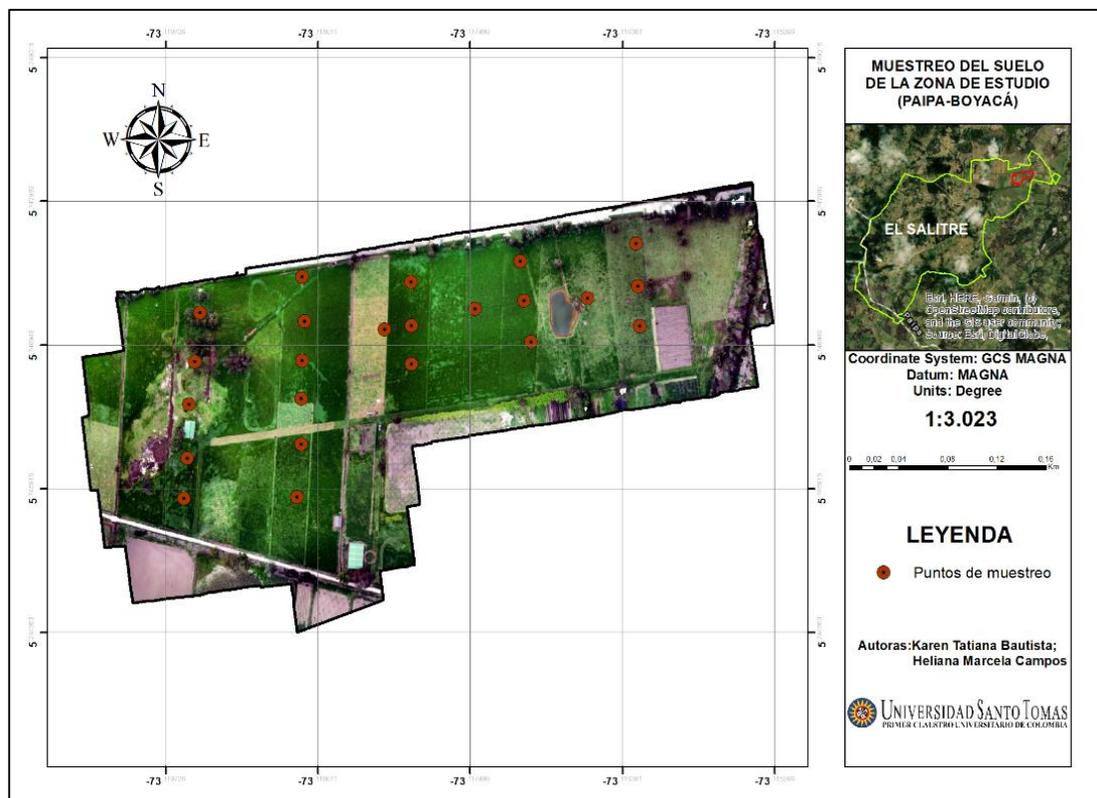
7.2 ETAPA 2. Definición de aspectos teóricos con relación a la salinización y sodificación del suelo a estudiar

7.2.1 *Definición a partir de resultados fisicoquímicos del suelo*

Para la identificación de la salinidad y/o sodicidad del suelo de estudio, se realizan 23 cajuelas a partir de cuadrantes de 50 por 100 metros. Seguido de esto, se toman 46 muestras de suelo, 23 a los 25 cm y 23 a los 50 cm de profundidad a partir de la superficie, teniendo en cuenta que la metodología del IGAC, indica que la zona fértil y de captación de nutrientes se encuentra entre los 0 a 50 cm. Las muestras se envían al Laboratorio Nacional de Suelos, para obtener los diferentes parámetros fisicoquímicos del suelo, que son útiles para realizar su respectivo análisis (Quinchanegua & Parra, 2018). Las coordenadas del muestreo del suelo se muestran a continuación en la figura 2:

Figura 2

Coordenadas del muestreo del suelo



Fuente: Autoría propia.

7.2.2 Definición a partir de información bibliográfica

Se hace una búsqueda bibliográfica con el fin de obtener información relacionada a la salinización y sodificación del suelo de la zona de estudio, para esto, inicialmente se seleccionan fuentes de información secundarias, tales como artículos de investigación, tesis, libros, además de documentos maestros que incluyen la zona de estudio como el Plan de Ordenamiento Territorial de Paipa y el Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta del Río Chicamocha, que permiten recopilar una serie de conocimientos esenciales sobre la temática abordada, siendo útil para identificar aquellas causas que dan paso a la formación de los suelos salinos y/o sódicos en la zona de estudio.

7.3 ETAPA 3. Adquisición de la imagen hiperespectral

Existen diferentes métodos útiles para la observación remota de la tierra, en este caso, se utiliza la técnica de teledetección hiperespectral, la cual consiste en la captura de una imagen hiperespectral, la cual se lleva a cabo por la empresa Geosystem Ingeniería S.A.S. mediante un dron y la cámara HeadWall con rango espectral entre 400 a 1000 nm, 270 bandas espectrales y 640 bandas espaciales. Esta técnica permite recopilar las características espectrales tanto de la vegetación como del suelo de la zona de estudio.

7.4 ETAPA 4. Procesamiento de la imagen hiperespectral

7.4.1 Corrección topográfica o ortorectificación con relación al geoide y al DEM de Headwall

La empresa Geosystem Ingeniería S.A.S también se encarga de realizar el procesamiento de la imagen hiperespectral. Inicialmente, por medio del software SpectraView, se definen los puntos de control con una estación topográfica en relación al geoide (Gonzaga, 2014), que es la circunferencia de la tierra, y al modelo digital de elevación DEM de Headwall, con el objetivo de ubicar geográficamente la imagen respecto a la localización de Colombia, realizando la corrección topográfica.

7.4.2 Corrección radiométrica con relación al tarp

Consecutivamente, se realiza en el software, la conversión de niveles digitales a radiancia, y de radiancia a reflectancia de la imagen hiperespectral, por medio de un tarp, que es una gama de colores de blanco al negro con una resolución radiométrica de 0 a 255 tonalidades, con el fin de que todos los cubos estén a la misma iluminación, obteniendo una imagen de 7,37 ha que se utiliza para el desarrollo de la investigación.

7.5 ETAPA 5. Análisis de la imagen hiperespectral

7.5.1 Obtención de las firmas espectrales del suelo y la vegetación

Se utiliza el software ENVI 5.3, para obtener 23 firmas espectrales del suelo, las cuales se adquieren en las coordenadas geográficas donde se localiza cada cajuela respectivamente, y 23 firmas espectrales de la vegetación, las cuales se adquieren en las coordenadas geográficas donde se localiza la vegetación circundante a cada cajuela (Anexo 2), para analizar su comportamiento de reflectancia y absorbancia en el espectro electromagnético de los 400 a 1000 nm, a fin de identificar cómo los factores fisicoquímicos del suelo y la vegetación analizada modifican sus comportamientos espectrales.

7.5.2 Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Se utiliza la herramienta “Raster Calculator” del software ArcGIS 10.3.1 para calcular cuatro índices espectrales. El primero es el *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada* o NDVI, que es uno de los algoritmos más comunes para analizar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación, mediante la operación algebraica de bandas espectrales (Badaracco, 2012), con el fin de identificar la zona con mayor o menor actividad fotosintética. El rango en el que se oscila este índice es de -1 a 1, cuyos valores son establecidos en relación a la intensidad de verdor que emite la vegetación, pues los valores mayores a 0,1 indican la presencia de vegetación y a medida que aumentan, indican el estado de la vegetación (Gonzaga, 2014). El NDVI se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 3 *Formula NDVI*

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

Fuente: (Gonzaga, 2014).

Donde:

- ✓ *NIR*: Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano
- ✓ *R*: Reflectancia de la banda roja

7.5.3 Cálculo del Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

Teniendo en cuenta que el NDVI es sensible al brillo del fondo del suelo, se calcula el SAVI, el cual discrimina ese brillo, a fin de que el índice sea capaz de adaptarse a zonas que no presentan densas coberturas vegetales. A diferencia del NDVI, el SAVI *Índice de vegetación Ajustada al Suelo* incorpora una constante denominada *línea del suelo* (L), que tiene como finalidad ajustar el índice con relación a la densidad de la vegetación, con valores de 0 a infinito. Se puede utilizar un valor de 1 para bajas densidades de vegetación, 0,5 para moderadas densidades y 0,25 para altas densidades. El rango en que oscila este índice es de -1 a 1 (Qi et al., 1994). El SAVI se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 4 Formula SAVI

$$SAVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R + L)} * (1 + L)$$

Fuente: (Gonzaga, 2014).

Donde:

- ✓ IR: Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano
- ✓ R: Reflectancia de la banda roja
- ✓ L: Línea del suelo

7.5.4 Cálculo del Índice de Salinidad (INDSAL)

Existen diferentes índices que permiten determinar la salinidad en el suelo. En este caso, se calcula el INDSAL *Índice de Salinidad*, utilizado comúnmente en suelos desnudos o suelos no cultivados (Badaracco, 2012). El rango en el que oscila este índice es de -1 a 1, cuyos valores son establecidos en relación a la concentración de sal en el suelo, pues los valores cercanos a 1 indican baja presencia de sales, mientras que los valores cercanos a -1 indican una elevada presencia de las mismas (Soca et al., 2016). El INDSAL se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 5 Formula INDSAL

$$INDSAL = \frac{(B - R)}{(B + R)}$$

Fuente: (Elhag, 2016).

Donde:

- ✓ *R*: Reflectancia de la banda roja
- ✓ *B*: Reflectancia de la banda azul

7.5.5 Cálculo del Índice de Salinidad de Diferenciada Normalizada (NDSI)

Adicional al INDSAL, se calcula el NDSI *Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada*, con el fin de estimar y mapear la distribución espacial de la salinidad del suelo, a partir de las bandas del rojo en la región visible y el infrarrojo cercano (Asfaw et al., 2018). Este índice, es el mismo NDVI, pero en valores absolutos, de manera que el rango en el que oscila este índice es de -1 a 1 (Khan et al., 2005), pues los valores cercanos a 1 indican presencia de sales, mientras que los valores cercanos a -1 indican una baja presencia de las mismas. El NDSI se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 6 Formula NDSI

$$NDSI = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$$

Fuente: (Abdullah et al., 2019).

Donde:

- ✓ *NIR*: Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano
- ✓ *R*: Reflectancia de la banda roja

7.5.6 Correlación de los índices de vegetación (NDVI y SAVI)

A partir del cálculo del NDVI y el SAVI, se realiza una correlación lineal de Pearson, utilizando los valores de los índices donde se localiza la vegetación circundante a las 23 cajuelas de estudio, a fin de estimar la relación que existe entre ellos y validar su precisión.

7.5.7 Correlación de los índices de salinidad (INDSAL y NDSI)

A partir del cálculo del INDSAL y el NDSI, se realiza una correlación lineal de Pearson, utilizando los valores de los índices donde se localizan las 23 cajuelas de estudio, a fin de estimar la relación que existe entre ellos y validar su precisión.

7.5.8 Correlación de índices de salinidad con variables químicas

Una vez calculados los índices mencionados anteriormente, se procede a realizar la respectiva correlación entre los resultados obtenidos de los índices de salinidad de la imagen hiperespectral y los resultados de laboratorio correspondientes a las variables químicas de CE, RAS, PSI y pH, obtenidos del muestreo del suelo realizado previamente en la zona de estudio.

7.5.9 Identificación del porcentaje de afectación en la vegetación de la zona de estudio

Con el cálculo de los índices de vegetación y salinidad, es posible identificar el porcentaje de afectación en la vegetación, ya sea por presentar una condición enferma o escasa, o por la presencia de sales en el suelo. Para esto, se selecciona un índice de vegetación y un índice de salinidad, con relación a los resultados obtenidos, con el fin de realizar una superposición ponderada de capas en ArcGIS, utilizando la herramienta “Weighted Overlay”, que arroja un nuevo ráster, con el cual es posible identificar y calcular el porcentaje de vegetación con y sin afectación.

7.6 ETAPA 6. Planteamiento de estrategias para dar un manejo adecuado a los suelos de la zona de estudio

Finalmente, la interpretación y análisis de los datos obtenidos de la imagen hiperespectral, permiten plantear estrategias para prevenir, mitigar y/o controlar las afectaciones generadas en la vegetación, debido a la presencia de sales y/o sodio en la zona de estudio.

8 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Características del suelo de la zona de estudio

8.1.1 Unidades Cartográficas de los Suelos (UCS)

Las unidades cartográficas identificadas para la zona de estudio se reconocieron mediante el uso del shape *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá*, proporcionado por el geoportal del IGAC (I. G. A. C. IGAC, 2004). De acuerdo a esto, en la siguiente tabla se encuentran las UCS identificadas:

Tabla 3

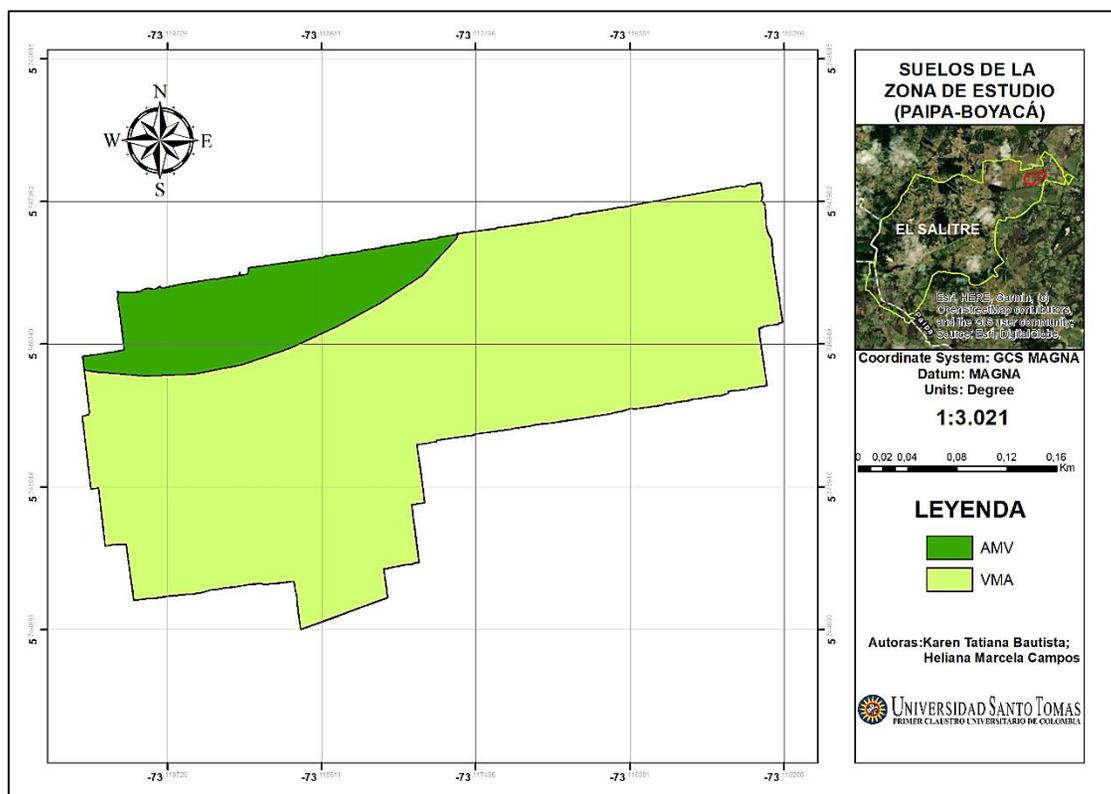
Unidades Cartográficas de los Suelos (UCS) de la zona de estudio

Unidades cartográficas de los suelos (UCS)	UCS de la zona de estudio
VMA	Asociación: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Fluventic Haplustepts</i> • <i>Udertic – Haplustepts</i> • <i>Typic- Dystrustepts</i>
AMV	Asociación: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Vertic Haplustafts</i> • <i>Andic Dystrustepts</i>

Fuente: Autoría propia con base en (I. G. A. C. IGAC, 2004).

Figura 3

Suelos de la zona de estudio



Fuente: Autoría propia.

8.1.1.1 VMA Asociación Fluventic Haplustepts - Udertic - Haplustepts – Typic-Dystrustepts

La unidad cartográfica VMA abarca 9,59 Ha, que equivalen al 85.78% de la zona de estudio. Esta unidad se conforma por suelos de paisaje valle aluvial, que poseen un relieve plano y se caracterizan por presentar pendientes de 0 a 1%, de manera que tienden a encharcarse y a tener un mal drenaje, además, son moderadamente profundos y muy superficiales, presentando texturas finas. Por otra parte, tienen reacciones extremadamente ácidas y moderadamente alcalinas, junto a una saturación de aluminio mayor al 60%, que provocan una baja fertilidad (Corpoboyacá, 2019).

8.1.1.2 AMV Asociación Vertic Haplustalfs – Andic Dystrustepts

La unidad cartográfica AMV abarca 1,58 Ha, que equivalen al 14.22% de la zona de estudio. Esta unidad se conforma por suelos de paisaje de altiplanicie, que poseen un relieve moderado a fuertemente quebrado, se caracterizan por ser moderadamente escarpados y empinados, con pendientes desde 12% hasta 75%, ocasionando escurrimiento ligero a moderado. Además, son suelos bien drenados, profundos y muy profundos, con texturas franco finas. Por otra parte, tienen reacciones de fuerte a muy fuertemente ácidas, junto a una saturación de aluminio mayor al 70%, que provocan una baja fertilidad (Corpoboyacá, 2019).

8.1.2 Geomorfología de la zona de estudio

La geomorfología es un factor importante para conocer las características de los suelos, razón por la cual, se identifica la geomorfología para el presente estudio mediante el sistema taxonómico de las geoformas establecido por Zinck (2012), ya que este, se compone de categorías jerárquicas que buscan realizar un estudio detallado de la forma del suelo, tales como: orden, suborden, grupo, subgrupo, familia y subfamilia, y haciendo uso del shape de *Mapa de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá*, proporcionado por el geoportal del IGAC (I. G. A. C. IGAC, 2004). La geomorfología identificada para las unidades cartográficas de la zona de estudio se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 4

Geomorfología de la asociación VMA

Geomorfología	Geomorfología del área de estudio	Descripción
Geoestructura	Geosinclinal	Es una estructura de amplias depresiones, generadas a través del tiempo. Comúnmente son alargadas y contienen sedimentos clásticos estratificados, cenizas volcánicas y capas de material orgánico.
Ambiente morfogénético	Deposicional	El ambiente morfogénético identificado en esta unidad cartográfica es Deposicional, que se forma por la deposición de materiales solubles y detríticos que son arrastrados por agua, viento, hielo o movimientos de masa.
Paisaje geomorfológico	Valle Aluvial	El Valle Aluvial es una zona plana, que se puede encontrar en medio de un piedemonte, lomerío, montaña o altiplanicie, la cual está drenada por un río cercano. Para su identificación, este paisaje debe tener un relieve de terrazas. En este caso, la zona de estudio está ubicada en

el sur de Paipa, donde se destaca un paisaje de Valle generado por el Río Chicamocha.		
Geomorfología	Geomorfología del área de estudio	Descripción
Relieve / modelado	Terrazas recientes aluviales	Las Terrazas Recientes, son superficies que tienen una topografía a nivel, divididas con una pequeña pendiente fuertemente inclinada del plano de inundación. Para el caso de la zona de estudio, estas terrazas son formadas por el sistema fluvial de la cuenca del Río Chicamocha, las cuales, se encuentran ubicadas a lo largo de la quebrada Honda Grande.
Litología/facies	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos mixtos.	La litología de la asociación VMA está constituida por aluviones heterogéneos medianos a finos, que son transportados por corrientes de agua, como su nombre lo indica.
Forma de terreno	(1) Plano de terraza	(1) El Plano de terraza es una superficie ubicada en terrazas fluvio-glaciares, presentando una pendiente con ligera a fuerte inclinación y un perfil topográfico plano o con ligeras ondulaciones.
	(2) Bajo	(2) El Bajo es una superficie ubicada en el plano de terraza, que presenta una pendiente con ligera a moderada inclinación y un perfil topográfico cóncavo. Se compone de materiales detríticos y presenta un estado anegadizo, debido a cuerpos de agua en ciertas temporadas del año.
	(3) Talud	(3) El Talud es una superficie ubicada en los bordes del plano de terraza, que presenta una pendiente con moderada inclinación a escarpada y un perfil topográfico rectilíneo. Limita con las geoformas y drenajes aledaños.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Zinck (2012); Plan de Ordenamiento Territorial de Paipa (2009); Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC (2018) y Corpoboyacá et al., (2006).

Tabla 5

Geomorfología de la asociación AMV

Geomorfología	Geomorfología del área de estudio	Características
Geoestructura	(1) Cordillera	(1) Las cordilleras son un sistema montañoso, el cual se formó a partir de plegamientos generados por la orogénesis, para el caso de este estudio, la geoestructura, es debida a que el área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Cordillera Oriental de Colombia.
	(2) Geosinclinal	(2) Es una estructura de amplias depresiones, generadas a través del tiempo. Comúnmente son alargadas y contienen

sedimentos clásticos estratificados, cenizas volcánicas y capas de material orgánico.

Geomorfología	Geomorfología del área de estudio	Características
Ambiente morfogenético	(1) Estructural-Erosional	(1) Estructural-Erosional: El ambiente morfogenético estructural, se genera por la geodinámica de la tectónica y el volcanismo, y el erosional se genera por los procesos de eliminación y remoción de materiales, que son llevados a través de corrientes de agua y viento o movimientos en masas o hielo.
	(2) Depositional	(2) Depositional: Se forma por la deposición de materiales solubles y detríticos, que son arrastrados por agua, viento, hielo o movimientos en masa.
Paisaje geomorfológico	(1) Altiplanicie estructural	(1) La Altiplanicie, es una superficie elevada que está limitada por un escarpe y segmentada por cortes profundos de gargantas y valles, tiene una topografía ligeramente ondulada, lo que propicia la erosión. Esta clase de paisaje se origina por procesos tectónicos.
	(2) Piedemonte	(2) El Piedemonte, es una superficie ubicada abajo de terrenos más elevados como altiplanicies y montañas. En el municipio de Paipa, este paisaje es generado por procesos de sedimentación coluviales y aluviales.
Relieve / modelado	(1) Lomas y Colinas	(1) Las Lomas de Paipa suelen ser ovaladas en su parte inferior, con agrietamientos ocasionados por la escorrentía, cuyo proceso generó Colinas de cimas estrechas, que se encuentran entalladas por una corriente hídrica detrítica a subdetrítica. Este relieve mixto, presenta pendientes ligeramente onduladas a escarpadas.
	(2) Glacis coluvio-aluvial	(2) Los Glacis de Paipa son generados por escurrimiento difuso y reptación, los cuales se ubican en los bordes de las quebradas de Honda Grande, Canocas, Del Palacio y Cerón. Su pendiente es de moderadamente inclinada a ligeramente plana.
Litología/facies	Depósitos superficiales piroclásticos de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas.	La litología de la asociación AMV está constituida por lomas y colinas, compuestas por materiales de areniscas, lutitas y arcillolitas del periodo Terciario y Cretácico, siendo rocas sedimentarias o volcánicas.
		Los Glacis también constituyen su litología, los cuales se conforman de rocas sedimentarias arcillosas <i>detritos de texturas finas</i> , que están repartidas en terrenos moderadamente inclinados a planos.
Forma de terreno	(1) Cima y ladera	(1) Forma del terreno que corresponde a una secuencia de Cimas y Laderas, que a nivel cartográfico no se diferencian. La Cima presenta un perfil topográfico convexo y se ubica en la parte más alta de la montaña, y la Ladera, presenta un perfil topográfico rectilíneo cóncavo.
	(2) Cuerpo	(2) El Cuerpo es una forma de terreno originada por procesos de depósitos de sedimentos a lo largo de ríos, que son

transportados por corrientes fluviales y gravedad. Se caracteriza por ser un terreno inclinado con perfil topográfico rectilíneo-cóncavo.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Zinck (2012); Plan de Ordenamiento Territorial de Paipa (2009); Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC (2018).

8.2 Tipos de suelos de la zona de estudio

Actualmente los suelos se clasifican por distintas metodologías taxonómicas, entre las que está el USDA *Sistema Americano de Taxonomía de Suelos*, que es una técnica que busca asignar un nombre al suelo en relación a sus características, por medio de categorías, las cuales organizan el nombre del suelo respecto al nivel de detalle de las propiedades que posee. De acuerdo a esto, la primera categoría es orden, la segunda suborden, la tercera gran grupo, la cuarta subgrupo, la quinta familia y la sexta serie. Teniendo en cuenta estas categorías, se analizan los tipos de suelo presentes en la zona de estudio.

8.2.1 Orden Inceptisol

Los Inceptisoles son suelos jóvenes minerales, que no tienen horizontes definidos y que suelen estar conformados por epipedones, que son antrópicos, ócricos, hísticos, úmbricos, plaggen y móllicos. Los horizontes diagnósticos por los que suelen estar conformados son: fragipan, cámbico, cálcico o gypsico, sin embargo, principalmente están formados por un epipedón ócrico y un horizonte cámbico (Service-USDA, 1999). En relación a las condiciones de formación, estos se desarrollan en lugares con depósitos recientes de valles o glaciares (Ibáñez et al., 2011).

8.2.1.1 Suborden de los suelos inceptisoles

Ustepst: El suborden Ustepst, son suelos que se forman a partir de los depósitos del holoceno, los cuales suelen tener un epipedón ócrico y un horizonte cámbico. La vegetación que crece en ellos es la hierba y su uso se puede destinar a cultivos de pastos. Además, su temperatura es hipertérmica y en condiciones ácuicas tienen un epipedón hístico o un horizonte sulfúrico (Service-USDA, 1999).

8.2.1.2 Grandes grupos de los suelos inceptisoles

Haplustepts: El gran grupo Haplustepts, son suelos parcialmente drenados, que presentan un contacto lítico a los 50 cm de profundidad, un horizonte cálcico a los 100 cm de profundidad y carbonatos libres dentro de los 200 cm de profundidad, con una textura de arena fina o gruesa en algunas partes de dicho horizonte. Por lo general, la vegetación presente en este suelo mineral son pastos, aunque algunos soportan árboles (Service-USDA, 1999).

Dystrustepts: El gran grupo Dystrustepts, son suelos formados en el Holoceno y están conformados por rocas metamórficas o sedimentarias, siendo los ácidos su material formador. El epipedón que lo compone es ócrico y se encuentra ubicado sobre un horizonte cámbico. Sumado a esto, otra de las características que define a este suelo mineral, es que presenta un contacto lítico a los 50 cm de profundidad a partir de la superficie. Su textura es moderadamente fina, teniendo un drenaje imperfecto en la zona de las terrazas (Service-USDA, 2014).

8.2.1.3 Subgrupos de los suelos inceptisoles

Fluventic Haplustepts: El suelo Fluventic Haplustepts, pertenece al orden de los inceptisoles, lo cual, se evidencia por su prefijo *ept*. De acuerdo al suborden, *ust* es el prefijo que lo define, que hace referencia al clima seco al que pertenece, el prefijo del gran grupo es *halp*, que significa que el suelo presenta un mínimo desarrollo en sus horizontes (G. S. Fadda, 2010).

La característica que define a este suelo mineral es la presencia de un horizonte gypico durante los 100 cm de profundidad a partir de la superficie, el cual se identifica por ser un horizonte aluvial cementando o débilmente cementado, que tiene acumulaciones de yeso. Sin embargo, no se encuentra cementado por este, si no por otros agentes formadores como el sulfato de calcio, pues su espesor puede ser de 15 cm o más, de los cuales, al menos el 5% debe ser de yeso para considerarse un horizonte gypico (Service-USDA, 2014).

Udertic Haplustepts: El suelo Udertic Haplustepts, pertenece al orden de los inceptisoles, lo cual, se evidencia por su prefijo *ept*. De acuerdo al suborden, *ust* es el prefijo que lo define, el cual hace referencia al clima seco al que pertenece, y el prefijo del gran grupo es *halp*, que significa que el suelo presenta un mínimo desarrollo en sus horizontes (G. S. Fadda, 2010).

Las características que definen a este suelo son la presencia de un contacto lítico, dénsico y paralítico durante los 100 cm de profundidad a partir de la superficie, además de grietas durante los 125 cm. Por otra parte, para el proceso de retención de humedad, cuando se encuentra el suelo sin arar y sin riego, se puede realizar dicha retención mediante tres regímenes de temperatura. El primer régimen es el frígido, el cual presenta una sección de humedad, que es totalmente seca en cuatro décimos de los días del año, esto, cuando la temperatura es mayor a 5°C después de los 50 cm de profundidad a partir de la superficie. El segundo, es méxico, en el que la sección control de humedad es parcial o totalmente seca en seis décimos de los días del año y con las mismas condiciones de temperatura y profundidad del frígido. Y, por último, el tercer régimen de temperatura es el hipertérmico, en el que se pueden presentar dos condiciones, que la sección control de humedad esté parcial o totalmente húmeda durante menos de 90 días del año a la misma profundidad de los anteriores regímenes, pero con una temperatura mayor a 8°C, o que la sección control esté parcial o totalmente seca con las mismas condiciones del régimen méxico (Service-USDA, 2014).

Typic Dystrustepts: El suelo Typic Dystrustepts, pertenece al orden de los inceptisoles, lo cual, se evidencia por su prefijo *ept*. De acuerdo con el suborden, *ust* es el prefijo que lo define, que hace referencia al clima seco al que pertenece, el prefijo del gran grupo es *Dystr* que significa distrófico, haciendo referencia a suelos que presentan una baja saturación de bases (G. S. Fadda, 2010).

Andic Dystrustepts: El suelo Andic Dystrustepts pertenece al orden de los inceptisoles, lo cual se evidencia por su prefijo *ept*. De acuerdo al suborden, *ust* es el prefijo que lo define, que hace referencia al clima seco al que pertenece, el prefijo del gran grupo es *Dystr*, que significa distrófico, que hace referencia a suelos que presentan una baja saturación de bases (G. S. Fadda, 2010).

Las características que definen a este suelo son la presencia de uno o más horizontes con un ancho de 18 cm, dentro de los 75 cm de profundidad a partir de la superficie, en el cual, un 35% se forma por partículas de 2 mm, como tefras o piedras pómez, otro 35%, se forma por partículas de 0,02 a 2 mm, de las cuales, un 5% son vidrio volcánico, y el 30% restante, se forma por oxalato de amonio y vidrio volcánico (Service-USDA, 2014). De acuerdo con esto, la

textura de estos suelos es fina franco arenosa, pues se forman a partir de rocas clásticas arenosas con contenidos de cenizas volcánicas.

8.2.2 Orden Alfisol

Los alfisoles en Colombia son suelos que presentan un horizonte argílico, es decir, con altos contenidos de arcilla, y un epipedón ocrico. Las diferencias granulométricas entre sus horizontes facilitan la generación de procesos de erosión, principalmente en zonas con poca vegetación, por ejemplo, los alfisoles que conforman a la región Andina, son altamente susceptibles a estos procesos de degradación, ya que presentan altos contenidos de arcilla en su horizonte B, afectado los procesos entre sus horizontes ((IGAC), 2016)

8.2.2.1 Suborden del Alfisol.

Ustalfs: El suborden ustalfs, hace referencia a suelos que pertenecen a las regiones subhúmedas a semiáridas, los cuales, durante un periodo de tiempo, tienen una transferencia de humedad hasta las capas más profundas del suelo, además, presentan contenidos de carbonatos en la superficie y tienen un horizonte cálcico, que está ubicado debajo de un horizonte argílico o kándico. La vegetación que se desarrolla en estos suelos son los pastizales y la temperatura que manejan es térmica e isotérmica (Service-USDA, 1999).

8.2.2.2 Gran grupo del Alfisol

Haplustalfs: El gran grupo Haplustalfs, son suelos que se formaron en la era del Pleistoceno Tardío, en lugares con depósitos erosivos. Presentan un horizonte argílico, es decir, con altos contenidos de arcilla, su color es de rojizo a marrón amarillento y los contenidos de arcilla son altos en la parte superficial y disminuyen progresivamente a mayor profundidad (Service-USDA, 1999).

8.2.2.3 Subgrupo del Alfisol

Vertic Haplustalfs: El suelo Vertic Haplustalfs, pertenece al orden de los alfisoles, lo cual, es evidenciado en su prefijo *ept*. De acuerdo con el suborden, *ust* es el prefijo que lo define, que

hace referencia al clima seco al que pertenece, el prefijo del gran grupo es *halp*, que significa haploide, haciendo referencia al mínimo desarrollo que presentan sus horizontes (Fadda, 2010). Las características que definen a este suelo mineral son la presencia de empobrecimiento redox en los 75 cm a partir de la superficie y condiciones acuáticas en determinadas temporadas del año. Sumado a estas, las clases texturales que posee son arena gruesa, fina, franco fina y franco gruesa, las cuales se encuentran en un horizonte argílico que ocupa desde los 50 cm hasta los 100 cm de profundidad del suelo (Service-USDA, 2014).

8.3 Conflicto de uso de la zona de estudio

El conflicto de uso de suelo de la zona de estudio se reconoce mediante el shape del *Mapa de Conflictos de uso del territorio colombiano a escala 1:100.000* (I. G. A. C. IGAC, 2004), en el cual se identifican los siguientes tipos de conflictos (Anexo 3):

8.3.1 Sobreutilización severa (O3)

El conflicto de uso O3 abarca 1,59 Ha, que equivalen al 14.22% del suelo de la zona de estudio. En este predominan aquellas tierras cuyo uso actual es intenso, pues supera en más de tres niveles su vocación de uso en relación a las características agrológicas, presentando degradación severa generada por procesos de erosión y salinización, además de la disminución en la productividad del suelo (Celis, 2019).

8.3.2 Subutilización moderada (U2)

El conflicto de uso U2 abarca 9,59 Ha, que equivalen al 85.78% del suelo de la zona de estudio. En este predominan aquellas tierras cuya intensidad de uso es moderada, es decir, que es menor en dos niveles a la vocación de uso asignada (Celis, 2019), presentando un uso inadecuado, razón por la cual, no se aprovecha su potencial productivo (Guerra, 2014).

8.4 Capacidad de uso de la zona de estudio

La clasificación de las unidades cartográficas de los suelos por capacidad de uso es una metodología elaborada por el IGAC *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, que permite agrupar los suelos en clase, subclase y grupo de manejo en relación a las características

físicas, químicas, morfológicas y mineralógicas de los suelos. Para ello, se hace uso del shape de *Mapas de Capacidad de Uso de las Tierras del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá*, proporcionado por el geoportal del IGAC (I. G. A. C. IGAC, 2004).

Las clases agrológicas identificadas para la zona de estudio son IIIsc1, que abarca un área de 9,59 ha que equivalen al 85.78% del área total de la zona de estudio y VIIes, que abarca un área de 1,58 Ha que equivalen al 14.22% del área total de la zona de estudio (Anexo 4).

8.4.1 Clase agrológica IIIsc1

Clase (III): Son suelos con limitaciones moderadas para su uso, ya sea por humedad, erosión, pedregosidad superficial y topografía levemente plana, que es susceptible al encharcamiento, de manera que no permiten la implementación de cualquier tipo de cultivo en ciertas épocas del año y requieren de adecuadas técnicas de cosecha (I. G. A. C. IGAC, 2004).

Subclase (sc): Los suelos presentan limitaciones para su uso por ciertas características físicas o químicas del suelo (s) y por clima (c). En relación al suelo, existen limitaciones físicas como lo es la moderada profundidad del suelo, presencia de trozos de roca dentro o en la superficie del suelo y la textura gruesa o fina de los horizontes que lo componen. A su vez, existen limitaciones químicas como la presencia de selenio, niveles tóxicos de aluminio intercambiable u otros elementos químicos que impiden que las plantas crezcan con normalidad, como también las elevadas concentraciones de sales o sodio y la baja fertilidad. Cada una de estas limitaciones intervienen en el desarrollo normal de las raíces del suelo. En relación al clima, existen limitaciones por temperaturas bajas, heladas ocasionales, brillo solar bajo, fuertes vientos y deficiencia de agua, que hacen indispensable el uso de técnicas especializadas para el manejo del suelo (I. G. A. C. IGAC, 2004) .

Grupo de manejo (1): La unidad cartográfica de suelo IIIsc, corresponde al grupo de manejo 1, teniendo en cuenta que, presenta un potencial productivo similar a las otras unidades cartográficas presentes en la zona de estudio, debido a que se pueden implementar cultivos o pastos similares y se pueden llevar a cabo las mismas prácticas de manejo y conservación (Fadda, 2017).

Uso Actual: El suelo se usa principalmente para ganadería extensiva y se implementan cultivos de subsistencia y comerciales.

Uso recomendado: Estos suelos pueden utilizarse para ganadería intensiva y semi-intensiva, con pastos mejorados de elevado rendimiento, y para agricultura, principalmente con cultivos como papa, maíz y hortalizas con la aplicación de técnicas para la conservación del suelo (I. G. A. C. IGAC, 2004), también son apropiados para la permanencia de plantaciones forestales, praderas y cultivos permanentes. Es recomendable utilizar sistemas de drenaje para controlar el encharcamiento, utilizar riego por aspersion en los cultivos, prevenir la acidez del suelo y aplicar fertilizantes (Corpoboyacá, 2019).

8.4.2 Clase agrológica Villes 1

Clase (VII): Son suelos que por lo general se encuentran en montañas o en altiplanicies con clima frío (Corpoboyacá, 2019). Presentan limitaciones fuertes a severas, ya sea por baja fertilidad, elevadas pendientes (más del 12%), pedregosidad, erosión, pH ácido entre otras, que impiden que los suelos sean cultivables, razón por la cual, se consideran como suelos de protección, a fin de mantener su cubierta vegetal densa (I. G. A. C. IGAC, 2004).

Subclase (es): Los suelos presentan limitaciones para su uso por erosión (e) y por ciertas características físicas o químicas del suelo (s). En relación a la erosión, es un proceso que por lo general se da en zonas secas, donde la vegetación no es muy densa, de manera que la acción que ejerce el agua o las gotas de lluvia sobre el suelo ocasionan la disgregación de las partículas del suelo, arrastrándolas hacia zonas bajas. Este problema puede afectar las funciones del suelo, como el desempeño del ciclo del agua y nitrógeno, la capacidad para filtrar contaminantes o la aptitud que tiene para proveer hábitat y mantener la biodiversidad. En relación al suelo, existen limitaciones físicas y químicas, las cuales fueron mencionadas en la clase agrológica anterior, e intervienen de igual manera en el desarrollo normal de las raíces del suelo (I. G. A. C. IGAC, 2004).

Grupo de manejo (1): La unidad cartográfica de suelo Villes, corresponde al grupo de manejo 1, teniendo en cuenta que, presenta un potencial productivo similar a las otras unidades cartográficas presentes en la zona de estudio, debido a que se pueden implementar cultivos o

pastos similares y se pueden llevar a cabo las mismas prácticas de manejo y conservación (Fadda, 2017).

Uso actual: El suelo se usa principalmente para ganadería extensiva y agricultura de subsistencia.

Uso recomendado: Villes1 son suelos aptos para presentar cobertura arbórea de manera permanente, conformando áreas que deben protegerse para preservar el suelo, agua, fauna y flora (I. G. A. C. IGAC, 2004). Se puede llevar a cabo la ganadería extensiva con baja carga haciendo rotación de potreros, y la agricultura, con plantaciones comerciales, frutales de hoja caduca entre otros, implementando el riego por aspersión y fertilizantes. Además, es recomendable utilizar sistemas de drenaje para conducir las aguas empozadas y evitar el encharcamiento (Corpoboyacá, 2019).

8.5 Clima de la zona de estudio

La zona de estudio presenta un clima frío y muy seco, que se caracteriza porque la evaporación supera la precipitación (H. Castro et al., 2009), perteneciendo al piso térmico frío que va de los 1800 a 2800 m.s.n.m. La temperatura oscila de los 12 a 18°C, además tiene una precipitación de 501 a 1000 *mm/año*, donde los meses secos son diciembre, enero, febrero, julio y agosto y los meses lluviosos son, abril, mayo, junio noviembre y finales de septiembre y marzo (IDEAM, 2014) (Anexo 5).

8.6 Hidrología de la zona de estudio

La zona de estudio pertenece a la subcuenca del sur del municipio, la cual está conformada por la quebrada Honda Granda o Río Salitre. Se caracteriza por ser un área seca, es decir, que no presenta caudales abundantes, además se encarga de transportar sales por medio de su afluente, las cuales son suministradas por los pozos termales ubicados en la parte media y baja de la subcuenca. El drenaje que caracteriza a la subcuenca es detrítico y subdetrítico y en la zona del Valle de Chicamocha es un poco meándrico (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, 2009).

8.7 Cobertura vegetal de la zona de estudio

Arbustales Densos: Este tipo de vegetación se presenta en todo el municipio, la cual está conformada por especies de arbustos tales como: Uva Camarona *Macleania rupestris*, Laurel de Cera *Morella pubescens*, Chilco *Escallonia myrtilloides*, Tuno Esmeraldo *Miconia squamulosa*, Hayuelo *Dodonaea viscosa*, Gaque *Clusia multiflora*, Jarilla *Larrea Cuneifolia*, encenillo *Weinmannia tomentosa* y Hesperomeles *Hesperomeles obtusifolia*, junto con pequeñas zonas de pastos naturales en el sur de municipio (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, 2009).

Pastizales limpios Manejados: Este tipo de vegetación se presenta en la zona sur del municipio, específicamente en el Valle Aluvial del Río Chicamocha y en algunos de sus afluentes como la Quebrada Honda, donde se encuentra ubicada el área de estudio. Son pastos naturalizados llamados Raigrás *Lolium perenne* y Kikuyo *Pennisetum clandestinum*, que son utilizados para el desarrollo de actividades pecuarias de ganadería semi-intensiva a intensiva, las cuales se realizan adecuadamente, ya que hacen fertilización y riego del terreno y rotación de potreros (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, 2009).

Arbustales densos y bosque denso alto: Este tipo de vegetación se presenta en la zona sur del municipio y como su nombre lo indica, son arbustales con presencia de áreas pequeñas de bosques plantados (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, 2009).

8.8 Firmas espectrales

La reflectancia de las superficies de la tierra depende del cuerpo que las emite, pues el nivel de reflectancia que emite cada cuerpo está sujeto a sus características fisicoquímicas. Un cuerpo que absorbe toda la luz incidente que lo penetra es capaz de emitir radiación en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, generando una armonía entre la luz incidente y la que refleja, razón por la cual, a estos cuerpos se les llama *cuerpos negros*, mientras que, son llamados *cuerpos grises*, a aquellos que no absorben toda la luz incidente, pues una parte de esta es transmitida o reflejada. Sin embargo, en las dos formas de absorción de energía que presentan estos cuerpos, se cumple la ley de la conservación de energía. De acuerdo a esto, la naturaleza está conformada por cuerpos grises, puesto que no absorben y

reflejan toda su energía incidente, si no que alguna es transmitida, debido a las características fisicoquímicas que posee la naturaleza (Castro, 1999).

En el presente estudio se analiza la reflectancia del suelo y de la cobertura vegetal, por medio de una imagen hiperespectral de 11,18 ha. Con esta, se generan las gráficas de las firmas espectrales del suelo y de la vegetación para cada cajuela mediante el software ENVI 5.3, a fin de conocer los factores fisicoquímicos que modifican el comportamiento espectral de estas superficies.

8.8.1 Firmas espectrales del suelo

El espectro electromagnético en el que se estudia el suelo afectado por sales y/o sodio, oscila entre 400 a 1000 nm, abarcando la región visible y el infrarrojo cercano, en el cual es posible apreciar el comportamiento de las curvas espectrales del suelo de las 23 cajuelas. De acuerdo a esto, de la energía que incide en el suelo desnudo, solo se presentan variaciones en su reflectancia y absorbancia, pues la transmitancia es nula, siendo una propiedad diferenciadora de estas superficies (Alonso, 2006). Sumado a ello, la forma de la curva espectral de los suelos varía en relación a las interacciones de sus componentes fisicoquímicos, principalmente la humedad, la textura, el color, la estructura del suelo, la rugosidad, la litología y el contenido de materia orgánica (González, 2019).

En relación al contenido de humedad superficial en los suelos, este influye en los valores de reflectancia, de manera que, con un contenido de humedad bajo, los valores de reflectancia son altos, y a su vez, con un contenido de humedad alto, los valores de reflectancia son bajos, debido a la presencia de agua higroscópica en las sales minerales (Wang et al., 2012). En los suelos con bajos contenidos de humedad, la luz penetrada en sus granos superficiales se dispersa en el aire, mientras que, en suelos con superficies húmedas, la luz se dispersa en el agua superficial, limitando la reflectancia de los suelos (D. Rodríguez et al., 2015).

La textura, es otro factor que afecta la reflectancia del suelo, pues cuando posee una textura fina, es decir, un suelo conformado por arcillas, con granos compactados unos con otros (Jiménez, 2017), la radiación incidente no se dispersa dentro de él, aumentando su reflectancia. En relación a esto, el contenido de humedad depende a su vez del tipo de textura,

pues en suelos secos, es decir, con bajo contenido de agua, la reflectancia es mayor (Hernández & Montaner, 2009). Sin embargo, en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético, el contenido de humedad no modifica en gran medida la reflectancia (Jiménez, 2017). Cabe mencionar que, los suelos secos y húmedos siempre muestran una relación directamente proporcional en las regiones del rojo e infrarrojo, es decir, a medida que aumenta o disminuye la reflectancia en el rojo, también aumenta o disminuye en el infrarrojo.

El color que poseen los suelos, el cual depende de su composición química, también afecta directamente la reflectancia, pues suelos de colores claros presentan mayores niveles de reflectancia en toda la región visible, mientras que, suelos arcillosos, de colores oscuros, presentan mayor reflectancia solo en el rojo, debido a la presencia del óxido de hierro. No obstante, el tamaño de la partícula del suelo influye más que el color, pues, aunque los suelos arcillosos presentan coloraciones más oscuras que los arenosos, el tamaño de sus granos forma agregados, además de ser suelos compactos, permitiendo así el aumento de su reflectividad (Reuter, 2009).

La estructura del suelo es otra característica que modifica el comportamiento de la curva de reflectancia, pues los suelos con superficies uniformes, finas y compactadas aumentan la reflectividad (Reuter, 2009), mientras que suelos recién arados o fangosos, la disminuyen (Cetina, 2017). Además, la rugosidad de los suelos también cambia su nivel de reflectancia, pues entre mayor sea su rugosidad, menor es su reflectancia y viceversa (Reuter, 2009).

Otro factor importante, que influye en el aumento o disminución de la reflectancia y absorbancia de los suelos, es su composición mineralógica, pues los suelos minerales, que son aquellos que tienen menos del 20% de materia orgánica y están conformados por cromóforos como los hidróxidos, óxido de hierro y carbonatos, presentan absorbancia en la región visible y en el infrarrojo del espectro electromagnético (D. Rodríguez et al., 2015). Esta absorción en la región visible (400 - 780 nm), es provocada específicamente por las interacciones de los minerales de hierro, y en la región del infrarrojo (780 - 2500 nm), por las interacciones de los hidróxidos, carbonatos, y sulfatos de magnesio. Además, los minerales arcillosos pueden generar comportamientos en la región visible y en el infrarrojo cercano, debido a las combinaciones de hidróxidos (Stenberg et al., 2010).

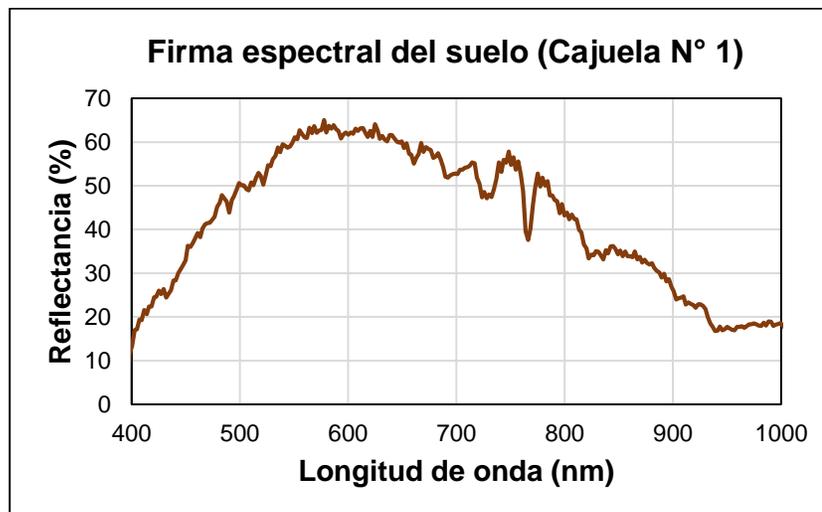
La composición mineralógica de los suelos es un factor importante para el presente estudio, pues los suelos con problemas de salinización y/o sodicidad, se encuentran compuestos por sulfatos, cloruros y carbonatos (Goldshleger et al., 2013), y presentan altos contenidos de magnesio y sodio, que aumentan la retención de agua (Mitran et al., 2015), originando sales higroscópicas, capaces de absorber el vapor de agua y convertirlo en humedad (Farifteh et al., 2007). También, los carbonatos que conforman a estos suelos, aumentan la absorbancia en las bandas del espectro electromagnético (Mitran et al., 2015). Estos procesos en los suelos salinos suelen generar una alta reflectancia en la longitud de onda de 500 a 900 nm (Escobar, 2017). Según Allbed et al. (2014), los suelos salinos presentan alta reflectividad en la región del rojo cuando tienen una superficie lisa salada y ligera.

En el presente estudio, se identifican dos patrones de comportamiento dominantes en las 23 firmas espectrales del suelo, de manera que, para el análisis de cada comportamiento fue necesario extraer previamente algunos valores de las firmas que presentan un comportamiento similar y hacer su respectivo promedio, para conocer la manera en que modifican la curva de reflectancia del espectro electromagnético del suelo.

El primer comportamiento espectral, se evidencia en 12 de las 23 firmas del suelo, que equivalen al 52.17% del total de firmas analizadas, el cual se aprecia en la siguiente figura:

Figura 4

Firma espectral del suelo (Cajuela N° 1)



Fuente: Autoría propia.

Este comportamiento indica un aumento progresivo de reflectancia entre la longitud de onda de 400 a 586,668 nm aproximadamente, alcanzando un pico de reflectancia de 65%. Desde la longitud de onda de 588,912 nm, hasta los 754,939 nm, disminuye la reflectancia, con diferencias poco marcadas en sus valores, oscilando entre 64.16% a 46.37%. A partir de este comportamiento, se observa un rasgo de absorción agudo en la curva, que, en promedio, empieza en la longitud de onda de 757,182 nm, con una reflectancia de 55.86%, extendiéndose hasta la longitud de onda de 766,157 nm, con un valor de reflectancia de 37.15%, terminando en la longitud de onda de 775,131 nm con un valor de reflectancia de 52.13%. El rasgo de absorción agudo se debe a la presencia de los minerales que componen al suelo (I. G. A. C. IGAC, 2015), de manera que, para el caso del presente estudio, este comportamiento es generado por la presencia de sales y/o sodio en el suelo. Por último, desde la longitud de onda de 777,375 nm, con un valor de reflectancia de 50.60%, hasta la longitud de onda 1003, 98 nm, con un valor de reflectancia de 17.43%, se observa un comportamiento decreciente en la reflectancia, por ende, una mayor absorbancia, con un valor de 33.17%.

El segundo comportamiento espectral, se evidencia en 11 de las 23 firmas del suelo, que equivalen al 47.82% del total de firmas analizadas y se aprecia en la siguiente figura:

Figura 5

Firma espectral del suelo (Cajuela N° 11)



Fuente: Autoría propia.

Este comportamiento indica un aumento progresivo de reflectancia entre la longitud de onda de 400 a 586,668 nm aproximadamente, alcanzando un pico de reflectancia de 63.58%. Desde la longitud de onda de 588,912 nm, hasta los 754,939 nm, empieza a variar la reflectancia, con diferencias marcadas en sus valores, oscilando entre 65% que es el pico de reflectancia, a 53.04%. A partir de este comportamiento, se observa un rasgo de absorción agudo, que, en promedio, empieza en la longitud de onda de 757,182 nm, con una reflectancia del 63.28%, extendiéndose hasta la longitud de onda de 766,157 nm, con un valor de reflectancia de 46.14%, terminando en la longitud de onda de 775,131 nm, con un valor de reflectancia de 60.41%. El rasgo de absorción agudo se debe de igual forma, a la presencia de los minerales que componen el suelo, es decir, a las sales y/o sodios. Por último, desde la longitud de onda de 777,375 nm con un valor de reflectancia de 58.32%, hasta la longitud de onda 1003,98 nm con un valor de reflectancia de 30.93%, se observa un comportamiento decreciente en la reflectancia, por ende, una mayor absorbancia con un valor de 27.39%.

Los dos comportamientos espectrales, evidencian que el estado del suelo de las 23 cajuelas es moderadamente seco, pues, cuanto menor es su humedad, mayor es su reflectancia (Cetina, 2017), lo cual se debe al clima frío y seco de la zona de estudio. Además, cabe resaltar que los suelos en condiciones normales presentan un espectro continuo sin fluctuaciones (Anexo 6) (Sasal & Soler, 1997), lo cual no es evidenciado en las firmas espectrales del suelo analizado, pues, entre la longitud de onda de 400 a 586,668 nm, hay una reflectancia promedio de 45.44%, siendo su absorción de 54.56%, debido a que los suelos arcillosos absorben minerales de hierro en la región visible.

En la región del rojo, los óxidos de hierro, junto a la superficie salada y ligera del suelo, generan una alta reflectividad, lo cual se observa en la longitud de onda de 588,912 a 754,939 nm, con una reflectancia promedio de 58.50%, siendo el promedio de reflectancia más alto de las firmas espectrales. Este comportamiento evidencia la interacción entre los minerales de los suelos arcillosos, además, el suelo al presentar una textura fina compactada, con una baja humedad superficial y una estructura uniforme, explican este nivel de reflectividad en la región del rojo.

Por último, en la región del infrarrojo cercano, en la longitud de onda de los 777,375 a los 1003,98 nm, se produce una fuerte absorbancia, debido a la interacción entre los sulfatos y

bicarbonatos que conforman a las sales y sodios presentes en el suelo de estudio. Sin embargo, cabe resaltar que, en el segundo comportamiento, no es generado el mismo nivel de absorción, de lo cual, se infiere que no hay una distribución homogénea de los sulfatos y bicarbonatos, en la superficie analizada.

8.8.2 Firmas espectrales de la vegetación

El espectro electromagnético utilizado para realizar las firmas espectrales de la vegetación es el mismo en el que se generaron las 23 firmas espectrales del suelo, sin embargo, para su obtención se establecieron geográficamente puntos estratégicos localizados alrededor de cada cajuela, a fin de obtener el comportamiento espectral de la vegetación circundante a estas.

La reflectancia espectral de la vegetación depende principalmente de las características del suelo, las propiedades fisiológicas y fenológicas de las plantas, razón por la cual, la región del espectro electromagnético en la que se evalúan las firmas espectrales del presente estudio, poseen un comportamiento diferenciador en relación a las características de la vegetación. El comportamiento de la curva de la firma espectral en la región visible depende de la manera en que interactúan los pigmentos de las hojas, y en el infrarrojo cercano depende de la estructura celular de la planta, la humedad, la geometría, la disposición de las hojas y el área foliar de las plantas (Anexo 7)(Gonzalez, 2019).

El comportamiento de la firma espectral de la vegetación sana varía dependiendo la región del espectro en el que se evalúa. En la región azul (400 a 500 nm) se presenta una baja reflectancia y transmitancia, puesto que ocurre una fuerte absorción de la luz azul, debido a la interacción de los pigmentos foliares tales como la clorofila a, clorofila b, caroteno y xantofila (Cochrane, 2000), sin embargo, dicha absorción es dominada por la clorofila, ya que se encuentra en mayor cantidad que los otros pigmentos y garantiza una elevada absorción. El mecanismo que le permite a estos pigmentos absorber la radiación es la transición electrónica, pues al ser absorbida la luz por los pigmentos, ocurren transiciones electrónicas en la estructura molecular de cada pigmento. Esta energía es utilizada por las plantas para llevar a cabo diferentes reacciones fotoquímicas, sintetizar compuestos orgánicos y realizar el proceso de fotosíntesis, por medio del cual los cloroplastos convierten en carbonatos el dióxido de carbono y el agua capturada (Kuusk et al., 2004).

En la región verde (500 a 600 nm), ocurre una menor absorción y por ende una mayor reflectancia, de manera que el comportamiento en este rango representa la porción de luz verde que no se absorbe para la fotosíntesis (Rock et al., 1986). Esto se debe a las interacciones de los carotenos y las xantofilas con la luz incidente, los cuales tienen una mayor absorción que la clorofila, permitiendo generar el verdor con el que se perciben las plantas. La región roja (600 a 700 nm), se caracteriza por presentar un valle de absorción, pues ocurre un aumento de absorción de la clorofila debido a sus interacciones con la planta.

En la región del infrarrojo cercano (700 a 1000 nm), se espera un cambio abrupto del comportamiento de la firma espectral entre la longitud de onda de 700 a 740 nm, el cual es llamado zona de transición (E. Gonzalez, 2019), aumentando la reflectancia hacia los 750 nm, debido a la estructura interna de la hoja y la humedad de la planta (Alonso et al., 1999). Además se espera una alta reflectancia y transmitancia desde 800 a 1000 nm, debido a que no hay interacciones entre los pigmentos foliares de la planta, pues la energía que incide en esta región no presenta niveles adecuados para que ocurran estos procesos, ya que sus valores son extremadamente bajos, por lo que comúnmente solo se absorbe el 5% de la energía incidente, siendo el 55% reflejada y 40% transmitida; de este 40% de energía transmitida se refleja el 55%, ya que al transmitir esta energía de una hoja superior a una inferior, se desarrolla este proceso, aumentando así la reflectancia en esta región (Alonso, 2006) .

Además, la absorbancia y transmitancia de la planta en la región del infrarrojo cercano, es influenciada directamente por la estructura interna de sus hojas, la cual se conforma por la forma, el tamaño y la disposición de sus células, razón por la cual, las hojas que en su estructura tienen una capa mesófila compacta, tienden a generar una mayor transmisión de energía, debido a que, al ser una capa compacta disminuye el espacio intercelular, para que el aire circundante no atraviese las hojas de la planta (Kuusk et al., 2004). A su vez, si las hojas en su estructura tienen una capa mesófila esponjosa, tienden a generar mayor dispersión y por ende menor transmisión, debido a que su estructura permite el paso de aire, ya que la hoja tiene más espacios intercelulares para que se genere este fenómeno, además de que presentan una mayor relación entre aire y agua. Las capas mesófilas son de gran importancia, pues afectan el nivel de reflectancia de las plantas, debido a que el agua se queda almacenada entre espacios intracelulares, hidratando las paredes de las células (Gonzalez, 2019), provocando así la disminución de la reflectividad y el aumento de la transmitancia de la

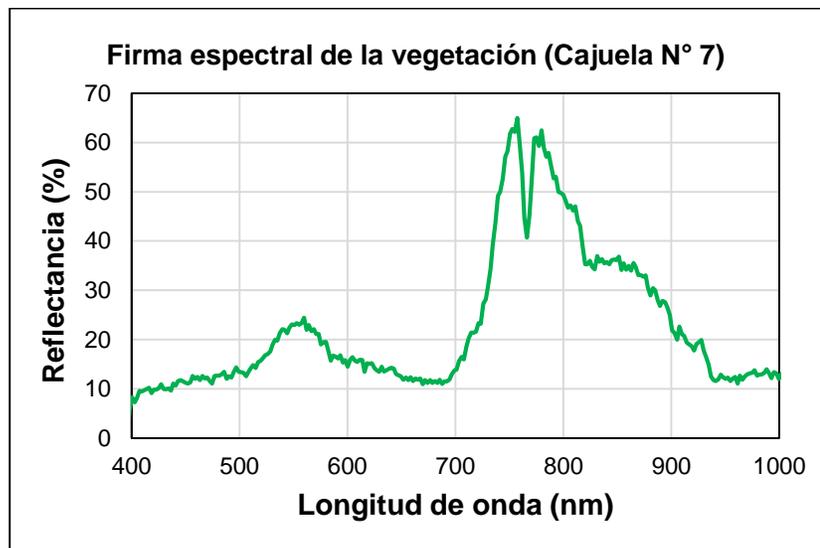
planta, sin embargo, cabe resaltar que la capa mesófila esponjosa propicia el elevado nivel de reflectividad del infrarrojo cercano (Alonso et al., 1999).

Consecuente a lo anterior, la curva espectral de la vegetación presenta distintos comportamientos a través del espectro electromagnético, sin embargo, este comportamiento se puede ver afectado por el estado y vigor de la vegetación, es decir, una cobertura vegetal senescente y/o enferma presenta un aumento de la reflectancia en la región visible y una disminución en el infrarrojo cercano. Por ejemplo, en la vegetación enferma se incrementa la reflectancia en la región verde, debido a la ausencia de contenidos de clorofila, provocando coloraciones diferentes en las hojas de la planta, de igual forma pasa en la región azul y roja, pues la ausencia de pigmentos impide llevar a cabo los procesos dentro de la planta. En el caso de la vegetación senescente, la clorofila disminuye rápidamente ocasionado el aumento de la reflectividad en el rojo e infrarrojo cercano (Castro, 1999), además, los carotenos y las xantofilas realizan la mayor parte de los procesos químicos durante el espectro visible, generando colores amarillos y marrones en las hojas (Kuusk et al., 2004). Otro factor que afecta la reflectancia de la vegetación es el grosor de las hojas de las plantas, pues de este depende el contenido de pigmentos y la estructura fisiológica, por ejemplo, las hojas gruesas absorben más energía incidente, mientras las hojas delgadas y palmadas presentan valores más altos de reflectividad, además de tener colores más claros que las hojas gruesas (Castro, 1999).

En el presente estudio, se identifican tres patrones de comportamiento dominantes en las 23 firmas espectrales de la vegetación, de manera que, para el análisis de cada comportamiento fue necesario extraer previamente algunos valores de las firmas que presentan un comportamiento similar y hacer su respectivo promedio, para conocer la manera en que modifican la curva de reflectancia del espectro electromagnético del suelo. El primer comportamiento espectral, se evidencia en 8 de las 23 firmas de la vegetación, que equivalen al 34% del total de firmas analizadas, el cual se aprecia en la siguiente figura:

Figura 6

Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 7)



Fuente: Autoría propia.

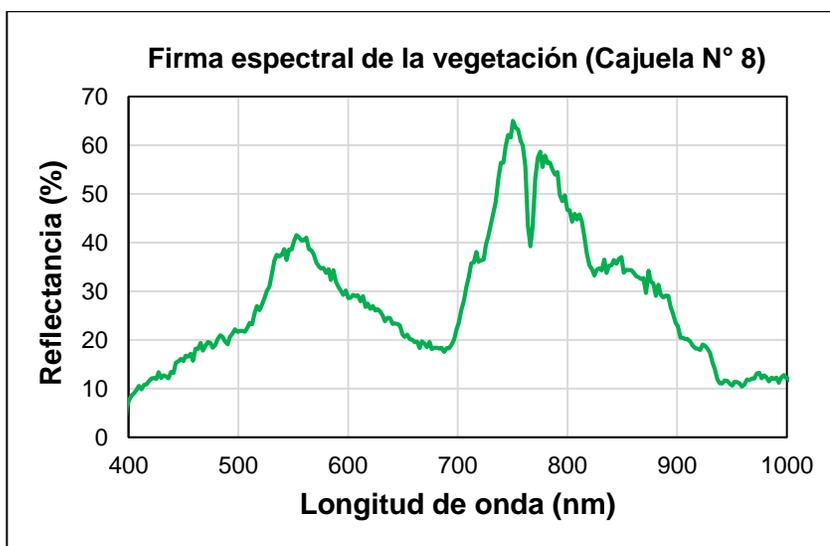
Este comportamiento indica una fuerte absorción en el rango de 400 a 500 nm, teniendo valores promedio de reflectancia de 12.17%, lo que indica que del 100% de la energía incidente, el 87.83% es absorbida, además tiene un valor máximo promedio de 15.45%. En el rango de 500 a 600 nm, se evidencia un pico en la curva, con un valor máximo de reflectancia del 28.35%, representando las interacciones que tiene la clorofila de la vegetación en este espectro. En el rango de 600 a 700 nm, se muestra un comportamiento decreciente, con un valor mínimo de reflectancia de 12.05%. Entre el rango de 700 a 800 nm, se muestra un cambio abrupto en la curva del espectro, aumentado significativamente los valores de reflectancia, mostrando un pico de la longitud de onda de 700 a 757 nm, que alcanza un valor máximo de reflectancia del 65%. A partir de este pico, el comportamiento de la curva empieza a decrecer, generando un rasgo de absorción agudo, extendiéndose hacia la longitud de onda de 766,157 nm con un valor de reflectancia de 40.93%, alcanzando la longitud de onda de 775,131 nm con un valor de reflectancia de 60.95%. Seguido de esto, se muestra un comportamiento decreciente en la reflectancia, desde la longitud de onda de 779,618 nm, con un valor de reflectancia de 60.54%, hasta la longitud de onda 1003,98 nm con un valor de reflectancia de 13.69%, teniendo una diferencia del 46.84%.

Este comportamiento espectral, evidencia que el estado de la vegetación circundante a las 8 cajuelas es moderadamente sano, pues según Alonso et al., (1999), la firma espectral de una vegetación completamente saludable cumple principalmente con las siguientes condiciones: un pico máximo de reflectancia en torno a los 550 nm, es decir, en la región visible, sumado a una baja reflectancia entre el rango 600 a 700 nm, debido a la elevada absorción de energía por clorofila, y una alta reflectancia desde los 800 a 1000 nm, pues el componente celulósico aumenta la reflectancia. De manera que, cuanto más vigorosa o saludable es la vegetación, mayor es la diferencia entre la radiación reflejada en la región visible y el infrarrojo cercano. En relación a lo anterior, este comportamiento espectral, cumple las dos primeras condiciones para representar una vegetación saludable, sin embargo, el comportamiento espectral en el rango de 800 a 1000 nm no cumplen con la tercera condición, pues, aunque presenta una elevada reflectancia en torno a los 800 nm, la curva decrece hacia los 1000 nm, demostrando que el comportamiento espectral no cumple con las tres condiciones a cabalidad, y a su vez, presentan una diferencia mínima entre el promedio de radiación reflejada en la región visible y en el infrarrojo cercano.

El segundo comportamiento espectral, se evidencia en 14 de las 23 firmas de vegetación, que equivalen al 60,86% del total de firmas analizadas, el cual se aprecia en la siguiente figura:

Figura 7

Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 8)



Fuente: Autoría propia.

Este comportamiento indica una fuerte absorción en el rango de 400 a 500 nm, teniendo valores promedio de reflectancia de 15%, lo que indica que del 100% de la energía incidente, el 85% es absorbida, además tiene un valor máximo promedio de 25.75%. En el rango de 500 a 600 nm, se evidencia un pico en la curva, con un valor máximo de reflectancia del 41.76%, representando las interacciones que tiene la clorofila de la vegetación en este espectro. En el rango de 600 a 700 nm, se muestra un comportamiento decreciente, con un valor mínimo de reflectancia de 12.51%. Entre el rango de 700 a 800 nm, se muestra un cambio abrupto en la curva del espectro, aumentado significativamente los valores de reflectancia, mostrando un pico en la longitud de onda de 700 a 757 nm, que alcanza un valor máximo de reflectancia promedio del 65%. A partir de este pico, el comportamiento de la curva empieza a decrecer, generando un rasgo de absorbancia agudo, extendiéndose hacia la longitud de onda de 766,157 nm con un valor de reflectancia de 40.62%, alcanzando la longitud de onda de 775,131 nm con un valor de reflectancia de 60.6%. Seguido de esto, se muestra un comportamiento decreciente en la reflectancia, desde la longitud de onda de 779,618 nm, con un valor de reflectancia de 59.42%, hasta la longitud de onda 1003, 98 nm con un valor de reflectancia de 15.16%, teniendo una diferencia del 44.26%.

El segundo comportamiento espectral, evidencia que la vegetación circundante a las 14 cajuelas, está estresada o enferma, pues aunque posee rasgos similares al primer comportamiento espectral, posee algunos rasgos que no representan a una vegetación moderadamente sana, pues según Herrera, (2018), la vegetación enferma se caracteriza por presentar un aumento en la reflectividad en la región azul y roja, sumado a una disminución en el infrarrojo cercano, tal como ocurre en el segundo comportamiento, sus valores son mayores al promedio de reflectancia del primer comportamiento en esa región, y a su vez, en el infrarrojo cercano ocurre una fuerte disminución de reflectancia. Otro rasgo diferenciador de la vegetación enferma o estresada según Kuusk et al., (2004), es una mayor transmitancia y reflectancia en torno a los 650 nm, lo cual se evidencia en este comportamiento, pues presenta un aumento de reflectancia en dicha longitud de onda, siendo mayor a la reflectancia del primer comportamiento en esta banda; esto se debe principalmente a la disminución de pigmentos foliares, los cuales le aportan diversas coloraciones a las hojas de la planta, como amarillo o rojizo, y al no estar presentes en sus debidas proporciones, se limita la realización de algunos procesos dentro de la planta.

El ultimo comportamiento, se identifica en la firma espectral correspondiente a la vegetación circundante a la cajuela 23, que equivale al 4,34% y se evidencia en la siguiente figura:

Figura 8

Firma espectral de la vegetación (Cajuela N° 23)



Fuente: Autoría propia.

Este comportamiento, indica una fuerte absorción en el rango de 400 a 500 nm, alcanzando un valor máximo de reflectancia de 32.41%, lo que indica que del 100% de la energía incidente, el 67.59% es absorbida. En el rango de 500 a 600 nm, se evidencia un pico en la curva, con un valor máximo de reflectancia del 52.41%, representando las interacciones que tiene la clorofila de la vegetación en este espectro. En el rango de 600 a 700 nm, se muestra un comportamiento decreciente con un valor mínimo de reflectancia de 30.32%. Entre el rango de 700 a 800 nm, se muestra un cambio abrupto en la curva del espectro, aumentado significativamente los valores de reflectancia, mostrando un pico en la longitud de onda de 700 a 757 nm, que alcanza un valor máximo de reflectancia del 65%. A partir de este pico, el comportamiento de la curva empieza a decrecer, generando un rasgo de absorción agudo, extendiéndose hacia la longitud de onda de 766,157 nm con un valor de reflectancia de 41.77%, alcanzando la longitud de onda de 775,131 nm con un valor de reflectancia de 61.29%. Seguido de esto, se muestra un comportamiento decreciente en la reflectancia, desde la longitud de onda de 779,618 nm, con un valor de reflectancia de 59.67%, hasta la longitud de onda 1003, 98 nm con un valor de reflectancia de 20.32%, teniendo una diferencia del 46.84%.

El tercer comportamiento espectral, evidencia que la vegetación circundante a la cajuela 23 está muerta o que es suelo desnudo, teniendo en cuenta que, en comparación al segundo comportamiento, este presenta un aumento importante de reflectancia en torno a los 650 nm, y a su vez, en el infrarrojo cercano, entre la longitud de onda de 800 a 1000 nm disminuye la reflectancia, con un valor mínimo de 18.54%. Este comportamiento, que caracteriza a la vegetación muerta, se debe también a la disminución de pigmentos, lo que genera diversas coloraciones en las hojas de la planta y no permiten realizar algunos procesos dentro de ella.

El análisis de los tres comportamientos identificados permite inferir que la mayoría de las firmas correspondientes a la vegetación circundante a las 23 cajuelas, indican que la vegetación se encuentra moderadamente sana y parte de ella en condiciones de estrés por diversos factores, sin embargo, por medio de la imagen hiperespectral es posible realizar un análisis más detallado, puesto que la vegetación no presenta características homogéneas en la zona de estudio.

8.9 Aplicación de índices

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada y al comportamiento de las firmas espectrales de la vegetación y del suelo del presente estudio, se calculan cuatro índices espectrales, dos de vegetación y dos de salinidad, seleccionando las fórmulas correspondientes y utilizando las bandas de la imagen hiperespectral, a fin de obtener cuatro rásters que permitan interpretar e identificar el estado de la vegetación y la clase de salinidad que presenta el suelo de estudio, el cual abarca 7,37 ha.

8.9.1 Índices de vegetación

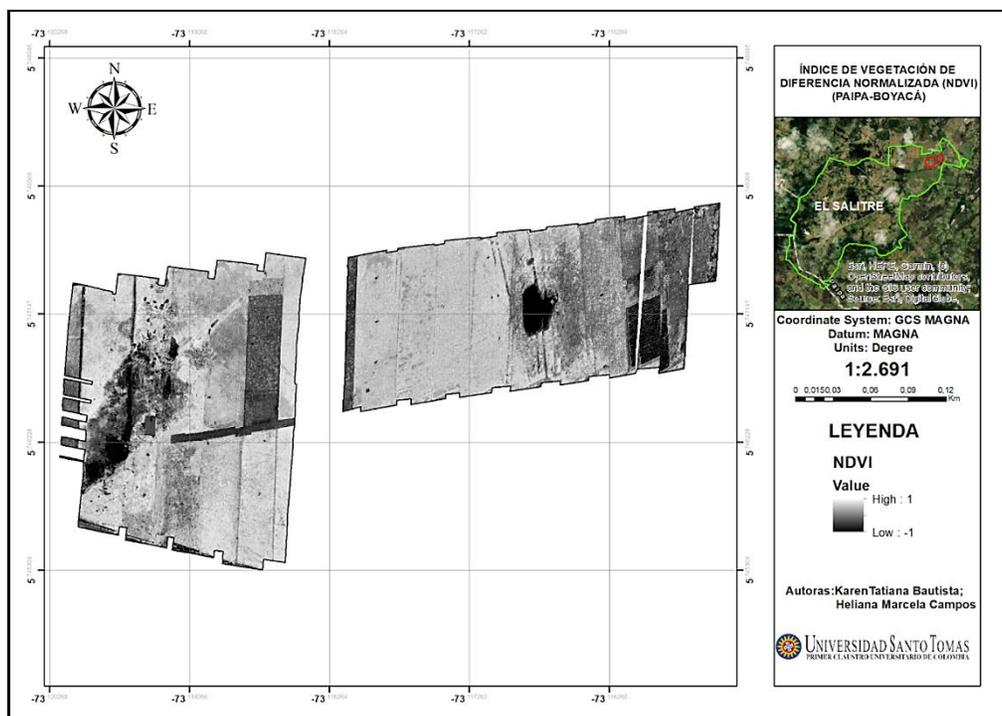
Los índices de vegetación son parámetros cuantitativos que permiten estimar la biomasa o vigor vegetal mediante la combinación de bandas espectrales, de manera que valores bajos de este índice representan vegetación poco vigorosa y valores altos representan vegetación muy vigorosa y saludable (J. Díaz, 2015). De acuerdo a lo anterior, es de gran importancia aplicar estos índices en el presente estudio, con el fin de identificar la densidad y estado de salud actual de la vegetación en relación a su actividad fotosintética.

8.9.1.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es el más utilizado para el estudio de las superficies terrestres a escala espacio temporal, que es determinado por el nivel de reflectancia y absorbancia que generan las coberturas vegetales en relación a su estado y vigor, el cual es generado por los procesos fotosintéticos de las plantas y la estructura interna de estas. De acuerdo con esto, para calcular el NDVI, se seleccionaron las bandas 106 (Rojo) y 181 (Infrarrojo cercano), dando como resultado una imagen ráster, que se compone de una serie de tonalidades entre blancos, grises y negros, la cual se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 9

Mapa índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)



Fuente: Autoría propia.

A partir de la imagen del NDVI, se aplica una reclasificación en ArcGIS, para asignar una característica a los valores entre -1 y 1, a fin de conocer el estado de la vegetación con mayor precisión, mediante los siguientes valores:

Tabla 6

Clasificación de los rangos de NDVI

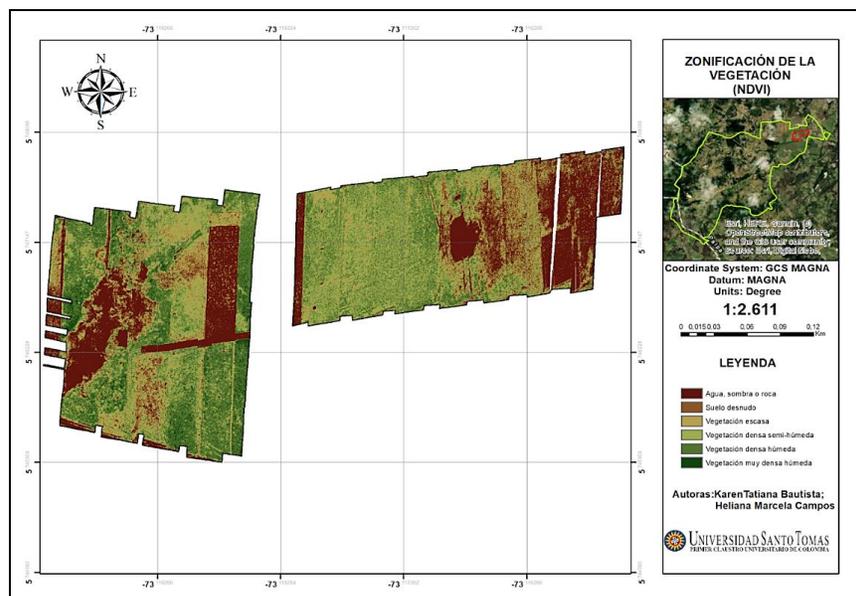
CLASIFICACIÓN NDVI			
RANGO (Valor del píxel)	CLASE	TONALIDAD	CARACTERÍSTICA
-1 - 0	Muy baja	Marrón oscuro	Agua, sombra rocas o vegetación muerta
0 - 0.2	Baja	Marrón claro	Suelo desnudo o vegetación enferma
0.2 - 0.4	Media baja	Amarillo	Vegetación escasa
0.4 - 0.6	Media	Verde claro	Vegetación densa semihúmeda
0.6 - 0.8	Alta	Verde	Vegetación densa húmeda
0.8 - 1	Muy alta	Verde oscuro	Vegetación muy densa húmeda

Fuente: Autoría propia con base en (Aquino et al., 2018) y (A. González & Otálora, 2017).

En el siguiente mapa se observa la distribución espacial de las clases de NDVI obtenidas a partir de la reclasificación, el cual se compone de una serie de tonalidades, que varían con relación al vigor de la vegetación, por ende, píxeles con tono marrón, indican vegetación poco vigorosa y píxeles con tonos verdes claros a oscuros, indican vegetación vigorosa.

Figura 10

Mapa Zonificación de la vegetación (NDVI)



Fuente: Autoría propia.

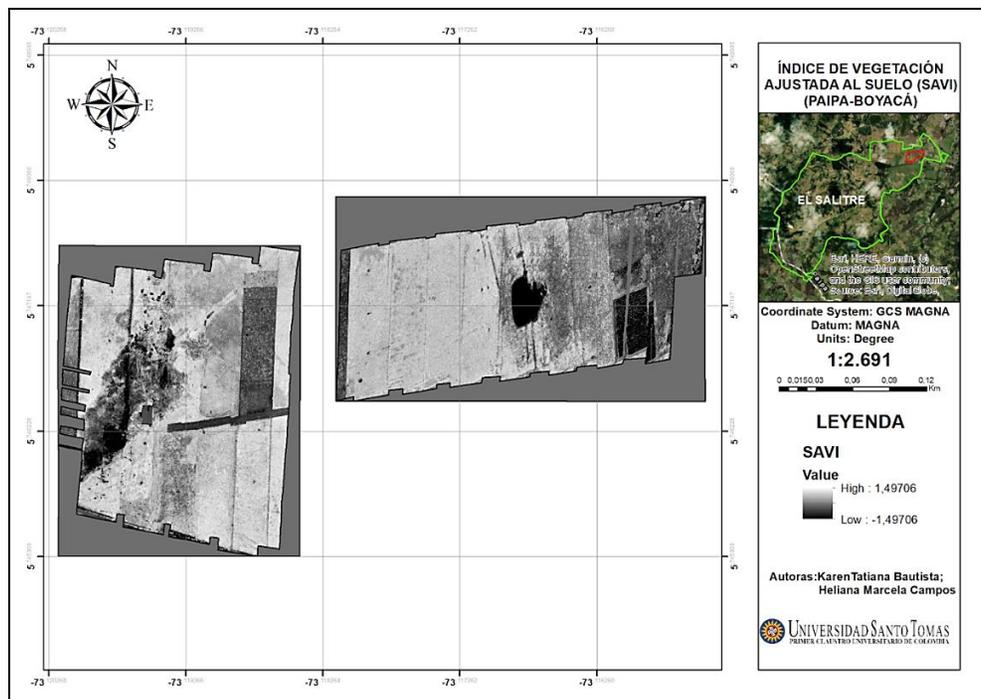
La *clase muy baja*, abarca un área de 1,73 ha, que equivale al 24% del área total de la zona de estudio, la *clase baja* abarca un área de 0,67 ha, con un 9%, la *clase media baja*, abarca un área de 0,87 ha, con un 12%, la *clase media* abarca un área de 1,81 ha, con un 25%, la *clase alta* abarca un área de 1,97 ha, con un 27% y la *clase muy alta* abarca un área de 0,32 ha, con un 4%. De lo cual, se puede inferir que la *clase alta* abarca el mayor porcentaje del área de estudio, demostrando que la vegetación es densa y húmeda.

8.9.1.2 Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)

Teniendo en cuenta que el NDVI es sensible al brillo del fondo del suelo, se calcula el SAVI, a fin de que el índice sea capaz de adaptarse a zonas que no presentan densas coberturas vegetales. Para esto, se calcula el SAVI, seleccionando las bandas 106 (Rojo) y 181 (Infrarrojo cercano), y se le asigna un valor de 0,5 a la constante *L línea del suelo*, teniendo en cuenta que la cobertura vegetal de la zona de estudio es moderada, dando como resultado una imagen ráster con valores de -1,49 a 1,49, la cual se compone de una serie de tonalidades entre blancos, grises y negros, y se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 11

Mapa Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)



Fuente: Autoría propia.

A partir de la imagen del SAVI, se aplica una reclasificación en ArcGIS, para asignar una característica a los valores entre -1,49 y 1,49. Estas se dividen en rangos proporcionales a los establecidos para el NDVI, a fin de conocer el estado de la vegetación con mayor precisión, los cuales se identifican en la siguiente tabla:

Tabla 7

Clasificación de los rangos de SAVI

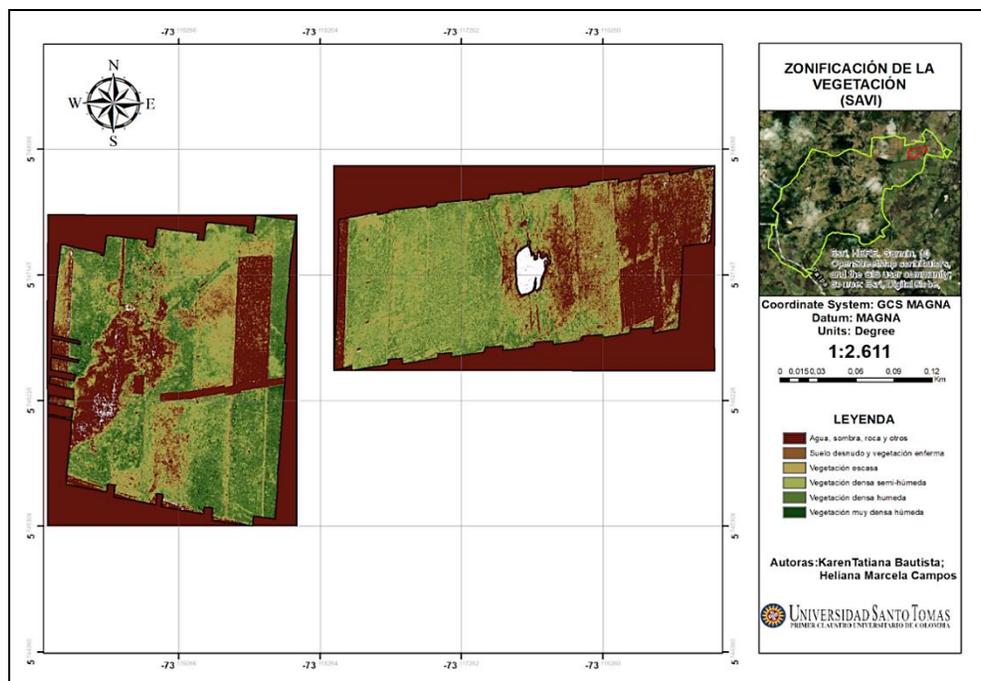
CLASIFICACIÓN SAVI			
RANGO (Valor de píxel)	CLASE	TONALIDAD	CARACTERÍSTICA
-1.49 - 0	Muy baja	Marrón oscuro	Agua, sombra, rocas o vegetación muerta
0 - 0.3	Baja	Marrón claro	Suelo desnudo o vegetación enferma
0.3 - 0.6	Media baja	Amarillo	Vegetación escasa
0.6 - 0.9	Media	Verde claro	Vegetación densa semihúmeda
0.9 - 1.2	Alta	Verde	Vegetación densa húmeda
1.2 - 1.49	Muy alta	Verde oscuro	Vegetación muy densa húmeda

Fuente: Autoría propia con base en (Aquino et al., 2018) y (A. González & Otálora, 2017).

En el siguiente mapa se observa la distribución espacial de las clases de SAVI obtenidas a partir de la reclasificación, el cual se compone de una serie de tonalidades, que varían en relación al vigor de la vegetación, por ende, píxeles con tono marrón, indican vegetación poco vigorosa y píxeles con tonos verdes claros a oscuros, indican vegetación vigorosa.

Figura 12

Mapa Zonificación de la vegetación (SAVI)



Fuente: Autoría propia.

La *clase muy baja*, abarca un área de 1,73 ha, que equivale al 23% del área total de la zona de estudio, la *clase baja* abarca un área de 0,66 ha, con un 9%, la *clase media baja*, abarca un área de 0,87 ha, con un 12%, la *clase media* abarca un área de 1,84 ha, con un 25%, la *clase alta* abarca un área de 1,97 ha, con un 27%, y finalmente, la *clase muy alta* abarca un área de 0,30 ha, con un 4%. De lo cual, se puede inferir que la *clase alta* abarca el mayor porcentaje del área de estudio, demostrando que la vegetación es densa y húmeda. Cabe mencionar que, para estimar el porcentaje que abarca cada clase, fue necesario restar previamente el área correspondiente al procesamiento de la imagen que es de 2,53 ha, que equivalen a un 26% del Mapa Zonificación de la vegetación (SAVI).

El análisis estadístico permite conocer las diferencias y similitudes entre el NDVI y el SAVI, pues como se observa, en las dos imágenes obtenidas, la *clase alta*, es decir la vegetación densa y húmeda, abarca la mayor parte del área de estudio, seguida de la *clase media*, que corresponde a la vegetación densa semi húmeda. Por su parte, la *clase muy alta*, que es la vegetación muy densa y húmeda, abarca la menor parte del área de estudio, y la *clase baja*,

que es el suelo desnudo o vegetación enferma abarcan porcentajes similares, al igual que la *clase muy baja* que corresponde a agua, sombra, roca o vegetación muerta.

Los valores del NDVI y del SAVI dependen directamente de las condiciones climáticas de la zona de estudio, del desarrollo y estructura de las plantas (Gonzalez, 2019), como también, se ven influenciados por la hora en la que se captura la imagen (J. Díaz, 2015), el brillo del suelo, las nubes, la sombra de las superficies y el color del suelo. Estas condiciones provocan inconvenientes en la interpretación de los valores del NDVI (Xue & Su, 2017), principalmente cuando el porcentaje de vegetación es menor al 50%, pues al ser un índice sensible al verde claro, arroja valores correspondientes a suelo desnudo, cuando la vegetación es dispersa y escasa (Sánchez et al., 2000), razón por la cual, en el presente estudio, el suelo desnudo, correspondiente a la *clase baja*, puede ser en realidad vegetación escasa, correspondiente a la *clase media baja*.

Otro factor que influye en los valores del NDVI y del SAVI, es el tipo de vegetación, que, para el caso del presente estudio, es un mosaico de pastizales limpios manejados, arbustos densos y áreas pequeñas de árboles plantados y cultivados, el cual fue identificado por medio del mapa de ecosistemas de la zona de estudio (Anexo 8), elaborado mediante el shape denominado *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, versión 2.1 100K 2017* (IDEAM, 2017). A su vez, por medio de las coberturas vegetales que conforman la zona sur del municipio de Paipa según el POT, y por medio del mosaico que compone la imagen hiperespectral de estudio, es posible verificar que los pastizales limpios son la vegetación predominante, pues abarcan la mayor parte de la zona de estudio. Según Corrales & Ochoa, (2014), los valores de NDVI para los pastizales verdes son altos, de aproximadamente 0,7, mientras que los valores de NDVI para los pastizales secos son bajos, de aproximadamente 0,3, lo cual indica que, según los resultados del NDVI del presente estudio, la vegetación corresponde principalmente a pastos verdes, teniendo en cuenta que la *clase alta* del NDVI tiene el porcentaje más representativo.

Considerando la influencia de algunos factores en el valor del NDVI, el SAVI busca discriminar la influencia del suelo mediante la constante L *Línea del suelo*, que se acomoda a las condiciones ambientales de la zona de estudio, optimizando la respuesta espectral de la vegetación (Muñoz, 2013). En este caso, el SAVI arroja un menor porcentaje de agua sobra o roca, a comparación del NDVI, debido a que aísla eficazmente la reflectancia de la vegetación,

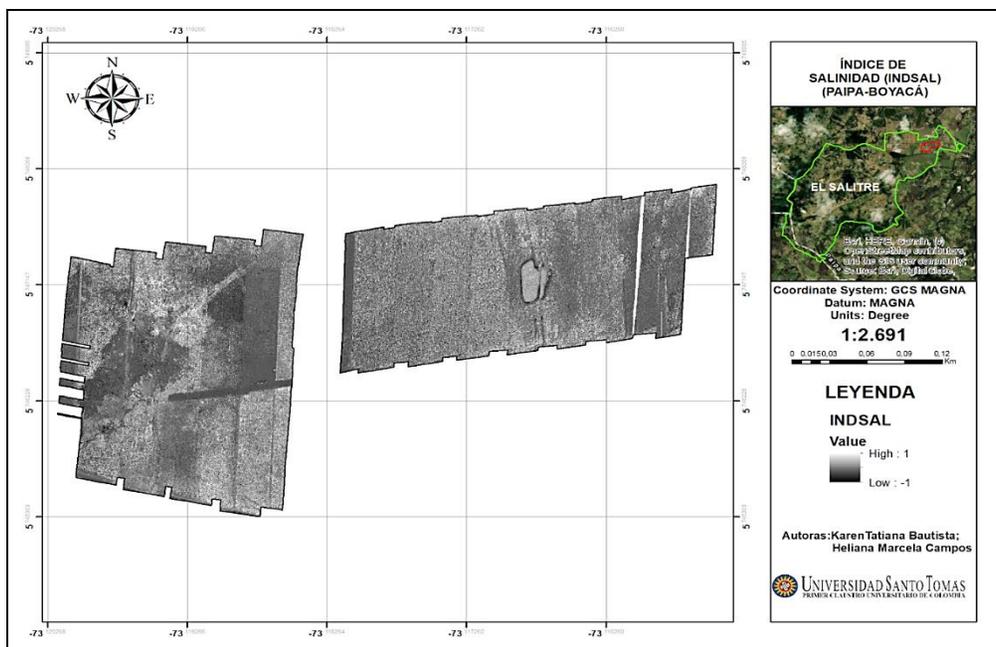
discriminando la reflectancia del suelo, razón por la cual, el SAVI capta con mayor precisión la clase de vegetación que conforma la zona de estudio.

8.9.1.3 Índice de Salinidad (INDSAL)

El INDSAL, permite estimar y mapear la distribución espacial de la salinidad del suelo, a partir del uso de 3 bandas, principalmente de la región azul, verde y roja, debido a que estas permiten discriminar adecuadamente la presencia de sal en la superficie terrestre. Cabe mencionar que la reflectancia del suelo aumenta a medida que incrementa el contenido de sal (Abbas & Khan, 2007). De acuerdo a esto, para calcular el INDSAL, se seleccionaron las bandas 106 (Roja) y 34 (Azul), dando como resultado una imagen ráster con valores entre -1 a 1, que se compone de una serie de tonalidades entre blancos, grises y negros, la cual se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 13

Mapa índice de salinidad (INDSAL)



Fuente: Autoría propia.

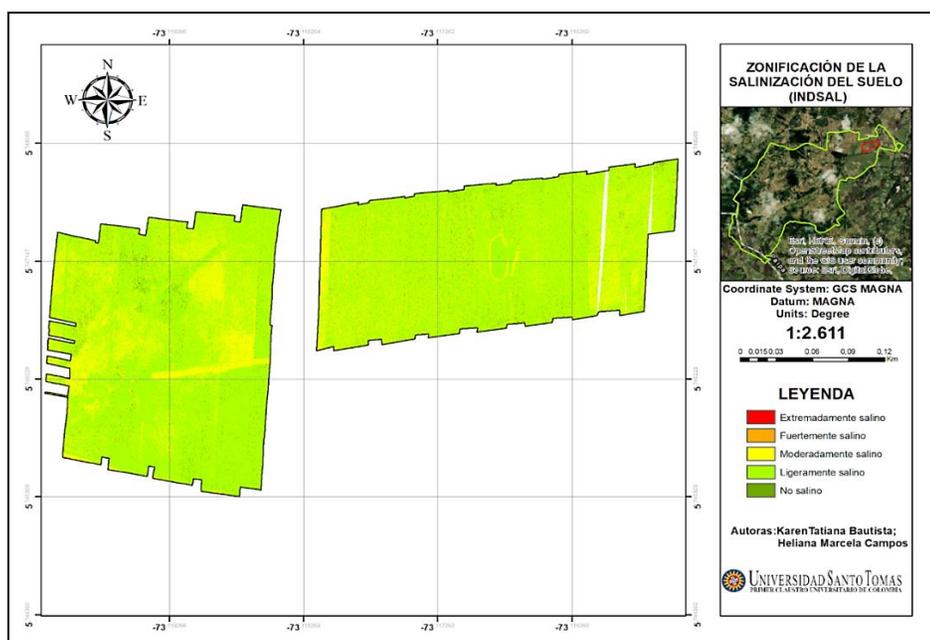
A partir de la imagen del INDSAL, se aplica una reclasificación en ArcGIS, para asignar una característica a los valores entre -1 y 1, a fin de conocer la distribución espacial de la salinidad, mediante los siguientes valores:

Tabla 8*Clasificación de los rangos de INDSAL*

CLASIFICACIÓN INDSAL			
RANGO (Valor de píxel)	CLASE	TONALIDAD	CARACTERÍSTICA
-1 - -0.9	Muy alta	Rojo	Extremadamente salino
-0.9 - -0.5	Alta	Naranja	Fuertemente salino
-0.5 - 0	Media	Amarillo	Moderadamente salino
0 - 0.6	Baja	Verde claro	Ligeramente salino
0.6 - 1	Muy baja	Verde oscuro	No salino

Fuente: Autoría propia con base en (Medina, 2019) y (Soca et al., 2016).

En el siguiente mapa se observa la distribución espacial de las clases de INDSAL obtenidas a partir de la reclasificación, el cual se compone de una serie de tonalidades, que varían en relación al nivel de salinidad del suelo, por ende, píxeles con tono rojo y naranja, indican un suelo con elevada concentración de sal y píxeles con tonos amarillos y verdes, indican un suelo con media a baja concentración de sal.

Figura 14*Mapa zonificación de la salinización del suelo (INDSAL)*

Fuente: Autoría propia.

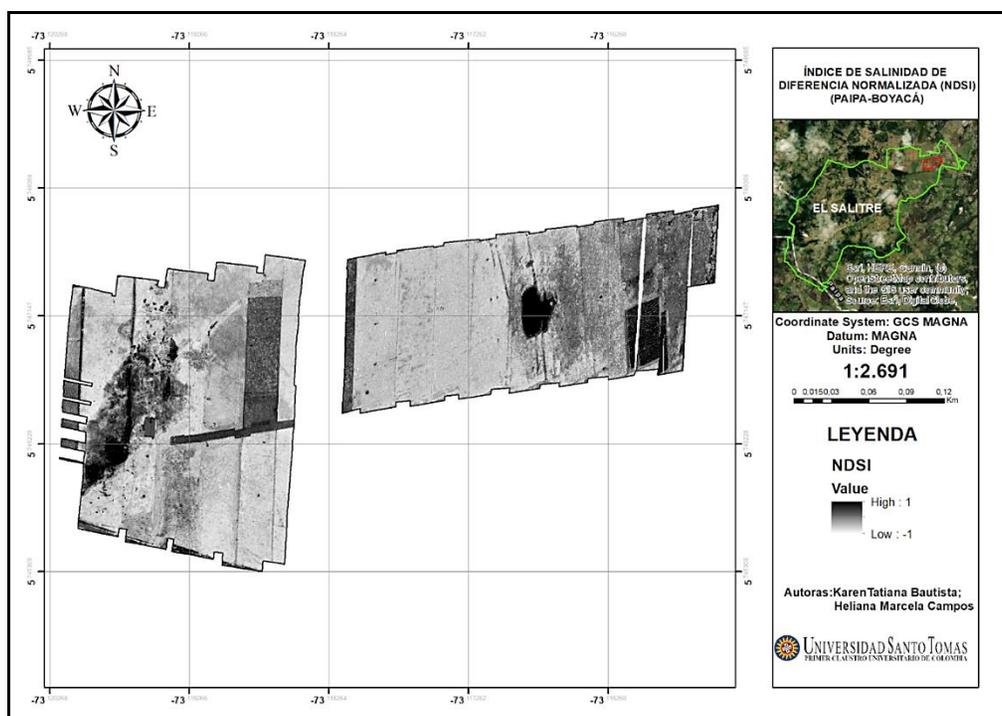
La *clase muy alta*, abarca un área de 0,01 ha, con un 0.1% del área total de la zona de estudio, la *clase alta* abarca un área de 0,02 ha, con un 0.2%, la *clase media*, abarca un área de 1,71 ha, con un 23%, la *clase baja* abarca un área de 5,56 ha, con un 75%, la *clase muy baja*, abarca un área de 0,08 ha, que equivale al 1%. De lo cual, se puede inferir que la *clase baja* abarca el mayor porcentaje del área de estudio, demostrando que la salinidad ligera abarca más del 50% de la zona de estudio.

8.9.1.4 Índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI)

El NDSI, permite estimar y mapear la distribución espacial de la salinidad del suelo, a partir de las bandas de la región del rojo y el infrarrojo cercano (Asfaw et al., 2018). De acuerdo a esto, para calcular el NDSI, se seleccionaron las bandas 106 (Rojo) y 181 (Infrarrojo cercano), dando como resultado una imagen ráster con valores entre -1 a 1, que se compone de una serie de tonalidades entre blancos, grises y negros, la cual se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 15

Mapa índice de salinidad diferenciada normalizada (NDSI)



Fuente: Autoría propia.

A partir del NDSI, se aplica una reclasificación en ArcGIS, para asignar una característica a los valores entre -1 y 1, a fin de conocer la distribución espacial de la salinidad, mediante los siguientes valores:

Tabla 9

Clasificación de los rangos NDSI

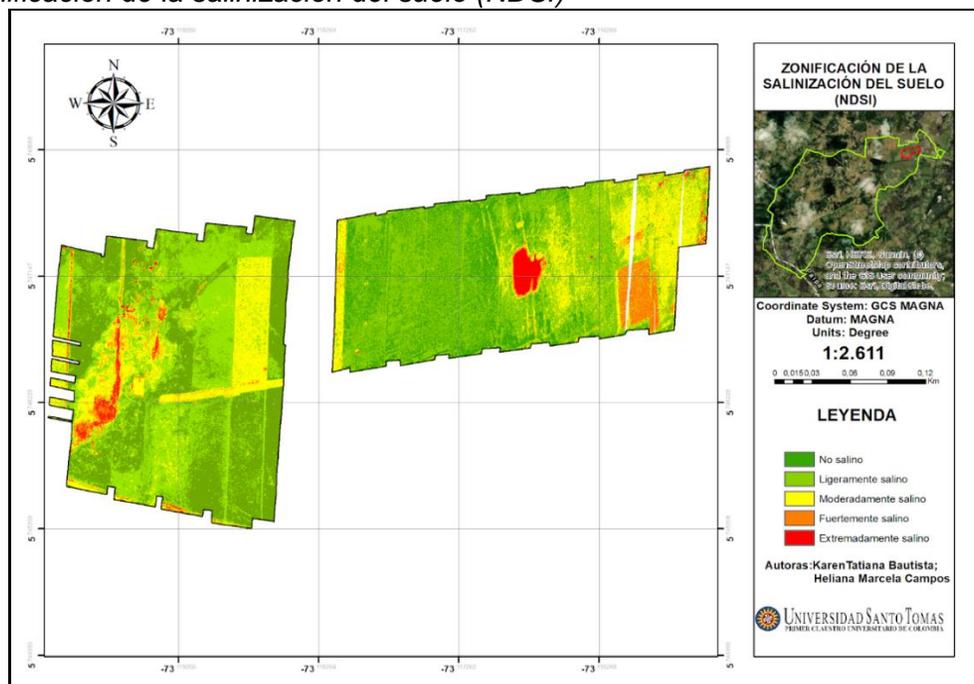
CLASIFICACIÓN NDSI			
RANGO (Valor de píxel)	CLASE	TONALIDAD	CARACTERÍSTICA
-1 - -0.6	Muy baja	Verde oscuro	No salino
-0.6 - 0	Baja	Verde claro	Ligeramente salino
0 - 0.5	Media	Amarillo	Moderadamente salino
0.5 - 0.9	Alta	Naranja	Fuertemente salino
0.9 - 1	Muy alta	Rojo	Extremadamente salino

Fuente: Autoría propia con base en (Medina, 2019); (Soca et al., 2016) y (Khan et al., 2005).

En el siguiente mapa se observa la distribución espacial de las clases de NDSI obtenidas a partir de la reclasificación, el cual se compone de una serie de tonalidades, que varían en relación al nivel de salinidad del suelo, por ende, píxeles con tono rojo y naranja, indican un suelo con elevada concentración de sal y píxeles con tonos amarillos y verdes, indican un suelo con media a baja concentración de sal.

Figura 16

Mapa zonificación de la salinización del suelo (NDSI)



Fuente: Autoría propia.

La *clase muy baja*, abarca un área de 2,29 ha, que equivale al 31% del área total de la zona de estudio, la *clase baja* abarca un área de 3,35 ha, con un 45%, la *clase media*, abarca un área de 1,29 ha, con un 18%, la *clase alta* abarca un área de 0,29 ha, con un 4% y la *clase muy alta* abarca un área de 0,15 ha, con un 2%. De lo cual, se puede inferir que la *clase baja* abarca el mayor porcentaje del área de estudio.

El análisis estadístico permite conocer las diferencias y similitudes entre el INDSAL y el NDSI, pues como se observa, en las dos imágenes obtenidas, la *clase baja*, es decir, salinidad ligera abarca la mayor parte del área de estudio. Sin embargo, presentan diferencias, ya que el NDSI discrimina de mejor manera las clases de salinidad, razón por la cual, el INDSAL presenta un porcentaje alto en la *clase baja*, es decir, salinidad ligera y un porcentaje muy bajo y poco significativo en las clases restantes, mientras que el NDSI presenta porcentajes significativos en la *clase baja*, que es el suelo ligeramente salino y en la *clase muy baja*, que es el suelo que no posee concentración de sal, además, presenta un porcentaje bajo en la *clase alta y muy alta*, es decir, aquel suelo con fuerte a extremada salinidad. Esta última clase de salinidad genera alta reflectancia, debido a la presencia de sales en la superficie, las cuales ascienden mediante la evaporación y evapotranspiración, originada porque el clima de la zona de estudio es frío y seco, con bajas precipitaciones (IDEAM et al., 2017).

El INDSAL y el NDSI, son sensibles a la reflectancia de aquellos suelos que además de estar afectados por sales, presentan vegetación escasa (Elhag, 2016) (Allbed et al., 2014b). Los valores del INDSAL, así como los del NDSI, dependen del estado de la vegetación, y a su vez, este estado depende del contenido de agua de la planta. Sin embargo, según diferentes estudios, el NDSI es uno de los índices que permite conocer con mayor precisión la concentración de sal en el suelo (Asfaw et al., 2018). De acuerdo esto, en relación a la zonificación de salinidad del territorio nacional, realizada por el IDEAM, se identifica la salinidad de la zona de estudio mediante el shape de *Zonificación de la degradación de suelos por salinización para el área continental e insular de Colombia a escala 1:100.000 y 1:10.000 respectivamente. Año 2016 – 2017*, proporcionado por el SIAC *Sistema de Información Ambiental de Colombia* (SIAC, 2017), esto mediante la elaboración del mapa de zonificación de salinidad de la zona de estudio (Anexo 9).

El mapa de salinización del IDEAM, concuerda significativamente con los resultados obtenidos del cálculo de los índices de salinidad del presente estudio, pues este muestra que la zona de estudio posee una *clase ligera* de salinidad que abarca un área de 9,59 ha que equivalen al 85.78% del área total la zona de estudio y una *clase muy ligera* que abarca un área de 1,58 ha que equivalen al 14.22% del área total la zona de estudio, lo que concuerda con los altos porcentajes de la salinización ligera identificada con los índices de salinidad.

8.10 Análisis de correlación lineal

La correlación tiene como objetivo determinar la fuerza y dirección de la relación entre dos variables cuantitativas a fin de conocer el comportamiento de estas, es decir, si una variable aumenta o disminuye respecto a la otra (Laguna, 2019). Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente estudio es necesario correlacionar los índices de vegetación, los índices de salinidad, y los índices de salinidad con las variables químicas de CE, RAS, PSI y pH, para validar su relación y precisión, razón por la cual, se lleva a cabo un análisis de correlación lineal de Pearson, siendo uno de los más utilizados en este tipo de estudios (Gorji et al., 2020); (A. González & Otálora, 2017) y (Nguyen et al., 2020). Para el caso de la presente investigación, este método se selecciona en relación a las características que presentan los valores que conforman estas variables, pues son cuantitativas, tienen una distribución normal bivariada (Restrepo & González, 2007), es decir que cada variable se aleja de manera moderada respecto a la otra, además, este tipo de correlación es paramétrica (I. Díaz et al., 2014), ya que cada variable cuenta con una escala de medición de intervalos, son independientes una de la otra (Laguna, 2019) y para cada valor de X existe un valor de Y (Restrepo & González, 2007).

Este tipo de correlación permite obtener: un gráfico de dispersión, conformado por una nube de puntos, una recta de regresión lineal, que busca conocer la cercanía entre dichos puntos, un coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), que mide el grado de asociación entre las variables, oscilando entre valores de -1 a 1, por lo cual, valores menores a 0, indican una correlación negativa y valores mayores a 1, indican una correlación positiva (Amat, 2016); también permite obtener un coeficiente de determinación (R^2), el cual se calcula elevando al cuadrado el valor del coeficiente de Pearson (r), que determina la bondad de ajuste entre dos variables, expresado en porcentaje de variabilidad, oscilando entre valores de 0% a 100%, de los cuales, valores cercanos a 0% indican un ajuste malo y valores cercanos a 100% indican un

ajuste bueno (Laguna, 2019). Estos coeficientes se pueden interpretar con las siguientes tablas:

Tabla 10

Clasificación del coeficiente de correlación (r)

Correlación de Pearson	
$r = -1$	Correlación negativa perfecta
$r \leq -0.5$	Correlación negativa
$r = 0$	No hay correlación
$r \geq 0.5$	Correlación positiva
$r = 1$	Correlación positiva perfecta

Fuente:(Martínez et al., 2009).

Tabla 11

Clasificación del coeficiente de determinación (R^2)

Coeficiente de determinación (R^2)	
$R^2 < 50\%$	Mala
$R^2 > 50\%$	Buena

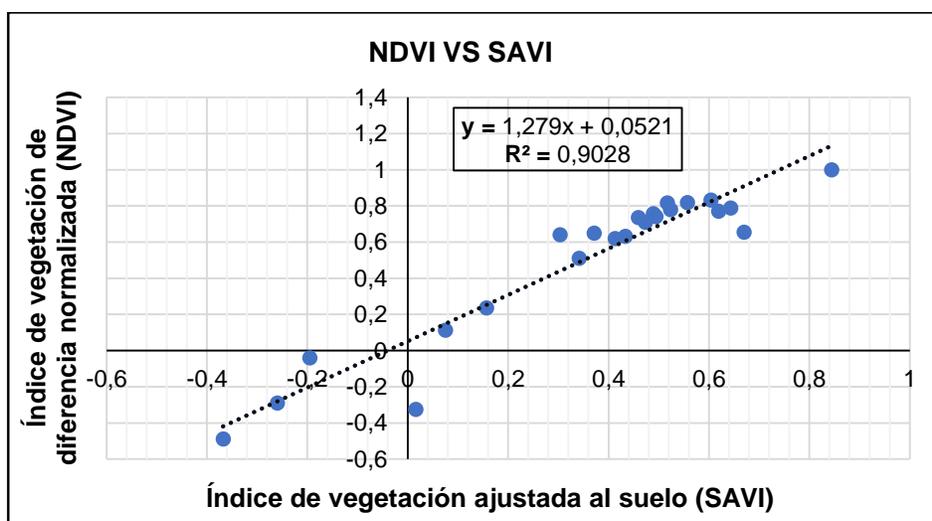
Fuente: (Martínez et al., 2009).

8.10.1 Correlación de los índices de vegetación

La correlación lineal de Pearson entre el NDVI y el SAVI, se realiza utilizando los valores de los índices donde se localiza la vegetación circundante a las 23 cajuelas de estudio (Anexo 11), obteniendo una gráfica de dispersión que permite identificar el comportamiento entre dichas variables.

Figura 17

Correlación de Pearson entre NDVI y SAVI



Fuente: Autoría propia.

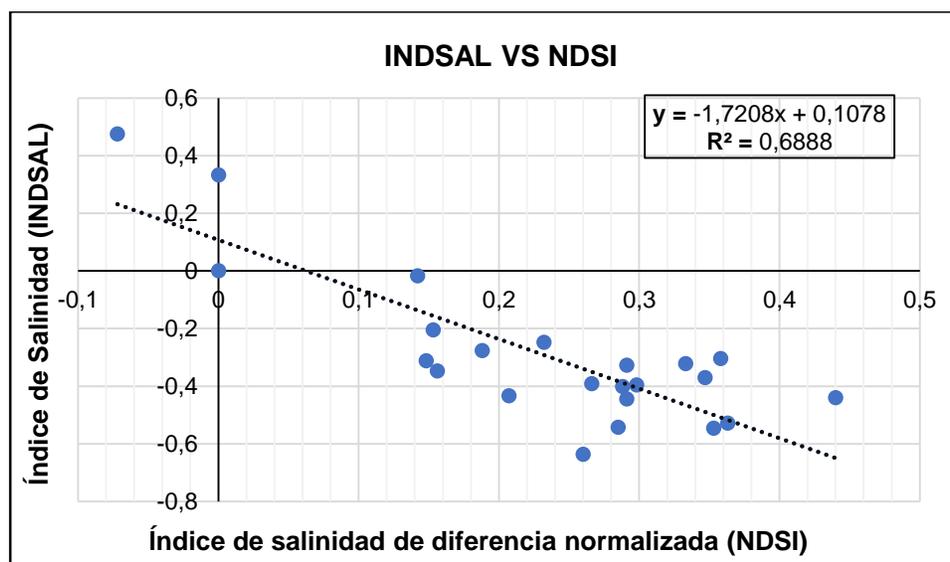
La gráfica de dispersión de los índices de vegetación muestra que la línea recta de regresión aumenta de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el primer cuadrante del plano cartesiano, los cuales tienden a concentrarse en la línea recta. A partir de los valores que componen la gráfica, se puede extraer el valor del coeficiente de Pearson (r), que es de 0,95, con el cual se puede inferir que la correlación es *positiva*, debido a que el valor es mayor a 0,5 y a medida que aumentan los valores del NDVI, aumentan los valores del SAVI y viceversa, además, es *perfecta* porque la nube de puntos está ubicada relativamente cerca de la línea recta. Por último, el coeficiente de determinación (R^2), es de 90%, lo que indica que la bondad de ajuste es buena, pues el R^2 se acerca a 100%, demostrando que los valores de los índices presentan una mínima variación (Martínez et al., 2009).

8.10.2 Correlación de los índices de salinidad

La correlación lineal de Pearson del INDSAL y NDSI, se realiza utilizando los valores de los índices donde se localizan las 23 cajuelas de estudio (Anexo 11), obteniendo una gráfica de dispersión que permite identificar el comportamiento entre dichas variables.

Figura 18

Correlación de Pearson entre INDSAL y NDSI



Fuente: Autoría propia.

La gráfica de dispersión de los índices de salinidad muestra que la línea recta de regresión disminuye de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el cuarto cuadrante del plano cartesiano, los cuales están un poco dispersos respecto a la línea recta. A partir de los valores que componen la gráfica, se puede extraer el valor del coeficiente de Pearson (r), que es de -0,8, con el cual se puede inferir que la correlación es *negativa*, debido a que el valor es menor a -0,5 y a medida que aumentan los valores del INDSAL, disminuyen los valores del NDSI y viceversa. Por último, el coeficiente de determinación (R^2), es de 69%, lo que indica que la bondad de ajuste es *buena*, pues el R^2 es mayor al 50%, demostrando que los valores de los índices presentan variación (Martínez et al., 2009).

En la siguiente tabla se presenta los valores del coeficiente Pearson (r) y del coeficiente de determinación (R^2), obtenidos de la correlación de los índices de vegetación y salinidad:

Tabla 12

Resultados de la correlación de los índices de vegetación y salinidad

CORRELACIÓN	r	R^2
NDVI VS SAVI	0,95	90%
INDSAL VS NDSI	-0,8	69%

Fuente: Autoría propia.

8.10.3 Correlación de índices de salinidad con variables químicas

De acuerdo a los resultados de los dos índices de salinidad, y a los resultados físico químicos de laboratorio, obtenidos a partir de las muestras de suelo tomadas a 25 cm de las 23 cajuelas, se hace necesario conocer la correlación que existe entre los valores del INDSAL y NDSI de cada cajuela, con los valores de cuatro variables químicas (Anexo 10), tales como: conductividad eléctrica (CE), relación de absorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y potencial de hidrogeno (pH) de cada cajuela, teniendo en cuenta que son los indicadores químicos más utilizados a nivel global para estimar la salinidad y/o sodicidad en el suelo (L. Otero et al., 2008). Para la correlación, se tomaron previamente los

valores de INDSAL y NDSI de las 23 cajuelas, en su respectiva coordenada geográfica, obteniendo un total de 8 correlaciones lineales de Pearson.

8.10.3.1 Correlación de la Conductividad Eléctrica (CE) con INDSAL y NDSI

La conductividad eléctrica (CE), es la capacidad que tiene una determinada solución de transmitir electricidad, la cual depende del contenido de sales (Jaramillo, 2002). La medida de CE, permite conocer la cantidad de sales presentes en una solución extraída del suelo humectado; se expresa por lo general en dSm^{-1} *decisiemen/metro* a 25°C (Badia, 1992), y su valor depende de la composición de las sales disueltas. A medida que aumenta el valor de CE, mayor es la salinidad del suelo (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca(CAR),2018), razón por la cual, se correlaciona con el INDSAL y el NDSI. A continuación, se puede observar la clasificación de los suelos salinos, en relación a la conductividad eléctrica y la correlación de los índices con este indicador químico:

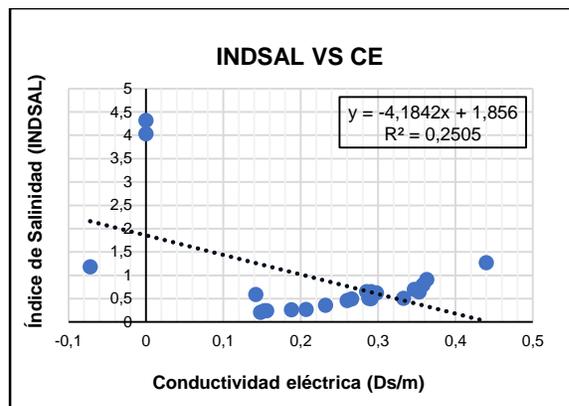
Tabla 13

Suelos salinos según conductividad eléctrica

CLASIFICACIÓN	CE (dSm^{-1})
No salino	0-2
Ligeramente salino	2-4
Moderadamente salino	4-8
Fuertemente salino	8-16
Extremadamente salino	> 16

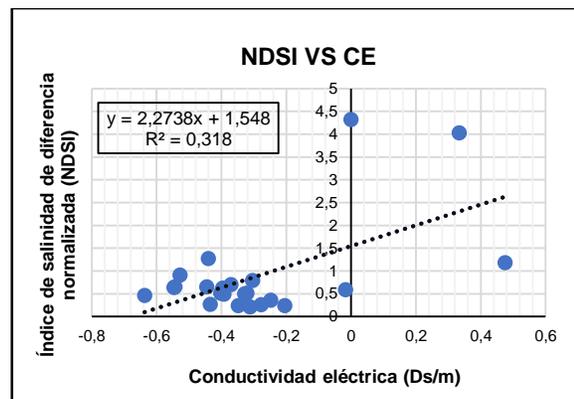
Fuente: (Medina, 2019).

Figura 19
Correlación de Pearson entre INDSAL y CE



Fuente: Autoría propia.

Figura 20
Correlación de Pearson entre NDSI y CE



Fuente: Autoría propia.

La gráfica de dispersión del INDSAL con la CE (Figura 19), muestra que la línea recta de regresión disminuye de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el primer cuadrante del plano cartesiano, los cuales están dispersos alrededor de la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de $-0,5$, con el cual, se puede inferir que la correlación es *negativa*, debido a que el valor es igual a $-0,5$ y a medida que disminuyen los valores del INDSAL, aumentan los valores de la conductividad eléctrica. El coeficiente de determinación (R^2), es de 25%, lo que indica que la bondad de ajuste es *mala*, pues el R^2 se acerca a 0%, demostrando que los valores de las variables estudiadas presentan una alta variación (Martínez et al., 2009). Este comportamiento *negativo*, se debe a que a medida que aumenta el valor de la CE, hay mayor contenido de sales y/o sodios, mientras que, entre menor es el valor del índice de salinidad, mayor contenido de sales y/o sólidos presenta el suelo.

Por otra parte, la gráfica de dispersión del NDSI con la CE (Figura 20), muestra que la línea recta de regresión aumenta de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el segundo cuadrante del plano cartesiano, los cuales están moderadamente dispersos de la línea recta. A partir de los valores que componen la gráfica, se puede extraer el valor del coeficiente de Pearson (r), que es de $0,6$, con el cual se puede inferir que la correlación es *positiva*, debido a que el valor es mayor a $0,5$ y a medida que aumentan los valores del NDSI, aumentan los valores de la conductividad eléctrica. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 32%, lo que indica que la bondad de ajuste es *mala*, pues el R^2 se acerca a 0% (Martínez et al., 2009), demostrando que los valores de las variables estudiadas

presentan una alta variación y la recta muestra menos del 50% de la relación de los valores (Laguna, 2019). Este comportamiento directo, se debe a que a medida que aumenta el valor de CE, hay mayor contenido de sales y/o sólidos en el suelo, pasando de igual forma con el NDSI.

8.10.3.2 Correlación de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) con INDSAL y NDSI

La relación de absorción del suelo (RAS), es un indicador que se usa para identificar problemas de sodicidad, el cual expresa la proporción relativa del sodio en relación al calcio y al magnesio, los cuales participan como cationes divalentes, compitiendo con el sodio por el intercambio catiónico. Un valor de RAS mayor o igual a 13 meq/l *miliequivalentes/litro* indica que el suelo es sódico (Courel, 2019), razón por la cual, se correlaciona con el INDSAL y el NDSI. A continuación, se puede observar la clasificación de los suelos sódicos, según la relación de absorción del suelo y la correlación de los índices con este indicador químico:

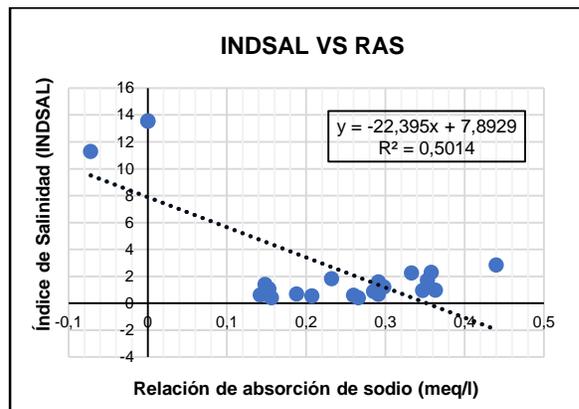
Tabla 14

Suelos sódicos según conductividad eléctrica

CLASIFICACIÓN	RAS (meq/l)
No sódico	< 13
Bajo en sodio	13 - 25
Moderadamente sódico	25 - 45
Fuertemente sódico	> 45

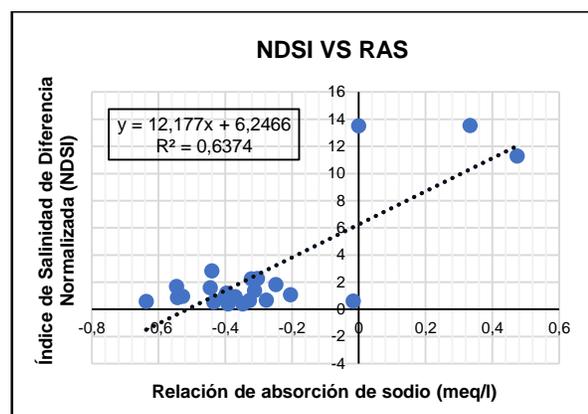
Fuente: (Medina, 2019).

Figura 21
Correlación de Pearson entre INDSAL y RAS



Fuente: Autoría propia.

Figura 22
Correlación de Pearson entre NDSI y RAS



Fuente: Autoría propia.

La gráfica de dispersión del INDSAL con la RAS (Figura 21), muestra que la línea recta de regresión que disminuye de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el primer cuadrante del plano cartesiano, los cuales están dispersos alrededor de la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de $-0,7$, con el cual, se puede inferir que la correlación es *negativa*, debido a que el valor es menor a $-0,5$ y a medida que disminuyen los valores del INDSAL, aumentan los valores de la RAS. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 50% , lo que indica que la bondad de ajuste es moderadamente *buen*a, pues el R^2 se acerca medianamente a 100% , demostrando que los valores de las variables estudiadas presentan una moderada variación (Martínez et al., 2009). Este comportamiento *negativo*, se debe a que a medida que aumenta el valor de la RAS, hay mayor contenido de sodios, mientras que, entre menor es el valor INDSAL, mayor contenido de sales y/o sólidos hay en el suelo.

Por otra parte, la gráfica de dispersión del NDSI con la RAS (Figura 22), muestra que la línea recta de regresión aumenta de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el segundo cuadrante del plano cartesiano, los cuales están moderadamente dispersos alrededor de la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de $0,8$, con el cual, se puede inferir que la correlación es *positiva*, debido a que el valor es mayor a $0,5$ y a medida que aumentan los valores del NDSI, aumentan los valores de la conductividad eléctrica. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 64% , lo que indica que la bondad de ajuste es buena, pues el R^2 es mayor al 100% (Martínez et al., 2009), demostrando que los valores de

las variables estudiadas presentan una alta variación y la recta muestra más del 50% de la relación entre los valores (Laguna, 2019). Este comportamiento *positivo*, se debe a que a medida que aumenta el valor de la RAS hay mayores contenidos de sodio, pasando de igual forma con el NDSI.

8.10.3.3 Correlación del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) con INDSAL y NDSI

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI), es un indicador común de salinidad y sodicidad, el cual representa el porcentaje de sodio. Para calcularlo, se debe identificar el contenido de sodio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. Por lo general, un valor de PSI mayor o igual a 15% indica que el suelo es afectado por sales (Pita, 2017), puesto que presenta problemas debido al elevado contenido de sodio en el complejo de intercambio (Jaramillo, 2002), razón por la cual, se correlaciona con el INDSAL y el NDSI.

A continuación, se puede observar la clasificación de los suelos sódicos, en relación al porcentaje de sodio intercambiable y la correlación de los índices con este indicador químico:

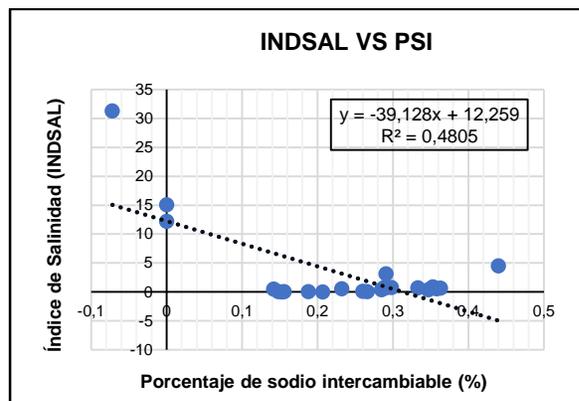
Tabla 15

Suelos sódicos según sodio intercambiable

CLASIFICACIÓN	PSI (%)
No sódico	< 7
Ligeramente sódico	7 - 15
Moderadamente sódico	15 - 20
Fuertemente sódico	20 - 30
Muy fuertemente sódico	> 30

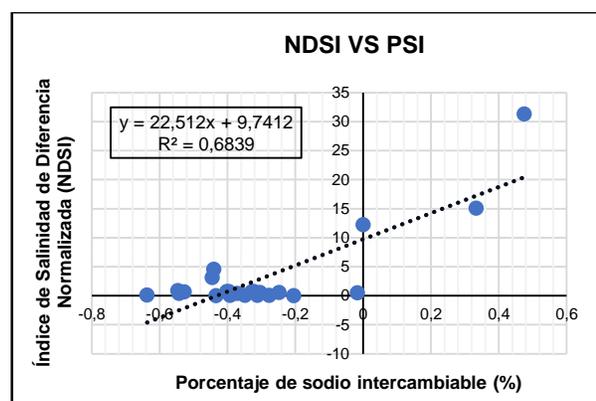
Fuente: (Medina, 2019).

Figura 23
Correlación de Pearson entre INDSAL y PSI



Fuente: Autoría propia.

Figura 24
Correlación de Pearson entre NDSI y PSI



Fuente: Autoría propia.

La gráfica de dispersión del INDSAL con el PSI (Figura 23), muestra que la línea recta de regresión disminuye de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el primer cuadrante del plano cartesiano, los cuales están dispersos a la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de $-0,7$, con el cual, se puede inferir que la correlación es *negativa*, debido a que el valor es menor a $-0,5$ y a medida que disminuyen los valores del INDSAL, aumentan los valores del PSI. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 48% , lo que indica que la bondad de ajuste es *mala*, pues el R^2 es menor al 50% , demostrando que los valores de las variables estudiadas presentan una alta variación, evidenciándose en la nube de puntos, ya que no están ubicada relativamente cerca de la línea recta (Martínez et al., 2009). Este comportamiento *negativo*, se debe a que a medida que aumenta el valor del PSI hay mayor contenido de sales y/o sodios, mientras que, entre menor es el valor del índice de salinidad mayor contenido de sales y/o sólidos hay en el suelo.

Por otra parte, la gráfica de dispersión del NDSI con el PSI (Figura 24), muestra que la línea recta de regresión aumenta de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el segundo cuadrante del plano cartesiano, los cuales están moderadamente dispersos a la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de $0,8$, con el cual, se puede inferir que la correlación es *positiva*, debido a que el valor es mayor a $0,5$ y a medida que aumentan los valores del NDSI, aumentan los valores del PSI. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 68% , lo que indica que la bondad de ajuste es *buen*a, pues el R^2 es mayor a 50% (Martínez et al., 2009), demostrando que los valores de las variables estudiadas

presentan una baja variación y la recta muestra más del 50% de la relación entre las dos variables (Laguna, 2019). Este comportamiento *positivo*, se debe a que a medida que aumenta el valor del PSI hay mayor contenido de sales y/o sólidos en el suelo, pasando de igual forma con el NDSI.

8.10.3.4 Correlación del potencial de hidrógeno (pH) con INDSAL y NDSI

El potencial de hidrógeno (pH), es una medida que representa el grado de acidez o basicidad de una solución, su valor oscila entre 0 y 14, de manera que, si el valor de pH es inferior a 7, la solución es ácida, por el contrario, si el valor es superior a 7, la solución es básica, lo que indica que, un valor de 7 corresponde a una solución neutra (Goyenola, 2007), razón por la cual, se correlaciona con el INDSAL y el NDSI. A continuación, se puede observar la clasificación de los suelos, en relación al potencial de hidrógeno y la correlación de los índices con este indicador químico:

Tabla 16

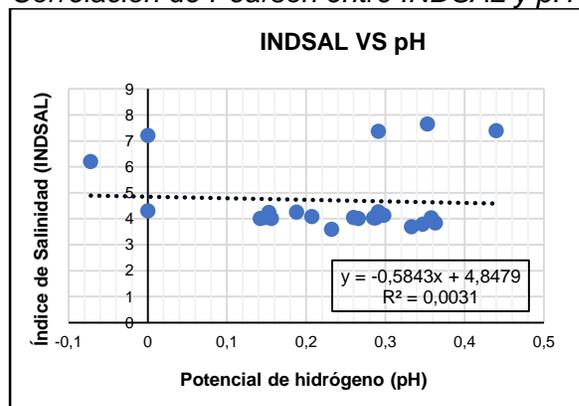
Clasificación del pH

CLASIFICACIÓN	pH
Fuertemente ácido	< 5
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Fuente: (Medina, 2019).

Figura 25

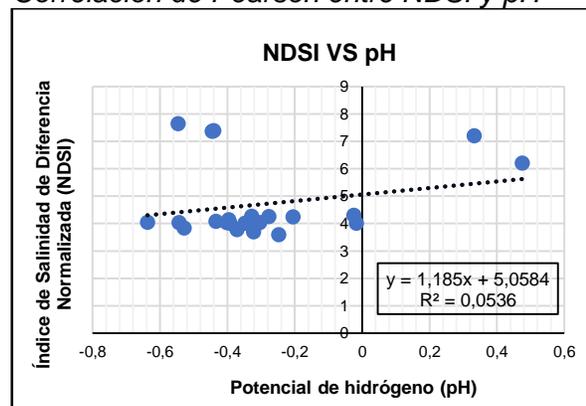
Correlación de Pearson entre INDSAL y pH



Fuente: Autoría propia.

Figura 26

Correlación de Pearson entre NDSI y pH



Fuente: Autoría propia.

La gráfica de dispersión del INDSAL con el pH (Figura 25), muestra que la línea recta de regresión disminuye ligeramente de izquierda a derecha, con una nube de puntos ubicados principalmente en el primer cuadrante del plano cartesiano, los cuales están dispersos en la línea recta, generando un coeficiente de Pearson (r) de -0,05, con el cual, se puede inferir que no hay correlación, puesto que el valor es cercano a 0. Además, el coeficiente de determinación (R^2), es de 0%, lo que indica que la bondad de ajuste es *mala*, pues el R^2 es de 0%, demostrando que los valores de las variables estudiadas no se relacionan. Al igual que el INDSAL, el NDSI no presenta correlación con el pH (Figura 26), pues tiene un coeficiente de Pearson (r) de 0,2, además, el coeficiente de determinación (R^2) es de 5%, lo que de igual forma indica que la bondad de ajuste es *mala* (Martínez et al., 2009). Este comportamiento se debe a que los suelos salinos suelen presentar pH entre 7,3 y 8,5 ((IGAC), 2016), mientras que, para el caso del presente estudio, según los análisis de laboratorio y las unidades cartográficas, el suelo es muy ácido, con un pH promedio de 4,7.

En la siguiente tabla se presenta los valores del coeficiente Pearson (r) y del coeficiente de determinación (R^2), obtenidos de la correlación entre los índices de salinidad con las variables químicas del suelo:

Tabla 17

Resultados de la correlación entre los índices de salinidad con las variables químicas del suelo

CORRELACIÓN	r	R^2
CE VS INDSAL	-0,5	25%
CE VS NDSI	0,6	32%
RAS VS INDSAL	-0,7	50%
RAS VS NDSI	0,8	64%
PSI VS INDSAL	-0,7	50%
PSI VS NDSI	0,8	68%
pH VS INDSAL	-0,05	0%
pH VS NDSI	0,2	5%

Fuente: Autoría propia.

Las correlaciones realizadas entre las variables químicas de CE, RAS, PSI y pH, con el INDSAL y el NDSI, permiten determinar que se presenta una mayor correlación entre el PSI y la RAS con los índices, sin embargo, el índice que presenta mayor correlación con las variables es el NDSI, lo cual concuerda con diferentes estudios realizados, puesto que, como anteriormente se nombró, este índice presenta una alta precisión. De acuerdo a los rangos entre los que se evalúan los índices de salinidad y las variables químicas del suelo de las 23 cajuelas, se identifica que los valores de los índices indican que el suelo se caracteriza por ser ligero a moderadamente salino, mientras que, según las variables químicas, la mayoría de las muestras de suelo no presentan salinidad, y el restante son ligeramente salinas, demostrando que, la utilización de imágenes hiperespectrales permite detectar de manera más detallada el contenido de sales y/o sodios en los suelos.

8.11 Afectación en la vegetación

El cálculo de los índices de vegetación y salinidad permite zonificar la vegetación que presenta afectación, ya sea por estar en una condición escasa o enferma, o por estar ubicada en suelos con presencia de sales. Sin embargo, para estimar el porcentaje de vegetación afectada de la zona de estudio, generado por estas dos condiciones, se hace necesario llevar a cabo una evaluación multicriterio, a fin de identificar aquellas áreas de estudio, que además de presentar vegetación afectada, presentan problemas de salinidad.

Para la evaluación multicriterio, se realiza una superposición ponderada de capas, que, en este caso, son los ráster obtenidos de la reclasificación del NDVI (Figura 10) y el NDSI (Figura 16), seleccionados por su potencial para discriminar la vegetación y la salinidad del suelo y por su alta correlación con los resultados de las variables químicas estudiadas. La superposición ponderada se lleva a cabo mediante la herramienta Weighted Overlay de ArcGIS 10.3.1, en la que es importante establecer una ponderación, que permita identificar la magnitud de afectación generada por las características de cada índice. Para el presente estudio, se establece la siguiente ponderación:

Tabla 18*Ponderación para la superposición de capas*

Ponderación	Característica
1	Zona sin vegetación
2	Afectación
3	Sin afectación

Fuente: Autoría propia.

El valor más bajo, que es 1, es asignado a las variables que no representan vegetación en la zona de estudio, el valor medio, que es 2, es asignado a las variables que presentan o generan afectación, y el valor más alto, que es 3, es asignado a las variables más favorables, es decir, aquellas que no presentan o generan afectación en la zona de estudio. De esta manera, los ráster del NDVI y NDSI adquieren los siguientes valores:

Tabla 19*Ponderación NDVI*

Rango	Características	Ponderación
-1- 0	Roca o vegetación muerta	1
0 - 0.2	Suelo desnudo o vegetación enferma	2
0.2 - 0.4	Vegetación escasa	2
0.4 - 0.6	Vegetación densa semi húmeda	2
0.6- 0.8	Vegetación densa húmeda	3
0.8 - 1	Vegetación muy densa húmeda	3

Fuente: Autoría propia**Tabla 20***Ponderación NDSI*

Rango	Características	Ponderación
-1- -0.6	No salino	3

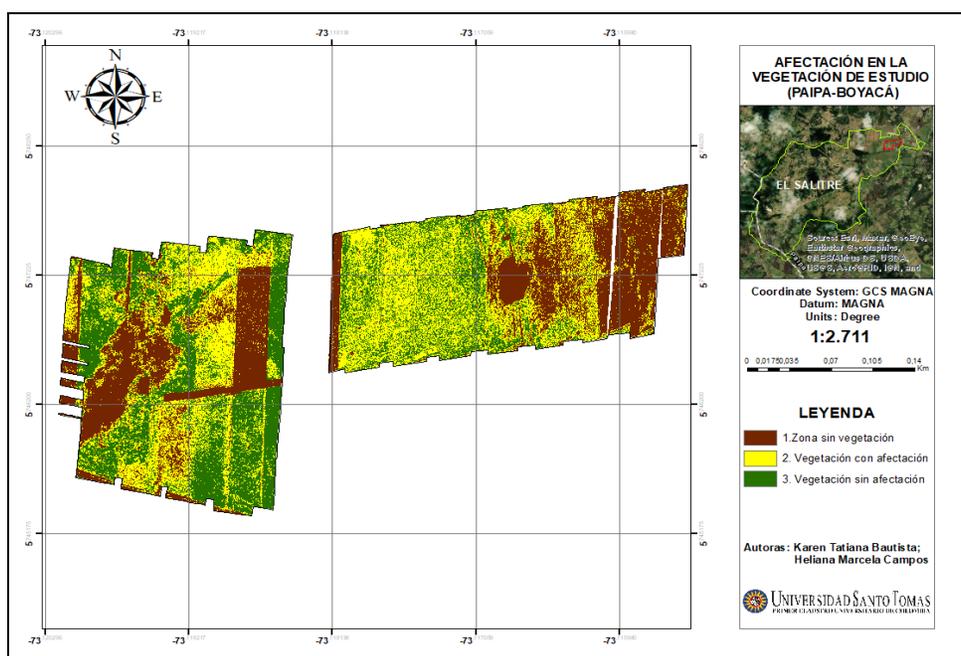
-0.6 - 0	Ligeramente salino	2
0 - 0.5	Moderadamente salino	2
0.5 - 0.9	Fuertemente salino	2
0.9 - 1	Extremadamente salino	2

Fuente: Autoría propia.

Mediante la herramienta Weighted Overlay, se establece la escala de evaluación utilizada, que en este caso oscila entre un rango de 1 a 3, y se agregan los ráster NDVI y NDSI con su respectiva ponderación, para superponerlos. Finalmente, se obtiene un ráster, donde se identifican aquellas zonas con ponderación 1, 2 y 3, como se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 27

Mapa afectación de la vegetación de la zona de estudio



Fuente: Autoría propia.

La zona de estudio abarca 7,37 ha, de las cuales 2,40 ha, que equivalen al 33% que corresponden a *zona sin vegetación*, es decir, aquella zona con suelo desnudo o roca, mientras que el área restante, que es de 4,97 ha, corresponde a zonas con presencia de vegetación. A

partir del área con presencia de vegetación, es posible identificar el porcentaje de vegetación que se encuentra saludable y densa, y que se encuentra en un suelo libre de salinidad, por su parte, la vegetación que está afectada, es decir, la vegetación enferma o escasa, y que se encuentra en suelo con problemas de salinidad. Entonces, la *vegetación sin afectación* corresponde a un 46%, abarcando 2,29 ha, mientras que el porcentaje restante, es decir, el 54%, corresponde a la *vegetación con afectación*, abarcando 2,68 ha de la zona de estudio.

Las características que permiten la generación de procesos de salinización en el suelo, son particularmente: la erupción de ceniza volcánica conformada por sales procedentes de algunos componentes del azufre, como sulfitos, sulfatos o sulfuros, la presencia de aguas termales, corrientes o nacimientos con contenidos de minerales salinos, la escorrentía de agua que arrastra sedimentos salinos, los climas secos o áridos con bajas precipitaciones y las prácticas agrícolas antrópicas inadecuadas (IDEAM et al., 2017). Además, las características que representan a un suelo en condiciones salinas son: la presencia de una roca madre sedimentaria con elevada concentración de sales solubles, la capa freática próxima a la superficie, el suelo localizado en un relieve con valles y depresiones, es decir, un suelo de textura fina con mal drenaje (J. Otero et al., 2002). De acuerdo a esto, es posible inferir que el suelo de estudio cumple con todas las características mencionadas, principalmente por la cercanía de aguas termales (Rocha & Parra, 2011), debido a que el municipio de Paipa pertenece a la Cuenca Alta del Río Chicamocha en la cual se encuentran pozos salinos (Corpoboyacá et al., 2006).

Los procesos de salinización en el suelo ocasionan diversos problemas en la vegetación, afectando su respuesta fotosintética, pues la concentración de sal genera diferentes procesos que intervienen en el crecimiento de las plantas, tales como: efecto osmótico, efecto iónico específico y efecto del sodio intercambiable, limitando la absorción de nutrientes esenciales para las plantas, tales como: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S), Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo) y Zinc (Zn) (J. Barrera et al., 2007). En relación al efecto osmótico, este ocasiona estrés hídrico en la planta, debido a que, la concentración de sales en el suelo, aumenta la presión osmótica, es decir, que aunque el suelo contenga agua, se le dificulta a la planta absorber el agua mediante sus raíces, de manera que la mayor cantidad de agua es almacenada en el suelo (Badia, 1992), pues el agua fluye de la planta al suelo, causando que la planta se deshidrate y se marchite (IDEAM et al.,

2017), disminuyendo así su crecimiento normal (Badia, 1992), además, la acumulación de sales en la planta, ocasionan la pérdida de las hojas más viejas (Lamz & González, 2013).

El efecto iónico específico, genera toxicidad en la planta, debido a la elevada absorción de sodio (Na), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}), los cuales, son iones tóxicos que se encuentran en el agua del suelo y son captados y acumulados por la planta, ocasionando cambios en las funciones de sus membrana, alteración en su proceso de fotosíntesis y variación en su metabolismo, lo que modifica el balance energético de la planta, de manera que consume mayor energía para mantener la cantidad mínima de agua que requiere y no la utiliza para su proceso de crecimiento. Sumado a esto, el aumento de sodio (Na) en la planta, afecta la germinación de las semillas, debido a la toxicidad que genera, pues el sodio, reemplaza al calcio en la pared celular de la planta, lo que podría generar un fracturamiento de la síntesis de la pared celular, impidiendo el crecimiento de la planta (Lamz & González, 2013). Tanto el efecto osmótico como el efecto iónico específico pueden generar la muerte de la planta antes de que complete sus etapas de desarrollo (Courel, 2019).

El efecto del sodio intercambiable, ocurre cuando la proporción de sodio (Na) en el suelo, aumenta respecto al calcio (Ca), magnesio (Mn) y potasio (K) (Badia, 1992), pues a medida que aumenta el contenido de sodio, también aumenta su pH, adquiriendo alcalinidad (Piñeiro et al., 2006), razón por la cual, el Ca , Mn y K , forman compuestos insolubles, que no son captados como nutrientes minerales por las plantas, limitando su crecimiento ((FAO), 1998), además, de generar cambio en la actividad enzimática de la planta. Por otra parte, cuando hay un déficit de potasio (K) en la planta, este ocasiona clorosis, propiciando la necrosis a medida que aumenta el déficit (Lamz & González, 2013). Sin embargo, respecto al efecto del sodio intercambiable, este es poco probable que genere afectaciones en la vegetación de estudio, teniendo en cuenta que, los resultados de los análisis fisicoquímicos de laboratorio muestran que, la mayoría de las 23 muestras de suelo, presentan un pH muy ácido, y a su vez, la concentración de sodio es mínima, mientras que el efecto osmótico y el efecto iónico específico presentan más posibilidades de generar afectaciones en la vegetación y por ende en la respuesta fotosintética, debido al tipo de suelo de la zona de estudio.

Consecuente a lo anterior, el estudio realizado previamente mediante el análisis de la imagen hiperespectral y los resultados físico químicos de laboratorio, permiten inferir que la mayor parte del suelo de estudio, es sulfatado ácido, lo cual se puede constatar con un estudio

realizado por Gómez et al., (2005), en el que afirma que el distrito de riego del Alto Chicamocha, el cual se localiza en el centro del departamento de Boyacá, presenta suelos sulfatados ácidos, afectando alrededor de 3.000 ha, los cuales se originan a partir de sedimentos fluviales lacustres y presentan depósitos de material parental ricos en pirita (sulfuros de hierro) (IDEAM et al., 2017).

Mediante las firmas espectrales del suelo, obtenidas a partir de la imagen hiperespectral, también se comprueba que los suelos de estudio son sulfatados ácidos, pues las firmas indican la presencia de óxido de hierro en la región del rojo del espectro electromagnético, debido al aumento de la reflectancia en esta región, lo que caracteriza a estos suelos, pues al presentar un mal drenaje, se propicia la oxigenación del suelo y por ende, la oxidación de materiales de hierro y azufre, como la pirita, convirtiéndolos en ácido sulfúrico y Jarosita *sulfatos de hierro*, que a su vez, reducen el pH considerablemente (IDEAM et al., 2017). Así mismo, en los resultados fisicoquímicos del suelo, se identificó que los suelos son sulfatados ácidos, porque el tipo de sal dominante en el suelo son los sulfatos ($MgSO_4$, Na_2SO_4), además, junto con los cloruros, son las sales que conforman la mayoría de los suelos salinos ((IGAC), 2016). Sumado a esto, son suelos sulfatados ácidos, debido a que el pH es ácido, pues las muestras de suelo poseen un pH aproximado de 4,7 y según las unidades cartográficas VMA y AMV que abarcan la zona de estudio, el suelo presenta reacciones ácidas.

Este pH ácido, afecta la estructura cristalina de las arcillas, permitiendo la liberación de iones de aluminio en el suelo, ocasionando daños en las raíces de las plantas, pues atrofian su sistema radicular (Bernal & Forero, 2014), y así mismo, afectando la estructura y funcionamiento de la membrana, además de generar una parálisis de la síntesis del ADN y disminución de la respiración radical, entre otros (Caballero et al., 2007). Sin embargo, es preciso aclarar que los resultados fisicoquímicos de las muestras de suelo, muestran que el suelo no posee características homogéneas, pues 3 muestras de suelo, que correspondientes a la cajuela 1, 2 y 3, indican que el suelo es salino sódico, pues la CE es mayor a 4 dSm^{-1} y el PSI es mayor a 15%, no obstante, tanto el suelo sulfatado ácido, como el suelo salino sódico, al ser suelos con presencia de sales, ocasionan afectaciones similares en la vegetación, aunque se diferencia en que al ser un suelo con presencia de sodio tiene más posibilidades de presentar afectaciones por el efecto del sodio intercambiable.

Por último, el análisis multicriterio realizado del NDVI y el NDSI, junto con los resultados de los índices de salinidad y vegetación y los análisis fisicoquímicos del suelo realizados en la zona de estudio, permiten concluir que la vegetación no muestra un nivel de afectación alto, pues aunque los suelos presentan una clase de salinidad sulfatada ácida, esta, según los índices de salinidad, demuestran que la clase está produciendo una afectación ligera, ya que esta característica abarca la mayor parte de la zona de estudio, por ende los índices de vegetación demuestran de igual forma, que la vegetación tampoco está siendo fuertemente afectada por este tipo de salinidad. Cabe resaltar, que, si no se realiza un adecuado y oportuno tratamiento de este tipo de salinidad, este proceso de degradación puede incrementar su afectación en los suelos a futuro, haciendo más difícil su restauración.

8.12 Estrategias para prevenir, mitigar y/o controlar la afectación en la vegetación generada por la salinización en la zona de estudio

Para mejorar las características de los suelos sulfatados ácidos, se han desarrollado diferentes estrategias que implican la modificación de sus propiedades químicas, a fin de convertirlos en suelos afines a los requerimientos que exigen las plantas o cultivos que se deseen implementar. A través del tiempo, se ha demostrado que algunas prácticas agrícolas, no son sostenibles, pues utilizan grandes cantidades de insumos, que por ende generan altos costos para su aplicación (Castro, 1998). Algunas estrategias que sirven para tratar este tipo de suelo o para cultivar plantas que se adapten a las condiciones del suelo son:

8.12.1 Encalado del suelo

El encalado, es una enmienda orgánica que permite corregir la acidez de los suelos, mediante la neutralización del aluminio intercambiable (Al^{+3}) y el hidrógeno (H) de la solución del suelo, generada a partir de la aplicación del material encalante (Combatt et al., 2009). Entre los materiales de encalado, se encuentra la cal agrícola ($CaCO_3$), la cal viva (CaO), la cal apagada ($Ca(OH)_2$), la cal dolomítica ($CaCO_3 - MgCO_3$) y las escorias Thomas, las cuales son útiles para tratar los SSA *suelos sulfatados ácidos* (Council Environment Protection and Heritage, 2011), que se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de azufre, aluminio y hierro, que inhiben el crecimiento de los cultivos (Hernández, 2007).

La aplicación de cal, además de corregir la acidez en el suelo al aumentar el pH a valores neutrales ((FAO), 2020), disminuye las concentraciones del aluminio tóxico (Al^{+3}), siendo una relación inversamente proporcional (Mathew et al., 2001). A su vez, mejora la estructura, algunas propiedades físicas del suelo, entre ellas la permeabilidad, y el aumento de la actividad microbiana que permite la degradación de la materia orgánica, razón por la cual hace disponibles otros nutrientes esenciales para la planta como el fósforo (P), nitrógeno (N), Boro (B) entre otros. Estas condiciones elevan la productividad del suelo, disminuyendo los costos de producción y perfeccionando la eficiencia de los abonos (Sadeghian & (Cenicafé), 2016). Sin embargo, para el suelo del presente estudio, es preferible la aplicación de cal dolomítica, teniendo en cuenta que es útil para los suelos ácidos con deficiencia de calcio y magnesio (Castro, 1998).

8.12.1.1 Encalado del suelo con cal dolomítica.

La cal dolomítica, se compone de carbonatos de calcio ($CaCO_3$) en un 44 a 55% y carbonatos de magnesio ($MgCO_3$) en un 10 a 35%, la cual, según Bernal & Forero, (2014), actúa como un corrector eficiente para el manejo de suelos SSA *sulfatados ácidos* en el municipio de Paipa, Boyacá.

El calcio (Ca), es un elemento importante que conforma la membrana y la pared celular de la planta, que impiden la entrada de organismos que generan enfermedades, además, incrementa la salud de la planta, fortalece sus tallos, y sintetiza proteínas que eleva la absorción de nitrógeno. El magnesio (Mg), por su parte, es un elemento que constituye a la clorofila, siendo indispensable en la fotosíntesis de la planta, pues permite el metabolismo de los carbohidratos y la respiración celular.

El Ca, junto con el Mg y otros elementos, generan ventajas significativas para el desarrollo de las plantas, ya que mejoran su sistema radicular, permitiendo un aprovechamiento más sencillo de los nutrientes y una mejor captación de agua (ENLASA, 2018), además, le proporcionan resistencia a las plantas frente a enfermedades fungosas, favoreciendo su crecimiento (Osorno, 2012) y previenen la baja fertilidad del suelo ((FAO), 2020) mejorando la calidad y la cantidad de las cosechas (MINERHUILA, 2017).

La cantidad de cal aplicada en el suelo depende de la calidad del producto encalante, del grado de acidez del suelo, el tipo de arcillas y su capacidad buffer. Castro, (1998) sugiere que esta enmienda se aplique de forma manual, mediante arado o rastrillo, o de forma mecánica, mediante voleadora o encaladora, con mínimo un mes de anticipación a la siembra del cultivo, pues de lo contrario, puede generar reacciones entre el fósforo del fertilizante y el aluminio del suelo. Esta enmienda debe aplicarse preferiblemente en épocas lluviosas, pues es necesaria la humedad para que se produzca una reacción adecuada de la enmienda, generando un equilibrio en las condiciones químicas del suelo (Osorno, 2012).

El sobre-encalamiento, puede generar impactos ambientales perjudiciales para el suelo y las plantas, como lo es la falta de Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Fósforo (P), Potasio (K) y Boro (B), debido al desbalance de estos elementos con el Mg y Ca, y a su vez, la disminución del tamaño de los agregados, que afecta la estructura del suelo, propiciando una menor tasa de infiltración que promueve procesos erosivos (Osorno, 2012).

8.12.1.2 Encalado del suelo con la mezcla de cal dolomítica y yeso.

El yeso o también denominado sulfato de calcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), es una mezcla entre azufre y calcio, la cual le sirve a la planta para mejorar sus raíces, teniendo en cuenta que las reacciones generadas entre el ión aluminio y el anión sulfato producen la precipitación del aluminio, logrando suspenderse hasta el subsuelo por su solubilidad. Aunque el objetivo del yeso no es reducir específicamente la acidez, se han obtenido buenos resultados al aplicarlo en suelos con condiciones ácidas y elevadas concentraciones de aluminio, como por ejemplo en la altillanura colombiana. El efecto del yeso alcanza mayores profundidades en comparación a las cales, y a su vez, no vuelve ácido ni alcalino el suelo por ser una sal neutra, sin embargo, ayuda a eliminar el aluminio tóxico y aporta calcio al suelo (Osorno, 2012).

Entre los beneficios que aporta su aplicación a las plantas, se encuentra el aumento del rendimiento de los cultivos susceptibles a la acidez, permitiéndoles utilizar los nutrientes y el agua del subsuelo, el aumento de su resistencia al estrés hídrico durante más días (Rodríguez et al., 2013) y el incremento del contenido de minerales en los tejidos de las hojas (Meriño-Gergichevich et al., 2010). Sumado a estos beneficios, está el aumento de la infiltración, la agregación del suelo, y la disminución de la adsorción del sodio (Meriño-Gergichevich et al., 2010), de la erosión y de la escorrentía superficial (Rodríguez et al., 2013).

La aplicación de la mezcla de yeso y cal dolomítica al suelo, permite reducir su acidez en menor tiempo, en comparación a la aplicación de cal solamente. La mezcla de estas enmiendas se puede realizar de forma manual antes de ser aplicada al suelo o mediante procesos industriales. Las proporciones de la mezcla de yeso y cal suelen ser de 25% a 30% y 70% a 75% respectivamente (Osorno, 2012).

8.12.1.3 Enmienda del suelo con escorias y yeso.

Las escorias básicas, son aquellos residuos que provienen de industrias de acero, mientras que las escorias de Thomas provienen de la fundición de hierro. Estas escorias se componen de silicatos de magnesio ($MgSiO_3$) y de calcio ($CaSiO_3$) (Espinosa & Molina, 1999), que reaccionan en el suelo, produciendo ácido monosilícico, siendo el componente químico que es asimilado por la planta como silicio, el cual reemplaza parcialmente la cal (Zambrano, 2015).

Entre los beneficios que aporta el silicio para el suelo están: el incremento del pH y de las reservas de Ca, Mg y P, la disminución de la contaminación del suelo por productos químicos, la mayor eficiencia en la fertilización, sumado a la disminución de la toxicidad generada por el Al, Fe y Mn (Zambrano, 2015). Entre los beneficios que aporta el silicio para la vegetación están: la descarga de potasio y fósforo en el suelo, la acumulación de silicio en los tejidos de la planta, la resistencia a enfermedades y plagas, hojas más desarrolladas y vigorosas, la adaptación a altas temperaturas y al estrés hídrico, además del aumento en la productividad, calidad y sostenibilidad de los cultivos (Rodríguez et al., 2013).

Según investigaciones realizadas en Brasil, la mezcla de silicatos de calcio y yeso, constituye una enmienda amigable con el medio ambiente, ya que no genera emisiones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2) (Osorno, 2012), mientras que el encalado con piedra caliza o dolomita sí producen emisiones de CO_2 , puesto que al ser disueltas generan bicarbonatos ($2HCO_3$), los cuales se convierten en agua y CO_2 (De Klein et al., 2006). Se sugiere, que las proporciones de este tipo de enmienda sean 50% de yeso y 50% de silicatos de calcio (Osorno, 2012). Cabe resaltar que la aplicación excesiva de yeso en el suelo puede ocasionar una disminución de la fertilidad y un aumento de la lixiviación de bases (Osorno, 2012).

8.12.2 Gallinaza como abono orgánico

La gallinaza, es un abono orgánico obtenido a partir de residuos que son considerados insignificantes por algunos agricultores, debido a la falta de información con relación al alto valor nutricional que le otorgan estos residuos al suelo y las plantas. Una disposición inadecuada de estos residuos, puede generar un elevado impacto ambiental negativo (Orozco & Thienhaus, 1997) en el agua, aire y suelo, razón por la cual, la gallinaza, al encontrarse en grandes cantidades, puede ser aprovechada por su alto contenido de nitrógeno y fósforo (Rosales et al., 2007). Al igual que otro tipo de estiércol, las excretas de gallinas cuentan con los nutrientes esenciales para las plantas pero en mayor cantidad, sin embargo, se debe manejar adecuadamente para que el estiércol no pierda el nitrógeno de manera rápida (Orozco & Thienhaus, 1997).

Este tipo de abono orgánico se compone de heces, orina, microorganismos intestinales, plumas de aves de corral (Carhuancho. et al., 2015) y materiales utilizados para las bases del corral, como lo es el pasto seco, la viruta, la cascarilla y otros, los cuales tienen propiedades de absorción (Mullo, 2012). La calidad de la gallinaza depende de factores como: la cantidad de alimento desperdiciado, la edad y raza del ave, el tipo y calidad del alimento que consumen, además de la temperatura ambiente y la ventilación del galpón (Estrada, 2005).

Entre los beneficios que brinda la gallinaza al suelo están: el aporte de nutrientes como Potasio (P), Manganeseo (Mn), Fósforo (F), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Calcio (Ca), Boro (B), Magnesio(Mg), Hierro (Fe) y Nitrógeno (N), los cuales se presentan en altas concentraciones (Cantarero & Martínez, 2002), además de proveer materia orgánica, aumentar la retención de agua en el suelo (Estrada, 2005) y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Entre los beneficios que aporta la gallinaza a la planta están: el aumento de la calidad y rendimiento, además de propiciar un mayor desarrollo (Peñaloza et al., 2019). Cabe resaltar que, la gallinaza presenta elevados contenidos de nitrógeno y humedad, que se disipan en poco tiempo, generando olores desagradables y fuertes, razón por la cual, le quita valor a la calidad del fertilizante. Por tal motivo, se hace necesario realizar un proceso de secado de la gallinaza, pues al presentarse en un estado deshidratado posee una mayor concentración de nutrientes (Estrada, 2005).

8.12.3 Aplicación de micorriza

Las micorrizas, son una asociación entre un hongo y la raíz de una planta, la cual tiene por objetivo lograr un beneficio mutualista, donde las plantas le proveen a los hongos el hábitat y los azúcares necesarios para su desarrollo, mientras que los hongos le ayudan a las raíces de las plantas a captar del suelo los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo, además de que les permite crear defensas contra patógenos (Honrubia, 2009). Existen dos tipos principales de micorrizas, que son las MVA *micorrizas vesiculares arbusculares* pertenecientes a la familia latifoliadas y las ectomicorrizas pertenecientes a la familia de las coníferas, las cuales se diferencian por el tipo y crecimiento de su raíz (Molina et al., 2005).

Para el caso del presente estudio, se propone implementar las MVA *micorrizas vesiculares arbusculares*, conformadas como su nombre lo indica, por dos estructuras. Las vesículas, que son estructuras redondas compuestas por lo general de lípidos y sirven como órganos que almacenan energía o como estructuras que se reproducen, y los arbúsculos, que son estructuras ramificadas que se desarrollan en el interior de una célula y sirven como espacio para que el hongo intercambie nutrientes con el hospedante; los hongos que se agrupan con este tipo de raíces son del orden *Glomales* y *Endogonales* (Molina et al., 2005). De acuerdo a esto, las micorrizas son consideradas como un biofertilizante, mediante el cual es posible llevar a cabo buenas prácticas agrícolas, pues permite obtener una productividad sostenible ((FAO), 2013), y poseen un alto potencial biotecnológico, teniendo en cuenta que le facilita a la planta la captación de nutrientes (S. Barrera, 2009). Existen diversas investigaciones que han demostrado que la aplicación de MVA en el suelo aportan beneficios significativos en el rendimiento de cultivos como: soya, maíz, trigo, pasto, tomate, entre otros, y mejoran la nutrición y el crecimiento de las plantas que se desarrollan en suelos salinos (Noda, 2009).

Entre los beneficios que le aportan las MVA al suelo están: el aumento de sus agregados, mejores propiedades físicas (Pentón et al., 2011) y disminución de la erosión (Molina et al., 2005). Entre los beneficios que le aportan las MVA a la vegetación están: mayor crecimiento y productividad, lo cual se evidencia en la maduración de los frutos, pues se genera en menor tiempo, además de la adaptación climática de los cultivos, resistencia a patógenos y perfeccionamiento de diferentes actividades fisiológicas como la transpiración e intercambio de dióxido de carbono (CO_2). También mejoran el desarrollo y capacidad de las raíces para

absorber nutrientes del suelo como el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Zinc (Zn), Cobre (Cu), entre otros ((FAO), 2013), debido a que las hifas, en comparación al pelo radicular de la planta, permiten explorar una mayor extensión del suelo, ocasionando un aumento en el contenido de clorofila y, por ende, una alta tasa fotosintética de la vegetación. Sumado a esto, las MVA generan una mayor interacción entre los microorganismos benéficos del suelo y la planta (PEREZ et al., 2011), y generan una mejor tolerancia de la vegetación al estrés hídrico, debido a que las plantas optimizan el aprovechamiento de agua, permitiendo que la vegetación se adapte a suelos salinos y ácidos (Sadeghian & (Cenicafé), 2016).

Teniendo en cuenta cada una de las propiedades que le aportan las micorrizas a las plantas, actualmente se han desarrollado productos en el mercado con estos microorganismos, ya que además de proporcionarle gran cantidad de nutrientes a la planta, es una alternativa amigable con el medio ambiente, pues ayuda a disminuir la degradación de los ecosistemas, preservando la biodiversidad (Noda, 2009) y aumentando el rendimiento de los cultivos en un 15% a 50% (Pentón et al., 2011). Entre los productos colombianos que utilizan este tipo de microorganismos se encuentran: ABONAMOS MICORRIZAS (Abonamos & Sobiotech, 2008) y SAFER MICORRIZAS M.A. Se recomienda que la aplicación de estos productos sea durante la siembra o el trasplante de la planta (Safer, 2020).

8.12.4 Gallinaza y micorriza

La combinación de los abonos orgánicos como la gallinaza y la micorriza, aportan mayor valor nutricional y rendimiento en los cultivos, similar a los que aportan los abonos inorgánicos (Peñaloza et al., 2019), pues diversos estudios lo comprueban. Un estudio realizado en Boyacá, en el municipio de Cucaita, demuestra que el cultivo de cebolla cabezona aumentó su rendimiento, producción y calidad mediante el uso de micorrizas y gallinaza, en comparación a los cultivos que no se les aplicó un tratamiento con micorrizas (Agudelo & Casierra, 2004). Esto demuestra que, los fertilizantes orgánicos junto con las micorrizas son enmiendas prometedoras en la agricultura, pues además de aportar diversos beneficios al suelo y a las plantas, reducen el impacto ambiental negativo generado por los fertilizantes químicos, los cuales actualmente presentan una mayor demanda por los agricultores.

8.12.5 Selección de plantas tolerantes a los suelos salinos (Sulfatados Ácidos)

A través del tiempo, se han implementado estrategias costosas para manejar y modificar las características químicas de suelos con problemas de salinidad y acidez, a fin de adaptarlos a las características fisiológicas de la planta que se desea cultivar, sin embargo, es una práctica agrícola poco sostenible, pues requiere del uso de gran cantidad de insumos. Para evitar esta técnica, que genera un alto impacto ambiental negativo, se han buscado alternativas que permitan disminuir la transformación de las características fisicoquímicas del suelo, como lo es la selección de plantas que tienen la capacidad de adaptarse a las condiciones que presenta el suelo, como el estrés salino y la acidez (Castro, 1998). Por esta razón, se sugiere en el presente estudio, implementar plantas halófitas como los cultivos de pastizales, remolacha forrajera y cebada, los cuales fueron seleccionados en relación, al POT de Paipa, a la capacidad de uso del suelo de la zona de estudio, a los resultados químicos del suelo y a estudios de diversos autores que demuestran la eficiencia de estos cultivos en suelos con condiciones de salinidad y acidez.

8.12.5.1 Pastizales Raigrás *Lolium perenne* y Kikuyo *Pennisetum clandestinum*.

Los pastizales, se conforman principalmente por especies herbáceas y sirven para alimentar a animales herbívoros. Estos se distribuyen en suelos con baja productividad que no son aptos para prácticas agrícolas intensivas (Rebollo & Gómez, 2003), como es el caso del suelo del presente estudio, pues, según el POT de Paipa, entre los tipos de vegetación de pastizales que se desarrollan en la zona de estudio, son: Raigrás *Lolium perenne* y Kikuyo *Pennisetum clandestinum*.

El Raigrás, es una especie gramínea perenne de pastos, que se presenta en climas fríos, en alturas de 2.000 a 3.000 m.s.n.m y en diversos tipos de suelos. Crece en matorros, con abundantes hojas de una altura entre 28 a 30 cm y presenta espigas cortas, formando un césped tupido. Se siembra preferiblemente al iniciar las épocas de lluvia, sin embargo, es necesario una enmienda previamente para disminuir la acidez del suelo (Vicuña, 1985).

El Kikuyo, es una especie gramínea perenne de pastos, que se presenta de igual manera en climas fríos y se adapta a suelos secos. Se conforma por tallos gruesos y nutritivos, que pueden alcanzar hasta un metro de altura, por hojas de 10 a 20 cm de largo y un ancho de 8 a

15 mm, y por raíces que se extienden a altas profundidades, formando un césped tupido. Se siembra preferiblemente al iniciar las épocas lluviosas (Vicuña, 1985). Estos pastizales, tienen la capacidad de crecer en suelos con condiciones de estrés salino (Grattan, 2018), pues se han realizado varios estudios que indican que estas gramíneas han desarrollado mecanismos que les permite tolerar la salinidad de los suelos, debido a que han modificado su morfología y fisiología, permitiéndoles adaptarse a este tipo de ambiente sin disminuir su rendimiento (W. Ramirez & Hernández, 2016). Además, estas especies toleran los pH ácidos (Marín & Lora, 1974).

8.12.5.2 Remolacha Forrajera *Beta vulgaris*.

La remolacha forrajera *Beta vulgaris*, es una especie que pertenece a la familia *Quenopodiácea*, se presenta en altura de 1.800 a 2.800 m.s.n.m, siendo resistente a heladas. Su raíz pivotante, crece de manera vertical hacia abajo, es rugosa y posee un color amarillo claro a verdoso, siendo el órgano más importante de la planta para la acumulación de nutrientes. Esta produce tubérculos dentro del suelo, que tienen una forma redondeada y poseen un alto contenido de azúcares. Se siembra de manera directa en forma de hileras, separadas en surcos. Para obtener un alto rendimiento del cultivo, se hace necesario aplicar un abono orgánico de calidad (Álvarez, 2015).

Esta especie, presenta una alta adaptabilidad a suelos salinos y mal drenados, sin embargo, en la etapa de germinación suele ser sensible a la salinidad (Flores, 2014). Un estudio realizado en Paipa, Boyacá, afirma que estos cultivos se adaptan a suelos sulfatados ácidos que son los suelos de la zona de estudio, contribuyendo en la disminución de la acidez del suelo, pues aumenta ligeramente su pH (Bernal & Forero, 2014 b). Entre los beneficios ambientales que aporta este cultivo, es la alta producción de oxígeno, pues genera en un año cinco veces más oxígeno que un bosque de pinos (Flores, 2014).

8.12.5.3 Cebada *Hordeum vulgare L.*

La cebada *Hordeum vulgare L.*, es una especie que pertenece a la familia *Poaceae*, se presenta en altura de 2500 a 3500 m.s.n.m, y se adaptan a una precipitación entre 500 a 700 mm, a una temperatura de 10 a 20°C y a cualquier tipo de suelo (Cajamarca & Montenegro, 2015). Sus raíces son fibrosas y alcanzan una profundidad mínima en comparación a otros cereales, el

tallo tiene una forma recta y gruesa y alcanza una altura de 50 cm, la longitud de sus hojas es media ancha con una terminación en punta y su color es verde claro (Aguado, 1957). Se siembra preferiblemente al iniciar las épocas de lluvia, mediante una técnica manual al voleo, y se cosecha en época seca (Cajamarca & Montenegro, 2015). La cebada, tiene la habilidad de mantener su calidad y productividad en suelos salinos (Grattan, 2018), además, es considerado como el cereal más tolerante a las salinidad (Steduto et al., 2012), debido a que su rendimiento productivo no se ve afectado por esta condición, principalmente cuando la CE presenta valores iguales o inferiores a 8 dS/m (Bercero & Aragues, 1996). Sumado a esto, esta especie toleran los pH ácidos (Marín & Lora, 1974).

9 IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

El desarrollo del presente estudio permite obtener impactos sociales y ambientales a corto, mediano y largo plazo. Los impactos a corto plazo generados son, el conocimiento de la distribución espacial y concentración de la salinización en el suelo de la zona de estudio, localizada en la vereda El Salitre, Paipa, por medio del procesamiento y análisis de una imagen hiperespectral, la cual permite identificar el porcentaje de vegetación que se encuentra afectada por esta problemática, posibilitando plantear y proponer a la población que habita en esta zona, una serie de estrategias que permitan realizar al suelo un manejo y aprovechamiento adecuado, logrando una productividad sostenible. Otro impacto generado, es el aporte de conocimiento en el campo investigativo, con relación al desarrollo de metodologías modernas, como lo es la técnica de teledetección hiperespectral, que no requiere la intervención del suelo y permite realizar estudios en zonas de difícil acceso, pues en Colombia el estudio y monitoreo del estado del suelo se realiza en su gran mayoría, mediante muestreo en campo y análisis de laboratorio.

Los impactos a mediano plazo generados son, la implementación de las estrategias planteadas para mejorar las condiciones del suelo, propiciando una productividad que no genere impactos ambientales negativos y que comprometan el estado de los recursos naturales, a su vez, el desarrollo de estas prácticas agrícolas sostenibles, permiten incentivar a la población aledaña a replicar estas técnicas.

Los impactos a largo plazo generados son, el mejoramiento del estado del suelo y la vegetación, mediante las estrategias desarrolladas, aumentando el rendimiento y productividad del suelo, impulsando el mercado local y, por ende, la economía del municipio. Otro impacto generado, es la consolidación de nuevas investigaciones a nivel nacional, que hagan uso de la técnica de teledetección hiperespectral para el estudio y monitoreo de los recursos naturales, promoviendo la innovación y la acogida de entidades gubernamentales que se deseen involucrar en este tipo de investigaciones.

10 CONCLUSIONES

Los sistemas de información geográfico son útiles para realizar estudios ambientales, pues softwares como ENVI y ArcGIS permiten realizar procedimientos especializados con imágenes hiperespectrales, los cuales ayudan a conocer patrones específicos del comportamiento espectral de diferentes superficies terrestres, en relación a sus características, logrando diferenciar y conocer tanto el tipo de superficie como el estado en que se encuentra.

En el caso de la presente investigación, el software ENVI 5.3 permitió generar firmas espectrales del suelo y la vegetación, mediante la herramienta Spectral Profile, con las cuales fue posible establecer las características fisicoquímicas que modifican la curva de reflectancia. En relación a las 23 firmas espectrales del suelo, se identificó que la curva de reflectancia depende principalmente de la humedad, la textura, el color, la estructura, la rugosidad, la litología y el contenido de materia orgánica del suelo, la cual permitió establecer que el suelo de estudio es moderadamente seco, con una textura fina y una estructura uniforme y compacta, con presencia de óxidos de hierro, bicarbonatos y sulfatos, los cuales conforman a las sales y sodios del suelo. Con relación a las 23 firmas espectrales de vegetación, se identificó que la curva de reflectancia depende de las características del suelo y las propiedades fisiológicas y fenológicas de las plantas, como la forma en que interactúan los pigmentos foliares de sus hojas, su estructura celular, la humedad, la geometría, la disposición de las hojas y el área foliar. El comportamiento de las 23 curvas espectrales de vegetación, indica que 8 de ellas representan vegetación moderadamente sana, 14 representan vegetación enferma o estresada y una de ellas representa vegetación muerta o suelo desnudo.

El software ArcGIS, mediante la herramienta "Raster Calculator" permitió calcular los índices de vegetación NDVI y SAVI a partir de la imagen hiperespectral, con los cuales fue posible establecer que los dos índices son útiles para identificar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación, pues los dos arrojaron resultados similares, determinando que la mayor parte de la zona de estudio presenta una vegetación densa humedad, debido a las condiciones de humedad y vigor que presentan los pastizales y arbustos que conforman la zona de estudio. A su vez, permitió calcular los índices de salinidad INDSAL y NDSI, los cuales, a pesar de que arrojaron resultados similares respecto a la clase de salinidad que abarca la mayor parte del suelo la zona de estudio, que es la salinidad ligera, los porcentajes correspondientes a las clases de salinidad restantes no presentan similitud, razón por la cual,

se hace necesario calcular un índice de salinidad adicional, a fin de obtener resultados más exactos. Sin embargo, el suelo al presentar en su mayoría salinidad ligera concuerda con los resultados de los índices de vegetación, ya que, al no presentarse elevadas concentraciones de sales, no se generan afectaciones significativas en la vegetación.

La correlación entre los índices de salinidad y las variables químicas de CE, RAS, PSI y pH permitió establecer que los índices de salinidad presentan una mayor correlación con el PSI y la RAS, en comparación con la CE y el pH. Específicamente, el índice NDSI presenta una mayor correlación con el PSI y el RAS, lo que permite inferir que el desarrollo del NDSI presenta una alta precisión para conocer la distribución y concentración de la salinización en los suelos de la zona de estudio.

En concordancia a lo anterior, las unidades cartográficas VMA y AMV que conforman la zona de estudio, junto a las firmas espectrales de la vegetación y el suelo, los índices de vegetación y salinidad y los análisis de las variables químicas del suelo, permitieron determinar que el suelo de la zona de estudio es ligeramente sulfatado ácido, debido a que, tanto el comportamiento de las firmas espectrales del suelo, como los índices de salinidad, muestran la presencia de salinización, y el pH del suelo junto con las unidades cartográficas, demuestran que el suelo tiene reacciones ácidas y saturaciones de aluminio (A^{+3}) mayor al 60%, que son características propias de este tipo de suelos.

Por otra parte, el software ArcGIS, mediante la herramienta Weighted Overlay, permitió establecer el porcentaje de vegetación afectada en la zona de estudio, haciendo una evaluación multicriterio en la que se lleva a cabo una superposición ponderada de los ráster correspondientes a la reclasificación del NDVI y del NDSI, obteniendo un ráster adicional donde es posible establecer que el 54% de la vegetación está afectada, es decir, que presenta una condición enferma o escasa y que se encuentra en un suelo sulfatado ácido, con problemas de salinidad.

Teniendo en cuenta el porcentaje de la vegetación afectada y la salinización ligera que presentan los suelos sulfatados ácidos de estudio, se plantearon estrategias para la prevención, la mitigación y/o el control, en concordancia con dichas características, a fin de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, para que estas permitan el desarrollo de las plantas y cultivos que se desean implementar. Entre las estrategias planteadas, las más

amigables con el medio ambiente son: la aplicación en el suelo de enmiendas de escorias y yeso, de abono orgánico, como gallinaza y de biofertilizante como las micorrizas, debido a que le aportan, tanto al suelo como a la planta gran cantidad de nutrientes, como lo hace un fertilizante de uso convencional y las plantaciones de pastizales Raigrás y Kikuyo, la remolacha forrajera y la cebada, pues según la política para la gestión sostenible del suelo, estas permiten conservar las características físicas del suelo, optimizando su aprovechamiento y contribuyendo al desarrollo de prácticas agrosostenibles. Cabe resaltar que se debe realizar rotación de cultivos para no generar una sobreutilización del suelo.

Finalmente, el estudio demuestra que el desarrollo de la técnica de teledetección hiperespectral, con el uso de vehículos aéreo no tripulados (UAV) para la obtención de imágenes hiperespectrales, permiten conocer y analizar satisfactoriamente la distribución de la salinización del suelo y la respuesta fotosintética de la vegetación en relación al estado del suelo, con un alto nivel de detalle, pues junto con las diversas herramientas con las que cuentan softwares como ENVI y ArcGIS, facilitan el estudio de estas características en poco tiempo y con menores costos operativos, en comparación con metodologías convencionales para el análisis de suelos, evidenciado que es una técnica prometedora que cuenta con un gran potencial para ser utilizada en investigaciones futuras.

11 RECOMENDACIONES

Se recomienda que la captura de la imagen hiperespectral se realice con relación a las condiciones climáticas de la zona de estudio, principalmente la nubosidad, la radiación solar, la sombra, el tiempo, entre otras, pues los resultados dependen de éstas, ya que pueden generar resultados erróneos a la hora de interpretar las características de la superficie a estudiar.

Para estimar los índices espectrales, se debe tener en cuenta que, actualmente no hay expresiones matemáticas definidas, razón por la cual, se han desarrollado fórmulas personalizadas que se adaptan a las diferentes plataformas, sensores y cámaras utilizadas para la captura de la imagen, por esto, se recomienda comparar diferentes expresiones matemáticas planteadas por diversos autores, a fin de utilizar aquellas que se adapten a las condiciones de la zona de estudio, permitiéndole dar solución óptima al objetivo de estudio.

Los resultados de los índices espectrales permiten conocer la distribución espacial y la concentración de la salinización en el suelo, sin embargo no dan a conocer el tipo de sal presente en el suelo, razón por la cual, si se desean implementar estrategias para prevenir, mitigar y/o controlar esta problemática, se recomienda complementar estos estudio, con el análisis de diversas variables químicas del suelo, las cuales permiten conocer el tipo de salinidad que presenta el suelo en relación al nivel de concentración de sales, además de que ayudan a verificar los resultados obtenidos de los índices espectrales.

En la selección de enmiendas y fertilizantes para el suelo, se recomienda realizar de manera previa, ensayos con muestras de suelos que contengan dichas enmiendas y fertilizantes, a fin de establecer e implementar el que posea mayor efectividad. Por último, una vez implementadas las enmiendas y fertilizantes, se recomienda realizar pruebas fisicoquímicas al suelo y a las plantas, a fin de conocer su respuesta a la aplicación de enmiendas y fertilizantes.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIAGNÓSTICO Y MONITOREO DE DEGRADACIÓN DE SUELOS POR SALINIZACION EN LA CUENCA RIO GARAGOA-SUBCUENCA RIO MACHETÁ- JURISDICCION CAR A ESCALA 1 1:100.000, (2018). <http://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=16632>
- (FAO), F. and A. O. (1998). *Salt-Affected Soils and their Management*. <http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e00.htm#Contents>
- (FAO), F. and A. O. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. In *Food and Agriculture Organization of the United Nationso*.
- (FAO), F. and A. O. (2016). Estado Mundial del Recurso Suelo Resumen Técnico. In *Estado Mundial del Recurso Suelo Resumen Técnico: Vol. I*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- (FAO), F. and A. O. (2020). *Suelos Ácidos*. Suelos Ácidos. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- (IGAC), I. G. A. C. (2016). *Suelos y Tierras de Colombia* (Imprenta Nacional de Colombia S.A (ed.)).
- Abdullah, A. Y. M., Biswas, R. K., Chowdhury, A. I., & Billah, S. M. (2019). Modeling soil salinity using direct and indirect measurement techniques: A comparative analysis. *Environmental Development*, 29(December 2018), 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.12.007>
- Abonamos, & Sobiotech. (2008). *Abonamos micorrizas*. 57(4), 1. <https://static1.squarespace.com/static/59bc6b2d29f1875d21620187/t/5ebead3b97f115135888c1170/1589554517155/9+FT+Abonamos+Micorrizas.pdf>
- Abril, N., Bárcena, A., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., Meléndez, F., & Túnez, I. (1984). 8. Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. *SAE Technical Papers*, 1–8. <https://doi.org/10.4271/841496>
- Aguado, M. (1957). *La cebada* (M. DE AGRICULTURA & C. Y. C. A. • S. D. C. DIRECCION GENERAL DE COORDINACION (eds.)). https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1957_17.pdf%0A
- Agudelo, M., & Casierra, F. (2004). EFECTO DE LA MICORRIZA Y GALLINAZA SOBRE LA PRODUCCIÓN Y LA CALIDAD DE CEBOLLA CABEZONA (*Allium cepa* L. 'Yellow Granex') EFFECT OF MYCORRHIZAE AND HEN MANURE FERTILIZATION ON YIELD AND QUALITY OF ONION (*Allium cepa* L. 'YELLOW GRANEX'). *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 57(1), 2190–2204.
- Allbed, A., Kumar, L., & Aldakheel, Y. Y. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in

- a date palm dominated region. *Geoderma*, 230–231(October), 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025>
- Allbed, A., Kumar, L., & Sinha, P. (2014). Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. *Remote Sensing*, 6(2), 1137–1157. <https://doi.org/10.3390/rs6021137>
- Alonso. (2006). 2 *Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación*. Geographic, o Geographical, Information Systems (GIS).
<https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node70.html>
- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *Teledetección*, 429–432.
- Alonso, F. (2003). 01. Fundamentos físicos de la teledetección. *Teledetección*, 9–16.
<http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema01.pdf>
- Altshuler, G. B., & Tuchin, V. V. (2009). Physics Behind Light-Based Systems: Skin and Hair Follicle Interactions with Light. *Cosmetic Applications of Laser and Light-Based Systems*, 49–123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1572-2.50008-7>
- Álvarez, P. (2015). *Evaluación nutricional y económica de diferentes planes de fertilización en remolacha forrajera (beta vulgaris) para alimentación de bovinos* [Universidad de La Salle Facultad].
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=zootecnia>
- Alzate, B. E. (2012). Capitulo II Indices De Vegetación. *Office of Space Science & Applications*, 1, 29–44. http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf
- Amat, J. (2016). Correlación lineal y regresión lineal simple. *RPubs*.
- Aquino, D. do N., Coimbra da Rocha Neto, O., Alves Moreira, M., Santos, Dos Teixeira, A., & De Andrade, E. (2018). Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciencia Agronomica*, 49(3), 420–429.
<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180047>
- Arán, M., Villar, P., Xandri, J., Albizua, L., Leránóz, A., Zalba, M., & Farré, X. (2001). ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO, CUBIERTA VEGETAL Y RESPUESTA ESPECTRAL EN EL CULTIVO DE VIÑA.pdf. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 29–32.
- Asfaw, E., Suryabhagavan, K. V., & Argaw, M. (2018). Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 250–258.

<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.05.003>

- Babiker, S., Abulgasim, E., & HS, H. (2018). Enhancing the Spatial Variability of Soil Salinity Indicators by Remote Sensing Indices and Geo-Statistical Approach. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 09(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000462>
- Badaracco, R. R. (2012). Detección de la salinidad en los suelos de cultivos de algodón usando imágenes de satélite en la costa norte del Perú. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 126.
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:fn01x7rxrPAJ:cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/3071+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe>
- Badia, D. (1992). Suelos afectados por sales. *Butlletí de Les Societats Catalanes de Física, Química, Matemàtiques i Tecnologia*, XIII, 609–629.
- Barrera, J., Cruz, M., & Melgarejo, L. M. (2007). V. nutrición mineral. *Experimentos En Fisiología Vegetal, Fao 1998*, 79–106.
- Barrera, S. (2009). El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 7(1), 123–132.
- Bercero, A., & Aragues, R. (1996). Respuesta de la cebada alpha a la salinidad del suelo. In *Riegos y Drenajes XXI* (Vol. 88, pp. 45–50).
- Bernal, A., & Forero, F. (2014). Efecto de especies forrajeras sobre las bases intercambiables de un suelo sulfatado ácido del municipio de Paipa (Colombia) The effect of the fodder species over the interchangeable bases of sulfated acid soil in municipality of Paipa (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 93–101.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/932/923>
- Bernal Figueroa, A. A., & Forero Ulloa, F. E. (2014). Evaluación de especies vegetales para el manejo de la acidez en suelos sulfatados ácidos de Paipa, Boyacá. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 229. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:362
- Borda, X. (2013). *Análisis de Situación de Salud con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud 2013 Municipio de Paipa* (pp. 16–123).
https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/ASIS_2013/ASIS_PAIPA_2013.pdf
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117.
<https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Caballero, E., Jarma, A., & Atencio, L. (2007). ENCALAMIENTO DE UN SUELO SULFATADO

ÁCIDO DE CÓRDOBA Y SU EFECTO SOBRE EL DESARROLLO DE TRES GENOTIPOS DE MAÍZ EN INVERNADERO. *IENCIAS AGROPECUARIAS Y BIOLÓGICAS*, 10, 85–94.
<https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/587/523>

- Cajamarca, G. B., & Montenegro, I. S. (2015). Selección de una línea promisorio de cebada (*Hordeum vulgare* L.) Bio-fortificada, de grano descubierto y bajo contenido en fitatos, en áreas vulnerables de la sierra sur ecuatoriana [UNIVERSIDAD DE CUENCA]. In *Tesis*.
[http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23473/1/TESIS CEBADA.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23473/1/TESIS%20CEBADA.pdf)
- Camacho, A., Vargas, C. A., Rojas, F. A., Castillo, S. F., & Arguello, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Revista Facultad De Ingeniería*, 24(40), 17. <https://doi.org/10.19053/01211129.3845>
- Campbell, J. (2017). Unit 3 Spectral Signature. In *Introduction to Remote Sensing* (pp. 41–57).
- Cantarero, R., & Martínez, O. (2002). Evaluación De Tres Tipos De Fertilizantes (Gallinaza, Estiércol vacuno, y un Fertilizante Mineral) en el cultivo de Maíz (*Zea mays* L.). Variedad NB-6. [UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA]. In *Bioresource Technology* (Vol. 153, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.004>
- Carhuanchó., F., Ramírez C., J., & Guerrero B., J. (2015). Gestión Ambiental De Residuos Avícolas Mediante Digestión Anaerobia Para La Producción De Fertilizantes Orgánicos Líquidos. *Anales Científicos*, 76(1), 125. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i1.773>
- Castro, H. (1998). *FUNDAMENTOS PARA EL CONOCIMIENTO Y MANEJO DE SUELOS AGRÍCOLAS* (C. I. U. J. De (ed.); Produmedio).
- Castro, H., Cely, G., & Vásquez, S. (2009). *Criterios técnicos para un manejo eficiente del riego en cebolla de bulbo* (G. I. y Publicaciones (ed.); Primera).
- Castro, R. (1999). *Sistema para el seguimiento y Análisis de Tierras mediante Teledetección (TeleSAT). Bases Teóricas*.
http://biblioteca.inia.cl/medios/transferecia/tallersatelital/bsesteoricasp.remota_rcastro.pdf
- Celis, R. (2019). *Identificación de conflictos por el uso del suelo en el sector rural y en la reserva forestal protectora Serranía de la Lindosa , área de influencia de San José del Guaviare* [Universidad de La Salle Ciencia Unisalle].
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2114&context=ing_ambiental_sanitaria
- Cely, S. (2017). *CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y EMPRESARIAL*.
- Cetina, N. (2017). *Generación De Curvas Espectrales De Vegetación, Suelo Y Agua, a Partir Del Análisis De Imágenes Multiespectrales, Como Herramienta Indirecta De Evaluación Del Estado Del Humedal “El Ocho” Y Paramo De Letras*. 99.

- [http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2009/Nicol Andrea Cetina.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2009/Nicol%20Andrea%20Cetina.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (Segunda ed). RIALP S.A. <https://es.slideshare.net/noldinn/fundamentos-deteledeteccionemiliochuvieco%0A>
- Cochrane, M. A. (2000). Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(10), 2075–2087. <https://doi.org/10.1080/01431160050021303>
- Combatt, E., Mercado, T., & Palencia, G. (2009). ALTERACIÓN QUÍMICA DE LA SOLUCIÓN DE UN SUELO SULFATADO ÁCIDO, CON ENCALAMIENTO Y LAVADO EN COLUMNA DISTURBADAS. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(1), 101–111. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/646/639>
- Corpoboyacá. (2019). Capítulo III Elementos naturales. In *Tierras en trance* (pp. 87–138). <https://doi.org/10.2307/j.ctvckq6jk.5>
- Corpoboyacá, UNAL, & UPTC. (2006). Diagnóstico Capítulo II- PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA. *Plan De Ordenación Y Manejo Ambiental De La Cuenca Alta Del Río Chicamocha*, 365. <http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/diagnostico-capitulo2-pomca-chicamocha.pdf>
- Corrales, R. E., & Ochoa, V. L. (2014). Firmas espectrales de la cobertura de la Tierra, aplicando radiometría de campo. Fase 1: Región 03 occidente de Honduras. *Ciencias Espaciales*, 7(1), 76–96. <https://doi.org/10.5377/ce.v7i1.2527>
- Council Environment Protection and Heritage, C. and the N. R. M. M. (2011). *National Guidance on Acid Sulfate Soils- National guidance for the management of acid sulfate soils in inland aquatic ecosystems*.
- Courel, G. (2019). Guía de estudio. Suelos Salinos y Sódicos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- De Klein, C., Novoa, R., Stehen, O., Smith, K., Rochette, P., & Wirth, T. (2006). *Emisiones De N2O de los suelos gestionados y emisiones de Co2 derivadas de la aplicación de Cal y Urea* (Vol. 4, pp. 1–56).
- Dehni, A., & Lounis, M. (2012). Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: Application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*, 33, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1193>
- Díaz, I., García, C., León, M., & Ruiz, F. (2014). *Guía de Asociación entre variables (Pearson y Spearman en SPSS)*. Universidad de Chile.

- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense De Madrid*, 78. http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dondurur, D. (2018). Fundamentals of Data Processing. *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*, 211–239. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811490-2.00004-9>
- Duarte, T., Largos, H., & Paipa, R. (2018). *Portafolio de servicios GRANJA TUNGUAVITA UPTC* (p. 29). http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/institucional/servicios/doc/porta_granja_tunguavita2019.pdf
- Elhag, M. (2016). Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7596175>
- ENLASA. (2018). *Ficha Técnica: Cal Dolomita* (p. 4). http://enlasa.swproyectos.com/sites/default/files/ft._cal_dolomita_1.pdf
- ESA. (2014). *Firmas espectrales*. Firmas Espectrales. http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html
- Escobar, M. (2017). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS RECURSOS AGUA Y SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO DEL CANTÓN MEJÍA UTILIZANDO TELEDETECCIÓN Y FRACTALES Trabajo [UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD]*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13142/1/T-UCE-0012-40.pdf>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. *Accs*, 1, 1–46. http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez_y_encalado_de_suelos
- Estrada, M. (2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 43–48.
- Fadda, G. (2017). *CLASIFICACIÓN DE TIERRAS CLASIFICACIONES INTERPRETATIVAS*. 1–5.
- Fadda, G. S. (2010). *Clasificación de Suelos*.
- FAO-ITC. (2013). *Management of Spatial Information Principles of Remote Sensing*.
- Farifteh, J., van der Meer, F., & Carranza, E. J. M. (2007). Similarity measures for spectral discrimination of salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, 28(23), 5273–5293. <https://doi.org/10.1080/01431160701227604>
- Flores, J. (2014). Efecto del distanciamiento entre plantas en la producción de dos variedades de remolacha forrajera (*beta vulgaris* l. ssp. *vulgaris* var *crassa*) Puno [UNIVERSIDAD

- NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD]. In *Universidad Nacional del Altiplano*.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2218/Flores_Flores_Josefina_Elizabeth.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, A. (2016). *Estudio De La Reflectancia Espectral Y Modelos De Predicción De Color En Mosaicos Vítreos*. 48.
https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9203/Garcia_Alonso_Andrea.pdf?sequence=1
- García, L., & Dubus, M. (2013). *Relación entre la reflectancia y la reflectividad*.
<https://es.slideshare.net/oficinageomatica/reflectancia-y-reflectividad>
- Gilabert, M. A., Garcia, J., & Gonzalez, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación.
ResearchGate, May 2014.
- Giron, Y., Oleschko, K., Francois, J., Hernández, M., Camarillo, E., & Velázquez, J. (2009). Análisis fractal de la reflectancia de los suelos salinos. *Agrociencia*, 43(4), 403–416.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000400007
- Goldshleger, N., Chudnovsky, A., & Ben-Binyamin, R. (2013). Predicting salinity in tomato using soil reflectance spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17), 6079–6093.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2013.793859>
- Gómez, I., Castro, H., & Pacheco, W. (2005). Recovery and management of actual acid sulphate soils in Boyacá (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 23(1), 128–135.
<http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n1/v23n1a16.pdf>
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM + y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador. *Univerisdad Ncional de La Plata*, 103.
- González, A., & Otálora, P. (2017). *Uso de sensores remotos y tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para apoyar la identificación de la salinización del suelo en San Miguel de Sema, Boyacá, Colombia*. 14–102.
- Gonzalez, A., & Vargas, N. (2014). Análisis de imágenes hiperespectrales To cite this version :
 HAL Id : hal-00935014. *Hal*, 9, 14–17.
- González, C. (2012). *Procesamiento a bordo de imágenes hiperespectrales de la superficie terrestre mediante hardware reconfigurable*. <https://eprints.ucm.es/15828/1/T33468.pdf>
- González, D. (2007). *Tolerancia al estrés salino del vinal (Prosopis ruscifolia): germinación, crecimiento y ajuste osmótico*. [Universidad Nacional de Santiago del Estero – UNSE.].
<http://170.210.231.10:8080/jspui/handle/123456789/4>
- Gonzalez, E. (2019). *Humedales de la llanura costera de Ajó-Samborombón: Identificación y*

- caracterización mediante herramientas de teledetección.* [Universidad Nacional de San Martín].
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/82786/CONICET_Digital_Nro.3a9485b2-5771-4479-8426-29eb5dc475dd_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Gorji, T., Sertel, E., & Tanik, A. (2017). Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecological Indicators*, 74, 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.043>
- Gorji, T., Yildirim, A., Hamzehpour, N., Tanik, A., & Sertel, E. (2020). Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. *Ecological Indicators*, 112(January), 106173. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106173>
- Goyenola, G. (2007). Guía para la utilización de las Valijas Viajeras - Determinación del pH Determinación del pH. *RED MAPSA*, 1(315025), 1–2.
[http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Determinacion del pH.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Determinacion%20del%20pH.pdf)
- Grattan, S. R. (2018). Consejos sobre la sequía: La tolerancia del cultivo a la sal. In *Consejos sobre la sequía: La tolerancia del cultivo a la sal*. <https://doi.org/10.3733/ucanr.8630>
- Grebner, D. L., Bettinger, P., & Siry, J. P. (2013). Forest Measurements and Forestry-Related Data. *Introduction to Forestry and Natural Resources*, 191–220.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386901-2.00008-7>
- Guerra, S. (2014). DETERMINACIÓN DEL CONFLICTO DE USO DE SUELO PARA LAS VEREDAS LAS PETACAS Y LA CORREA DEL MUNICIPIO DE PUERTO RONDÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO CRAVO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE ARAUCA. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1–47.
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11729/GuerraRodriguez;jsessionid=96C54321BD18D03593FACDB27B5AD4F2?sequence=1>
- Gutiérrez, J., & Moreno, V. (2000). Pasado, presente y futuro de la teledetección de alta resolución: El satélite IKONOS. *Mapping*, 64, 34–40.
- Hammam, A. A., & Mohamed, E. S. (2018). Mapping soil salinity in the East Nile Delta using several methodological approaches of salinity assessment. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, xxxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.002>
- Hernández, D. (2007). *Rehabilitación agrícola de suelos sulfatados ácidos en el altiplano Cundiboyacense*. Orporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) Biblioteca Agropecuaria de Colombia, (BAC). <http://www.sidalc.net/cgi->

bin/wxis.exe/?IsisScript=bac.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf=049164

- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones De Respuesta Espectral. *Universidad de Chile*, 3. <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hernández & Montaner 2009 SAF.pdf>
- Herrera, N. (2018). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ESTADO DE LA VEGETACIÓN EN LOS MUNICIPIOS COTA, CHIA Y CAJICA EN EL TRAMO DE PUENTE VARGAS HASTA PUENTE DE LA VIRGEN SOBRE EL AREA DE INFLUENCIA DEL RÍO BOGOTÁ A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Herrero, J. (1986). *Salinidad en los suelos*. 197. <http://hdl.handle.net/10261/156817>
- Honrubia, M. (2009). Las micorrizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*, 66(SUPPL. 1), 133–144. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2226>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M., & Moreno, H. (2011). Inceptisoles. *Editorial Universidad Politécnica de Valencia*, 8.
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. de C. (2014). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. 48. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. de C. (2017). *ECOSISTEMAS*. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas>
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. de C., U.D.C.A, U. de C. A. y A., & CAR, C. A. R. de C. (2017). *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización*.
- IGAC, B. (1982). *MAPA DE GEOLOGIA*. 48, 1115000.
- IGAC, I. G. A. C. (2004). *GEOPORTAL*. Datos Abiertos. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- IGAC, I. G. A. C. (2015). *Características y exploración de datos espectrales*.
- IGAC, I. G. A. C. (2018). *Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelos*. 128.
- Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. In *Introducción a La Ciencia Del Suelo*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Jiménez, R. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos* (I. Hernández (ed.); Mundi-Pren). España. <https://books.google.com.co/books?id=iZg6DwAAQBAJ&pg=PA476&lpg=PA476&dq=reflektividad+de+los+suelos+de+texturas+finas&source=bl&ots=i4QtSl6w4r&sig=ACfU3U2TliwYRCEg->

- Ir_kpiJfUoeT6AAEg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj967j0pq3qAhXhUN8KHUaBAFkQ6AEw
AnoECAgQAQ#v=onepage&
- Khan, N. M., Rastoskuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1–3), 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.038>
- Kuusik, A., Lang, M., & Nilson, T. (2004). Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(1–2), 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.05.004>
- Laguna, C. (2019). Correlación y regresión. *Análisis Exploratoria de Datos*, 143–178. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc5pc9g.6>
- Lamz, A., & González, M. (2013). La Salinidad Como Problema En La Agricultura: La Mejora Vegetal Una Solución Inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31–42.
- Marín, J., & Lora, R. (1974). *Acidez y encalado de los suelos* (Instituto, pp. 1–37). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/22383/21227_786.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A., & Cánovas, A. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas.*, 8(2), 1–20.
- Mathew, E. K., Panda, R. K., & Nair, M. (2001). Influence of subsurface drainage on crop production and soil quality in a low-lying acid sulphate soil. *Agricultural Water Management*, 47(3), 191–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00110-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00110-4)
- Medeiros, L. G., Galvão, M. B., Wilcox, B. P., Green, C., Mailson, A., & Domiciano, J. (2015). Spectral Reflectance Characteristics of Laboratory-Grown Salt Crusts on Silty Clay and Sandy Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(15), 1895–1904. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1059849>
- Medina, B. (2019). Aplicación de láminas de agua para recuperación de suelo salino en sandía (*Citrullus lanatus*). Predio Los Papayos [Universidad Nacional de Trujillo]. In *universidad Nacional de Trujillo*. [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12328/Medina_Zavaleta%2C Bruno Paolo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12328/Medina_Zavaleta%2C%20Bruno%20Paolo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Meriño-Gergichevich, C., Alberdi, M., Ivanov, A. G., & Reyes-Díaz, M. (2010). Al³⁺-Ca²⁺ interaction in plants growing in acid soils: Al-phytotoxicity response to calcareous amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 217–243.
- MINERHUILA. (2017). *Cal Dolomita*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Política para la Gestión Sostenible del

Suelo. In *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*.

http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

- Mitran, T., Ravisankar, T., Fyzee, M. A., Suresh, J. R., Sujatha, G., & Sreenivas, K. (2015). Retrieval of soil physicochemical properties towards assessing salt-affected soils using Hyperspectral Data. *Geocarto International*, 30(6), 701–721. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.985745>
- Molina, M., Mahecha, L., & Medina, M. (2005). Importancia del manejo de hongos micorrizógenos en el establecimiento de árboles en sistemas silvopastoriles. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu*, 18, 162–175.
- Mullo, G. I. (2012). Manejo y procesamiento de la gallinaza. In *Lasallista De Investigación* (Vol. 2, Issue 1). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15. <https://doi.org/http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nguyen, K. A., Liou, Y. A., Tran, H. P., Hoang, P. P., & Nguyen, T. H. (2020). Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0311-0>
- Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *CWL Publishing Enterprises, Inc., Madison*, 10. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v32n2/pyf01209.pdf>
- Obando, E., & Carbonell, J. (2010). Caracterización espectral y mineralógica de los suelos del río Cauca por espectroscopía visible e infrarroja (400-2500 nm). *Land Cover and Land Use, Encyclopedia of Life Support ...*, 28(2), 291–301. <http://www.eolss.net/sample-chapters/c12/e1-05-07-01.pdf>
- Ojeda, J., & Marín, D. (2014). Puerto Wilches: Un acercamiento al antes y después de la pudrición del cogollo en la palma de aceite. *Fedepalma*, 2014(June), 1–2. <https://doi.org/10.1038/132817a0>
- Ordóñez, J. L. (2019). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Aca*, 17–31.
- Orozco, M., & Thienhaus, S. (1997). Efecto de la gallinaza en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en desarrollo. *Agronomía Mesoamericana*, 8(1), 81–92.

<https://doi.org/10.15517/am.v8i1.24735>

- Osoño, H. (2012). *Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Otero, J., Gómez, C., & Sánchez, R. (2002). *Zonificación de los procesos de salinización de los suelos de Colombia*. 40.
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Roberto, M., Inalvis, S., Martha, L., Mirna, V., Marianela, C., & Luis, R. (2008). Caracterización y evaluación de la salinidad. *Instituto de Suelo. Ministerio de La Agricultura*, 537, 1–9. <http://www.fao.org/docs/eims/upload/cuba/5420/salinidad.pdf>
- Paipa, A. (2020). *Alcaldía Paipa*.
- Parra, J. (2006). "PROGRAMA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA POBREZA Y SEGUIMIENTO AL AVANCE DE LAS METAS DEL MILENIO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ." <https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/odm/tundama/paipa.pdf>
- Peláez, O. (2017). ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS COBERTURAS VEGETALES DE LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES A PARTIR DE LOS SENSORES AEROTRANSPORTADOS ULTRACAM D, DJI PHANTON 3 PRO Y MAPIR NIR. CASOS DE ESTUDIO HUMEDAL "EL OCHO", VILLAMARÍA – CALDAS. AUTOR: (Vol. 6) [UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES FACULTAD]. [http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2049/Omar Enrique Pelaéz M.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2049/Omar%20Enrique%20Pela%C3%A9z%20M.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Peñaloza, J., Reyes, A., Huerta, A., Perez, D. D. J., & Sangermán, D. M. (2019). Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(5), 1139–1149. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1759>
- Pentón, G., Reynaldo, I., Martín, G. J., Rivera, R., & Oropesa, K. (2011). Uso del EcoMic® y el producto bioactivo Pectimorf® en el establecimiento de dos especies forrajeras Use of EcoMic® and the bioactive product Pectimorf® in the establishment of two forage species. *Pastos y Forrajes*, 34(3), 281–294.
- PEREZ, A., ROJAS, J., & MONTES, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 3(2), 366. <https://doi.org/10.24188/recia.v3.n2.2011.412>
- Piñeiro, A., Cerena, L., & Panigatti, J. (2006). *Suelos Salinos y Sódicos*. http://rafaela.inta.gov.ar/info/bolintdiv/inta_rafaela_boletin_interno_divulgacion_007.pdf
- Pita, M. (2017). *PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS SÓDICOS, SU IMPACTO EN EL CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN RADICAL EN EL CULTIVO DE MAÍZ*. Universidad

Nacional de Córdoba Facultad.

- Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, P. (2009). *SUBSISTEMA BIOFÍSICO (LOS RECURSOS NATURALES Y EL MEDIO AMBIENTE)*.
<https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/odm/tundama/paipa.pdf>
- Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Paipa, P. (2009). PARTE II 1. EVALUACIÓN INTEGRAL DEL TERRITORIO (EIT). In *Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Paipa* (pp. 290–296).
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119–126.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Quinchanegua, E., & Parra, S. (2018). *Análisis de la dinámica de las sales y/o sodio con relación a las formas del terreno en la vereda el salitre municipio de Paipa*. 22.
- Ramírez, E., Manzanares, T., & Cabrera, M. (2014). La Teledetección Como Elemento De Aprendizaje De La Historia De La Ingeniería Y El Patrimonio Industrial : *Innovación Educativa En Las Enseñanzas Técnicas Vol., 1*, 167–181.
- Ramírez, R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. *Convenio FENALCE-SENA-SAC*, 13–23.
<http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>
- Ramírez, W., & Hernández, L. (2016). ARTICULO DE REVISION: Tolerancia a la salinidad en especies cespitosas. *Pastos y Forrajes*, 39(4), 219–228.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0864-03942016000400001&lng=es&nrm=iso
- Rebollo, S., & Gómez, A. (2003). Aprovechamiento sostenible de los pastizales. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, XII(3).
<https://www.redalyc.org/pdf/540/54012308.pdf>
- Restrepo, L., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecurias*, 20, 183–192. <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295023034010.pdf>
- Reuter, F. (2009). Principios de teledetección. *Serie Didáctica No 33. Catedra de Teldetección y Cartografía. Facultad de Ciencias Forestales - UNSE*, 1–63.
<http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>
- Rocha, Z., & Parra, S. (2011). ESTUDIO DE CLORUROS Y SULFATOS EN DIFERENTES ESTADOS FENOLÓGICOS DE *Eichhornia Crassipes* (Mart Solms) EN TRATAMIENTOS DE AGUA TERMOMINERAL SERVIDA EN EL MUNICIPIO DE PAIPA (BOYACÁ). In

Pengaruh Harga Diskon Dan Persepsi Produk Terhadap Nilai Belanja Serta Perilaku Pembelian Konsumen.

- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., & Hoshizaki, T. (1986). Remote Detection of Forest Damage. *BioScience*, 36(7), 439–445.
<https://doi.org/10.2307/1310339>
- Rodríguez, D., Sánchez, N., Domínguez, J., & Santa Marta, C. (2015). *Cuestiones de Teledetección* (U. N. de E. a Distancia (ed.)).
https://elibro.net/es/ereader/usta/48836?fs_q=teledetección
- Rodríguez, N., Moreno, G., García, L., Zarate, M., Arango, J., González, Y., & López, R. (2013). *1er Simposio Internacional Beneficios del Silicio en la Agricultura*.
<https://es.slideshare.net/OrlandoSnchezV/beneficios-del-silicio-en-la-agricultura>
- Rodríguez, O., & Arredondo, H. (2005). MANUAL PARA EL MANEJO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES OBTENIDAS DEL SENSOR REMOTO MODIS DE LA NASA, APLICADO EN ESTUDIOS DE INGENIERIA CIVIL [PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. In *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 42, Issue 1).
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100353>
- Rosales, N., Bermúdez, J., Moronta, R., & Morales, E. (2007). Gallinaza: un residual avícola como fuente alternativa de nutrientes para producción de biomasa microalgal. *Rev. Colomb. Biotecnol*, IX(1), 41–48.
- Sacristán, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Civilizar*, 5(9), 1. <https://doi.org/10.22518/16578953.701>
- Sadeghian, S., & (Cenicafé), C. N. de I. de C. (2016). *La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café* (López, San).
<https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0466.pdf>
- Safer, A. (2020). *FICHA TÉCNICA SAFER MICORRIZAS M. A.* <https://safer.com.co/wp-content/uploads/2020/04/F.T-Safermicorrizas-MA.pdf>
- Sánchez, E., Torres, M. Á., Palacios, A. F., Aguilar, M., Pino, I., & Granado, L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación del riesgo de incendios en Andalucía. *Tecnologías Geográficas Para El Desarrollo Sostenible*, 1–11. http://tig.age-geografia.es/docs/IX_2/Sanchez_Esperanza.PDF
- Sasal, M., & Soler, J. (1997). Identificación de materiales por su respuesta espectral. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 5(2), 165–170.

- Service-USDA, U. S. D. of A. N. R. C. (1999). Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. *Archiv Für Elektrotechnik*, 45(4), 1–871. <https://doi.org/10.1007/BF01574372>
- Service-USDA, U. S. D. of A. N. R. C. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. *Mdp.Edu.Ar*, 339. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- SIAC, S. de I. A. de C. (2017). *Catálogo de Mapas*. Zonificación de La Degradación de Suelos Por Salinización Para El Área Continental e Insular de Colombia a Escala 1:100.000 y 1:10.000 Respectivamente. Año 2016 - 2017. <http://www.siac.gov.co/geovisorconsultas>
- Soca, R., Rojas, J., Willems, B., Ocola, L., Fernández, R., & Pérez, J. (2016). Identificación de Tierras Degradadas por Salinidad del Suelo en los Cultivos de Caña de Azúcar en Pomalca usando Imágenes de Satélite . *Revista de Investigacion de Física*, 19(July), 0–9.
- Sowmya, V., Soman, K., & Hassaballah, M. (2019). Fundamentals and Advance. *ResearchGate, January*, 33–59. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03000-1>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. In *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Stenberg, B., Viscarra, R. A., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 107, Issue C). Elsevier Inc. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Sytar, O., Brestic, M., Zivcak, M., Olsovskaa, K., Kovar, M., Shao, H., & He, X. (2017). Applying hyperspectral imaging to explore natural plant diversity towards improving salt stress tolerance. *Science of the Total Environment*, 578(August 2016), 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.014>
- UCO. (2010). Introducció a la espectroscopia molecular. *Química Física*, 323–339. http://www.uco.es/organiza/departamentos/quimica-fisica/quimica-fisica/QuiFis/L14_QF_10_11.pdf
- Vallejo, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Vázquez, M. (2019). *Trabajo Fin de Grado Análisis de imágenes hiperespectrales obtenidas con el sensor AHS Grado en Ingeniería de Telecomunicaciones* [Escuela de Ingeniería de Telecomunicación Universidad de Vigo]. <http://castor.det.uvigo.es:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/336/TFG Martín>

Vázquez Otero.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vicuña, P. (1985). PASTOS Y FORRAJES DE CLIMA FRIO. *Servicio Nacional de Aprendizaje "SENA,"* 3, 54.

http://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/446/12/vol3_pastos_clima_frio_op.pdf

Wang, Q., Li, P., & Chen, X. (2012). Modeling salinity effects on soil reflectance under various moisture conditions and its inverse application: A laboratory experiment. *Geoderma*, 170, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.015>

Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.

<https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Zambrano, R. (2015). EFECTO ACONDICIONANTE DE TRES ENMIENDAS SILICATO MAGNÉSICAS ENRIQUECIDAS CON ROCA FOSFÓRICA EN EL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE (*Elaeis guineensis* Jacq), PARA CORRECCIÓN DE pH EN UN SUELO ÁCIDO, EN SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS [UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO UNIDAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA MODALIDAD SEMIPRESENCIAL].

<https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/28>

Zhang, T. T., Zeng, S. L., Gao, Y., Ouyang, Z. T., Li, B., Fang, C. M., & Zhao, B. (2011). Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 11(6), 1552–1562. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.025>

Zinck, J. (2012). Geopedología. *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation*, 131. https://www.actswithscience.com/Descargas/zinck_geopedologia_2012.pdf

13 ANEXOS

Anexo 1 *Suelos de la vereda El Salitre*

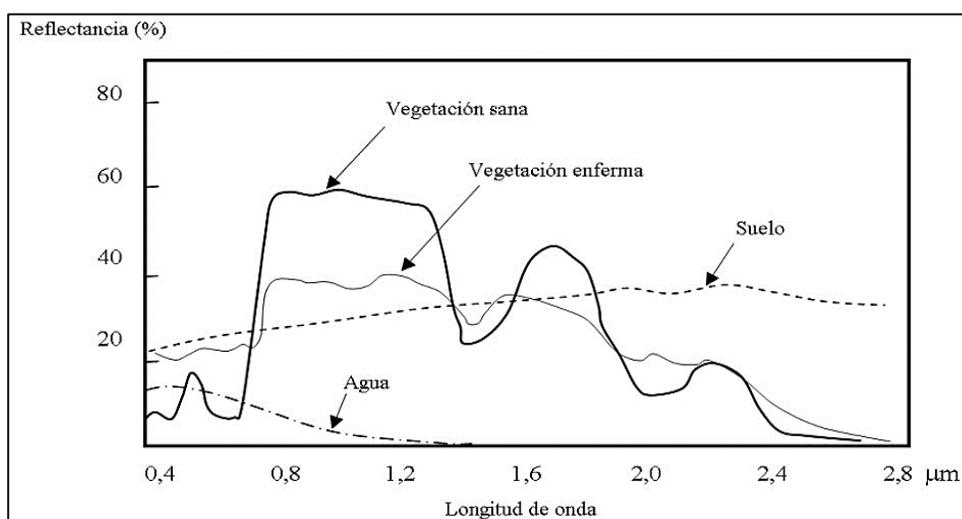
Anexo 2 *Coordenadas geográficas de la vegetación*

Anexo 3 *Conflicto de uso de la zona de estudio*

Anexo 4 *Capacidad de uso de la zona de estudio*

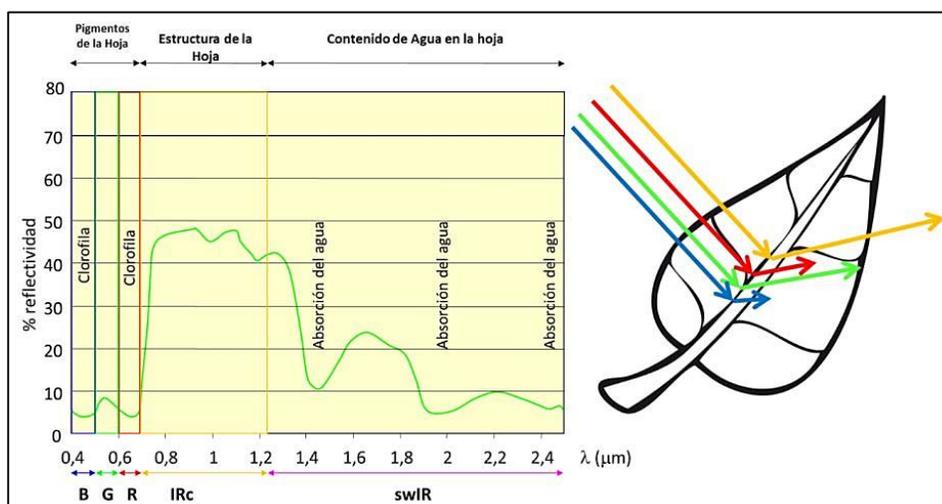
Anexo 5 *Clima de la zona de estudio*

Anexo 6 *Firma espectral del suelo*



Fuente: (J. Hernández & Montaner, 2009)

Anexo 7 *Firma espectral de la vegetación*



Fuente: (Peláez, 2017)

Anexo 8 Ecosistemas de la zona de estudio**Anexo 9 Salinización de la zona de estudio****Anexo 10 Variables químicas del suelo**

N° DE CAJUELA	VARIABLES QUÍMICAS			
	pH	CE (Ds/m)	RAS (meq/l)	PSI (%)
GT-01(0-25)	4,31	4,32	13,53	12,21
GT-02(0-25)	6,21	1,18	11,3	31,32
GT-03(0-25)	7,21	4,03	13,55	15,09
GT-04 (0-25)	7,4	1,27	2,84	4,54
GT-05 (0-25)	7,66	0,64	1,7	0,9
GT-06(0-25)	4,26	0,26	0,7	0,06
GT-07(0-25)	4,02	0,24	0,4	0,04
GT-08(0-25)	4,25	0,24	1,08	0,013
GT-09(0-25)	4,05	0,21	1,4	0,07
GT-10(0-25)	3,6	0,36	1,83	0,56
GT-11(0-25)	3,7	0,51	2,26	0,72
GT-12(0-25)	4,27	0,5	0,66	0,72
GT-13(0-25)	3,79	0,7	0,95	0,39
GT-14(0-25)	4,14	0,62	1,21	0,75
GT-15(0-25)	4,04	0,51	0,9	0,73
GT-16 (0-25)	4,05	0,46	0,6	0,12
GT-17 (0-25)	3,84	0,91	0,97	0,65
GT-18 (0-25)	4,09	0,27	0,55	0,01
GT-19 (0-25)	4,02	0,49	0,41	0,06
GT-20(0-25)	4,04	0,79	2,29	0,54
GT-21 (0-25)	7,38	0,65	1,6	3,12
GT-22 (0-25)	4,04	0,65	0,88	0,39
GT-23 (0-25)	4,02	0,59	0,63	0,51

Fuente: Autoría propia con base en los resultados del suelo del Laboratorio Nacional de Suelos (Quinchanegua & Parra, 2018)

Anexo 11

Valores de los índices espectrales

N° DE CAJUELA	INDICES DE VEGETACIÓN		INDICES DE SALINIDAD	
	NDVI	SAVI	INDSAL	NDSI
CAJUELA 1	0,517	0,816	0	0
CAJUELA 2	0,619	0,771	-0,072	0,475
CAJUELA 3	0,303	0,64	0	0,333
CAJUELA 4	0,459	0,736	0,44	-0,44
CAJUELA 5	0,844	1	0,353	-0,546
CAJUELA 6	0,523	0,78	0,188	-0,277
CAJUELA 7	0,371	0,65	0,156	-0,348
CAJUELA 8	0,016	-0,325	0,153	-0,205
CAJUELA 9	-0,195	-0,041	0,148	-0,312
CAJUELA 10	-0,26	-0,29	0,232	-0,248
CAJUELA 11	0,433	0,631	0,333	-0,322
CAJUELA 12	0,604	0,833	0,291	-0,328
CAJUELA 13	0,494	0,74	0,347	-0,371
CAJUELA 14	0,67	0,655	0,298	-0,396
CAJUELA 15	0,557	0,819	0,288	-0,402
CAJUELA 16	0,489	0,757	0,26	-0,637
CAJUELA 17	0,643	0,788	0,363	-0,528
CAJUELA 18	0,157	0,236	0,207	-0,434
CAJUELA 19	0,413	0,619	0,266	-0,392
CAJUELA 20	0,341	0,511	0,358	-0,304
CAJUELA 21	0,075	0,113	0,291	-0,445
CAJUELA 22	0,473	0,709	0,285	-0,543
CAJUELA 23	-0,368	-0,489	0,142	-0,017