



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS GEOFÍSICOS Y LAS
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO DE LA CUENCA
DEL RÍO CHIMBORAZO”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: ROSERO TOLEDO MIGUEL ANGEL

DIRECTORA: Dra. MAGDY MILENI ECHEVERRÍA GUADALUPE, PHD.

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS GEOFÍSICOS Y LAS
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO DE LA CUENCA
DEL RÍO CHIMBORAZO”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: ROSERO TOLEDO MIGUEL ANGEL

DIRECTORA: Dra. MAGDY MILENI ECHEVERRÍA GUADALUPE, PHD.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Rosero Toledo Miguel Angel

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Miguel Angel Rosero Toledo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 22 de enero de 2024



Miguel Angel Rosero Toledo

C.I: 0803161025

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**EVALUACIÓN DE PARAMETROS GEOFISICOS Y LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO CHIMBORAZO**”, realizado por el señor: **MIGUEL ANGEL ROSERO TOLEDO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Luis Elias Guevara Iñiguez, Msc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.		22-01-2024
Dra. Magdy Mileni Echeverría Guadalupe, PhD DIRECTORA DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		22-01-2024
Ing. Sofia Carolina Godoy Ponce, Mgs ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		22-01-2024

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación dedico de forma muy especial a Dios por darme salud para llegar hasta aquí. A mis padres Miguel Rosero y Marisol Toledo por ser mis pilares fundamentales de toda la vida, padres que me enseñaron que por más fuerte que sea la caída, me levantara, sacudiera mis rodillas y siguiera adelante. También quiero agradecer a mi hermano y hermana que siempre estuvieron junto a mí, en todo momento, por eso, con humilde y gran amor dedico este presente trabajo a mi amada familia, que saben cuánto sacrificio ponemos a todo lo que amamos.

Miguel

AGRADECIMIENTO

A mi amada familia por demostrarme que la vida no es una carrera de velocidad sino de constancia. Mi agradecimiento sincero a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas por haberme permitido ser parte de esta prestigiosa institución. A mis queridos maestros, forjadores del saber de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por sus sabios conocimientos que aportaron de manera muy significativa para mi formación como profesional y como persona mediante sus experiencias durante mi periodo académico dentro de la Institución. Agradezco de manera especial A la Doctora Magdy Echeverría, al Ingeniero Carlos Rosero, a la Ingeniera Sofia Godoy, al Ingeniero Franklin Cargua, y a todo el grupo de Investigación- Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC-ESPOCH) por permitirme formar parte de esta familia científica, quienes hicieron posible el desarrollo de la presente investigación con sus conocimientos y guías.

Miguel

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY	xiii
INTRODUCCIÓN	1

CAPITULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.1.1. <i>Problema general de la investigación</i>	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Hipótesis	4
1.4.1. <i>Hipótesis nula</i>	4
1.4.2. <i>Hipótesis alterna</i>	4

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de investigación	5
2.2. Bases teóricas	9
2.2.1. <i>Cuenca del Río Chimborazo</i>	9
2.2.2. <i>Geofísica</i>	10
2.2.3. <i>Teledetección</i>	11
2.2.4. <i>Espectro electromagnético</i>	12
2.2.5. <i>Firmas espectrales</i>	12
2.2.5.1. <i>Firma espectral característica del suelo</i>	13
2.2.6. <i>Suelo</i>	13
2.2.6.1. <i>Parámetros geofísicos del suelo</i>	14
2.2.6.2. <i>Resistividad Eléctrica</i>	14
2.2.6.3. <i>Conductividad eléctrica</i>	15

2.2.6.4.	<i>Velocidad de onda sísmica</i>	15
2.2.6.5.	<i>Densidad aparente</i>	15
2.2.6.6.	<i>Porosidad</i>	16
2.2.6.7.	<i>Permeabilidad</i>	17
2.2.7.	<i>Propiedades físicas del suelo</i>	17
2.2.7.1.	<i>Propiedades químicas del suelo</i>	17
2.2.8.	<i>Variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo</i>	18
2.2.9.	<i>Variabilidad espacial de los suelos</i>	20
2.2.10.	<i>Elementos minerales del suelo</i>	20
2.2.11.	<i>Clasificación de suelos en el Ecuador</i>	21
2.2.12.	<i>Páramo</i>	22
2.2.13.	<i>Ubicación y extensión</i>	22
2.2.14.	<i>Geoestadística</i>	23
2.3.	Bases conceptuales	23
2.3.1.	<i>Suelo de páramo</i>	23
2.3.2.	<i>Propiedades físico químicas de suelo de Paramo</i>	24
2.3.3.	<i>Carbono orgánico total</i>	24
2.3.4.	<i>Teledetección enfocada al suelo</i>	24
2.3.5.	<i>Índices espectrales</i>	24
2.4.	Bases legales	24

CAPITULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	26
3.1.	Metodología	26
3.1.1.	<i>Tipo de investigación</i>	26
3.1.2.	<i>Diseño de la investigación</i>	26
3.1.2.1.	<i>Pre experimental</i>	26
3.1.2.2.	<i>Identificación de las variables</i>	27
3.1.2.3.	<i>Área de Estudio.</i>	28
3.1.3.	<i>Generación de base de datos</i>	29
3.1.4.	<i>Obtención y procesamiento de imágenes satelitales</i>	29
3.1.5.	<i>Extracción y validación de datos</i>	31
3.1.6.	<i>Construcción de índices espectrales</i>	31
3.1.7.	<i>Evaluación de la relación de la variable de interés con los índices espectrales</i>	31
3.1.8.	<i>Análisis de la información</i>	34
3.1.9.	<i>Análisis estadístico</i>	34

CAPITULO IV

4.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1.	Determinar la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo en la cuenca del Rio Chimborazo en relación con la reserva de Producción de Fauna Chimborazo, mediante el uso de herramientas bibliográficas que permitan una mayor comprensión de los componentes edáficos del suelo de estudio.....	35
4.1.1.	<i>Análisis de la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo en la cuenca del Rio Chimborazo</i>	38
4.2.	Evaluación de la variabilidad espacial y realizar la cartografía de las propiedades físico-químicos del suelo en la cuenca del Río Chimborazo con respecto a la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.....	39
4.3.	Estudio comparativo en una parcela establecida en la zona de estudio.....	41
4.3.1.	<i>Construcción de los índices espectrales</i>	41
4.3.2.	<i>Coefficiente de correlación</i>	43
4.3.3.	<i>Evaluación de la relación del carbono con los índices espectrales</i>.....	44
4.3.4.	<i>Evaluación de índices espectrales</i>.....	45
4.4.	Discusión de los resultados.....	48

CAPÍTULO VI

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1.	Conclusiones.....	51
5.2.	Recomendaciones.....	52

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Términos descriptivos de los suelos según el pH y efectos esperables en cada rango	18
Tabla 2-2:	Términos descriptivos de los suelos según el pH y efectos esperables en cada rango	19
Tabla 3-1:	Propiedades físico químicas y parámetros geofísicos del suelo	27
Tabla 3-2:	Índices espectrales a partir de Landsat 8 y del Modelo de Elevación Digital.	33
Tabla 4-1:	Análisis físico químico del suelo de la Chorrera Mirador	35
Tabla 4-2:	Análisis físico químico del suelo del río colorado	36
Tabla 4-3:	Análisis físico químico del suelo Cununyaku	37
Tabla 4-4:	Análisis de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los suelos de los tres sitios	38
Tabla 4-5:	Propiedades Geológicas de las parcelas de entrenamiento.....	40
Tabla 4-6:	Parámetros de propiedades físico-químicas del suelo e índices espectrales.....	41
Tabla 4-7:	Análisis de Medidas de tendencia central.....	42
Tabla 4-8:	Matriz de correlación de Pearson	43
Tabla 4-9:	Resumen estadístico de regresión.....	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1:	Ubicación de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo	28
Ilustración 3-2:	Proceso de selección y descarga de imágenes satelitales.....	29
Ilustración 3-3:	Corrección de la imagen satelital.....	30
Ilustración 3-4:	Extracción de datos estadísticos-modelo y validación de datos.....	31
Ilustración 4-1:	Características principales de las diferentes formaciones litológicas del suelo.	40
Ilustración 4-2:	Resumen estadístico de regresión.	44
Ilustración 4-3:	Evaluación del cuadrante 09 mediante la corrección Pan-sharpened (afinado).	48

RESUMEN

El suelo de páramo de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo experimentó diversas amenazas asociadas a actividades antrópicas, expansión de la frontera agrícola, cambio climático y falta de una gestión gubernamental oportuna. Abordando estas problemáticas y respaldándose en el empleo de herramientas geográficas, así como considerando la escasez de información debido al difícil acceso propio de ese tipo de zonas, se llevó a cabo un estudio cuyo propósito fue evaluar la relación entre los parámetros geofísicos y las propiedades fisicoquímicas del suelo de la cuenca del río Chimborazo. En el marco de un diseño preexperimental, se utilizó la base de datos del GIDAC de 3 zonas de muestreo para analizar conjuntamente las propiedades físico químicas y los parámetros geofísicos del suelo. Estos fueron correlacionados mediante el uso de herramientas de sistema de información geográficas y estadísticas. Los hallazgos revelaron que el Contenido de carbono total (COT) fue la variable con mayor correlación, con un valor superior a (+/-) 0.9, considerando un R^2 de 0.88 y un p valor de ANOVA menor a 0.05, se excluyó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna. Por lo tanto, se concluyó que los índices espectrales son buenos indicativos de cambios sustanciales en el contenido de COT y la humedad del suelo.

Palabra claves: <SUELO DE PÁRAMO> <PROPIEDADES FISICO QUIMICAS>
<TELEDETECCION> <PARAMETROS GEOFISICOS> <ÍNDICES ESPECTRALES>
0229-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

The land from the *Reserva de Producción de Fauna de Chimborazo* moorland has experienced diverse threats associated with anthropic activities, expansion of the farming limits, climate change, and the lack of adequate governmental management. Covering these problems and supporting the use of geographical tools, as well as, considering the lack of information due to the difficult access to the zone, this research was carried out to evaluate the relationship between the geophysical parameters and the physical-chemical proprieties of the land from the catchment area of Chimborazo River. In the frame of the pre-experimental design, Zone 3 sampling GIDAC's database was used to analyze the physical and chemical properties in conjunction with the physical-chemical parameters of the land. These were correlated with the use of information tools of geographical and statistical systems. The finding revealed that the Carbon Total Content (CTC) was the variable with the main correlation with the superior rate (+/-) 0,9. Considering an R2 of 0,88 and a p ANONVA value less than 0,05, the null hypothesis was excluded, and the alternate hypothesis was accepted. Therefore, it was concluded that the expected rates are good indicators of sustainable changes in the content of CTC and soil humidity.

Keywords: <PARAMO SOIL> <PHYSICAL CHEMICAL PROPERTIES> <REMOTE SENSING> <GEOPHYSICAL PARAMETERS> <SPECTRAL INDICES>
0229-DBRA-UPT-2024



Ing. Romel Francisco Calles Jiménez Mgt.

C.I. 0603877713

INTRODUCCIÓN

En un rincón especial del territorio ecuatoriano, donde la naturaleza, la mente humana y la ciencia convergen en un determinado punto, nació un estudio de gran relevancia. En el área de la cuenca del río Chimborazo donde los frágiles ecosistemas de páramo luchan por sobrevivir, con más del 90 % de su territorio compuesto por páramos esta investigación se adentró en la exploración de los vínculos más cercanos que conectan los parámetros geofísicos y las propiedades fisicoquímicas del suelo en la zona de singular interés (INEC, 2020).

El grado de afectación de estas zonas es evidente, con estimaciones que indicaron que aproximadamente el 58% de los páramos en Ecuador, se encuentran en la actualidad en un estado crítico debido a la degradación y el cambio de uso de suelo (MAE, 2014). En este enfoque, los índices espectrales, derivados de la teledetección y a su vez, de sistemas de información geográfica, emergen como una herramienta revolucionaria capaz de evaluar el estado de vegetación y su relación con las propiedades del suelo (Xu et al., 2019).

El núcleo de esta investigación se dirigió hacia el análisis de como los parámetros geofísicos y las propiedades físico químicas del suelo se entrelazan, con la meta de construir un entendimiento que pueda informar sobre prácticas de conservación y buen manejo de los recursos naturales. Para abordar este desafío, se delinea objetivos específicos que abarcan desde la caracterización de las propiedades del suelo hasta el análisis comparativo de su variabilidad espacial. Por ejemplo, estudios previos han demostrado que existe una buena relación de forma directa entre los índices espectrales, como el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y el contenido de carbono orgánico en el suelo (Xu et al., 2019).

A medida que los resultados se develaron, se desplegaron patrones interesantes. La variación en el pH del suelo, la conductividad eléctrica, la humedad y la textura no solo se presentan como números aislados, sino como elementos intrínsecamente relacionados con la geología circundante y la actividad volcánica de la zona. Estas revelaciones pueden proporcionar información crucial para el desarrollo de medidas de conservación y prácticas agrícolas sostenibles en pro de la comunidad. (Lanfranco et al., 2014: pp. 139-143).

En última instancia, esta investigación no solo contribuyó al campo de las geo-ciencias, sino que también permite proporcionar importante información para la toma de decisiones con base científica.

CAPITULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La cuenca del río Chimborazo, a lo largo de las décadas ha sido objeto de intervención humana en sus ecosistemas de alta montaña de forma negativa, como por ejemplo se observa grandes afectaciones en el componente edáfico, el cual ha venido siendo objeto de sobreexplotación, ya sea afectando la cobertura vegetal, usando técnicas de sobrepastoreo o simplemente por un mal manejo.

La sobreexplotación descontrolada de suelos puede conducir a resultados desastrosos que generan efectos adversos sobre todo en la sostenibilidad de las comunidades. Estos problemas también suceden en zona de páramo, y la falta de recursos para estudiar esta área se hace evidente.

El suelo de páramo presenta varias amenazas asociadas a varios aspectos. Abordar este tipo de problemáticas en zonas de difícil acceso obstaculiza los posibles estudios y medidas de mitigación en suelos intervenidos, generando una afectación aun mayor debido a la falta de información. De igual manera algunas leyes que no facilitaban su estudio.

La intervención del hombre ha provocado daño a corto y largo plazo en la naturaleza, en la zona de estudio ubicada en la cuenca rio Chimborazo considerando el área de la reserva de Produccion de Fauna Chimborazo donde se nota extensiones de cultivos de diferentes tipos, los cuales afectan al hábitat en general, vulnerando la funcionalidad del mismo. El problema surgió ante los escasos de información sobre la verdadera situación del páramo, su nivel de afectación como ecosistema frágil, considerando que la disminución de ese bien, afecta de forma directa a otros recursos como hídricos y de igual manera vulnerando el buen vivir de la población en cuanto al desarrollo sostenible.

1.1.1. Problema general de la investigación

¿Cuál es la relación que existe entre las propiedades físico químicas y los aspectos geofísicos del suelo de la Cuenca del Rio Chimborazo?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la relación entre los parámetros geofísicos y las propiedades fisicoquímicas del suelo de la cuenca del río Chimborazo

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo en diferentes áreas de la cuenca del Río Chimborazo en relación con la reserva de Producción de Fauna Chimborazo, mediante el uso de herramientas bibliográficas que permitan una mayor comprensión de los componentes edáficos del suelo de estudio.
- Examinar la heterogeneidad espacial de las propiedades físico-químicos del suelo en la cuenca del Río Chimborazo con respecto a la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.
- Realizar un estudio comparativo entre las características geofísicas y las propiedades físico químicas del suelo en una parcela seleccionada dentro de la zona de estudio.

1.3. Justificación

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los parámetros geofísicos y las propiedades físico- químicas del suelo en la cuenca del río Chimborazo. Por medio de este estudio se estimó la relación que existe entre los índices espectrales y las propiedades del suelo mediante el uso de herramientas de tecnología geoespacial y base de datos de estudios en campo, dicha correlación demostró ser una herramienta oportuna, precisa e innovadora para la toma de decisiones en pro del desarrollo sostenible del páramo, la comunidad y sus áreas de influencia, de esta manera incorporar herramientas geomáticas en conjunto con datos in situ, para ofrecer soluciones integrales a esta problemática.

En el área son escasos los estudios en cuanto a la elaboración de algoritmos que mejor se adecuen a los aspectos físico químicos con el fin de conocer el estado del recurso suelo. De primera mano se supo que en esta zona existe un alto grado de contaminación por efectos antrópicos como asentamientos urbanos, agricultura, y ganadería, los cuales se han intensificado a lo largo de la historia, afectando a la calidad del suelo de páramo y como consecuencia, alterando significativamente la regulación del agua, erosión y sequía.

La elaboración de esta investigación permitió conocer con mejor enfoque respecto a las condiciones del suelo en la cuenca río Chimborazo y proporcionó datos esenciales para la toma de decisiones, con el fin de conservar y manejar de forma sostenible el recurso suelo. Además, esta información fue de total relevancia para la comunidad indígena autóctona de esta zona, así como también para la comunidad científica, brindando bases para futuras investigaciones y proyectos en pro de preservar el medio ambiente.

Ante la problemática expuesta, y en pro de preservar el recurso suelo- páramo, , junto con apoyo del grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC-ESPOCH), dentro del proyecto “Medios de vida como estrategia para la planificación y gestión en la adaptación basada en ecosistemas - PACHA” IDI-ESPOCH” se evaluó la relación entre parámetros geofísicos y aspectos físico-químicos del suelo de la cuenca rio Chimborazo, con el fin de generar bases de datos para aportar al desarrollo de la localidad, en cuanto al área científica y social.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis nula

Las propiedades físico- químicas del suelo y las herramientas de información geográfica no tienen una correlación significativa.

1.4.2. Hipótesis alterna

Existe una correlación significativa entre el uso de sistemas de información geográfica y las propiedades físico químicas del suelo.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

La cuenca del río Chimborazo, ubicada en la región andina de Ecuador, es un área importante para la agricultura y la ganadería. La evaluación de los parámetros geofísicos y las propiedades físico-químicas del suelo de esta cuenca es esencial para comprender su capacidad productiva y su potencial para el desarrollo sostenible (Cañizares et al., 2015: pp. 29-34). A continuación, se presenta algunos antecedentes referentes a la temática:

Según (Echeverría et al., 2023), en su obra cuyo objetivo fue evaluar la dinámica espacial de la cobertura costera dentro de la zona de influencia del río Chambo, centro del Ecuador”, tomaron como muestra 7 imágenes satelitales de landsat los años 2000, RapidEye 2009, y Spot 6 del año 2019, y en los rangos 2000- 2009 y 2009- 2019; mediante su metodología fundamentada en la clasificación supervisada por medio de algoritmo de máxima verosimilitud, tuvo como resultados previa validación mediante cálculo de medidas de precisión y el índice Kappa, una considerable pérdida en la cobertura del suelo- remanentes del páramo con un 26.70 %, en cuanto a cobertura de cultivo el mayor porcentaje de ganancia fue de 28.91, y en cuanto a su segunda etapa, la clase de cultivo presentó los mayores porcentajes de pérdidas 18.94% y ganancias 17.29%.

Luego de realizar la proyección para el año 2030 los resultados prevén que para entonces la extensión de la frontera agrícola aumentará 1.27%, afectando a la zona de bosque con un 1.19% menos, mientras que para suelos remanentes de páramos ganará apenas un 0.79% y la cobertura de cultivos y pastos decrecerá un 0.45 y 0.43% respectivamente.

Según (Echeverría, et al., 2014) en su obra se determinó el carbono orgánico en el páramo de Pichan Central, Ecuador, tomando como muestra, puntos de la zona San Isidro de forma aleatoria representando el espacio de la biomasa, es decir raíces, almohadillas, paja, por otro lado, en cuanto a profundidad del suelo se tomaron a 0.70 cm, 70-120 cm de profundidad. Su técnica empleada fue la colorimétrica según Walkey' Black, donde se obtuvo como resultado un promedio de biomasa de: paja raíz, 26.99%, almohadilla: 43.10%, para: 26.99% y almohadilla raíz 34.94%. De igual forma para el suelo a una profundidad rango 0-70 cm de profundidad fue de un 34.90%, tanto que para el suelo en el rango de 0.70-120 cm de profundidad, fue de 27. 43% su porcentaje.

Con esto se concluyó que el páramo presenta grandes cantidades de materia orgánica acumulada, y no solo acumula carbono en el suelo en su forma orgánica sino también aporta en la regulación hídrica del suelo.

"Análisis de los parámetros geofísicos del suelo en la cuenca del río Chimborazo" realizado por (Cañizares et al., 2015: pp. 29-34). Este estudio se enfocó en la evaluación de los parámetros geofísicos del suelo en la cuenca del río Chimborazo. Los investigadores utilizaron técnicas geofísicas no invasivas, como la resistividad eléctrica y la radiometría gamma, para medir la densidad aparente, la humedad del suelo y la concentración de elementos radiactivos. Los resultados indicaron una alta variabilidad espacial de los parámetros geofísicos del suelo, lo que sugiere la existencia de diferentes tipos de suelos en la cuenca.

"Evaluación de la calidad del suelo en la cuenca del río Chimborazo mediante el uso de índices de calidad del suelo" realizado por (González et al 2018: pp. 53-62). En este estudio, los investigadores evaluaron la calidad del suelo en la cuenca del río Chimborazo utilizando índices de calidad del suelo. Se midieron las propiedades físicas y químicas del suelo, como la textura, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y el pH. Los resultados indicaron que la calidad del suelo en la cuenca es baja a moderada debido a la erosión del suelo, la compactación y la contaminación.

"Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la cuenca del río Chimborazo" realizado por (Narváez et al 2019: pp. 1-7). En este estudio, se evaluó la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la cuenca del río Chimborazo. Se midieron la textura, la densidad aparente, la porosidad y la humedad del suelo en diferentes puntos de la cuenca. Los resultados mostraron una alta variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo, lo que indica la existencia de diferentes tipos de suelo en la cuenca.

Se han realizado varios estudios para la evaluación de los parámetros geofísicos, propiedades físico químicas del suelo en general, donde se destacan los aspectos que fueron considerados relevantes para esta investigación, entre los que se mencionan las obras:

Según el trabajo de (Ganga et al., 2023) la "aplicación de SIG y teledetección en monitoreo del suelo del medio ambiente", es de vital importancia para realizar una gestión oportuna en cuanto a procesos de mitigación. Varios estudios mencionaron que problemas como la actividad antrópica y efectos de la erosión han ido en aumento en el siglo presente, gracias a los efectos provocados por el cambio climático y actividad humana desmedida.

A todo esto y ante la evolución de tecnología de teledetección con imágenes de mayor resolución, integradas con observaciones de campo (in situ), ha logrado procesos de monitoreo más precisos. Por lo tanto, es fundamental implementar y perfeccionar métodos y modelos más precisos y eficientes, considerando esta relación que sin duda promete acaparar la atención en los próximos años.

De acuerdo con (Pazmiño et al., 2021) manifestó como objetivo identificar variables para la clasificación de suelos de paramo mediante teledetección y carbono orgánico, mencionando que que los páramos son muy ricos de diversidad, ya que brindan a la comunidad servicios ambientales tales como la regulación hídrica, o el secuestro de carbono. Sin embargo, los grandes problemas que afrontan al ser zonas de difícil acceso ha retrasado la pronta generación de planes de mitigación ante la extensión de frontera agrícola por efectos antrópicos. Se obtuvo a partir de muestreos dos modelos no paramétricos, y usando tres atributos como el modelo de elevación digital, la cobertura de uso de tierra (Sentinel 2) y el contenido de carbón orgánico. Sus resultados al ser contrastados con un informe emitido por gobierno, encontraron que el 9% del páramo se ha perdido en los últimos 8 años.

Según (Suntaxi y Toscano, 2022) por medio de su objetivo el cual fue “evaluar la concentración de carbono orgánico del suelo mediante su análisis físico químico” buscó identificar si las actividades de carácter antrópico, tales como monocultivos o extensión de frontera agrícola, afectan dichas concentraciones. Este trabajo de tipo experimental y descriptivo, usó análisis físico químicos de tres tratamientos con suelo intervenido y no intervenido, que mediante un muestro aleatorio de 15 submuestras, sus resultados arrojaron que tanto en suelos intervenidos como no intervenidos si contaban con un pH ligeramente ácido entre 5.10 a 5.76, con un porcentaje de humedad entre 33.46 a 83.34, y carbono orgánico total entre 92.85 y 186.14, con esto se concluyó que las actividades antrópicas tienen influencia directa sobre la cantidad de carbono orgánico en el suelo de páramo.

Así mismo (Vasquez et al., 2010) estudió la variabilidad espacial de las variables física, siendo el caso que la humedad gravimétrica, textura, densidad aparente (Da), resistencia a la penetración (RP) y conductividad hidráulica (KH) corresponden a esta subclasificación mientras que en las químicas abarcan la Materia orgánica (MO), pH, y varios metales. El análisis estadístico mostró como resultados una gran variabilidad de las propiedades; la densidad aparente y el pH presentaron baja variación. Con el análisis Geoestadístico se visualizó y graficó la variabilidad de cada propiedad evaluada y se evidenció la existencia de moderada dependencia espacial en las propiedades. (pp. 449-456)

Según (Sihan, P et al., 2023) expuso en su artículo que lograron predecir y mapear de carbono orgánico y nitrógeno total en perfiles de suelo recuperados en áreas de minería, también recalcó la importancia del uso combinado de estas estrategias metodológicas, donde mencionó que en comparación con los métodos tradicionales, químicos, el uso de la teledetección brindó una técnica rápida y no invasiva, que bien puede ser tomada como referencia para estimar indicadores importante de las propiedades del suelo. Para este caso se seleccionó perfiles de suelo de áreas mineras recuperadas, los mismos que fueron sometidos a patrones de distribución y características hiperespectrales, con el fin de construir un modelo de aprendizaje automático capaz de mapear contenido de carbono en el suelo y nitrógeno total. (pp. 2949-2960)

Conforme a (Paz, 2018), estimó variables biofísicas del suelo, por medio de sensores remotos, en este caso índices espectrales, permitiendo parametrizar diferentes modelos y adaptarse a varios campos aplicativos, ya que consideró aspectos teóricos y evidencia experimental o de campo (in situ), logrando un así un algoritmo válido para establecer su robustez y estabilidad, para futuros trabajos. (pp. 239-259)

En el estudio de (Mejía et al., 2018) el cual expuso sobre la “Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México” y como han sido afectadas por la frontera agrícola y deforestación, que, debido a la falta de información, la comunidad no ha logrado contrarrestar ese efecto que generando problemas a la comunidad. El presente trabajo analizó la variabilidad espacial tanto de propiedades físicas (como la textura, densidad aparente) como químicas (pH, materia orgánica y carbono orgánico).

Se distribuyeron 11 parcelas tomando muestras a 0.30 m. Los resultados arrojaron que existe alta variabilidad espacial relacionada con el punto de muestreo, y la antigüedad del tipo de suelo, es decir la variabilidad estuvo muy influenciada por la zona de muestreo y propiedades del área. (pp. 275-288)

Exponiendo la obra de (Ciarlo et al., 2020), cuyo objetivo planteó “analizar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo”, mantuvo como concepto que, mediante esta innovadora forma de implementar prácticas agrícolas, permitieron generar un método sostenible y poco invasivo. En cuanto a su muestreo se ubicó dos lotes a 0.20 m de una cuadrícula de 100 puntos. Por medio de estadística descriptiva y geoestadística, dentro de sus resultados se tuvo un pH con baja variabilidad espacial a distancias cercanas, mientras que a mayor distancia la variabilidad fue de mayor consideración debido a la alta complejidad de estudio de variables en la zona.

En cuanto al contenido de carbono en el suelo señaló una buena correlación con una significancia considerable en la mayoría de los sitios. Este estudio recomendó considerar trabajar en zonas reducidas o por lote, según el tipo de investigación con el fin de evitar una mayor variabilidad. (pp. 249-261)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cuenca del Río Chimborazo

El río Chimborazo cruza de norte a sur la parroquia San Juan, hasta el límite de la llanura Liribamba. El genesis del rio se da en la base de los deshielos Chimborazo y en su recorrido se encuentran o convergen junto a las aguas de los ríos Mambuc-Calera, Ballagán y Pasguazo. El caudal promedio del río Chimborazo es de 506 l/seg, en tanto que el de la cuenca es de 1 000 l/seg, de los cuales el 40 % se utiliza en las comunidades altas (34 % para riego y 6 % para consumo humano) y el 60 % restante abastece el riego de comunidades del cantón Riobamba y Guano. Al momento el 75 % de las comunidades poseen agua segura, aunque aún existe agua sin turbiedad que reporta coliformes (Pavón, 2016, p. 32).

La provincia de Chimborazo es una de las áreas de mayor superficie de páramos en el Ecuador, con un poco más de 246000 hectáreas de paramo. Presentan una capa de materia orgánica cuya función es vital para la regulación del agua y a la concentración de nutrientes (Bustamante y Argüello, 2011). En el área de conservación de la RPFCH se han divisado especies de fauna representativas: conejo de páramo, venado, curiquingue, vicuña, lobo de páramo, así como microorganismos (Romero et al., 2018: pp.1-57).

Dentro de la UOCIC (En la Unión de Organizaciones Campesinas Indígenas intercomunales Chimborazo Rey de los Andes) se evidencia 1024 hectáreas de las que conforman zonas de bosques, agrosilvopasturas y bosquetes, de las cuales 215 conforman plantaciones forestales y en cuanto a las especies nativas, en las riberas se encuentra el 5%. El 63% de los páramos constituyen la reserva natural y son custodiados por ser propiedad privada. Este ecosistema de paramo presenta pantano, estipas y almohadillas.

El área del ecosistema ha venido siendo afectado o mitigado en un 50% a causa del aumento de la frontera agrícola, quemas, lo cual genera erosión y pérdida de nutrientes del suelo y deterioro de los demás recursos como el agua (Pavón, 2016, p. 33).

2.2.2. Geofísica

De acuerdo con Mussett et al (2000: pp. 225-227) la geofísica es el estudio de la física de la tierra, su superficie, interior, y el entorno circundante en el espacio. Es una disciplina científica que se enfoca en el estudio de la estructura, composición, y procesos dinámicos del planeta Tierra. Esta rama de la ciencia utiliza principios y métodos de la física, la matemática y la geología para entender mejor la naturaleza y el comportamiento de la Tierra y sus sistemas.

La geofísica desempeña un papel crítico en nuestra comprensión de la Tierra y sus procesos. Se utiliza para investigar una amplia gama de fenómenos, incluyendo terremotos, volcanes, la tectónica de placas, el campo magnético de la Tierra y el cambio climático. Al estudiar las propiedades físicas de la Tierra, los geofísicos pueden obtener información sobre los procesos subyacentes que dan forma a nuestro planeta y desarrollar modelos para predecir cambios futuros (Bolt, 2018, pp.120-225).

Una de las aplicaciones más importantes de la geofísica es el estudio de los terremotos. Al analizar las ondas sísmicas y el comportamiento de la corteza terrestre, los geofísicos pueden determinar la ubicación, magnitud y profundidad de los terremotos, así como los tipos de rocas y otros materiales que conforman la corteza terrestre. Esta información es crítica para comprender el riesgo de terremotos en diferentes regiones y desarrollar estrategias para mitigar sus impactos (Christopherson y Birkeland, 2016: pp. 120-124).

La geofísica también desempeña un papel crucial en el estudio del cambio climático. Al analizar las propiedades de la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre, los geofísicos pueden desarrollar modelos para predecir cómo cambiará el clima de la Tierra en respuesta a las actividades humanas y otros factores. Esta información es esencial para desarrollar estrategias para mitigar los impactos del cambio climático y proteger a las poblaciones y los ecosistemas vulnerables (Dziewonski y Anderson, 2018: pp. 1-19).

En los últimos años, la geofísica se ha vuelto cada vez más importante en la exploración y extracción de recursos naturales. Al utilizar técnicas geofísicas como la imagen sísmica y los estudios de gravedad, los geofísicos pueden mapear la estructura subsuperficial de la Tierra e identificar posibles depósitos de petróleo, gas y minerales. Esta información es crítica para guiar el desarrollo de nuevos proyectos de extracción de recursos y garantizar su sostenibilidad y seguridad ambiental (Lawyer et al., 2001: pp. 40-45).

2.2.3. Teledetección

La teledetección es una herramienta científica que permite la obtención de datos en tiempo real sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo con ella. Esta técnica se basa en la detección y medición de la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre y su posterior análisis para obtener información sobre la misma. La teledetección se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la observación de la Tierra y la monitorización de los recursos naturales, hasta el estudio del clima y la predicción de desastres naturales (Lilesand et al., 2015: pp. 951-952).

Uno de los aspectos más importantes de la teledetección es la capacidad de obtener información de zonas remotas y de difícil acceso, como las regiones polares, las selvas tropicales, los océanos y los desiertos. Además, gracias a la evolución de la tecnología, es posible obtener imágenes de alta resolución y de manera cada vez más rápida y eficiente (Cracknell y Hayes, 1991: pp. 150-153).

La capacidad de la teledetección para medir la energía reflejada o emitida por la superficie terrestre a través de sensores remotos hace posible la evaluación de las características físicas y químicas del suelo, así como de la vegetación y otros elementos terrestres (Jensen, 2014, pp. 255-259).

La teledetección se basa en la interacción de los objetos con la energía electromagnética. Los sensores remotos capturan esta energía en diferentes longitudes de onda y la convierten en información útil para el análisis y la interpretación. Los datos obtenidos pueden utilizarse para evaluar cambios en la vegetación, detectar incendios forestales, monitorear la calidad del agua, evaluar la calidad del aire, entre otros (Lilesand et al., 2015: pp. 951-952).

Entre los sensores utilizados en la teledetección se encuentran los de radar, lidar, y cámaras multispectrales. Cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas, y es importante elegir el sensor adecuado para la aplicación específica (Jensen, 2014, pp. 255-259).

La teledetección también es utilizada en la investigación y el monitoreo del cambio climático. Los datos obtenidos por los sensores remotos pueden ayudar a identificar y cuantificar los cambios en la temperatura y el nivel del mar, la distribución de las masas de hielo y la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos (Campbell et al., 2011: pp. 65-67).

Otro campo en el que la teledetección ha demostrado su utilidad es en la agricultura de precisión. Los datos obtenidos por los sensores remotos pueden utilizarse para evaluar la salud de los

cultivos, detectar áreas de estrés hídrico, y optimizar el uso de los recursos, lo que puede contribuir a una producción más eficiente y sostenible (Campbell et al., 2011: pp. 65-67).

2.2.4. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el rango completo de ondas electromagnéticas, que incluye desde las ondas de radio con la menor energía hasta los rayos gamma con la mayor energía. Estas ondas electromagnéticas se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz y son esenciales para nuestra comprensión del universo (IOP, 2020).

Por otro lado, Ferreyra (2016, pp. 57-61) menciona que el espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias existentes agrupadas en bandas, en las cuales la radiación electromagnética se implica de manera similar (Mediante el desarrollo de técnicas actuales se ha podido determinar que la longitud de onda más pequeña posible corresponde a la longitud de Planck ($\lambda \approx 1,616252 \cdot 10^{-35}$ m) y la más grande es del tamaño del universo (Luque, 2017, p. 14). A través de los años y la profundización en el estudio del espectro se determinó que el límite inferior es 0 debido a que no existen frecuencias negativas y el límite superior es el infinito positivo (Rojas, 2009, p.23).

2.2.5. Firmas espectrales

La firma espectral se refiere a la respuesta de un material a diferentes longitudes de onda de luz, que se puede representar gráficamente como una curva. Esta curva se construye a partir de los datos espectrales obtenidos a través de la espectroscopía y muestra cómo el material interactúa con la luz en diferentes regiones del espectro electromagnético. La firma espectral es una huella digital única de cada material, que puede ser utilizada para identificar y caracterizar diferentes tipos de materiales (Lilesand et al., 2015: pp. 951-952).

Los tipos de firmas espectrales se pueden clasificar en tres categorías principales: continuas, discretas y selectivas. Las firmas espectrales continuas se caracterizan por presentar un patrón de respuesta que varía de manera continua en función de la longitud de onda, y se utilizan para determinar la composición química y mineralógica de los materiales. Las firmas espectrales discretas, por su parte, presentan picos o bandas de absorción en ciertas longitudes de onda específicas, y se utilizan para identificar compuestos químicos específicos. Finalmente, las firmas espectrales selectivas se caracterizan por presentar una respuesta diferente en función de la orientación de la muestra, y se utilizan para la detección de materiales en función de su textura y forma (Afzaal et al., 2021: pp. 1-17).

2.2.5.1. Firma espectral característica del suelo

El suelo como recurso natural representa un complejo grupo de interacciones, indicando materiales orgánicos e inorgánicos con sus respectivas propiedades edáficas las cuales afectan a la absorción y reflectancia del mismo (Machuca, 2015, p. 34-50). Por ende, el gran problema de lograr agrupar estas variables y estimar en función de sus diversos espectros una respuesta a dicha temática (Cetina, 2017, p. 5). En relación a la reflectancia y las propiedades biofísicas 3 de estas características logran modificarla las cuales son: humedad, color, textura y estructura, disposición vertical y horizontal (Hernández, 2011, p. 10). Ahora en cuanto a los componentes químicos siempre estará presente la materia orgánica como la de mayor importancia, debido a su significativa reflectividad, ya que mientras más humus presente más negrozco se verá el suelo y por lo tanto presentará una relación inversamente proporcional con la reflectividad (Sarría y Palazón, 2008: pp. 95-105). El contenido de sal también es un factor que modifica la reflectancia de los suelos, debido a que las sales cuando se encuentran en la superficie se presentan de manera más brillante en las imágenes y con una alta reflectividad (Giron, 2009, p. 22).

Según Qiao y Zhang (2012, pp. 428-441). Las propiedades químicas del suelo que presentan una significativa correlación con la respuesta espectral del suelo son el pH y nitrógeno. Destacando que para el análisis de los componentes del suelo se da uso de espectros en las regiones VIS, NIR, MIR por medio de sus características las cuales se demuestran de manera más clara y precisa en bandas específicas (Camacho, 2013, pp. 83-99).

2.2.6. Suelo

El suelo del páramo es un tema de gran interés científico debido a su importancia para el mantenimiento de los ecosistemas de alta montaña. Este tipo de suelo se ha formado a lo largo de miles de años, a partir de cenizas volcánicas y otros materiales inorgánicos, y se caracteriza por ser muy rico en nutrientes y materia orgánica y por lo tanto una alta capacidad para retener agua y nutrientes (Llambí et al., 2012: p. 281).

Según estudios realizados por diferentes expertos en el tema, el suelo del páramo es considerado como uno de los más jóvenes, ya que su formación se inició hace alrededor de 10.000 años, después de la última glaciación. Esta información se ha obtenido a través del análisis de la composición química y física de los suelos, así como del estudio de la geología y la historia del clima en la región (Mena et al., 2000: p. 14).

Uno de los principales factores que influyen en la formación y la composición del suelo del páramo es la actividad volcánica. La presencia de cenizas volcánicas en el suelo contribuye a su fertilidad y a su capacidad para retener agua, lo que a su vez favorece el crecimiento de la vegetación. Sin embargo, esta misma actividad volcánica también puede ser causa de la degradación del suelo, a través de la emisión de gases tóxicos y la erosión del suelo (Llambí et al., 2012: p. 281).

Otro factor importante en la formación del suelo del páramo es la acción del clima y la geografía. La topografía montañosa de la región, combinada con las bajas temperaturas y las frecuentes lluvias y nevadas, favorece la acumulación de agua y la formación de turberas, que son un tipo especial de suelo rico en materia orgánica. Estos suelos son muy importantes para la conservación de la biodiversidad del páramo, ya que proporcionan un hábitat para muchas especies vegetales y animales (Llambí et al., 2012: p. 281).

2.2.6.1. Parámetros geofísicos del suelo

Los parámetros geofísicos de los suelos se refieren a las propiedades físicas del suelo que se pueden medir utilizando métodos geofísicos.

2.2.6.2. Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica del suelo es una cualidad física que denota la capacidad de un suelo para resistir la corriente eléctrica. Esta propiedad es importante para la evaluación de la calidad del suelo, la detección de contaminantes, la planificación de sistemas de riego y drenaje, y la localización de recursos minerales (Hillel, 2003, p. 98).

De acuerdo con Rhoades et al (1989: pp. 434-439), la resistividad eléctrica del suelo está influenciada por varios factores, entre ellos la humedad, la temperatura, el contenido de sales, la textura, la compactación y la presencia de materia orgánica. En general, la resistividad eléctrica disminuye con el aumento de la humedad y el contenido de sales del suelo, y aumenta con la textura más fina y la presencia de materia orgánica.

La resistividad eléctrica del suelo se mide mediante la inyección de corriente eléctrica en el suelo y la medición de la diferencia de potencial resultante. Esta medición se realiza utilizando un dispositivo llamado resistivímetro. La medida se expresa en ohmios por metro (Ω/m) y se utiliza para calcular la conductividad eléctrica del suelo (σ), que se expresa en siemens por metro (S/m), mediante la fórmula $\sigma = 1/R$, donde R es la resistividad eléctrica (Hillel, 2003, p. 98).

2.2.6.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo mide la capacidad del agua en el suelo para transportar corriente eléctrica. La conductividad eléctrica es un protocolo que se da por medio de poros rellenos de agua. Los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , y NH_4^{+}) y aniones (SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} , y HCO_3^{-}) de las sales disueltas en el agua del suelo transportan cargas eléctricas y conducen la corriente eléctrica (USDA-NRCS, 2011, p. 357).

Esta propiedad está influenciada por varios factores, como la humedad, la textura, la salinidad, la temperatura, la compactación y la presencia de materia orgánica. La medición de la conductividad eléctrica del suelo se realiza utilizando un conductímetro y se expresa en Siemens por metro (S/m). La conductividad eléctrica del suelo es importante para varias aplicaciones en la agricultura, la ingeniería ambiental y la geología, y su medición se realiza según la norma ISO 11265 (Shi et al., 2018: pp. 851-852).

2.2.6.4. Velocidad de onda sísmica

La velocidad de onda sísmica es un parámetro fundamental en la caracterización de los suelos y su evaluación sísmica. La velocidad de onda sísmica es una medida de la velocidad a la que se propagan las ondas sísmicas en el suelo, y está influenciada por la densidad, la porosidad, la compresibilidad y la rigidez del suelo (Liu et al., 2023: pp. 179-190).

En la agricultura de precisión, se están utilizando cada vez más tecnologías no invasivas para evaluar la estructura y la composición del suelo, incluyendo la medición de la velocidad de onda sísmica. Esto permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre la fertilización, la irrigación y el manejo del suelo en general, lo que puede mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir los costos de producción (Liu et al., 2023: pp. 179-190).

2.2.6.5. Densidad aparente

Se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g x cm^{-3} o t x m^3). Donde se nota la compactación del suelo, estableciendo una semejanza entre sólidos y espacios porosos. La densidad aparente presenta fluctuaciones en función de texturas y materia orgánica; considerando también efectos climáticos como la presencia de humedad o incluso efectos antrópicos sobre todo en los suelos con arcillas expandentes (Rojas y Sáenz, 2012: p.1).

Existen diversos métodos para determinar la densidad aparente, entre los más comunes están el cilindro, el método del hoyo, y el de terrones mediante su densidad. Todos estos métodos tratan con el mayor cuidado la muestra sin afectar considerablemente su estructura y por ende sus resultados (Bulkman, 2019, p. 4).

Al iniciar el muestreo para medir esta densidad aparente, la muestra previamente recogida se seca en el horno a 150 °C hasta llegar a un peso constante. La densidad aparente se calcula dividiendo el peso seco del suelo por el volumen que ocupaba en el campo (Rubio, 2010, p. 21).

$$da = \frac{\text{Peso de los sólidos de la muestra seca o peso seco}}{\text{Volumen de los sólidos} + \text{volumen de los sólidos}}$$

Existen dos mediciones de densidad aparente que se usarán en función de los datos que se obtengan, uno es la densidad aparente global y el otro es la densidad aparente de la tierra fina. En el caso de la primera mencionada se trata del peso seco total de un volumen dado de suelo, incluyendo todos sus elementos (piedras, raíces y tierra fina). Este dato es sumamente relevante por ejemplo en investigaciones donde se realizan excavaciones, remoción de tierras e incluso obras de ingeniería (Rubio, 2010, p. 21).

2.2.6.6. Porosidad

Se menciona la distribución aleatoria de espacios vacíos en el suelo influyendo directamente en la capacidad de retención hídrica para los diversos procesos dentro de ese suelo, así como también en la presencia de nutrientes. (Brady y Weil, 2016: p. 171).

De acuerdo con Bulkman (2019, p.3) se calcula la porosidad del suelo de la siguiente manera:

El volumen total de suelo (V_t) se puede dividir en el volumen de las partículas sólidas (V_s) y volumen de vacíos (V_v):

$$V_t = V_s + V_v$$

La porosidad (P) es la relación entre el volumen de poros y el volumen total del suelo

$$P = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t}$$

Si lo expresamos en porcentaje, tenemos que:

$$P (\%) = 100 \frac{V_v}{V_t} = 100 \frac{(V_t - V_s)}{V_t}$$

2.2.6.7. Permeabilidad

La permeabilidad del suelo se refiere a la capacidad de un suelo para permitir que el agua lo atraviese. Depende de las propiedades físicas y químicas del suelo, en particular, la distribución del tamaño de las partículas (la gama de tamaños de partículas presentes), el espacio poroso, el tamaño de los poros y la continuidad de los espacios. Este concepto es importante para la hidrología, la ingeniería civil, la agricultura y la geología, entre otras disciplinas (IKECHUKWU, s.f,).

La permeabilidad del suelo se puede medir mediante diferentes métodos, incluyendo el método del cilindro, el método del infiltrómetro y el método de la tasa de caída de carga. A continuación, se describe brevemente el método del cilindro (Braja, 2007, pp. 411-412).

El método del cilindro implica excavar un agujero en el suelo y llenarlo con agua. Luego, se coloca un cilindro de metal en el agua y con un cronómetro controlar el tiempo que transcurre el agua en descender una distancia conocida en el cilindro. La velocidad a la que el agua desciende indica la permeabilidad del suelo (Nelson, 2019).

2.2.7. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas pueden ser analizadas sin modificar la composición del suelo y están relacionadas con los nutrientes, raíces, agua, aire y calor, determinando la condición física del suelo en características como: textura, color, profundidad, estructura, densidad, porosidad y temperatura; las cuales permiten determinar la capacidad de uso de los suelos (Rucks et al., 2004).

2.2.7.1. Propiedades químicas del suelo

Según Brady y Weil (2016: p.328) Las propiedades químicas del suelo se refieren a los componentes y procesos químicos que afectan la calidad del suelo. Algunas de estas propiedades son:

pH del suelo: Mide la acidez o alcalinidad del suelo con el fin de detectar si es apto o no para las plantas entre múltiples aplicaciones según el estudio planteado. Un pH adecuado es importante para un crecimiento saludable de las plantas.

Tabla 2-1: Términos descriptivos de los suelos según el pH y efectos esperables en cada rango

Término descriptivo	Rango de pH
Extremadamente ácido	< 4,5
Muy Fuertemente ácido	4,5 – 5,0
Fuertemente ácido 5,1 -5,5	5,1-5,5
Moderadamente ácido	5,6 – 6,0
Ligeramente ácido	6,1 – 6,5
Neutro	6,6 – 7,3
Ligeramente alcalino	7,4 – 7,8
Moderadamente alcalina	7,9 – 8,4
Fuertemente Alcalino	8,5 – 9,0
Muy fuertemente alcalino	>9,0

Fuente: (Campillo Y Sazawka, 2015: p.53)

Materia orgánica: es la cantidad y calidad de la materia orgánica presente en el suelo y es importante para la fertilidad y la estructura del suelo. La materia orgánica ayuda a mejorar la retención de agua y nutrientes, y también promueve la actividad microbiana en el suelo.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): es la capacidad del suelo para retener y liberar cationes, como calcio, magnesio y potasio, que son importantes para el crecimiento de las plantas. La CIC está relacionada con la cantidad de arcilla y materia orgánica presente en el suelo.

Nutrientes: son los componentes químicos importantes para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. La disponibilidad de estos nutrientes en el suelo depende de factores como el pH, la materia orgánica y la actividad microbiana.

2.2.8. Variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo

La variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo es un tema de gran importancia en la investigación y práctica agrícola. El suelo es un recurso natural complejo y heterogéneo, y su capacidad de soportar cultivos depende en gran medida de sus propiedades físicas y químicas.

El suelo es un sistema complejo, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire. La variabilidad en las propiedades físicas y químicas del suelo puede deberse a una serie de factores, incluyendo la textura, estructura, pH, materia orgánica, nutrientes y el clima (Brady y Weil, 2016: p. 188). La variabilidad de estos factores puede afectar significativamente la productividad agrícola, ya que pueden afectar la retención de agua y nutrientes, la capacidad de aireación, la resistencia a la compactación y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Powlson et al., 2011: pp. 72-87).

La textura del suelo es uno de los factores más importantes que influyen en sus propiedades físicas y químicas. Los suelos arenosos tienen una baja capacidad de retención de agua y nutrientes, mientras que los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, pero también son más susceptibles a la compactación (Brady y Weil, 2016: p.130). La variabilidad en la textura del suelo puede ser muy alta, incluso dentro de una sola parcela de tierra, lo que puede hacer que sea difícil predecir la productividad agrícola en diferentes partes de un campo (Pohlman, 1940, pp. 446-447).

Tabla 2-2: Términos descriptivos de los suelos según el pH y efectos esperables en cada rango

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100 70-86	0-14 0-30	0-10 0-15	Arenoso Franco Arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco Arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52 20-50 0-20	28-50 74-88 88-100	7-27 0-27 0.12	Franco Franco limoso Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45 45-80 0-20	15-52 0-28 40-73	27-40 20-35 27-40	Franco Arcilloso Franco Arenoso Arcilloso Franco limoso Arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65 0-20 0-45	0-20 40-60 0-40	35-55 40-60 40-100	Arcilloso Arenoso Arcilloso Limoso Arcilloso

Fuente: (FAO, 2014)

Otro factor que puede afectar la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo es la materia orgánica. La materia orgánica es importante para mantener la fertilidad del suelo y mejorar su estructura. La variabilidad en la cantidad y calidad de la materia orgánica puede afectar la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, así como la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Brady y Weil, 2016: p.233).

El manejo adecuado del suelo es esencial para reducir la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo y mejorar la producción agrícola. Algunas estrategias para manejar la variabilidad del suelo incluyen el mapeo de la variabilidad espacial del suelo, la aplicación de fertilizantes y enmiendas de manera precisa, la rotación de cultivos y el manejo integrado de plagas (Powlson et al., 2011: pp. 72-87). El uso de tecnologías como la agricultura de precisión puede

ayudar a los agricultores a identificar la variabilidad en sus campos y manejar el suelo de manera más eficiente (Pohlman, 1940, pp. 446-447).

2.2.9. Variabilidad espacial de los suelos

La variabilidad espacial de los suelos se da debido a interacciones de mucho grado de complejidad donde participan ciencias como la geología, topografía y factores climáticos (Ferreira et al., 2015: pp. 383-392). Estas interacciones son muy diversas lo que da como resultado una gran variedad de tipos de suelos (Jaramillo, 2012, pp. 40-45).

Estudiar estas variables y encontrar patrones dentro de su “aleatoriedad” permiten establecer predicciones en un punto características del suelo estudiado, así como su respectiva distribución espacial (Iqbal et al., 2005: pp. 1338-1350). Por el contrario, aquellas propiedades relacionadas con las actividades humanas, tales como el uso del suelo en agricultura, movimientos de tierra, vertidos, contaminaciones, ocupaciones con infraestructuras urbanas e industriales, entre otras, determinan una variación ligada al uso y, para poder llegar a conclusiones válidas respecto a esta clase de suelos, se requieren muestreos sistemáticos de alta densidad, tratamientos estadísticos de los datos y estudios geoestadísticos (McBratney et al., 2000: pp. 293-301).

El suelo es un importante recurso natural debido a los esenciales servicios ambientales que presta, tanto para la vida humana, como para el funcionamiento del ecosistema. Debido a que el suelo cumple con la función primordial de soporte y suministro de nutrientes a las plantas, se ve afectado con una constante degradación que influye de manera negativa a su desarrollo sostenible y la producción de alimentos. Por lo cual, es fundamental el estudio del suelo como un sistema dinámico y cambiante, para comprender el conjunto de factores y procesos que ocurren dentro y poder realizar una correcta planeación, monitoreo y manejo del suelo (Lal, 2004, pp. 1-22).

2.2.10. Elementos minerales del suelo

Nutrientes son elementos esenciales para el desarrollo vegetal, estos provienen del aire y del suelo circundante (INTA, 2012: p.1-161). La insuficiencia de los nutrientes puede conducir a enfermedades y ataques de insectos. Se clasifican en macro y micronutrientes, siendo los primeros los que se necesitan en grandes cantidades y que, si el suelo es deficiente en uno o más de ellos, deben aplicarse en grandes cantidades (FAO, 1993, p. 3).

De acuerdo con Sánchez (2007, pp. 1-19) los nutrientes primarios son:

Nitrógeno: El nitrógeno es uno de los elementos más ampliamente distribuido en la naturaleza, El suelo contiene solo una fracción minúscula del N de la litosfera, y de este N del suelo, solo una muy pequeña fracción está disponible directamente para las plantas. Esto ocurre principalmente en la forma de iones NO_3^- y NH_4^+ . El nitrógeno es un elemento muy móvil que circula entre la atmósfera, el suelo y los organismos vivos. Muchos procesos y factores están implicados en el ciclo del N. Algunos son fisicoquímicos y otros biológicos.

Fósforo (P): El fósforo en los suelos ocurre casi exclusivamente en forma de ortofosfatos. El contenido total se da en un rango entre 0.02 a 0.15% de P. Una cantidad bastante sustancial de este P está asociado con la materia orgánica de suelo y en suelos minerales la proporción de P orgánico oscila entre 20 a 80% del total de P. En suelos arroceros del Oeste de Bengala el P orgánico representaba en promedio cerca del 35 % del P total del suelo. En suelos minerales vírgenes el contenido de P orgánico depende mucho de la edad del suelo.

Potasio (K): La fuente principal de K^+ para el crecimiento de las plantas en condiciones naturales viene de la meteorización de minerales que contienen potasio

Según INIA (1999) K se encuentra en el suelo en cuatro formas: soluble, intercambiable, no intercambiable y mineral; dependiendo de la composición mineralógica del suelo. El K en suelo puede provenir de la meteorización de los minerales, minerales arcillosos y la mineralización de los residuos orgánicos.

2.2.11. Clasificación de suelos en el Ecuador

La clasificación de los suelos es un tema crucial en la agricultura y la gestión del medio ambiente, ya que ayuda a identificar las características y propiedades del suelo que influyen en la productividad de los cultivos y la conservación del ecosistema. En el caso de Ecuador, el país cuenta con una diversidad de climas y ecosistemas, lo que se refleja en una variedad de tipos de suelos.

El sistema de clasificación de suelos más utilizado en Ecuador es el Sistema de Clasificación de Suelos de la USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos), que se basa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Según este sistema, los suelos ecuatorianos se dividen en doce órdenes: Entisoles, Inceptisoles, Andisoles, Gelisoles, Histosoles, Alfisoles, Ultisoles, Mollisoles, Spodosoles, Vertisoles, Aridisoles y Oxisoles (Guerrero et al., 2018: pp. 193-206).

Cada uno de estos órdenes se caracteriza por sus propias características físicas, químicas y biológicas, como la textura, la estructura, la capacidad de retener agua y nutrientes, el pH, la materia orgánica y la presencia de horizontes.

Uno de los órdenes más comunes en Ecuador es el de los Andisoles, que se encuentran principalmente en las zonas montañosas y volcánicas del país. Estos suelos se caracterizan por su alta fertilidad, debido a su contenido en materia orgánica y nutrientes, y su capacidad de retener agua. Según Guerrero et al. (2018: pp. 193-206), los Andisoles son especialmente adecuados para cultivos de café, cacao y frutas tropicales.

Otro orden importante en Ecuador es el de los Ultisoles, que se encuentran en las zonas de tierras bajas y lluviosas del país. Estos suelos se caracterizan por su baja fertilidad, debido a su bajo contenido en materia orgánica y nutrientes, y su alta acidez. Sin embargo, con la aplicación de fertilizantes y técnicas de manejo adecuadas, los Ultisoles pueden ser utilizados para cultivos de arroz, maíz y frutales (Guerrero et al., 2018: pp. 193-206).

Los suelos de Ecuador también presentan desafíos para la gestión ambiental, debido a la erosión del suelo, la deforestación y el cambio climático. La conservación y la gestión adecuada del suelo son fundamentales para mantener la productividad de los cultivos y la salud del ecosistema. Según Guzmán et al (2017: pp. 1-11), la implementación de prácticas de manejo de suelos, como la rotación de cultivos, la cobertura del suelo y la aplicación de fertilizantes orgánicos, puede mejorar la calidad del suelo y reducir la erosión.

2.2.12. Páramo

Los páramos siempre fueron considerados como elementos únicos en su especie debido a sus grandes aplicaciones y que hoy en día son desaprovechadas por las personas, es decir su regulación a nivel de agua, su captación de carbono. Además de albergar gran biodiversidad, animales y vegetales (Tapia et al., 2011: p.3).

2.2.13. Ubicación y extensión

Los páramos son ecosistemas frágiles neotropicales de alta montaña (Chuncho y Chuncho, 2019: pp. 72-76). Es un ecosistema de altura inmerso en un espacio geosocial mayor, conocido como la alta montaña ecuatorial, donde coexiste con otros sistemas de altura. Es una formación ecológica específica de los Andes septentrionales (Colombia y Venezuela) que se localiza entre las cotas de

los 3.200 y los 4.700 msnm (metros sobre el nivel del mar). Los Andes del sur, en tanto, forman la puna. Los dos son formaciones herbáceas de altura, pero se diferencian porque el páramo recibe más precipitaciones (lluvia y/o neblina), por la alta humedad relativa (60% ante 30%), y el tapiz vegetal que lo constituye es más tupido que el de la puna (Camacho, 2014, pp. 77-92).

2.2.14. Geoestadística

La Geoestadística es una rama de la estadística espacial que se enfoca en el análisis y modelado de datos georreferenciados. El objetivo principal de la geoestadística es estimar la distribución espacial de los fenómenos y hacer predicciones precisas en áreas donde no se tienen datos. El uso de técnicas geoestadísticas se ha vuelto cada vez más común en una variedad de campos, incluyendo la minería, la agricultura, la ingeniería civil, la ecología, la hidrología, la epidemiología, entre otros (Rees y Cressie, 1993). Según Díaz (2002, p.3) un análisis geoestadístico comprende tres etapas: a) Análisis exploratorio de datos, b) Análisis estructural y c) Predicciones.

Análisis exploratorio de datos: se lo realiza para identificar la variabilidad, forma y observaciones extremas o datos atípicos con la aplicación de técnicas descriptivas de la estadística clásica al conjunto de datos disponibles, pero sin tomar en cuenta su distribución geográfica.

Análisis estructural: estima y modela una función que exprese la correlación espacial de la variable en estudio; conocido también como el cálculo y modelación del variograma y semivariograma.

El semivariograma indica el cambio de una variable con relación a la distancia, este puede variar de forma continua o discontinua dependiendo de algunos parámetros como: meseta o silla, rango o alcance y efecto pepita o nugget (Olea, 1999, pp. 31-36).

2.3. Bases conceptuales

2.3.1. Suelo de páramo

Constituye un suelo con gran capacidad de regulación de agua, pero considerado también poco conocido y valorado. Generalmente es de origen volcánico, presentará variación en cuanto a sus propiedades según los factores, como edad, composición material, factores ambientales entre otros (Cárdenas, M., 2015).

2.3.2. *Propiedades físico químicas de suelo de Paramo*

Se representan como aquellas propiedades que pueden medir, tanto física (Sin alteraciones químicas) como químicamente (con alteraciones) el suelo, relacionadas estrechamente con los elementos de la zona de estudio, sus nutrientes, factores climáticos etc. A nivel de paramo generalmente se puede presentar características como baja densidad aparente, gran retención hídrica, alto grado de deshidratación, presencia de micro agregados, y considerable erosión (Llambí et al., 2012: p. 20).

2.3.3. *Carbono orgánico total*

Es una medida del componente orgánico que reside dentro de unas muestras de suelo, que permite medir la calidad edáfica siendo uno de sus principales indicadores (Arias et al., 2007: p.21).

2.3.4. *Teledetección enfocada al suelo*

La Teledetección como herramienta innovadora para estudiar el recurso suelo, ha permitido conducir a resultados significativos ante la lucha contra la explotación descontrolada y desmedida de los suelos, permitiendo así generar óptimos planes de desarrollo para la comunidad como información fundamental para seguir fundamentando investigaciones (Guillén, et al., 2015).

2.3.5. *Índices espectrales*

Es una técnica moderna donde se trata una imagen con la condición que el investigador requiera, la cual se rige a fórmulas matemáticas donde presentan como variables, a las bandas espectrales en forma numérica (Moreno, 2017, p. 20).

2.4. Bases legales

Según el art. 71 de la Constitución de la República del Ecuador : “...La naturaleza, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y generación de sus ciclos vitales, estructura funciones y proceso...”

Según el art 3(g) del código de Organización territorial, Autonomía y descentralización (COOTDA) menciona que: “...La participación ciudadana es un derecho constitucional, que permite garantizar gestiones compartidas y control social de planes, políticas, programas con el

fin de garantizar los derechos y preservaciones colectivas de las comunidades, pueblos y nacionalidades...”

El art. 6 del código orgánico del Ambiente, menciona que: “...Los derechos de la naturaleza están reconocidos en la constitución, abarcando el respeto integral a su existencia, mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, así como la restauración...”

Acorde a la ordenanza para la conservación y restauración de los ecosistemas, páramos y bosques de la provincia de Chimborazo, según el art. 2. Se declara: “...Un interés público, la conservación de ecosistemas naturales, fuentes hídricas superficiales y subterráneas, de la provincia del Chimborazo...”

Basados en los ejes principales, líneas estratégicas para la conservación del ecosistema Páramos y bosques de la provincia de Chimborazo, el art. 5 sección a menciona: “..... La elaboración de planes de manejo de páramos con la inclusión de planes de desarrollo y ordenamiento territorial de los GADS de Chimborazo...”

Según el capítulo III Estructura, elaboración y financiamiento de los planes de manejo de páramos y bosques de la provincia de Chimborazo, expone que: “... Los planes de manejo de Páramo serán elaborados sea por la dirección de Gestión Ambiental del GADPCH, o incluso obtener participación de actores locales...”

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

3.1.1. *Tipo de investigación*

La presente investigación corresponde al tipo cuantitativo según el método de investigación, debido a que se recopilaron datos numéricos a través de diferentes fuentes de la base GIDAC, permitiendo así, el análisis de la información y el uso de herramientas matemáticas y estadísticas cuya meta sirva para cuantificar el problema de la investigación. Según el objetivo, el trabajo en curso se enmarca en el diseño aplicado, debido a que se emplean técnicas geo-espaciales que tratan de solucionar una problemática social. En este caso el problema estará centrado a nivel social

3.1.2. *Diseño de la investigación*

3.1.2.1. *Pre experimental*

El diseño Pre experimental se encuadró en este trabajo de investigación con el objetivo de evaluar las características edafológicas en la cuenca de río Chimborazo, considerando los parámetros geofísicos sin realizar grandes cambios, siendo este un primer paso para establecer la evidencia en pro o en contra de una intervención.

Se realizó un análisis de las propiedades físico-químicas y parámetros geofísicos de los suelos sujetos a estudio, del área que abarca la cuenca río Chimborazo, haciendo uso de la base de datos del GIDAC, considerando los puntos de muestreos de las parcelas con sus respectivos puntos de validación de base antes mencionada.

Para el primer objetivo se determinó la variabilidad de propiedades físico-químicas del área de estudio considerando las parcelas de los puntos de muestreo de la base de datos del GIDAC, estableciendo cuatro parámetros de importancia que, en conjunto con el COT, sean indicadores para la evaluación de los índices espectrales a lo largo de la cuenca.

En cuanto al segundo objetivo se usaron los puntos de muestreo de las parcelas, ingresando todos los datos en conjunto en un sistema de información geográfica (SIG), se aplicó metodología de información espacial y geoestadística, con el fin de analizar la heterogeneidad y cartografía espacial.

El último objetivo, se enmarcó en hacer un estudio comparativo en una parcela establecida de la zona, mediante un merge de parámetros usando software de estadística libre y sistemas de información geográfica con el fin de encontrar una correlación de las propiedades físico químicas y los índices espectrales. A partir de esa correlación se estableció la significancia de la relación cuantitativa de la variable de interés.

3.1.2.2. Identificación de las variables

Tabla 3-1: Propiedades físico químicas y parámetros geofísicos del suelo

Variabes edáficas (Propiedades del suelo)	Índices espectrales (Parámetros Geofísicos)
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Potencial de hidrogeno (pH) ➤ Conductividad eléctrica (C.E) ➤ Carbono orgánico total (COT) ➤ Humedad (H%) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI) ➤ Índice de vegetación de amplio rango dinámico (WDRIV) ➤ Índice de quema normalizada 1 y 2 (NBR y NBR2). ➤ Índice visible de resistencia atmosférica verde (VARIG) ➤ El método Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) ➤ El método Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) ➤ Índice Diferencial Normalizado De Nieve (NDSI) ➤ El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) ➤ Índice de Suelo descubierto (BI)

Realizado por: Rosero M.. 2023

3.1.2.3. Área de Estudio.

La Reserva de Producción de Fauna Chimborazo se encuentra en Ecuador y abarca una extensión de 58.560 hectáreas. Está ubicada en los cantones de Guano, Riobamba, Guaranda y Ambato, que pertenecen a las provincias de Chimborazo, Bolívar y Tungurahua. Puedes identificar su ubicación utilizando las coordenadas geográficas UTM proporcionadas, que se dividen en cuatro puntos: noroeste 724588 - 9851177; sureste 748675 - 9831139; noreste 754275 - 9850907 y suroeste 731335 - 9830667 (Romero et al., 2018: pp. 1-57).

El rango de altitud va desde los 3600 hasta los 6310 metros sobre el nivel del mar, lo que equivale a la altura de la cumbre del nevado Chimborazo. La zona presenta un clima frío andino con temperaturas que oscilan entre los 0° y 10° C

Los límites de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo son:

- Norte: con la provincia de Bolívar y Tungurahua
- Sur: con la provincia de Bolívar y Chimborazo
- Este: con la provincia de Tungurahua y Chimborazo
- Oeste: con la provincia de Bolívar (Romero et al., 2018: pp. 1-57)

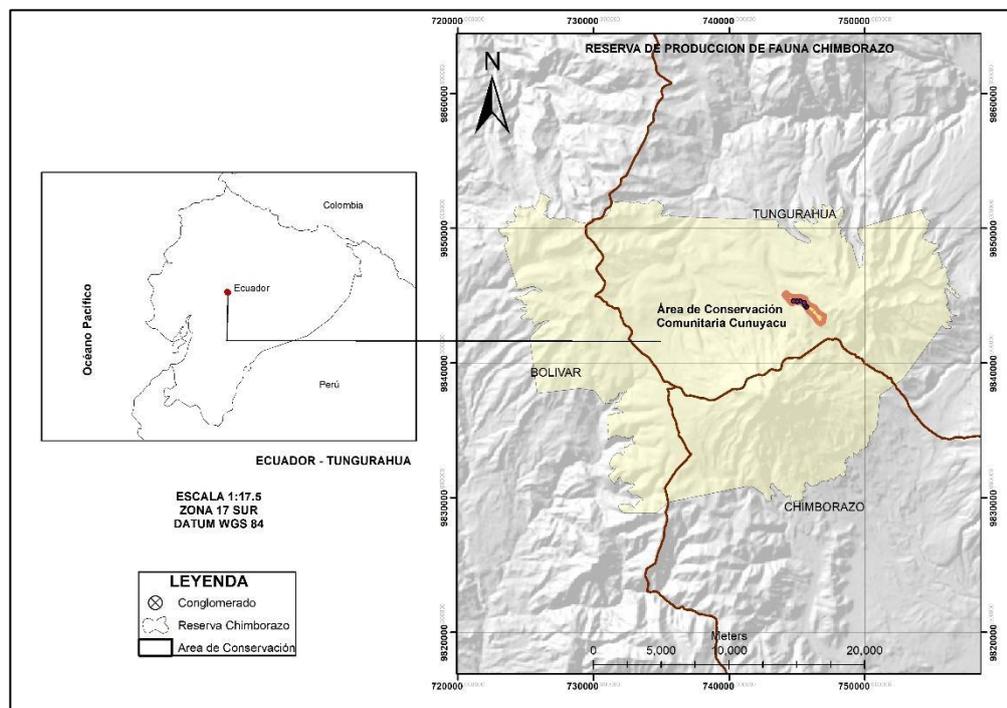


Ilustración 3-1: Ubicación de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo

Realizado por: Rosero M. 2023

3.1.3. Generación de base de datos

Con el fin de establecer la metodología detallada y adecuada se utilizó los datos de diversos estudios realizados por el Grupo de Investigación GIDAC en la zona de la reserva Chimborazo.

Se emplearon imágenes satelitales LANSAT 8 que contienen entre 7 y 8 bandas espectrales específicas para evaluar la zona de investigación. Estas bandas son seleccionadas con el fin de monitorear la vegetación, realizar aplicaciones geológicas y estudiar los recursos naturales. Al combinar estas bandas se crearon nuevas imágenes que extendieron su uso. La totalidad de esta información se encuentra disponible en el sistema de información USG (Negrete, 2014, pp. 30-36).

3.1.4. Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales se obtuvieron desde el sitio web de la NASA, www.earthexplorer.usgs.gov, y se consideraron diversos parámetros como la nubosidad, la fecha de la imagen, el número de grilla en el mapa (*path/row*), y el tipo de satélite utilizado (Landsat 8), entre otros. Para trabajar con estas imágenes, es fundamental disponer de un software SIG que proporcione las herramientas adecuadas para llevar a cabo el proyecto. En el siguiente diagrama de flujo se presentó el proceso para seleccionar y descargar las imágenes satelitales, así como el uso de las herramientas del software SIG para corregir la imagen.

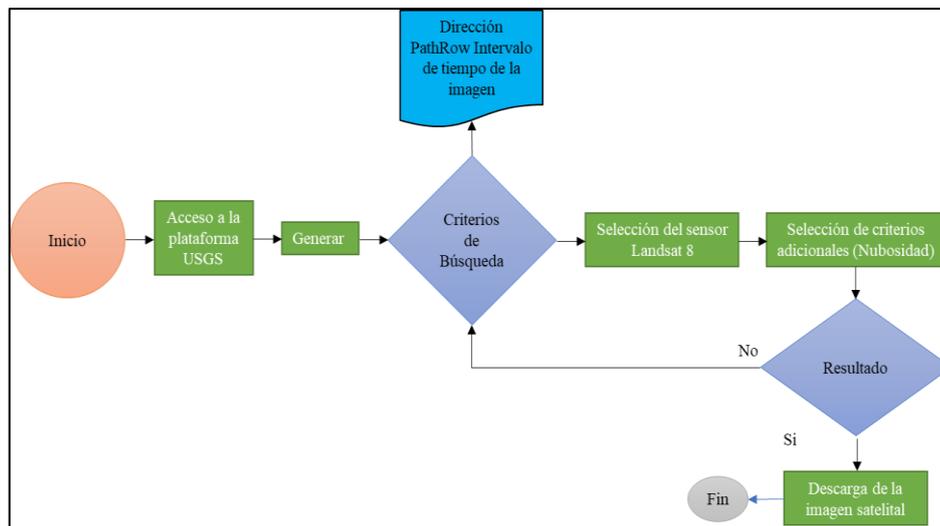


Ilustración 3-2: Proceso de selección y descarga de imágenes satelitales

Realizado por: Rosero M. 2023

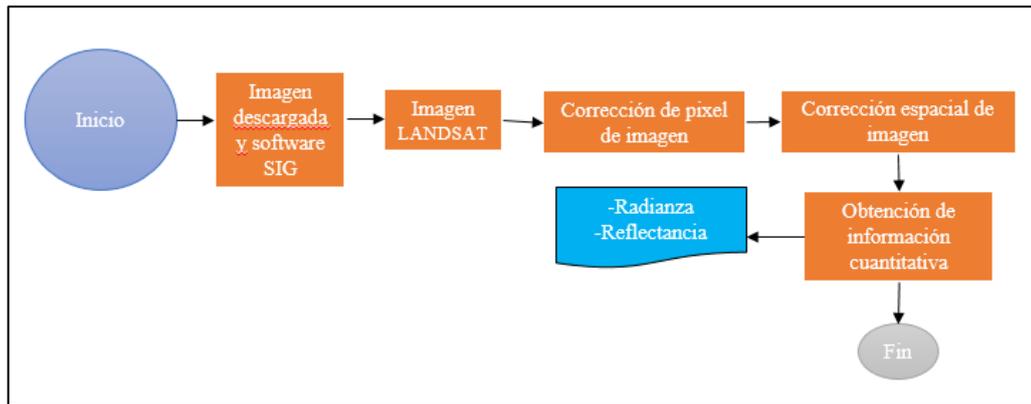


Ilustración 3-3: Corrección de la imagen satelital

Realizado por: Rosero M. 2023

Para la corrección de la Radiancia (1) y reflectancia (2) de la imagen satelital los valores de número digital (DN) por sus siglas en inglés, se utilizó un re-escalado radiométrico proporcionado por el archivo metadato utilizando las siguientes ecuaciones de

$$\begin{aligned}
 L_{sat_{rad}} &= ND * M + A \\
 L_{earth_{rad}} &= L_{sat_{rad}} - (L_{min_{rad}} - L_{haze\ 1\%_{rad}}) \\
 L_{haze\ 1\%_{rad}} &= 0.01 * (ESUN * \cos \cos \theta) / (d^2 * \pi)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Dónde:

ND = Número digital

$M+A$ = Coeficiente de corrección geométrica

$L_{haze\ 1\%_{rad}}$ = % mínimo de Radiancia

$\cos \theta$ = Ángulo Solar

$ESUN$ = Irradiación espectral exoatmosférica.

$$\begin{aligned}
 R_{TOA} &= (DN * 0.0002 - 0.1) / \cos \cos \theta_s \\
 R_{scatter} &= (DN_{minimum} * 0.0002 - 0.1) / \cos \cos \theta_s \\
 R_{earth} &= (R_{TOA} - (R_{scatter} - 0.1))
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Dónde:

R_{TOA} = Reflectancia en el Techo de la Atmósfera

$ND_{minimum}$ = Número digital mínimo

$\cos \theta_s$ = Ángulo Solar

$R_{scatter}$ = dispersión de reflectancia

R_{earth} = Reflectancia en la superficie de la tierra

3.1.5. Extracción y validación de datos

En la **Ilustración 4-3**, se detalla la secuencia utilizada para la extracción de los datos en las parcelas de muestreo y validación de la base de datos, de esta manera se obtiene la nueva base de datos de índices espectrales y parámetros edáficos.

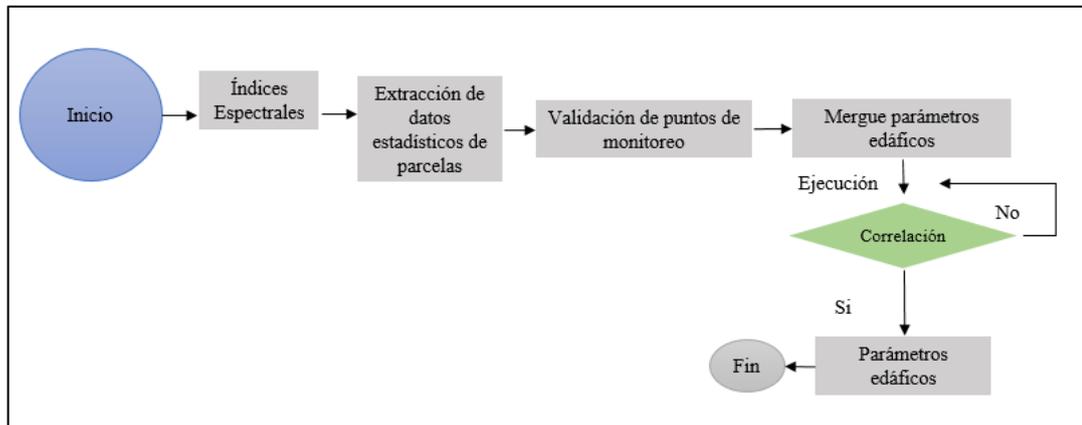


Ilustración 3-4: Extracción de datos estadísticos-modelo y validación de datos.

Realizado por: Rosero M. 2023

3.1.6. Construcción de índices espectrales

Utilizando los datos proporcionados por la base GIDAC de los puntos de muestreo y según el objetivo propuesto, se extrajeron los valores de los índices espectrales puntuales para cada **parcela**. Estos datos fueron ingresados en la versión de prueba del software *PAST* 1.0, generó una matriz que servirá para establecer la correlación de los datos edáficos con los índices espectrales a partir de la imagen Landsat 8, estos índices, más las variables topográficas, nos servirán para generar una evaluación de la precisión de los datos (Cadkin y Brennan, 2002: pp. 52-54).

3.1.7. Evaluación de la relación de la variable de interés con los índices espectrales

Para evaluar los índices, se procedió a establecer un análisis de regresión, y junto con la variable de interés, considerada como indicadora del efecto respuesta sobre los índices espectrales. se realizó la evaluación de la normalidad de los datos, para tener el factor teórico de la ecuación de regresión lineal simple, establecido por la siguiente ecuación:

De esta manera la relación que se presenta entre las variables independientes puede predecir valores con diferentes datos en la dimensión espacial,

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Donde:

Y = variable dependiente.

b_0 = coeficiente que denota la magnitud del efecto

b_1 = Son los coeficientes

X = valor de variables independientes

Todo este cálculo se efectuó mediante el uso del software PAST 1.0, mismo que permitió obtener datos que sirvieron para elaborar el gráfico de normalidad y analizar la correlación.

Luego se procedió a realizar el análisis ANOVA, para determinar la variable de interés con relación a las variables de interés e índices espectrales, para comprobar si presentó significancia o no.

En el análisis de varianza se comprobó se puso a prueba las siguientes hipótesis planteadas

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu$$

El factor en estudio no tiene un efecto significativo sobre las propiedades físico-químicas.

$$H_1: \text{Al menos un } \mu_i \neq \mu_j, \text{ para todo } i \neq j$$

El factor en estudio si tiene un efecto significativo sobre propiedades físico-químicas.

Tabla 3-2: Índices espectrales a partir de Landsat 8 y del Modelo de Elevación Digital.

Índices a partir de Landsat 8			
N°	Índice	Descripción	Fórmula
1	Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) (Gitelson et al. 1996)	Genera una imagen que muestra el verdor, también conocida como biomasa relativa.	$NDVI = ((NIR - Red)/(NIR + Red))$
2	Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete et al., 1987)	Minimiza las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección de brillo.	$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L)$ L=0.5
3	Índice de resistencia atmosféricamente visible (VARI) (Steven et al., 2003)	Resalta la vegetación en la parte visible del espectro y mitiga las diferencias en la iluminación y los efectos atmosféricos.	$VARI = (Green - Red) / (Green + Red - Blue)$
4	Índice de nieve de diferencia normalizado (NDSI) (Hall, Riggs & Salomonson, 1995).	Identifica la cobertura de nieve a la vez que se ignora la cobertura de nubes.	$NDSI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
5	Índice diferencial de agua normalizada (NDWI) (McFeeters, 1996)	Identifica masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad.	$NDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$
6	Índice diferencial de humedad normalizado (NDMI) (Xiao et al., 2002)	Es sensible a los niveles de humedad de la vegetación.	$NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$
7	Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI) (Chuvieco et al., 2002)	Destaca áreas calcinadas y mitiga las diferencias en la iluminación y los efectos atmosféricos.	$NBR = (NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$
8	Índice de relación de calcinación normalizado (NBR2) (Chuvieco et al., 2002)		$NBR2 = (SWIR1 - SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)$
9	Índice de Vegetación Mejorado (EVI2) (Huete et al., 2002)	Proporciona información espacial y temporal de la vegetación.	$EVI2 = 2.5[NIR - Red / NIR + (2.4Red) + 1]$
10	Índice de vegetación de amplio rango dinámico (WDRVI) (Rouse et al., 1973)	Presenta sensibilidad reducida a densidad de vegetación moderada a alta.	$WDRVI = ((aNIR - Red) / (aNIR + Red))$ a=0.05
Modelo de Elevación Digital (MED)			

Fuente: Pazmiño et al., 2021: pp. 5-6

3.1.8. *Análisis de la información*

Este procedimiento se llevó a cabo para el análisis de los índices espectrales que ejercen una fuerte correlación en las diferentes coberturas de suelo en el entorno de la RPFCH.

3.1.9. *Análisis estadístico*

La exploración de los ecosistemas de páramo inundables fue llevada a cabo mediante una matriz de correlación de Pearson, que es una validación estadística de dos o más variables continuas, de esta manera si la normalidad no es lineal, el coeficiente se encuentra establecido por una proporción directa cuando el valor es cercano a (1), mientras que es inversa cuando el valor es cercano a (-1) y la fuerza de correlación es mayor mientras más cercanos se encuentren a estos puntos (Cai, Lin y Zhang, 2019: pp. 22-24).

CAPITULO IV

4. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. **Determinar la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo en la cuenca del Rio Chimborazo en relación con la reserva de Producción de Fauna Chimborazo, mediante el uso de herramientas bibliográficas que permitan una mayor comprensión de los componentes edáficos del suelo de estudio.**

Tabla 4-1: Análisis físico químico del suelo de la Chorrera Mirador

Puntos o Codigos	Este	Norte	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Humedad %	Textura
CM1-0.30m	740896.44	9831286.71	6.64	22.43	30.60	Franco arcillo limoso
CM2-0.30m	740917.62	9831302.05	7.66	20.92	26.25	Franco arcillo limoso
CM3.30m	740898.2	98313665.71	8.88	25	25.96	Franco arcillo limoso

CE= Conductividad eléctrica

$\mu\text{S}/\text{cm}$ = microSiemens

CM = Chorrera Mirador

Fuente: GIDAC

Realizado por: Rosero M. 2023

La **tabla 1-4** muestra los resultados del análisis físico-químico del suelo en tres puntos diferentes (Sc8, Sc3 y Centro) de la Chorrera Mirador, así como los valores de pH, conductividad eléctrica, humedad, y textura del suelo a una profundidad de 0.30m.

El pH fluctuó entre 6.64 y 8.88, lo cual señaló que el suelo en los tres puntos es ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Llambí et al., 2012: p. 281). La conductividad eléctrica, que mide la cantidad de sales en el suelo, varió entre 20.92 y 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando un contenido de sales moderado en el suelo (Rosero, 2019, p. 45). La humedad del suelo, medida como porcentaje de agua, osciló entre 25.96% y 30.60%, lo que mostró que el suelo en los tres puntos tiene una humedad moderada según Sierra (2019, p. 53). En cuanto a la textura del suelo, todos los puntos tienen una textura Franco arcillo limoso, lo que implica una mezcla equilibrada de partículas de arena, limo y arcilla (Garay y Ochoa, 2010: p.20).

En general, los resultados de los tres puntos mostraron que el suelo en la Chorrera Mirador es moderadamente húmedo y tiene una textura Franco arcillo limosa, con valores de pH y conductividad eléctrica dentro de los rangos normales.

Tabla 4-2: Análisis físico químico del suelo del río colorado

Puntos o Codigos	Este	Norte	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Humedad%	Textura
RC1-0.30m	740680.14	9845024.22	7.42	63.96	12.03	Areno- Franco
RC2-0.30m	740542.27	9845221.04	7.84	49.46	21.66	Franco
RC3-0.30m	740468.12	9845329.38	7.12	55.66	12.89	Arena
RC4-0.30m	740633.17	9845280.55	7.36	63.34	23.03	Franco
RC5-0.30m	740781.05	9844906.13	8.43	61.12	22.25	Franco Limoso

CE= Conductividad eléctrica

$\mu\text{S}/\text{cm}$ = microSiemens

RC= Rio Colorado

Fuente: GIDAC

Realizado por: Rosero M. 2023

La **tabla 2-4** presenta los resultados del análisis físico químico del suelo en cinco puntos diferentes ubicados en la zona del Río Colorado. Cada punto se identifica con un código y se proporcionan las coordenadas Este y Norte, así como los valores de pH, conductividad eléctrica, humedad, y textura del suelo a una profundidad de 0.30m.

Los valores del pH oscilaron entre 7.12 y 8.43, indicando que el suelo en esta zona es alcalino propuesto en la **tabla 1-2** según (Campillo Y Sadzawka 2015: p. 53) estos valores están dentro del rango normal para suelos agrícolas. Los valores de la conductividad eléctrica variaron de 49.46 a 63.96 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que señala posibles altos niveles de nutrientes. No obstante, un alto nivel de salinidad puede ser perjudicial para algunas plantas y limitar el crecimiento de las raíces (Rengasamy, 2026, pp. 1-7). Los valores de la humedad del suelo varían de 12.027% a 23.028%, lo que evidenció que algunos puntos pueden estar más secos que otros. La textura del suelo también varía de Arenoso-Franco, Franco y Franco Limoso, lo que refleja que la capacidad de retener agua y nutrientes del suelo puede variar de un punto a otro según la tipología Casanova, et al. (2015: pp. 1-9).

En general, los resultados indicaron que el suelo en la zona del Río Colorado es alcalino, con una cantidad moderada a alta de sales y una humedad variable dependiendo del punto de análisis. La textura del suelo varió entre Areno-Franco, Franco y Franco Limoso.

Tabla 4-3: Análisis físico químico del suelo Cununyaku

Puntos	Este	Norte	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Humedad %	Textura
CY1 0-30m	745675.39	9844171.37	6.55	37	88.58	Franco arenoso
CY2 0-30m	745875.31	9844171.37	6.46	44.5	82.41	Franco arcillosa
CY3 0-30m	745875.31	9844371.62	6.41	42.5	82.45	Arcillo limosa
CY4 0-30m	745559.76	9844327.4	6.34	78.8	79.84	Franco arcillo limosa
CY5 0-30m	745759.25	9844327.4	6.24	57.9	79.27	Franco arcillosa
CY6 0-30m	745759.25	9844527.72	6.21	48.6	83.89	Arcillo limosa
CY7 0-30m	745514.49	9844484.83	6.24	110.7	80.88	Arcillo limosa
CY8 0-30m	745714.18	9844484.83	6.41	44.9	71.13	Franco arcillo limosa
CY9 0-30m	745714.18	9844684.52	6.26	32.8	83.17	Arcillosa
CY10 0-30m	745217.05	9844592.79	5.98	86.3	88.81	Franco arcillo limosa
CY11 0-30m	745417.41	9844592.79	6.4	104.5	87.50	Franco arcillo limosa
CY12 0-30m	745417.41	9844792.14	6.01	99.9	69.02	Franco arcillosa
CY13 0-30m	744984.39	9844580.26	6.17	106.2	64.79	Franco arcillosa
CY14 0-30m	745184.73	9844580.26	6.04	43.2	85.06	Arcillo arenoso
CY15 0-30m	745184.73	9844780.92	6.06	127	71.58	Franco arcillosa
CY16 0-30m	744741.99	9844594.88	6.03	98.2	89.28	Arcillo limosa
CY17 0-30m	744941.25	9844594.88	6.2	127.2	86.60	Arcillo limosa
CY18 0-30m	744941.25	9844794.21	6.11	116.2	90.22	Franco arcillosa

CE= Conductividad eléctrica

$\mu\text{S}/\text{cm}$ = microSiemens

CY= Cununyaku

Fuente: GIDAC

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

La **tabla 3-4** muestra los datos que corresponden a un análisis físico-químico del suelo en la zona de Cununyaku. La tabla incluye información sobre la ubicación de los puntos de muestreo (Este y Norte), el pH, la conductividad eléctrica, la humedad y la textura del suelo.

El pH del suelo osciló entre 5.98 y 6.55, lo que indica su carácter ligeramente ácido (Campillo Y Sadzawka 2015: p. 45). La conductividad eléctrica se encontró en un rango de 32.8 a 127 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que apuntó una notable variación en la salinidad del suelo en la región. En específico la ubicación CY registra el nivel más bajo de conductividad eléctrica, mientras que la ubicación CY17 identifica el valor más alto, Esta situación sugiere que, debido a la proximidad de pasturas y humedales a los volcanes Chimborazo y Carihuairazo existe desprendimiento de roca sedimentaria rica en carbonato entre otros elementos (Rosero, 2019, p.60). La humedad del suelo es relativamente alta, con oscilaciones entre el 64.79% y el 90.21%. En cuanto a la textura del suelo, esta presenta variaciones y suele ubicarse la mayormente en la categoría franco (arcilloso, arcillo

limoso o arcilloso arenoso), considerando así, una mezcla equilibrada de arcilla, arena y limo acorde a la **tabla 2-2** propuesta por FAO (2014).

En general, los datos sugieren que la zona de Cununyaku tiene suelos ligeramente ácidos con una variación significativa en la salinidad y una mezcla equilibrada de arcilla, arena y limo.

4.1.1. Análisis de la variabilidad de los parámetros físico-químicos del suelo en la cuenca del Rio Chimborazo

Para analizar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos del suelo de los tres sitios evaluados, se calculó el promedio de los datos de cada parámetro para cada lugar de muestreo. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4-4: Análisis de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los suelos de los tres sitios

	Lugares		
	Chorrera Mirador	Rio Colorado	Cununyaku
pH	7.73	7.63	6.23
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22.78	58.71	78.13
Humedad	27.60	18.37	81.36
Textura	Franco arcilloso limoso	Franco limoso	Franco arcilloso

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

Estos valores promedio han permitido comparar entre las diferentes ubicaciones de muestreo en relación a sus características fisicoquímicas del suelo. Por ejemplo, se puede observar que el sitio con el pH más alto es Chorrera Mirador con un valor promedio de 7.73, lo que revela un suelo es ligeramente alcalino. El sitio con el pH más bajo es Cununyaku con un valor promedio de 6.23, lo cual señala la presencia de ligera acidez en el suelo es. En cuanto a Rio Colorado, su pH intermedio con un valor promedio de 7.63, sugiere un suelo ligeramente alcalino.

En términos de conductividad eléctrica se destaca que Cununyaku registra la cifra más alta, con un promedio de 78.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su parte, Rio Colorado presenta una conductividad eléctrica intermedia, con un valor promedio de 58.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que Chorrera Mirador exhibe la cifra más baja, con un valor promedio de 22.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Respecto a la humedad, Cununyaku se destaca por presentar la cifra más alta, con un promedio de 81.36%, evidenciando un suelo muy húmedo. Chorrera Mirador tiene la humedad intermedia con un valor promedio de 27.60%, mientras que Rio Colorado exhibe la humedad más baja con un promedio de 18.37%

En relación al atributo de textura del suelo, Chorrera Mirador se caracteriza por poseer una textura franco arcillosa limosa, lo cual señala una equilibrada combinación de arena, limo y arcilla. En contraste Rio Colorado tiene una textura franco-limosa, indicando una mayor proporción de arena y limo. Por su parte, Cununyaku presenta una textura franco arcillosa, señalando una mayor proporción de arcilla

De acuerdo con el análisis anterior se constata la presencia de variabilidad en los parámetros fisicoquímicos del suelo en los tres sitios evaluados. En referencia al pH, se observa una gama de valores promedio que abarcan desde ligera acidez hasta ligera alcalinidad. Esto señala una diversidad en la acidez/alcalinidad del suelo en las distintas ubicaciones. En relación a la conductividad eléctrica, se percibe una variabilidad significativa en la concentración de sales disueltas en el suelo, lo que puede afectar la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Respecto a la humedad, se aprecia una variabilidad significativa en la cantidad de agua presente en los diversos sitios. Esta diferencia puede influir en la capacidad del suelo para retener agua y en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Rossi y Rabenhorst, 2019, pp. 12-13). Finalmente, en términos de textura, se detecta una disparidad en la proporción relativa de arena, limo y arcilla, lo que puede repercutir en la retención de agua del suelo, la disponibilidad de nutrientes para las plantas y también en la facilidad de labranza y la erosión del suelo (Pazmiño, 2020, p. 40).

4.2. Evaluación de la variabilidad espacial y realizar la cartografía de las propiedades físico-químicos del suelo en la cuenca del Río Chimborazo con respecto a la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.

Con la finalidad de evaluar la variabilidad espacial y cartográfica se establecieron tres parcelas que fueron evaluadas en estudios proporcionados por el GIDAC en la RPFCH, se procedió implementar polígonos que se llamarán parcelas de entrenamiento y otras tres parcelas denominadas parcelas de evaluación, cada una con diferente superficie y características propias de su entorno (Lazo, 2014, pp. 45-48).

Entre las características podemos observar que el origen litológico que corresponde a la formación de la edad cuaternaria, la formación geológica es una unidad litoestratigráfica denominada como cuerpos de rocas caracterizados por propiedades litológicas similares que las diferencian de formaciones adjuntas u originarias, en nuestro caso identificamos tres formaciones: en los sectores de Cununyaku se encontraron la presencia de formaciones de lavas del Carihuirazo y antiguas del Chimborazo, además de formaciones de Cangahua (Coltorti y Ollier, 2000: pp. 1-19).

Mientras que en los sectores de Río Colorado y Chorrera en su mayor proporción se identificaron la presencia de formaciones volcánicas de Chimborazo.

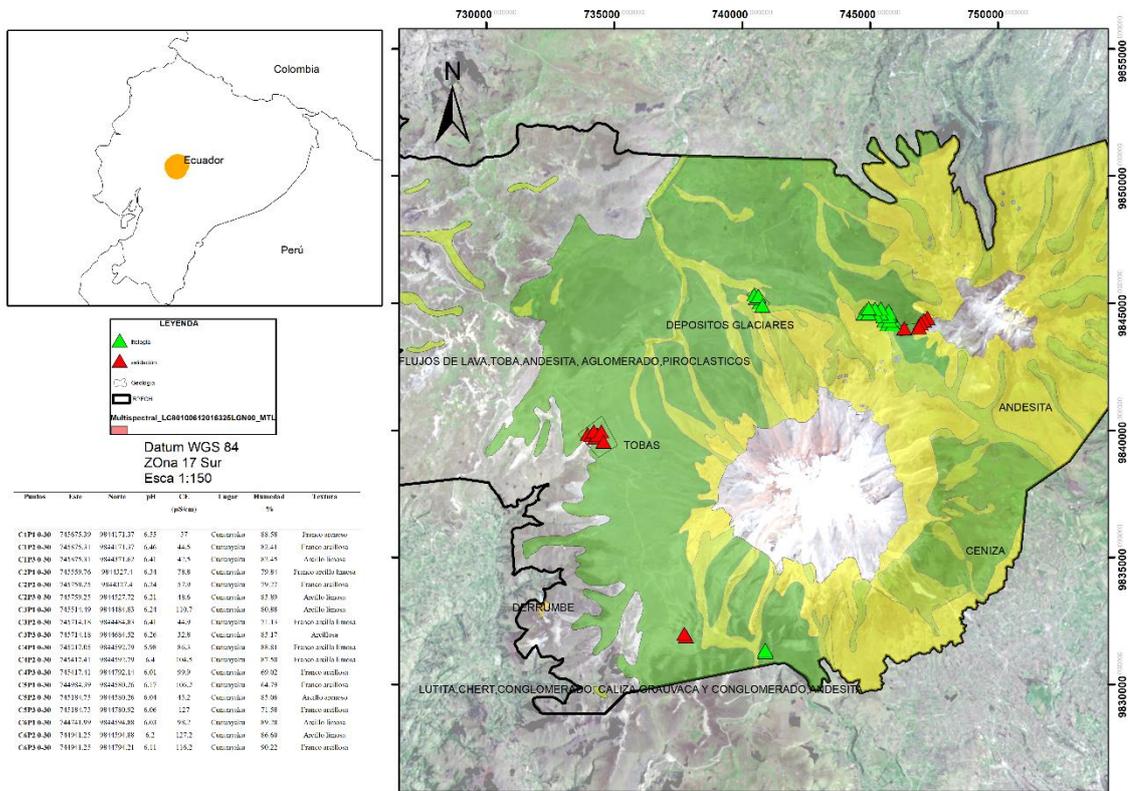


Ilustración 4-1: Características principales de las diferentes formaciones litológicas del suelo.

Realizado por: Rosero M. 2023

En el siguiente cuadro se puede observar la litología que es nada más que la composición del tipo de rocas originarias para la formación del suelo (OCW, 2023), mientras que la permeabilidad se define como la propiedad que permite transitar elementos como el agua y el aire en su estructura, además de la fisuración que representa la capacidad de fragmentarse en elementos más básicos y de menor tamaño de partícula (Padilla, 2013).

Tabla 4-5: Propiedades Geológicas de las parcelas de entrenamiento

Lugar	Litología	Permeabilidad	TIPO_PERM
Chorrera	Tobas	Baja A Media	Fisuración
Rio colorado	Depósitos Glaciares	Media	Porosidad Inter-granular
Rio colorado	Depósitos Glaciares	Media	Porosidad Inter-granular
Cununayaku	Tobas	Baja	Porosidad Inter-granular
Cununayaku	Andesita	Baja A Media	Fisuración
Cununayaku	Depósitos Glaciares	Media	Porosidad Inter-granular
Cununayaku	Depósitos Glaciares	Media	Porosidad Inter-granular

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

La evaluación de cada parcela de entrenamiento nos sirve como punto de partida para establecer la variabilidad de los índices espectrales en el contexto geográfico, por esta razón utilizamos los criterios de (Tomillo, 2014), para establecer la distribución de las propiedades frente a cada parámetro tomado en la base de datos de suelos del GIDAC.

4.3. Estudio comparativo en una parcela establecida en la zona de estudio

4.3.1. Construcción de los índices espectrales

Una vez consideradas las parcelas de monitoreo y validación, se procedió a aplicar las ecuaciones para generar índices espectrales, para la presente investigación se implementaron 10 índices espectrales relacionados con la determinación de características que muestran las propiedades físico-químicas del suelo, descritos en la **tabla 1-3**.

Tabla 4-6: Parámetros de propiedades físico-químicas del suelo e índices espectrales

ID	P h	C CE	O T	% H	T	NDV I	WDR VI	VARI G	SAVI	NDW I	NDSI	NDM I	NBR 2	NBR	BI	
T1	6.	60.3	0.8	23.												
P1	91	3	7	72	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
T1	7.		0.5	13.	A											
P2	21	64.5	6	88	F	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
T1	6.		0.4	31.												
P3	87	58.5	1	3	A	0.095	-0.246	-0.019	0.095	-0.114	0.033	-0.033	0.055	0.022	0.026	0.026
T2	6.		0.7	24.												
P1	98	65.5	1	55	A	0.067	-0.273	-0.021	0.067	-0.087	0.024	-0.024	0.031	0.008	0.022	0.022
T1	6.	96.5	3.1	53.												
P1	91	3	6	79	FL	0.376	0.048	0.026	0.376	-0.353	-0.155	0.155	0.155	0.303	0.108	0.108
					F											
T2	7.	119.	2.3	77.	A	0.358	0.028	0.026	0.358	-0.335	-0.137	0.137	0.149	0.281	-	-
P1	23	93	1	41	L										0.097	0.097
T3	7.	172.	3.3	63.												
P1	06	6	5	75	FL	0.392	0.067	0.022	0.392	-0.373	-0.182	0.182	0.159	0.331	0.125	0.125
T4	6.	80.3	3.8	86.												
P1	96	2	1	04	FL	0.405	0.083	0.034	0.405	-0.376	-0.147	0.147	0.184	0.322	0.103	0.103
T5	6.	92.0	3.2	85.	A											
P1	79	6	5	42	F	0.399	0.075	0.033	0.399	-0.371	-0.185	0.185	0.172	0.346	0.127	0.127
T6	7.	54.2	3.1	76.												
P1	1	3	5	43	FL	0.305	-0.032	0.015	0.305	-0.292	-0.119	0.119	0.149	0.263	0.082	0.082
T1	6.		1.6	28.												
P1	77	38.4	7	53	A	0.047	-0.291	-0.022	0.047	-0.069	0.018	-0.018	0.022	0.004	0.018	0.018
T1	6.		2.1	32.	A											
P2	82	32.8	7	99		0.025	-0.311	-0.018	0.025	-0.043	0.006	-0.006	0.024	0.019	0.008	0.008
					A											
T2	6.		0.4	15.		0.030	0.305	0.016	0.030	0.047	0.006	0.006	0.025	0.018	0.010	0.010
P1	77	31.4	1	86		957	529	782	957	714	947	947	853	91	932	932

				A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
T2	6.		0.6	16.		0.010	0.324	0.019	0.010	0.030	0.002	0.002	0.019	0.022	0.006
P2	87	32	6	3		423	036	586	423	003	709	709	434	142	789
				A											
T3	6.		0.5	27.		0.010	0.323	0.022	0.010	0.033	0.001	0.001	0.022	0.020	0.011
P1	69	32.2	7	4		998	522	694	998	683	697	697	466	77	677
				A											
T3	6.		0.7	27.		0.011	0.323	0.019	0.011	0.031	0.002	0.002	0.020	0.023	0.007
P2	8	30.8	5	75		306	245	89	306	189	552	552	843	394	341
T4	6.		1.5	29.	A	0.011	0.322	0.020	0.011	0.032	0.000	0.000	0.014	0.014	0.007
P1	95	30.1	3	12	F	655	933	98	655	627	297	297	438	141	659
T4	6.		0.5	28.		0.007	0.326	0.015	0.007	0.023	0.001	0.001	0.015	0.014	0.003
P2	86	30.1	9	6	A	866	323	31	866	173	833	833	903	07	967

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

Para realizar el análisis de variabilidad estadística se estableció los parámetros de estadística descriptiva mencionada previamente en la metodología mediante el uso del software libre Past 1.0, de esta manera se logró observar si hay datos anómalos que salgan de la normalidad, de esta manera se obtiene valores para las 18 parcelas, considerando las propiedades físico-químicas del suelo y los índices espectrales.

Tabla 4-7: Análisis de Medidas de tendencia central

	Ph	CE	CO T	% H	NDV L1	WDR VI	VAR IG	SA VI	ND WI	ND SI	ND MI	NB R2	NB R	BI
	6.9	62.46	1.7	42.30		-	-	0.1	0.15	0.04	0.04	0.07	0.1	0.03
X	20	9	09	1	0.150	0.163	0.002	50	4	9	9	2	18	1
	0.1	39.72	1.2	25.55				0.1	0.15	0.08	0.08	0.06	0.1	0.05
DE	55	5	38	9	0.172	0.177	0.022	72	3	2	2	9	45	9
	0.0	1578.	1.5	653.2				0.0	0.02	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00
V	24	115	33	78	0.030	0.031	0.001	30	3	7	7	5	21	4
	6.6	30.10	0.4	13.88		-	-	0.0	0.37	0.18	0.03	0.00	0.0	0.12
Mín	90	0	10	0	0.000	0.326	0.023	00	6	5	3	0	00	7
	7.2	172.6	3.8	86.04				0.4	0.00	0.03	0.18	0.18	0.3	0.02
Máx	30	00	10	0	0.405	0.083	0.034	05	0	3	5	4	46	6
NC	0.0	20.42	0.6	13.14				0.0	0.07	0.04	0.04	0.03	0.0	0.03
(95%)	80	5	37	1	0.088	0.091	0.012	88	9	2	2	6	75	0

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

Tras realizar este análisis, se han establecido los siguientes criterios que indican que los valores medios se encuentran dentro de los parámetros adecuados para cada variable. Esto se debe a que tanto la desviación estándar como la varianza son bajas, lo que indica una menor dispersión de los datos con respecto al valor medio. Además, no se observan valores atípicos que se alejen significativamente del promedio.

En cuanto a los valores máximos y mínimos, estos no superaron los límites establecidos para la excentricidad, con la excepción de la CE y el % H. Esta discrepancia se debe a que la concentración de sales en el caso de la CE puede estar influenciada por la presencia de carbonatos

(Ponce y Gambaudo, 2010: pp. 31-34), especialmente en la zona sur occidental de la reserva, que es de origen volcánico y se caracteriza por altas concentraciones de carbonato de calcio, que es una materia prima utilizada en la minería.

Del mismo modo, el % H está determinado por la temporalidad en la recolección de las muestras, ya que en la zona de estudio se presentan lluvias frecuentes debido al intercambio de corrientes frías y cálidas, lo cual puede generar variabilidad en los niveles de humedad.

4.3.2. Coeficiente de correlación

De los 10 índices espectrales calculados se construyó una matriz para evaluar el coeficiente de variación de PEARSON; utilizando las variables que tienen baja similitud como se muestra en la matriz, solo se utilizaron cinco índices que tienen similitud y que sirven como patrones que predicen las propiedades físico-químicas del suelo (**Tabla 8-4**).

Tabla 4-8: Matriz de correlación de Pearson

	PH												
PH	1												
CE	0.54 4	1											
COT	0.27 9	0.63 2	1										
% H	0.33 1	0.63 8	0.89 <u>5</u>	1									
NDVI	0.37 3	0.79 3	0.89 <u>5</u>	0.93 7	1								
WDR	0.57 5	0.78 9	0.71 <u>6</u>	0.73 1	0.80 7	1							
VARI	0.47 9	0.76 4	0.83 <u>8</u>	0.87 6	0.92 4	0.94 4	1						
SAVI	0.37 3	0.79 3	0.89 <u>5</u>	0.93 7	1.00 0	0.80 7	0.92 4	1					
NDWI	- 0.35 2	- 0.78 7	- 0.89 <u>2</u>	- 0.93 5	- 0.99 9	- 0.77 8	- 0.90 3	- 0.99 9	1				
NDSI	- 0.36 4	- 0.78 7	- 0.89 <u>5</u>	- 0.90 6	- 0.96 2	- 0.82 9	- 0.94 4	- 0.96 2	0.95 3	1			
NDMI	0.36 4	0.78 7	0.89 <u>5</u>	0.90 6	0.96 2	0.82 9	0.94 4	0.96 2	- 0.95 3	- 1.00 0	1		
NBR2	0.33 6	0.73 7	0.89 <u>4</u>	0.95 2	0.99 4	0.76 8	0.90 5	0.99 4	- 0.99 5	- 0.95 1	0.95 1	1	

NBR	0.35 8	0.77 2	0.90 6	0.93 9	0.98 9	0.81 0	0.93 7	0.98 9	- 0.98 5	- 0.98 9	0.98 9	0.98 6	1	
BI	- 0.39 2	- 0.79 6	- 0.89 6	- 0.90 9	- 0.96 5	- 0.85 0	- 0.95 7	- 0.96 5	0.95 5	0.99 9	- 0.99 9	- 0.95 2	- 0.98 9	1

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

De esta manera se obtuvieron los valores de correlación que determina la variable independiente, considerando los valores de correlación fuerte, directa e inversamente proporcional, con un valor superior a (+/-) 0.9, siendo el contenido de COT expresado en porcentaje como la variable que tiene influencia directa sobre los demás parámetros e índices espectrales, de acuerdo a la tabla 8-4 se resaltado en negrita el COT, el mismo que va ser considerado para los análisis de correlación.

4.3.3. Evaluación de la relación del carbono con los índices espectrales

Para evaluar los índices, se procedió a establecer un análisis de regresión, considerando la variable COT, considerada como indicadora del efecto respuesta sobre los índices espectrales, ya que el contenido de carbono no se ve alterado de acuerdo a la temporalidad, como lo es el % H, se realizó la evaluación de la normalidad de los datos, para tener el factor teórico de la ecuación de regresión lineal simple, establecido por la siguiente ecuación:

De esta manera la relación que se presenta entre las variables independientes puede predecir valores con diferentes datos en la dimensión espacial, de esta manera se logró obtener los siguientes datos:

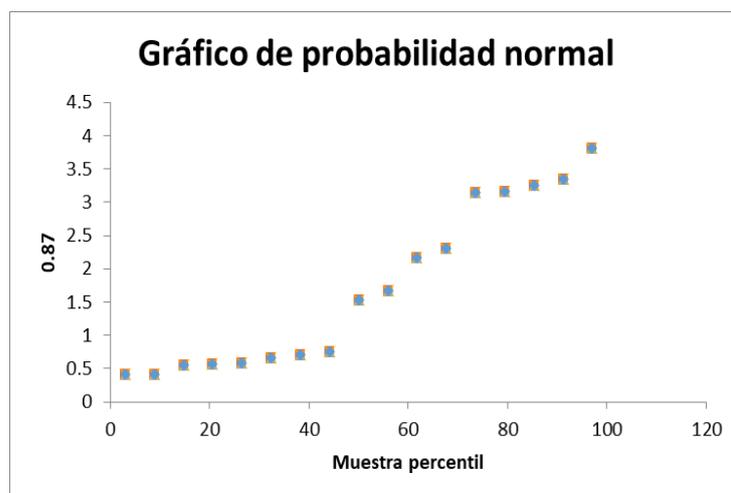


Ilustración 4-2: Resumen estadístico de regresión.

Realizado por: Rosero M. 2023

Se establece un nivel de correlación muy buena, que nos muestra la dispersión de los datos de manera asimétrica con las

demás variables, cuyo valor es de 0.88 para R^2 .

Tabla 4-9: Resumen estadístico de regresión

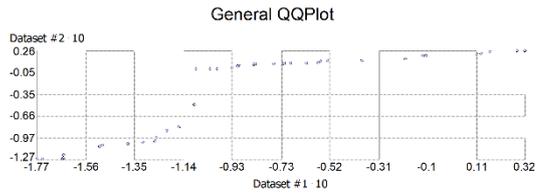
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	11	21.66	1.96930182	4.52	0.053
Residuos	6	2.87	0.47852901		
Total	17	24.53			

Realizado por: Rosero M., GIDAC. 2023

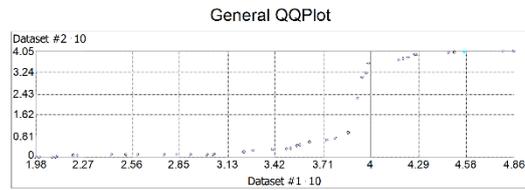
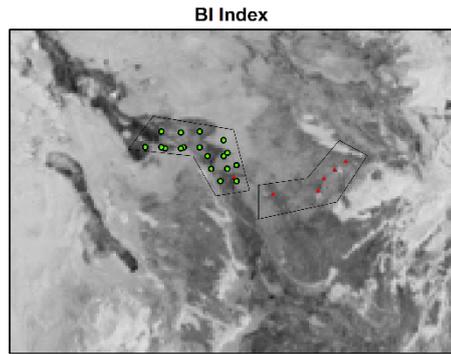
Análisis. El análisis de Varianza (ANOVA) **tabla 9-4**, para el contenido COT en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, y los Índices espectrales tienen efectos significativos, puesto que tienen valores p menores a 0,05; de esta manera existe evidencia estadística para descartar la hipótesis nula por tanto se puede decir que las variables producen cambios significativos en el contenido de COT.

4.3.4. Evaluación de índices espectrales

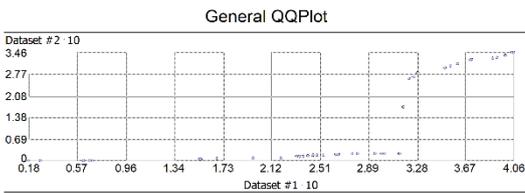
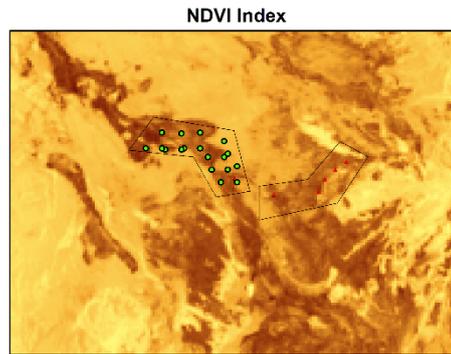
Para determinar la variabilidad se realizó la extracción de los valores asignados mediante los índices espectrales, de esta manera cada parcela dispone de 10 variables descritas en los índices propuestos en la metodología, considerando una resolución de 30 metros cuadrados.



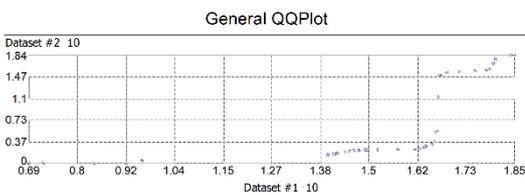
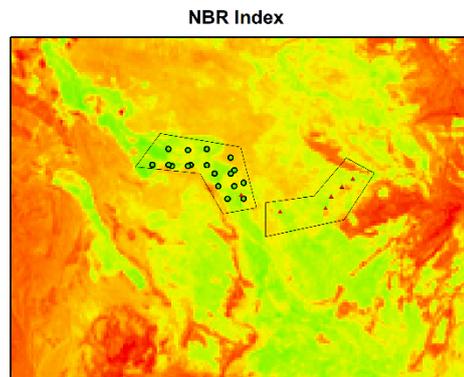
Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: bi
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: bi



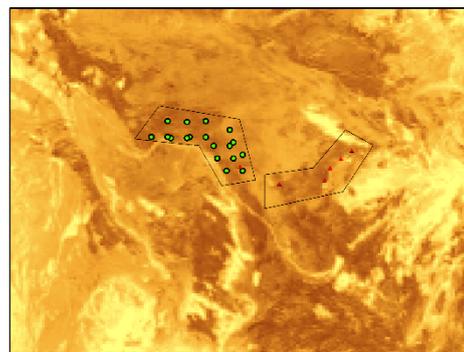
Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: NDVI_1
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: NDVI_1

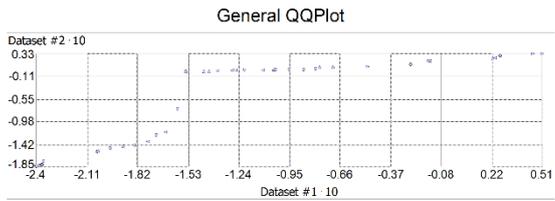


Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: nbr
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: nbr

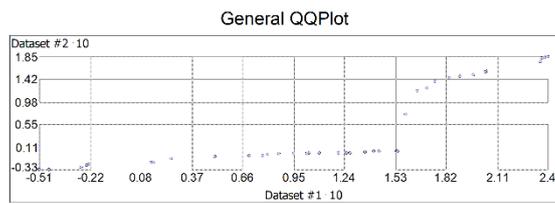


Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: nbr2
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: nbr2

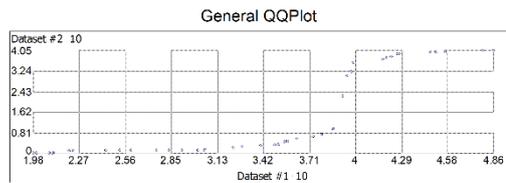




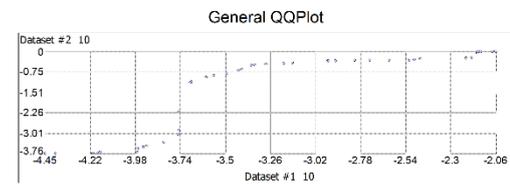
Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: ndsi
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: ndsi



Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: ndmi
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: ndmi

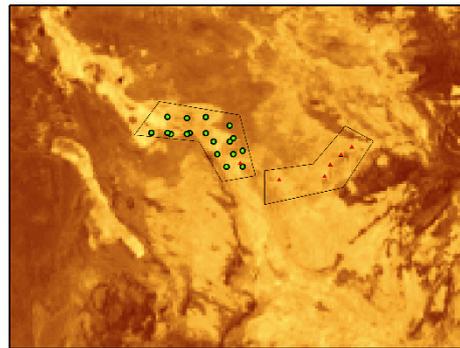


Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: savi
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: savi

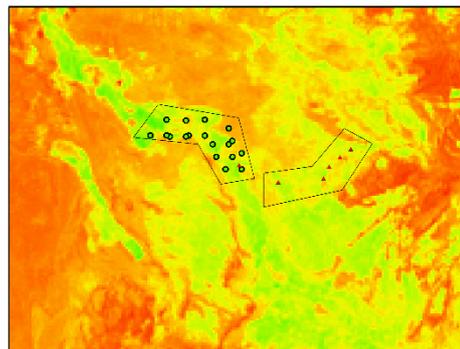


Dataset #1 Layer: Parcelas Attribute: ndwi
 Dataset #2 Layer: validación Attribute: ndwi

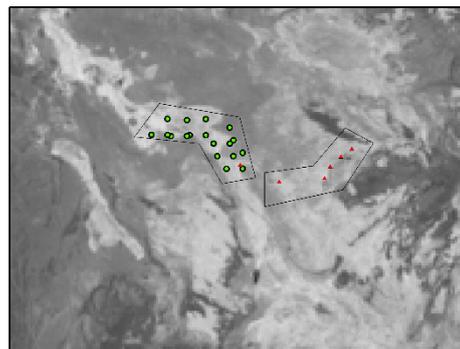
NDSI Index



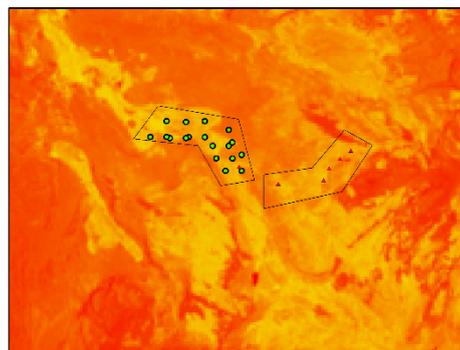
NDMI Index



SAVI Index



NDWI Index



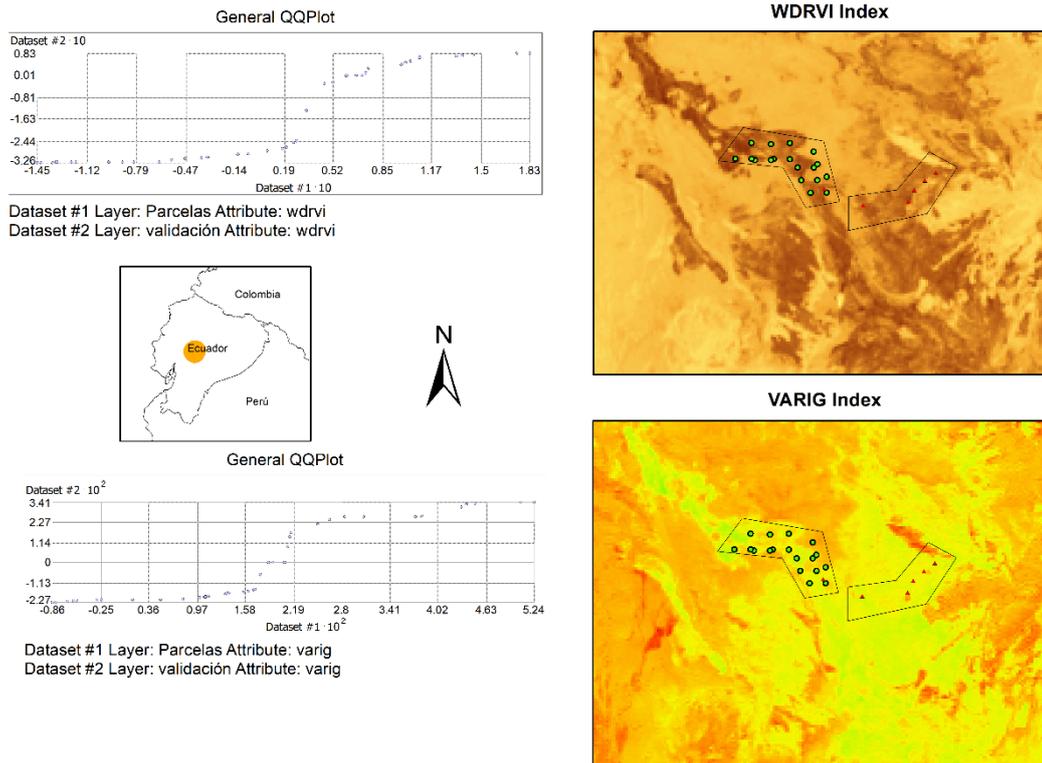


Ilustración 4-3: Evaluación del cuadrante 09 mediante la corrección Pan-sharpened (afinado).

Realizado por: Rosero M. 2023

4.4. Discusión de los resultados

De acuerdo con Campbell et al., 2011: pp. 65-67 el análisis anterior se establece que sí existe variabilidad en los parámetros fisicoquímicos del suelo entre los tres sitios evaluados. En términos de pH, los valores promedio varían de ligeramente ácido a ligeramente alcalino, lo que indica una variabilidad en la acidez/alcalinidad del suelo en los diferentes sitios. En términos de conductividad eléctrica, hay una variabilidad significativa en la cantidad de sales disueltas en el suelo, lo que puede afectar la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Estos resultados guardan concordancia con lo que mencionaron Vasquez et al. (2010) donde estudió la variabilidad de las propiedades físico químicas del suelo, evidenciando que hablando en términos de ph en suelos, suele existir moderada variabilidad en el ph, acorde con lo que este estudio halló, de igual manera alegaron la evidencia de una dependencia de las propiedades según el área de toma de muestras y la zona de estudio, misma afirmación que Mejia et al., (2018) estableció donde la variabilidad alta o baja dependerá según la zona de punto de muestreo, distancia entre muestreos, propiedades físico químicas del área de estudio entre otros factores, tipo climático, geológicos, etc.

Los estudios realizados por Cangahua (Coltorti y Ollier, 2000) manifestaron que entre las características que se pueden observar, el origen litológico que corresponde a la formación de la edad cuaternaria, la formación geológica es una unidad litoestratigráfica denominada como cuerpos de rocas caracterizados por propiedades litológicas similares que las diferencian de formaciones adjuntas u originarias, en nuestro caso identificamos tres formaciones: en los sectores de Cununyaku se encontraron la presencia de formaciones de lavas del Carihuairazo y antiguas del Chimborazo, además de formaciones de Cangahua (Coltorti y Ollier, 2000: pp. 1-19).

Dicho hallazgo apoyó la idea de que existe heterogeneidad espacial de las zonas de estudios, así como de sus propiedades, previamente mencionadas. Hallazgos respaldados por la obra de Ciarlo et al., 2020, donde su analizó la variabilidad espacial del suelo y sus propiedades, como una forma innovadora de abordar este tipo de zonas, mencionando que este tipo de variabilidad geo espacial se debe por la distancia entre las áreas de estudios, donde están influenciadas por una gran combinación de variables biofísicas, climáticas y geofísicas. Ya que, contrastando con los resultados de este estudio, a mayor dispersión entre muestras, mayor tendencia a encontrar diferencias entre sus tipologías, de igual manera de forma inversa.

Del mismo modo Vega & Bellanga, 2011, establecieron que este sistema ecológico está relacionado entre elementos naturales y humanos, explicando así las causas naturales, físicas, químicas y biológicas.

En cuanto a los valores máximos y mínimos, estos no superan los límites establecidos para la excentricidad, con la excepción de la CE y el % H. Esta discrepancia se debe a que la concentración de sales en el caso de la CE puede estar influenciada por la presencia de carbonatos (Ponce y Gambaudo, 2010: pp. 31-34), especialmente en la zona sur occidental de la reserva, que es de origen volcánico y se caracteriza por altas concentraciones de carbonato de calcio, sodio, que es una materia prima utilizada en la minería. Dicho descubrimiento se sustenta con lo mencionado por Choca (2017), el cual realizó un estudio de la conductividad eléctrica dentro de esta reserva, obteniendo un valor de 0.1568 mmho/cm, es decir menos de 4 mmhos/cm a 25°, adjudicando dicho valor a un suelo tipo sódico, con suelo que presentan un color negro como consecuencia al elevado sodio.

Del mismo modo, el % H está determinado por la temporalidad en la recolección de las muestras, ya que en la zona de estudio se presentan lluvias frecuentes debido al intercambio de corrientes frías y cálidas, lo cual puede generar variabilidad en los niveles de humedad.

A partir de los hallazgos encontrados se determinó los valores de correlación de la variable independiente, considerando los valores de correlación fuerte, directa e inversamente proporcional, con un valor superior a (+/-) 0.9, siendo el contenido de COT expresado en porcentaje como la variable que tiene influencia directa sobre los demás parámetros e índices espectrales, considerando que a partir de su análisis mediante ANOVA el valor menor a 0.05 comprobó y aceptó la hipótesis alterna. (Tomillo, 2014).

Esta afirmación entró en concordancia con lo emitido por Boyang et al., 2023, donde estimó el nivel de contenido de carbono en el suelo, reflejando de igual manera un alto grado de significancia del carbono en relación a los índices espectrales, y no solo del COT, sino de la materia orgánica debido a su estrecha relación.

Este hallazgo guarda concordancia con lo emitido por García y Ruiz, 2023, donde establecieron la relación de COT con los índices espectrales de suelo obteniendo una correlación de 0.98, en contraste con lo descubierto en el estudio con una correlación de 0.88 esto puede deberse a múltiples factores como diferencias de vegetación, época del año, instrumentos de mediciones, condiciones climáticas.

Esto también guarda concordancia por lo emitido por Ayala et al., 2022 estableciendo que variabilidad en las relaciones en cuanto a su correlación puede deberse a factores como elevación, geología, taxonomía del suelo, entre otros.

A partir de los hallazgos encontrados se determinó los valores de correlación de la variable independiente, considerando los valores de correlación fuerte, directa e inversamente proporcional, con un valor superior a (+/-) 0.9, siendo el contenido de COT expresado en porcentaje como la variable que tiene influencia directa sobre los demás parámetros e índices espectrales, considerando que a partir de su análisis mediante ANOVA el valor menor a 0.05 comprobó y aceptó la hipótesis alterna. (Tomillo, 2014).

Los semivariogramas generados en las parcelas de entrenamiento y control de los parámetros del suelo, que representan una distribución normal, con una tendencia a los valores representativos intermedios de los índices 0.6 hasta 0.8; siendo la relación más fuerte en la variable de humedad (% H) en promedio de 0.89 y -0.92, lo que representa que si los índices como el de humedad por ejemplo se incrementa, el contenido de humedad y carbono lo hacen de manera proporcional, pero en el caso de los índices BI y NDSI se incrementan los valores de humedad y carbono disminuirán, ya que la respuesta de estos índices está influenciada por la reflectancia máxima, solo se ve determinado por objetos claro, mientras la respuesta espectral de los cultivos por la absorción de la luz tienden a disminuir la reflectancia (Cifuentes, 2016).

CAPÍTULO VI

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Dentro de la variabilidad de las propiedades físico químicas del suelo de estudio, factores como la geología, origen de roca volcánica, zona de estudio o presencia de cultivo fueron determinantes en los cambios en las propiedades físico químicas donde se presentaron valores promedio para el pH que van desde ligeramente alcalino hasta ligeramente ácido desde 6.23, 7.63 y 7.73, para Cununyaku, Río Colorado y Chorrera Mirador respectivamente. De igual manera para la conductividad eléctrica los rangos fueron desde 78.13, 58.71 y 22.78 ($\mu\text{S}/\text{cm}$). En cuanto a la humedad sus valores correspondieron a 81.36, 18.37 y 27.60 (%). Y Finalmente, la textura presentando en su composición de arenas, arcillas y limos, una mezcla que va desde franco arcillo limoso hasta franco arcilloso.
- La heterogeneidad espacial demostró una notable distribución litológica influenciada por la zona de muestreo, donde se pudo observar para el caso de Cununyaku posiblemente formaciones de lava provenientes del Carihuairazo, del vestuoso Chimborazo y de Cangahua. Por otro lado, en las zonas de muestreo de Río Colorado y Chorrera se divisó probablemente formaciones volcánicas propias del Chimborazo.
- Al llevar a cabo un estudio comparativo entre las propiedades geofísicas y las propiedades físico químicas del suelo en una parcela seleccionada dentro de la zona de estudio, se estableció una relación significativa entre el contenido de COT y diversos parámetros geofísicos, los resultados de la correlación, destacando valores superiores a (+/-) 0.9 indicaron que el contenido de Carbono Orgánico Total, ejerce una influencia directa sobre los demás parámetros. El análisis de Varianza (ANOVA) aplicado al contenido de COT en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, así como a los índices espectrales, reveló efectos significativos al mostrar valores de p menores a 0.05. Esta relación sugirió que los índices espectrales pueden ser buenos indicativos de cambios sustanciales en el contenido de COT y la humedad del suelo.
- Dichos hallazgos abren la puerta para una comprensión más profunda entre la relación de estas variables, logrando así, entender la dinámica del suelo en la región con fines de conservación

5.2. Recomendaciones

- Continuar investigando sobre las múltiples aplicaciones que tiene el estudio de las relaciones de los índices espectrales con el suelo. Por ejemplo, el uso de herramientas informáticas en la creación de algoritmos adaptados a la tipología de un suelo determinado podría ahorrar muchos recursos económicos, optimizar tiempos y mejorar la toma de decisiones.
- Usar un equipo computacional con una mejorada memoria RAM y un buen sistema operativo agilizarán el tiempo de respuesta del software de uso en el procesamiento de imágenes, a su vez que permiten almacenar mayor cantidad de datos debido a que los archivos pesan varias gigas.
- Es fundamental que los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADs), de Tungurahua, Chimborazo y Bolívar prioricen la creación y ejecución de planes de manejo y conservación de las zonas de páramo. Para lograrlo es crucial que se apoyen en estas herramientas científicas proporcionadas por Instituciones de Educación Superior. Estas colaboraciones pueden generar asociaciones y convenios que permitan a las autoridades tomar decisiones más informadas. De esta manera, los GADs pueden desempeñar un papel clave como intermediarios para resolver los problemas de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

- AFZAAL, H.; et al.** "Detection of a potato disease (Early blight) using artificial intelligence." *Remote Sensing* [en línea], 2021, (Canada) 13(3), pp. 1-17. [Consulta: 10 marzo 2023]. ISSN 20724292. Disponible en: DOI 10.3390/rs13030411
- ARIAS, Ligia; et al.** Guía metodológica: Cuantificación y monitoreo de biomasa y carbono en algunos sistemas silvopastoriles. Pereira- Colombia: PUBLIPRINT LTDA, 2007. P.21.
- BOLT, B.** *Earthquakes and geological discovery*. 2018. pp. 120-125
- BRADY, N.C. & WEIL, R.R.** *Nature and Properties of Soils* [en línea]. 15. Maryland-USA: Pearson, 2016, pp. 130-328. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition.
- BRAJA, M.** *Advanced Soil Mechanics*. 5ed. New York-USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 13: 978-0-415-42026-6, pp. 411-412.
- BULKMAN, O.** *Porosidad y aireación densidad real y aparente* [blog]. 2019, pp. 3-4. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/33036/mod_resource/content/1/TEMA_5_POROSIDAD_Y_AIREACION.pdf.
- BUSTAMANTE, M., ALBÁN, M. & ARGÜELLO, M.** *Los Páramos de Chimborazo. Un estudio socioambiental para la toma de decisiones* [en línea]. Ecuador: Aristos arte gráfico, 2011. [Consulta: 8 mayo 2022]. Disponible en: www.flacsoandes.edu.ec.
- CABELLO, J. & PARUELO, J.M.** "La teledetección en estudios ecológicos". *Ecosistemas* [en línea], 2008, (España), vol. 17(3), pp. 3-4. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Número ISSN 1697-2473. Disponible en: <https://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=573>
- CADKIN, J. & BRENNAN, P.** *Dynamic segmentation in ArcGIS* [blog]. USA: ArcUse, 2002, pp. 52-54. [Consulta: 8 mayo 2022]. Disponible en: www.esri.com.
- CAI, Y., LIN, H. & ZHANG, M.** "Mapping paddy rice by the object-based random forest method using time series Sentinel-1/Sentinel-2 data". *Advances in Space Research* [En línea], 2019, (China) 64 (11), pp. 22-24. [Consulta: 10 marzo 2023]. ISSN 0273-1177. Disponible en: DOI 10.1016/J.ASR.2019.08.042.
- CAMACHO, F.** "Análisis espectral del suelo: una revisión de la literatura". *Revista de investigación en Ciencias Ambientales*, vol. 4, no° 1 (2013) pp. 83-99.
- CAMACHO, M.** "Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible". *Revista Anales* [En línea], 2014, (Ecuador) 1 (372), pp. 77-92. [Consulta: 10 marzo 2023]. ISSN 1390-7891. Disponible en: DOI 10.29166/anales.v1i372.1241

CAMPBELL, J.B., WYNNE, R.H. & THOMAS, V. *Introduction to remote sensing* [en línea]. New York- USA: the guilford press, 2011. pp. 65-67. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.guilford.com/books/Introduction-to-Remote-Sensing/Campbell-Wynne-Thomas/9781462549405>.

CAMPILLO, R., & SADZAWKA, A. *La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados* [blog]. 2015. pp.45-53. [Consulta: 12 febrero 2023]. Disponible: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33853.pdf>

CAÑIZARES, J.P., SEGOVIA, R.C. & CORDERO, M.A. “Análisis de los parámetros geofísicos del suelo en la cuenca del río Chimborazo”. *Revista Politécnica* [en línea], 2015, (Ecuador) 36(2), pp. 29-34. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/issue/view/17.

CÁRDENAS, Myriam. Evaluación de la calidad de los suelos de paramo intervenidos y no intervenidos en la comuna monjas bajo, parroquia Juan Montalvo, Cantón Cayambe. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Escuela de Ciencias Químicas. Quito- Ecuador 2015. pp. 15-16 [Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/9368/1/UPS-QT071111.pdf>

CASANOVA, M.; et al. “Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* [en línea], 2015, (Chile) 76(1). pp. 1-9. [Consulta: 18 diciembre 2020]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/chiljar/v76n1/15.pdf>

CETINA, N. 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 [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. 2017. p. 5. Consulta: 2015-07-23]. Disponible en: <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2009/1/Nicol%20Andrea%20Cetina.pdf>

CHRISTOPHERSON, R.W. & BIRKELAND, P.W. *Geosystems: An introduction to physical geography*. 10ª ed. USA: Pearson, 2016, pp. 120-124.

CHUNCHO, C. & CHUNCHO, G. “Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones”. *Bosques Latitud Cero*, vol. 9, n°4 (2019), (Ecuador) pp. 72-76.

CIARLO, E. et al. “Variabilidad espacial de propiedades del suelo: efecto del uso y tipo”. *Cienc. suelo* [En línea]. 2020, (Argentina), vol. 38 (2). pp.249-261. [Consulta: 17 noviembre 2023]. ISSN 1850-2067. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000200249&lng=es&nrm=iso. ISSN 1850-2067.

COLTORTI, M. & OLLIER, C.D. “Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes”. *Geomorphology* [en línea], 2000, (Ecuador) 32(1-2), pp. 1-19. [Consulta: 9 marzo 2023]. ISSN 0169555X. Disponible en: DOI 10.1016/S0169-555X(99)00036-7.

CRACKNELL, A.P. & HAYES, L.B.W. *Introduction to remote sensing*. USA: CRC Press, 1991. ISBN 0850663350, pp. 150-153.

DE LA CASA, A. y OVANDO, G. “Integración del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina”. *Agricultura Técnica* [en línea], 2007, (Argentina) 67(4), pp. 362-371. [Consulta: 9 marzo 2023]. ISSN 03652807. Disponible en: DOI 10.4067/s0365-28072007000400004.

DÍAZ, E. *Análisis geoestadístico de variables edáficas Serie técnica. Manual de Métodos de Análisis de Suelo*. Uruguay: INIA, 2002, p. 3. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: <http://www.inia.uy/productos-y-servicios/laboratorios/Laboratorio-de-Suelos-Plantas-y-Agua/an%C3%A1lisis-realizados-y-m%C3%A9todos-anal%C3%ADticos>

DZIEWONSKI, A.M. & ANDERSON, D.L. The Earth’s interior: Composition, structure, and evolution. In *The Handbook of Mineralogy*. USA: Cambridge University Press, 2018, pp. 1-19.

ECHEVERRIA, Julie; et al. “Spatial Dynamics of the Shore Coverage within the Zone of Influence of the Chambo River, Central Ecuador”. *MDPI* [en línea], 2022, (Ecuador) vol. 12(1), p. 180. [Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land12010180>

ECHEVERRIA, Magdy; et al. “Determinación de carbono orgánico en el páramo de Pichan Central, Ecuador”. *ResearchGate* [en línea], 2014, (Ecuador). [Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/270453601_Determinacion_de_carbono_organico_en_el_paramo_de_Pichan_Central_Ecuador

FAO. “Los fertilizantes y su uso”. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology* [en línea], 1993, (Francia) 20(12), pp. 801-808. [Consulta: 9 marzo 2023]. ISSN 14401681. Disponible en: DOI 10.1111/j.1440-1681.1993.tb03018.x.

FAO. *Plan De Manejo y Cogestión para el Territorio de la Microcuenca del río Chimborazo* [en línea]. Riobamba – Ecuador: Gef, 2012. p. 7. [Consulta: 2 marzo 2023]. Disponible en: http://www.canipeec.org.mx/woo/xtras/EVENTOS/Residuos_14mar13/CAMARA_DEL_PAPEL.pdf.

FAO. TEXTURA DEL SUELO [blog]. 2014. p. 3. [Consulta: 1 marzo 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/!33791!x6706s06.htm.

- FERREIRA, V.; et al.** “Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed”. *Solid Earth* [en línea], 2015, (Portugal) 6(2), pp. 383-392. [Consulta: 4 marzo 2023]. ISSN 18699529. . Disponible en: DOI 10.5194/se-6-383-2015.
- FERREYRA, A.** “La observación de la tierra desde el espacio. Imágenes Satelitales: un recurso disponible”. *RTA* [en línea], 2016, (Argentina) 10(31), pp. 57-61. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_pergamino_la_observacion_de_la_tierra_desde_el_espacio._imagenes_satelitales_un_recurso_disponible.pdf.
- GANGA, A. et al.** “Applications of GIS and Remote Sensing in Soil Environment Monitoring”. *Gold Open Access* [en línea], 2023, (Switzerland), vol. 15 (18). [Consulta: 14 noviembre 2023]. ISSN 20711050. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/su151813705>
- GARAY CANALES, O; & OCHOA ACEVEDO, Á.** *Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del río Mantaro* [en línea]. Lima-Perú: Publi Rabbit Diseño y Produccion Gráfica, 2010. p.20. [Consulta: 16 marzo 2023]. Disponible en: <http://met.igp.gob.pe/proyectos/incagro/datos/manual.pdf>
- GIRON, I.** *Propiedades espectrales de los suelos y su relación con el contenido de sales*. Madrid, 2009, p. 22.
- GONZÁLEZ, F.A.; et al.** "Evaluación de la calidad del suelo en la cuenca del río Chimborazo mediante el uso de índices de calidad del suelo". *Revista Científica Agroecosistemas*, vol. 6, noº2 (2018), (Ecuador) pp. 53-62.
- GUERRERO, J.; et al.** “Caracterización de los órdenes de suelos en el Ecuador y su relación con la producción agrícola”. *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 38, noº2 (2018), (Ecuador) pp. 193-206
- GUILLEN, Carlos; et al.** “Aplicación de teledetección y SIG para el levantamiento cartográfico de los suelos de la cuenca Solani, India”. *Geográfica Venezolana* [en línea], 2015, (Ecuador) vol. 56(2), pp. 185- 204. [Consulta: 23 Noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3477/347743079003/html/>
- GUILLOT & ALARCÓN.** “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO DE UN SISTEMA DE PERMACULTURA Y UNA FINCA AGROECOLÓGICA EN EL MUNICIPIO SANTIAGO DE CUBA”. *Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba* [En línea], 2020, (Cuba), vol. 1 (3), pp.1-2. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181365138008/html/>
- GUZMÁN, A.; et at.** “Impacto de las prácticas de manejo de suelos en la calidad del suelo y la productividad agrícola en Ecuador”. *Revista de Investigación Agrícola y Ambiental*, vol. 8, noº1 (2017), (ECUADOR) pp. 1-11.

- HAWKING, S. & JOU, D.** *El universo en una cáscara de nuez Física* [en línea]. Reino Unido: Editorial Crítica, 2002. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: <http://esystems.mx/BPC/llyfrgell/0324.pdf>.
- HERNÁNDEZ, J.C.** *La reflectancia del suelo y su relación con la producción vegetal en áreas de cultivo*, 2011, p. 10.
- HERNÁNDEZ, M.** “Valbuena, C., et al. “Métodos geoestadísticos para la distribución espacial y temporal de plagas”. Estatal de Sanidad Vegetal de Guanajuato [En línea], 2003, (México), vol. 81, pp. 1-2. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/hzKH6fLGTmQmb7FKcvH83Jr/?format=pdf&lang=es>”.
- HERNÁNDEZ, R.** *Metodología de la investigación*. Mexico: McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. de C.V., 2014. ISBN 9781456223960, p. 91.
- HILLEL, D.** *Introduction to Environmental Soil Physics* [en línea]. Elsevier, 2003, p. 98. [Consulta: 11 marzo 2023]. ISBN 9780123486554. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780123486554/introduction-to-environmental-soil-physics>.
- IKECHUKWU, N.** *Soil permeability and capilarity* [blog]. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: https://portal.abuad.edu.ng/Assignments/1586978514NAME-17:eng03:035_nwani_ikechukwu.pdf.
- INEC.** *Estadísticas del Medio Ambiente. Gobierno del Ecuador* [blog] Ecuador, 2020. [Consulta: 2 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-medio-ambiente/>
- INSTITUTE OF PHYSICS.** *The Electromagnetic Spectrum* [blog]. 2020. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.iop.org/>.
- INTA.** *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. La pampa- Argentina, pp. 161.
- IQBAL, J.; et al.** “Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils”. *Soil Science Society of America Journal* [en línea], 2005, (USA) 69(4), pp. 1338-1350. [Consulta: 4 marzo 2023]. ISSN 03615995. Disponible en: DOI 10.2136/sssaj2004.0154.
- JARAMILLO, D.** Análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en el Centro de Investigación Tibaitatá de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Colombia 2012. pp. 40-45.
- JARAMILLO, D., et al.** “Variabilidad espacial de algunas propiedades físico- mecánicas del suelo de textura pesada”. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* [En línea], 2008, (Cuba), vol. 3 (2), pp. 3-4. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3214/321428100001.pdf>

- JENSEN, J.R.** *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. 2ª ed. USA: Pearson, 2014. ISBN 9781292021706, pp. 255-259.
- LAL, R.** “Soil carbon sequestration to mitigate climate change”. *Geoderma* [en línea], 2004, (USA) 123(1-2), pp. 1-22. [Consulta: 4 marzo 2023]. ISSN 00167061. Disponible en: DOI 10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
- LAWYER, L.C. (Lee); et al.** *Geophysics in the Affairs of Mankind*. Oklahoma- USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001, pp. 40-45.
- LAZO, L.** EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN BASADOS EN PÍXELES Y EN OBJETOS PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES RAPIDEYE [en línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de Maestría) UNIVERSIDAD DEL AZUAY MAESTRÍA, Cuenca, Ecuador. 2014. pp. 45-48. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4023/1/10622.pdf>.
- LILESAND, T.M.; et al.** *Remote Sensing and Image Interperation*. 7ed. New York-USA: Wiley, 2015, pp. 951-952.
- LIU, B.; et al.** “Forward prediction for tunnel geology and classification of surrounding rock based on seismic wave velocity layered tomography”. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* [en línea], 2023, (China) 15(1), pp. 179-190. [Consulta: 12 marzo 2023]. ISSN 16747755. Disponible en: DOI 10.1016/j.jrmge.2022.10.004.
- LLAMBÍ, L.D.; et al.** *Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos-Proyecto Páramo Andino* [en línea]. Ecuador: Monsalve Moreno, 2012. p. 281. Disponible en: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56475.pdf>.
- LOPEZ-CALDERON, Magali J. et al.** “Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2”. *Terra Latinoam* [En línea], 2023, (Mexico), vol. 41, pp. 1-2. [Consulta: 14 Noviembre 2023]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792023000100107&lang=es
- LUCIO, M. et al.** “Monitoreo de la vegetación del páramo mediante la intersección de los índices ndvi y evi de la microcuenca del río Cebadas, provincia de Chimborazo, periodo 2021”. *Domino de las ciencias* [En línea], 2021, (Ecuador), vol. 9 (4), pp. 991-992. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i4.3632>
- MACHUCA, M.**” Respuesta espectral del suelo: una revisión”. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, vol. 15, no. 4 (2015) (Chile) pp. 34-50.
- MACHUCA, P. & UZQUIANO, F.** Evaluación del estado de Salud de Bofedales mediante Teledetección en la Microcuenca de Acocancha-Lima 2021. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO. Lima-Perú. 2022. pp. 4-5. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5316>

MAE. *Plan de manejo de paramos y humedales Ecuador*. Quito: Ministerio de ambiente del Ecuador, 2014. [Consulta: 10 febrero 2023]. Disponible en: http://ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/03/plan_nacional_paramos_humedales_2014.pdf

MCBRATNEY, A.B.; et al. “An overview of pedometric techniques for use in soil survey”. *Geoderma* [en línea], 2000, (Australia) 97(3-4), pp. 293-301. [Consulta: 14 marzo 2023]. ISSN 00167061. Disponible en: DOI 10.1016/S0016-7061(00)00043-4.

MENA, P.; et al. *Los suelos del páramo* [en línea]. Quito-Ecuador: Abya Yala, 2000, p. 14. [Consulta: 11 marzo 2023]. ISBN 9978045910. Disponible en: <https://es-static.zdn.net/files/d5c/a9751b4293c82c26ef428db85b953254.pdf>.

MEJÍA et al. “Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México”. *Agricultura, sociedad y desarrollo* [En línea], 2018, (México), vol.15 (2). pp.275-288. [Consulta: 17 noviembre 2023]. ISSN 2395-8030. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3605/360559620008/html/>

MONTERO LORENZO, José; & LARRAZ IRIBAS, Beatriz. *Introducción a la geoestadística lineal*. 1ª ed. Barcelona-España: Netbiblo, S.L., 2008. P.20.

MORENO, A. *Sistemas de Información geográfica*. 2ª ed. España: Ra-Ma S.A., 2017. pags.20-32

MUSSETT, A.E.; et al. *Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics*. Reino Unido: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-052178085, pp 225-227.

NARVÁEZ, E.C.; et al. “Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la cuenca del río Chimborazo”. *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 32, no. 4 (2019), (Ecuador) pp. 1-7.

NAVARRO BLAYA, Simón & NAVARRO GACÍA, Gines. *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. 2 ed. Madrid-España: Mundi-Prensa, 2003. P. 128

NEGRETE, S. ESTUDIO MULTITEMPORAL DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LAS RESERVAS PRIVADAS DEL NODO NOROCCIDENTAL DE PICHINCHA EN LOS AÑOS 1989, 1999 Y 2013 [en línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Ecuador. 2009. pp. 30-36. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/10293>.

NELSON. Z. *Permeabilidad Del Suelo*. [blog]. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm.

OCW. *Elaboración de Cartografía Física Elemental* [blog]. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: https://ocw.uma.es/pluginfile.php/1546/mod_resource/content/0/OCW_Tema_5_Mapa_Litologia.pdf#:~:text=Empecemos por la definición%3A, muy variadas en sus características.

OLAYA, V. *Sistemas de información geográfica* [en línea]. España: Sheldon and Company, año 2020. [Consulta: 25 de Septiembre 2023]. Disponible en: <https://pcsitna.navarra.es/archivo/Documents/Sistemas.de.Informacion.Geografica.pdf>

OLEA, R. *Geostatistics for engineers and earth scientistists*. USA: Springer, 1999, pp. 31-36

PADILLA, F. *Hidrogeología de suelos y rocas* [blog]. [Consulta: 3 marzo 2023]. Disponible en: [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/113/pdfs/GEOLOGIA 2012 UNIDAD V.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/113/pdfs/GEOLOGIA%202012%20UNIDAD%20V.pdf).

PAUCAR, P. & VELASTEGUI, J. CUANTIFICACIÓN DE LA RESPIRACIÓN EDÁFICA COMO MEDIDA DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN SUELOS DE LA MICROCUENCA DEL RIO CHIMBORAZO. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. Riobamba-Ecuador. 2019. pp. 12-13. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11137/1/236T0439.pdf>

PAVÓN, M. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO POBLACIONAL DE DOS ESPECIES FORESTALES PRIORIZADAS PARTICIPATIVAMENTE EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIMBORAZO [en línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. Pp. 32-33. [Consulta: 4 marzo 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5136/1/33T0157.pdf>.

PAZ, F. “Estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea usando sensores remotos”. *Terra Latinoam* [En línea], 2018, (México), vol.36 (39). pp.239-259. [Consulta: 16 noviembre 2023]. ISSN 2395-8030. Disponible en: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.399>.

PAZMIÑO, L. CUANTIFICACIÓN DE LA RESPIRACIÓN EDÁFICA COMO MEDIDA PARA LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN LA ZONA DE PANZARRUMI DEL PARQUE NACIONAL DE LLANGANATES [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Colombia. 2022. p. 40. [Consulta: 20 marzo 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17617/1/236T0616.pdf>

PAZMIÑO, Y.; et al. “Identificación de un Conjunto de Variables para la Clasificación de Paramo Suelos usando un modelo no paramétrico, teledetección y carbono orgánico”. *Sustainability* [en línea], 2021, (Ecuador), pp. 5-6. [Consulta: 20 marzo 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13169462>

POHLMAN, G.G. “Soil Science Society of America”. *Soil Science Society of America Journal* [en línea], 1940, (USA) 4, pp. 446-447. [Consulta: 1 marzo 2023]. Disponible en: DOI 10.2136/sssaj1940.036159950004000c0132x.

POLANCO, V. APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA ELABORACIÓN DE INSTRUMENTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA

MOLINA. Lima-Perú. 2022. pp. 9-13. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5316>

PONCE, M. & GAMBAUDO, S. *Las rocas carbonatica-Minerales para la Agricultura en Latinoamérica* [en línea]. Argentina: Universidad Nacional de San Martín., pp. 31-34. [Consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: www.segemar.com.

POWLSON, D.S.; et al. "Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services". *Food Policy* [en línea], 2011, (Reino Unido) 36(1), pp. 72-87. [Consulta: 12 marzo 2023]. ISSN 03069192. DOI 10.1016/j.foodpol.2010.11.025. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306919210001399>.

QIAO, Y. & ZHANG, J. "Correlation of the spectral response of the soil with the chemical properties". *Journal of Remote Sensing*, vol. 16, no. 3 (2012), (USA) pp. 428-441.

REES, M. & CRESSIE, N. *Statistics for Spatial Data*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1993. ISBN 0471002550.

RENGASAMY, P. "World salinization with emphasis on Australia". *Journal of Experimental Botany* [en línea], 2006, (Australia) 57(5), pp. 1–7. [Consulta: 10 de marzo]. Número ISSN 00220957. Disponible en: <https://academic.oup.com/jxb/article/57/5/1017/641287>

RHOADES, J.; et al. "Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations". *Soil Science Society of America Journal* [en línea], 1989, (USA) 55(1), pp. 434-439. [Consulta: 20 Abril 2023]. Disponible en: DOI. 10.2136/sssaj1991.03615995005500010053x.

RODRÍGUEZ, Natalia; et al. La contaminación del suelo: Una realidad oculta. [en línea]. Roma- Italia: , Universidad de Saskatchewan, 2019. P.3. [Consulta: 20 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>

ROJAS, J. & SÁENZ, P. *Comparación de métodos de determinación en Ensayo de rotaciones en siembra directa*. [blog]. 2012, p.1. [Consulta: 12 marzo 2023]. Disponible en: www.inta.gov.ar/saenzpe.

ROJAS KATHERINE. Fundamentos de la Radiación Electromagnética [en línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga. 2009. p. 23. [Consulta: 9 marzo 2023]. Disponible en: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/432/digital_17516.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

ROMERO, F.; et al. *HACIA UN MANEJO ADAPTATIVO DE LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO Y SU ZONA DE AMORTIGUAMIENTO* [blog]. Riobamba, 2018. pp. 1-57. [Consulta: 2 marzo 2023]. Disponible en: www.giz.de.

ROSETO, G. EVALUACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL ECOSISTEMA DE PÁRAMO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIMBORAZO EN BASE A LAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado)

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2019. pp. 45-60. [Consulta: 5 marzo 2023]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/11124/1/236T0433.PDF>

ROSSI, A.M., & RABENHORST, M.C. "Organic carbon dynamics in soils of Mid-Atlantic barrier island landscapes". *Geoderma* [en línea], 2019, 337(7), pp. 12-13. [Consulta: 1 abril 20023]. ISSN 00167061. DOI 10.1016/j.geoderma.2018.10.028. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.028>.

RUBIO, A. LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado) Universidad de Sevilla, España. 2010. p. 21: Disponible en: [https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La densidad aparente en suelos forestales .pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales.pdf).

RUCKS, L.; et al. *Evaluación física y química del suelo* [blog]. 2004. [Consulta: 1 marzo 2023]. Disponible en: <https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>

SÁNCHEZ, J. *FERTILIDAD DEL SUELO Y NUTRICION MINERAL DE PLANTAS-MINERALES EN LAS PLANTAS* [blog]. 2007, pp. 1-19. [Consulta: 20 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FERTILIDAD%20DEL%20SUELO%20Y%20NUTRICION.pdf>

SARRÍA, M. & PALAZÓN, L. "La reflectancia espectral de los suelos y su relación con la humedad y la materia orgánica". *Agrociencia*, vol. 42, no. 1 (2008) pp. 95-105.

SHI, W.; et al. "Assessment of the impact of sea-level rise on steady-state seawater intrusion in a layered coastal aquifer". *Journal of Hydrology* [en línea], 2018, (China), 563, pp. 851-852. [Consulta: 20 marzo 2023]. ISSN 00221694. Disponible en: DOI 10.1016/j.jhydrol.2018.06.046.

SIERRA, C. *La relación entre contenido de arcilla y la CIC y su influencia en la fertilización* [blog]. 2019, p.53 [Consulta: 1 abril 2023]. Disponible en <https://digital.elmercurio.com/2020/03/03/A>

SIHAN, P. et al. "Prediction and mapping of organic carbon and total nitrogen in reclaimed soil profiles in surface coal mining areas based on imaging hyperspectral technology". *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society* [en línea]. 2023, (China), vol. 48(7), pp. 2949-2960 [Consulta: 15 noviembre 2023]. ISSN: 02539993. Disponible en: <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.CN23.0469>

STEIGMEIER, Daniela; et al. "TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PARA IDENTIFICAR SUELOS DECAPITADOS (LA PLATA, BUENOS AIRES)". *Editorial Universidad Nacional de la Plata* [en línea], 2019, (Argentina), pp. 3-4. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Número ISSN 2362-4221. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/110639/Documento_completo.13660.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20

SUNTAXI, J. & TOSCANO, J. EVALUACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO E IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES ANTRÓPICOS QUE HAN INFLUENCIADO EN EL SUELO DE PÁRAMO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO LA CHIMBA, PARROQUIA OLMEDO, CANTÓN CAYAMBE. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO. Quito-Ecuador. 2022. [Consulta: 12 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23364/1/UPS%20-%20TTS984.pdf>

TAPIA, C.; et al. *Manejo de Páramos* [blog]. 2011, p. 3. [Consulta: 11 mayo 2022]. Disponible en: www.flacsoandes.edu.ec.

USDA-NRCS. *Soil Quality Indicators: Soil Electrical Conductivity* [blog]. 2011, p. 357 [Consulta: 3 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>

USDA-NRCS. *Soil Quality Indicators: Soil Electrical Conductivity* [blog]. 2011, p. 357 [Consulta: 3 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>

VALBUENA, C., et al. “Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento del mango (*Mangifera indica L.*)”. *Revista Bras. Frutic., Jaboticabal* [En línea], 2008, (Cuba), vol. 30 (4), pp. 2-3. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/hzKH6fLGTmQmb7FKcvH83Jr/?format=pdf&lang=es>

VÁSCONEZ, Michelle; et al. Cuencas Hidrográficas [en línea]. Cuenca- Ecuador: Abya-Yala, 2019. P.15. [Consulta: 20 septiembre 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>

VÁSQUEZ, P. et al. “Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena”. *Acta Agronómica* [en línea]. 2010, (Colombia), vol. 127(4), pp. 449-456 [Consulta: 15 noviembre 2023]. ISSN: 0120-2812. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169920032009>

XU, X.; et al. “Estimation of Soil Organic Carbon Based on Spectral Features of Hyperspectral Data”. *Remote Sensing* [en línea], 2019, (*China*) 11(1) [Consulta: 4 marzo 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs11010007>





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 01/ 03/ 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Miguel Angel Rosero Toledo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería en Biotecnología Ambiental
Título a optar: Ingeniero en Biotecnología Ambiental
<p style="text-align: center;"> Dra. Magdy Mileni Echeverría Guadalupe, PhD Directora del Trabajo de Titulación</p> <p style="text-align: center;"> Ing. Sofia Carolina Godoy Ponce, Mgs Asesora del Trabajo de Titulación</p>