



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE AMBIENTAL

Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO KRIGING, PARA
DETERMINAR LA RELACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EDÁFICO CON LOS
SISTEMAS ECOLÓGICOS, EN LA PARROQUIA ACHUPALLAS, CANTÓN
ALAUÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

AUTORES

ANDREA ELIZABETH BARROSO CAICEDO

ROOSEVELT VINICIO REAL OROZCO

TUTOR

MSc. PATRICIO SANTILLÁN

RIOBAMBA - ECUADOR

AÑO 2017

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de tema: **“Aplicación y validación del modelo matemático KRIGING, para determinar la relación del stock de carbono edáfico con los sistemas ecológicos, en la parroquia achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo”**, presentada por: Andrea Elizabeth Barroso Caicedo y Roosevelt Vinicio Real Orozco y dirigida por: MsC. Patricio Santillán.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, se constató el cumplimiento de las observaciones realizadas y se remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

MsC. Patricio Santillán

Tutor del Proyecto



Firma

MsC. Mauro Jiménez

Miembro del Tribunal



Firma

PhD. María Fernanda Rivera

Miembro del Tribunal



Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORIA

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención de grado de Ingeniero Ambiental, elaborado por la señorita Andrea Elizabeth Barroso Caicedo y el señor Roosevelt Vinicio Real Orozco con el tema: “**Aplicación y validación del modelo matemático KRIGING, para determinar la relación del stock de carbono edáfico con los sistemas ecológicos, en la parroquia achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo**”, fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutor y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que se puede informar en honor a la verdad.



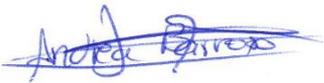
MsC. Patricio Santillán

C.I: 0602780777

AUTORIA DE LA INVESTIGACION

Nosotros, Andrea Elizabeth Barroso Caicedo con cédula de identidad 060404024-6 y Roosevelt Vinicio Real Orozco con cédula de identidad 160049973-3; hacemos referencia como autores del presente trabajo de investigación, titulado: “**Aplicación y validación del modelo matemático KRIGING, para determinar la relación del stock de carbono edáfico con los sistemas ecológicos, en la parroquia achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo**”, dirigida por el tutor del proyecto, Msc. Patricio Santillán.

Manifestamos la originalidad en la conceptualización de ideas, interpretación de resultados, con el sustento de autores que han sido debidamente referenciados en el documento.



.....
Andrea Elizabeth Barroso Caicedo
C.I: 060404024-6



.....
Roosevelt Vinicio Real Orozco
C.I: 1600499733

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A mi familia quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abrió abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien y finalmente quisiera agradecer el apoyo brindado por parte del proyecto “Soil Organic Carbon Evaluation and Secuestation in Ecuadorian Paramo Ecosystem”

ANDREA BARROSO CAICEDO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, a mi familia clave importante de este logro alcanzado, a mis estimados docentes y colaboradores.

A Dios estar a mi lado en todo momento y por ser el que me brindó la fortaleza y fe necesarias para poder culminar esta etapa de mi vida además de ser quien guía mis pasos.

A mi Familia por ser un pilar fundamental a lo largo de toda mi vida especialmente a mi abuelita quien ha sabido guiarme por el camino del bien y quien me ha enseñado con su ejemplo de lucha que todas las recompensas se logran luego de un grande esfuerzo y sacrificio.

A mis estimados profesores, por su esfuerzo y dedicación, por sus conocimientos, orientación y su manera de trabajar ya que gracias a su persistencia, paciencia y motivación han sido base para alcanzar esta meta.

Finalmente quisiera agradecer el apoyo brindado por parte del proyecto “Soil Organic Carbon Evaluation and Secuestration in Ecuadorian Paramo Ecosystem”

A todos mil Gracias

ROOSEVELT REAL OROZCO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar hasta este momento importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser la persona que siempre ha estado apoyándome incondicionalmente en cada escalón de mi vida estudiantil. A mi padre, a pesar de que no está físicamente a mi lado siempre me apoyará y guiará desde el cielo. A mi hermana, mi cuñado y mis dos sobrinos quienes me han brindado su apoyo incondicional para poder llegar a cumplir mi meta.

Andrea Barroso Caicedo

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mi abuelita pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida académica, sembró en mí las bases de responsabilidad, deseos de superación y creyó en mi capacidad, en ella tengo el espejo en el cual me quiero reflejar por sus grandes virtudes y buen corazón.

Te brido mi más sincera gratitud, amada abuelita.

Roosevelt Real Orozco

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CC: contenido de carbono

CE: carbono edáfico

COS: carbono orgánico del suelo

COT: carbono orgánico total

CUT: clase de uso de la tierra

DAP: densidad aparente

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

MDL: mecanismo de desarrollo limpio

Mg/ha: Megagramos sobre hectárea

MO: materia orgánica

SIG: Sistemas de Información geográfica

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL	i
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORIA	ii
AUTORIA DE LA INVESTIGACION.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	vi
GLOSARIO DE TÉRMINOS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	5
1. General	5
2. Específicos	5
ESTADO DEL ARTE	5
1. Sistema de información geográfica.....	5
1.1. ¿Qué es KRIGING?	5
1.2. La fórmula de KRIGING	6
1.3. Métodos KRIGING.....	7
1.4. Gráficos de semivariograma	7
2. Ciclo global del carbono	8
2.1. Fuentes de almacenamiento de carbono	8
2.2. Compartimento o depósitos de carbono grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC)	9
2.3. El cambio climático	9
2.4. Captura de carbono ante el cambio climático	10
2.5. Impacto del suelo en el cambio climático.....	11
2.6. Impacto del cambio climático en la biodiversidad	11
2.7. Carbono en el suelo.....	12
3. Ecosistema páramo.....	13
METODOLOGÍA	14
1. Descripción del lugar	14
2. Análisis experimental y de gabinete	16
2.1. Muestreo de campo	16
2.2. Análisis de laboratorio	17
2.3. Análisis geoestadístico	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20

1. Implementación de la base de datos para carbono edáfico en la parroquia Achupallas.....	20
2. Determinación mediante un análisis estadístico y geoestadístico la variabilidad espacial del contenido de carbono edáfico en los sistemas ecológicos del área de estudio	21
2.1. Densidad aparente	21
2.2. Materia orgánica	22
2.3. Humedad en el suelo.....	23
2.4. Contenido de carbono edáfico total	24
2.5. Análisis geoestadístico.....	26
3. Aplicación del modelo de interpolación de distribución espacial KRIGING de los datos establecidos.....	28
3.1. Validación del modelo matemático.	30
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
Conclusiones	33
Recomendaciones.....	34
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	38
Anexo 01. Determinación de carbono en el suelo.....	38
Anexo 02. Modelo matemático KRIGING	41
Anexo 03. Valoración del índice kappa	42
Anexo 04. Registro fotográfico.....	42
Anexo 05. Coordenadas de conglomerados	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Depósitos de carbono en los sistemas ecológicos	9
Tabla 02. Estadística básica del contenido de carbono (Mg/ha) según el uso de suelo .	20
Tabla 03. Promedio de Densidad aparente a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo	22
Tabla 04. Porcentaje de materia orgánica a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo	22
Tabla 05. Porcentaje de humedad a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo.....	23
Tabla 06. Análisis Geoestadístico	27
Tabla 07. Error de predicción	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	15
Figura 02. Modelo KRIGING	19
Figura 03. Contenido de carbono edáfico páramo.....	24
Figura 04. Contenido de carbono edáfico en pastos	25
Figura 05. Contenido de carbono edáfico en cultivos	26
Figura 06. Contenido de carbono edáfico en los diferentes usos de suelo	27
Figura 07. Modelo matemático KRIGING.....	28
Figura 08. Validación del modelo con transposición de imagen satelital	30
Figura 09. Error de predicción.....	32

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo determinar la relación del stock de carbono de los sistemas ecológicos, en la parroquia Achupallas mediante la aplicación del modelo de interpolación KRIGING. La zona de estudio posee 1016 Km², los rangos altitudinales varían desde 2000-4000 msnm; posee una temperatura promedio de 8,9 °C y la precipitación es de (1406,55mm)

El trabajo fue desarrollado en dos fases: experimental y de gabinete. La primera fase consistió en un muestreo en campo de 12 conglomerados distribuidos en distintos estratos: 5 en páramos, 5 en cultivos y 2 en pastos, a diferentes profundidades (0-10;10-20;20-30) cm, las muestras fueron analizadas en el laboratorio; donde se analizaron cuatro parámetros: densidad aparente, humedad, contenido de materia orgánica y contenido de carbono (lost ignition). En la segunda fase se evaluaron los valores del contenido de carbono, generando una base de datos georreferenciada, para la implementación del modelo de interpolación KRIGING.

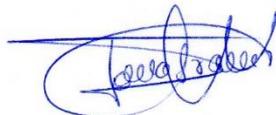
El contenido de carbono en los estratos fue: 224,33 Mg/ha en paramos; 158,16 Mg/ha en cultivos y 166,25 Mg/ha en pasto; con una desviación estándar promedio de 13,16; con un rango de variación entre estratos de 191,25 Mg/ha. Para la implementación del modelo de interpolación se determinó el error de predicción de 5,97% y un nivel de confiabilidad de 94.03%; considerado como (valor alto de confianza), según el índice Kappa; con esta datos se generó información cartográfica, donde se observa el contenido de carbono edáfico, esta información puede ser utilizada para implementar proyectos de compensación y cuantificación de servicios ecosistémicos.

Palabras clave: KRIGING, stock de carbono, sistemas ecológicos, geoestadística.

ABSTRACT

The main objective of this research is to determine the relationship of the carbon stock relates into the ecological systems in Achupallas parish, by applying Kriging interpolation model. The study area has 1016 km² and it is located at an altitude range between 2000 to 4000 m above sea level, the average temperature is 8.9°C, and precipitation is about 1406.55 mm. The present research work was developed in two phases: experimental and cabinet. The first phase consisted of a field sampling of 12 conglomerates distributed in different strata: 5 in páramos, 5 in crops and 2 in grasses, at different depths (0-10, 10-20, 20-30) cm. The samples were analyzed in the laboratory such as: density, humidity content of organic matter and carbon content. In the second phase, the carbon content values were evaluated, generating a georeferenced database for the implementation of the Kriging interpolation model. The results of every stratum's test showed a carbon content of 224.33 Mg / ha in moorlands; 158.16 Mg / ha in crops and 166.25 Mg / ha in pasture; with an average standard deviation of 13.16 and a variation range between strata of 191.25 Mg / ha. The predictions error for the implementation of the interpolation model was 5.9% and a level of reliability of 94.03% according to the Kappa index. With this data, cartographic information was generated, where carbon content is observed. As a result, this information can be used to implement compensation and quantification projects of ecosystem services.

Keywords: Kriging, carbon stock, ecological systems, geo-statistics.



Reviewed by: Granizo, Sonia

Language Center Teacher



INTRODUCCIÓN

El modelo matemático de interpolación KRIGING presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie, ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. (Esri, 2013); el modelo nos proporciona una valoración fiable de los datos, teniendo así una certeza en las predicciones y una interpretación aproximada a la realidad.

El uso de técnicas geoestadísticas se vuelve útil a la hora de predecir atributos en zonas no muestreadas y puede complementar las técnicas de generación de mapas convencionales, que por lo general están basadas en la experiencia empírica del especialista. Técnicas de estadística espacial como KRIGING y sus derivados, inicialmente desarrollado en el área de la minería, han sido ampliamente usadas, mejorando considerablemente las predicciones de atributos como el CO del suelo, material particulado en el aire y caudal en agua (Padarian Campusano, 2011). Los modelos matemáticos de interpolación geográfica con herramientas informáticas repercuten en la optimización de tiempo y recursos.

En Chile se realizó un estudio sobre “modelación geoestadística del contenido de carbono orgánico del suelo entre las regiones de Valparaíso y de los Ríos” de (Padarian Campusano, 2011), concluyendo que es posible ajustar modelos de predicción espacial del contenido de carbono orgánico (CO) en el áreas predeterminadas, presentando buenos resultados en la caracterización de los procesos involucrados.

En Ecuador existe un trabajo investigativo basado en técnicas geoestadísticas con el objetivo de “Elaborar un inventario forestal multipropósito con énfasis en el contenido de carbono de las diferentes clases de uso de tierra en la parroquia Achupallas” (Rodriguez & Cargua, 2012), el cual nos puede dar información para aplicar esos datos en nuevas investigaciones.

El suelo es uno de los grandes reservorios de carbono del planeta. El cambio que se genera al pasar de ecosistemas naturales a agroecosistemas genera pérdidas importantes del CO acumulado, por lo que es necesario disponer de métodos adecuados que permitan evaluar su estado.

Una medida de mitigación es el almacenamiento como sumidero de carbono edáfico; esto ayuda a la conservación de los ecosistemas de los diferentes sitios del mundo, el cual constituye en gran parte a la fracción de carbono total con un promedio de 238,13 Mg/ha, perteneciente a los ecosistemas de páramo andino según (Rodríguez & Cargua, 2012).

Este trabajo de investigación es un estudio complementario al proyecto denominado “Elaboración de un inventario forestal multipropósito con énfasis en el contenido de carbono de las diferentes clases de uso de tierra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo”(Rodríguez & Cargua, 2012), en el cual se obtuvo el primer muestreo puntual de carbono edáfico en algunos puntos: 5 conglomerados en bosques, 6 en páramos, 2 en pastos y 2 en plantaciones forestales. Sin embargo, el precedente estudio necesitaba ser complementado y validado con un incremento en el número de muestras para abarcar una mayor área de muestreo y mejorar el modelo de interpolación.

En este contexto, la presente tesis de investigación tiene por objetivo determinar la relación del stock de carbono con los sistemas ecológicos, en la parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo mediante la aplicación del modelo matemático KRIGING.

Este trabajo fue desarrollado en dos fases que son: experimental y de gabinete. La fase experimental consistió en un muestreo en campo de 12 conglomerados distribuidos: 5 en páramos, 5 en cultivos y 2 en pastos, en profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, cuyas muestras fueron analizadas en laboratorio en parámetros tales como: densidad aparente, humedad, contenido de materia orgánica y contenido de carbono. Una vez obtenidos los análisis de laboratorio, la segunda fase fue puesta en marcha, donde se calculó el contenido de carbono haciendo referencia a puntos específicos (coordenadas) a través de una base de datos.

Finalmente, se generó un mapa a través de un sistema que usa geoestadística, utilizando el método KRIGING donde se observa el contenido de carbono según los diferentes usos de suelo, los resultados son presentados dentro de esta investigación.

OBJETIVOS

1. General

Determinar la relación del stock de carbono con los sistemas ecológicos, en la parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo mediante la aplicación del modelo matemático KRIGING.

2. Específicos

Implementar una base de datos de carbono edáfico utilizando Sistemas de Información Geográfica ArcGis 10.2.

Determinar mediante un análisis estadístico y geoestadístico la variabilidad espacial del contenido de carbono edáfico en los sistemas ecológicos del área de estudio.

Aplicar y validar el modelo de interpolación de distribución espacial KRIGING de los datos establecidos.

ESTADO DEL ARTE

1. Sistema de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas. El objetivo de SIG consiste en crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente (Esri, 2013).

Los mapas representan colecciones lógicas de información geográfica como capas de mapa. Constituyen una metáfora eficaz para modelar y organizar la información geográfica en forma de capas temáticas. Asimismo, los mapas SIG interactivos ofrecen la interfaz de usuario principal con la que se utiliza la información geográfica (Esri, 2013).

1.1.¿Qué es KRIGING?

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda

familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como KRIGING, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (Esri, 2013).

KRIGING presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta KRIGING ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. KRIGING es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología (Esri, 2013).

1.2. La fórmula de KRIGING

El método kriging es similar al de IDW en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medidos

En IDW, la ponderación, λ_i , depende exclusivamente de la distancia a la ubicación de la predicción. Sin embargo, con el método kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición

espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por lo tanto, en un KRIGING ordinario, la ponderación, λ_i , depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción. En las siguientes secciones se describe cómo se utiliza la fórmula general de kriging para crear un mapa de la superficie de predicción y un mapa de la precisión de las predicciones (Esri, 2013).

1.3. Métodos KRIGING

Existen dos métodos KRIGING:

- Ordinario
- Universal.

El KRIGING **ordinario** es el más general y más utilizado de los métodos KRIGING y es el predeterminado. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable a menos que haya una razón científica para rechazarla (Esri, 2013).

El KRIGING **universal** presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, por ejemplo, un viento prevaeciente, y puede modelarse a través de la función determinística polinómica. Esta función polinómica se resta de los puntos medidos originalmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios. Una vez que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de realizar una predicción, se vuelve a sumar la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. El KRIGING universal solo se debe utilizar si se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla (Esri, 2013).

1.4. Gráficos de semivariograma

KRIGING es un procedimiento complejo que requiere de un mayor conocimiento sobre las estadísticas espaciales que lo que se puede abarcar en este tema. Antes de utilizar este método, debe comprender profundamente sus principios básicos y evaluar la adecuación de sus datos para realizar un modelo con esta técnica (Esri, 2013).

KRIGING se basa en una teoría de variables regionalizadas que presupone que la variación espacial en el fenómeno representado por los valores z es estadísticamente homogénea a lo largo de toda la superficie (por ej., se puede observar el mismo patrón de

variación en todas las ubicaciones sobre la superficie). Esta hipótesis de homogeneidad espacial es fundamental para la teoría de variables regionalizadas (Esri, 2013).

2. Ciclo global del carbono

Los ecosistemas forestales son un reservorio considerable de carbono y contienen más del 80% del carbono global de la superficie, sin embargo, cuando los bosques están maduros no ocurre asimilación neta de carbono, debido a que se encuentran saturados (Zárate, 2008).

El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biosfera terrestre incluyendo los sistemas de aguas frescas, los océanos y los sedimentos, estos depósitos son fuentes que pueden liberar el carbono, o sumideros que son los que absorben carbono de otra parte del ciclo; los mecanismos principales del intercambio del carbono son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Alvarez, 2008).

2.1. Fuentes de almacenamiento de carbono

El Protocolo de Kioto se estableció la necesidad de determinar la cantidad de carbono almacenado en los “sumideros de GEI (gases de efecto invernadero)”, a fin de comprender lo que pasará en el futuro si seguimos agotándolos sistemas vegetales. Considerando que estos sistemas tienen la capacidad de capturar carbono atmosférico y convertirlo en moléculas orgánicas mediante la fotosíntesis, así como participar activamente en el ciclo global del carbono, es posible implementar a través de ellos mecanismos de desarrollo limpio (MDL). Sin embargo, la aceptación de los sumideros para el MDL es motivo de debate político y parecen tener una muy débil relación con el objetivo ambiental de combatir el cambio climático (Cano & Villanueva, 2013).

La fijación de carbono es un servicio ecosistémico que cumple funciones importantes para el bienestar humano, se basa en el proceso de transformación del carbono atmosférico a carbono orgánico almacenado en el suelo y en los sistemas vegetales (hojas, tallos y raíces). Particularmente, los pastos naturales alto andinos cubren grandes extensiones de terreno y no han merecido tanta atención investigativa como los elementos de bosque. Sin embargo, las pasturas son un gran potencial no explotado para atenuar el cambio climático, mediante la acumulación de CO₂, que sí es bien manejado podrían ser más importante que los bosques en la generación de “créditos de carbono”. Además, la

venta de este servicio de secuestro de carbono podría generar beneficios económicos a los agricultores (Cano & Villanueva, 2013).

La principal cantidad de carbono en nuestro planeta esta almacenada en el suelo y los océanos y una cantidad escasa están en la atmósfera en las plantas y la biomasa. La mayor cantidad presente en la tierra se encuentra en los combustibles fósiles, el océano es un gran regulador del dióxido de carbono atmosférico (Cano & Villanueva, 2013).

2.2. Compartimento o depósitos de carbono grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC)

Los principales depósitos de carbono son cinco; biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y en el suelo.

Tabla 01. Depósitos de carbono en los sistemas ecológicos

Compartimento/depósito		Descripción
Biomasa	Biomasa aérea	Toda la biomasa de la vegetación viva que se halla por encima del suelo, incluye tallos, cepas, ramas, corteza, follaje y semillas.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa de las raíces vivas. Excluyendo las raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque es difícil de distinguir de la materia orgánica del suelo.
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Incluye toda la biomasa leñosa no viva, ya sea en pie, tendida en el suelo o enterrada.
	Hojarasca	Incluye toda la biomasa no viva con un tamaño menor que el diámetro mínimo establecido para la madera muerta (< 10 cm).
Suelo		Carbono del horizonte orgánico del suelo

Fuente: (Rodríguez & Cargua, 2012)

2.3. El cambio climático

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta. El cambio climático es inducido principalmente por gases de efecto invernadero

como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO₂), los cuales provocan el incremento de su concentración en la atmósfera. En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, éstos se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles. Se estima que el cambio de uso de la tierra emite $1,6 \pm 1,0$ Gt ($1 \text{ Gt} = 1 \times 10^9 \text{ t}$) de carbono al año y que la combustión de fósiles emite $5,5 \pm 0,5$ Gt de carbono al año (Ibrahim et al., 2007).

2.4. Captura de carbono ante el cambio climático

Los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y en la biomasa arriba del suelo. Se ha estimado que el carbono (C) en la biomasa de los bosques primarios y secundarios varía entre 60 y 230 y entre 25 y 190 t ha⁻¹, respectivamente, y que el C en el suelo puede variar entre 60 y 115 t ha⁻¹ (Ibrahim et al., 2007).

Los suelos pueden ser fuente y sumidero de carbono (C). Por lo tanto, los suelos contribuyen a la regulación del ciclo del carbono y sus consecuencias en el cambio climático. El cambio de usos del suelo es la fuerza motriz que determina el papel fuente o sumidero de C del suelo. La roturación de tierras ha supuesto una pérdida de carbono orgánico (CO) y el aumento inmediato de las emisiones de carbono, mientras que la reforestación de tierras cultivadas comporta un aumento en el secuestro de carbono. Sin embargo, el secuestro de C por forestación u otros cambios a usos no agrícolas, sólo recupera muy lentamente el CO perdido por el cultivo y las diferencias de escala temporal entre pérdidas antrópicas y recuperación son generalmente de varios órdenes de magnitud. Por otra parte, las propiedades de los suelos son sensibles al cambio climático (Vallejo, Fierros, & Rosa, 2007).

Gran parte de los impactos del cambio climático en los suelos están mediatizados por el carbono orgánico edáfico. En suelos minerales, la relación aproximada entre materia orgánica y carbono orgánico del suelo es $1,724 \times \% \text{ CO} = \% \text{ materia orgánica}$. El aumento de temperatura incidiría en una mayor tasa de descomposición del carbono orgánico. El aumento de la sequía tendría un efecto contrario. El posible aumento de la productividad vegetal debido al efecto fertilizador de un aumento del CO₂ atmosférico comportaría aumento de los aportes de carbono orgánico al suelo, especialmente en cultivos intensivos. En ecosistemas naturales en los que la productividad está limitada por la escasez de Nitrógeno (N), la fertilización por contaminación atmosférica de N puede también comportar un aumento de los aportes de carbono orgánico al suelo. Por el

contrario, la disminución de la productividad por intensificación del estrés hídrico conllevaría pérdidas de carbono orgánico edáfico (Vallejo et al., 2007).

2.5. Impacto del suelo en el cambio climático

Además de los impactos del cambio climático sobre las propiedades del suelo y su funcionamiento, resulta también del mayor interés conocer la influencia del suelo sobre dicho cambio. La cantidad global de carbono orgánico en el suelo tiene una influencia directa en los niveles de CO₂ atmosférico. Ligeros cambios en el carbono orgánico ya sean positivos o negativos, pueden tener un efecto apreciable sobre el CO₂ atmosférico. Por otra parte, en suelos encharcados de forma permanente o temporal, las emisiones de CH₄ (metano) y N₂O (óxido nitroso) también contribuyen al efecto invernadero (Vallejo et al., 2007).

El secuestro del carbono orgánico por los ecosistemas terrestres forma parte de un ciclo biológico muy activo, por lo que una parte importante del carbono actualmente retenido por los suelos puede volver a la atmósfera en un tiempo relativamente corto. De esta forma, el secuestro del carbono por los ecosistemas terrestres se debe considerar como un almacenamiento temporal más bien que permanente. En este sentido, se estima que los suelos dedicados al cultivo han perdido entre un 20-40% de su carbono orgánico respecto al que tenían con vegetación natural y se considera que mediante la utilización de prácticas de laboreo de conservación es posible el recuperar en parte los niveles de carbono orgánico del suelo originarios (Vallejo et al., 2007).

Dentro de los ecosistemas terrestres, el almacenamiento actual de carbono es mucho mayor en los suelos que en la vegetación, particularmente en los ecosistemas no forestados de latitudes medias y altas. Además, el retorno del carbono almacenado a la atmósfera es más lento en el suelo que en la vegetación. También, el carbono retenido en el suelo se encuentra bastante mejor protegido contra los incendios y otras perturbaciones (Vallejo et al., 2007).

2.6. Impacto del cambio climático en la biodiversidad

Aunque en la actualidad existen numerosos estudios científicos que han tratado de ofrecer aproximaciones para evaluar las respuestas potenciales de distintos grupos de organismos ante el calentamiento global, esta información apenas se ha traducido en propuestas concretas de gestión que permitan minimizar los impactos del cambio climático sobre las especies y los sistemas naturales. Este hecho deja patente que, a pesar

de que las estrategias para la conservación de la biodiversidad necesitan basarse en evidencias científicas, la desconexión entre científicos y gestores sigue siendo la norma (Arribas et al., 2012).

La vulnerabilidad de una especie ante el calentamiento global hace referencia a su capacidad para responder y adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, de manera que aquellas especies que tengan una capacidad de respuesta limitada serán las más vulnerables. En este sentido, la vulnerabilidad de una especie ante el cambio climático dependerá fundamentalmente de dos factores: a) su capacidad para mantener poblaciones en su área de distribución actual a pesar del cambio en las condiciones ambientales (persistencia), y b) el potencial para colonizar zonas actualmente deshabitadas pero que serán climáticamente favorables en el futuro (Arribas et al., 2012).

Los bosques son los principales reservorios de carbono en el planeta además de ser uno de los principales reguladores del clima mundial influyen en factores como la temperatura del suelo, la evapotranspiración, la formación de nubes y precipitaciones (Arribas et al., 2012).

2.7. Carbono en el suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos. El COS se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, al aportar elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente deficitario. Además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el COS aumenta la solubilidad de varios nutrientes. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico. Su efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo. La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo. Existen prácticas de manejo que generan un detrimento del COS en el tiempo, a la vez hay prácticas que favorecen su acumulación (Martínez, Fuentes, & Acevedo, 2008).

El suelo representa un reservorio muy importante del carbono (C) a escala global, en función de la importancia que tiene este elemento en la evaluación de los cambios del C atmosférico. El contenido de carbono orgánico (CO) en el suelo llega a superar en dos o tres veces los depósitos de C de la biomasa aérea, mientras que las reservas de C total en

el suelo representan 75 % del C almacenado en los ecosistemas terrestres (Mogollón et al., 2015).

La influencia del relieve es un factor determinante en la variación de los niveles del CO del suelo, tanto en cantidad como en calidad, porque en muchos casos, con la altitud se manifiestan cambios en las características del mismo (pH, humedad, contenido de macro y micro elementos, textura), en la precipitación, la temperatura y el tipo de vegetación, lo cual influye también en las reservas del CO (Mogollón et al., 2015).

El contenido en carbono orgánico varía de unos suelos a otros, dependiendo fundamentalmente del clima y de la cubierta vegetal o uso actual. A nivel mundial, ese contenido oscila entre menos de 0,0002 Mg/ha para los suelos de las zonas sub-desérticas y más de 0,003 Mg/ha en las zonas de tundra y bosque húmedo (Simón Cid, 2010).

El carbono orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al carbono elemental. En condiciones naturales, el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO₂ a la atmósfera, erosión y lixiviación (Martínez et al., 2008).

Cuando los suelos tienen condiciones aeróbicas, una parte importante del carbono que ingresa al suelo es lábil y se mineraliza rápidamente y una pequeña fracción se acumula como humus estable. El CO₂ emitido desde el suelo a la atmósfera no solo se produce por la mineralización de la materia orgánica del suelo donde participa la fauna edáfica (organismos detritívoros) y los microorganismos del suelo, sino también se genera por el metabolismo de las raíces de las plantas (Martínez et al., 2008).

3. Ecosistema páramo

El páramo es un ecosistema de altura inmerso en un espacio geo social 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, 2013).

El páramo en el país se ubica entre las cotas de los 3.200 y los 4.700 msnm (límite inferior del piso glaciar o gélido). La mayoría de los páramos ecuatorianos son húmedos. Sobre ellos caen entre 500 y 2.000 mm de precipitación anual (lo cual genera impactos sobre el crecimiento de la vegetación natural y pasturas). Por lo general la cordillera Central recibe más lluvias que la Occidental (Camacho, 2013).

En conjunto constituyen “verdaderas esponjas de agua, gracias a la gran capacidad de retención de agua de sus suelos, que supera el 200% de su propio peso seco”. Sólo unas pequeñas áreas secas y ecológicamente similares a la puna, (250 a 500 mm de precipitación anual) se encuentran en el Ecuador: el arenal del Chimborazo, las alturas del Illiniza, y la meseta de Palmira. Por su alta humedad, los páramos del Ecuador son más similares a los de Colombia, Venezuela y Costa Rica, que a las punas de los Andes Centrales y del Sur (Camacho, 2013).

METODOLOGÍA

1. Descripción del lugar

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la parroquia Achupallas (Figura 1c) y comprende una extensión de 1012 Km², con una población de 10.529 habitantes (Censo 2010) y fue creado el 22 de abril de 1987, sus límites son: Norte; Parroquia Cebadas y la Matriz del cantón Guamote, Sur; Con la Parroquia Rivera del Cantón Azogues de la provincia del Cañar y Parroquia Amaluza del Cantón Sevilla, provincia del Azuay, Este; parroquias Zuñac y Rio Blanco del Cantón Morona, parroquia Asunción del Cantón Sucua y parroquia Santiago de Méndez, del Cantón Santiago provincia de Morona Santiago Provincia , Oeste; Parroquias Tixan, Guasuntos, Pumallacta, Sevilla del Cantón Alausi, parroquia La Matriz del Cantón Chunchi, provincia de Chimborazo y parroquia Ingapirca del Cantón Cañar, provincia del Cañar y Matriz de Chunchi, su rango altitudinal promedio es de; 3.600 m. s. n. m, tiene un clima que oscila entre 9°C en los páramos y 16°C en las zonas bajas (Barreno, 2015).

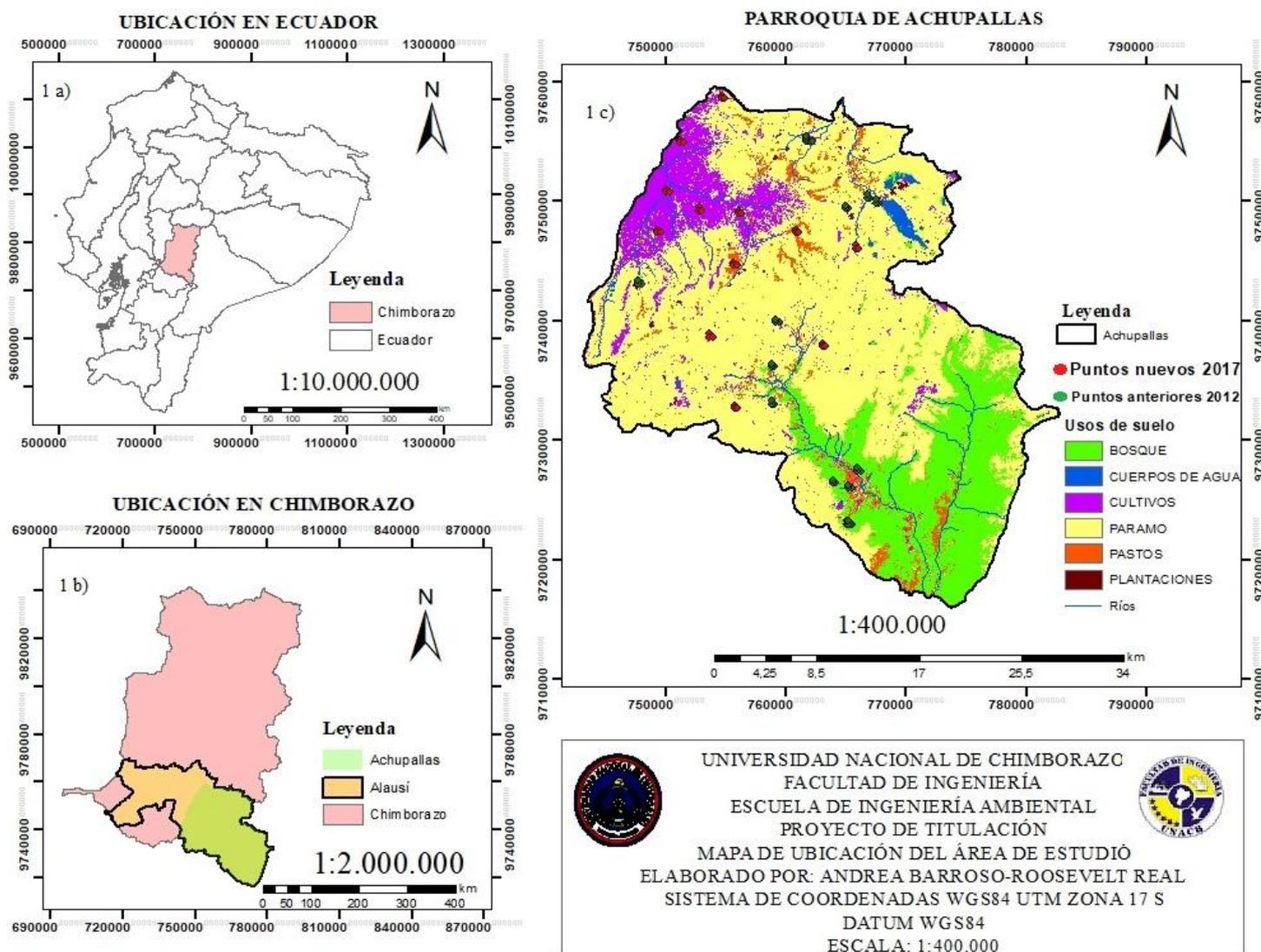


Figura 01. Mapa de ubicación de la zona de estudio

Fuente: Autores

En la figura 1c) se puede evidenciar que en la parroquia Achupallas están distribuidos los puntos de muestreo de la siguiente manera: los puntos de color rojo corresponden a los puntos analizados en el presente estudio; mientras que los puntos de color verde pertenecen a los estudiados por (Rodríguez & Cargua, 2012).

Geología

La parroquia Achupallas está ubicado en la parte central del Ecuador, asentado completamente sobre parte del Cinturón Montañoso de los Andes, al Sur del valle Interandino y al Norte de una zona intermontaña dominada por valles y colinas con

pendientes moderadas, sobre una zona de transición dominada por valles con profunda incisión y lomas de fuertes pendientes, donde es difícil distinguir los dos ramales montañosos denominados en el Ecuador, Cordilleras Real y Occidental, regiones fisiográficas que sobrepasan los 4.000 msnm constituyéndose en dos ramales bien definidos, atravesados por ríos que drenan hacia las cuencas y micro cuencas que desembocan en las costas de los océanos Pacífico y Atlántico (Barreno, 2015).

Hidrología

Los ríos en esta hoya son: el Alausí que principia en los páramos de Atapo, tomando más adelante el nombre de Chanchan; el Zula que tiene origen en los páramos del mismo nombre y desciende a incorporarse con el Chanchán cerca de Sibambe, el Zula toma el nombre de Achupallas y Guasuntos, mientras pasa por el territorio de estas parroquias, ríos Ozogoche que inicia en los páramos de la parroquia que corre hacia el río Chambo/Pastaza, El río Juval que corre hasta el río Paute. El Complejo Lacustre de Ozogoche está formado por treinta lagunas siendo las más grandes Magtayán con una superficie de 2.19 Km², Ozogoche o Cubillina, con 5.25 Km², Ayapugo, Verdecocha, Atillo, Paila Cocha, Mangan Cocha, Pichaguña, Yanacocha, Juna cocha entre los principales, lagunas de Ozogoche sector lacustre más importante del centro del país. Sus aguas alimentan al río Pastaza, que desemboca en el Amazonas (Barreno, 2015).

2. Análisis experimental y de gabinete

2.1. Muestreo de campo

Para levantar información primaria se accedió a los datos del repositorio del proyecto “Caracterización bio-geográfica de las subcuencas hídricas para la adaptación al cambio climático considerando el paisaje cultural andino en la parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo” datos recolectados en el año 2012. Se utilizaron los valores de partida en el cual fueron establecidos 15 conglomerados y un total de 150 puntos de la tesis: “Elaboración de un inventario forestal multipropósito con énfasis en el contenido de carbono de las diferentes clases de uso de tierra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo” (Rodríguez & Cargua, 2012).

Una vez estratificados y analizados los sistemas ecológicos, se calculó el tamaño de la muestra para bajar el error del modelo de interpolación. Se analizó 12 diferentes estratos divididos en: 5 en cultivos; 5 en páramos y 2 en pastos con un total de 108 puntos nuevos, con respecto al estudio anterior de 150 puntos. Se tomaron muestras en campo

utilizando la misma metodología de (Rodríguez & Cargua, 2012). El muestreo consistió en la toma de 1 kg de suelo recogido en fundas plásticas herméticas a diferentes profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30 cm con la finalidad de estimar el contenido de carbono edáfico en la zona. La figura 1C describe la ubicación de puntos de muestro en el año 2012 (puntos verdes) y los levantados en el año 2017 (puntos rojos) para el presente estudio. El análisis en los puntos de muestro tienen como objetivo evidenciar los cambios en la reconversión de los suelos, en campo para lo cual se analizan diversas variables como: ubicación geográfica; altura y usos de suelo.

Las muestras recolectadas en campo y llevadas al laboratorio de servicios ambientales en fundas de plásticos con cierres herméticos fueron homogenizadas antes de su respectivo análisis. En los análisis de laboratorio se obtuvieron valores de: densidad aparente empleando el método del cilindro de volumen conocido (Cargua, Rodríguez, Damián, Recalde, & Santillán, 2017); humedad calculada por diferencia de pesos; porcentaje de materia orgánica y contenido de carbono edáfico en cada punto de muestreo.

2.2. Análisis de laboratorio

Para determinar los valores de; densidad aparente; humedad; porcentaje de materia orgánica y contenido de carbono edáfico se implementó la metodología utilizada por (Rodríguez & Cargua, 2012) “Lost Ignition”; se pesaron los vasos de precipitación y se puso las muestras recogidas en cilindros de pesos específicos en estos vasos, se pesó de nuevo los vasos con el suelo recogido en campo y se procedió a dejarlos en la estufa a 105 °C por 24 horas.

Luego se puso estos vasos en el desecador por 2 horas, se pesaron los crisoles y se puso en cada uno de ellos 5 g de la muestra de suelo, se colocaron estas muestras en la estufa por 2 horas a 450 °C y se colocaron luego los crisoles de nuevo en el desecador para ser pesados por última vez.

Fórmula N° 01. Densidad aparente

$$DA \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen del cilindro}}$$

Fórmula N° 02. Contenido de carbono edáfico

$$\text{Carbono en suelo} \left(\text{ton} \frac{\text{C}}{\text{ha}} \right) = DA * FC * P * A$$

Donde:

DA = Densidad aparente (g/cm^3)

FC = Contenido de carbono (%)

P = Profundidad de muestreo en cm

A = Área (cm^2) de la sección transversal de la muestra de suelo.

2.3. Análisis geoestadístico

Durante el estudio se realizó el análisis geoestadístico a través de la herramienta KRIGING desde el modelo ArcGis, el cual es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z, este modelo presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie; es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza .

Para la utilización de este método se sigue los siguientes pasos:

- Depuración de los datos (análisis estadístico)
- Análisis Geoestadístico

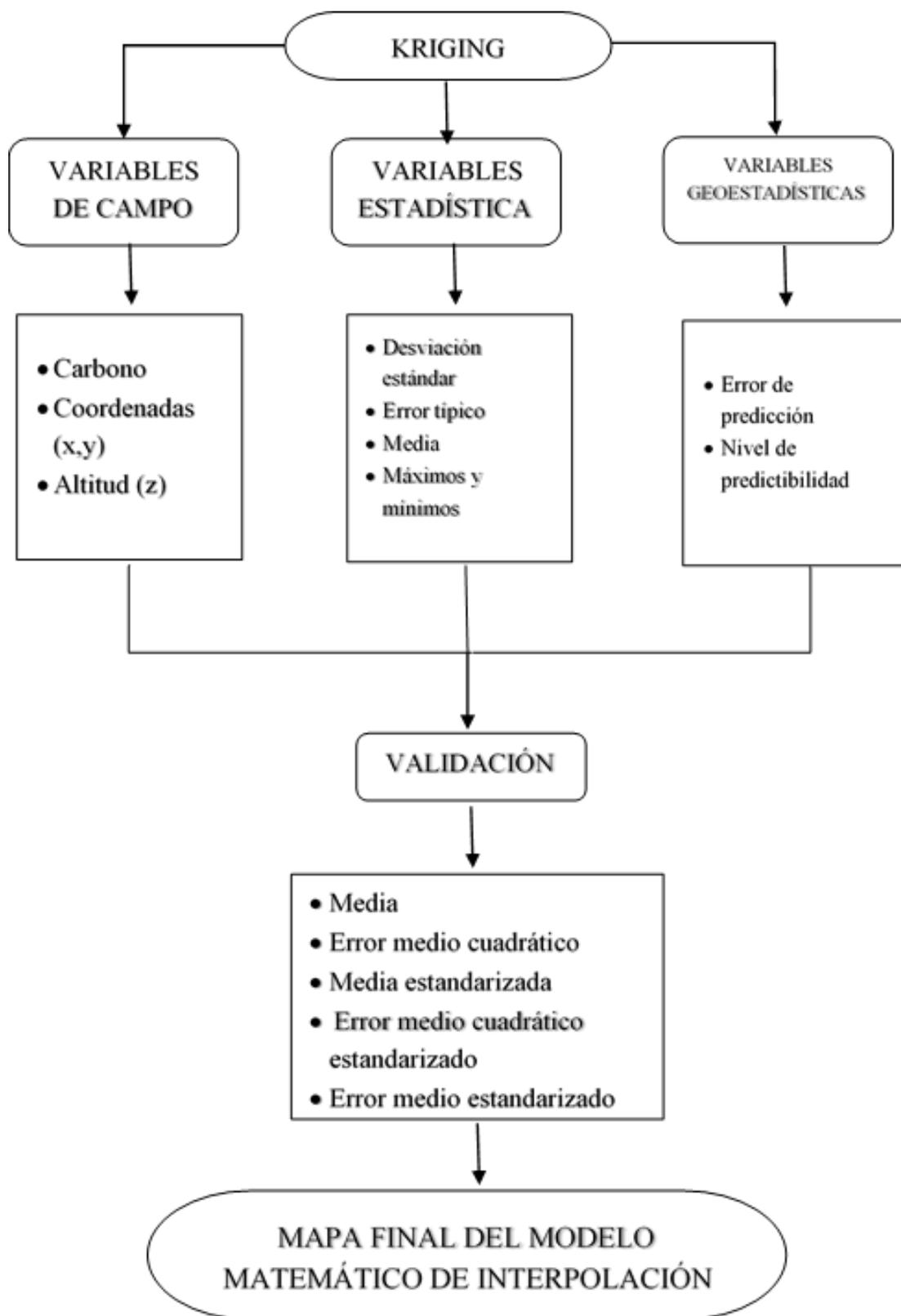


Figura 02. Modelo KRIGING

Fuente: Autores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Implementación de la base de datos para carbono edáfico en la parroquia Achupallas.

Para ajustar la variabilidad en el laboratorio se tomó en cuenta los 4 componentes ya establecidos en la fase anterior los cuales son; humedad (%), densidad aparente DAP, materia orgánica (%) y contenido de carbono en el suelo (Mg/ha); se establecieron 12 conglomerados distribuidos de la siguiente manera; 5 en páramo, 5 en cultivos y 2 en pastos, incrementando de esta manera la intensidad de monitoreo a 27 hectáreas; (Rodríguez & Cargua, 2012) establecieron 15 conglomerados; 5 en bosque; 2 en pastos; 6 en páramos y 2 en plantaciones forestales, logrando de esta manera incrementar la información para obtener datos precisos y con un alto nivel de confiabilidad, al momento de establecer un modelo de interpolación de datos. (Ver anexo1).

La tabla 02 muestra una estadística básica del contenido de carbono en la zona de estudio según los diferentes usos de suelo. Del análisis de los datos mostrados se evidencia que el promedio de contenido de carbono es mayor en la zona de plantaciones con 277,06 (mg/Ha), con una desviación estándar de 18,94 y menor en pastos con una desviación estándar de 23,29%.

Tabla 02. Estadística básica del contenido de carbono (Mg/ha) según el uso de suelo

DESCRIPCION	UNIDAD	BOSQUE	PARAMO	PASTOS	PLANTACIONES	CULTIVOS
RANGO ALTITUDINAL	msnm	2696 - 3299	3410 - 4067	2810 - 4234	3695 - 3790	2772 - 3797
PROMEDIO	Mg/ha	243,41	224,33	174,43	277,06	158,16
DESVIACION ESTÁNDAR		21,40	27,44	23,30	18,94	14,50
MÁXIMOS	Mg/ha	271,77	292,22	228,05	297,59	177,21
MÍNIMOS	Mg/ha	189,76	157,49	152,43	254,54	140,97

Fuente: Autores

En plantaciones existe mayor contenido de carbono edáfico debido a la presencia de turberas, que es la acumulación de materia orgánica mientras que en cultivos se evidencia una menor cantidad de carbono ocasionado por el efecto de las actividades humanas, se estima que se pierden de 20 a 80 Mg/ha de carbono, esto se explica por el uso agrícola y la deforestación ya que la materia orgánica se disminuye principalmente en la capa de suelo labrada debido a una caída de aportes de residuos, el incremento de la temperatura

y a la destrucción de macro y micro agregados (Cespedes, FE; Fernandez, JA; Gobbi, JA; Bernardis, 2012).

2. Determinación mediante un análisis estadístico y geoestadístico la variabilidad espacial del contenido de carbono edáfico en los sistemas ecológicos del área de estudio

La variabilidad de los datos en margen a los análisis deben ser filtrados para lograr niveles de confiabilidad; la importancia de analizar estadísticamente datos se origina en poder sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis, se aplicó la geoestadística como respuesta a necesidades prácticas concretas en la cual se interpolaron datos, esta es una de las herramientas que poseen los sistemas de información geográfica (SIG) para calcular estadísticas de las entidades y realizar actividades de geoprocetamiento. La interpolación espacial se basa en el proceso de utilizar puntos con valores conocidos y a partir de los mismos estimar valores desconocidos en otros puntos.

2.1. Densidad aparente

Se recolectaron 108 muestras a diferentes profundidades, para determinar la DAP, logrando obtener en el estrato de páramo, un valor máximo de $0,79 \text{ g/cm}^3$, un valor mínimo de $0,40 \text{ g/cm}^3$ y un valor promedio de $0,57 \text{ g/cm}^3$ para una profundidad de 0-10cm, $0,58 \text{ g/cm}^3$ en una profundidad de 10-20cm y finalmente $0,59 \text{ g/cm}^3$ para una profundidad de 20-30cm ; para el uso de suelo que corresponde a pastos tenemos un valor máximo de $0,76 \text{ g/cm}^3$, un valor mínimo de $0,56 \text{ g/cm}^3$ y un valor promedio de $0,59 \text{ g/cm}^3$ para una profundidad de 0-10 cm, $0,60 \text{ g/cm}^3$ en una profundidad de 20-30 cm y $0,67 \text{ g/cm}^3$ para una profundidad de 20-30 cm; mientras que para el estrato de cultivos se obtuvo un valor máximo de 1,17, un valor mínimo de 0,84 y un valor promedio de $1,01 \text{ g/cm}^3$ en una profundidad de 0-10 cm, a una profundidad de 10-20cm se tiene un valor promedio de $1,01 \text{ g/cm}^3$ y para 20-30 cm se tiene un valor de $1,03 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 03. Promedio de Densidad aparente a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo

CUT	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Páramo	0,57	0,58	0,58
Pastos	0,59	0,60	0,67
Cultivos	1,01	1,02	1,09

Fuente: Autores

Estos resultados concuerdan con (Eduardo Besoain M., 2008), quienes realizaron investigaciones en suelos andisoles, es decir en suelos de páramos y bosques andinos cuyas densidades aparentes varían entre 0,42 a 0,94 g/cm³. Estos valores podrían deberse a un elevado contenido orgánico y la presencia de componentes no-cristalinos en los suelos. Tales constituyentes son considerados responsables de bajos valores de densidad aparente en andisoles.

2.2. Materia orgánica

De las muestras recolectadas a diferentes profundidades, para determinar el porcentaje de materia orgánica, se obtuvo valores promedio para el estrato páramo de 23,63 de 0-10cm; 22,35 de 10-20cm y de 21,45 de 20-30cm. Para el estrato pastos los porcentajes de MO tienen valores de 16,33; 15,17 y 14,77% a profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30cm respectivamente, finalmente para el uso de suelo que corresponde a cultivos para profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30cm los porcentajes de MO poseen valores de 8,93; 9,17 y 8,64% respectivamente.

Tabla 04. Porcentaje de materia orgánica a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo

CUT	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Páramo	23,63	22,35	21,45
Pastos	16,33	15,17	14,77
Cultivos	8,93	9,17	8,64

Fuente: Autores

Estos valores son similares a estudios realizados por (Jaramillo, 2011), cuyos rangos de materia orgánica para suelos andisoles de páramos fluctúan entre 8,2 y 23,8%, esto se debe a que existe una regeneración natural del ecosistema y que las actividades antrópicas son escasas o nulas; mientras que en cultivo se evidencia una pérdida notable de materia orgánica debido al laboreo permanente de los suelos a largo plazo y se genera un proceso erosivo debido a los diferentes métodos de riego que existen (Rojas W. & Sierras B., 2015).

2.3. Humedad en el suelo

De las muestras analizadas, para determinar el porcentaje humedad en el suelo, se obtuvieron valores promedio para el sistema ecológico páramo de 49,92 de 0-10cm; 49,92 de 10-20 cm y de 49,99 de 20-30cm. Para el estrato pastos los porcentajes de humedad son de 41,86; 38,10 y 30,69% a profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30cm de profundidad correspondientemente, por último, para el estrato correspondiente a cultivos para profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30cm los porcentajes de humedad poseen valores de 18,62; 19,22 y 19,17% respectivamente.

Tabla 05. *Porcentaje de humedad a distintas profundidades en los diferentes usos de suelo*

CUT	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Páramo	49,92	49,92	49,99
Pastos	41,86	38,10	30,69
Cultivos	18,62	19,22	19,17

Fuente: Autores

Los porcentajes de humedad obtenidos concuerdan con la investigación realizada por (Paulina Sepúlveda R., 2008) quienes obtuvieron resultados de porcentajes de humedad que varían entre 13,2 a 69,9 %. Estos niveles de humedad varían con el cambio de temperatura del aire, además las plantas transpiran y agregan vapor de agua constantemente al ambiente, en páramos hay una alta retención de humedad debido a que se presentan bajas temperaturas y alta nubosidad; los vientos en páramos son fuertes y permanentes.

2.4. Contenido de carbono edáfico total

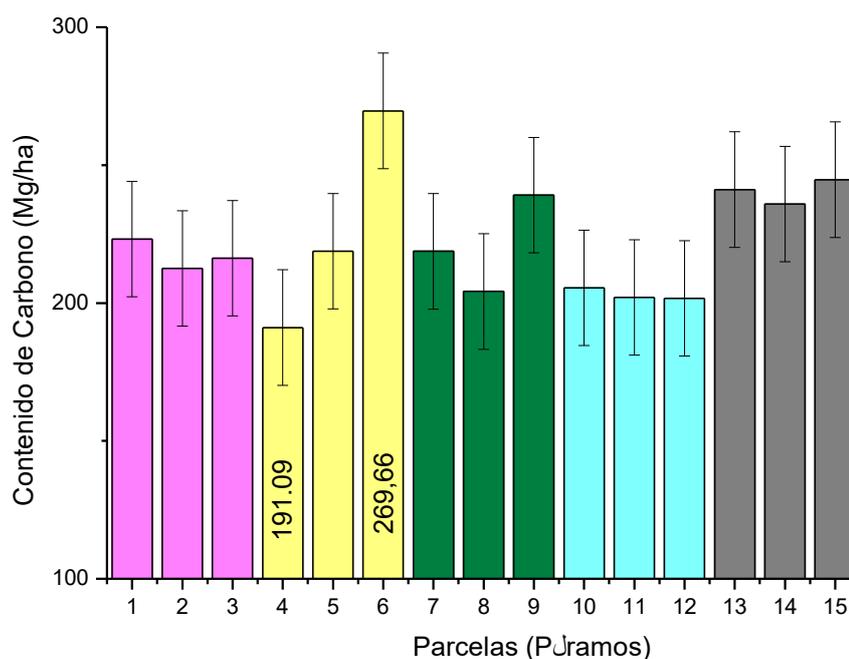


Figura 03. Contenido de carbono edáfico páramo

Fuente: Autores

En la figura 03, se distinguen los 5 conglomerados cada uno con 3 parcelas para el estudio del estrato páramo, el conglomerado 2 presenta los máximos y mínimos puesto que se encuentra en una zona de pendiente debido a esto se evidencia un mínimo de 191,09 Mg/ha en la parcela 1 esto se debe a su localización en la parte más alta dado que no existe una acumulación de materia orgánica y un máximo de 269,66 Mg/ha en la parcela 3 por su ubicación en la zona más baja de la pendiente debido a que se localiza una mayor presencia de materia orgánica, los valores de contenido de carbono nos indican una desviación estándar de 20,94 y un promedio de 224,33 Mg/ha, valor similar al encontrado en la tesis realizada por (Rodríguez & Cargua, 2012), con un promedio de 238,13 Mg/ha para el presente uso de suelo.

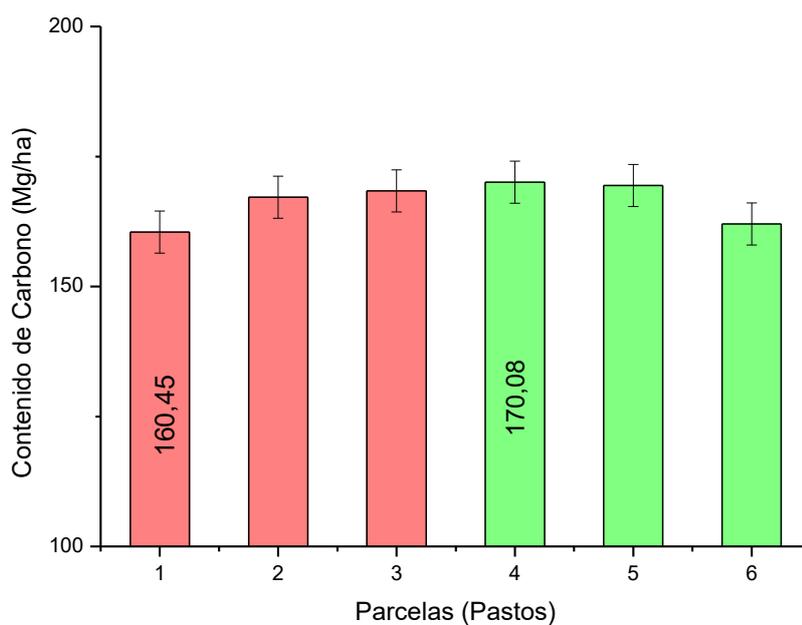


Figura 04. *Contenido de carbono edáfico en pastos*

Fuente: Autores

En la figura 04, se evidencian 2 conglomerados compuesto por 3 parcelas para el análisis del uso de suelo pasto, en el conglomerado 1, parcela 1 se localiza el mínimo de 160,45 Mg/ha, mientras que en el conglomerado 2, parcela 1 se encuentra el máximo de 170,08 Mg/ha, la variabilidad de carbono se debe a que en los pastos se va renovando según las necesidades de los propietarios. Con una desviación estándar de 4,04 y un promedio de 166,25 Mg/ha valor mayor al encontrado de 126 Mg/ha en la investigación realizada por (Miranda, Machado, Machado, & Duquesne, 2007), esto puede ser a la profundidad del primer horizonte de suelo ya que este contiene el mayor porcentaje de carbono.

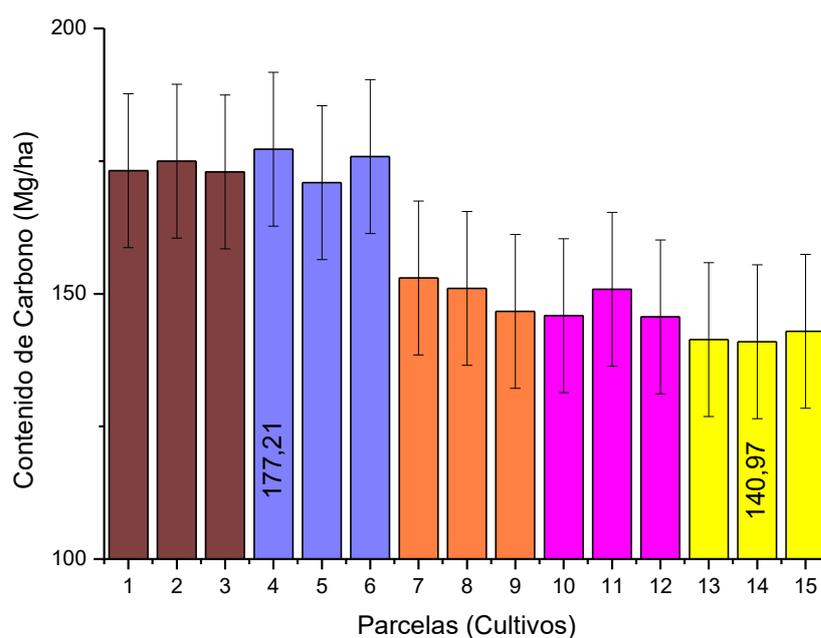


Figura 05. *Contenido de carbono edáfico en cultivos*

Fuente: Autores

En la figura 05, se distinguen 5 conglomerados cada uno con 3 parcelas para el estudio del uso de suelo en cultivos, el conglomerado 5, parcela 2 presenta el mínimo de 140,97 Mg/ha, puesto que es una zona que ha sido intervenida desde hace algunos años, mientras que el conglomerado 2, parcela 1 se encuentra el máximo de 177, 21 Mg/ha debido a que esta es una zona en la que recién existe una intervención antrópica y aún no existe una pérdida considerable de carbono. Con una desviación estándar de 14,50 y un promedio de carbono edáfico en cultivos es 158,16 Mg/ha valor que es mayor al de estudios realizados anteriormente por (Carvajal, Feijoo, Quintero, & Rondón, 2009), cuyo promedio es de 119,45 Mg/ha debido al tipo de cultivos y la capacidad de renovación del suelo.

2.5. Análisis geoestadístico

En la figura 06, se evidencia los 3 estratos para el presente proyecto de investigación los cuales son; páramos, pastos, cultivos. En cultivos tenemos un promedio de contenido edáfico de 158,16; páramos 224,33; pastos 166,65 Mg/ha evidenciándose que la mayor cantidad de datos se encuentran dentro del valor de la media.

PROMEDIO DE CONTENIDO DE CARBONO EN DIFERENTES USOS DE SUELO

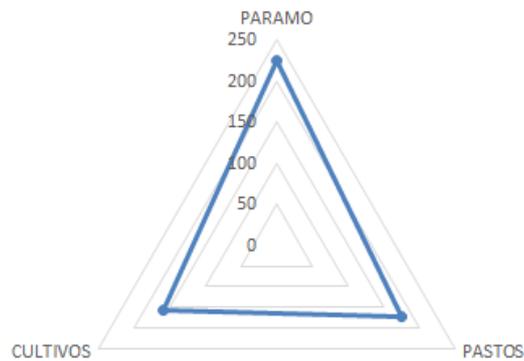


Figura 06. Contenido de carbono edáfico en los diferentes usos de suelo

Fuente: Autores

En la tabla 04, se puede observar que el dato obtenido en el campo de desviación estándar en páramos es de 27,43 y en el modelo de 27, 01 se puede evidenciar una variación de +- 0,42; en pastos los datos de campo dan como resultado 23,29 y en el modelo 22,30 con una diferencia de +- 0,99; mientras que de cultivos la diferencia de la desviación es de +- 2,49 con un dato de campo de 14,50 y del modelo de 16,99.

Tabla 06. Análisis Geoestadístico

SECTOR	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR TÍPICO	NIVEL DE CONFIANZA
PÁRAMO	27,43 <i>27,01</i>	4,77	95,22
PASTOS	23,29 <i>22,30</i>	6,72	93,27
CULTIVOS	14,50 <i>16,99</i>	3,74	96,25

Fuente: Autores

Con negrita se encuentran los datos recolectados en campo, con cursiva se encuentran los datos obtenidos con el modelo matemático KRIGING, lo que corrobora que los datos obtenidos en campo vs los simulados son muy cercanos entre sí.

3. Aplicación del modelo de interpolación de distribución espacial KRIGING de los datos establecidos

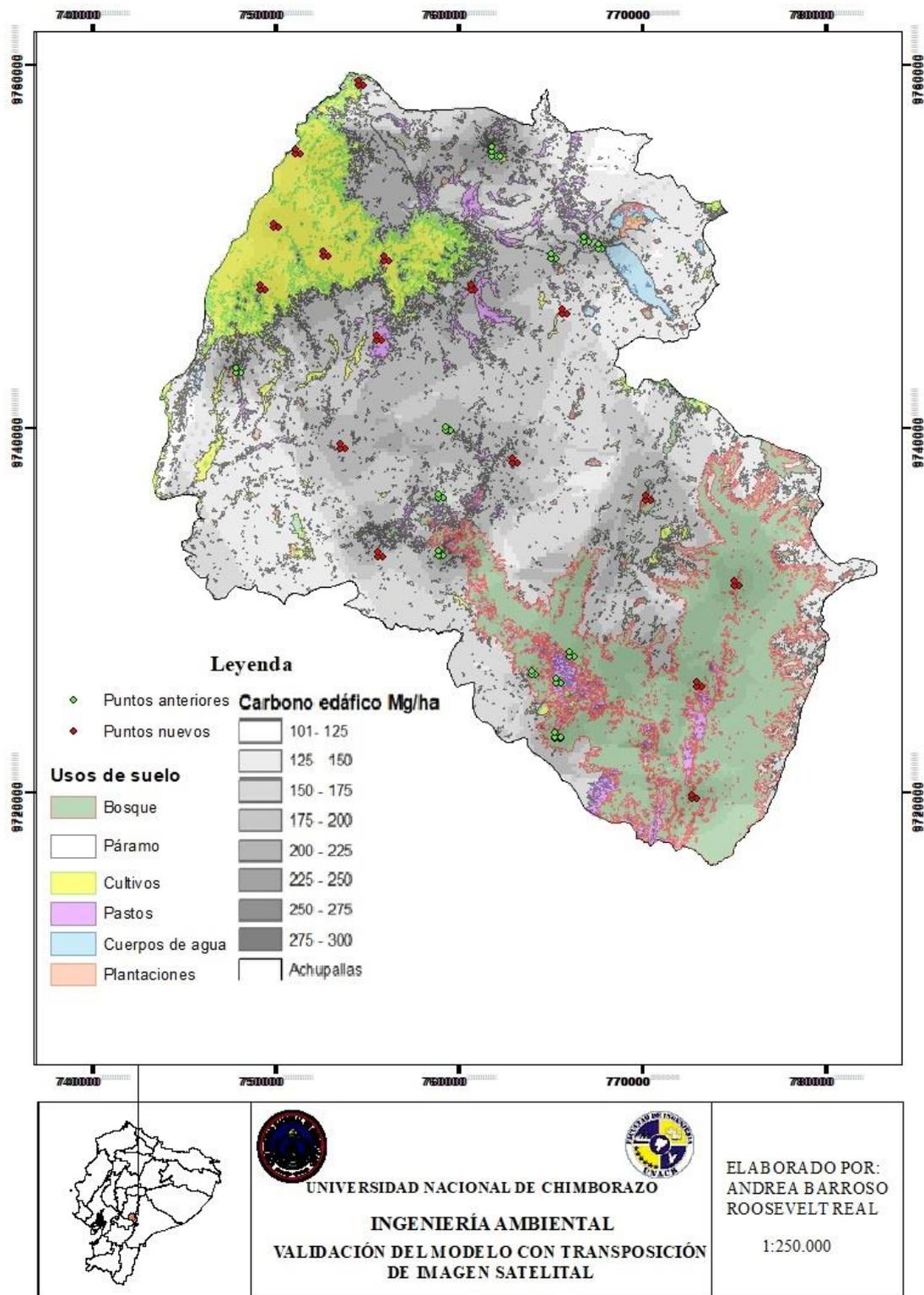


Figura 07. Modelo matemático KRIGING

Fuente: Autores

En la figura 07, se puede observar el modelo matemático KRIGING, (Rodriguez & Cargua, 2012), establecieron 15 conglomerados con un total de 150 muestras, los cuales se visualizan de color verde; mientras que para mejorar el modelo se establecieron 12 conglomerados con 108 muestras compuestas, visualizadas de color rojo; de esta manera se logró bajar el error, debido a la extensión del área de estudio; los puntos que se encuentran fuera del área de intervención son puntos de corrección con contenido de carbono edáfico con valores de 0 para que el modelo matemático pueda extender su rango de predicción.(Ver Anexo 1).

3.1. Validación del modelo matemático.

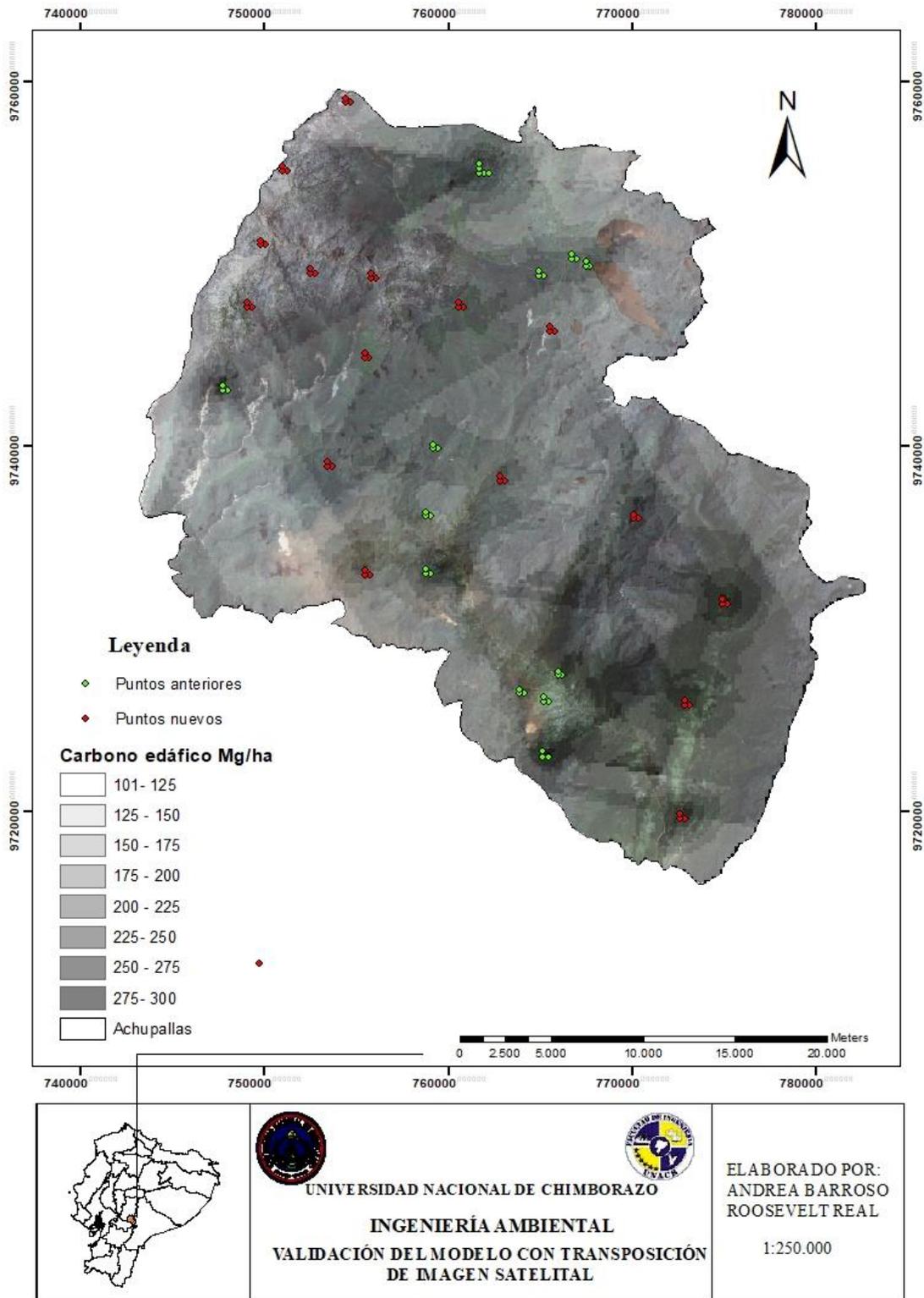


Figura 08. Validación del modelo con transposición de imagen satelital

Fuente: Autores

La figura 08, muestra los usos de suelo representados por la imagen satelital LandSat8, del año 2014, y la tendencia de interpolación del contenido de carbono edáfico. De esto se puede deducir la pérdida de carbono en áreas de intervención antrópica como es el caso de cultivos. Además, las áreas de plantaciones muestran los valores más altos de carbono edáfico debido a la presencia de turberas, que es la acumulación de materia orgánica en proceso de descomposición.

La calibración del modelo muestra los siguientes valores: el ángulo de predicción fue 301,8° en este valor la mayor parte de puntos bajo la curva, entran en el análisis de predicción.

La anisotropía analiza el comportamiento de los datos en función a las gráficas en ese caso se seleccionó la anisotropía verdadera la misma que muestra que la variación espacial es diferente en las distintas direcciones del espacio; se establecieron 8 cuadrantes de interpolación, de esta manera los pixeles cercanos a estos cuadrantes van a tener mayor cantidad de interacciones.

Los coeficientes: media, error medio cuadrático, media estandarizada, error medio cuadrático estandarizado y error medio estandarizado (Tabla 07), muestran una alta correlación al momento de predecir los datos, previamente analizados en la estadística tradicional, de esta manera se establecen datos homogenizados para cada estrato, sin considerar la asimetría de los valores del contenido de carbono edáfico; se estimó un nivel de predictibilidad del 94,03%. Según estudios realizados por (Marco Mouriño et al., 2011), el valor de predicción en el rango (81-100)%, indica el valor “muy bueno”, en la confianza de predicción de datos según el índice Kappa

Los resultados de Kriging de las parcelas de cada uno de los estratos son los que se muestran en la tabla 07 con su respectivo gráfico de error:

Tabla 07. Error de predicción

ERROR DE PREDICCIÓN	
Media	5,97%
Error medio cuadrático	44,53%
Media estandarizada	0,05%
Error medio cuadrático estandarizado	1,40%
Error medio estandarizado	22,05%

Fuente: Autores

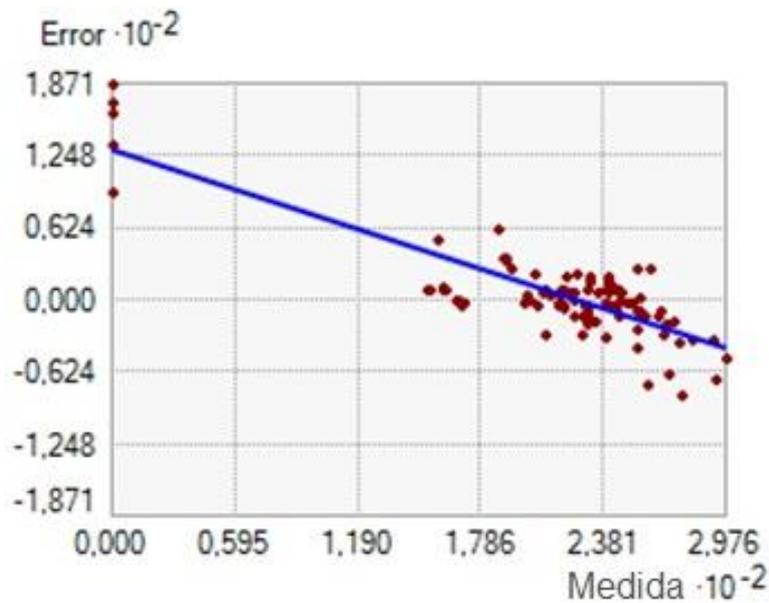


Figura 09. Error de predicción

Fuente: Autores

La figura 09, hace una confrontación entre los valores simulados vs valores muestreados para el contenido de carbono en los 27 conglomerados. Como se muestra en la tabla 07 en el error medio cuadrático se determina que entre menor sea el error de la predicción arrojada mejor será el ajuste del modelo y mejor será la calidad del mapa. (Rodríguez, 2008). Se evidencia que los datos se encuentran distribuidos de manera lineal agrupados en una zona a excepción de cinco puntos los cuales tiene valores de carbono de cero que se utilizaron para el mejoramiento del modelo. Del análisis de la figura se puede juzgar la validez del mismo, se conoce de literatura que cuando existe una pendiente de aproximadamente 45° la calibración del modelo es adecuada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se implementó una base de datos, fundamental como punto de partida para el proceso de investigación, que servirá como plataforma de ingreso de nuevos datos recolectados para estimar el contenido de carbono edáfico en la parroquia Achupallas; estableciendo cuatro variables principales, humedad (%), densidad aparente DAP, materia orgánica (%) y contenido de carbono en el suelo (Mg/ha); se establecieron 12 conglomerados distribuidos de la siguiente manera; 5 de páramo, 5 de cultivos y 2 de pastos, para incrementar la información y obtener datos precisos con un alto nivel de confiabilidad, al momento de establecer un modelo de interpolación de datos.

Se determinaron 4 variables (DAP, % humedad, % MO y CE); se recolectaron 108 muestras a diferentes profundidades, La densidad aparente (DAP), con un promedio de $0,57 \text{ g/cm}^3$ en páramo; $0,62 \text{ g/cm}^3$ en pastos y $1,02 \text{ g/cm}^3$ en cultivos; El contenido de humedad (%), con un promedio de 49,94% en páramo, 36,89% en pastos y 19,00% en cultivos; en cuanto a materia orgánica (MO) se refiere encontramos promedios de 22,48% en páramos, 15,42% en pastos y 8,91% en cultivos; finalmente el contenido de carbono edáfico (CE) tiene un promedio de 224,32 Mg/ha en páramos, 174,43 Mg/ha en pastos y 157,56 Mg/ha en cultivos.

Se evaluaron estadísticamente dos ambientes, los de laboratorio y los datos obtenidos del modelo geoestadístico, mostrando los siguientes valores; una desviación estándar en páramos de 27,43 en datos de campo y en el modelo de 27,01 se puede evidenciar una variación de $\pm 0,42$; en pastos los datos de campo dan como resultado 23,29 y en el modelo 22,30 con una diferencia de $\pm 0,99$; mientras que de cultivos la diferencia de la desviación es de $\pm 2,49$ con un dato de campo de 14,50 y del modelo de 16,99.

Se establecieron 12 conglomerados con 108 muestras compuestas, de esta manera se logró bajar el error, debido a la extensión del área de estudio; los puntos que se encuentran fuera del área de intervención son puntos de corrección con contenido de carbono edáfico con valores de 0 para que el modelo matemático pueda extender su rango de predicción.

Los usos de suelo representados por la imagen satelital LandSat8, del año 2014, y el modelo de interpolación KRIGING del contenido de carbono edáfico concuerdan, las mismas que manifiesta una pérdida de carbono en áreas de intervención antrópica, además las áreas de páramo muestran los valores más altos de carbono edáfico.

La anisotropía verdadera, muestra que la variación espacial es diferente en las distintas direcciones del espacio; se establecieron 8 cuadrantes de interpolación, de esta manera los pixeles cercanos a estos cuadrantes van a tener mayor cantidad de interacciones, los coeficientes (media, error medio cuadrático, media estandarizada, error medio cuadrático estandarizado y error estandarizado medio), muestran una alta correlación al momento de predecir los datos, previamente analizados en la estadística tradicional, de esta manera se establecen datos homogenizados para cada estrato, sin considerar la asimetría de los valores del contenido de carbono edáfico; se estimó un nivel de predictibilidad del 94,03%.

Recomendaciones

Es indispensable determinar los puntos necesarios para la extensión de terreno en el que se aplique el modelo de interpolación matemático KRIGING, para un terreno de un área grande se deberá determinar más conglomerados para que el grado de error sea aceptable en el modelo.

Se debe aplicar puntos de corrección en el modelo, estos puntos van fuera de la zona de estudio con valores de carbono cero y sirven para corregir el mismo.

Este proyecto de investigación para determinar el stock de carbono edáfico según los sistemas ecológicos puede ser utilizado para la valoración de este ecosistema y la gestión adecuados de los bienes y servicios ambientales que este brinda.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba , Bolivia. Tesis de Posgrado de Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques.*
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. T., Lobo, J. M., Millán, A., & Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3), 79–84. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.10>
- Barreno, E. (2015). PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2015 – 2019.
- Camacho, M. (2013). Los páramos Ecuatorianos : caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. *ANALES de La Universidad Central Del Ecuador, Vol. 372*(No. 1), 77–92.
- Cano, R. M. Y., & Villanueva, M. C. (2013). Almacenamiento de carbono en pastos naturales altoandinos. *Rev. Fitotec. Mex.*, 16(3), 215–220. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>
- Cargua, F., Rodríguez, M., Damián, D., Recalde, C., & Santillán, G. (2017). Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park-, 66, 408–413.
- Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.*, 9(3), 222–235. Retrieved from <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v9n3/art05.pdf>
- Céspedes, FE; Fernandez, JA; Gobbi, JA; Bernardis, A. (2012). Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizales y una pradera bajo pastoreo. *Rev. Fitotec. Mex.*, 35(1), 79–86.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., ... Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería En Las Américas*, 45(45), 27–36. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Jaramillo, D. (2011). Caracterización De La Materia Orgánica Del Horizonte Superficial De Un Andisol Hidromórfico Del Oriente Antioqueño. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 35(134), 23–33.
- Marco Mouriño, A., Orcau Palau, A., Jané Galliga, R., Escribano Ibáñez, M., Caylà Buqueras, J. A., Solé Zapata, N., ... Martín Sánchez, V. (2011). Concordancia de las pruebas de tuberculina e Interferón gamma en población reclusa. *Revista Española de Sanidad Penitenciaria*, 13(1), 15–20. <https://doi.org/10.4321/S1575-06202011000100003>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Miranda, T., Machado, R., Machado, H., & Duquesne, P. (2007). Carbono secuestrado en file:///C:/Users/User/Desktop/art05.pdf agropecuarios cubanos y su valoración económica. *Pastos Y Forrajes*, 30(4), 483–491.
- Mogollón, J. P., Rivas, W., Martínez, A., Campos, Y., Edjuly, & Márquez. (2015). Carbono orgánico del suelo en un gradiente altitudinal en la Península de Paraguaná, Venezuela, 15, 12.
- Padarian Campusano, J. S. (2011). *MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO ENTRE LAS REGIONES DE VALPARAÍSO Y DE LOS RÍOS, CHILE.*
- Rodríguez, J. (2008). *APLICACIÓN DE METODOS DE INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN POR MODELAMIENTO GEOESTADISTICO Y ANÁLISIS ESPACIAL PARA EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rodriguez, M., & Cargua, F. (2012). “*ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO FORESTAL MULTIPROPÓSITO CON ÉNFASIS EN EL CONTENIDO DE CARBONO DE LAS DIFERENTES CLASES DE USO DE TIERRA, PARROQUIA ACHUPALLAS, CANTÓN ALAUSÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO.*” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Rojas W., C., & Sierras B., C. (2015). La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad en cultivos. *Inia*. Retrieved from

<http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR28123.pdf>

Simón Cid, N. (2010). *Modelización geoestadística de la distribución de carbono en suelo en una dehesa*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA.

Vallejo, V. R., Fierros, F. D., & Rosa, D. de la. (2007). Impactos Sobre Los Recursos Edáficos. *Impactos Del Cambio Climático En España*, 355–398.

Zárate, M. G. (2008). *Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de Pinus maximinoi H. E. Moore, Pinus oocarpa var. ochoterenai Mtz. y Quercus sp. en el norte del Estado de Chiapas, México*.

ANEXOS

Anexo 01. Determinación de carbono en el suelo

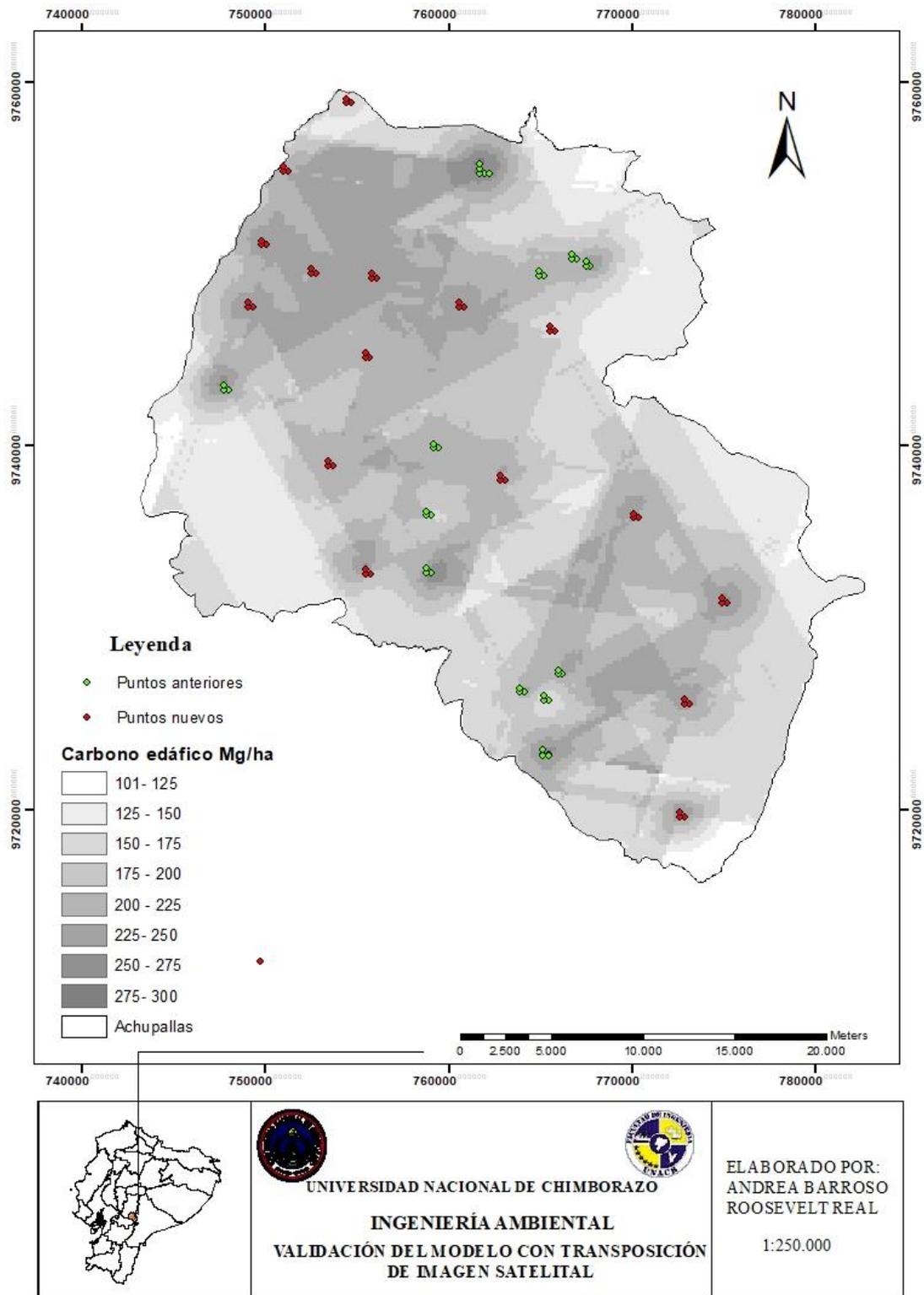
DETERMINACION DEL STOCK DE CARBONO EN EL SUELO										
CONGLOMERADO	PARCELA	PROF. MUESTRA (cm)	HUMEDAD (%)	D A P (g/cm ³)	P. SUELO SECO (g)	P.SUELO SECO DESP. IGNIC. (g)	PERDIDA DE PESO (g)	M. ORGANICA (%)	CARBONO (%)	CARBONO (Mg/ha)
001 HUANGRA BOSQUE	P1	Total parcela	60,74	0,26	15,00	6,23	8,77	58,47	33,92	259,69
	P2	Total parcela	60,74	0,26	15,00	6,23	8,77	58,47	33,92	259,69
	P3	Total parcela	60,74	0,26	15,00	6,23	8,77	58,47	28,72	259,69
	Promedio Conglomerado									216,94
002 HUANGRA SURALES	P1	Total parcela	57,03	0,35	15,00	9,23	5,77	38,48	22,32	233,46
	P2	Total parcela	57,03	0,35	15,00	9,23	5,77	38,08	22,09	217,08
	P3	Total parcela	60,79	0,33	15,00	9,29	5,71	37,86	21,96	221,77
	Promedio Conglomerado									224,10
003 HUANGRA PASTO	P1	Total parcela	25,85	0,75	15,00	13,13	1,87	12,45	7,22	152,43
	P2	Total parcela	23,63	0,77	15,00	13,24	1,76	11,75	6,81	153,64
	P3	Total parcela	23,75	0,79	15,00	13,22	1,78	11,89	6,90	160,25
	Promedio Conglomerado									155,44
004 POMACOCHO PLANTACION LATIZAL	P1	Total parcela	64,43	0,31	15,00	8,82	6,18	41,19	23,89	224,36
	P2	Total parcela	60,27	0,31	15,00	8,67	6,33	42,17	24,46	230,23
	P3	Total parcela	64,33	0,31	15,00	8,85	6,15	40,99	23,78	220,65
	Promedio Conglomerado									225,08
005 POMACOCHO RÍO SAUCAY	P1	Total parcela	54,43	0,38	15,00	11,49	3,51	23,43	13,59	157,49
	P2	Total parcela	53,28	0,40	15,00	10,47	4,53	30,18	17,50	209,93
	P3	Total parcela	53,75	0,38	15,00	10,48	4,52	30,13	17,48	199,77
	Promedio Conglomerado									189,06
006 OZOGOCHÉ ALTO LAGUNA CUBILLIN	P1	Total parcela	38,15	0,55	15,00	10,64	4,36	29,06	16,86	275,90
	P2	Total parcela	49,54	0,41	15,00	11,11	3,89	25,92	15,03	187,24
	P3	Total parcela	43,99	0,47	15,00	10,85	4,15	27,70	16,07	227,63
	Promedio Conglomerado									230,25
007 OZOGOCHÉ ALTO PASTO	P1	Total parcela	52,29	0,37	15,00	10,15	4,85	32,37	18,77	208,42
	P2	Total parcela	49,63	0,40	15,00	10,07	4,93	32,84	19,05	228,05
	P3	Total parcela	57,07	0,36	15,00	10,25	4,75	31,67	18,37	192,85
	Promedio Conglomerado									209,77
008 OZOGOCHÉ ALTO PICHAHUINA	P1	Total parcela	54,35	0,45	15,00	10,81	4,19	27,96	16,22	218,61
	P2	Total parcela	54,44	0,45	15,00	10,89	4,11	27,42	15,90	216,23
	P3	Total parcela	54,23	0,44	15,00	10,86	4,14	27,60	16,01	210,17
	Promedio Conglomerado									215,00
009 OZOGOCHÉ BAJO PLANTACIÓN DE PINO	P1	Total parcela	27,26	0,59	15,00	11,29	3,71	24,73	14,35	254,54
	P2	Total parcela	26,70	0,66	15,00	11,22	3,78	25,23	14,63	291,59
	P3	Total parcela	28,39	0,61	15,00	11,31	3,69	24,59	14,26	260,37
	Promedio Conglomerado									268,83

010 OZOGOCHE BAJO PLANTACIÓN DE PINO	P1	Total parcela	25,57	0,63	15,00	11,31	3,84	25,63	14,87	281,19
	P2	Total parcela	24,36	0,68	15,00	11,20	3,80	25,32	14,69	297,59
	P3	Total parcela	20,21	0,64	15,00	11,22	3,78	25,20	14,62	278,40
	Promedio Conglomerado									285,73
011 ACHUPALLAS LAGUNA MAPAHUINA	P1	Total parcela	62,45	0,36	15,00	9,55	5,45	36,33	21,07	225,52
	P2	Total parcela	53,22	0,41	15,00	9,55	5,45	36,30	21,06	255,73
	P3	Total parcela	51,63	0,47	15,00	9,94	5,06	33,74	19,57	274,37
	Promedio Conglomerado									251,87
012 JUBAL	P1	Total parcela	51,64	0,38	15,00	8,45	6,55	43,66	25,32	292,22
	P2	Total parcela	51,50	0,39	15,00	9,90	5,10	34,01	19,73	231,72
	P3	Total parcela	54,88	0,36	15,00	9,67	5,33	35,57	20,63	220,60
	Promedio Conglomerado									248,18
013 BOSQUES	P1	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	240,84
	P2	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	254,99
	P3	Total parcela	44,04	0,56	5,00	4,14	0,86	17,20	9,20	265,55
	P4	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	255,14
	P5	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	271,77
	Promedio Conglomerado									257,66
014 BOSQUES	P1	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	240,57
	P2	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	246,38
	P3	Total parcela	44,04	0,56	5,00	4,14	0,86	17,20	9,20	245,83
	P4	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	264,69
	P5	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	268,97
	Promedio Conglomerado									253,29
015 BOSQUES	P1	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	258,23
	P2	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	240,69
	P3	Total parcela	44,04	0,56	5,00	4,14	0,86	17,20	9,20	246,48
	P4	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	248,92
	P5	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	239,52
	Promedio Conglomerado									246,77
016 PASTOS	P1	Total parcela	38,02	0,64	5,00	4,28	0,72	14,40	8,35	160,45
	P2	Total parcela	34,84	0,61	5,00	4,21	0,79	15,87	9,20	167,19
	P3	Total parcela	44,04	0,56	5,00	4,14	0,86	17,20	9,20	168,37
	Promedio Conglomerado									165,33
017 PASTOS	P1	Total parcela	32,14	0,66	5,00	4,25	0,75	14,93	8,66	170,08
	P2	Total parcela	32,14	0,66	5,00	4,25	0,75	15,07	8,74	169,43
	P3	Total parcela	32,02	0,64	5,00	4,25	0,75	15,07	8,74	162,03
	Promedio Conglomerado									8,66
018 PÁRAMOS	P1	Total parcela	46,34	0,51	5,00	3,74	1,26	25,27	14,66	223,20
	P2	Total parcela	48,74	0,49	5,00	3,75	1,25	25,00	14,50	212,53
	P3	Total parcela	50,75	0,47	5,00	3,69	1,31	26,27	15,24	216,21
	Promedio Conglomerado									217,31

019 PÁRAMOS	P1	Total parcela	49,44	0,58	5,00	4,05	0,95	19,00	11,02	191,10
	P2	Total parcela	50,72	0,55	5,00	3,86	1,14	22,80	13,23	218,79
	P3	Total parcela	50,69	0,61	5,00	3,73	1,27	25,40	14,73	269,66
	Promedio Conglomerado									
020 PÁRAMOS	P1	Total parcela	52,05	0,59	5,00	3,94	1,06	21,27	12,34	218,73
	P2	Total parcela	51,77	0,58	5,00	3,99	1,01	20,20	11,72	204,17
	P3	Total parcela	48,43	0,62	5,00	3,90	1,10	22,07	12,80	239,11
	Promedio Conglomerado									
021 PÁRAMOS	P1	Total parcela	55,82	0,51	5,00	3,84	1,16	23,13	13,42	205,47
	P2	Total parcela	50,62	0,59	5,00	4,01	0,99	19,73	11,45	202,05
	P3	Total parcela	52,79	0,57	5,00	3,99	1,01	20,20	11,72	201,68
	Promedio Conglomerado									
022 PÁRAMOS	P1	Total parcela	59,24	0,52	5,00	3,59	1,41	28,27	16,40	241,12
	P2	Total parcela	40,35	0,71	5,00	4,04	0,96	19,20	11,14	235,87
	P3	Total parcela	43,85	0,72	5,00	4,03	0,97	19,33	11,21	244,69
	Promedio Conglomerado									
023 CULTIVOS	P1	Total parcela	17,99	1,03	5,00	4,52	0,48	9,67	5,61	173,19
	P2	Total parcela	17,94	1,02	5,00	4,51	0,49	9,87	5,72	175,01
	P3	Total parcela	17,85	1,00	5,00	4,50	0,50	9,93	5,76	172,99
	Promedio Conglomerado									
024 CULTIVOS	P1	Total parcela	16,86	1,13	5,00	4,55	0,45	9,00	5,22	177,21
	P2	Total parcela	9,23	1,08	5,00	4,55	0,45	9,07	5,26	170,92
	P3	Total parcela	15,42	1,10	5,00	4,54	0,46	9,13	5,30	175,87
	Promedio Conglomerado									
025 CULTIVOS	P1	Total parcela	18,86	1,10	5,00	4,54	0,40	8,00	4,64	152,95
	P2	Total parcela	18,69	1,10	5,00	4,61	0,39	7,87	4,56	151,02
	P3	Total parcela						7,80	4,52	146,66
	Promedio Conglomerado									
026 CULTIVOS	P1	Total parcela	18,85	1,03	5,00	4,59	0,41	8,13	4,72	145,85
	P2	Total parcela	18,72	1,03	5,00	4,58	0,42	8,40	4,87	150,82
	P3	Total parcela	18,32	1,03	5,00	4,59	0,41	8,13	4,72	145,64
	Promedio Conglomerado									
027 CULTIVOS	P1	Total parcela	25,90	0,86	5,00	4,53	0,47	9,47	5,49	141,38
	P2	Total parcela	25,93	0,84	5,00	4,52	0,48	9,67	5,61	140,97
	P3	Total parcela	25,82	0,86	5,00	4,52	0,48	9,60	5,57	142,94
	Promedio Conglomerado									

Fuente: (Rodríguez & Cargua, 2012) y Autores

Anexo 02. Modelo matemático KRIGING



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



INGENIERÍA AMBIENTAL

VALIDACIÓN DEL MODELO CON TRANSPOSICIÓN DE IMAGEN SATELITAL

ELABORADO POR:
ANDREA BARROSO
ROOSEVELT REAL

1:250.000

Fuente: Autores

Anexo 03. Valoración del índice kappa

Valoración del Índice Kappa	
Valor de x	Fuerza de la concordancia
< 0,20	Pobre
0,21-0,40	Débil
0,41-0,60	Moderada
0,61-0,80	Buena
0,81-1,00	Muy buena

Fuente: (Marco Mouriño et al., 2011)

Anexo 04. Registro fotográfico



FOTOGRAFÍA N°01. Ubicación de la zona

Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°02. Elaboración de calicatas.

Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°03. Medición de las profundidades.
Fuente: Autores



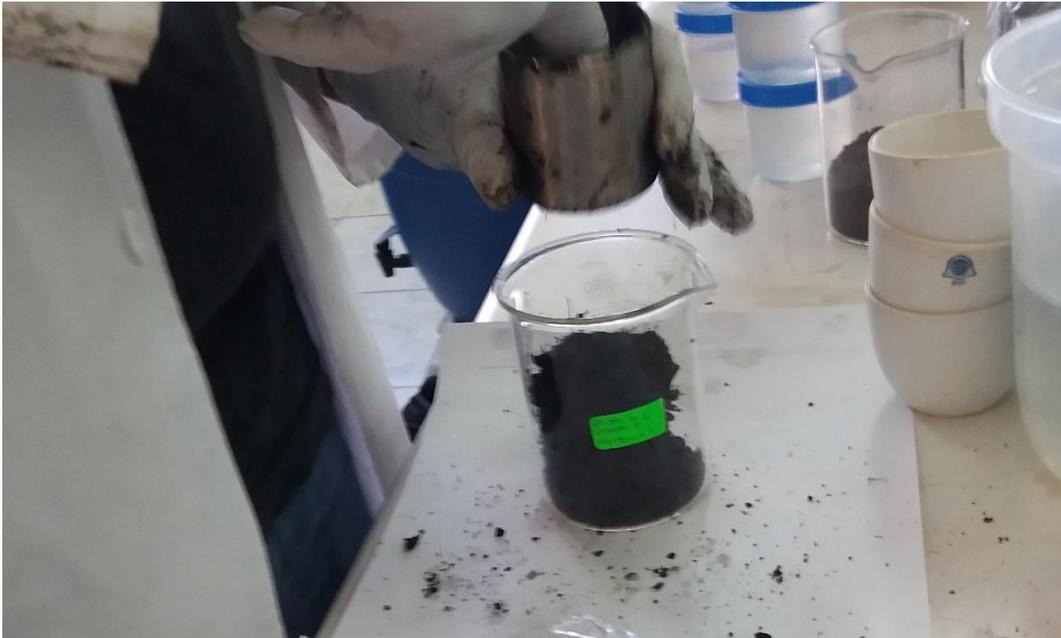
FOTOGRAFÍA N°04. Recolección de las muestras a diferentes profundidades.
Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°05. Elaboración de las muestras compuestas.
Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°06. Muestras a diferentes profundidades.
Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°07. Recolección de las muestras a diferentes profundidades.

Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°08. Colocar en la estufa a 105°C por 24 horas.

Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°09. Colocar en la mufla por 2 horas a 450°C
Fuente: Autores



FOTOGRAFÍA N°10. Se le coloca en el desecador para que se enfríe.
Fuente: Autores

Anexo 05. Coordenadas de conglomerados

ESTRATOS	COOR X	COOR Y	CARBONO	ALTITUD	USO DE SUELO
1	764099	9726401	259,69	3214	BOSQUE
1	763849	9726401	189,76	3299	BOSQUE
1	763849	9726651	201,37	3299	BOSQUE
2	766208	9727397	233,46	2865	BOSQUE
2	765958	9727397	217,08	2696	BOSQUE
2	765958	9727647	221,77	2780	BOSQUE
3	765436	9725979	152,43	2810	PASTOS
3	765186	9725979	153,64	2910	PASTOS
3	765187	9726229	160,25	2890	PASTOS
4	759429	9739837	224,36	3920	PÁRAMO
4	759179	9739837	230,23	3880	PÁRAMO
4	759179	9740087	220,65	3895	PÁRAMO
5	759038	9736130	157,49	3420	PÁRAMO
5	758788	9736132	209,93	3410	PÁRAMO
5	758786	9736382	199,77	3560	PÁRAMO
6	767734	9749853	275,9	3775	PÁRAMO
6	767484	9749854	187,24	3787	PÁRAMO
6	767483	9750105	227,63	3762	PÁRAMO
7	766979	9750280	208,42	3766	PASTOS
7	766729	9750278	228,05	3783	PASTOS
7	766726	9750530	192,85	3777	PASTOS
8	765171	9749347	218,61	4070	PÁRAMO
8	764921	9749347	216,23	4030	PÁRAMO
8	764921	9749597	210,17	4067	PÁRAMO
9	761931	9754976	254,54	3745	PLANTACIONES
9	761681	9754976	291,59	3810	PLANTACIONES
9	761681	9755227	260,37	3790	PLANTACIONES
10	762181	9754976	281,19	3695	PLANTACIONES
10	761681	9755477	297,59	3730	PLANTACIONES
11	747973	9743065	225,52	3948	PÁRAMO
11	747723	9743064	255,73	3874	PÁRAMO
11	747723	9743315	274,37	3872	PÁRAMO
12	759021	9733001	292,22	3625	PÁRAMO
12	758771	9733001	231,72	3620	PÁRAMO
12	758771	9733251	220,6	3599	PÁRAMO
13	765444	9722937	240,84	3221	BOSQUE
13	765424	9722937	254,99	3222	BOSQUE
13	765424	9722957	265,55	3215	BOSQUE
13	765444	9722957	255,14	3214	BOSQUE
13	765434	9722947	271,77	3218	BOSQUE
14	765134	9722937	240,57	3252	BOSQUE
14	765114	9722937	246,38	3254	BOSQUE

14	765114	9722957	245,83	3240	BOSQUE
14	765134	9722957	264,69	3238	BOSQUE
14	765124	9722947	268,97	3245	BOSQUE
15	765134	9723247	258,23	3147	BOSQUE
15	765114	9723247	240,69	3154	BOSQUE
15	765114	9723267	246,48	3155	BOSQUE
15	765134	9723267	248,92	3145	BOSQUE
15	765124	9723257	239,52	3149	BOSQUE
16	754681	9758839	160,4457	4234	PASTOS
16	754681	9758588	167,1868	4222	PASTOS
16	754930	9758587	168,3673	4213	PASTOS
17	765770	9746291	170,0781	4074	PASTOS
17	765772	9746041	169,4340	4129	PASTOS
17	766023	9746041	162,0285	4149	PASTOS
18	753671	9738866	223,1980	4029	PÁRAMO
18	753673	9738616	212,5265	4066	PÁRAMO
18	753925	9738613	216,2108	4031	PÁRAMO
19	755726	9732916	191,0976	3882	PÁRAMO
19	755726	9732665	218,7879	3981	PÁRAMO
19	755981	9732663	269,6618	3913	PÁRAMO
20	763047	9738086	218,7322	3812	PÁRAMO
20	763050	9737830	204,1750	3863	PÁRAMO
20	763302	9737829	239,1120	3939	PÁRAMO
21	755678	9744845	205,4658	4051	PÁRAMO
21	755678	9744592	202,0508	4050	PÁRAMO
21	755925	9744597	201,6850	3991	PÁRAMO
22	760793	9747609	241,1238	3931	PÁRAMO
22	760796	9747358	235,8692	3937	PÁRAMO
22	761042	9747358	244,6863	4000	PÁRAMO
23	751240	9755095	229,6780	3228	CULTIVOS
23	751242	9754907	230,1923	3187	CULTIVOS
23	751493	9754905	191,0390	3099	CULTIVOS
24	750046	9751022	253,7754	2815	CULTIVOS
24	750045	9750770	245,8407	2836	CULTIVOS
24	750298	9750770	255,7552	2772	CULTIVOS
25	749305	9747608	243,5641	3548	CULTIVOS
25	749308	9747360	267,6278	3553	CULTIVOS
25	749559	9747360	241,1130	3636	CULTIVOS
26	756074	9749206	229,6528	3343	CULTIVOS
26	756072	9748958	238,6825	3353	CULTIVOS
26	756324	9748954	239,1134	3329	CULTIVOS
27	752762	9749474	228,9164	3797	CULTIVOS
27	752765	9749224	221,6925	3451	CULTIVOS
27	753013	9749222	229,5582	3430	CULTIVOS