



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL SUELO POR EL CRECIMIENTO DE
LA FRONTERA AGROPECUARIA

Autora

Andrea Fernanda Saltos Suasnavas

2017



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL SUELO POR EL CRECIMIENTO
DE LA FRONTERA AGROPECUARIA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía

Dra. Ruth Magdalena López Ulloa

Autora

Andrea Fernanda Saltos Suasnavas

Año

2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Ruth Magdalena López Ulloa
Doctora en Ciencias Forestales
CI: 1705006391

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Miguel Ángel Gualoto Oñate
Master of Science en Biología
CI: 1707429351

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Andrea Fernanda Saltos Suasnavas

CI: 1723382071

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y a mi hermana por todo el apoyo brindado para poder culminar con esta etapa de mi vida.

A mis profesores, en especial a mi profesora guía, por el aporte en este proyecto y por darme las herramientas necesarias para terminar con el proceso educativo.

Al Instituto Ecuatoriano Aeroespacial por la información proporcionada para el cumplimiento de este estudio y a la empresa Agropresición por ayudarme con la capacitación en el programa PCI Geomatics.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por ser un ejemplo por seguir y apoyarme en todas las decisiones tomadas en mi vida.

RESUMEN

El estudio fue realizado en la provincia de Pichincha, parroquia de Nono y tuvo como objeto principal la evaluación del crecimiento de la frontera agropecuaria y la determinación de los efectos del cambio de uso de suelo en las propiedades fisicoquímicas de la zona de estudio.

Para el análisis de la frontera agropecuaria se utilizaron imágenes Landsat 7 y 8, de los años 2000, 2005, 2010 y 2017. Las cuales se sometieron a una clasificación supervisada y no supervisada para la determinación de coberturas de uso de suelo, esto fue validado con el porcentaje de precisión global y el coeficiente Kappa. Para la evaluación del cambio de las propiedades fisicoquímicas, se analizaron 120 muestras de suelo de cuatro diferentes usos (vegetación natural, pasto, cultivo y pino). Los análisis realizados fueron pH, densidad, textura y carbono orgánico. Los resultados muestran que al comparar las coberturas del año 2000 con los años 2010 y 2017 no hay diferencia, pero si se relaciona con el año 2005 se observa que en ese año el porcentaje de cobertura natural incremento en un 15% en relación con los restantes años analizados, con una disminución del 12 % el avance de la frontera agrícola en ese año. En relación a las propiedades fisicoquímicas, hubo un cambio notable de vegetación natural a otros usos en los parámetros de pH, densidad aparente y contenido de carbono.

ABSTRACT

The study was conducted in the province of Pichincha, Nono and had as main objective the evaluation of the growth of the agricultural frontier and the determination of the effects of the change of soil use on the physical and chemical properties of the study area.

For the analysis of the agricultural frontier, Landsat 7 and 8 images of the years 2000, 2005, 2010 and 2017 were used. These images were subjected to a supervised and unsupervised classification for the determination of land cover, this was validated with the percentage of overall accuracy and the Kappa coefficient. For the evaluation of the change in physical chemical properties, 120 soil samples of four different uses (natural vegetation, pasture, crop and pine) were analyzed. The analyzes were pH, density, texture and organic carbon. The results show that when comparing the coverage of the year 2000 with the years 2010 and 2017 there is no difference, but if it relates to the year 2005 it is observed that in that year the percentage of natural coverage increased by 15% in relation to the remaining Years analyzed, with a 12% decrease in the advance of the agricultural frontier in that year. In relation to the physical chemical properties, there was a remarkable change of natural vegetation to other uses in the parameters of pH, bulk density and carbon content.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 Alcance..... | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.3 Hipótesis..... | 3 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 2.1 Suelo..... | 3 |
| 2.1.1 Definición de suelo..... | 3 |
| 2.1.2 Propiedades..... | 4 |
| 2.1.2.1 Propiedades físicas..... | 4 |
| 2.1.2.2 Propiedades químicas..... | 6 |
| 2.1.3 Degradación del suelo..... | 7 |
| 2.1.3.1 Definición..... | 7 |
| 2.1.4 Calidad del suelo..... | 7 |
| 2.1.4.1 Indicadores de la calidad del suelo..... | 7 |
| 2.2 Sistemas de Información Geográfica..... | 8 |
| 2.2.1 Teledetección..... | 8 |
| 2.2.2 Satélite Landsat..... | 9 |
| 2.2.3 Procesamiento de imágenes satelitales..... | 9 |
| 2.2.3.1 Clasificación de las imágenes satelitales..... | 10 |
| 2.3 Marco Referencial..... | 10 |
| 2.3.1 Estudios de cobertura vegetal con teledetección..... | 10 |
| 2.3.2 Estudios de cambio de las propiedades por el tipo de uso de suelo..... | 12 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 13 |
| 3.1 Descripción del área de estudio..... | 13 |
| 3.2 Objetivo 1..... | 13 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.2.1 | Procedimiento para establecer el porcentaje de avance de la frontera agropecuaria..... | 13 |
| 3.2.1.1 | Análisis de imágenes satelitales..... | 13 |
| 3.2.1.2 | Determinación de áreas de cobertura de los usos de suelo..... | 16 |
| 3.2.1.3 | Cálculo del incremento de la frontera agrícola..... | 17 |
| 3.3 | Objetivo 2..... | 17 |
| 3.3.1 | Caracterización del suelo..... | 17 |
| 3.3.1.1 | Muestreo de suelo..... | 20 |
| 3.3.1.2 | Densidad Real..... | 20 |
| 3.3.1.3 | Densidad Aparente..... | 21 |
| 3.3.1.4 | Textura..... | 21 |
| 3.3.1.5 | pH..... | 22 |
| 3.3.1.6 | Materia Orgánica..... | 23 |
| 3.4 | Análisis estadístico..... | 24 |
| 4. | RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN..... | 25 |
| 4.1 | Mapas de cobertura de uso de suelo de la parroquia de Nono y cálculo de áreas de cobertura vegetal para los años 2000, 2005, 2010 y 2017..... | 25 |
| 4.1.1 | Clasificación no supervisada..... | 25 |
| 4.1.2 | Clasificación supervisada..... | 32 |
| 4.2 | Evaluación del crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono..... | 39 |
| 4.3 | Análisis de la clasificación de uso de suelo..... | 42 |
| 4.4 | Resultados de la caracterización de suelos..... | 43 |
| 4.5 | Evaluación del impacto del uso del suelo en las propiedades Físicas y Químicas en la parroquia de Nono..... | 46 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 54 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 54 |
| 5.2 | Recomendaciones..... | 56 |
| | REFERENCIAS..... | 57 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La degradación del suelo se da principalmente por la deforestación de bosques naturales, avance de la frontera agrícola en los páramos y el manejo inadecuado del suelo, lo que genera un desequilibrio hídrico (Paruelo, Guerschman y Verón, 2005). En la actualidad es un grave problema, debido a que se está perdiendo nutrientes del suelo generando cambios de las propiedades físico químicas. Esto causa que la mayoría de los suelos se conviertan en improductivos y en algunos casos ocasionen desertificación (Cárdenas, 2014).

El uso intensivo del suelo por la agricultura y actividad pecuaria ocasiona una reducción de sus funciones y afecta de manera directa a la biodiversidad que motiva el cambio de uso de suelo, principalmente por la implementación de actividades agropecuarias, que ocasiona un aumento en la erosión del suelo, disminución de la biodiversidad, pérdida de nutrientes y carbono (López-Ulloa, 2006). Es de suma importancia evitar estos daños debido a que el suelo es un recurso estratégico que contribuye a la seguridad alimentaria del mundo y a la regulación del ciclo de carbono (FAO y GTIS, 2015).

En el Ecuador en el año de 1990 la superficie cubierta por vegetación natural fue de 15'519.590 ha, representando el 62% del territorio nacional, dividida en 12'896.224 ha de bosque natural, 1'440.93 ha de páramos, 946.567 ha de vegetación arbustiva y 236.706 ha de vegetación herbácea (Ministerio del Ambiente, 2012). Para el año 2015 la superficie de cobertura de bosque natural disminuye a 12'548.000 ha, que significa una pérdida de 348.224 ha. A pesar de ello, el área de bosque corresponde al 50.5% del territorio nacional (FAO y GRIS, 2015). El 99.4% del área deforestada es utilizada en el sector agropecuario con cultivos permanentes, transitorios y barbecho, pastos naturales y cultivados.

Según datos del INEC, en el año 2014 la superficie total país destinada para el sector agropecuario era de 5.38 millones de hectáreas y para el año 2015, aumento a 5.67 millones de hectáreas. Donde, la provincia de Pichincha representa el 4.18% de toda esta superficie (INEC, 2015). La parroquia de Nono, perteneciente al Distrito Metropolitano de Quito, en los últimos años ha demostrado un crecimiento desmesurado del sector agropecuario, provocando afectaciones a nivel ambiental, sobre todo con la pérdida de bosque natural, pajonal y vegetación arbustiva, que en un futuro afectará a la calidad del suelo y a las reservas de agua; especialmente por la utilización de agroquímicos, que tendrá como consecuencia una reducción en la productividad (CAIRO S.A., 2015).

Dentro de la parroquia de Nono no se han realizado estudios del efecto del crecimiento de la actividad agropecuaria, avance de la frontera agrícola y sus efectos en la calidad del suelo. Al identificar si el tipo de uso del suelo afecta a las propiedades físicas químicas del suelo, permitirá a los tomadores de decisión reorganizar la planificación territorial de la parroquia e impulsar la ejecución de medidas de conservación del suelo en Nono.

1.2 Alcance

El alcance del proyecto de titulación fue cuantificar el área de crecimiento de la frontera agropecuaria y determinar cómo esta influye en la calidad del suelo de la parroquia de Nono. Para lo cual se utilizó imágenes satelitales Landsat de los años 2000, 2005, 2010 y 2017. Para establecer el efecto de este crecimiento agropecuario en las propiedades del suelo se seleccionaron cuatro usos de suelo correspondientes a: vegetación natural (arbórea y boscosa), pastos, cultivos y pino, y se analizó como estas modifican las propiedades del suelo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la degradación del suelo por el crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar mediante sistemas de información geográfica el crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono en los últimos 17 años.
- Evaluar el cambio de las propiedades físico químicas del suelo (D_r , D_a , porosidad, textura, pH y CO) por el cambio de uso de suelo.

1.3 Hipótesis

El crecimiento de la frontera agropecuaria provoca una disminución de la calidad del suelo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Suelo

2.1.1 Definición de suelo

El suelo representa una delgada cubierta de la superficie de la tierra, de algunos centímetros hasta varios metros (Porta, 2008). Se compone de elementos sólidos (materia orgánica y minerales), líquidos y gaseosos (Osman, 2013).

Los suelos son producto de un largo proceso de meteorización del material parental, los factores que influyen en este proceso son la roca madre, el clima, los organismos vivos, el relieve y el tiempo. En la formación de suelos se identifican cuatro procesos básicos que dan como resultado la diferenciación de los horizontes del suelo. Estos procesos son adiciones, pérdidas, transformaciones y translocaciones (Porta, 2008).

Las principales funciones que cumple el suelo son la producción de biomasa, regulación del ciclo hídrico, fijación de gases (secuestro de carbono), regulación de microclimas y soporte físico para las actividades antrópicas (Porta, 2008,).

El suelo es uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la vida, debido a que es la base para la producción alimentaria, por lo que es indispensable su cuidado y mantenimiento (FAO y GRIS, 2015).

2.1.2 Propiedades

2.1.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo son parámetros que nos permiten identificar su calidad, determinan aspectos como el almacenamiento y transporte de agua, la aireación, el crecimiento de las raíces, la perspectiva de erosión y el hábitat para los organismos (Porta, 2008).

Entre las propiedades físicas del suelo podemos mencionar a la textura, porosidad, densidad real, densidad aparente, retención de agua, permeabilidad e infiltración (Porta, 2008), de las cuales en este estudio solo analizaremos textura, porosidad, densidad real y densidad aparente.

2.1.2.1.1 Textura

La textura indica el contenido de partículas de diferente tamaño, como la arcilla ($\geq 2 \mu\text{m}$), el limo (2 a 50 μm) y arena (de 50 a 2000 μm) (Porta, 2008). La textura se relaciona con la cantidad de agua y aire que retiene el suelo y la velocidad con que el agua penetra y lo atraviesa.

2.1.2.1.2 Porosidad

La porosidad del suelo es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total del suelo. Esta propiedad influye en la circulación del agua y aire del suelo en relación al tamaño de los poros (Porta, 2008).

2.1.2.1.3 Densidad real

La densidad real es la relación entre la masa de suelo seco y un volumen de las partículas. Esta densidad varía dependiendo el tipo de partículas originarias de un suelo. Por lo general en suelos minerales la densidad real es de 2,65 mg/m^3 , y en suelos orgánicos esta entre 1,1 y 1,4 mg/m^3 , por lo que los suelos con alto contenido de materia orgánica tienen menor densidad de partículas (Porta, 2008).

2.1.2.1.4 Densidad aparente

.Esta densidad toma en cuenta al suelo en un conjunto, y varía dependiendo el contenido de materia orgánica, textura, compactación y porosidad del suelo (Osman, 2013). Los suelos minerales tienen una densidad aparente promedio de 1,3 mg/m^3 (Porta, 2008).

2.1.2.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas del suelo están relacionadas con la composición química y las reacciones en el suelo en sus tres fases (sólido, líquido y gaseoso). Entre las propiedades químicas del suelo podemos mencionar a la capacidad de intercambio catiónico, reacción del suelo (pH), conductividad eléctrica, presencia de macro y micro nutrientes, de las cuales en este estudio solo analizaremos pH y el contenido de carbono orgánico (CO).

2.1.2.2.1 Reacción del suelo

La reacción del suelo informa el grado de acidez o basicidad de un suelo, expresado por el pH. El pH está relacionado con algunas propiedades del suelo, como el funcionamiento de los microorganismos del suelo, el comportamiento de los contaminantes, e influye en la nutrición de las plantas (Porta, 2008).

2.1.2.2.2 Materia Orgánica

La materia orgánica es un componente heterogéneo en el suelo. Conformado principalmente de C, H, O y N (Porta, 2008). Está constituida por residuos de plantas y animales que se encuentran en diferentes etapas de descomposición (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008).

El Carbono orgánico (CO) es el principal componente de la materia orgánica del suelo. Tiene muchos efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, por esta razón es el principal determinante de la productividad del suelo (Martínez, 2008).

2.1.3 Degradación del suelo

2.1.3.1 Definición

La degradación de un suelo es la pérdida de la utilidad actual o potencial, reduciendo la capacidad de realizar sus funciones. Se entiende como degradación a la disminución, pérdida o cambio de parámetros de calidad, por procesos como la erosión, compactación o las malas prácticas agrícolas que influyen en la pérdida de capas de suelo y como consecuencia de algunas de las propiedades del suelo (Porta, 2008).

Esta modificación ocurre principalmente en la capa superficial del suelo por las diferentes actividades que tienen contacto directo con esta, más que con las capas más profundas (Sripada, 2014).

2.1.4 Calidad del suelo

La calidad del suelo se define como la capacidad para funcionar (Karlen, 1997). Se basa en sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud vegetal y animal (Doran, 1994).

2.1.4.1 Indicadores de la calidad del suelo

Un indicador describe las condiciones de un sistema, en este caso el suelo. Estos permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos: calidad, degradación, sostenibilidad, entre otros. Los indicadores proporcionan información acerca de cuál es la causa del problema y que es lo que se deberá hacer en un futuro (Porta, 2008).

El contenido de materia orgánica, nitrógeno total y la relación C/N , son indicadores que definen la fertilidad del suelo, su estabilidad o resistencia a la

erosión (Cruz, Barra, Castillo y Gutiérrez, 2004).

2.2 Sistemas de Información Geográfica

2.2.1 Teledetección

La teledetección o percepción remota es un instrumento en base a conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. La obtención de información remota de la superficie terrestre se lo hace por sensores aéreos o espaciales. El sistema de teledetección está conformado por los elementos mostrados en la figura 1. Para que la observación remota sea posible es necesario que, entre estos elementos, el objeto y el sensor exista una interacción (Chuvieco, 1995).

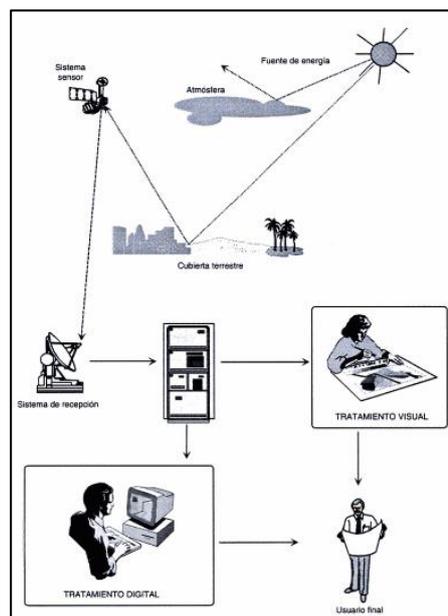


Figura 1. Elementos de la teledetección
Tomado de (Chuvieco, 1995)

Una vez que existe la interacción, hay tres maneras para adquirir la información del sensor remoto, por reflexión, emisión y por emisión-reflexión.

La resolución del sistema sensor va a discriminar información de detalle, es

decir que se va a reconocer el número de bandas, su ancho, y la energía detectada en cada pixel. También se detectará información de profundidad, frecuencia de cobertura del sensor y la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe (Chuvieco, 1995).

2.2.2 Satélite Landsat

Landsat es un conjunto de satélites manejado por EROS Data Center of the United States Geological Survey. LANDSAT 7, lanzado en el año de 1999 trabaja con Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +), un sensor multiespectral que adquiere imágenes en ocho bandas espectrales: azul (1), verde (2), rojo (3), infrarrojo cercano (4-5), térmica (6), infrarrojo medio (7) y pancromática (8). Landsat 8 lanzado en el año 2013 trabaja con dos sensores. El primero es el Operation Land Imager (OLI) que trabaja con nueve bandas y el segundo es el Thermal Infrared Sensor (TIRS) que recoge dos bandas. Landsat toma una imagen de 170 km x 185km cada 16 días con una resolución espectral de cada pixel de 30x30m.

2.2.3 Procesamiento de imágenes satelitales

Para el análisis visual, los compuestos de color hacen pleno uso de las capacidades del ojo humano. Dependiendo del sistema de gráficos en uso, la generación de composición de bandas va a cambiar. La combinación de bandas 5, 4, 3 para Landsat 7 y 6, 5, 4 para Landsat 8 van a dar una mejor apreciación de los usos de suelo (Eastman, 2001).

2.2.3.1 Clasificación de las imágenes satelitales

2.2.3.1.1 Supervisada

Para una clasificación supervisada es necesario tener un conocimiento previo de la zona de estudio. El intérprete va a identificar las diferentes áreas ya reconocidas. Para empezar, se seleccionan las áreas de entrenamiento que van a representar a los diferentes usos de suelo. El software va a utilizar las áreas pre-seleccionadas para agrupar píxeles de las mismas características dependiendo de la reflectancia de la información seleccionada y así establecer los diferentes usos de suelo del área de estudio (Chuvienco, 1995).

2.2.3.1.2 No supervisada

A diferencia de la clasificación supervisada, esta clasificación no requiere de un conocimiento previo de la zona, por lo que se basa más en la interpretación humana. El software va a realizar una clasificación automática formando conglomerados o grupos de similares características dependiendo de la reflectancia de la información presentada en la imagen, estableciendo los diferentes usos de suelo del área de estudio (Chuvienco, 1995).

2.3 Marco Referencial

2.3.1 Estudios de cobertura vegetal con teledetección

La teledetección puede ser usada para la determinación de varios factores ambientales, uno de estos es la cobertura vegetal de una zona.

Un estudio realizado en Damietta, Egipto por El-Gammal, Ali y Eissa, (2014) se basa en la evaluación de los usos de suelo en áreas estériles utilizando teledetección. Para la determinación del uso de suelo se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8, con el software ERDAS se realizó una clasificación no

supervisada con el algoritmo ISODATA. También, se caracterizaron los suelos mediante parámetros físico-químicos. Los resultados de la clasificación arrojan que la agricultura presenta una cobertura del 49% y áreas estériles 12%. Los porcentajes de cobertura comparados con los resultados de la caracterización muestran que los suelos estériles no presentan las características adecuadas para agricultura, pero estos pueden ser utilizados para otras actividades antrópicas.

En Veracruz, México se realizó un estudio para evaluar el cambio de la cobertura vegetal en un periodo de 16 años, utilizando dos imágenes Landsat 5 de los años 1994 y 2010. En este estudio, se realizó una clasificación supervisada de las imágenes satelitales con el software IDRISI Selva 17.0, realizando una clasificación de máxima verosimilitud. La validación de los resultados fue mediante una matriz de confusión con valores entre 92.5 y 93.1 y el coeficiente Kappa con valores de 0.89 y 0.91. En el periodo de 16 años se observó un incremento del 74% de las actividades agrícolas (Osuna-Osuna et al., 2015).

Posada y Salvatierra, en el año 2001 realizaron un estudio multi-temporal del cambio del ecosistema de manglar en la costa de Colombia en el periodo de 1970 a 1996, se basó principalmente en el análisis de fotografías aéreas, pero por la falta de información en algunas zonas se usó imágenes satelitales Landsat 5. Realizaron una clasificación no supervisada con el algoritmo de ISODATA y una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud utilizando el software ILWIS. Los resultados de la clasificación muestran que en el periodo de 1970 se contaba con 22,24 km² de manglar, en donde 17.2 km² (17%) era solo de manglar (alto, bajo y medio) y 5,04 km² (23%) correspondía a manglar con otro tipo de coberturas. Para el año 1980, el área de manglar disminuye a 13,77 km² y para el año de 1996 reduce a 11,48 km². Teniendo un aumento del área de manglar con otro tipo de usos de suelo en el periodo de 1970 a 1996 de 6,63 km².

2.3.2 Estudios de cambio de las propiedades por el tipo de uso de suelo

En Etiopia, en la zona noroeste fue realizado un estudio de los efectos del uso de suelo y sus prácticas de manejo sobre ciertas características físico-químicas del suelo. En este estudio se analizaron cuatro usos de suelo: bosque natural, plantación de bosques, cultivos y pasto. Los resultados muestran que los valores más altos de nitrógeno total (N), materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentan los bosques naturales, y en los mismos parámetros los valores más bajos son de cultivos. Concluyendo que el cambio de bosque a tierras cultivadas y pasto tiene un efecto de pérdida en la calidad del suelo expresado en los parámetros N, MO y CIC (Selassie, Anemut y Addisu, 2015).

En un estudio similar realizado en Taiwán se analizó los efectos de cuatro usos de la tierra (plantaciones de té, bambú, bosque de cedro y bosque de Taiwania) en el contenido de carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades. Los resultados muestran que las áreas bajo té y bambú presentan mayor densidad aparente y menor contenido de carbono de 21.2 y 33.6 MgC/ha a una profundidad 0-5 cm, mientras que bajo bosque tuvieron valores de 55.3 y 58.4 MgC/ha. Manteniendo este patrón a la profundidad de 5-10 cm. Para el perfil de 0-50 cm los valores de C fueron de 158.1 MgC/ha para el bosque de Taiwania, 101.8 MgC/ha para el bambú y para la plantación de té de 100.5 MgC/ha (Chen, Juang, Cheng y Pai, 2016).

En el sur del Ecuador, en el páramo de Quimsacocha se estudió el efecto del cambio de cobertura del suelo de natural a antrópica, sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Se evaluaron ocho coberturas: almohadillas, bosque montano alto, bosque de pino, bosque de polylepis, cultivo de papas, pajonal, pasto y pajonal quemado. En la transición de pajonal a cultivos, hubo una disminución en el contenido de humedad a capacidad de campo y un aumento en la densidad aparente en los cultivos. La conductividad hidráulica disminuyó en los suelos bajo papa y pajonal quemado y aumento en el pasto y pino. En las coberturas de pasto, pino y cultivo el pH se encontró en un rango

de 4,3 a 4,7 aumentando en la cobertura de bosque montano a 5,3; notándose una acidificación del suelo por cambio de coberturas de vegetación natural a uso antrópico (Quichimbo, 2012).

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la Parroquia de San Miguel de Nono, está ubicada de la Provincia de Pichincha, al Noroccidente del cantón Quito. Limita al norte con la parroquia de Calacalí y Nanegal, al sur con las parroquias de Lloa y Mindo, al este con la ciudad de Quito y al Oeste con las parroquias de Nanegalito y Mindo. Se encuentra a una altitud entre 1.650 y 4.500 m, con una superficie total de 213,59 km² (CAIRO S.A., 2015). Se sitúa dentro de la formación vegetal bosque siempreverde montano alto (Cleef, 1981).

3.2 Objetivo 1

Para lograr el cumplimiento del primer objetivo “Identificar mediante sistemas de información geográfica el crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono en los últimos 17 años”, se realizó el análisis de imágenes satelitales para determinar el área de incremento de la frontera agrícola para los años 2005, 2010 y 2017 comparados con la cobertura vegetal del año 2000.

3.2.1 Procedimiento para establecer el porcentaje de avance de la frontera agropecuaria

3.2.1.1 Análisis de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales fueron provistas por el Instituto Espacial Ecuatoriano.

De acuerdo a la calidad de las mismas y ausencia de nubes en la zona de estudio, las imágenes seleccionadas correspondieron a las siguientes fechas: 18 de diciembre del 2000, 09 de julio del 2005, 09 de septiembre del 2010 y 23 de enero del año 2017. Las imágenes satelitales corresponden a los satélites Landsat 7 y 8 y tienen una resolución de 30x30 m.

3.2.1.1.1 Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Para el pre-procesamiento de las imágenes se usó el software ArcGis. En este, se utilizó la herramienta de Pansharpning para mejorar la calidad en las imágenes satelitales, cambiando a una resolución espacial de 15x15 m. Se delimito el área de estudio y se hizo un corte de la imagen. Debido a que las imágenes del año 2005 y 2010 presentaban bandeo por una mala calibración entre detectores de los satélites, se realizó una corrección con ayuda de la herramienta GapFill (Figura 2).

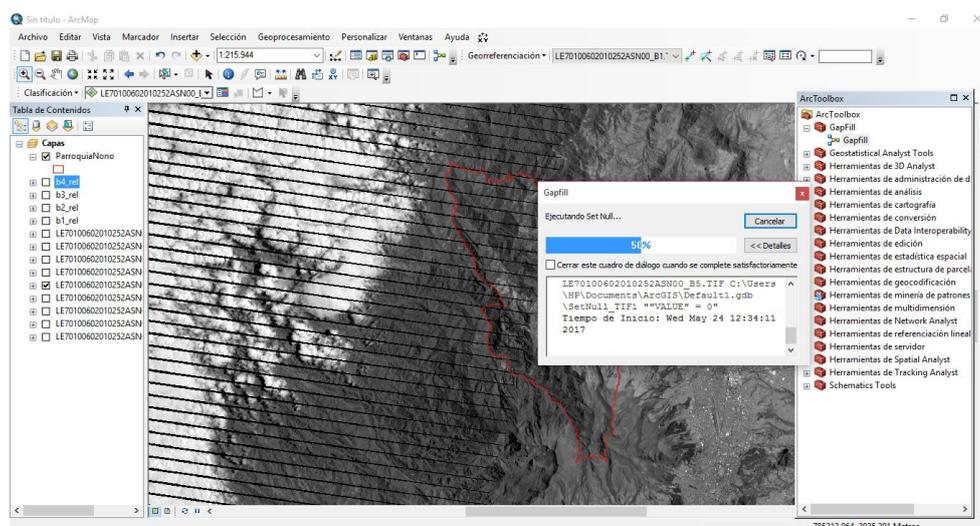


Figura 2. Corrección de bandeo en la imagen satelital con la herramienta de GapFill.

3.2.1.1.2 Clasificación de las imágenes

Se realizó dos tipos de clasificación de las imágenes, una clasificación no supervisada con el software ArcGis y una clasificación supervisada con el software de PCI Geomatics.

La clasificación no supervisada se realizó en el software ArcGis. Debido a que

es una clasificación no supervisada y las imágenes no son de buena resolución, solo se diferenciaron dos tipos de cobertura. Con la herramienta Iso Cluster, se definieron dos usos de suelo (Coberturas) correspondientes a vegetación natural (boscosa y arbustiva) y antrópica (pastos y cultivos).

La clasificación supervisada se realizó en PCI Geomatics, en primer lugar, se definieron 6 tipos de uso de suelo que corresponden a: 1.- vegetación natural boscosa, 2.- vegetación natural arbustiva, 3.- pastos y cultivos (recién cultivados), 4.- pastos y cultivos, 5.- páramo y 6.- zona urbana. Se establecieron sitios de entrenamiento, estos sitios son zonas que fueron identificadas previamente en campo de los diferentes usos de suelo en la parroquia de Nono.

Una vez seleccionados los sitios de entrenamiento, con la herramienta "Signature Separability: Brattacharyya Distance", se analizó la separabilidad de las 6 clases previamente definidas. Con un índice que va de 0 a 2, siendo 0 las clases sobrepuestas y 2 clases totalmente separadas; en la Figura 3, para el año 2000 se observa que todas las clases tienen una buena separabilidad entre ellas. En el Anexo 1 se indica los resultados de este análisis para los años 2005, 2010 y 2017.

Signature Separability

Bhattacharyya Distance | Transformed Divergence

Separability Measure: Bhattacharyya Distance

Average separability: 1.943181
 Minimum separability: 1.542113
 Maximum separability: 1.999999
 Signature pair with
 Minimum separability: (Bosque 1, Bosque 2)

Table display: Matrix Sorted List

| Name | Bosque 1 | Bosque 2 | Pastos y cul | Pastos recie | Páramo |
|--------------|----------|----------|--------------|--------------|----------|
| Bosque 2 | 1.542113 | | | | |
| Pastos y cul | 1.999872 | 1.998847 | | | |
| Pastos recie | 1.999999 | 1.991275 | 1.967845 | | |
| Páramo | 1.943474 | 1.971640 | 1.841637 | 1.999599 | |
| Urbano | 1.999981 | 1.999988 | 1.955902 | 1.999934 | 1.935612 |

Save Report Close

Figura 3. Separabilidad de las clases definidas. Bosque 1= Vegetación natural Boscosa, Bosque 2= Vegetación natural arbustiva.

Luego se corrió la clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud, que da un reporte de los resultados de la matriz de confusión y del coeficiente Kappa, información que valida la clasificación del mapa. La matriz de confusión indica el número de píxeles comunes entre cada clase y el porcentaje de exactitud global de la clasificación. Los valores de Kappa están en un rango entre 0 y 1, por debajo de 0,4 se considera una clasificación pobre, entre 0,41 y 0,60 se considera como moderada, entre 0,61 y 0,75 se considera buena, entre 0,76 y 0,80 se considera excelente y a partir de 0,81 la clasificación puede considerarse casi perfecta (Richards, 2013). Luego se realizó una agregación entre las clases ya identificadas; que corresponde agregar las dos clases de vegetación natural y a los dos tipos de sistema pasto-cultivo, dando como resultado 4 nuevas clases (o tipos de uso de suelo). Seguido de esto se realizó una edición de clases con la herramienta Mask, en donde se reclasifican zonas específicas, para los casos en que el software realice una clasificación errada.

Una vez realizada la clasificación supervisada en PCI Geomatics, se exportó las imágenes en formato TIFF para trabajar en ArcGis y determinar el área de los diferentes usos de suelo identificados.

3.2.1.2 Determinación de áreas de cobertura de los usos de suelo

Una vez realizada la clasificación no supervisada, se transformó la imagen raster a polígonos y se agruparon los polígonos por el tipo de clasificación. Mediante las herramientas de la tabla de atributos, se agregó un nuevo campo y se calculó el área de los polígonos. Este proceso se realizó para todos los años en estudio y se creó una base de datos para el posterior análisis y comparación.

Para la determinación del área de cobertura mediante clasificación supervisada, de la tabla de atributos provenientes del archivo TIFF del PCI Geomatics, se multiplico el número de píxeles de cada tipo de uso de suelo por

la resolución de la imagen satelital correspondiente, que en todos los casos fue de 15x15 m y se obtuvo el área de cada cobertura en km².

3.2.1.3 Cálculo del incremento de la frontera agrícola

Para estimar el incremento de la frontera agrícola y el porcentaje de pérdida de vegetación natural, se calculó las diferencias de áreas de cobertura natural (boscosa- arbustiva) del año 2000 en relación con las coberturas de los años 2005, 2010 y 2017 y establecer la dinámica de uso del suelo en la zona de estudio.

3.3 Objetivo 2

Para el cumplimiento del segundo objetivo “Evaluar la afectación a las propiedades físico químicas del suelo Densidad real (Dr), Densidad aparente (Da), Porosidad, Textura, pH y C por el cambio de uso de suelo” se procedió a caracterizar los suelos en los parámetros mencionados.

3.3.1 Caracterización del suelo

Selección de sitios de muestreo

El total de muestras tomadas para el estudio fue de 120, ochenta fueron tomadas por los estudiantes de la carrera de Ingeniera Ambiental para el proyecto de vinculación con la comunidad bajo la dirección de Magdalena López. Las muestras corresponden a las zonas alta y media de la parroquia. Adicionalmente, se completó el número de muestras de suelo (40) establecidas para este trabajo. Las muestras de suelo corresponden a cuatro tipos de cobertura dominantes en el paisaje: vegetación natural (arbustiva – arbórea), pasto, cultivo y pino.

Para las muestras de suelo del proyecto de Vinculación se escogieron sitios de similitud biogeográfica con al menos tres parcelas cercanas con diferente tipo de cobertura. Mientras que las restantes cuarenta muestras para este estudio fueron tomadas de manera indistinta en los cuatro tipos de cobertura. Cada parcela tuvo al menos media hectárea de extensión. En cada parcela se tomó coordenadas geográficas (X, Y) y altitud (Tabla 1).

Se tiene 60 puntos de muestreo debido a que se tomaron muestras en la misma parcela a dos profundidades, de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm.

Tabla 1.

Puntos de muestreo con sus respectivas coordenadas e identificación de uso de suelo.

| Punto | Uso de suelo | Coordenadas | | Altitud |
|-------|--------------|-------------|---------|---------|
| | | X | Y | m |
| 1 | V. Natural | 768157 | 9988377 | 3300 |
| 2 | V. Natural | 769701 | 9987610 | 3590 |
| 3 | V. Natural | 770044 | 9990334 | 2978 |
| 4 | V. Natural | 769985 | 9990440 | 2955 |
| 5 | V. Natural | 773072 | 9987873 | 3440 |
| 6 | V. Natural | 771829 | 9988031 | 3461 |
| 7 | V. Natural | 768336 | 9992404 | 3330 |
| 8 | V. Natural | 769007 | 9991844 | 2885 |
| 9 | V. Natural | 772776 | 9988974 | 3298 |
| 10 | V. Natural | 772296 | 9996682 | 2625 |
| 11 | V. Natural | 771542 | 9995955 | 2649 |
| 12 | V. Natural | 769342 | 9987890 | 3635 |
| 13 | V. Natural | 770461 | 9988245 | 3470 |
| 14 | V. Natural | 770760 | 9995326 | 2696 |
| 15 | V. Natural | 769432 | 9993091 | 2703 |
| 16 | V. Natural | 769917 | 9992860 | 2724 |
| 17 | V. Natural | 770228 | 9991096 | 2874 |
| 18 | Pasto | 772224 | 9996708 | 2627 |
| 19 | Pasto | 772311 | 9997375 | 2659 |

| | | | | |
|----|---------|--------|---------|------|
| 20 | Pasto | 771490 | 9995661 | 2674 |
| 21 | Pasto | 770098 | 9991328 | 2839 |
| 22 | Pasto | 771710 | 9995947 | 2623 |
| 23 | Pasto | 769824 | 9991229 | 2863 |
| 24 | Pasto | 769413 | 9988026 | 3576 |
| 25 | Pasto | 769990 | 9987792 | 3545 |
| 26 | Pasto | 770805 | 9994520 | 2624 |
| 27 | Pasto | 770801 | 9994521 | 2533 |
| 28 | Pasto | 769446 | 9993006 | 2710 |
| 29 | Pasto | 769789 | 9992119 | 2772 |
| 30 | Pasto | 768709 | 9988272 | 3548 |
| 31 | Pasto | 769687 | 9987780 | 3548 |
| 32 | Pasto | 770507 | 9990086 | 2954 |
| 33 | Pasto | 770112 | 9990308 | 2970 |
| 34 | Pasto | 781240 | 9980126 | 2890 |
| 35 | Pasto | 773196 | 9987981 | 3447 |
| 36 | Pasto | 771906 | 9988003 | 3478 |
| 37 | Pasto | 772729 | 9988700 | 3333 |
| 38 | Pasto | 769106 | 9992016 | 2892 |
| 39 | Pasto | 772688 | 9988928 | 3314 |
| 40 | Cultivo | 768756 | 9988273 | 3460 |
| 41 | Cultivo | 769598 | 9987640 | 3574 |
| 42 | Cultivo | 788903 | 9782012 | 2980 |
| 43 | Cultivo | 773251 | 9987984 | 3447 |
| 44 | Cultivo | 771816 | 9987923 | 3481 |
| 45 | Cultivo | 772738 | 9988676 | 3333 |
| 46 | Cultivo | 772710 | 9988952 | 3314 |
| 47 | Cultivo | 771468 | 9995831 | 2667 |
| 48 | Cultivo | 771750 | 9989452 | 3315 |
| 49 | Cultivo | 770784 | 9995201 | 2670 |
| 50 | Cultivo | 769452 | 9993310 | 2621 |
| 51 | Cultivo | 769427 | 9993164 | 2704 |
| 52 | Pino | 770315 | 9991461 | 3198 |

| | | | | |
|----|------|--------|---------|------|
| 53 | Pino | 788903 | 9782012 | 3269 |
| 54 | Pino | 769026 | 9992016 | 2892 |
| 55 | Pino | 769814 | 9991178 | 2871 |
| 56 | Pino | 772377 | 9997479 | 2686 |
| 57 | Pino | 770858 | 9988189 | 3266 |
| 58 | Pino | 770599 | 9991089 | 2998 |
| 59 | Pino | 770037 | 9991892 | 2845 |
| 60 | Pino | 770938 | 9995129 | 2686 |

3.3.1.1 Muestreo de suelo

Para el muestreo de suelos se utilizó el siguiente procedimiento:

Se tomó 10 submuestras en cada una de las parcelas en forma de zigzag, cada 50m, a dos profundidades (0-10 cm y de 10-30 cm) utilizando un barreno. Teniendo un total de 60 parcelas muestreadas, y 120 muestras de suelo. Las 10 submuestras de cada profundidad fueron homogeneizadas en una bandeja y luego mediante cuarteo se tomó un kilogramo de suelo, las cuales fueron etiquetadas con el uso de suelo, la fecha, la profundidad y el nombre del recolector, obteniéndose 2 muestras compuestas por parcela. Adicionalmente se tomó una muestra sin disturbar a cada profundidad con anillos para determinación de densidad aparente. Las muestras compuestas fueron procesadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UDLA, en donde fueron secadas al aire y tamizadas en una malla de 2 mm, previo a la caracterización física - química.

3.3.1.2 Densidad Real

Se pesó 10g de la muestra de suelo seco y colocó el suelo en una probeta de 100ml, luego se añadió 50ml de agua destilada. Se midió el aumento de volumen en la probeta, que corresponde al volumen de las partículas de suelo. Para calcular la densidad se aplica la siguiente ecuación.

$$D_r = \text{masa del suelo} / \text{volumen partículas.} \quad (\text{Ecuación 1})$$

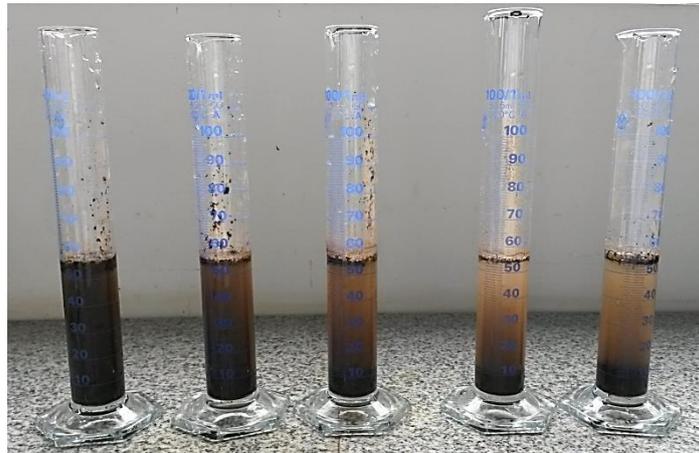


Figura 4. Determinación de densidad real

3.3.1.3 Densidad Aparente

La muestra de suelo sin disturbar fue tomada con el anillo, esta se colocó en papel aluminio y se secó 105°C durante 24 horas hasta esperar que el suelo ya no tenga una variación en su peso. Para calcular la densidad aparente se aplica la siguiente ecuación.

$$D_a = \text{masa del suelo seco} / \text{volumen del cilindro.} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Una vez determinada la densidad real y aparente, se calcula la porosidad con la siguiente ecuación.

$$\text{Porosidad} = [100 - (D_a / D_r)] * 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

3.3.1.4 Textura

El análisis de textura se hizo con el método del hidrómetro de Bouyoucos, este se basa en la distribución de las partículas del suelo.

Se pesó 50g de suelo en vasos de precipitación y se añadió 40 ml de la solución de hidróxido de sodio 0,1N. Se dejó reposar la muestra por 24 horas.

Pasadas las 24 horas, se agito la muestra por 10 minutos con agua destilada. Una vez terminada la agitación, se trasvasó la muestra a una probeta de 1000ml y se aforó a ese volumen con agua destilada. Se agitó la muestra por 20 segundos y se colocó el hidrómetro, pasados 40 segundos se realizó la primera lectura. Luego de 2 horas de reposo, sin agitar se volvió a colocar el hidrómetro y se tomó una segunda lectura (Medina, García Coronado y Nuñez, 2007).

Para calcular la textura se aplicó la siguiente ecuación:

$$\%Limo + \%Arcilla = 100 * (Lectura\ 1/50) \quad (Ecuación\ 4)$$

$$\%Arcilla = 100 * (Lectura\ 2/50)$$

$$\% Arena = 100 - \%Arcilla - \%Limo$$



Figura 5. Determinación del suelo por el método de Bouyoucos.

3.3.1.5 pH

Se pesó 25g de la muestra de suelo y se agregó 50ml de agua destilada (relación 1:2,5), se agitó por 5 minutos a 400 RPM y se dejó reposar por 20 minutos. Una vez reposada, se procedió a medir el pH con el potenciómetro previamente ya calibrado. Se realizó el mismo procedimiento para determinar

pH en KCl, a diferencia de agregar 50 ml de agua destilada se agregó 50ml de la solución de KCl 1 molar. Se utilizó un pH-metro HANNA HI 2550.



Figura 6. Determinación de pH en la muestra de suelo

3.3.1.6 Materia Orgánica

La materia orgánica fue determinada por el método de Walkley y Black, que se basa en un proceso de oxidación en frío del carbón por un exceso de dicromato de potasio en un medio ácido.

La muestra de suelo previamente debe estar molida y tamizada a 0.25 mm. Se pesó entre 0,1g y 0,5g de suelo, dependiendo de la cantidad de materia orgánica de la muestra. Se agregó 5 ml de dicromato de potasio y 10 ml de ácido sulfúrico concentrado al 97% por muestra. Se agitó por 1 minuto y se dejó reposar por media hora. Una vez pasada la media hora se agregó en el siguiente orden: 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico al 85% y de 10 a 15 gotas de difenilamina. Se tituló el exceso de dicromato con Sal de Morh. El viraje de color es de azul a verde. Se anotó el volumen consumido y se calculó el porcentaje de materia orgánica con ecuación 5. Se realizó un blanco para el cálculo.

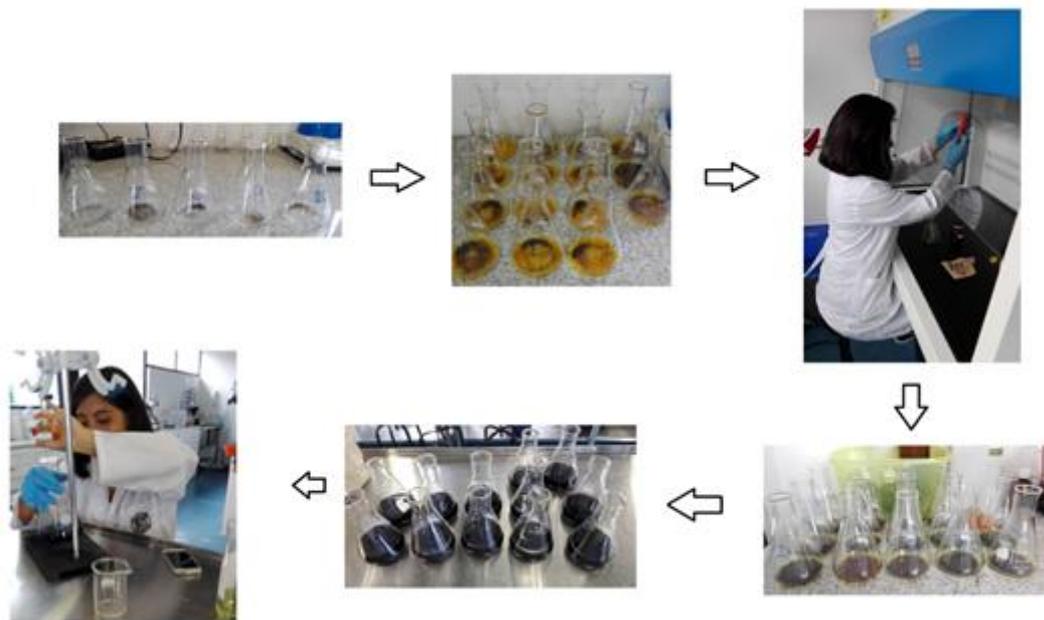


Figura 7. Proceso para la determinación de materia orgánica en el suelo

Para calcular la materia orgánica se aplicó la siguiente ecuación.

$$MO = \frac{(V_{of} - V_F) \cdot N \cdot (0.335) \cdot (1.72) \cdot (1.1)}{[PM]} \quad (\text{Ecuación 5})$$

MO: Materia orgánica

V_{of}: Volumen de titulación en el blanco

V_F: Volumen de titulación de la muestra

N: Normalidad (0.5)

PM: Peso de la muestra (0.1 – 0.5)

3.4 Análisis estadístico

Se realizó un análisis ANOVA One Way con el que se determinó si los valores promedios de los parámetros del suelo son significativamente diferentes por el cambio de uso del suelo de vegetación natural a pasto, cultivo y/o pino en la parroquia de Nono.

4 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 Mapas de cobertura de uso de suelo de la parroquia de Nono y cálculo de áreas de cobertura vegetal para los años 2000, 2005, 2010 y 2017.

Se trabajó con imágenes satelitales Landsat 7 y 8, y utilizando clasificación no supervisada y supervisada, se elaboraron los mapas y se calculó el área de avance de la frontera agropecuaria.

4.1.1 Clasificación no supervisada

Año 2000

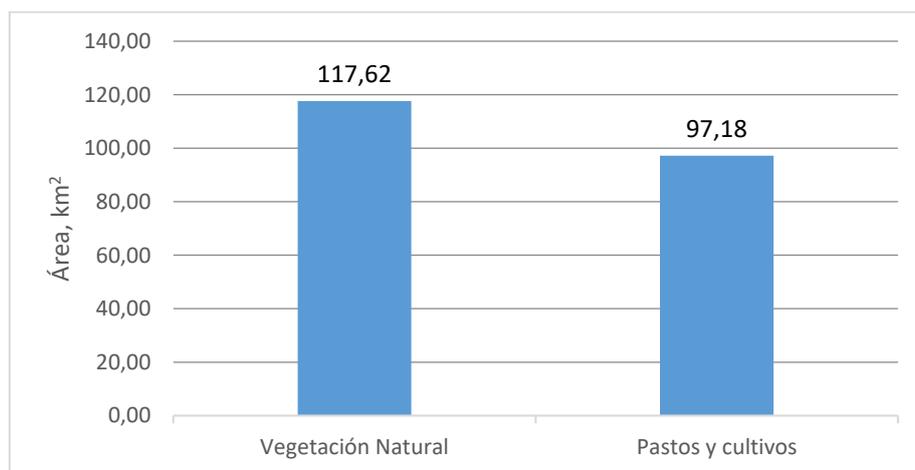


Figura 8. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2000. Clasificación No Supervisada.

En el año 2000 se puede ver que el área de vegetación natural abarca 117,62 km² (55%) de la parroquia, y el sector agropecuario 97,18 km² (45%).

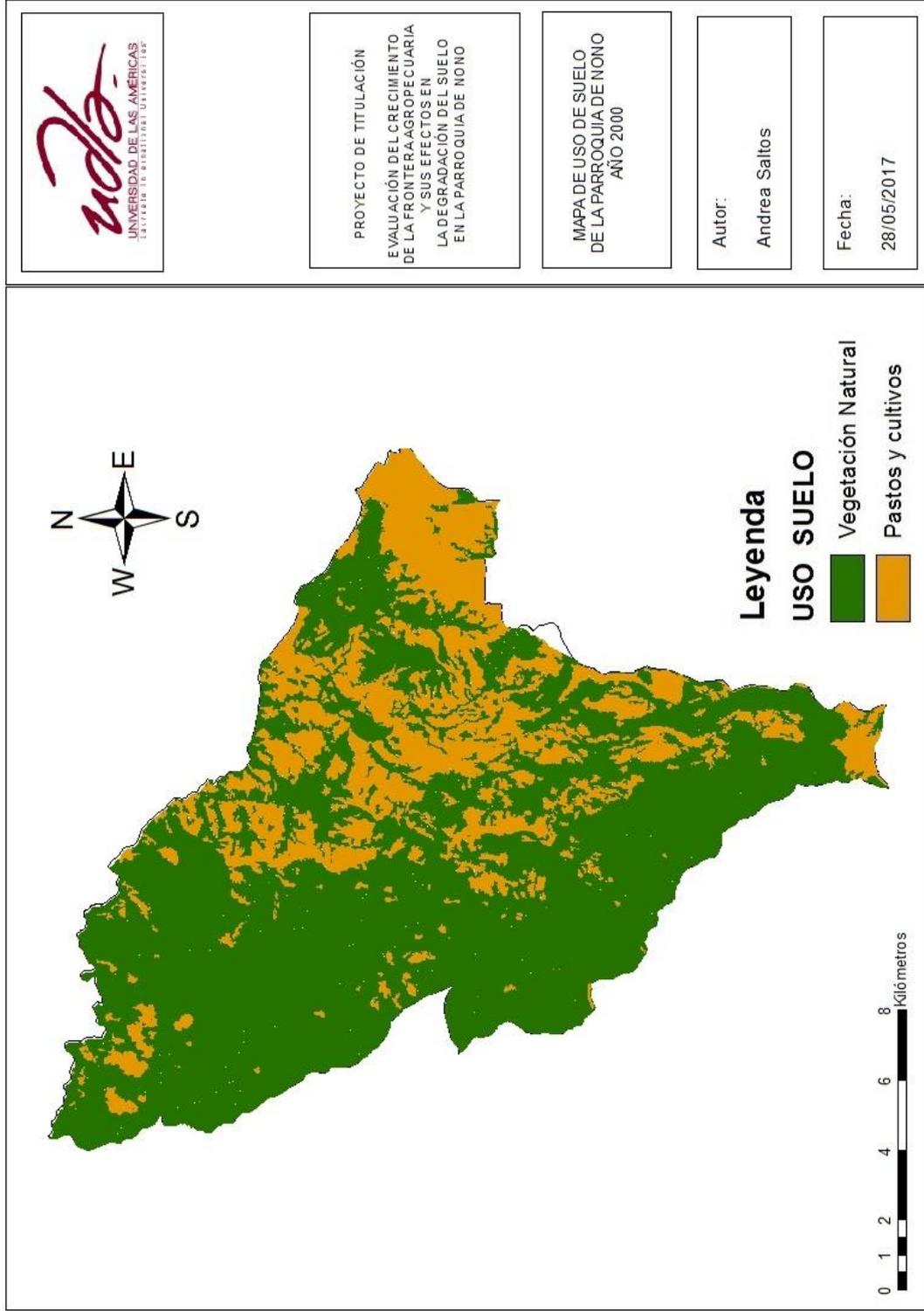


Figura 9. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2000. Clasificación No Supervisada.

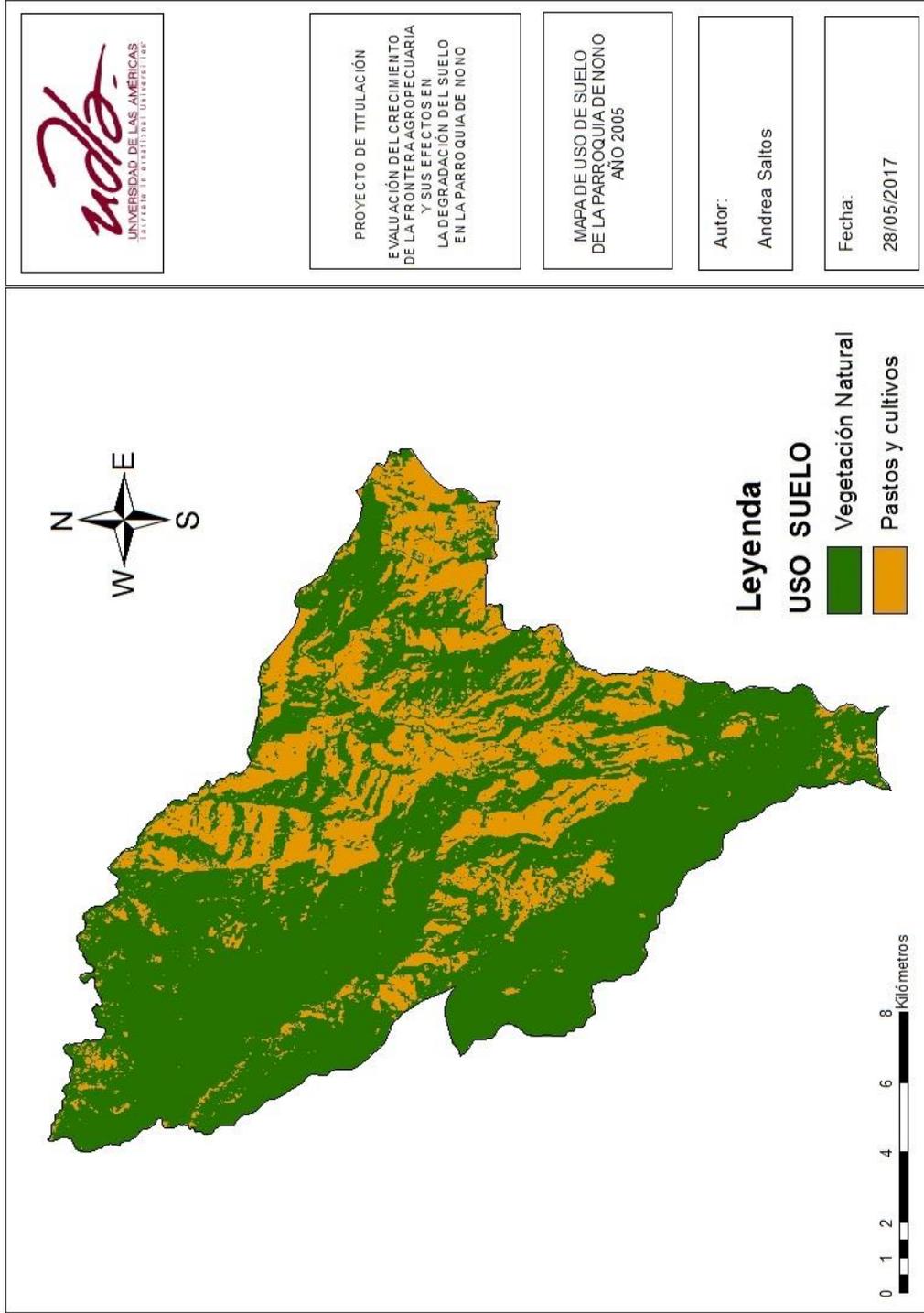


Figura 10. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2005. Clasificación No Supervisada.

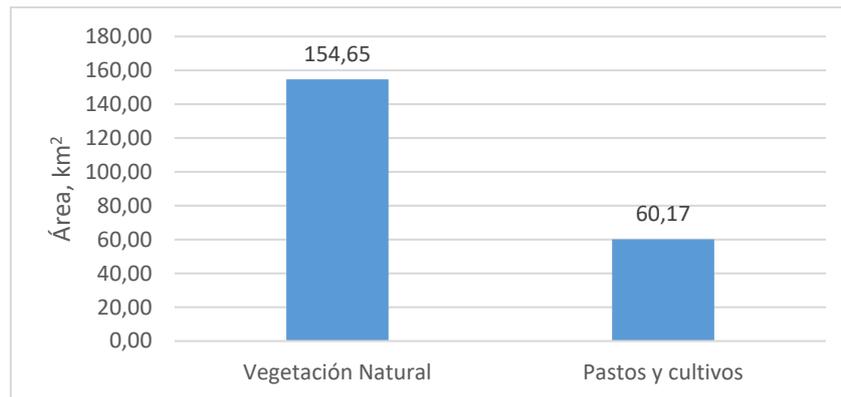


Figura 11. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2005. Clasificación No Supervisada

En el año 2005 se puede ver que el área de vegetación natural aumentó a 154,65 km² (72%) de la parroquia, y el sector agropecuario disminuyó a 60,17 km² (28%).

Año 2010

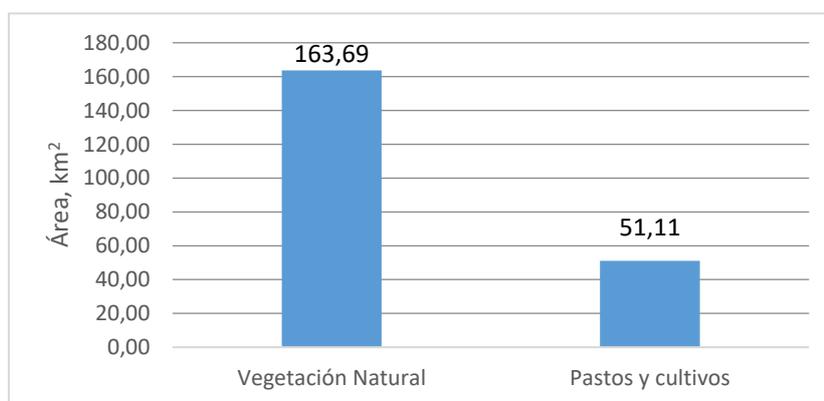


Figura 12. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2010. Clasificación No Supervisada.

En el año 2010, la cobertura de vegetación natural cambió a 163,69 km² (76%) y la de pastos y cultivos a 51,11 km² (24%).

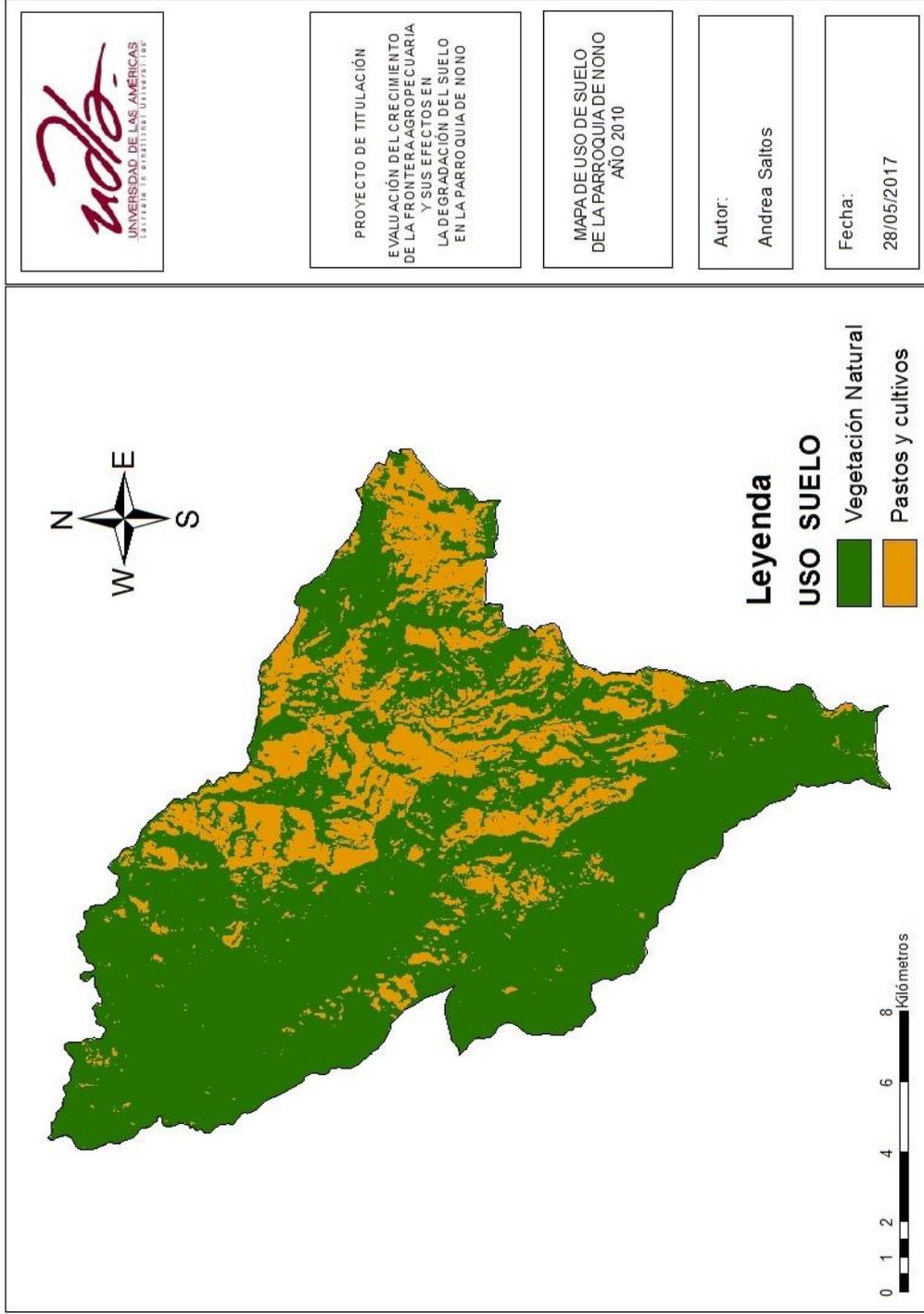


Figura 13. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2010. Clasificación No Supervisada.

Año 2017

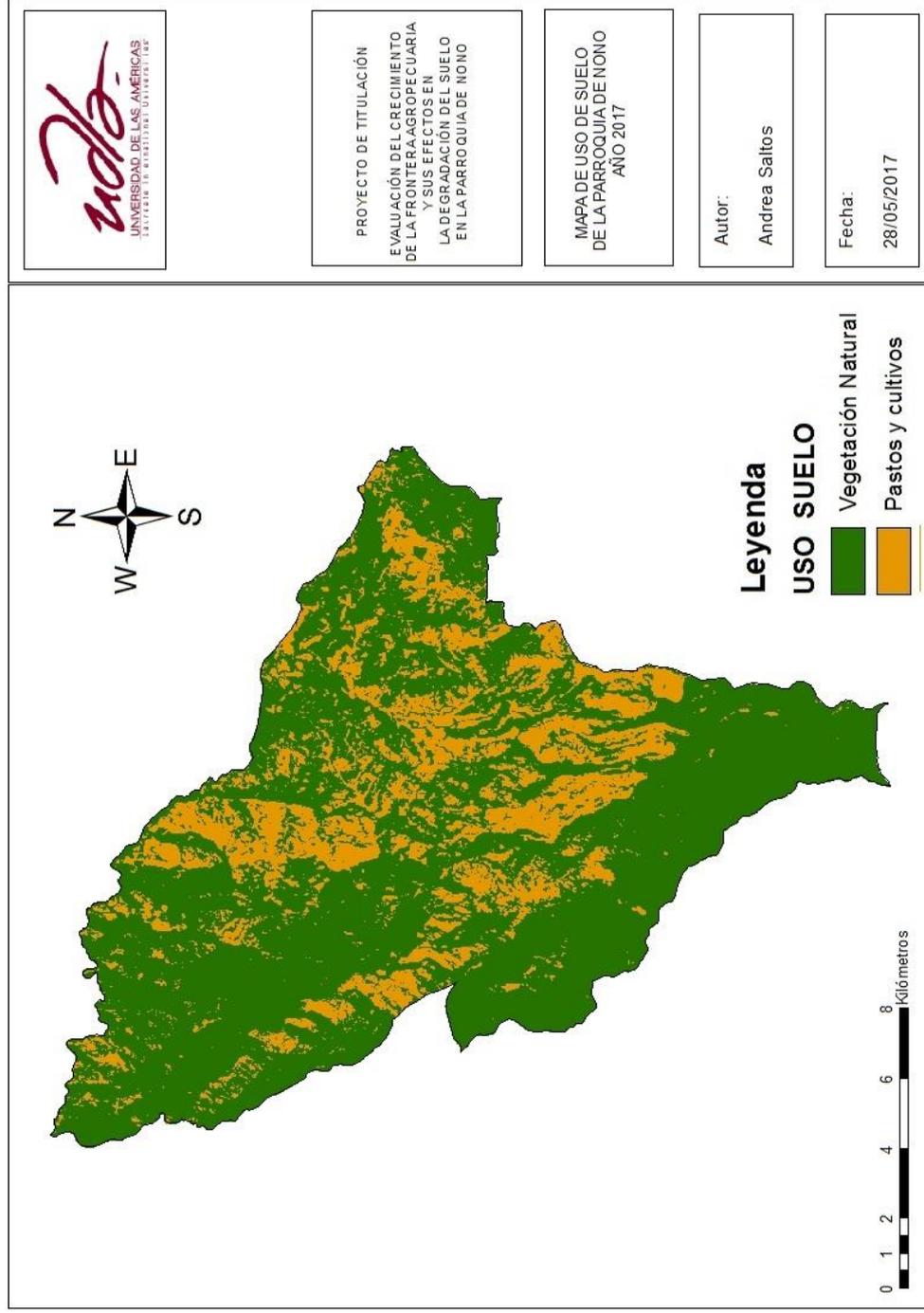


Figura 14. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2017. Clasificación No Supervisada.

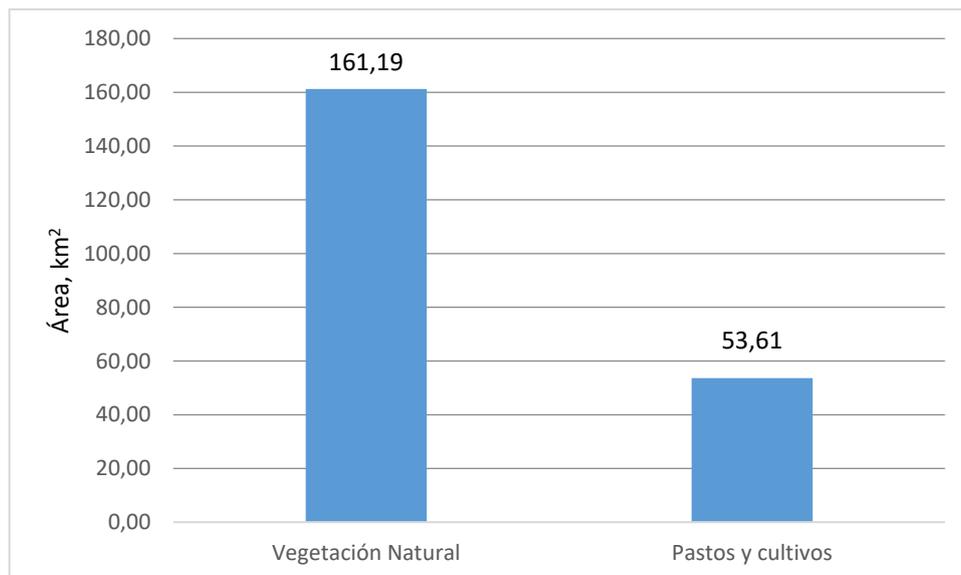


Figura 15. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2017. Clasificación No Supervisada.

Para el año 2017, la cobertura de vegetación natural disminuyó a 161,19 km² (75%) y la del sector agropecuario aumentó a 53,61 km² (25%).

4.1.2 Clasificación supervisada

Año 2000

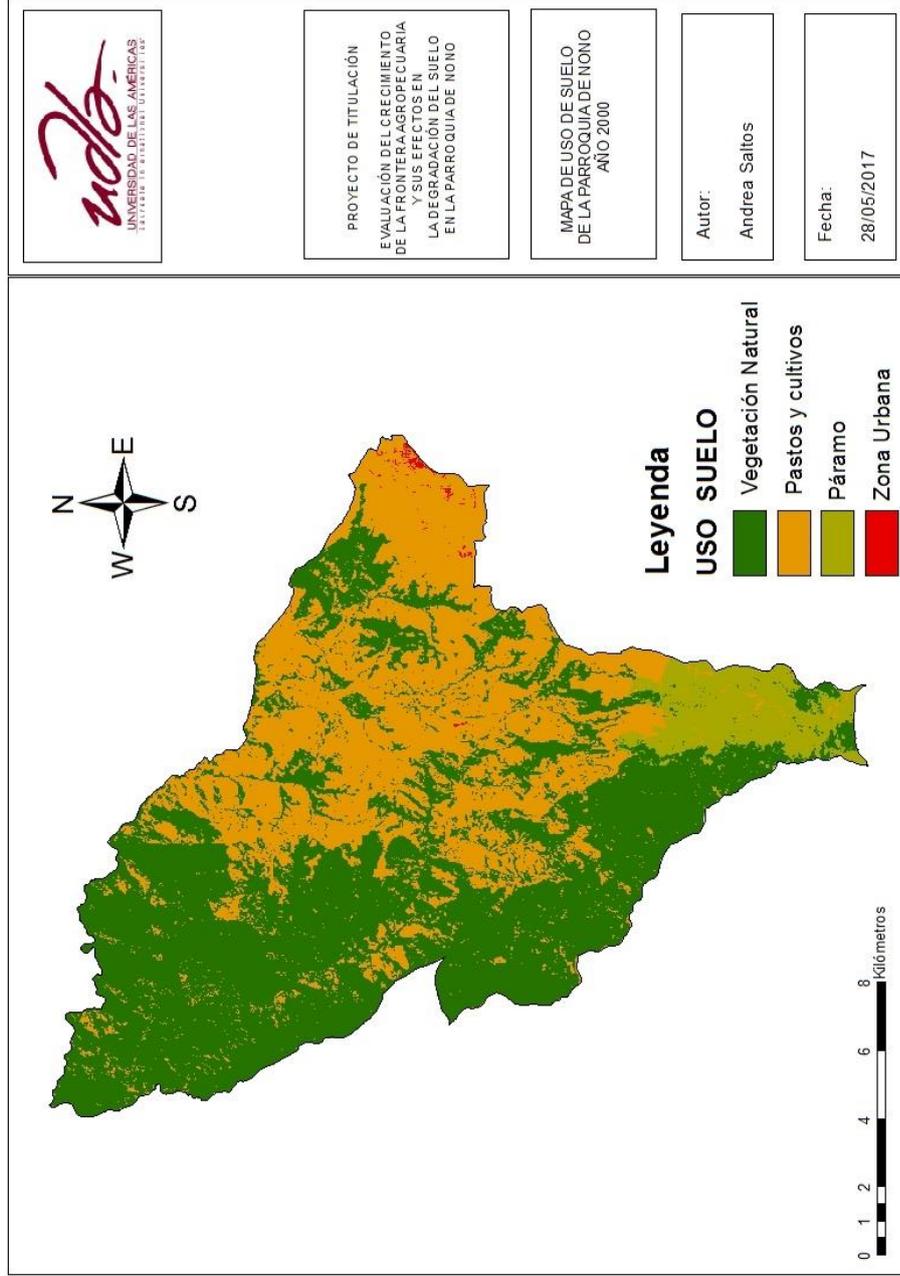


Figura 16. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2000. Clasificación Supervisada.

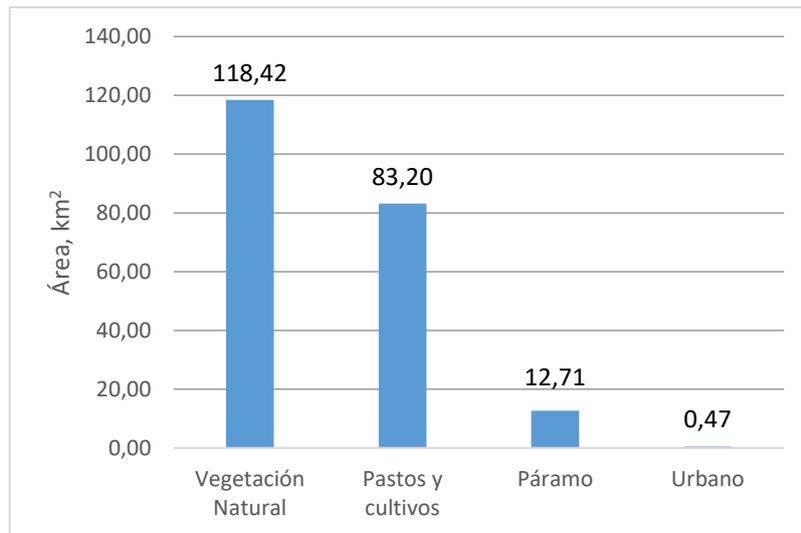


Figura 17. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2000. Clasificación Supervisada.

El área de vegetación natural cuenta con aproximadamente 120 km² (55%) en el periodo de diciembre del año 2000, esta vegetación comprende tanto la parte boscosa como la arbustiva de la zona. Los pastos y cultivos son la segunda cobertura más abundante, esta comprende 83 km² (38%). La zona del páramo abarca 12 km² (6%) mientras que la zona urbana ocupa tan solo 0,47 km² dentro de la parroquia.

La precisión del mapa de cobertura es alta, con una precisión general de 82,7% y el coeficiente Kappa es de 0,82.

Año 2005

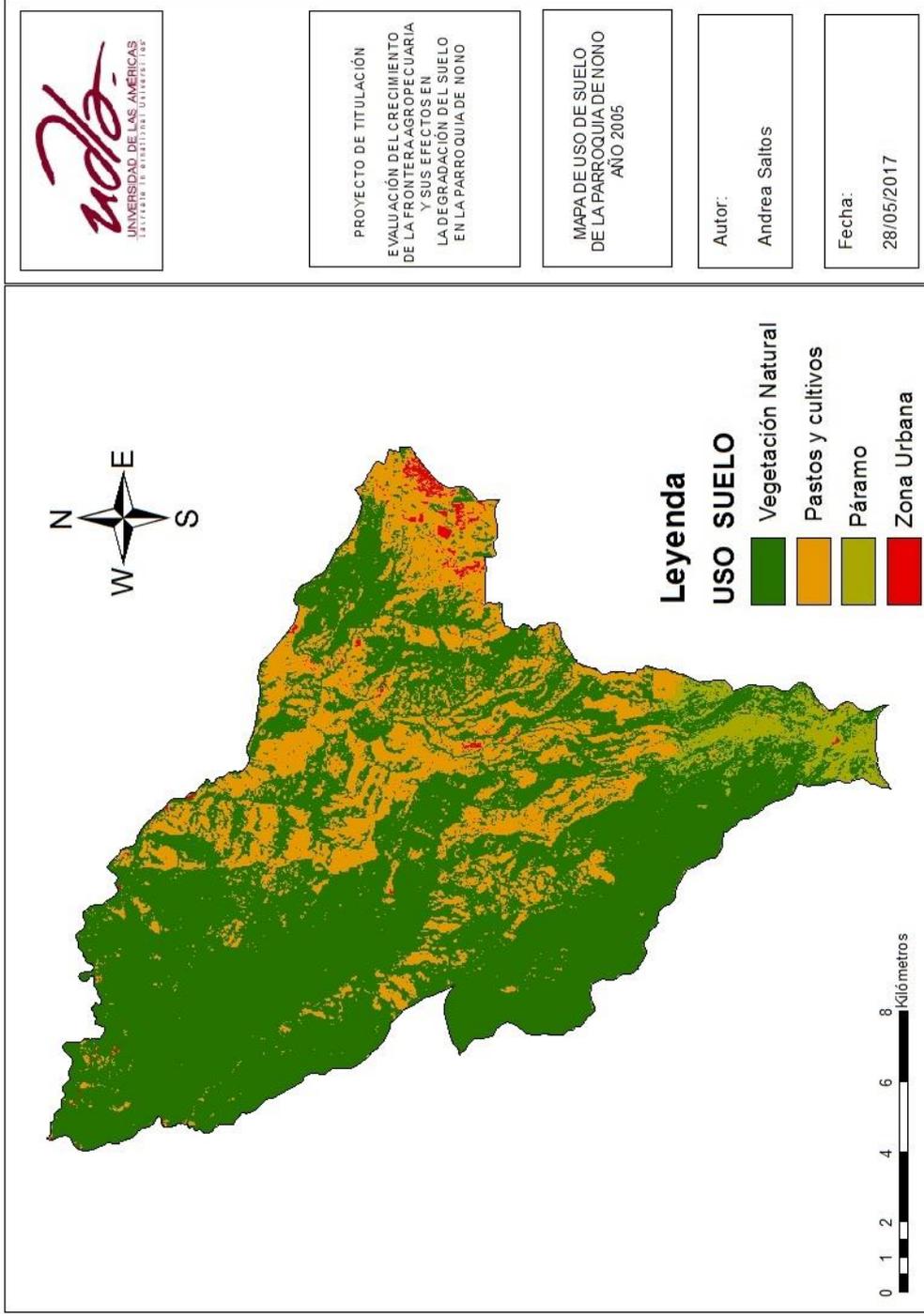


Figura 18. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2005. Clasificación Supervisada.

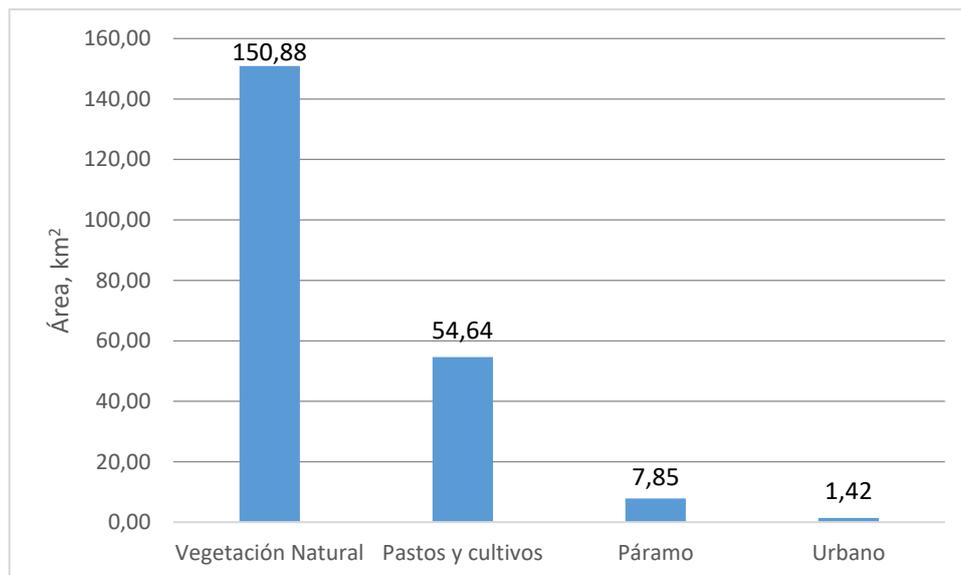


Figura 19. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2005. Clasificación Supervisada.

En el periodo de julio del 2005, el área de vegetación natural cuenta con 150 km² (70%). Los pastos y cultivos son la segunda cobertura más abundante con 54 km² (25%). La zona del páramo abarca 8 km² (3%) mientras que la zona urbana ocupa 1,42 km² dentro de la parroquia de Nono.

La precisión del mapa de cobertura es alta, con una precisión general de 85,6% y el coeficiente Kappa es de 0,87.

Año 2010

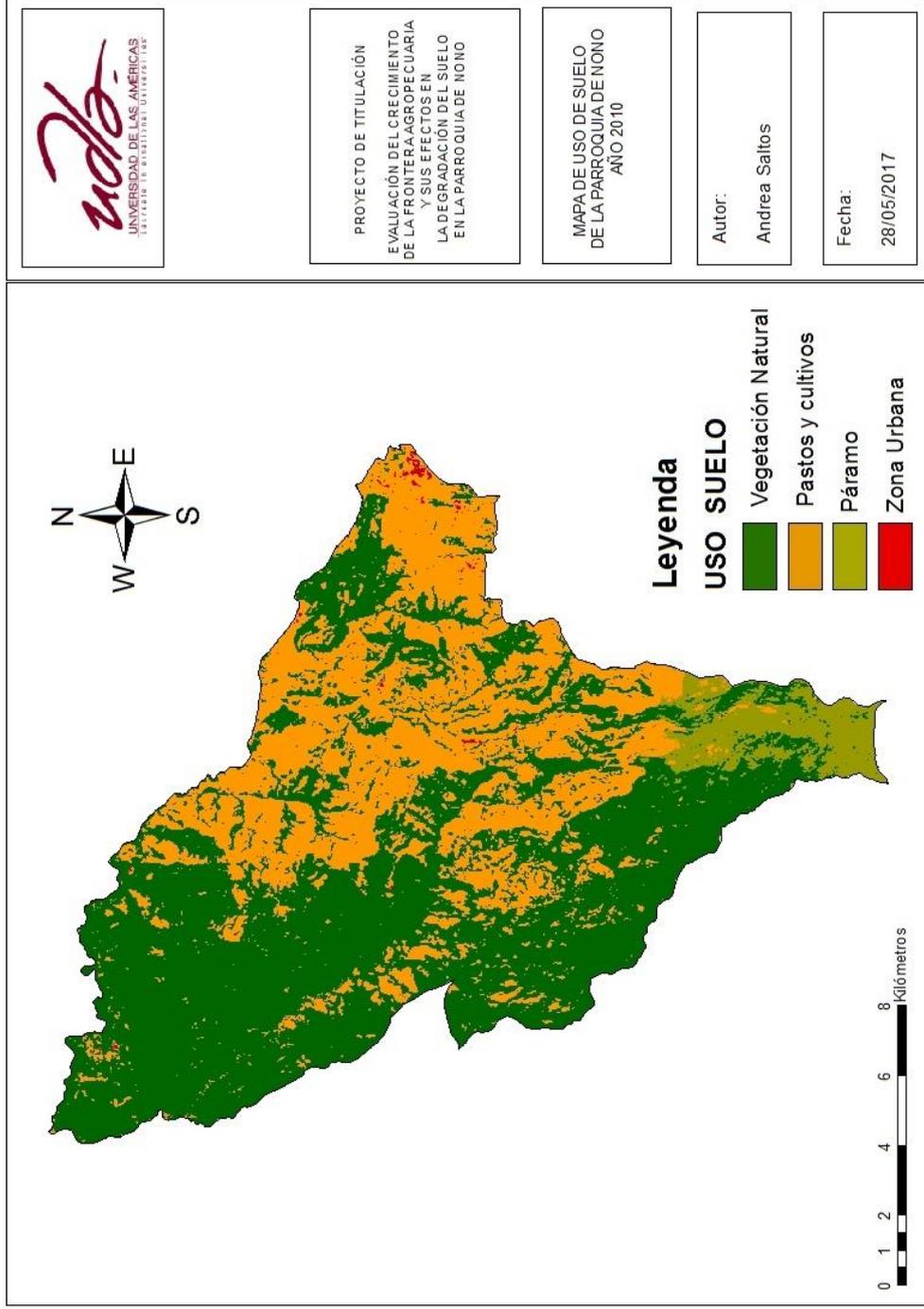


Figura 20. Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono, año 2010. Clasificación Supervisada.

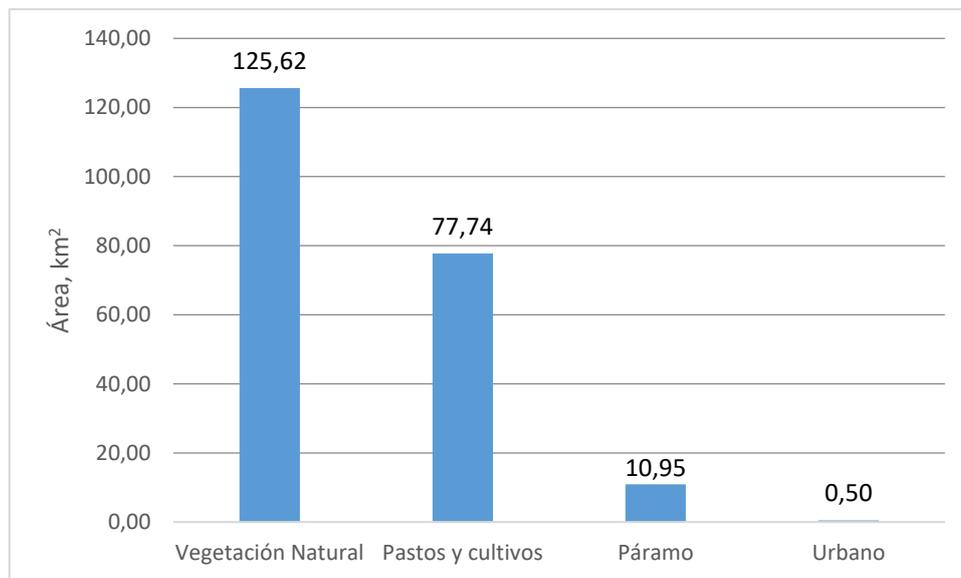


Figura 21. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2010. Clasificación Supervisada.

En el año 2010 se presentó una cobertura de vegetación natural de 125 km² (58%), seguida por pastos y cultivos con 77 km² (36%) y la zona de páramo presenta un área de 11 km² aproximadamente (5%). La zona urbana cuenta con la menor cobertura de la parroquia 0,50 km².

La precisión del mapa de cobertura es de 77,3% y el coeficiente Kappa es de 0,76.

Año 2017

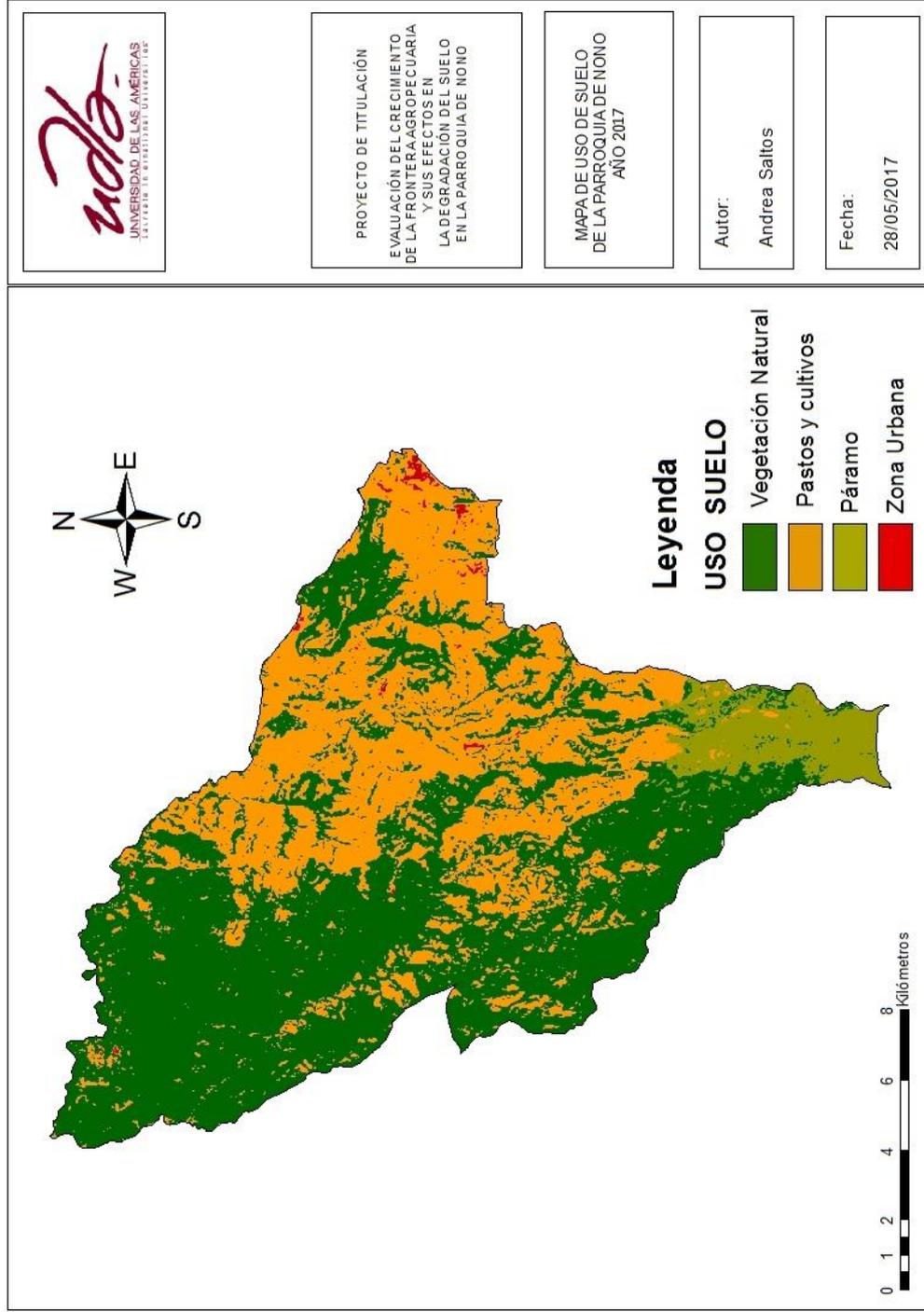


Figura 22 Mapa de Uso de Suelo de la Parroquia de Nono año 2017 Clasificación Sinervisada

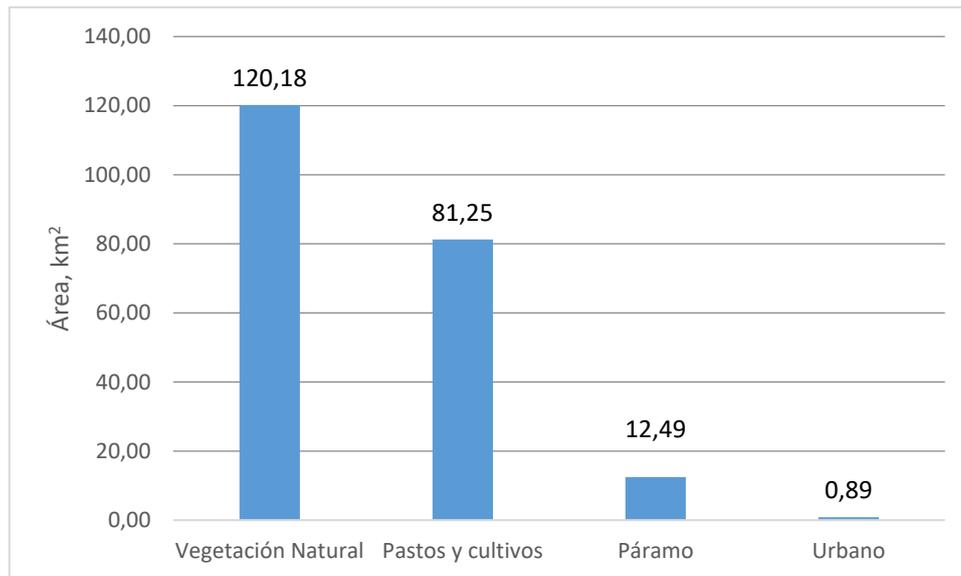


Figura 23. Cobertura de los usos de suelo de la parroquia de Nono para el año 2017. Clasificación Supervisada.

El área de vegetación natural cuenta con aproximadamente 120 km² (55%) en el periodo de enero del año 2017, esta vegetación comprende tanto la parte boscosa como la arbustiva de la zona. Los pastos y cultivos son la segunda cobertura más abundante, esta comprende 81 km² (38%). La zona del páramo abarca 12 km² (6%) mientras que la zona urbana ocupa tan solo 0,89 km² dentro de la parroquia.

La precisión del mapa de cobertura es alta, con una precisión general de 82,2% y el coeficiente Kappa es de 0,82.

4.2 Evaluación del crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono

Con imágenes no supervisadas

En el año 2000 se presenta un área de vegetación natural de 117,62 km² y 97,18 km² de pastos y cultivos, para el año 2005 la vegetación natural aumenta

a un área de 154,65 km², mientras que la actividad agropecuaria disminuyó a 60,17 km², el crecimiento continúa en el año 2010, pero en menor porcentaje, la vegetación natural cambió a 163,69 km² y los pastos y cultivos disminuyeron a 51,11 km². Del año 2010 al 2017 se presenta una pequeña pérdida del 1% de vegetación natural y así mismo un 1% de crecimiento de la frontera agropecuaria.

Los resultados presentados en Plan de Ordenamiento Territorial de la parroquia son similares a los obtenidos en este estudio. La superficie de vegetación natural presenta un 74,27% y los sistemas productivos un 24,11% para el año 2013, según los resultados obtenidos de la clasificación no supervisada del año 2010 hay un 76% de vegetación natural y un 24% de pastos y cultivos.

Tabla 2.

Resultados del avance de la frontera agropecuaria de la clasificación no supervisada de mapas para la parroquia de Nono.

| Año | 2000 | | 2005 | | 2010 | | 2017 | |
|--------------------|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|
| Uso de Suelo | Área (km ²) | % |
| Vegetación Natural | 117,62 | 55 | 154,65 | 72 | 163,69 | 76 | 161,19 | 75 |
| Pastos y cultivos | 97,18 | 45 | 60,17 | 28 | 51,11 | 24 | 53,61 | 25 |
| Total | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 |

Con imágenes supervisadas

En el año 2000, la parroquia de Nono tenía una cobertura del 55% de vegetación natural, 38% de pastos y cultivos, y un 6% de páramo; para el año 2005 la cobertura natural aumentó en un 15% y el sector agropecuario disminuyó en un 13%. A partir del año 2005, hubo un decrecimiento del área de vegetación natural del 13 y 15% para los años 2010 y 2017 respectivamente en

relación al 2005 y un incremento de 11 y 13% en la clase pasto-cultivo. Al observar los valores de áreas asignadas a pasto-cultivo, no existe casi variación para los años 2000, 2010 y 2017, pero si hay una diferencia con el año 2005 donde decrece la actividad agropecuaria en un 13%. El resurgimiento de la actividad agropecuaria luego del 2005 ocasiono las pérdidas de vegetación natural en rango de 12 al 14% y en similares porcentajes incremento la actividad antrópica. El área de páramo y de la clase de pasto-cultivo para el año 2000 y 2017 fueron similares. La dinámica del área de paramo fue: para el año 2000 abarcó el 5,8% del área total de la parroquia, pero en el año 2005 disminuye a 3,65% y en el año 2010 aumenta a 5,1%. Estas diferencias se deben al aumento de las áreas agrícolas en la zona del páramo, pero con la creación de la reserva Yanacocha, perteneciente a la fundación Jocotoco disminuyen para el año 2010 y se mantiene hasta el año 2017.

En relación a la zona urbana, según los datos del INEC, la parroquia presenta una disminución en el crecimiento poblacional del año 2001 al 2010, por emigrar a ciudades capitales. En el año 2005 se presenta un alto crecimiento de la población, y estos valores se reflejan en el crecimiento de la zona urbana en 0,44%; y para el año 2010 la población vuelve a disminuir por lo que la zona urbana decrece en 0,43%.

Tabla 3.

Resultados del avance de la frontera agropecuaria de la clasificación supervisada de mapas para la parroquia de Nono.

| Año | 2000 | | 2005 | | 2010 | | 2017 | |
|--------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| Uso de suelo | Área (km ²) | % |
| Vegetación Natural | 118,42 | 55,1 | 150,88 | 70,2 | 125,62 | 58,5 | 120,18 | 56 |
| Pastos y cultivos | 83,2 | 38,7 | 54,64 | 25,4 | 77,74 | 36,2 | 81,25 | 37,8 |
| Páramo | 12,7 | 5,92 | 7,85 | 3,65 | 10,95 | 5,1 | 12,49 | 5,81 |

| | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Zona Urbana | 0,47 | 0,22 | 1,42 | 0,66 | 0,5 | 0,23 | 0,89 | 0,41 |
| Total | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 | 214,8 | 100 |

4.3 Análisis de la clasificación de uso de suelo

Como se ve en la tabla 2 y 3, las áreas de las diferentes coberturas varían entre las dos metodologías usadas para la clasificación.

Según un estudio realizado en la región sierra de Tabasco por Rullán-Silva, Gama-Campillo, Galindo-Alcántara y Olthoff en el año 2011, sobre coberturas de suelo con clasificación no supervisada usando imágenes Landsat, obtuvieron una precisión del 59% en la clasificación, y esto debido a la complejidad del paisaje. Otro estudio aplicando clasificación no supervisada se realizó en el páramo de Belmira por (Polanco, 2012), con imágenes satelitales Landsat; esta clasificación presentó problemas al momento de distinguir las clases de cobertura vegetal, pero sirvió como base para una posterior clasificación supervisada en la que se obtuvo un 80% de precisión al comparar datos de campo con los mapas obtenidos de la clasificación. La diferencia de la superficie entre vegetación natural (VN) y clase pasto- cultivo (P-C) de los años 2010 y 2017 entre la clasificación no supervisada con valores altos de VN y menores de C-P que la clasificación supervisada puede deberse como lo menciona Rullán-Silva, (2011) a la complejidad del paisaje, con quebradas abruptas en la zona noreste y centro de la parroquia de Nono, debido a que la parroquia está formada por las laderas del volcán Pichincha.

La clasificación supervisada presenta un buen porcentaje de precisión al momento de la clasificación mayor del 80%, solo en el año 2010 el índice Kappa bajo 0,76. Adicionalmente, en algunas zonas puede confundirse la reflectancia que presenta una pendiente de terreno y du dirección sumado a la reflectancia cada uso de suelo (Segura, Ortiz y Gutiérrez, 2003).

En el caso de la clasificación supervisada se cuenta con los porcentajes globales de precisión, que para este estudio están en un rango de 77,3% y

85,6%, y el coeficiente o índice kappa se encuentra en un rango de 0,76 a 0,87, mientras que la clasificación no supervisada no entrega estos indicadores.

4.4 Resultados de la caracterización de suelos

Según los resultados de los promedios, máximos y mínimos de los parámetros físico-químicos para todo el perfil del suelo en estudio (Tabla 4), el pH en agua presenta una disminución de este parámetro en el cultivo (rango de 6,5 a 5,3) que de la vegetación natural con un rango de 7,3 a 5,7. El cultivo y el pino presentan valores de pH que corresponden a suelos ácidos a ligeramente ácidos, a diferencia del pH de la vegetación natural y del pasto que corresponde a suelos ligeramente ácidos a neutros. Los resultados de pH en KCl son menores a los de pH en agua.

La densidad aparente de los suelos pertenecientes a vegetación natural se encuentra en un rango de 1,5 a 0,6, con una media de 0,9; mientras que para el pasto aumenta a un rango entre 1,8 a 0,6, y una media de 1,1. La Da son similares para pasto y cultivo (1,1). Los valores de densidad real no reflejan variación, la media de todos los tipos de uso de suelo están en un rango de entre 1,8 y 1,9 g/cm³.

Con respecto a la porosidad del suelo, los valores más altos son los de vegetación natural (47,6%) y los más bajos corresponden a cultivo (40,8%), presentando una diferencia de 6,8% entre estos dos tipos de cobertura.

Al observar los valores de arena, arcilla y limo, se aprecia que el cultivo presenta el mayor porcentaje de arena (84%), mientras que la vegetación natural, el pasto y pino cuentan con un 81%. Este aumento puede deberse a que la falta de una cobertura total del suelo bajo cultivo, puede causar erosión al suelo. No existe diferencia textural entre los diferentes tipos de uso de suelo estudiados, esto significa, que el material parental es el mismo para toda la parroquia de Nono.

En el Anexo 3 se muestra las medias, máximos y mínimos de los parámetros

analizados para las dos profundidades en estudio (0 a 10 cm y de 10 a 30cm). El contenido de carbono orgánico aumenta a mayor profundidad en todos los tipos de uso de suelo. En la profundidad de 0 a 10 cm, el pino y el pasto son los tipos de uso de suelo que contienen más carbono orgánico, 42 mil y 44 mil kg/ha respectivamente, en cambio la vegetación natural y el cultivo no presentan una variación de contenido de carbono en este nivel (39 mil kg/ha). En la profundidad de 10 a 30 cm el pasto es el que contiene más carbono orgánico (123 mil kg/ha) y el pino es el que presenta menor contenido (98 mil kg/ha).

Tabla 4.

Valores promedios, máximos y mínimos de la caracterización del suelo de todo el perfil en estudio, 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm.

| Uso de suelo | pH _{H2O} | pH _{KCl} | Densidad aparente g/cm ³ | Densidad real g/cm ³ | Porosidad % | CO % | CO kg/ha | Arena % | Arcilla % | Limo % |
|-----------------------|-------------------|-------------------|--|------------------------------------|----------------|---------|-------------|------------|--------------|-----------|
| Vegetación Natural | Promedio | 6,4 | 0,9 | 1,8 | 47,6 | 4,0 | 70876,4 | 81,6 | 11,1 | 7,3 |
| | Máximo | 7,3 | 1,5 | 2,5 | 70,6 | 6,8 | 190086,2 | 96,0 | 25,0 | 19,7 |
| | Mínimo | 5,7 | 0,6 | 1,1 | 19,0 | 2,0 | 23275,9 | 66,0 | 2,0 | 1,0 |
| Pasto | Promedio | 6,3 | 1,1 | 1,9 | 43,0 | 3,9 | 82822,9 | 81,1 | 12,0 | 6,9 |
| | Máximo | 7,0 | 1,8 | 2,5 | 67,5 | 6,3 | 212362,1 | 96,0 | 25,0 | 24,9 |
| | Mínimo | 5,4 | 0,6 | 1,4 | 11,4 | 2,4 | 22787,4 | 62,6 | 2,0 | 1,0 |
| Cultivo | Promedio | 5,9 | 1,1 | 1,9 | 40,8 | 3,6 | 74404,3 | 84,0 | 10,7 | 5,3 |
| | Máximo | 6,5 | 1,4 | 3,3 | 69,5 | 5,2 | 178793,1 | 98,0 | 20,0 | 28,3 |
| | Mínimo | 5,3 | 0,6 | 1,2 | 14,1 | 1,4 | 19448,3 | 61,4 | 1,0 | 1,0 |
| Pino | Promedio | 6,2 | 1,0 | 1,9 | 45,3 | 3,9 | 71884,8 | 82,4 | 12,8 | 4,9 |
| | Máximo | 6,5 | 1,3 | 2,6 | 81,0 | 5,6 | 136310,3 | 96,0 | 22,5 | 10,0 |
| | Mínimo | 5,5 | 0,4 | 1,2 | 6,5 | 1,8 | 14023,0 | 72,0 | 2,0 | 1,5 |

4.5 Evaluación del impacto del uso del suelo en las propiedades Físicas y Químicas en la parroquia de Nono

Para evaluar la afectación a las propiedades físico químicas del suelo por el cambio de uso, se realizó un análisis ANOVA one way, que indica si los valores promedios de los parámetros en estudio tuvieron diferencias significativas o altamente significativas por el cambio de uso de la tierra. Posteriormente a los parámetros que tuvieron diferencias significativas se les realizó la prueba de Tukey. Este análisis se efectuó en forma separada para las dos profundidades de 0-10 y de 10 - 30 cm y luego para todo el perfil (Tablas 12, 13 y 14 respectivamente).

Del análisis ANOVA one way solo los parámetros pH en agua y pH en KCl fueron estadísticamente significativos ($p < 0,01$) por el cambio de uso del suelo, en las profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm (Tabla 5, 6, 7 y 8 respectivamente) y en todo el perfil de suelo en estudio el pH_{H_2O} , pH_{KCl} y densidad aparente fueron estadísticamente significativos ($p < 0,01$) (Tabla 9, 10 y 11).

Tabla 5.

ANOVA de pH en agua en la profundidad de 0 a 10 cm

| | | ANOVA | | | | |
|-------------|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH_{H_2O} | Entre grupos | 2,161 | 3 | 0,720 | 5,229 | 0,003 |
| | Dentro de grupos | 7,713 | 56 | 0,138 | | |
| | Total | 9,874 | 59 | | | |

Tabla 6.

ANOVA de pH en KCL en la profundidad de 0 a 10 cm

| | | ANOVA | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH _{KCl} | Entre grupos | 2,845 | 3 | 0,948 | 7,688 | 0,000 |
| | Dentro de grupos | 6,909 | 56 | 0,123 | | |
| | Total | 9,754 | 59 | | | |

Tabla 7.

ANOVA de pH en agua en la profundidad de 10 a 30 cm

| | | ANOVA | | | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH _{H₂O} | Entre grupos | 1,475 | 3 | 0,492 | 4,776 | 0,005 |
| | Dentro de grupos | 5,765 | 56 | 0,103 | | |
| | Total | 7,240 | 59 | | | |

Tabla 8.

ANOVA de pH en KCL en la profundidad de 10 a 30 cm

| | | ANOVA | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH _{KCl} | Entre grupos | 2,274 | 3 | 0,758 | 5,483 | 0,002 |
| | Dentro de grupos | 7,740 | 56 | 0,138 | | |
| | Total | 10,014 | 59 | | | |

Tabla 9.

ANOVA de pH en agua en todo el perfil de estudio (0 -10cm y de 10-30cm)

| ANOVA | | | | | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|-----|------------------|--------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH _{H₂O} | Entre grupos | 3,580 | 3 | 1,193 | 10,214 | 0,000 |
| | Dentro de grupos | 13,554 | 116 | 0,117 | | |
| | Total | 17,135 | 119 | | | |

Tabla 10.

ANOVA de pH en KCl en todo el perfil de estudio (0 -10cm y 10-30cm).

| ANOVA | | | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------|-----|------------------|--------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| pH _{KCl} | Entre grupos | 5,101 | 3 | 1,700 | 13,447 | 0,000 |
| | Dentro de grupos | 14,669 | 116 | 0,126 | | |
| | Total | 19,771 | 119 | | | |

Tabla 11.

ANOVA de densidad aparente en todo el perfil de estudio (0-10cm y 10-30cm).

| ANOVA | | | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------|-----|------------------|-------|-------|
| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Densidad aparente | Entre grupos | 0,619 | 3 | 0,206 | 4,054 | 0,009 |
| | Dentro de grupos | 5,906 | 116 | 0,051 | | |
| | Total | 6,525 | 119 | | | |

En la Tabla 12 y 13 se observa que los valores promedios de los parámetros del suelo afectados por el cambio de uso corresponden a pH en agua y pH en KCl en las dos profundidades, donde estos valores presentan valores

estadísticamente diferentes ($p < 0,01$).

Los resultados de la prueba Tukey muestran que las categorizaciones de los valores promedios no tienen igual patrón para el pH_{KCl} que el pH_{H_2O} . Así, para pH en agua, existen dos categorías, en donde los valores más bajos de pH corresponden al cultivo de papa (en las profundidades 0-10 cm y 10- 30 cm), y los valores más altos de pH presentan el pasto y la vegetación natural. En cambio, para el pH en KCl se establecen tres categorías a la profundidad de 0-10 cm, teniendo el valor más bajo el cultivo de papa, seguido por el pasto, pino y vegetación natural que muestran valores diferentes estadísticamente al cultivo y al pasto.

Los valores de pH en KCl está relacionado con el signo de la carga neta superficial de los coloides del suelo, indicando que a esta profundidad en el suelo existe mayor variación de carga neta negativa entre los diferentes usos (Gaitán y López, 2007). Mientras que para la profundidad de 10- 30 cm el pH en KCl mantiene los dos rangos que el pH en agua y las diferencias estadísticas de pH entre papa y vegetación.

Tabla 12.

Valores medios y desviación estándar de los parámetros de suelo por el tipo de uso tomando en cuenta la profundidad de 0 a 10cm

| | pH_{H_2O} ** | pH_{KCl} ** | ρ_a (g/cm^3) | ρ_r (g/cm^3) | Porosida d % | CO % | CO (kg/ha) | Aren a % | Arcill a % | Lim o % |
|-------------|-------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|----------|---------------|----------------|------------------|---------------|
| Pasto | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,31 B | 5,28 BC | 1,05 | 1,89 | 44,14 | 4,0 5 | 42130, 5 | 81,72 | 11,15 | 7,12 |
| Σ | 0,32 | 0,37 | 0,21 | 0,28 | 10,37 | 0,9 7 | 12887, 7 | 6,93 | 6,26 | 4,96 |
| V.N. | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,41 B | 5,48 C | 0,91 | 1,87 | 48,91 | 4,3 5 | 39595, 3 | 81,84 | 10,92 | 7,23 |
| Σ | 0,41 | 0,37 | 0,19 | 0,44 | 14,07 | 1,1 7 | 15007, 4 | 7,93 | 6,64 | 5,05 |
| Cultiv o | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 5,9 A | 4,89 A | 1,1 | 1,82 | 37,20 | 3,6 9 | 39493, 4 | 82,75 | 10,61 | 6,63 |
| Σ | 0,41 | 0,29 | 0,28 | 0,58 | 16,85 | 1,0 3 | 14838, 4 | 9,17 | 4,53 | 7,89 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|---------|------|------|-------|----------|-------------|-------|-------|------|
| Pino | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,1 AB | 5,06 AB | 0,98 | 1,89 | 45,46 | 4,5 6 | 44873, 4 | 82,63 | 12,03 | 5,32 |
| Σ | 0,32 | 0,34 | 0,26 | 0,38 | 21,52 | 0,7 1 | 14982, 9 | 6,76 | 6,18 | 2,63 |

Nota: \bar{X} : Media, σ : Desviación estándar. **: Altamente significativo con $p < 0,01$ de acuerdo al análisis ANOVA one way. Letras: Indican diferencias entre categorías por los resultados de la prueba de Tukey.

Tabla 13.

Valores medios y desviación estándar de los parámetros de suelo por el tipo de uso tomando en cuenta la profundidad de 10 a 30cm

| | pH _{H2O} ** | pH _{KCl} ** | pa (g/cm ³) | pr (g/cm ³) | Porosidad % | CO % | CO (kg/ha) | Arena % | Arcilla % | Limo % |
|-----------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|---------|---------------|------------|--------------|-----------|
| Pasto | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,31 B | 5,27 AB | 1,13 | 1,96 | 41,93 | 3,72 | 123515 | 80,5 | 12,91 | 6,63 |
| Σ | 0,28 | 0,46 | 0,25 | 0,24 | 13,14 | 1,04 | 36694,3 | 8,26 | 7,06 | 5,6 |
| V.N. | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,40 B | 5,45 B | 0,93 | 1,79 | 46,32 | 3,57 | 102158 | 81,6 | 11,2 | 7,24 |
| Σ | 0,4 | 0,35 | 0,21 | 0,43 | 10,14 | 0,97 | 43914,1 | 9,66 | 7,1 | 6,05 |
| Cultivo | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 5,96 A | 4,91 A | 1,06 | 2 | 44,46 | 3,56 | 109315 | 85,3 | 10,91 | 3,77 |
| Σ | 0,28 | 0,21 | 0,21 | 0,52 | 16,38 | 0,94 | 31429,1 | 7,85 | 6,82 | 3,41 |
| Pino | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,21 AB | 5,08 AB | 1,01 | 1,87 | 45,05 | 3,3 | 98896,1 | 81,9 | 14,14 | 3,99 |
| Σ | 0,27 | 0,28 | 0,15 | 0,34 | 8,1 | 0,71 | 26253,1 | 7,71 | 7,57 | 3,34 |

Nota: \bar{X} : Media, σ : Desviación estándar. **: Altamente significativo con $p < 0,01$ de acuerdo al análisis ANOVA one way. Letras: Indican diferencias entre categorías por los resultados de la prueba de Tukey.

En la tabla 14 se muestra que para todo el perfil en estudio (0-10 y 10-30 cm), los parámetros del suelo que muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los usos en estudio corresponden a: pH en agua, pH en KCl y densidad aparente. Donde, para el pH en agua y el pH en KCl, el valor más alto correspondió a vegetación natural, y el menor valor a cultivos, es decir que el suelo sufre una acidificación por el cambio de vegetación natural a cultivo de papa o maíz en la parroquia de Nono. En el estudio realizado por Muñoz y López-Ulloa (2015) en el páramo de Chimborazo los valores de pH no presentaron diferencias estadísticas significativas por el cambio de cobertura, pero si se observó similar tendencia a la disminución del pH en el cultivo de papa en relación con las coberturas naturales de este estudio, que

correspondieron a pajonal, almohadillas y vegetación arbustiva. Broquen, *et al*, (2005), encontraron que el cambio de vegetación natural a pino causo una disminución de pH_{H_2O} de 6,5 a 6,3 y de pH_{KCl} de 5,5 a 5,1; valores similares a los encontrados en este trabajo. Igualmente en el estudio realizado en el páramo de Quimsacocha, el pH del suelo se acidifica bajo el cultivo de papas, pasto y pino en relación al bosque natural, tendencia similar a la que presenta en la parroquia de Nono (Quichimbo, 2012).

Tabla 14.

Valores medios y desviación estándar de los parámetros de suelo por el tipo de uso tomando en cuenta la profundidad de 0 a 10cm y de 10 a 30cm.

| | pH agua ** | pH KCl ** | ρ_a (g/cm ³) ** | ρ_r (g/cm ³) | Porosidad % | CO % | CO (kg/ha) | Arena % | Arcilla % | Limo % |
|-----------|------------------|--------------|--|----------------------------------|----------------|---------|---------------|------------|--------------|-----------|
| Pasto | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,31 BC | 5,27 BC | 1,09 B | 1,93 | 43,03 | 3,88 | 82822,8 | 81,1 | 12,03 | 6,87 |
| Σ | 0,32 | 0,41 | 0,23 | 0,26 | 11,75 | 1,01 | 49326,1 | 7,56 | 6,65 | 5,23 |
| V.N. | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,40 C | 5,47 C | 0,92 A | 1,83 | 47,61 | 3,96 | 70876,4 | 81,7 | 11,06 | 7,23 |
| Σ | 0,4 | 0,35 | 0,2 | 0,43 | 12,15 | 1,13 | 45303 | 8,71 | 6,77 | 5,49 |
| Cultivo | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 5,93 A | 4,90 A | 1,08 AB | 1,91 | 40,83 | 3,62 | 74404,3 | 84 | 10,76 | 5,2 |
| Σ | 0,34 | 0,25 | 0,24 | 0,54 | 16,67 | 0,97 | 43005,6 | 8,45 | 5,66 | 6,12 |
| Pino | | | | | | | | | | |
| \bar{X} | 6,16 AB | 5,07 AB | 0,99 AB | 1,88 | 45,25 | 3,93 | 71884,8 | 82,3 | 13,09 | 4,65 |
| Σ | 0,29 | 0,3 | 0,21 | 0,35 | 15,78 | 0,94 | 34677,3 | 7,05 | 6,79 | 2,99 |

Nota: \bar{X} : Media, σ : Desviación estándar. **: Altamente significativo con $p < 0,01$ de acuerdo al análisis ANOVA one way. Letras: Indican diferencias entre categorías por los resultados de la prueba de Tukey.

La densidad aparente se encuentra en un rango de 0,4 a 1,7 g/cm³ y los promedios de ρ_a por tipo de uso de suelo difieren estadísticamente entre vegetación natural y pasto (Tabla 14). Según Tukey, los valores se agrupan en dos categorías. La menor categoría comprende la vegetación natural con una densidad de 0,92 g/cm³, comparten el mismo rango con cultivo y pino. Mientras que el pasto con un valor de densidad aparente de 1,09 g/cm³ representa la categoría más alta. Lo que indica que el cambio de vegetación natural a pasto genera un aumento de la densidad aparente y como consecuencia una

reducción en la porosidad del suelo, similar tendencia fue encontrada por Daza, (2014), en el páramo de Sumapaz – Colombia.

No se encontró diferencias significativas estadísticamente para los parámetros de densidad real y porosidad, lo que indica que estadísticamente el uso de la tierra no afecta a estos parámetros del suelo.

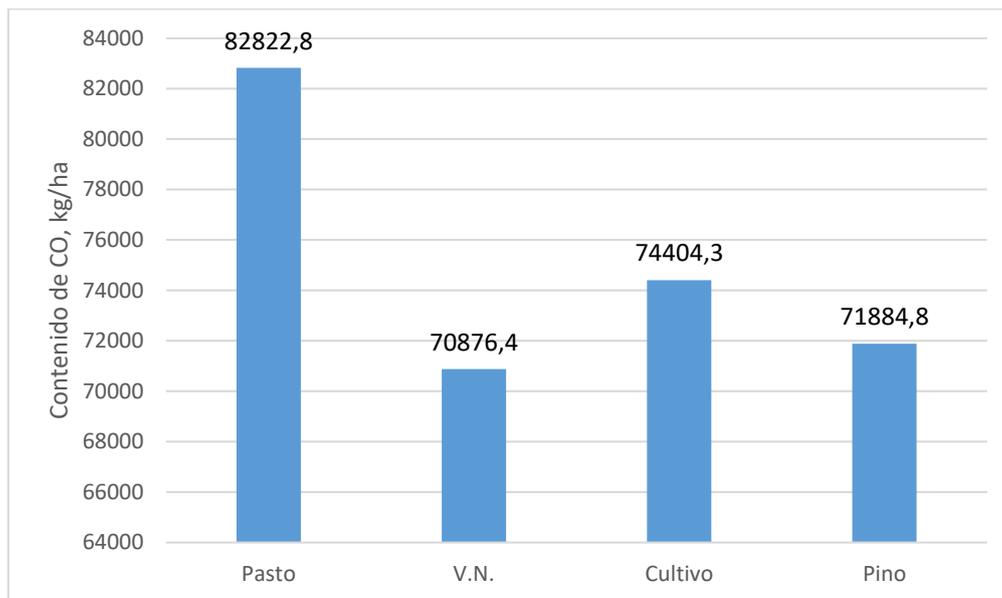


Figura 24. Medias del contenido de carbono de los diferentes tipos de uso de suelo en todo el perfil de suelo en estudio.

Si se considera todo el perfil del suelo de 0-10 y de 10-30 cm (Tabla 14), los porcentajes promedios de carbono orgánico en el suelo fueron similares para todos los tipos de cobertura vegetal, siendo ligeramente superior en la vegetación natural con un 3,96% que en los cultivos que tuvo un valor promedio de CO de 3,66%. Estos resultados varían numéricamente si se considera el contenido de carbono orgánico en el suelo expresado en kg/ha; ya que este tiene relación con la profundidad y la densidad aparente del suelo. En relación a contenido (Figura 24), el pasto tiene 10,2% más kg de carbono por hectárea que los cultivos y un 14,42% más que la vegetación natural.

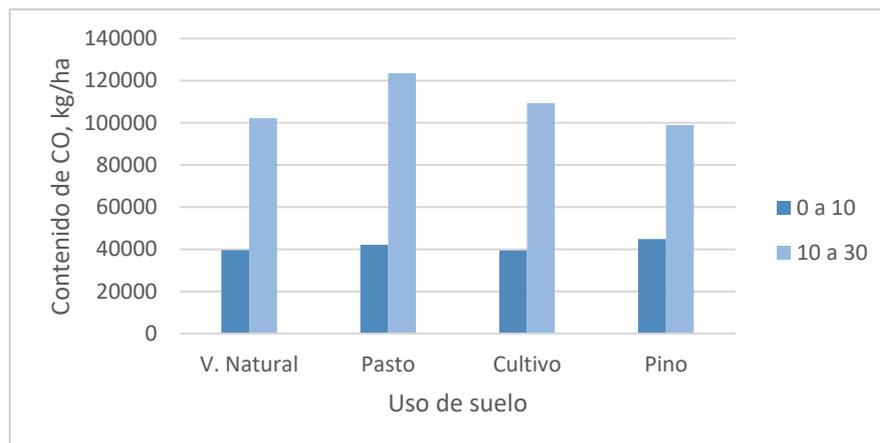


Figura 25. Contenido de carbono orgánico en la profundidad de 0 a 10cm y de 10 a 30cm.

En la figura 25 se muestra el contenido de carbono en ambas profundidades. Observándose que el pino es el que presenta mayor contenido en la capa superficial del suelo (44 mil kg/ha), que el resto de tipos de uso de suelo, y también presenta el menor contenido de carbono en la capa subsuperficial con 98 mil kg/ha. Este valor es similar al hallado por el estudio de Cargua et al. (2014), quien encontró contenidos de CO de 99 y 98 MgC/ha bajo una plantación de pino, a una profundidad 10 a 20 cm y 20 a 30 cm respectivamente. El pasto es el que presentó mayor contenido de CO a la profundidad de 10 a 30 cm, y esto se podría asociar con el volumen del sustrato aportado por sus raíces (Eiza y Fioriti, 2005).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Evaluar la degradación del suelo por el crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono

Los suelos de la parroquia de Nono por el cambio de vegetación natural a la clase de clasificación cultivo- pasto, sufren acidificación e incremento de la densidad aparente; parámetros que están relacionados a procesos físicos y químicos del suelo como aireación, actividad microbiana, potencial de óxido-reducción, disponibilidad de nutrientes entre otros, por lo que estos cambios conllevan a una degradación de la calidad del suelo, por la pérdida de las funciones de utilidad del suelo.

El crecimiento de la frontera agrícola se ha dado en los años 2010 y 2017 en relación al año 2005 y está casi no ha cambiado si el año de referencia es el 2000. A pesar de ello, al tener la parroquia una topografía compleja con pendientes pronunciadas los procesos de erosión por pérdida de cobertura vegetal temporal, en el sistema de cultivo, ocasiona que los suelos de esta parroquia sean más susceptibles a su deterioro.

Identificar mediante sistemas de información geográfica el crecimiento de la frontera agropecuaria en la parroquia de Nono en los últimos 17 años

La parroquia de Nono presentó un comportamiento fluctuante en cuanto al incremento de la actividad agropecuaria, como lo muestran los resultados del análisis de imágenes satelitales de los años 2000, 2005, 2010, y 2017 mediante clasificación supervisada. Fluctuación que se da por aspectos económicos, sociales y de iniciativas particulares y gubernamentales (Municipio de Quito, Consejo Provincial de Pichincha y Ministerio del Ambiente) para conservar y utilizar este hotspot que tiene una alta biodiversidad.

A pesar de que la superficie de vegetación natural del año 2000 es similar a la del año 2017, se observa que la intervención antrópica con sistema de rotación cultivo –pasto se ha extendido en las cabeceras de las micro cuencas de los ríos Mindo Y Alambi en los años 2010 y 2017, tanto para la clasificación no supervisada y supervisada de las imágenes satelitales.

Los sistemas de información geográfica son una herramienta útil para la determinar la variación espacial y temporal en la cobertura vegetal o uso del suelo de una determinada región, pero se requiere de mayor tiempo para capacitarse y adquirir más experiencia en el uso de diferentes softwares disponibles en la actualidad.

La clasificación no supervisada no presenta indicadores de precisión como el índice Kappa y la matriz de confusión, pero es útil como referencia para realizar la clasificación supervisada.

Los resultados de la clasificación supervisada presentan altos valores en el coeficiente o índice Kappa, por lo que la clasificación de este estudio está en la categoría de excelente y casi perfecta.

Evaluar el cambio de las propiedades físico químicas del suelo (D_r , D_a , porosidad, textura, pH y CO) por el cambio de uso de suelo

El cambio de uso de suelo de vegetación natural a cultivos, pasto o pino si influye en las propiedades físico-químicas del suelo. Los parámetros más afectados fueron el pH, la densidad aparente y el contenido de carbono.

En la transición de vegetación natural a cultivo, el suelo sufrió una acidificación y un aumento en la densidad aparente.

Los porcentajes de carbono orgánico en todo el perfil del suelo no varían significativamente por el cambio de tipo de cobertura, siendo superior en la capa de 0-10 que la de 10-30 cm. Pero el contenido de carbono orgánico en el suelo varía dependiendo la profundidad. Así el pasto el suelo de la profundidad

de 10 a 30 cm presento más CO que el suelo bajo la vegetación natural a esa misma profundidad, debido posiblemente al incremento de la densidad aparente y a los sustratos de las raíces.

5.2 Recomendaciones

Implementar una asignatura de teledetección en la carrera de Ingeniería Ambiental o incluir esta temática en la cátedra de Sistemas de Información Geográfica de la malla de la carrera, debido a que es una herramienta que engloba varios temas de interés y aplicables para el ejercicio profesional del ingeniero ambiental. De la misma manera que se cuente con una base de imágenes satelitales sin presencia de nubosidad, bandeado y de mejor resolución, ya que al momento de realizar las correcciones se pierde información de la imagen y eso incrementa los errores en la clasificación.

Se recomienda continuar con este tipo de estudios, pero incluyendo mediciones de pérdida de suelo por erosión, debido al cambio de uso de la tierra y como estos procesos afectan a la calidad del suelo.

Utilizar índices NVDI en este tipo de estudios para mejorar la exactitud y precisión de la clasificación de coberturas.

Complementar este estudio con una valoración económica del contenido de carbono que se tiene en la zona, para determinar si es factible o no el pago por servicios ambientales a los agricultores de la parroquia de Nono.

REFERENCIAS

- Broquen, P., Candan, F., Falbo, G., Girardin, J. L., y Pellegrini, V. (2005). Impacto del *Pinus ponderosa* sobre la acidificación de los suelos de la transición bosque-estepa, SO del Neuquén, Argentina. *Bosque*, 26(3), 63–74. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000300007>
- CAIRO S.A. (2015). *PDOT Parroquia de Nono*. Recuperado el 28 de octubre de 2016 de http://app.sni.gob.ec/visorseguimiento/DescargaGAD/data/sigadplusediagnostico/1768122810001_Documento%20de%20Trabajo%20Nono%20Fase%201_24-06-2015_21-57-32.pdf
- Cárdenas, I. (2014). Impacto de las prácticas agropecuarias y forestales sobre las propiedades físico-químicas de los suelos andinos del sur del Ecuador. (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca. Recuperado el 20 de marzo de 2017 de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5477>
- Cargua, F. E., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., y Vinueza, L. M. (2014). Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Informacion Tecnologica*, 25(3), 83–92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300011>
- Chen, C. P., Juang, K. W., Cheng, C. H., y Pai, C. W. (2016). *Effects of adjacent land-use types on the distribution of soil organic carbon stocks in the montane area of central Taiwan*. *Botanical Studies*, 57. <https://doi.org/10.1186/s40529-016-0147-5>
- Chuvieco, E. (1995), *Fundamentos De Teledetección Espacial* (2,a ed.), España: Rialp S.A. Recuperado el 15 de febrero de 2017 de <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200001110-8750e88486/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Cleef. 1981. Ministerio del Ambiente del Ecuador 2012. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito. Recuperado el 15 de febrero de 2017 de http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf
- Cruz, a B., Barra, J. E., Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Evaluation*, 13(2), 90–97.

<https://doi.org/10.1111/j.1564-9148.2008.00030.x>

- Daza Torres, Martha Constanza, Hernández Florez, Fanny, & Triana, Flor Alba. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicsek, D. F., Stewart, B. A., Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). *Defining and Assessing Soil Quality. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. doi:10.2136/sssaspecpub35.c1
- Eastman, J. R. (2001). *Introduction to Remote Sensing and Image Processing*. Clark University, USA, 1, 17–34. Recuperado el 26 de mayo de 2017 de https://www.researchgate.net/profile/Ronald_Eastman/publication/242377547_Guide_to_GIS_and_Image_Processing_Volume_2/links/5419a9d10cf25ebee9887ac2.pdf
- Eiza, M., y Fioriti, N. (2005). Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y fertilización nitrogenada. *Ciencia Del Suelo*, 23(1), 59–67. Recuperado el 18 de mayo de 2017 de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:FRACCIONES+DE+CARBONO+ORG?NICO+EN+LA+CAPA+ARABLE:+EFECTO+DE+LOS+SISTEMAS+DE+CULTIVO+Y+DE+LA+FERTILIZACI?N+NITROGENADA#0>
- El-Gammal, M. I., Ali, R. R., y Eissa, R. (2014). *Land use assessment of barren areas in Damietta Governorate, Egypt using remote sensing*. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(3–4), 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2014.07.002>
- Erazo Moreano, Lorena Mishel (2015). Influencia de la actividad agrícola y pecuaria en la calidad del agua de dos microcuencas del Río El Ángel, Provincia del Carchi. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. UDLA. Quito. 107 p.
- FAO y GRIS, (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos, Roma, Italia. Recuperado el 4 de abril de 2017 de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>.
- Gaitán, Juan José, y López, Carlos Rodolfo. (2007). Análisis del gradiente edáfico en la región Andinopatagónica. *Ciencia del suelo*, 25(1), 53-63. Recuperado el 08 de junio de 2017 de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000100007&lng=es&tlng=es.

- Instituto nacional de Estadísticas y Censos (2015). ENCUESTA DE SUPERFICIE Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA CONTINUA. Recuperado el 28 de octubre de 2016 de http://www.ecuadorencifras.gob.ec//documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2014.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., y Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: *A Concept, Definition, and Framework for Evaluation* (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- López-Ulloa, M. (2006). *Soil ecosystem services in different land use types in coastal Ecuador*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Göttingen. Recuperado el 15 de enero de 2017 de <http://dnb.info/982223641/34>.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal*, 8, 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Medina González, H., García Coronado, J., y Nuñez Acosta, D. (2007). El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 19–24. Recuperado el 25 de mayo de 2017 de <http://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>.
- Ministerio del Ambiente. (2012). Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito-Ecuador. Recuperado el 15 de febrero de 2017 de <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto%20mapa-parte1.pdf>
- Osman. (2013). *Soils Principles, Properties and Management*, Dordrecht: Springer Netherlands. Doi: 10.1007/978-94-007-5663
- Osuna-Osuna, A. K., Díaz-Torres, J. D. J., De Anda-Sánchez, J., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J., y Davila-Vazquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. *Ambiente E Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10(2), 445–458. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1539>
- Paruelo, J., Guerschman, J., y Verón, S. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 14–23. Recuperado el 11 de diciembre del 2016 de: [http://ced.agro.uba.ar/gran-chaco/sites/default/files/pdf/sem6/Paruelo et al 2005.pdf](http://ced.agro.uba.ar/gran-chaco/sites/default/files/pdf/sem6/Paruelo%20et%20al%202005.pdf)

- Polanco, J. (2012). teledetección de la vegetación del páramo de belmira con imágenes Landsat. DYNA, 79(171), 222-231. Recuperado el 15 de abril de 2017 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000100028&lng=en&tlng=es.
- Porta, J., López-Acevedo, M, y Poch, R,M. (2008). Introducción a la edafología: uso y protección del suelo. Madrid, ES: Mundi-Prensa. Recuperado el 18 de abril de 2017 de <http://www.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>
- Posada, E., y Salvatierra, H. C. (2001). Análisis multitemporal del cambio del ecosistema de manglar en la costa del departamento del Atlántico (Colombia). Revista Cartográfica, 73, 25–48. Recuperado el 19 de marzo de 2017 de https://www.researchgate.net/publication/232727288_Analisis_multitemporal_del_cambio_del_ecosistema_de_manglar_en_la_costa_delddepartamento_del_Atlantico_Colombia
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cardenas, I., Crespo, P., y Celleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: Páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. Suelos Ecuatoriales, 42(2)(2), 138–153. Recuperado el 15 de mayo de 2017 de https://www.researchgate.net/publication/260389572_EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO PARAMO DE QUIMSACOCCHA AL SUR DEL EC UADOR
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Rullán-Silva, C., Gama-Campillo, L., Galindo-Alcántara, A., y Olthoff, A. (2011). Clasificación No Supervisada De La Cobertura De Suelo De La Región Sierra De Tabasco Mediante Imágenes Landsat Etm+. *Universidad Y Ciencia*, 27(1), 33–41. Retrieved from <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=15419871003>
- Segura, M., Ortiz, C., y Gutiérrez, M. del C. (2003). LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: Clasificación Automática Supervisada de la Imagen. *TERRA LATINOAMERICANA*, 21(2), 149–156. Recuperado el 15 de mayo de 2017 de https://www.researchgate.net/profile/M_Gutierrez-Castorena/publication/48198311_LOCALIZACION_DE_SUELOS_DE_HUMEDAD_RESIDUAL_A_PARTIR_DE_IMAGENES_DE_SATELITE_Clasificacion_Automatica_Supervisada_de_la_Imagen/links/0f31

753925f266799f000000/LOCALIZACION-DE-SUELOS-DE-HUMEDAD-RESIDUAL-A-PARTIR-DE-IMAGENES-DE-SATELITE-Clasificacion-Automatica-Supervisada-de-la-Imagen.pdf

Selassie, Y. G., Anemut, F., y Addisu, S. (2015). *The effects of land use types, management practices and slope classes on selected soil physico-chemical properties in Zikre watershed, North-Western Ethiopia*. *Environmental Systems Research*, 4(1), 3.
<https://doi.org/10.1186/s40068-015-0027-0>

Sripada, R. P., Das, P. K., Oyarzabal, E. S., Grapes, L., Griffith, D., Luchte, J., & Songstad, D. D. (2014). *Convergence of Food Security, Energy Security and Sustainable Agriculture*, 67, 173–196.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-55262-5>

ANEXOS

Anexo 1: Separabilidad de la clasificación supervisada

Separability Measure: Bhattacharyya Distance

Average separability: 1,857587

Minimun separability: 0,526993

Maximun separability: 2,000000

| Name | Bosque 1 | Bosque 2 | Pastos y cul | Pastos recie | Páramo |
|--------------|----------|----------|--------------|--------------|----------|
| Bosque 2 | 0,526993 | | | | |
| Pasto y cul | 1,999438 | 1,999588 | | | |
| Pastos recie | 1,988671 | 1,879845 | 1,971941 | | |
| Páramo | 1,792493 | 1,908713 | 1,93357 | 1,92734 | |
| Urbano | 2,000000 | 2,000000 | 1,948058 | 1,99998 | 1,987171 |

Separabilidad de la clasificación supervisada año 2000

Separability Measure: Bhattacharyya Distance

Average separability: 1,995499

Minimun separability: 1,966132

Maximun separability: 2,000000

| Name | Bosque 1 | Bosque 2 | Pastos y cul | Pastos recie | Páramo |
|--------------|----------|----------|--------------|--------------|----------|
| Bosque 2 | 1,999883 | | | | |
| Pasto y cul | 2,000000 | 1,999973 | | | |
| Pastos recie | 2,000000 | 1,99233 | 1,998828 | | |
| Páramo | 2,000000 | 1,966132 | 1,996303 | 1,999867 | |
| Urbano | 2,000000 | 2,000000 | 1,948058 | 2,000000 | 1,979588 |

Separabilidad de la clasificación supervisada año 2005

Separability Measure: Bhattacharyya Distance

Average separability: 1,938847

Minimun separability: 1,444663

Maximun separability: 2,000000

| Name | Bosque 1 | Bosque 2 | Pastos y cul | Pastos recie | Páramo |
|--------------|----------|----------|--------------|--------------|----------|
| Bosque 2 | 1,444663 | | | | |
| Pasto y cul | 1,999893 | 1,998965 | | | |
| Pastos recie | 1,999950 | 1,979347 | 1,958278 | | |
| Páramo | 1,883475 | 1,972139 | 1,898912 | 1,999510 | |
| Urbano | 1,999874 | 1,999997 | 1,996110 | 2,000000 | 1,951598 |

Separabilidad de la clasificación supervisada año 2010

Separability Measure: Bhattacharyya Distance

Average separability: 1,943181

Minimun separability: 1,542113

Maximun separability: 1,999999

| Name | Bosque 1 | Bosque 2 | Pastos y cul | Pastos recie | Páramo |
|--------------|----------|----------|--------------|--------------|----------|
| Bosque 2 | 1,542113 | | | | |
| Pasto y cul | 1,999872 | 1,998847 | | | |
| Pastos recie | 1,999999 | 1,991275 | 1,967845 | | |
| Páramo | 1,943474 | 1,971640 | 1,841637 | 1,999599 | |
| Urbano | 1,999981 | 1,999988 | 1,955902 | 1,999934 | 1,935612 |

Separabilidad de la clasificación supervisada año 2017

Anexo 2: Resultados de la matriz de confusión y del coeficiente kappa

CONFUSION MATRIX

____Areas____ ___Percent Pixels Classified by Code___

| Name | Code | Pixels | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bosque 1 | 1 | 132670 | 79.16 | 19.28 | 0.00 | 0.00 | 1.56 | 0.00 |
| Bosque 2 | 2 | 86028 | 29.46 | 68.25 | 0.00 | 2.03 | 0.27 | 0.00 |
| pastos y cult | 3 | 10578 | 0.00 | 0.00 | 98.13 | 1.20 | 0.08 | 0.60 |
| Pastos recién | 4 | 3465 | 0.00 | 2.19 | 0.00 | 97.14 | 0.66 | 0.00 |
| Páramo | 5 | 114280 | 3.78 | 0.04 | 0.27 | 0.23 | 94.50 | 1.18 |
| Urbano | 6 | 9451 | 0.00 | 0.00 | 0.61 | 0.00 | 0.55 | 98.84 |

Average accuracy = 89.34 %

Overall accuracy = 82.70 %

KAPPA COEFFICIENT = 0.82794 Standard Deviation = 0.00000

Matriz de confusión y coeficiente kappa, año 2000

CONFUSION MATRIX

____Areas____ ___Percent Pixels Classified by Code___

| Name | Code | Pixels | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bosque | 1 | 21303 | 99.35 | 0.63 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| Bosque 2 | 2 | 48090 | 4.91 | 89.63 | 0.00 | 0.00 | 5.46 | 0.00 |
| Pastos | 3 | 2750 | 0.00 | 0.00 | 99.71 | 0.00 | 0.25 | 0.04 |
| Cultivos | 4 | 1304 | 0.00 | 1.92 | 0.00 | 98.08 | 0.00 | 0.00 |
| Páramo | 5 | 56608 | 2.15 | 21.39 | 0.12 | 0.00 | 73.46 | 2.87 |
| Urbano | 6 | 10722 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.56 | 99.38 |

Average accuracy = 93.27 %

Overall accuracy = 85.62 %

KAPPA COEFFICIENT = 0.87371 Standard Deviation = 0.00000

Matriz de confusión y coeficiente kappa, año 2005

CONFUSION MATRIX

____Areas____ ___Percent Pixels Classified by Code___

| Name | Code | Pixels | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bosque 1 | 1 | 22713 | 92.15 | 6.22 | 0.01 | 0.00 | 1.62 | 0.00 |
| Bosque 2 | 2 | 75230 | 40.62 | 57.32 | 0.04 | 1.81 | 0.20 | 0.00 |
| Pastos y cult | 3 | 6836 | 0.00 | 0.00 | 97.24 | 1.01 | 1.76 | 0.00 |
| Pastos recién | 4 | 1070 | 0.00 | 0.65 | 0.00 | 99.35 | 0.00 | 0.00 |
| Paramo | 5 | 164696 | 14.76 | 0.02 | 2.36 | 0.00 | 81.93 | 0.93 |
| Urbano | 6 | 10681 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.68 | 99.27 |

Average accuracy = 87.88 %

Overall accuracy = 77.27 %

KAPPA COEFFICIENT = 0.76726 Standard Deviation = 0.00000

Matriz de confusión y coeficiente kappa, año 2010

CONFUSION MATRIX

____Areas____ ___Percent Pixels Classified by Code___

| Name | Code | Pixels | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bosque 1 | 1 | 34067 | 94.99 | 3.58 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 0.00 |
| Bosque 2 | 2 | 46546 | 46.85 | 52.01 | 0.20 | 0.57 | 0.36 | 0.00 |
| Pastos y cult | 3 | 9831 | 0.00 | 0.00 | 95.40 | 0.11 | 3.97 | 0.52 |
| Pastos recién | 4 | 1639 | 0.00 | 0.06 | 0.31 | 99.63 | 0.00 | 0.00 |
| Páramo | 5 | 152428 | 11.10 | 0.01 | 2.35 | 0.00 | 85.80 | 0.74 |
| Urbano | 6 | 15125 | 0.00 | 0.00 | 0.39 | 0.00 | 0.15 | 99.46 |

Average accuracy = 87.88 %

Overall accuracy = 82.19 %

KAPPA COEFFICIENT = 0.82628 Standard Deviation = 0.00000

Matriz de confusión y coeficiente kappa, año 2017

Anexo 3

| Uso de suelo | | Profundidad cm | pH _{H2O} | pHKCl | Densidad aparente | Densidad real | Porosidad | CO | CO | Arena | Arcilla | Limo |
|-----------------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------|-----------|------|-----------|-------|---------|------|
| | | | | g/cm ³ | g/cm ³ | g/ml | % | % | kg/ha | % | % | % |
| Vegetación Natural | Prom | 0 a 10 | 6,41 | 5,49 | 0,92 | 1,88 | 48,91 | 4,36 | 39595,33 | 81,8 | 10,9 | 7,2 |
| | Máx | | 7,10 | 6,10 | 1,28 | 2,50 | 70,59 | 6,80 | 80183,91 | 96,0 | 25,0 | 19,7 |
| | Mín | | 5,67 | 4,80 | 0,57 | 1,05 | 19,05 | 2,27 | 23275,86 | 72,0 | 2,0 | 2,0 |
| Vegetación Natural | Prom | 10 a 30 | 6,40 | 5,45 | 0,94 | 1,79 | 46,32 | 3,57 | 102157,51 | 81,4 | 11,2 | 7,4 |
| | Máx | | 7,30 | 6,00 | 1,47 | 2,50 | 69,60 | 5,29 | 190086,21 | 96,0 | 25,0 | 19,2 |
| | Mín | | 5,86 | 4,80 | 0,62 | 1,15 | 33,60 | 2,03 | 37594,83 | 66,0 | 2,0 | 1,0 |
| Pasto | Prom | 0 a 10 | 6,31 | 5,28 | 1,05 | 1,90 | 44,15 | 4,05 | 42130,56 | 81,7 | 11,2 | 7,1 |
| | Máx | | 6,98 | 6,01 | 1,45 | 2,50 | 63,47 | 5,93 | 64482,76 | 94,0 | 21,0 | 18,1 |
| | Mín | | 5,43 | 4,77 | 0,61 | 1,43 | 18,07 | 2,56 | 22787,36 | 73,4 | 2,0 | 2,0 |
| Pasto | Prom | 10 a 30 | 6,31 | 5,27 | 1,14 | 1,97 | 41,93 | 3,72 | 123515,20 | 80,5 | 12,9 | 6,6 |
| | Máx | | 6,90 | 5,96 | 1,76 | 2,50 | 67,50 | 6,34 | 212362,07 | 96,0 | 25,0 | 24,9 |
| | Mín | | 5,80 | 4,40 | 0,65 | 1,65 | 11,43 | 2,38 | 62758,62 | 62,6 | 2,0 | 1,0 |
| Cultivo | Prom | 0 a 10 | 5,90 | 4,90 | 1,10 | 1,82 | 37,21 | 3,70 | 39493,38 | 82,8 | 10,6 | 6,6 |
| | Máx | | 6,50 | 5,30 | 1,41 | 3,33 | 69,49 | 5,17 | 69689,66 | 96,0 | 15,0 | 28,3 |
| | Mín | | 5,29 | 4,40 | 0,56 | 1,16 | 15,00 | 1,40 | 19448,28 | 61,4 | 2,0 | 1,0 |
| Cultivo | Prom | 10 a 30 | 5,97 | 4,91 | 1,06 | 2,00 | 44,46 | 3,56 | 109315,24 | 85,3 | 10,7 | 3,9 |
| | Máx | | 6,40 | 5,30 | 1,42 | 3,33 | 67,57 | 4,94 | 178793,10 | 98,0 | 20,0 | 12,3 |
| | Mín | | 5,60 | 4,60 | 0,61 | 1,42 | 14,08 | 1,51 | 63655,17 | 74,0 | 1,0 | 1,0 |
| Pino | Prom | 0 a 10 | 6,11 | 5,06 | 0,98 | 1,90 | 45,46 | 4,56 | 44873,45 | 82,6 | 12,0 | 5,3 |
| | Máx | | 6,50 | 5,50 | 1,27 | 2,63 | 80,95 | 5,58 | 68413,79 | 94,0 | 22,5 | 10,0 |
| | Mín | | 5,50 | 4,60 | 0,40 | 1,36 | 6,54 | 3,55 | 14022,99 | 76,0 | 2,0 | 1,5 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|---------|------|------|------|------|-------|------|-----------|------|------|-----|
| Pino | Prom | 10 a 30 | 6,21 | 5,08 | 1,01 | 1,87 | 45,05 | 3,31 | 98896,09 | 82,1 | 13,5 | 4,4 |
| | Máx | | 6,50 | 5,50 | 1,18 | 2,50 | 60,50 | 4,07 | 136310,34 | 96,0 | 20,0 | 9,9 |
| | Mín | | 5,60 | 4,60 | 0,73 | 1,21 | 33,40 | 1,80 | 59306,21 | 72,0 | 2,0 | 2,0 |

Anexo 4: Resultados de los análisis realizados en laboratorio de todos los parámetros en estudio.

| Uso de suelo | Coordenadas | | Profundidad | pHH ₂ O | pHKCl | Densidad aparente | Densidad real | Porosidad | CO | CO | Arena | Arcilla | Limo |
|--------------|-------------|---------|-------------|--------------------|-------|-------------------|---------------|-----------|-----|----------|-------|---------|------|
| | X | Y | | | | | | | | | | | |
| V. N. | 768157 | 9988377 | 0-10 | 5,67 | 5,04 | 0,64 | 1,42 | 54,9 | 4,7 | 29425,3 | 95,0 | 2,0 | 3,0 |
| V. N. | 768157 | 9988377 | 10-30 | 6,01 | 5,84 | 0,64 | 1,66 | 61,5 | 3,0 | 56275,9 | 94,0 | 2,0 | 4,0 |
| V. N. | 769701 | 9987610 | 0-10 | 5,75 | 5,33 | 1,05 | 2,00 | 47,6 | 3,7 | 37981,0 | 91,0 | 6,0 | 3,0 |
| V. N. | 769701 | 9987610 | 10-30 | 6,03 | 6,00 | 0,97 | 1,66 | 41,8 | 3,1 | 88363,8 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| V. N. | 770044 | 9990334 | 0-10 | 6,79 | 5,58 | 0,85 | 1,25 | 31,9 | 3,8 | 31752,9 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| V. N. | 770044 | 9990334 | 10-30 | 6,81 | 5,82 | 0,83 | 1,25 | 33,6 | 2,9 | 71551,7 | 92,0 | 2,0 | 6,0 |
| V. N. | 769985 | 9990440 | 0-10 | 6,98 | 6,01 | 0,75 | 1,15 | 34,8 | 3,1 | 23275,9 | 90,0 | 8,0 | 2,0 |
| V. N. | 769985 | 9990440 | 10-30 | 6,86 | 5,96 | 0,73 | 1,15 | 36,5 | 3,1 | 66706,9 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| V. N. | 773072 | 9987873 | 0-10 | 6,2 | 5,72 | 0,89 | 1,79 | 50,3 | 4,0 | 35253,5 | 79,6 | 11,3 | 9,1 |
| V. N. | 773072 | 9987873 | 10-30 | 5,86 | 5,24 | 0,89 | 1,36 | 34,6 | 2,6 | 69051,7 | 71,8 | 10,2 | 17,9 |
| V. N. | 771829 | 9988031 | 0-10 | 5,87 | 5,29 | 1,07 | 1,75 | 38,9 | 2,6 | 27672,4 | 83,7 | 9,3 | 7,0 |
| V. N. | 771829 | 9988031 | 10-30 | 6,07 | 5,25 | 0,89 | 1,36 | 34,6 | 2,9 | 75189,7 | 75,9 | 9,6 | 14,5 |
| V. N. | 768336 | 9992404 | 0-10 | 6,62 | 5,26 | 0,65 | 2,21 | 70,6 | 3,8 | 24281,6 | 74,8 | 11,5 | 13,8 |
| V. N. | 768336 | 9992404 | 10-30 | 6,6 | 5,38 | 0,62 | 1,50 | 58,5 | 2,0 | 37594,8 | 68,5 | 15,8 | 15,8 |
| V. N. | 769007 | 9991844 | 0-10 | 6,2 | 5,91 | 0,57 | 1,79 | 68,3 | 4,4 | 24765,5 | 84,2 | 6,8 | 9,0 |
| V. N. | 769007 | 9991844 | 10-30 | 6,3 | 5,28 | 0,86 | 1,50 | 42,5 | 3,4 | 87787,9 | 84,3 | 9,0 | 6,7 |
| V. N. | 772776 | 9988974 | 0-10 | 6,25 | 5,57 | 0,85 | 1,05 | 19,1 | 5,4 | 44942,5 | 73,0 | 7,4 | 19,7 |
| V. N. | 772776 | 9988974 | 10-30 | 5,93 | 5,21 | 0,82 | 1,49 | 45,0 | 5,0 | 121586,2 | 72,8 | 7,9 | 19,2 |
| V. N. | 772296 | 9996682 | 0-10 | 6,6 | 5,70 | 1,07 | 2,00 | 46,5 | 4,2 | 44890,8 | 86,0 | 10,0 | 4,0 |
| V. N. | 772296 | 9996682 | 10-30 | 6,8 | 5,40 | 1,08 | 2,00 | 46,0 | 3,0 | 94965,5 | 84,0 | 15,0 | 1,0 |
| V. N. | 771542 | 9995955 | 0-10 | 6,6 | 5,70 | 0,87 | 2,50 | 65,2 | 4,5 | 38500,0 | 72,0 | 24,0 | 4,0 |
| V. N. | 771542 | 9995955 | 10-30 | 6,4 | 5,70 | 0,95 | 2,00 | 52,5 | 4,4 | 122844,8 | 77,0 | 22,0 | 1,0 |
| V. N. | 769342 | 9987890 | 0-10 | 6,2 | 5,00 | 1,28 | 2,00 | 36,0 | 6,3 | 80183,9 | 74,0 | 17,5 | 8,5 |
| V. N. | 769342 | 9987890 | 10-30 | 6,1 | 5,00 | 1,16 | 2,00 | 42,0 | 5,3 | 182000,0 | 73,0 | 20,0 | 7,0 |
| V. N. | 770461 | 9988245 | 0-10 | 6,2 | 4,80 | 1,18 | 2,00 | 41,0 | 4,6 | 53574,7 | 80,0 | 5,0 | 15,0 |
| V. N. | 770461 | 9988245 | 10-30 | 6,1 | 4,80 | 1,05 | 2,00 | 47,5 | 4,1 | 126724,1 | 84,0 | 10,0 | 6,0 |
| V. N. | 770760 | 9995326 | 0-10 | 7,1 | 6,10 | 0,95 | 2,50 | 62,0 | 5,1 | 47500,0 | 76,0 | 15,0 | 9,0 |
| V. N. | 770760 | 9995326 | 10-30 | 7,3 | 5,90 | 1,47 | 2,50 | 41,2 | 4,4 | 190086,2 | 80,0 | 15,0 | 5,0 |
| V. N. | 769432 | 9993091 | 0-10 | 6,7 | 5,60 | 0,85 | 2,00 | 57,5 | 6,8 | 57155,2 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| V. N. | 769432 | 9993091 | 10-30 | 6,5 | 5,30 | 0,76 | 2,50 | 69,6 | 3,8 | 85172,4 | 86,0 | 10,0 | 4,0 |
| V. N. | 769917 | 9992860 | 0-10 | 6,5 | 5,20 | 1,10 | 2,50 | 56,0 | 2,3 | 24655,2 | 86,0 | 10,0 | 4,0 |
| V. N. | 769917 | 9992860 | 10-30 | 6,5 | 5,10 | 1,13 | 2,50 | 54,8 | 2,8 | 93517,2 | 83,0 | 12,5 | 4,5 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|---------|-------|------|------|------|------|------|-----|----------|------|------|------|
| V. N. | 770228 | 9991096 | 0-10 | 6,8 | 5,60 | 0,98 | 2,00 | 51,0 | 4,9 | 47310,3 | 72,0 | 25,0 | 3,0 |
| V. N. | 770228 | 9991096 | 10-30 | 6,7 | 5,50 | 1,09 | 2,00 | 45,5 | 5,2 | 167258,6 | 66,0 | 25,0 | 9,0 |
| Pasto | 772224 | 9996708 | 0-10 | 6,6 | 5,70 | 1,19 | 2,00 | 40,5 | 3,8 | 44454,0 | 78,0 | 20,0 | 2,0 |
| Pasto | 772224 | 9996708 | 10-30 | 6,9 | 5,70 | 1,14 | 2,50 | 54,4 | 3,1 | 106137,9 | 75,0 | 22,5 | 2,5 |
| Pasto | 772311 | 9997375 | 0-10 | 6,3 | 4,90 | 1,29 | 2,08 | 38,0 | 2,7 | 34103,5 | 74,0 | 21,0 | 5,0 |
| Pasto | 772311 | 9997375 | 10-30 | 6,2 | 4,40 | 1,08 | 2,00 | 46,0 | 2,4 | 76344,8 | 80,0 | 15,0 | 5,0 |
| Pasto | 771490 | 9995661 | 0-10 | 6,6 | 5,60 | 1,23 | 2,50 | 50,8 | 3,3 | 40293,1 | 86,0 | 11,5 | 2,5 |
| Pasto | 771490 | 9995661 | 10-30 | 6,6 | 5,60 | 1,23 | 2,00 | 38,5 | 3,3 | 118758,6 | 84,0 | 15,0 | 1,0 |
| Pasto | 770098 | 9991328 | 0-10 | 6,5 | 5,40 | 1,14 | 2,00 | 43,0 | 4,8 | 54379,3 | 78,0 | 20,0 | 2,0 |
| Pasto | 770098 | 9991328 | 10-30 | 6,4 | 5,30 | 1,05 | 1,82 | 42,3 | 3,9 | 121293,1 | 71,0 | 25,0 | 4,0 |
| Pasto | 771710 | 9995947 | 0-10 | 6,5 | 5,30 | 1,12 | 1,67 | 32,9 | 4,4 | 48919,5 | 74,0 | 20,0 | 6,0 |
| Pasto | 771710 | 9995947 | 10-30 | 6 | 5,90 | 1,03 | 1,82 | 43,4 | 3,0 | 92344,8 | 76,0 | 20,0 | 4,0 |
| Pasto | 769824 | 9991229 | 0-10 | 6,4 | 5,50 | 1,16 | 1,67 | 30,5 | 3,5 | 40000,0 | 80,0 | 15,0 | 5,0 |
| Pasto | 769824 | 9991229 | 10-30 | 6,3 | 5,50 | 1,29 | 2,50 | 48,4 | 2,6 | 97862,1 | 75,0 | 22,5 | 2,5 |
| Pasto | 769413 | 9988026 | 0-10 | 6 | 4,80 | 1,13 | 2,00 | 43,5 | 5,8 | 64293,1 | 77,0 | 15,0 | 8,0 |
| Pasto | 769413 | 9988026 | 10-30 | 6 | 4,70 | 1,13 | 2,00 | 43,5 | 6,3 | 212362,1 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Pasto | 769990 | 9987792 | 0-10 | 5,9 | 4,90 | 1,10 | 2,00 | 45,0 | 5,9 | 64482,8 | 85,0 | 10,0 | 5,0 |
| Pasto | 769990 | 9987792 | 10-30 | 6,2 | 5,00 | 1,15 | 2,00 | 42,5 | 5,3 | 180431,0 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Pasto | 770805 | 9994520 | 0-10 | 6,5 | 5,60 | 0,92 | 2,22 | 58,6 | 5,6 | 50758,6 | 76,0 | 10,0 | 14,0 |
| Pasto | 770805 | 9994520 | 10-30 | 6,4 | 5,40 | 0,90 | 1,82 | 50,6 | 5,8 | 153620,7 | 76,0 | 15,0 | 9,0 |
| Pasto | 770801 | 9994521 | 0-10 | 6,3 | 4,80 | 0,94 | 2,22 | 57,7 | 2,6 | 24310,3 | 80,0 | 15,0 | 5,0 |
| Pasto | 770801 | 9994521 | 10-30 | 6,3 | 5,00 | 1,30 | 2,00 | 35,0 | 3,6 | 138965,5 | 86,0 | 10,0 | 4,0 |
| Pasto | 769446 | 9993006 | 0-10 | 6,4 | 5,20 | 0,61 | 1,67 | 63,5 | 3,8 | 22787,4 | 80,0 | 10,0 | 10,0 |
| Pasto | 769446 | 9993006 | 10-30 | 6,2 | 5,20 | 0,65 | 2,00 | 67,5 | 3,3 | 62758,6 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Pasto | 769789 | 9992119 | 0-10 | 6 | 4,90 | 0,77 | 1,67 | 53,9 | 5,2 | 39827,6 | 76,0 | 20,0 | 4,0 |
| Pasto | 769789 | 9992119 | 10-30 | 6,3 | 5,20 | 1,27 | 2,50 | 49,2 | 3,6 | 133569,0 | 74,0 | 25,0 | 1,0 |
| Pasto | 768709 | 9988272 | 0-10 | 6,2 | 5,70 | 0,97 | 1,66 | 41,8 | 3,6 | 34456,3 | 90,0 | 5,0 | 5,0 |
| Pasto | 768709 | 9988272 | 10-30 | 6,5 | 5,70 | 0,97 | 1,65 | 41,5 | 3,7 | 104819,0 | 90,0 | 5,0 | 5,0 |
| Pasto | 769687 | 9987780 | 0-10 | 6,2 | 5,60 | 0,85 | 1,75 | 51,5 | 3,5 | 29275,9 | 91,0 | 6,0 | 3,0 |
| Pasto | 769687 | 9987780 | 10-30 | 6,1 | 5,50 | 0,90 | 1,76 | 49,2 | 4,5 | 118819,0 | 91,0 | 6,0 | 3,0 |
| Pasto | 770507 | 9990086 | 0-10 | 6,17 | 5,59 | 1,10 | 1,80 | 38,9 | 2,6 | 27816,1 | 94,0 | 2,0 | 4,0 |
| Pasto | 770507 | 9990086 | 10-30 | 6,11 | 5,90 | 0,99 | 1,75 | 43,4 | 5,2 | 153620,7 | 94,0 | 2,0 | 4,0 |
| Pasto | 770112 | 9990308 | 0-10 | 6,79 | 5,58 | 0,75 | 1,43 | 47,6 | 3,6 | 26293,1 | 92,0 | 2,0 | 6,0 |
| Pasto | 770112 | 9990308 | 10-30 | 6,81 | 5,82 | 1,19 | 1,87 | 36,4 | 2,9 | 100534,5 | 90,0 | 4,0 | 6,0 |
| Pasto | 781240 | 9980126 | 0-10 | 6,98 | 6,01 | 1,23 | 1,90 | 35,3 | 3,4 | 41706,9 | 92,0 | 2,0 | 6,0 |
| Pasto | 781240 | 9980126 | 10-30 | 6,86 | 5,96 | 1,56 | 2,00 | 21,9 | 3,1 | 145520,7 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| Pasto | 773196 | 9987981 | 0-10 | 5,43 | 4,87 | 0,79 | 1,66 | 52,7 | 3,7 | 28910,3 | 73,4 | 9,7 | 16,9 |
| Pasto | 773196 | 9987981 | 10-30 | 6,03 | 4,99 | 1,04 | 1,72 | 39,5 | 3,3 | 102206,9 | 62,6 | 12,5 | 24,9 |
| Pasto | 771906 | 9988003 | 0-10 | 6,3 | 4,94 | 1,04 | 2,00 | 48,0 | 4,6 | 47218,4 | 76,5 | 8,2 | 15,2 |
| Pasto | 771906 | 9988003 | 10-30 | 5,8 | 4,91 | 0,83 | 1,82 | 54,5 | 3,4 | 82900,0 | 80,7 | 9,7 | 9,7 |
| Pasto | 772729 | 9988700 | 0-10 | 6,1 | 5,28 | 1,36 | 1,66 | 18,1 | 4,1 | 55494,3 | 79,3 | 9,2 | 11,5 |
| Pasto | 772729 | 9988700 | 10-30 | 6,24 | 4,49 | 0,97 | 2,00 | 51,5 | 3,3 | 93655,2 | 76,6 | 9,3 | 14,0 |
| Pasto | 769106 | 9992016 | 0-10 | 6,3 | 4,77 | 1,04 | 1,67 | 37,7 | 4,4 | 45425,3 | 90,5 | 7,2 | 2,4 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------|-------|------|------|------|------|------|-----|----------|------|------|------|
| Pasto | 769106 | 9992016 | 10-30 | 6,24 | 4,88 | 1,76 | 2,00 | 12,0 | 3,0 | 157793,1 | 85,7 | 7,2 | 7,2 |
| Pasto | 772688 | 9988928 | 0-10 | 6,39 | 5,28 | 1,45 | 2,50 | 42,0 | 4,3 | 61666,7 | 75,1 | 6,8 | 18,1 |
| Pasto | 772688 | 9988928 | 10-30 | 6,38 | 4,96 | 1,55 | 1,75 | 11,4 | 3,6 | 163017,2 | 72,4 | 11,5 | 16,1 |
| Cultivo | 768756 | 9988273 | 0-10 | 5,29 | 4,40 | 1,02 | 3,33 | 69,5 | 5,2 | 51967,8 | 92,0 | 4,0 | 4,0 |
| Cultivo | 768756 | 9988273 | 10-30 | 5,9 | 4,80 | 1,08 | 3,33 | 67,6 | 4,1 | 132206,9 | 94,0 | 2,0 | 4,0 |
| Cultivo | 769598 | 9987640 | 0-10 | 5,35 | 4,50 | 1,41 | 1,66 | 15,1 | 5,0 | 69689,7 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| Cultivo | 769598 | 9987640 | 10-30 | 5,94 | 4,90 | 1,22 | 1,42 | 14,1 | 4,9 | 178793,1 | 98,0 | 1,0 | 1,0 |
| Cultivo | 788903 | 9782012 | 0-10 | 5,76 | 5,05 | 0,91 | 1,58 | 42,7 | 3,3 | 29679,3 | 90,0 | 6,0 | 4,0 |
| Cultivo | 788903 | 9782012 | 10-30 | 5,84 | 5,08 | 1,13 | 1,81 | 37,6 | 3,3 | 109103,5 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| Cultivo | 773251 | 9987984 | 0-10 | 5,8 | 4,55 | 1,18 | 1,68 | 29,8 | 4,0 | 46114,9 | 75,5 | 9,8 | 14,7 |
| Cultivo | 773251 | 9987984 | 10-30 | 5,7 | 4,72 | 1,15 | 1,47 | 21,8 | 4,1 | 138793,1 | 83,9 | 9,2 | 6,9 |
| Cultivo | 771816 | 9987923 | 0-10 | 5,8 | 4,92 | 0,99 | 1,16 | 15,0 | 4,6 | 44766,7 | 61,4 | 10,3 | 28,3 |
| Cultivo | 771816 | 9987923 | 10-30 | 5,7 | 4,79 | 0,95 | 1,68 | 43,5 | 4,0 | 112886,4 | 77,8 | 9,9 | 12,3 |
| Cultivo | 772738 | 9988676 | 0-10 | 5,9 | 5,27 | 0,66 | 1,36 | 51,4 | 3,7 | 23921,9 | 84,6 | 12,8 | 2,6 |
| Cultivo | 772738 | 9988676 | 10-30 | 5,6 | 5,15 | 0,61 | 1,74 | 64,7 | 4,4 | 80389,7 | 90,6 | 7,0 | 2,3 |
| Cultivo | 772710 | 9988952 | 0-10 | 5,4 | 4,97 | 0,56 | 1,40 | 60,1 | 4,0 | 21814,7 | 87,7 | 9,9 | 2,5 |
| Cultivo | 772710 | 9988952 | 10-30 | 5,7 | 4,83 | 0,77 | 2,03 | 62,2 | 4,1 | 92713,8 | 84,4 | 10,4 | 5,2 |
| Cultivo | 771468 | 9995831 | 0-10 | 6,2 | 4,80 | 1,16 | 1,72 | 32,6 | 3,9 | 44666,7 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Cultivo | 771468 | 9995831 | 10-30 | 6,3 | 4,90 | 1,10 | 2,22 | 50,5 | 3,7 | 121379,3 | 78,0 | 20,0 | 2,0 |
| Cultivo | 771750 | 9989452 | 0-10 | 6,3 | 4,80 | 1,16 | 1,67 | 30,5 | 2,8 | 32000,0 | 76,0 | 15,0 | 9,0 |
| Cultivo | 771750 | 9989452 | 10-30 | 6 | 4,60 | 1,21 | 1,82 | 33,5 | 2,6 | 93879,3 | 74,0 | 20,0 | 6,0 |
| Cultivo | 770784 | 9995201 | 0-10 | 6,1 | 5,10 | 1,38 | 2,00 | 31,0 | 3,8 | 51551,7 | 84,0 | 15,0 | 1,0 |
| Cultivo | 770784 | 9995201 | 10-30 | 6,4 | 5,30 | 1,13 | 2,00 | 43,5 | 3,3 | 111051,7 | 78,0 | 20,0 | 2,0 |
| Cultivo | 769452 | 9993310 | 0-10 | 6,5 | 5,30 | 1,36 | 1,82 | 25,3 | 2,9 | 38298,9 | 84,0 | 15,0 | 1,0 |
| Cultivo | 769452 | 9993310 | 10-30 | 6,4 | 5,20 | 0,97 | 2,00 | 51,5 | 2,7 | 76931,0 | 83,0 | 15,0 | 2,0 |
| Cultivo | 769427 | 9993164 | 0-10 | 6,4 | 5,10 | 1,41 | 2,50 | 43,6 | 1,4 | 19448,3 | 84,0 | 12,5 | 3,5 |
| Cultivo | 769427 | 9993164 | 10-30 | 6,1 | 4,70 | 1,42 | 2,50 | 43,2 | 1,5 | 63655,2 | 86,0 | 12,5 | 1,5 |
| Pino | 770315 | 9991461 | 0-10 | 6,01 | 5,16 | 0,90 | 1,62 | 44,4 | 4,5 | 39827,6 | 94,0 | 2,0 | 4,0 |
| Pino | 770315 | 9991461 | 10-30 | 6,23 | 5,19 | 1,14 | 1,82 | 37,4 | 3,3 | 110069,0 | 92,0 | 4,0 | 4,0 |
| Pino | 788903 | 9782012 | 0-10 | 6,36 | 5,18 | 1,27 | 1,36 | 6,5 | 3,6 | 45292,1 | 94,0 | 4,0 | 2,0 |
| Pino | 788903 | 9782012 | 10-30 | 6,29 | 5,06 | 1,11 | 1,67 | 33,4 | 1,8 | 59306,2 | 96,0 | 2,0 | 2,0 |
| Pino | 769026 | 9992016 | 0-10 | 6,2 | 4,70 | 0,40 | 2,10 | 81,0 | 3,6 | 14023,0 | 82,7 | 12,3 | 4,9 |
| Pino | 769026 | 9992016 | 10-30 | 6,2 | 4,77 | 0,73 | 1,21 | 39,7 | 3,1 | 67965,5 | 82,8 | 7,3 | 9,9 |
| Pino | 769814 | 9991178 | 0-10 | 6,2 | 5,30 | 1,08 | 1,82 | 40,7 | 4,3 | 45931,0 | 79,0 | 15,0 | 6,0 |
| Pino | 769814 | 9991178 | 10-30 | 6,3 | 5,10 | 1,18 | 2,50 | 52,8 | 3,9 | 136310,3 | 76,0 | 19,0 | 5,0 |
| Pino | 772377 | 9997479 | 0-10 | 5,5 | 4,60 | 1,03 | 2,63 | 60,8 | 5,0 | 50908,1 | 76,0 | 22,5 | 1,5 |
| Pino | 772377 | 9997479 | 10-30 | 5,6 | 4,60 | 1,07 | 1,96 | 45,4 | 4,0 | 127293,1 | 82,0 | 16,0 | 2,0 |
| Pino | 770858 | 9988189 | 0-10 | 6,5 | 5,40 | 1,13 | 2,00 | 43,5 | 5,2 | 58448,3 | 80,0 | 10,0 | 10,0 |
| Pino | 770858 | 9988189 | 10-30 | 6,4 | 5,20 | 1,09 | 2,00 | 45,5 | 3,7 | 118396,6 | 82,0 | 15,0 | 3,0 |
| Pino | 770599 | 9991089 | 0-10 | 6,4 | 5,50 | 0,84 | 2,22 | 62,2 | 5,1 | 42000,0 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Pino | 770599 | 9991089 | 10-30 | 6,4 | 5,40 | 0,93 | 1,67 | 44,3 | 3,1 | 84982,8 | 76,0 | 20,0 | 4,0 |
| Pino | 770037 | 9991892 | 0-10 | 5,7 | 4,60 | 1,24 | 1,67 | 25,8 | 5,6 | 68413,8 | 78,0 | 15,0 | 7,0 |
| Pino | 770037 | 9991892 | 10-30 | 6 | 4,90 | 1,07 | 2,00 | 46,5 | 2,9 | 90396,6 | 80,0 | 18,0 | 2,0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|---------|-------|-----|------|------|------|------|-----|---------|------|------|-----|
| Pino | 770938 | 9995129 | 0-10 | 6,1 | 5,10 | 0,93 | 1,67 | 44,3 | 4,2 | 39017,2 | 82,0 | 12,5 | 5,5 |
| Pino | 770938 | 9995129 | 10-30 | 6,5 | 5,50 | 0,79 | 2,00 | 60,5 | 4,1 | 95344,8 | 72,0 | 20,0 | 8,0 |

V.N.: Vegetación Natural

