



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO
ACUMULADO EN EL SUELO DE TURBERAS DE
ALTO PERÚ EN CAJAMARCA - 2018”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autor:

Bach. María Nilsa Fernández Delgado

Asesor:

M.Sc. Ing. Juan Carlos Flores Cerna

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

A DIOS

Por guiarme y protegerme en esta etapa tan importante de mi vida brindándome salud y permitiéndome llegar hasta este momento de gran importancia en mi formación profesional, además de darme la fuerza para continuar adelante frente a las dificultades presentadas.

A MI MADRE

Por ser el pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional, brindándome su apoyo incondicional, su amor y sus grandiosos consejos.

A MIS HERMANOS

Por brindarme su apoyo, motivándome e inspirándome para seguir adelante y luchar por mis objetivos.

A MIS AMIGOS

Por apoyarme y brindarme su compañía a lo largo de esta etapa de mi vida, siendo partícipes de muchas experiencias maravillosas llenas de emociones.

AGRADECIMIENTO

A DIOS

Por ser mi guía y compañía en el transcurso de mi vida,
dándome paciencia y sabiduría para afrontar las
dificultades presentadas y lograr culminar con éxito
esta etapa profesional.

A MI MADRE Y HERMANOS

Por su apoyo incondicional, por ser mi motor y motivo
para seguir adelante brindándome consejos para poder
superarme a mí misma y dándome fuerzas para lograr
cumplir mis objetivos.

A MIS AMIGOS

Por compartir grandiosas experiencias dentro y fuera
de las aulas; en especial al equipo “DREAMS”,
Ghyanmarco, Leodan, Raúl, Loidita y Anaí; a esos
extraños que hoy son parte importante en mi vida y se
han convertido en mi apoyo y compañía a lo largo de
esta etapa de desarrollo profesional y personal.

A MIS DOCENTES

Por compartir sus conocimientos y experiencias,
motivándome a desarrollarme personal y
profesionalmente; en especial a mi asesor el M.Sc Ing.
Juan Carlos Flores Cerna por guiarme y apoyarme en el
desarrollo de esta investigación, formando parte
importante en este objetivo alcanzado.

2.4.	Procedimiento.....	28
2.4.1.	Preparación de los reactivos.....	28
2.4.2.	Determinación del porcentaje de carbono orgánico en el suelo.....	28
2.4.2.1.	Titulación.....	28
2.4.3.	Determinación de la densidad aparente del suelo	30
2.4.4.	Cuantificación del carbono orgánico en el suelo	31
2.4.5.	Análisis geoestadístico	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS		33
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....		39
4.1	Discusión.....	39
4.2	Conclusiones	44
REFERENCIAS.....		45
ANEXOS.....		49
Anexo 1: Operacionalización de variables		49
Anexo 2: Lista de acrónimos.....		50
Anexo 3: Ubicación del área de estudio		51
Anexo 4: Ubicación de los puntos de muestreo en turberas de Alto Perú – Cajamarca		52
Anexo 5: Geología de la zona de estudio		53
Anexo 6: Tipo de suelo de la zona de estudio		54
Anexo 7: Hidrografía de la zona de estudio		55
Anexo 8: Hidrología de la zona de estudio.....		56
Anexo 9: Uso actual del suelo de la zona de estudio.....		57
Anexo 10: Cobertura vegetal de la zona de estudio		58
Anexo 11: Flora predominante de la zona de estudio		59
Anexo 12: Fauna predominante de la zona de estudio		60
Anexo 13: Ficha de recolección de datos en campo.....		61
Anexo 14: Identificación de la zona de estudio.....		62
Anexo 15: Ubicación de puntos de muestreo con el GPS		63
Anexo 16: Recolección de muestras para determinar el % de carbono en el suelo		64

Anexo 17: Recolección de muestras para determinar la densidad aparente del suelo.	65
Anexo 18: Etiquetado de muestras	66
Anexo 19: Determinación de la densidad aparente del suelo en laboratorio.....	67
Anexo 20: Determinación del carbono orgánico del suelo en laboratorio.	68
Anexo 21: Cambio de color en la muestra durante la titulación	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Determinación del porcentaje de carbono orgánico del suelo.....	33
Tabla 2: Determinación de la densidad aparente (g/cm^3) del suelo de turberas de Alto Perú	34
Tabla 3: Cuantificación de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú.....	35
Tabla 4: Cuantificación de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú en megagramos por hectárea (Mg/ha).	36
Tabla 5: Determinación del color del suelo en cada muestra según la Tabla de Munsell..	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diseño de investigación	22
Figura 2. Cantidad de carbono orgánico en megagramos por hectárea (Mg/ ha) acumulado en turberas de Alto Perú 2018.	38
Figura 3. Cantidad de carbono orgánico en el suelo en megagramos por hectárea (Mg /ha).	39
Figura 4: Relación entre el color del suelo y la acumulación de carbono en Mg/ ha.....	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1:Reacción de oxidación - reducción.....	27
Ecuación 2: Reacción de titulación.	27
Ecuación 3: Ecuación estequiométrica	29
Ecuación 4: Gasto del reactivo	29
Ecuación 5: Oxidación del carbono.....	29
Ecuación 6: Ecuación simplificada.....	30
Ecuación 7: Determinación del porcentaje carbono orgánico en el suelo.....	30
Ecuación 8: Densidad aparente del suelo	31
Ecuación 9: Cuantificación de carbono orgánico del suelo.....	31

RESUMEN

Se cuantificó el carbono orgánico del suelo de turberas de Alto Perú, ubicadas entre el distrito de Tumbadén y Cajamarca; para ello, se tomó 10 parcelas distribuidas sistemáticamente, seleccionadas mediante un muestreo estadístico aleatorio simple utilizando el método de rejilla aleatoria; para cuantificar el carbono orgánico del suelo se determinó la densidad aparente tomando muestras con un cilindro muestreador de 6 cm de diámetro por 5 cm de altura y el porcentaje de carbono orgánico del suelo extrayendo muestras mediante homogenización de 5 submuestras tomadas en zigzag a una profundidad de 30 cm, según criterios propuestos en el IPCC (2006), FAO (2017) y Bazán (2017); para el análisis en el laboratorio se utilizó el método de combustión húmeda de Walkley & Black. Las concentraciones determinadas varían entre 87.81 Mg/ha, y 967.84 Mg/ha; siendo al valor promedio 417.94 Mg/ha lo cual indica una alta concentración de carbono orgánico; por este motivo, proteger este ecosistema frágil mediante una gestión sostenible del suelo, permitirá darle valor como sumidero de carbono, además de favorecer la purificación y mejor abastecimiento de agua.

Palabras clave: Cuantificación de carbono, Walkley & Black, densidad aparente, turberas, gestión sostenible, sumidero de carbono.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El suelo es una reserva de carbono de gran importancia; se estima que almacena 1500 Petagramos¹ de carbono en el primer metro, lo cual supone más que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 750 Petagramos de carbono) y la vegetación terrestre (650 Petagramos de carbono) combinados. El carbono luego de entrar al suelo en forma de material orgánico, puede persistir décadas, siglos o incluso milenios, pero eventualmente, puede perderse en forma de dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄) emitido de nuevo a la atmósfera como material erosionado o como carbono orgánico disuelto que desemboca en ríos y océanos. (FAO, 2017)

El suelo actúa como sumidero de carbono; por ende, disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera; sin embargo, en el mundo un tercio de los suelos está degradado, lo que ha inducido la liberación de carbono en grandes cantidades hacia la atmósfera; pero si estos fueran restaurados, se podría retirar 51 Gigatoneladas² de carbono de la atmósfera, ayudando con la lucha contra el cambio climático. Entre todos los tipos de suelo, los que presentan alto contenido de carbono orgánico suelen ser más productivos, aportando a las plantas condiciones de humedad óptima, además de purificar el agua permitiendo una filtración y almacenamiento adecuado. (FAO, 2017)

El carbono orgánico del suelo (COS) es el que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos, de acuerdo a la geología, las condiciones climáticas, el uso y gestión del territorio y otros factores ambientales, la cantidad de carbono orgánico es diferente. (FAO, 2017)

¹ Equivale a 10¹⁵ gramos.

² Equivale a 10¹⁵ gramos.

Se estima que las mayores cantidades de carbono se encuentran almacenadas en la región de permafrost³ del norte con alrededor de 447 Petagramos de carbono en los primeros 30 cm del suelo (Tarnocai et al., 2009), principalmente en suelos de turba⁴, por ello Gougoulas et al. (2014) y Köchy et al. (2014) citados en FAO (2017) afirman que mundialmente, las reservas más grandes se encuentran en turberas⁵, aunque las incertidumbres alrededor de esta estimación permanecen altas; estos ecosistemas cubren solo el 3 por ciento de la superficie terrestre, pero contienen el 20 por ciento del carbono del suelo del mundo. (Hernández, 2010).

Parish et al. (2008) y Orgiazzi et al. (2016) citados en FAO (2017) definen a las turberas como ecosistemas de humedales caracterizados por la acumulación de materia orgánica (turba) derivada de material vegetal muerto y en descomposición bajo condiciones de saturación permanente de agua la mayoría aparecen en regiones de permafrost y en los trópicos⁶, allí la alta productividad de las plantas se combina con la lenta descomposición como resultado de las altas precipitaciones y la humedad.

El tipo de suelo predominante en las turbas es conocido como Histosol⁷ caracterizándose por tener un contenido de carbono orgánico del suelo de 12 a 18 por ciento, contrariamente en regiones secas y cálidas existe escasez en plantas y solo una cantidad pequeña de carbono entra al suelo.

³ Capa del suelo en la cual la temperatura está continuamente en o debajo de 0°C por lo menos por dos años consecutivos.

⁴ Es un suelo verdaderamente orgánico compuesto por fragmentos visibles de materia descompuesta. Su color varía del pardo claro al negro. Huele a materia orgánica.

⁵ Las turberas son humedales con una gruesa capa de suelo orgánico.

⁶ Son los paralelos situados a 23° 27' al Norte y 23° 27' al Sur respecto al Ecuador, donde los rayos del sol inciden perpendicularmente al mediodía al menos un día al año.

⁷ Son suelos ricos en materia orgánica y residuos vegetales más o menos descompuestos.

Son predominantes los Arenosoles⁸, en su mayoría con una concentración menor al 0,6 por ciento de carbono orgánico. Los suelos negros, como los Chernozems⁹, contienen una cantidad relativamente alta de carbono orgánico (más del 1 por ciento), por lo cual son intrínsecamente fértiles. (FAO, 2017).

El riego excesivo o dejar el suelo desnudo, corresponden a una gestión insostenible, que pone en peligro a las turberas, provocando erosión masiva y la pérdida de carbono orgánico, lo cual indica cierto grado de degradación; por ello es de gran importancia una gestión sostenible que logre el cuidado del suelo y la preservación del carbono orgánico, incluyendo la cobertura orgánica, la siembra de cultivos de cobertura, la fertilización juiciosa y el riego moderado. (FAO, 2017)

FAO (2017), recomienda dar prioridad a suelos con las más altas reservas de carbono, con el fin de desarrollar políticas nacionales y regionales sobre conservación del suelo. Entre dichos suelos se incluyen las turberas, áreas de permafrost y suelos negros. En cuanto a las turberas, se prioriza vastas zonas de turberas intactas y prístinas¹⁰, en especial en regiones donde son más vulnerables debido al cambio de uso de suelo.

FAO (2017), ha estimado que los suelos son capaces de secuestrar alrededor de 20 Petagramos de carbono en 25 años; es decir más del 10 % de las emisiones antropogénicas.

⁸ Se componen de una textura granular hasta 50 cm de profundidad y a consecuencia retienen pocos nutrientes, así como la capacidad de retención hídrica.

⁹ Suelos con una capa superficial gruesa, negra y rica en materia orgánica. El científico Ruso de Suelos Dokuchaev acuñó el nombre “Chernozems” en 1883 para denominar el “típico” suelo zonal de las estepas de pastizales altos.

¹⁰ Ecosistema que se mantiene intacto e inalterado por acciones antropogénicas.

En suelos que poseen una textura equilibrada, se encuentran condiciones favorables de características hídricas y físicas según Anstett (1979) citado por FAO (2002) algunas densidades aparentes de suelos son: Arena 1.35 g/cm^3 , arelimoso 1.30 g/cm^3 , limoarenoso 1.25 g/cm^3 , limo 1.20 g/cm^3 , arcillolimoso 1.15 g/cm^3 , arcilla 1.10 g/cm^3 y turba 1 g/cm^3 .

Un sumidero de CO_2 implica la remoción de gases de invernadero de la atmósfera; pero, la conversión de largo plazo de praderas y áreas forestales para terrenos de cultivo (y pastoriles) ha resultado en pérdidas históricas de carbono del suelo globalmente; no obstante, existe un potencial fundamental para incrementar el contenido de carbono orgánico del suelo mediante la rehabilitación de suelos degradados y la amplia adopción de prácticas de conservación del suelo. (FAO, 2017)

Ramsar (2016) define a los humedales como zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio, la vida vegetal y animal asociada a él, se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre, cerca de ella o donde la tierra está cubierta por agua poco profunda; se encuentran entre los medios más productivos del mundo, siendo fuentes de diversidad biológica, fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir, están entre los ecosistemas más diversos y productivos, proporcionan servicios esenciales y constituyen un componente primordial del ciclo del agua, desempeñando un papel clave en la regulación del clima y suministro de agua, constituyendo un recurso de enorme valor económico, cultural, científico y recreativo para la vida humana.

Las bofedales son humedales de altura, la legislación peruana los considera ecosistemas frágiles, se ubican en las partes altas y frías de la cordillera de los Andes, por su naturaleza biótica y abiótica proveen servicios ecosistémicos importantes tales como la retención y almacenamiento de agua, así como la captura y almacenamiento de carbono (MA, 2005 citado en León, 2006); estos ecosistemas se desarrollan bajo condiciones abióticas específicas como: permanente saturación de agua, altitud mayor a 3800 msnm, bajas temperaturas y vegetación predominante hidrofítica, favoreciendo la acumulación de carbono, por lo que son considerados como stock de carbono en el suelo (Díaz et al., 2005, citado en León, 2006).

Cajamarca no tiene una zona donde haya glaciares, pero parte de su territorio le corresponde a la ecorregión Jalca, una zona alta; donde hay presencia de lluvia, niebla y granizo; debido a la presencia de vegetación típica, las características, la calidad de suelo y el relieve, cumple diversas funciones como captura y almacenamiento del agua de diferentes fuentes, además concentra gran cantidad de manantiales, turbas y lagunas, en esta biorregión se originan ríos importantes que irrigan y proveen de agua a los valles y ciudades de las partes más bajas. Alto Perú se ubica a más de 3900 msnm, en el departamento de Cajamarca, esta zona forma parte de la jalca cajamarquina y es un ecosistema de gran valor ambiental, social y cultural, pero a la vez muy frágil, según un estudio hecho por el Gobierno Regional de Cajamarca está formado por 284 lagunas de diferentes tamaños y se han contabilizado 456 manantiales; esta zona es cabecera de tres cuencas hidrográficas, dando origen al río Llaucano, al río Quebrada Honda y al río Porcón y estos a su vez al Mashcón y al río Cajamarquino, permitiendo el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias en los valles de Cajamarca, Llacanora, Namora y San Marcos. (Sánchez, 2017)

Suárez et al. (2016), en su estudio analizó el potencial de carbono orgánico almacenado en humedales de altura de Ecuador. Determinando la cantidad de carbono a través de un muestreo sistemático, concluyendo que en la Reserva Ecológica Antisana (REA) y el Parque Nacional Cajas (PNC) el humedal considerado como “conservado” es el que tiene más alto contenido de carbono, por ello, conservar estos ecosistemas es de suma importancia en la regulación del ciclo de carbono en la Tierra.

Martínez et al. (2008), realizaron una investigación acerca del carbono orgánico del suelo (COS) y las propiedades del suelo, determinando que el COS se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes al aportar elementos como nitrógeno, cuyo aporte mineral normalmente es deficitario; además, al modificar el pH hacia valores cercanos a la neutralidad, el carbono orgánico aumenta la solubilidad de varios nutrientes y actúa como fuente energética para organismos heterótrofos del suelo; por tanto, a través de los efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ha resultado ser el principal determinante de su productividad.

Hernández (2010), realizó un estudio acerca de suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano, donde analizó el rol de los humedales en el ciclo del carbono, reportado productividades de $0.4 - 32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; además menciona que, en diversos humedales de Norteamérica se ha reportado oscilaciones entre 470 y 2902 Mg ha^{-1} ; sin embargo, los suelos inundados poseen condiciones anaerobias, lo cual favorece la producción de CH_4 , gas de efecto invernadero, con un potencial de calentamiento global 21 veces mayor al CO_2 .

Las emisiones de CH₄ de humedales investigados estuvieron dentro del rango de 0.001 - 1.810 Mg C ha⁻¹ año⁻¹; ante ello, un modelo realizado en la investigación de Whiting y Chanton (2001) manifiesta que, dependiendo al tiempo a ser considerado los humedales con periodo corto (20 años) son fuente de metano, mientras que si se considera a humedales con periodo largo (500 años), estos son sumideros de carbono; concluyendo que depende al tiempo todos los suelos de los humedales pueden ser sumideros de carbono. (Hernández, 2010)

Salvador, Monerris & Rochefort (2014), investigaron acerca de la concentración de materia orgánica en tres diferentes humedales situados en la puna peruana, determinando que las causas más comunes de perturbación en el suelo fueron el sobrepastoreo, la extracción de turba y las carreteras, aunque las más graves tuvieron mayor ocurrencia en sitios de extracción minera, donde las turberas son especialmente vulnerables porque no están bajo protección legal.

Zorogastúa-Cruz et al. (2012), estudiaron la dinámica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano; mediante la evaluación de las variables Cobertura y Uso de la Tierra, biomasa aérea a escala espacial de trabajo y el área del ecosistema de bofedales. Los cambios en el NDVI (Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación), durante el período estudiado, explicaron el 90% de la variación de la materia seca verde. De acuerdo al comportamiento del NDVI obtenido de imágenes SPOT 4 - 5 Vegetation 1-2, a nivel cualitativo, los bofedales muestran capacidad de recuperación de la biomasa, sin embargo, con escenas del LANDSAT 2 (MSS) y 5 (TM), a mayor detalle, se observa disminución del área, en consecuencia de la biomasa y la capacidad de regulación hídrica de este ecosistema.

Vela et al. (2011), analizaron los niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, México; para ello, estimaron el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) de áreas con cobertura de bosque, uso agrícola y en áreas reforestadas, mediante el método de Walkley & Black, delimitando las unidades geomorfológicas que sirvieron de base, estudiaron 50 sitios con muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0 - 30 cm con diferente cobertura vegetal. El mayor contenido de COS se presentó en los suelos de sitios reforestados con *Abies religiosa*, *Pinus spp.*, y *Pinus-cupressus*. Los suelos agrícolas contienen menos de la mitad de COS que los suelos forestales. Los contenidos más altos de COS se localizan en la Sierra de las Cruces y Sierra de Guadalupe, así como en los suelos de los volcanes Pelado, Cuautzin y Tláloc.

El ecosistema formado por el suelo de turberas de Alto Perú es de gran importancia; pero, a lo largo de los años está siendo alterado por actividades antropogénicas como la minería, la agricultura y la ganadería, las cuales han ido deteriorando a este impresionante lugar que brinda invaluable funciones por el gran valor ambiental, económico y social que tiene para las poblaciones rurales y urbanas que residen aguas abajo.

Este ecosistema cajamarquino según investigaciones semejantes tiene un alto potencial de secuestro de carbono; por lo que, cuantificar el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) de turberas de Alto Perú en Cajamarca 2018, permite agregarle valor como sumidero de carbono, además de fomentar el desarrollo de políticas sobre la conservación del suelo de la cabecera de cuenca cajamarquina, priorizando a los suelos que contengan las más altas reservas de carbono cumpliendo así lo determinado por FAO que menciona que se debe conservar prioritariamente los suelos con vastas zonas de turberas intactas y prístinas, en especial en regiones donde son más vulnerables debido al cambio de uso de suelo; permitiendo que la población conozca los beneficios que nos brinda, para determinar su importancia y poder crear una cultura de conservación, que permita evitar el desarrollo de actividades que degraden el lugar, como el drenado, quemas, remoción de suelo, extracción de turba y sobrepastoreo, las cuales provocan la liberación de gases contaminantes.

1.2. Formulación del problema

¿Qué cantidad de carbono orgánico se encuentra acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú – Cajamarca, 2018?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Cuantificar el carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú, Cajamarca 2018.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la densidad aparente del suelo de turberas de Alto Perú, Cajamarca 2018.
- Determinar el porcentaje de carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú, Cajamarca 2018.
- Elaborar un mapa de distribución de carbono orgánico acumulado en las turberas de Alto Perú, mediante una correlación geoespacial con el análisis Kriging.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca acumula más de 150 Megagramos por hectárea (Mg / ha) de carbono orgánico hasta el año 2018.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La densidad aparente del suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca es mayor a 1 gramo por centímetro cúbico (g/cm^3).
- El porcentaje de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú es superior a 12 por ciento.
- El mapa elaborado mediante la correlación Kriging realiza una estimación de la cantidad de carbono orgánico acumulado en las turberas de Alto Perú permitiendo mostrar la distribución en una superficie de predicción (un mapa de distribución de carbono orgánico).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Hernández, Fernández & Lucio (2014), definen a la investigación no experimental cuantitativa como la que se realiza sin manipular deliberadamente variables; es decir, no se hace variar intencionalmente las variables independientes, sino que el fin de estas es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para posteriormente analizarlos.

Además, dentro de este tipo de investigación existen algunos diseños, entre ellos el diseño transeccional descriptivo, el cual recoge datos en un solo momento, siendo su propósito describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado, de otra manera es como tomar una fotografía de algo que sucede.

De acuerdo a la definición planteada por Hernández et al. (2014), la investigación propuesta cumple con las características planteadas por el autor, por lo que se puede definir que esta es una investigación no experimental cuantitativa con un diseño transeccional descriptivo.

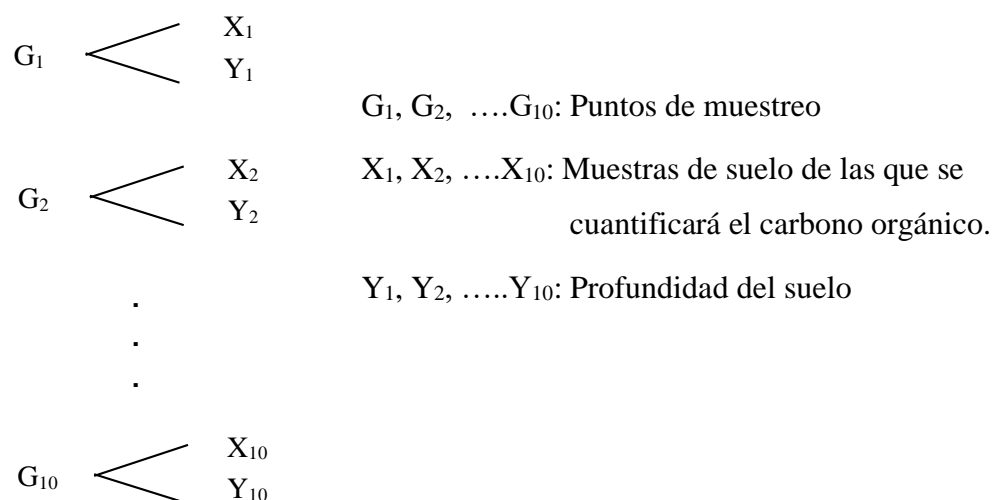


Figura 1: Diseño de investigación

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población

Suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca.

2.2.2. Muestra

10 parcelas de 1 x 1 metro de donde se extrajeron 10 muestras mediante homogenización de 5 submuestras.

2.3. Materiales, instrumentos y métodos

2.3.1. Recolección de datos

Para la recolección de datos se tomó en cuenta el Manual de Procedimientos de los Análisis de Suelos y Agua con fines de Riego desarrollado en el Ministerio de Agricultura y Riego mediante el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (Bazán, 2017) y la Guía de Muestreo de Suelos 2014 dada por el MINAM de conformidad con el Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

2.3.1.1. Materiales e instrumentos

- Palana plana
- Balde de plástico
- Cilindro muestreador de volumen conocido
- Bolsa Ziploc
- Marcador Indeleble
- Hoja de registro de datos
- Mapa de identificación de puntos de muestreo (Software Google Earth)
- GPS MAP 62 S.

2.3.1.2.Métodos

2.3.1.2.1. Recolección de muestras en campo

- Se delimitó la superficie de muestreo en un mapa realizado en el software Google Earth, con la finalidad de conocer la extensión de la zona a muestrear; para determinar la ubicación de cada punto se utilizó el muestreo estadístico aleatorio simple, mediante el método de rejilla aleatoria, según lo propuesto por la Guía de Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente.
- Se definió la profundidad de muestreo tomando en cuenta la finalidad de estudio; para muestrear el subsuelo las muestras fueron tomadas con una profundidad de 30 cm según lo estipulado por el Manual de Procedimientos de los Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riego.
- Con ayuda de un GPS, se recorrió el área de muestreo y se ubicó los puntos de donde se extrajeron las muestras.
- Como se desea cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo, fue necesario retirar toda la cobertura vegetal.
- Para tener una muestra más representativa se tomó 5 submuestras realizando un recorrido en zigzag a través de la parcela.

- Las submuestras fueron homogenizadas en un balde, para después transferir una porción de aproximadamente 1 Kg a una bolsa ziploc.
- Para determinar la densidad aparente se tomó las muestras con un cilindro de volumen conocido.
- Se identificó cada muestra con un marcador indeleble, etiquetando cada una, para luego ser trasladada al laboratorio.

2.3.2. Análisis de datos

Para realizar el análisis y tratamiento de datos se utilizó la cuantificación de carbono en el suelo mediante combustión húmeda con el método de Walkley & Black, y se determinó la densidad aparente con el método de cilindro de volumen conocido, ambos procesos se desarrollaron siguiendo el Manual de Procedimientos de los Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riego desarrollado Ministerio de Agricultura y Riego mediante el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (Bazán, 2017). Con los datos obtenidos se elaboró un mapa de distribución de carbono orgánico mediante un análisis geoestadístico utilizando la correlación kriging en el software ArcGIS 10.4.

2.3.2.1. Materiales e instrumentos

- Matraz erlenmeyer de 500 mL
- Pipeta volumétrica graduada
- Propipeta
- Agitador magnético

- Bureta para titulación
- Espátula de aluminio
- Balanza analítica
- Estufa para secado
- Tabla Munsell
- Reactivos
 - Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)
 - Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
 - Sulfato ferroso amoniacal
 - Ortofenantrolina - sulfato ferroso
 - Ácido fosfórico (H_3PO_4)
- Software ArcGis 10.4

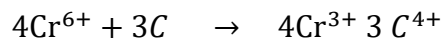
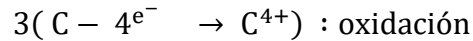
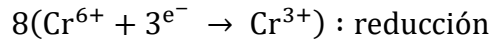
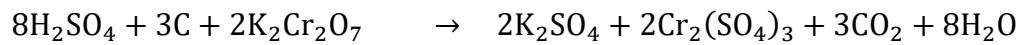
2.3.2.2. Métodos

2.3.2.2.1. Método de Walkley & Black para determinar el porcentaje carbono orgánico del suelo.

Principio

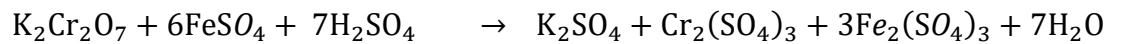
El carbono orgánico del suelo se puede oxidar al mezclar dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), y mediante una titulación con sulfato ferroso amoniacal se puede determinar el exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).

Ecuación 1: Reacción de oxidación - reducción



Fuente: (Bazán, 2017)

Ecuación 2: Reacción de titulación.



La equivalencia en esta reacción es dada por el indicador, el cual es un indicador redox.

Fuente: (Bazán, 2017)

2.3.2.2.2. Método del cilindro de volumen conocido para determinar la densidad aparente del suelo.

Este método consiste en extraer un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo cuando este se seque por calentamiento en una estufa a 105° C durante 24 horas. Para ello se utiliza un cilindro metálico de volumen conocido. La densidad se determina por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente.

2.4. Procedimiento

2.4.1. Preparación de los reactivos

- Dicromato de potasio 1N: Se disolvió en agua 49.04 g del reactivo $K_2Cr_2O_7$ (previamente secado a 105 °C) hasta llevarlo a 1000 mL.
- Sulfato ferroso amoniacal 0.5 N: Se pesó 139 g de la sal y se adicionó 800 mL de agua destilada, se disolvió y adicionó 15 mL de H_2SO_4 concentrado se dejó enfriar y se llevó a volumen de 1000 mL.
- Indicador:
 - Ortofenantrolina - sulfato ferroso 0.025 M. Este indicador se conoce comercialmente con el nombre de ferroína.
Se disolvió 0.174 g de sulfato de hierro (II) heptahidratado en agua, luego se añadió 0.296 g de 1-10 fenantrolina monohidratada, finalmente se agitó hasta disolución y se enrasó a 25 mL.
- Ácido sulfúrico concentrado 96 %; densidad = 1.84 g/cm³

2.4.2. Determinación del porcentaje de carbono orgánico en el suelo.

2.4.2.1. Titulación

- En un matraz erlenmeyer de 500 mL se agregó cierta cantidad de suelo variando entre 0.05 g y 1 g, y de manera paralela se llevó un blanco para poder conocer la normalidad del sulfato ferroso amoniacal.
- Se adicionó 10 mL de 1 N dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), luego 20 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y se mezcló la solución para homogeneizar.

- Se dejó en reacción por 1 hora y luego se adicionó 200 mL de agua destilada, luego 5 mL de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4) y 3 gotas de indicador (Ortofenantrolina - sulfato ferroso).
- Se tituló con 0.5 N de sulfato ferroso amoniacal, con agitación en forma lenta hasta cambio de color.
- Se tituló el blanco.

2.4.2.2.Cálculos

Ecuación 3: Ecuación estequiométrica

$$10 \text{ mL } K_2Cr_2O_7 = 10 \text{ meq } K_2Cr_2O_7 = 10 \text{ meq Carbono} = 30 \text{ mg Carbono}$$

- Durante la titulación tomando en cuenta que se gastan **a** mL de sulfato ferroso amoniacal en el blanco y **b** mL en la muestra, la diferencia de titulación: **a – b**.

Ecuación 4: Gasto del reactivo

$$\frac{30 \times (a - b)}{a} \text{ mg Carbono}$$

Fuente: (Bazán, 2017)

- De la muestra se toma **c** gramos, por lo que el contenido de carbono oxidable se puede determinar según lo siguiente:

Ecuación 5: Oxidación del carbono

$$\frac{30 \times (a - b) \times 100}{c \times a \times 1000} \text{ g Carbono por } 100 \text{ g de suelo}$$

Fuente: (Bazán, 2017)

Simplificando la ecuación 5, podemos obtener lo siguiente:

Ecuación 6: Ecuación simplificada

$$C\% = \frac{3(a - b)}{a \times c}$$

Fuente: (Bazán, 2017)

El método de Walkley y Black es convencional por ello el proceso de oxidación representa el 75% del carbono orgánico total presente. Esto hace que se fije al carbono equivalente un valor de 4 en vez del valor estequiométrico 3, por lo que la resultante será:

Ecuación 7: Determinación del porcentaje carbono orgánico en el suelo.

$$C\% = \frac{4(a - b)}{a \times c}$$

Fuente: (Bazán, 2017)

2.4.3. Determinación de la densidad aparente del suelo (ρ_a)

La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco; este incluye a los poros y a los sólidos, por ello, cualquier factor que influya en su porosidad afectará a la densidad aparente.

Esta característica es importante, y como la densidad de la partícula (ρ_p) es casi constante para los suelos, es necesario determinar la densidad aparente.

- Se definió el lugar para determinar la densidad aparente del suelo (ρ_a) gracias a la ayuda del GPS.
- Se introdujo en el suelo el cilindro de volumen conocido para tomar la muestra.

- Se retiró el cilindro con la muestra de volumen conocido.
- Se transfirió la muestra de suelo contenida en el cilindro hacia a una bolsa ziploc, para luego ser etiquetada y llevada al laboratorio.
- En el laboratorio se secó la muestra en la estufa a 105 °C por 24 horas, luego se dejó enfriar para después pesar el suelo seco.
- Relacionando la masa seca y el volumen se obtuvo la densidad aparente:

Ecuación 8: Densidad Aparente del suelo

$$\rho a = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3$$

ρa : Densidad Aparente del suelo

M : Masa del suelo seco

V : Volumen del cilindro conocido

Fuente: (Bazán, 2017)

2.4.4. Cuantificación del carbono orgánico en el suelo

Conociendo el porcentaje de carbono del suelo y su densidad aparente se aplicó lo siguiente:

Ecuación 9: Cuantificación de carbono orgánico del suelo

$$C = \%C * \rho a * P$$

Fuente: (Bazán, 2017)

Donde:

C = Cantidad de carbono orgánico en el suelo (g/cm^2);

$\%C$ = % de carbono orgánico en el suelo (%)

ρa = Densidad aparente (g/cm^3);

P = Profundidad de muestreo (cm).

2.4.5. Análisis geoestadístico

Para un análisis completo del área de estudio, se elaboró un mapa de distribución de carbono orgánico utilizando los datos de cuantificación y la ubicación del muestreo en el software ArcGis mediante el análisis geoestadístico de Kriging; el cual es un método de estimación que sirve para generar una superficie basándose en modelos estadísticos los cuales incluyen una autocorrelación; esto quiere decir que, usa las relaciones estadísticas entre los puntos medidos para no solo producir superficies de predicción; sino que, también proporciona certeza o precisión de las predicciones. (ESRI, 2018)

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Tabla 1
Determinación del porcentaje de carbono orgánico del suelo.

N° Muestras	Coordenas UTM			N° Réplicas	c (g)	a (mL)	b (mL)	%C	%C
	Norte	Este	Altitud						
M1	9237029	762332	3926	1	0.5	19.9	13.5	2.573	2.640
				2	0.5	19.9	13.4	2.613	
				3	0.5	19.9	13.1	2.734	
M2	9235755	763136	3924	1	0.1	19.9	8.95	22.010	21.876
				2	0.1	19.9	9.1	21.709	
				3	0.1	19.9	9	21.910	
M3	9236002	763430	3927	1	0.2	19.9	10.7	9.246	9.246
				2	0.2	19.9	10.7	9.246	
				3	0.2	19.9	10.7	9.246	
M4	9236082	764110	3930	1	0.1	19.9	15.2	9.447	9.414
				2	0.1	19.9	15.25	9.347	
				3	0.1	19.9	15.2	9.447	
M5	9235228	763709	3928	1	0.1	19.9	12.9	14.070	14.070
				2	0.1	19.9	12.9	14.070	
				3	0.1	19.9	12.9	14.070	
M6	9235446	764083	3923	1	0.2	19.9	10.35	9.598	9.531
				2	0.2	19.9	10.5	9.447	
				3	0.2	19.9	10.4	9.548	
M7	9235333	764602	3923	1	0.05	19.9	12.5	29.749	30.151
				2	0.05	19.9	12.3	30.553	
				3	0.05	19.9	12.4	30.151	
M8	9235028	764302	3920	1	0.05	19.9	13.1	27.337	27.203
				2	0.05	19.9	13.2	26.935	
				3	0.05	19.9	13.1	27.337	
M9	9234768	763922	3928	1	0.2	19.9	14.6	5.327	5.327
				2	0.2	19.9	14.6	5.327	
				3	0.2	19.9	14.6	5.327	
M10	9234338	764136	3945	1	0.1	19.9	16.3	7.236	7.236
				2	0.1	19.9	16.2	7.437	
				3	0.1	19.9	16.4	7.035	
Promedio									13.669

Nota: Para el cálculo del % de carbono orgánico se usó la siguiente fórmula: $C\% = \frac{4(a-b)}{a \times c}$, donde: **a** es la cantidad de sulfato ferroso amoniacal en mL gastados en la titulación de la muestra, **b** la cantidad de sulfato ferroso amoniacal en mL gastados en la titulación del blanco y **c** la masa de la muestra analizada en gramos.

Tabla 2:

Determinación de la densidad aparente (g/cm^3) del suelo de turberas de Alto Perú.

N° Muestras	Coordenas UTM			M (g)	V (cm^3)	ρa (g/cm^3)
	Norte	Este	Altitud			
M1	9237029	762332	3926	156.751	141.372	1.109
M2	9235755	763136	3924	141.314	141.372	1.000
M3	9236002	763430	3927	155.546	141.372	1.100
M4	9236082	764110	3930	140.496	141.372	0.994
M5	9235228	763709	3928	133.191	141.372	0.942
M6	9235446	764083	3923	163.545	141.372	1.157
M7	9235333	764602	3923	151.268	141.372	1.070
M8	9235028	764302	3920	126.784	141.372	0.897
M9	9234768	763922	3928	178.634	141.372	1.264
M10	9234338	764136	3945	143.007	141.372	1.012
Promedio						1.054

Nota: Para calcular la densidad aparente (ρa) en g/cm^3 se usó la siguiente fórmula:

$$\rho a = \frac{M}{V}, \text{ donde } M \text{ es la masa del suelo seco en gramos y } V \text{ es el volumen conocido en}$$

centímetros cúbicos.

Tabla 3:

Cuantificación de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú.

N° Muestras	Coordenas UTM			N° Réplicas	%C	ρa (g/cm ³)	P (cm)	C (g/cm ²)	C (g/cm ²)
	Norte	Este	Altitud						
M1	9237029	762332	3926	1	2.573	1.1088	30	0.8558	0.8781
				2	2.613	1.1088	30	0.8692	
				3	2.734	1.1088	30	0.9093	
M2	9235755	763136	3924	1	22.010	0.9996	30	6.6003	6.5601
				2	21.709	0.9996	30	6.5099	
				3	21.910	0.9996	30	6.5702	
M3	9236002	763430	3927	1	9.246	1.1003	30	3.0520	3.0520
				2	9.246	1.1003	30	3.0520	
				3	9.246	1.1003	30	3.0520	
M4	9236082	764110	3930	1	9.447	0.9938	30	2.8166	2.8066
				2	9.347	0.9938	30	2.7866	
				3	9.447	0.9938	30	2.8166	
M5	9235228	763709	3928	1	14.070	0.9421	30	3.9768	3.9768
				2	14.070	0.9421	30	3.9768	
				3	14.070	0.9421	30	3.9768	
M6	9235446	764083	3923	1	9.598	1.1568	30	3.3310	3.3078
				2	9.447	1.1568	30	3.2787	
				3	9.548	1.1568	30	3.3136	
M7	9235333	764602	3923	1	29.749	1.0700	30	9.5494	9.6784
				2	30.553	1.0700	30	9.8075	
				3	30.151	1.0700	30	9.6784	
M8	9235028	764302	3920	1	27.337	0.8968	30	7.3548	7.3187
				2	26.935	0.8968	30	7.2466	
				3	27.337	0.8968	30	7.3548	
M9	9234768	763922	3928	1	5.327	1.2636	30	2.0192	2.0192
				2	5.327	1.2636	30	2.0192	
				3	5.327	1.2636	30	2.0192	
M10	9234338	764136	3945	1	7.236	1.0116	30	2.1960	2.1960
				2	7.437	1.0116	30	2.2570	
				3	7.035	1.0116	30	2.1350	
Promedio					13.669	1.054	30	4.1794	

Nota: Para cuantificar el carbono se usó la siguiente fórmula $C = \%C * \rho a * P$, donde: **C** es la cantidad de carbono en el suelo en g / cm²; **%C** es el porcentaje de carbono orgánico; **ρa** es la densidad aparente del suelo en g/cm³ y **P** es la profundidad de muestreo (cm).

Tabla 4:

Cuantificación de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú en megagramos por hectárea (Mg/ha).

Muestras	Coordenas UTM			C (Mg/ha)
	Norte	Este	Altitud	
M1	9237029	762332	3926	87.8170
M2	9235755	763136	3924	656.0275
M3	9236002	763430	3927	305.2012
M4	9236082	764110	3930	280.6591
M5	9235228	763709	3928	397.6604
M6	9235446	764083	3923	330.7638
M7	9235333	764602	3923	967.8471
M8	9235028	764302	3920	731.8695
M9	9234768	763922	3928	201.9359
M10	9234338	764136	3945	219.5981
Promedio				417.9380

Nota: Para calcular la cantidad de carbono acumulado en el suelo (C) en megagramos por hectárea (Mg/ha) se utilizó un factor de conversión de 100, tomando en cuenta que 1 Mg (megagramo) equivale a 10^6 g (gramos) y 1 ha (hectárea) equivale a 10^8 cm² (centímetros cuadrados).

Tabla 5:

Determinación del color del suelo en cada muestra según la Tabla de Munsell

N° de muestras		Color		
M1	10 YR	4/6	Dark Yellowish brown	Marrón amarillento oscuro
M2	2.5 YR	N 2.5	Black	Negro
M3	2.5 Y	3/2	Very dark grayish brown	Marrón grisáceo muy oscuro
M4	10 YR	4/4	Dark Yellowish brown	Marrón amarillento oscuro
M5	2.5 Y	3/2	Very dark grayish brown	Marrón grisáceo muy oscuro
M6	10YR	3/1	Very dark gray	Grisáceo muy oscuro
M7	2.5YR	N 2.5	Black	Negro
M8	5Y	2.5/2	Black	Negro
M9	5 YR	3/3	Dark reddish brown	Marrón rojizo oscuro
M10	10 YR	3/3	Dark Brown	Marrón oscuro

MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CARBONO EN SUELO DE TURBERAS DE ALTO PERÚ - CAJAMARCA 2018

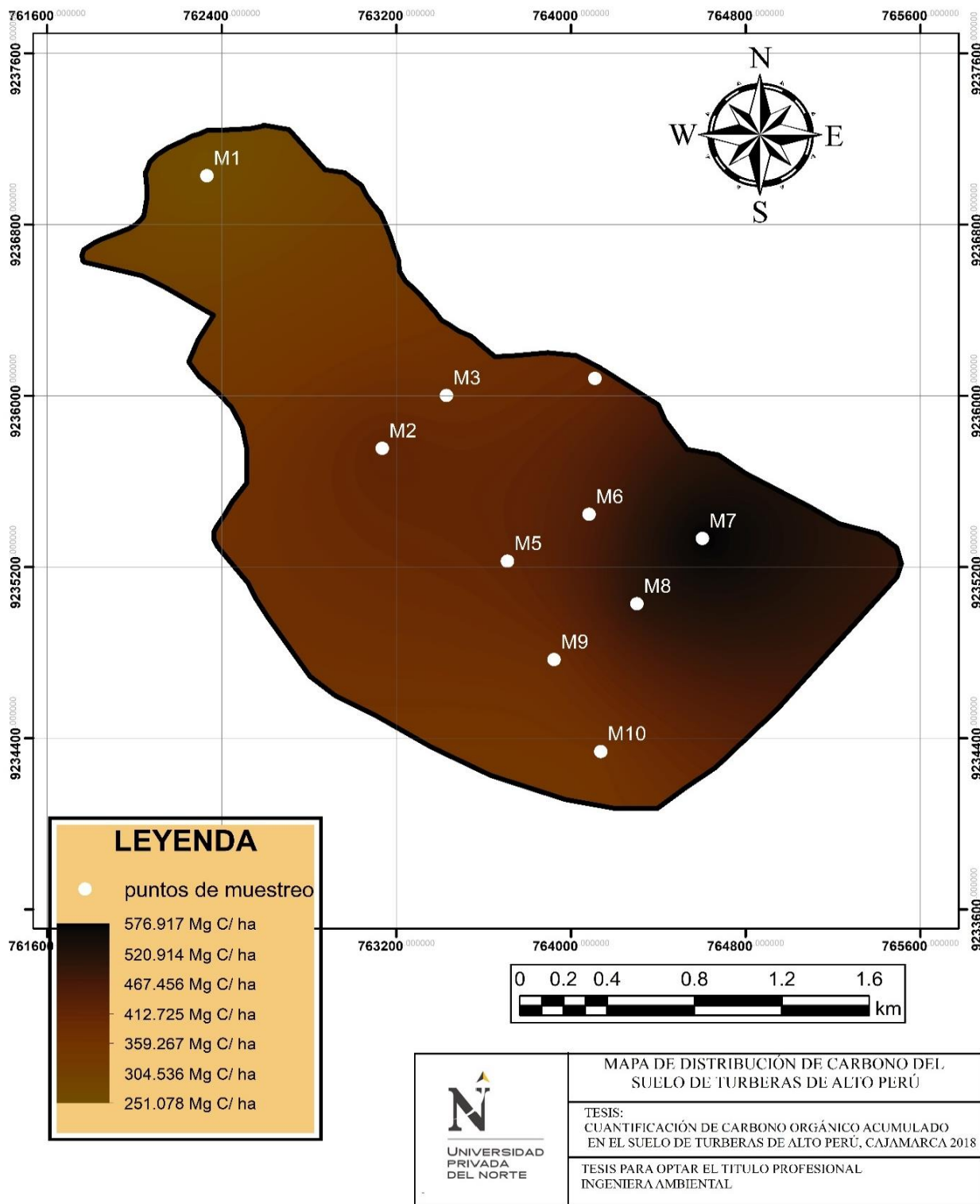


Figura 2. Cantidad de carbono orgánico en megagramos por hectárea (Mg/ ha) acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú 2018.

Nota: Datos obtenidos del laboratorio ambiental de la Universidad Privada del Norte.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

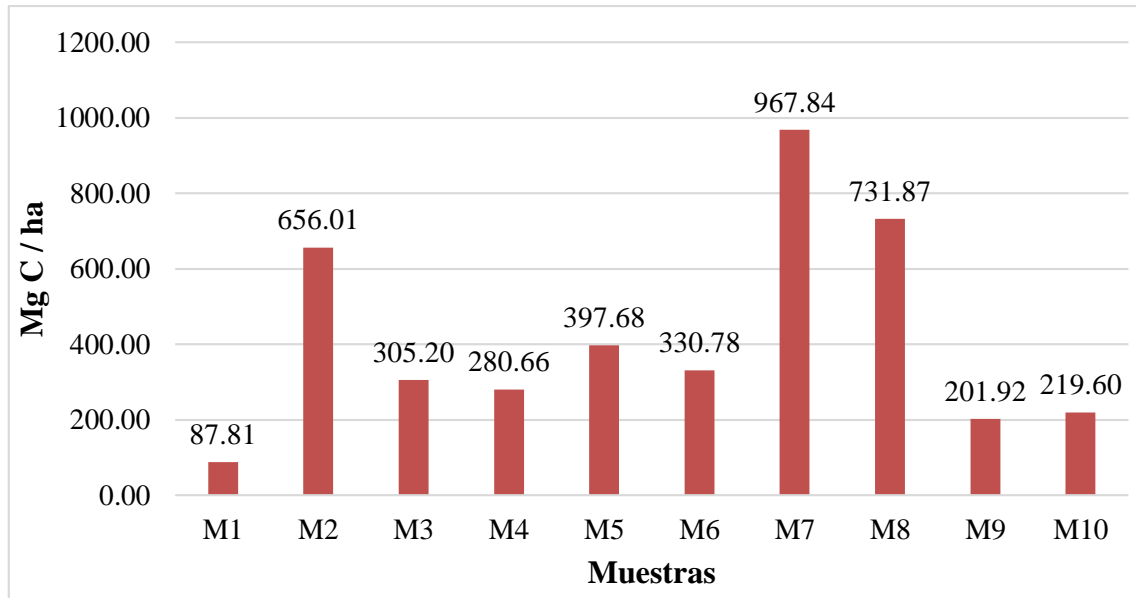


Figura 3. Cantidad de carbono orgánico en el suelo en megagramos por hectárea (Mg /ha).

En la figura 3 se puede apreciar que la mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo se encuentra en la parcela donde se tomó la muestra 7, mientras que la menor esta donde se tomó la muestra 1, además se puede observar que existe variación entre las muestras cuantificadas, evidenciando una variabilidad entre la capacidad de acumulación de carbono en el suelo analizado.

La cantidad de carbono orgánico capturado en las turberas de Alto Perú Cajamarca varía entre 87.81 Mg/ha y 967.84 Mg/ha como se puede observar en la Tabla 4, teniendo un valor promedio sacado de 10 muestras de 417.94 Mg/ha, este valor nos permite comprobar que este ecosistema forma parte de uno de los ecosistemas más frágiles, pero capaces de acumular gran cantidad de carbono, por lo que, si no tiene una adecuada conservación y gestión de uso de suelo se puede liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

El mapa de distribución de carbono orgánico de la figura 1 fue realizado mediante un análisis geoespacial Kriging en el software de ArcGIS 10.4 utilizando los datos de la Tabla 4 de cantidad de carbono orgánico en Mg/ha, el análisis realizado permitió generar una superficie basada en modelos estadísticos que usan la relación entre la ubicación geográfica y la cantidad de carbono orgánico (COS) acumulado en el suelo de turberas; este análisis permitió realizar una predicción para lograr conocer la capacidad del suelo de turberas de Alto Perú - Cajamarca para acumular COS, el resultado de esto no permite apreciar de una forma más comprensible, dinámica y gráfica la distribución del carbono orgánico en el suelo a lo largo del área de estudio ocupada por las turberas de Alto Perú en Cajamarca, siendo los suelos de color negro los que presentan mayor cantidad de carbono, y los suelos de color marrón amarillento oscuro los de menor concentración; pretendiendo así dar a conocer su importancia, contribuyendo con información eficaz que permita agregarle valor como sumidero de carbono a este diverso lugar.

Los valores encontrados al cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo, corresponden a un ecosistema de la Jalca Cajamarquina, conformado por un conjunto de turbas ubicadas en la parte altoandina de la región Cajamarca, dicha zona presenta acumulación de materia orgánica (turba), debido a que las condiciones climáticas (altas precipitaciones y humedad) permiten una alta productividad de plantas que se combina con la lenta descomposición.

El valor promedio determinado fue de 417.94 megagramos de carbono orgánico por hectárea (MgC/ha); según Jackson (2000), citado por IPCC (2006) en suelos forestales el contenido de carbono orgánico varía entre 20 y más de 300 MgC/ha, esto dependiendo del tipo de bosque y las condiciones climáticas, de acuerdo a ello, podemos afirmar que el carbono orgánico acumulado en turbas o humedales es mayor si lo relacionamos con los ecosistemas forestales.

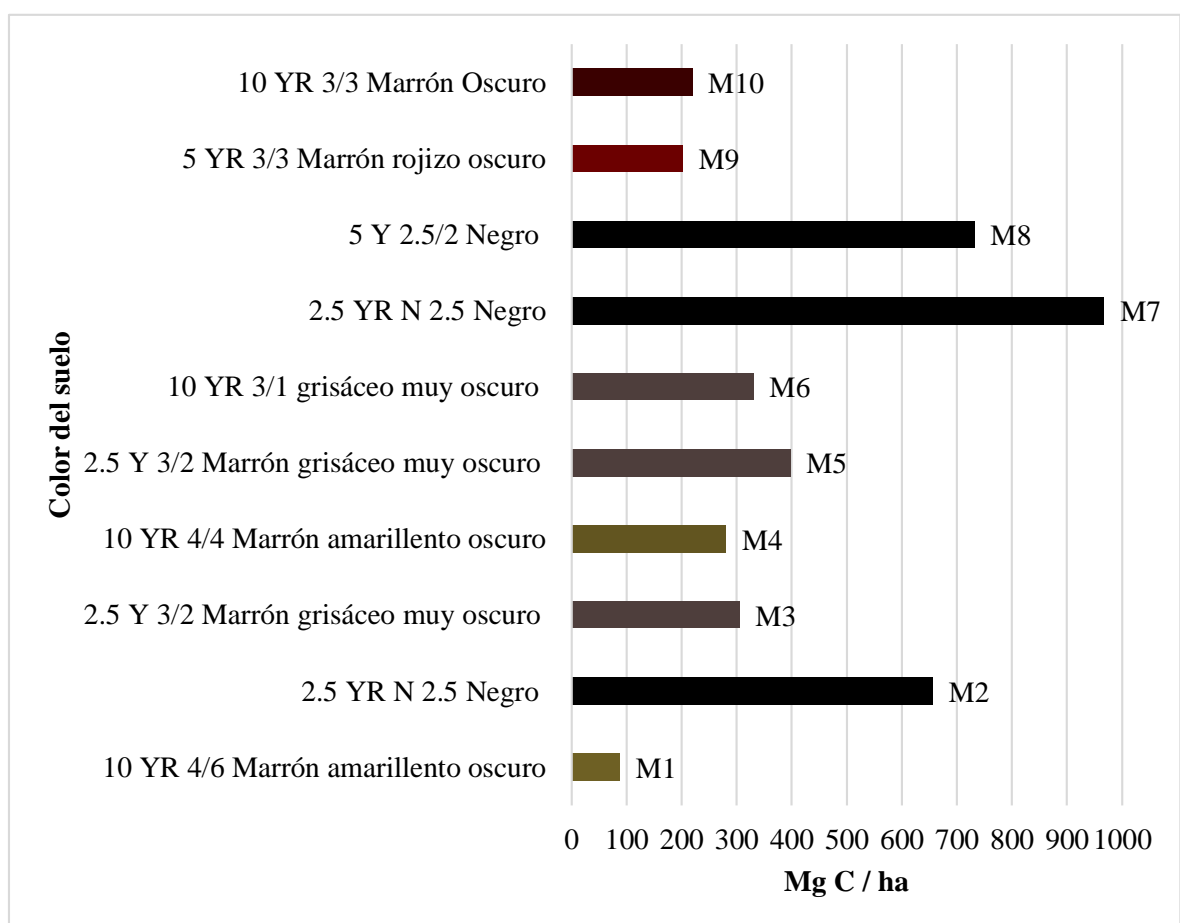


Figura 4: Relación entre el color del suelo y la acumulación de carbono orgánico en Mg/ ha.

En la figura 4 se aprecia que mientras más carbono tenga el suelo tiene una tonalidad más oscura variando de suelos de color negro a suelos de color marrón amarillento oscuro; siendo los suelos de color marrón grisáceo los que presentan una concentración de carbono intermedia.

Investigaciones como la hecha por Hernández (2010), han reportado productividades entre 0.4 y 32 megagramos de carbono orgánico por hectárea al año para diferentes humedales, esto permite considerar a estos paisajes como sumideros de carbono, por su alta capacidad de almacenamiento; sin embargo, también son fuente de metano (CH_4); ante ello, Whiting y Chanton (2001), en su investigación, basados en el modelo desarrollado, determinaron que los humedales estudiados fueron considerados fuentes de CH_4 , cuando el periodo de integración es corto (20 años); pero, si se considera un tiempo largo (500 años) todos los humedales pueden ser considerados como sumidero de carbono; por consiguiente, la zona en estudio debe lograr tal consideración por ser una gran reserva de almacenamiento de carbono en el suelo.

Se mencionó anteriormente que las turbas también son fuente de CH_4 , pero esto se explica porque el tiempo de vida en la atmósfera es más corto para CH_4 en relación al CO_2 ; por ello es importante comprender la importancia que tiene la conservación de estos ecosistemas, debido a que su conservación permite reducir la cantidad de CO_2 en la atmósfera.

Los valores presentados al cuantificar el carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca 2018 superan a los reportados por Suárez et al. (2016), quienes realizaron un estudio donde se analizó el potencial de carbono almacenando en los humedales de altura de la Reserva Ecológica Antisana (REA) y el Parque Nacional Cajas (PNC) del Ecuador, obteniendo valores entre $42.58 + 17.66$ y $176.57 + 67.99$ megagramos por hectárea.

Salvador, Monerris, & Rochefort (2014), determinaron la concentración de materia orgánica en tres diferentes humedales situados en la puna peruana, en su estudio determinaron que las causas más comunes de perturbación fueron el pastoreo, la extracción de turba y las carreteras, aunque las más graves tuvieron mayor ocurrencia en sitios de minería, donde las turberas son especialmente vulnerables porque no están bajo protección legal, esta situación es parecida a la realidad con la que se enfrenta las turberas en estudio; de modo que, es de suma importancia que este majestuoso territorio pueda ser protegido por la legislación peruana, para que los diversos servicios ambientales que brinda puedan seguir beneficiando a gran parte de la población cajamarquina.

En su investigación Martínez et al, (2008); mencionan que el carbono orgánico del suelo, está vinculado con la cantidad y disponibilidad de nutrientes, aportando nitrógeno y aumentando la solubilidad de nutrientes, actuando como fuente energética para organismo heterótrofos del suelo; esto nos permite comprender que la zona en estudio concentra una enorme disponibilidad de nutrientes siendo un suelo muy productivo, limitado por las condiciones climáticas, permitiendo que este sea parte de un sistema de abastecimiento y purificación de agua.

FAO (2017) afirma que una gestión insostenible del suelo pone en peligro a las turberas, generando erosión masiva y pérdida de carbono orgánico pasando este a la atmósfera, y a la vez indicándonos el grado de degradación; por esta razón, implementar una gestión sostenible en las turberas de Alto Perú permitirá lograr la protección del suelo y la preservación de una gran reserva de carbono orgánico, mediante la siembra de cultivos de cobertura, fertilización juiciosa y riego moderado.

Para lugares como la zona en estudio FAO recomienda dar prioridad para el desarrollo de políticas sobre conservación del suelo; debido a que zonas como estas son vulnerables al cambio de uso del suelo y representa una alta reserva de carbono.

4.2 Conclusiones

La cuantificación de carbono orgánico en el suelo de turberas de Alto Perú permitió determinar que el área de estudio ha acumulado en promedio 417.94 Mg/ha, variando entre 87.81 Mg/ha y 967.84 Mg/ha; evidenciando un gran potencial de secuestro de carbono.

Se determinó que la densidad aparente del suelo de turberas de Alto Perú en promedio es 1.054 g/cm³, variando entre 0.897 g/cm³ y 1.264 g/cm³.

Se determinó que el porcentaje de carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú varía entre 2.64 % y 30.15 %, con un valor promedio de 13.667%.

Se logró elaborar un mapa de distribución de carbono orgánico del suelo de turberas de Alto Perú mediante una correlación geoespacial utilizando el análisis de Kriging, el cual realizó una estimación que generó una superficie de predicción basada en modelos estadísticos.

REFERENCIAS

- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Obtenido de http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf
- Cáceres, M. (2013). *Protección y conservación de los bofedales y humedales en el Perú, Bolivia, España, Paraguay y Venezuela*. Obtenido de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/D1949F86098D9E6105257D000050DB9C/\\$FILE/Protecci%C3%B3nYConservaci%C3%B3nBofedales.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/D1949F86098D9E6105257D000050DB9C/$FILE/Protecci%C3%B3nYConservaci%C3%B3nBofedales.pdf)
- ESRI. (2018). *Cómo funciona Kriging*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- FAO. (2000). *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de dióxido de carbono*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-x4590s.pdf>
- FAO. (2002). *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. Obtenido de Medios y técnicas de Producción: <http://www.fao.org/3/s8630s/s8630s07.htm>
- FAO. (2017). *Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/b-i6937s.pdf>
- FAO. (2017). *Mapa de carbono orgánico del suelo*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/i8195es/I8195ES.pdf>
- FAO. (2017). *Mapa de Reservas de Carbono Orgánico en los suelos a escala global*. Obtenido de <https://apronadpanama.wordpress.com/2017/12/12/fao-publica-mapa-de-reservas-de-carbono-organico-en-los-suelos-a-escala-global/>

Hernández, M. (2010). *Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuente de metano.*

Obtenido de Acumulación de Carbono en Suelos de Humedales:

<https://www.globalnature.org/bausteine.net/f/7880/HumedalesyCarbono.pdf?fd=2>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación.*

México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Obtenido de

https://trabajosocialudocpno.files.wordpress.com/2017/07/metodologc3a3c2ada_de_la_investigac3a3c2b3n_-sampieri-_6ta_edicion1.pdf

Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P., & Swanson, D. K. (2013).

The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage. Obtenido de Earth System Science.

IPCC. (2006). *Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.*

León, Á. (2006). *RESERVA DE CARBONO EN BOFEDALES Y SU RELACIÓN CON LA*

FLORÍSTICA Y CONDICIÓN DEL PASTIZAL. Obtenido de

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2749/L02-L4-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Martínez, E., Fuentes, J., & Acevedo, E. (2008). *Carbono orgánico y propiedades del suelo.*

Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>

Mihelcic, J. R. (2008). *Fundamentos de la Ingeniería Ambiental.* México: LIMUSA, S.A.

MINAM. (2014). *Guía de muestreo de suelos.* Obtenido de

<http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

- Quispe, A. (s.f.). *Estado actual de la información sobre los recursos forestales y cambio en el uso de la tierra*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/006/ad396s/AD396s10.htm>
- Ramsar, S. d. (2016). *Introducción a la convención sobre los humedales*. Obtenido de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono*. Obtenido de http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf
- Rumpel, C. (2008). *Does Burning of harvesting residues increase soil carbon storage?* Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n2/art06.pdf>
- Salvador, F., Moneris, J., & Rochefort, L. (2014). *Peatlands of the Peruvian puna ecoregion: types, characteristics and disturbance*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/282882374_Peatlands_of_the_Peruvian_Puna_ecoregion_Types_characteristics_and_disturbance
- Sánchez, W. (2017). *Alto Perú: maravilla natural a 4000 metros de altitud*. Obtenido de <https://www.servindi.org/actualidad-opinion/22/03/2017/alto-peru-maravilla-natural-4000-metros-de-altitud>
- Solís, A., Nájera, J., Varga, B., Méndez, J., & Álvarez, M. (2014). *Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido la Victoria, Pueblo Nuevo, Durango*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/674/67435407001/>

- Suárez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). *Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas de Ecuador*. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v15n2/a12v15n2.pdf>
- Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A., Kuhry, P., Mazhitova, G., & Zimov. (2009). *Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region*. Obtenido de Global Geochemical.
- Vela, G., López, J., & Rodríguez, M. (2011). *Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a3.pdf>
- Whiting, G. J., & Chanton, J. P. (2001). *Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration*. Obtenido de <https://collab12.water.ca.gov/documents/18/3407432/Greenhouse+carbon+balance+of+wetlands.pdf>
- Zorogastúa-Cruz, P., Quiroz, R., & Garatuza-Payan, J. (2012). *Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano*. Obtenido de <http://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v8-n2-3-dinamica-de-los-bofedales-en-el-altiplano-peruano-boliviano.pdf>

ANEXOS

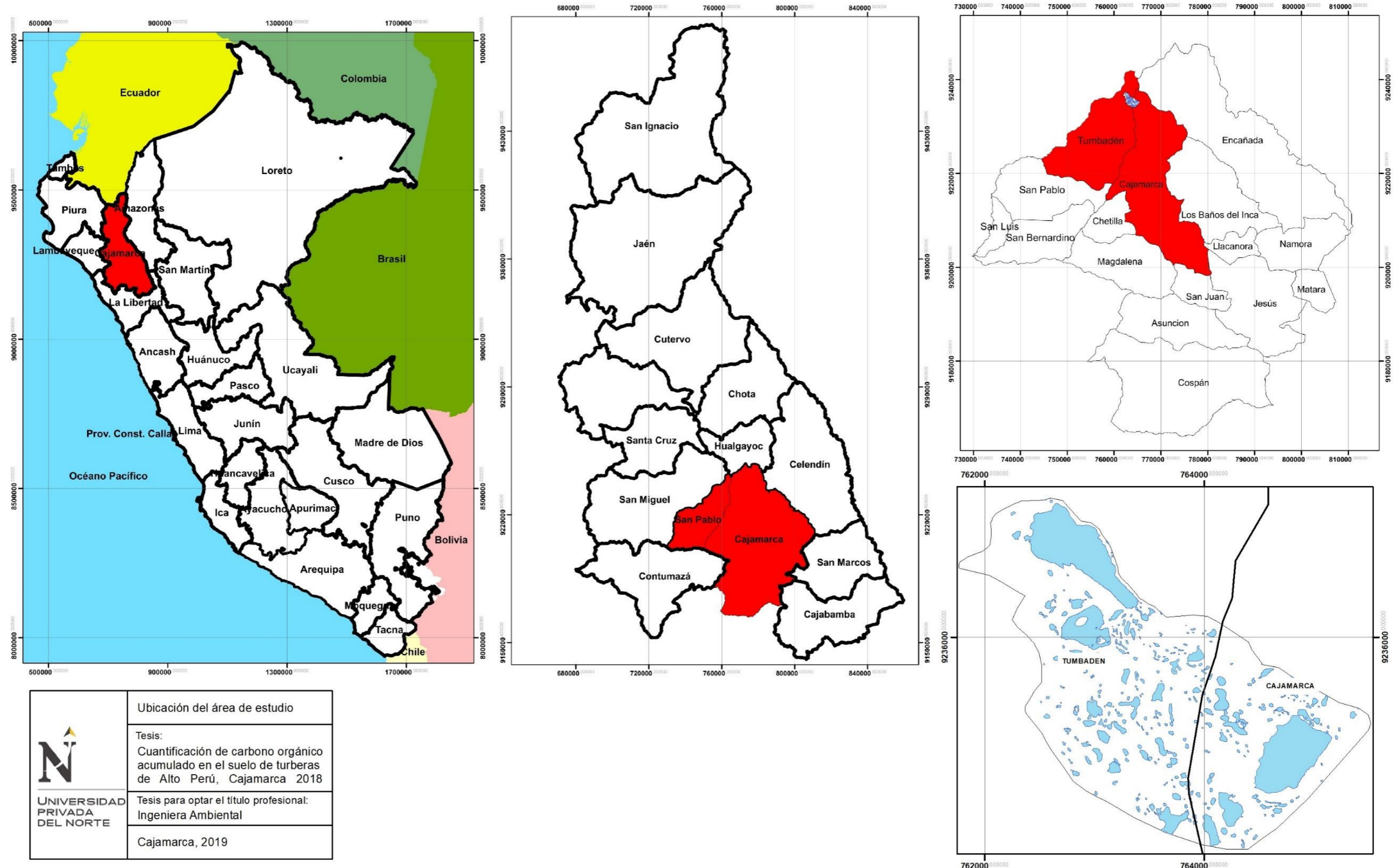
Anexo 1: Operacionalización de variables


VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
Carbono Orgánico del suelo	Carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. (FAO,2017)	% de carbono orgánico del suelo	%	Combustión húmeda de Walkley & Black
		Densidad Aparente del suelo	g/cm ³	Cilindro de volumen conocido
Suelo de turberas	Ecosistemas de humedales caracterizados por la acumulación de materia orgánica (turba) derivada de material vegetal muerto y en descomposición bajo condiciones de saturación permanente de agua. (Parish et al. 2008 y Orgiazzi et al. 2016 citados en FAO 2017)	Cantidad de carbono orgánico del suelo.	g/cm ²	Cuantificación de carbono orgánico

Anexo 2: Lista de acrónimos

- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- IUSS: Unión Internacional de las Ciencias del Suelo
- IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- COS: Carbono Orgánico del Suelo
- pH: Potencial de Hidrógeno
- NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global

Anexo 3: Ubicación del área de estudio



 <p>UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE</p>	Ubicación del área de estudio
	Tesis: Cuantificación de carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú, Cajamarca 2018
	Tesis para optar el título profesional: Ingeniera Ambiental
	Cajamarca, 2019

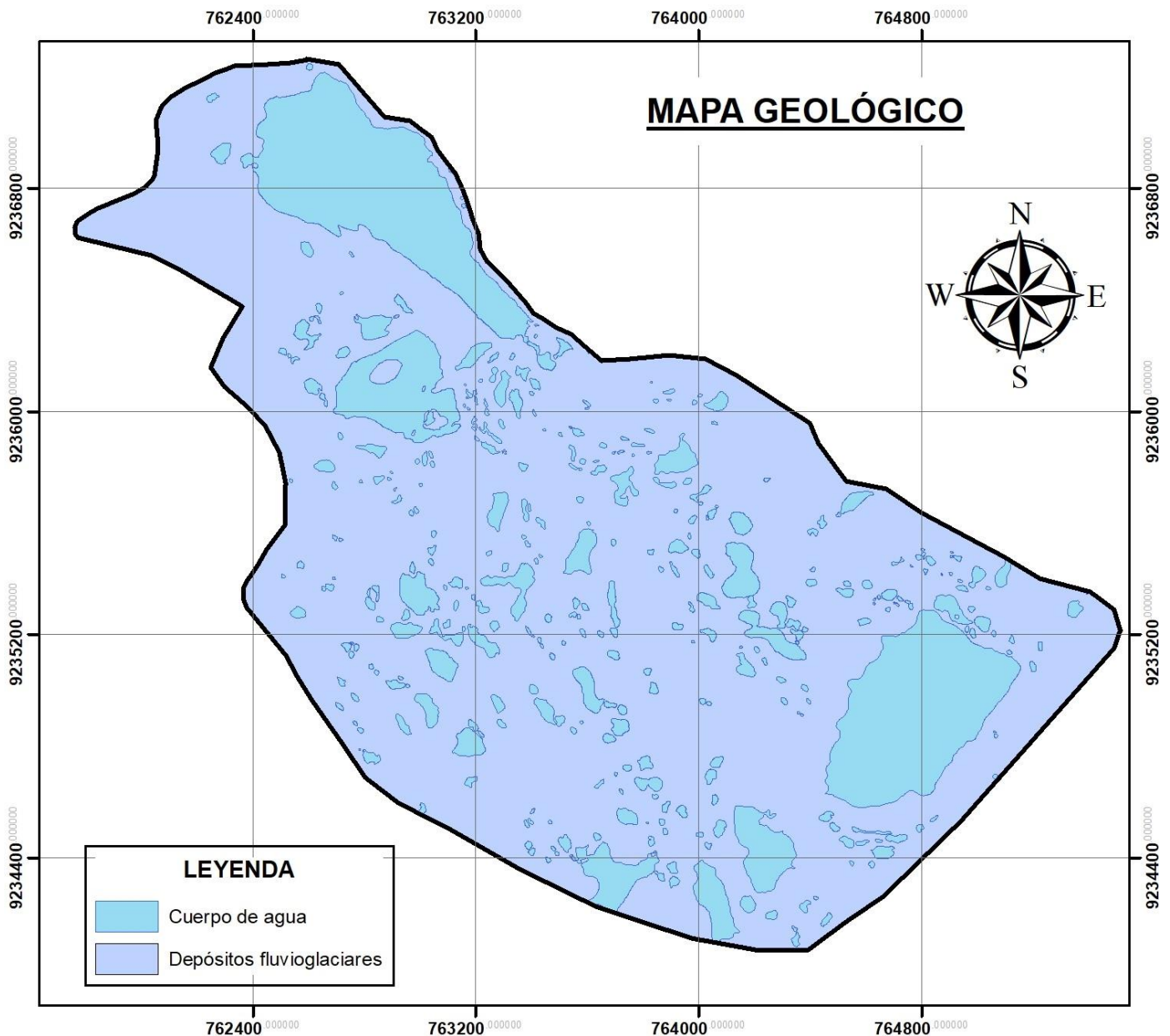
Anexo 4: Ubicación de los puntos de muestreo en turberas de Alto Perú – Cajamarca



Fuente: Google Earth

Anexo 5: Geología de la zona de estudio

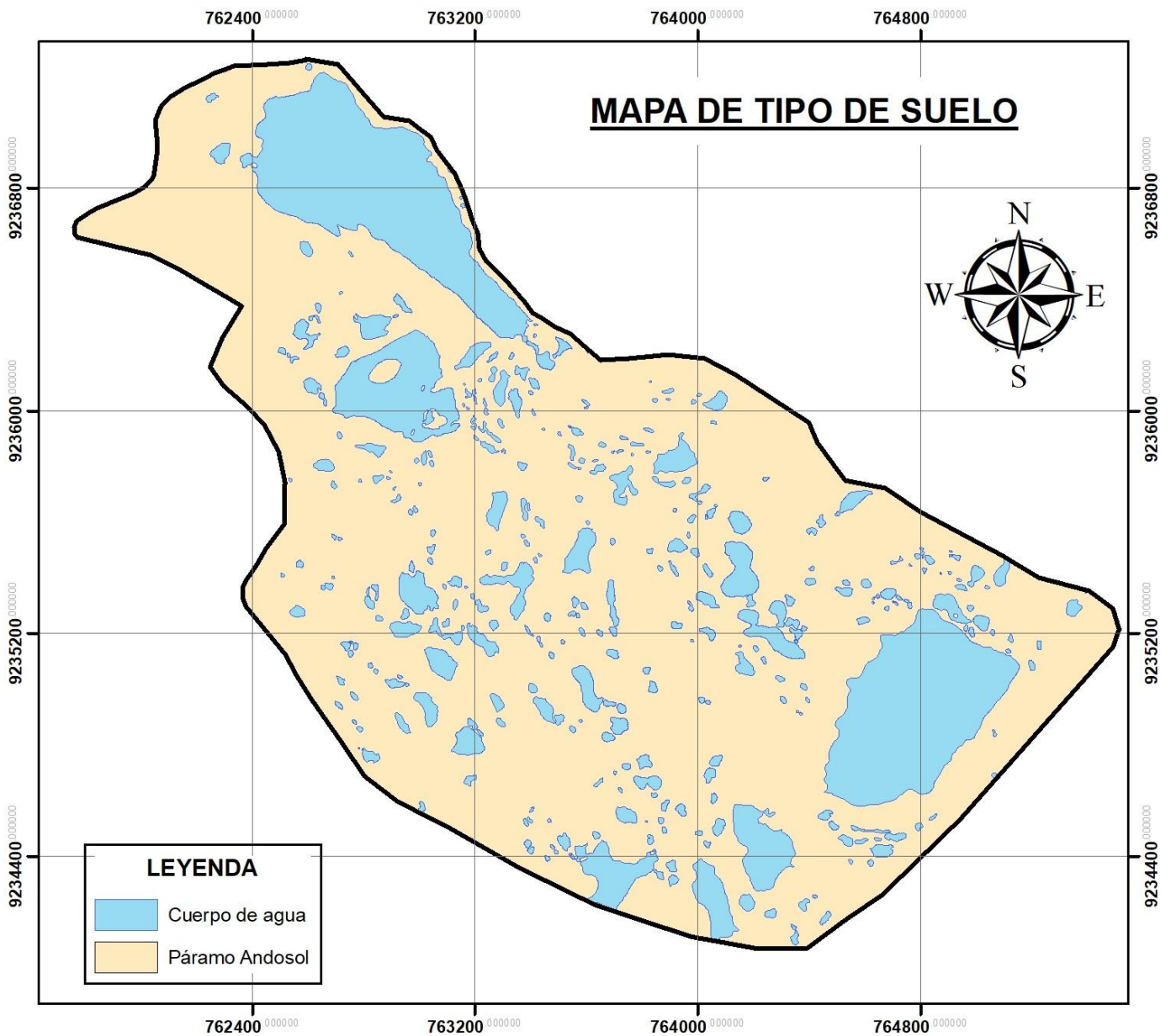
Se compone geológicamente de depósitos de origen fluvio-glaciares; con un paisaje fisiográfico ondulado suave y con un gran número de lagunas que son testigos de las glaciaciones ocurridas en estos lugares, rodeados de un sin número de bofedales o terrenos saturados de agua que durante todo el año proporcionan agua a las cuencas que abastece.



Fuente: ZEE – Cajamarca

Anexo 6: Tipo de suelo de la zona de estudio

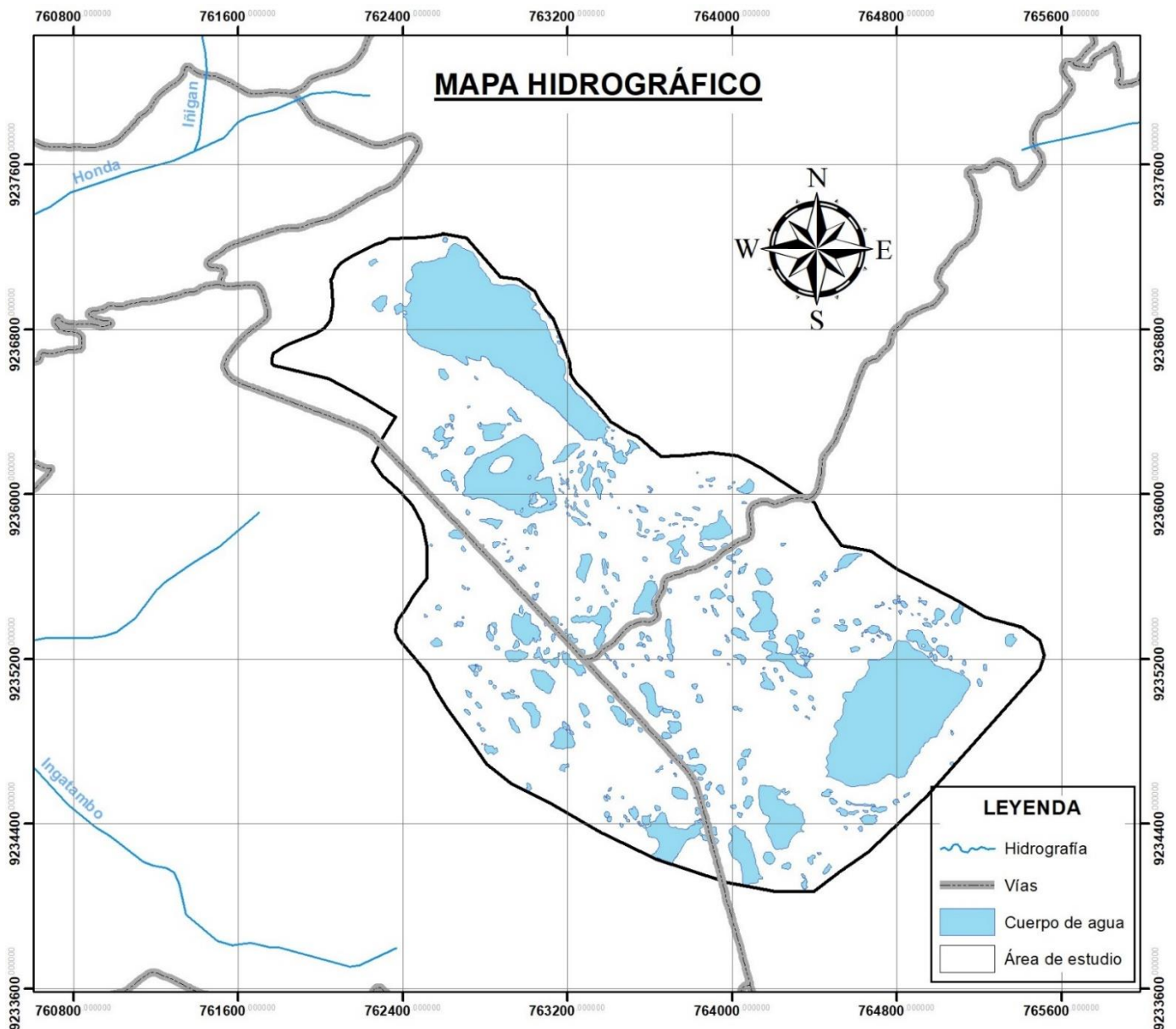
Según su origen los suelos son fluvioglaciares y con respecto a su taxonomía se caracteriza por el páramo andosol cuyo origen son montañas extrusivas formadas sobre una brecha andesítica o altiplanicies intrusivas formadas sobre gruesos estratos de roca volcánica.



Fuente: ZEE – Cajamarca

Anexo 7: Hidrografía de la zona de estudio

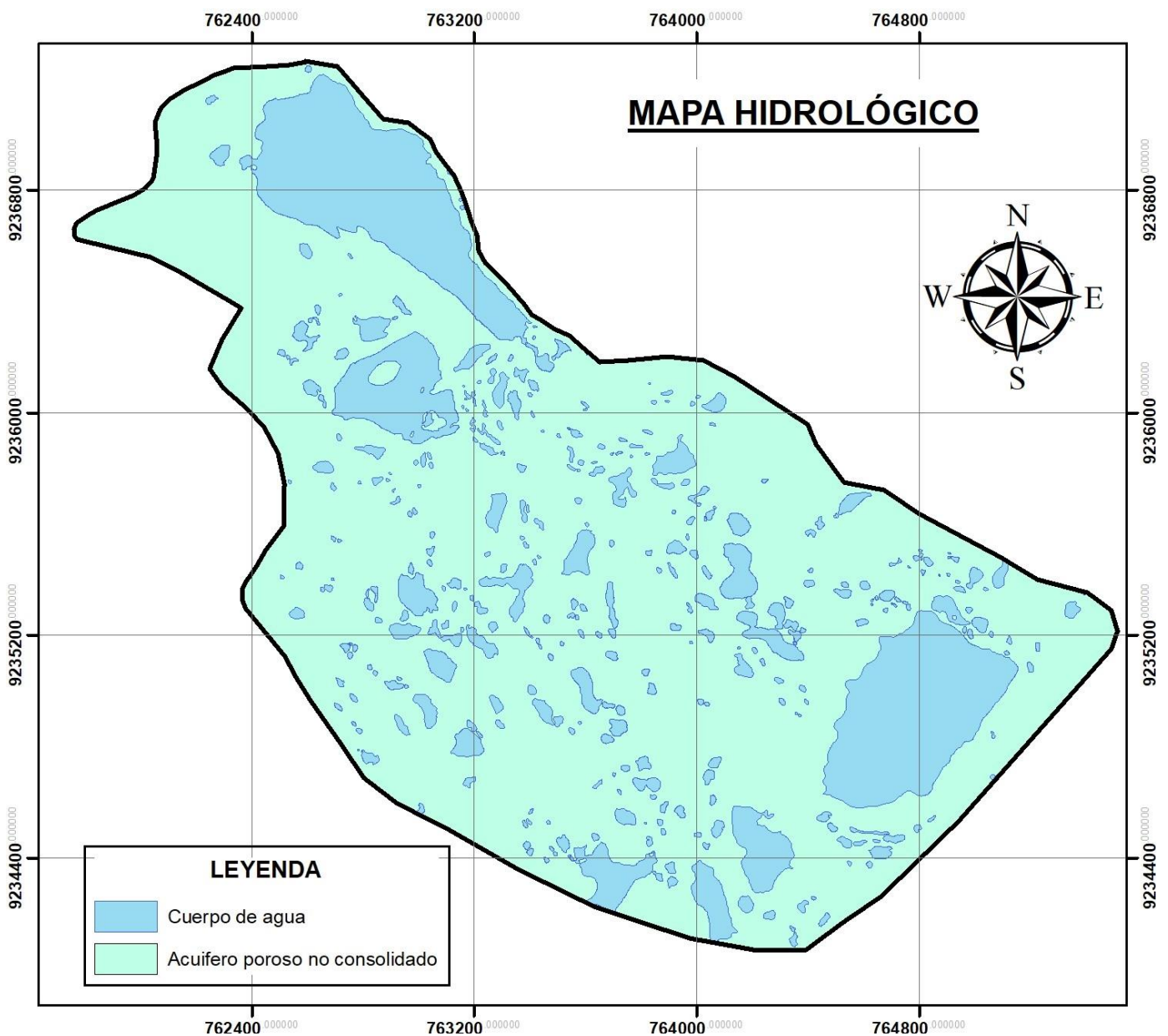
Constituye la cabecera de cuenca de los ríos Jequetepeque y Llaucano los cuales vierten sus aguas al Océano Pacífico y el Atlántico; respectivamente. Los cuerpos de agua del área están rodeados de un sin número de bofedales o terrenos saturados de agua los cuales constituyen verdaderas esponjas hídricas, dando lugar a puquios y manantiales por la infiltración del agua que posteriormente afloran en las zonas baja y media de las cuencas.



Fuente: ZEE - Cajamarca

Anexo 8: Hidrología de la zona de estudio

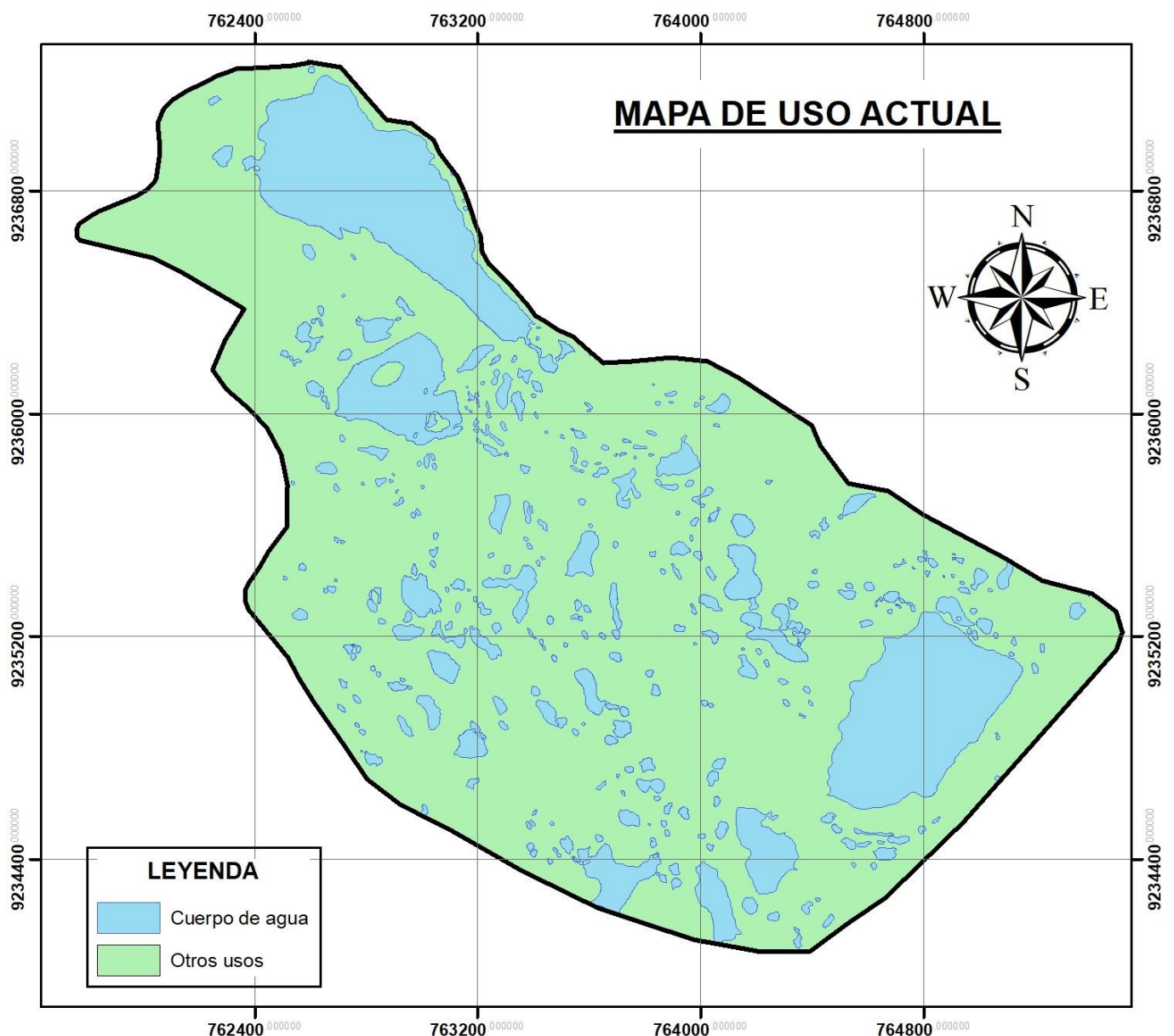
El área de estudio posee diversos acuíferos (formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua), el de mayor extensión es el acuífero poroso no consolidado; su permeabilidad se debe a su porosidad primaria intergranular. Por tanto, estos acuíferos estarán constituidos por aquellas formaciones geológicas de carácter detrítico.



Fuente: ZEE – Cajamarca

Anexo 9: Uso actual del suelo

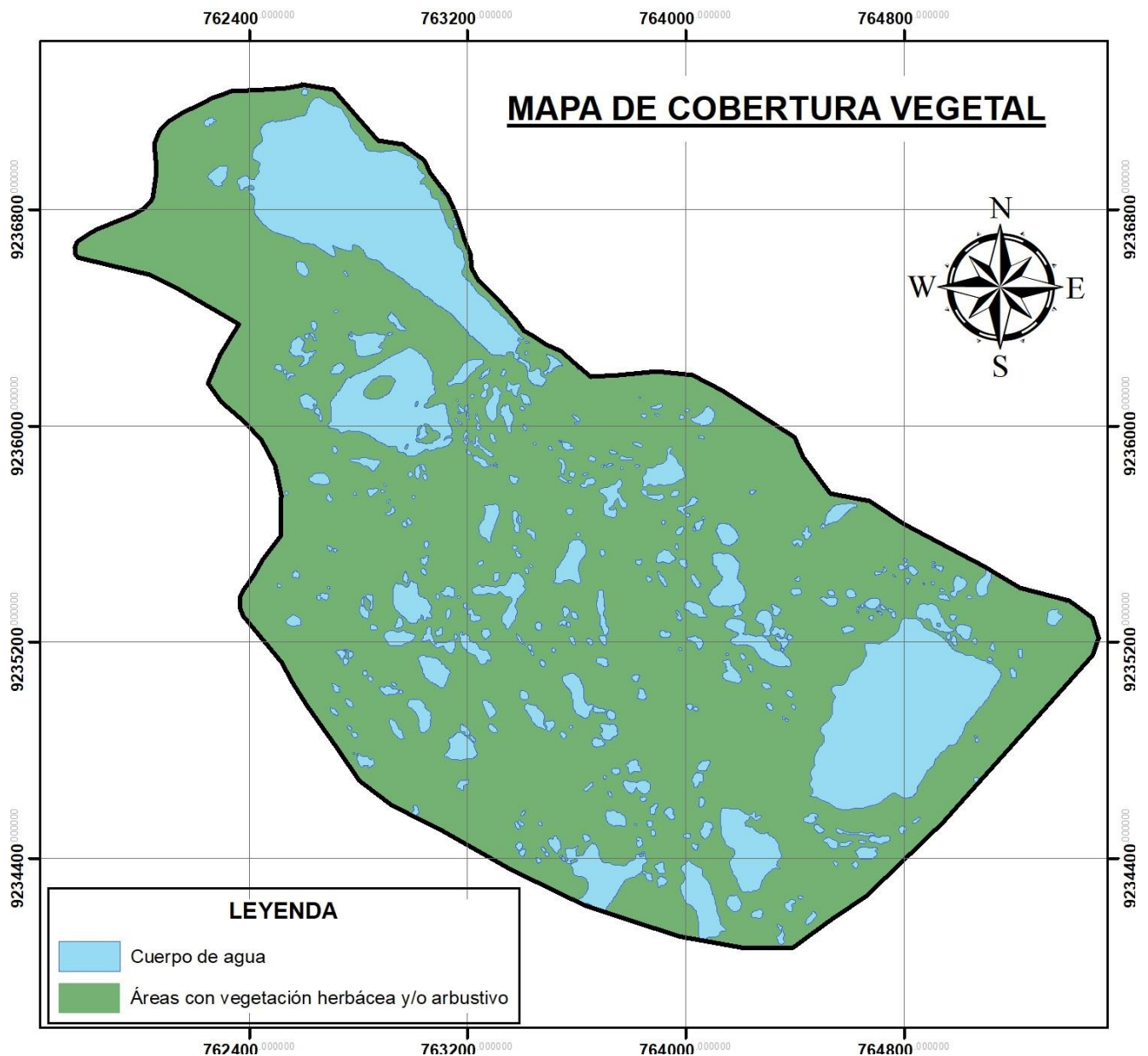
Tomando en cuenta la Zonificación Ecológica y Económica de Cajamarca, el uso actual de suelo del área de estudio está considerando dentro de otros usos y cuerpos de agua, es decir este ecosistema no está considerado dentro de usos como agrícola, agropecuario, forestal, minero o pecuario.



Fuente: ZEE – Cajamarca









Anexo 10: Cobertura vegetal de la zona de estudio

Tomando en cuenta la cobertura vegetal presentada en la Zonificación Ecológica y Económica de Cajamarca, el área de estudio se clasifica por tener áreas de vegetación herbácea y/o arbustiva.








Fuente: ZEE - Cajamarca

Anexo 11: Flora predominante de la zona de estudio

FOTO: 01	FOTO: 02	FOTO: 03
<i>Blechnum loxense</i>	<i>Cortaderia sericantha</i>	<i>Diplostegium abietinum</i>
		
FOTO: 04	FOTO: 05	FOTO: 06
<i>Cortaderia bifida</i>	<i>Oreithales integrifolia</i>	<i>Polystichum montevidense</i>
		
FOTO: 07	FOTO: 08	
<i>Werneria villosa</i>	<i>Werneria nubigena</i>	
		

Fuente: Lagunas de alto Perú – Gobierno Regional de Cajamarca

Anexo 12: Fauna predominante de la zona de estudio

FOTO: 01	FOTO: 02	FOTO: 03
<i>Colaptes rupicola</i> “Cargacha”	<i>Phalcoboenus megalopterus</i> “China Linda”	<i>Coeligena iris</i> “Quinde” “Inca Arcoiris”
		
FOTO: 04	FOTO: 05	FOTO: 06
<i>Metallura phoebe</i> Colibrí Negro	<i>Stenocercus chrysopygus</i> “Lagartija”	<i>Merganetta armata</i> “Pato de los torrentes”
	 <i>Fotografía: Manuel Roncal</i>	
FOTO: 07	FOTO: 08	FOTO: 09
<i>Dusicyon culpaeus</i> “Zorro andino”	<i>Leptasthenura pileata</i> “Tijeral de Corona Castaña”	<i>Grallaria andicolus</i> “Tororoi de jalca”
		

Fuente: Lagunas de alto Perú – Gobierno Regional de Cajamarca

Anexo 13: Ficha de recolección de datos en campo

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO

DESCRIPCIÓN

Código asignado

Fecha de muestreo

Norte (UTM)

Este (UTM)

Altitud

Profundidad de muestreo

Color del Suelo

Observaciones

Anexo 14: Identificación de la zona de estudio

Parcela N° 01



Parcela N° 02



Parcela N° 03



Parcela N° 04



Parcela N° 05



Parcela N° 06



Parcela N° 07



Parcela N° 08



Parcela N° 09



Parcela N° 10



Anexo 15: Ubicación de puntos de muestreo con el GPS

Identificación de parcela



Toma de datos con GPS



Verificación de puntos de muestreo



Anexo 16: Recolección de muestras para determinar el % de carbono orgánico en el suelo

Materiales para toma de muestras



Toma de muestras



Recolección de submuestras en Zig Zag



Anexo 17: Recolección de muestras para determinar la densidad aparente del suelo.

Recolección de muestras con el cilindro de volumen conocido.



Eliminación de suelo sobrante en el cilindro.



Anexo 18: Etiquetado de muestras

Etiquetado y conservación de muestras



Anexo 19: Determinación de la densidad aparente del suelo en laboratorio.

Pesaje de muestras



Secado de las muestras

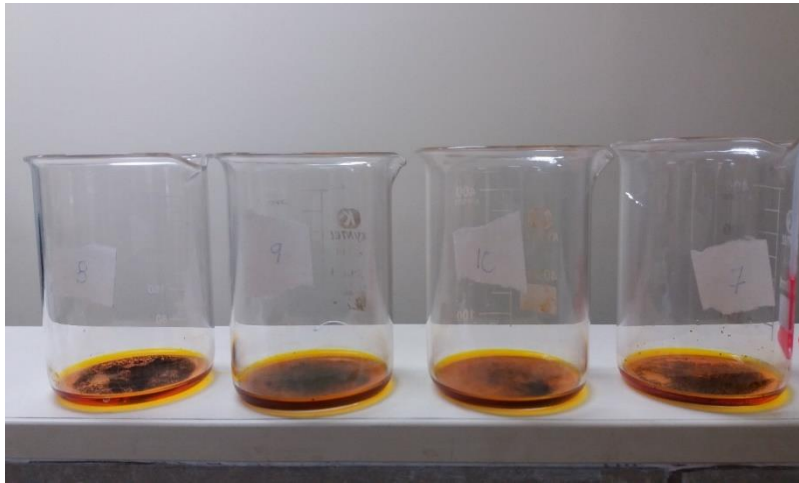


Muestras secas



Anexo 20: Determinación de carbono orgánico del suelo en laboratorio.

Reacción del suelo con los reactivos agregados



Reacción con el agua



Titulación de las muestras



Anexo 21: Cambio de color en la muestra durante la titulación

Fase 1

Fase 2

Fase 3



Fase 4

Fase 5

Fase 6

